

М.К. ФІЛЯШКІН

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

М. К. ФІЛЯШКІН

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ

Навчальний посібник

Київ 2019

УДК 621. 3. 049. 76(075 .8)
Ф 579

Рецензенти: *М.О. Попов* - член-кореспондент НАН України, д-р техн., проф., заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі НАН України).

О.А.Машков - д-р. техн. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України (Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління).

О.І. Лисенко - д-р. техн. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»).

Рекомендовано Вченою радою Національного авіаційного університету (протокол №2 від 20.02.2019 р.)

Філяшкін М.К.

Ф 579 Мікроелектромеханічні системи:

Навчальний посібник – К.: НАУ, 2019. – 276 с.

ISBN 978-966-932-123-7

Розглянуто основні типи мікросистемних пристроїв, їх характеристики, принципи роботи та базові технології мікроелектроніки і виготовлення об'ємних структур мікросистем; наведено класифікації мікросистемної техніки.

Зміст навчального посібника узгоджується з програмою спільного європейського проекту Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design, який підтримується Європейським Союзом і має, зокрема, за мету впровадження сучасних мікросистемних технологій в точну програму бакалаврів в українських університетах.

Для студентів вищих навчальних закладів. Може бути корисним для аспірантів та науковців, які спеціалізуються в галузі проектування та дослідження мікросистемних пристроїв.

УДК 621. 3. 049. 76(075 .8)

ISBN 978-966-932-123-7

© Філяшкін М.К. 2019

© НАУ 2019

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АМР	– анізотропний магніторезистивний ефект
АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач
БПЛА	– безпілотний літальний апарат
ВМ	– вимірювальна маса
ГТД	– газотурбінний двигун
ЕРС	– електрорушійна сила
ІМ	– інерційна маса
ІоІм	– іонна імплантація
ІЧ	– інфрачервоний
ККД	– коефіцієнт корисної дії
КНС	– кремній на сапфірі
КРД	– крем'яний резистивний датчик
МЕМС	– мікроелектромеханічна система
ММГ	– мікромеханічний гіроскоп
МПЗ	– магнітне поле Землі
МСТ	– мікросистемна техніка
ПММА	– поліметилметакрилат
РДТ	– резистивний детектор температури
РІТ	– реактивне іонне травлення
РРД	– рідинно-реактивний двигун
ТЕГ	– термоелектричний генератор
УЗ	– ультразвук
УФ	– ультрафіолетовий
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
ASIC	– Application-Specific Integrated Circuit – інтегральна схема, що спеціалізована для вирішення конкретного завдання
C2W	– Chip to Wafer – 3D-корпусування «кристал до пластини»
CMOS	– Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – технологія, за якою виготовляється мікросхема динамічної пам'яті
DLP	– Digital Light Processing – цифрова обробка світла

DMD	– Digital Micromirror Device – цифровий мікродзеркальний чип
DMP	– Digital Motion Processor – процесор оброблення руху
CSP	– Chip Scale Package – технологія однокристального корпусування чипів MEMC і ASIC
CVD	– Chemical Vapor Deposition – хімічне осадження з газової фази
ECM	– Electret Condenser Microphone – електретний конденсаторний мікрофон
FET	– Field Effect Transistors – польовий транзистор
Flip-Chip	– технологія приєднання перевернутих кристалів з кульковими виводами
GMR	– гігантський магніторезистивний ефект
IMEMS	– Integrated Micro Electro Mechanical System – інтегрована мікроелектромеханічна система
MPU	– Motion Processing Unit – блок оброблення руху
PiP	– Package-in-Package – корпус в корпусі
PVD	– Physical Vapour Deposition – фізичне вакуумне напылювання
PoP	– Package on Package – технологія корпусування корпус-на-корпусі
RF MEMS	– Radio Frequency MEMS – височастотні мікроелектромеханічні ключі –
ROIC	– Read-Out Integrated Circuit – інтегральна схема зчитування
SCP	– Single Chip Package – корпусування окремого чипу
SiP	– System in Package – система в корпусі.
SoC	– System-on Chip – система на кристалі
SPI	– Serial Peripheral Interface – послідовний периферійний інтерфейс
TF	– Tuning Fork – камертон
TSV	– Through-Silicon Vias – технології з'єднування через наскрізні металізовані отвори у кремнії
W2W	– Wafer to Wafer – 3D-корпусування « пластина до пластини »
Wire Bond	– технологія розварювання дріт'яних виводів
WLP	– Wafer-Level Packaging – корпусування на рівні пластини

ВСТУП

Аналіз сучасного стану техніки нових поколінь і «критичних» технологій показує, що одним з найбільш глобальних науково-технічних напрямів, які бурхливо розвиваються і визначають нову революцію у сфері систем, реалізованих на мікrorівні, є мікросистемна техніка (МСТ) і створювані на її базі мікроелектромеханічні системи.

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) – це мікропристрої найрізноманітніших конструкцій і призначень, які виготовлені ідентичними методами з використанням модифікованих технологій мікроелектроніки. Об'єднує їх дві ознаки. Перша – це мікронні розміри, друга – наявність механічних рухомих частин, тобто МЕМС це системи, що містять в собі взаємопов'язані мініатюрні механічні та електричні компоненти мікронних розмірів.

У рамках МСТ створюються мініатюрні чутливі, виконавчі й енергозабезпечувальні системи, які інтегруються на мікrorівні в конструктивні рішення, в основу функціонування яких покладено використання класичних принципів механіки, оптики, акустики, теплотехніки тощо.

Основними перевагами МСТ є:

- мініатюрність;
- висока функціональність;
- надійність;
- мале енергоспоживання;
- можливість інтеграції електроніки з механічними, оптичними та іншими вузлами;
- малий розкид параметрів у межах однієї партії виробів;
- висока технологічність і повторюваність;
- можливість досягти низької вартості (за великих або дуже великих обсягів виробництва).

До того ж інтеграція МЕМС і технологій побудови електронних схем забезпечує додаткове зменшення розміру кристала і збільшення кількості якісних між'єднань.

Сьогодні МЕМС-пристрої застосовуються майже повсюдно. Це можуть бути мініатюрні деталі (гідравлічні та пневмоклапани, струминні сопла принтера, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти (скальпелі та пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів), мікромашини (мотори, насоси, турбіни завбільшки з горошину), мікророботи, мікродатчики та виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії (на одному кристалі) тощо. Нові технології дозволяють впровадити МЕМС у такі системи, як прилади збирання енергії і мікроелементи живлення.

Мікротехнології розвиваються на основі науково-технологічного доробку мікроелектроніки. Але якщо вироби мікроелектроніки за суттю двовимірні й механічно статичні, то мікросистеми – це реальні тривимірні структури, елементи яких повинні мати можливість відносного механічного переміщення. Ці нові властивості потребують розвитку нових технологічних операцій для 3-D формоутворення.

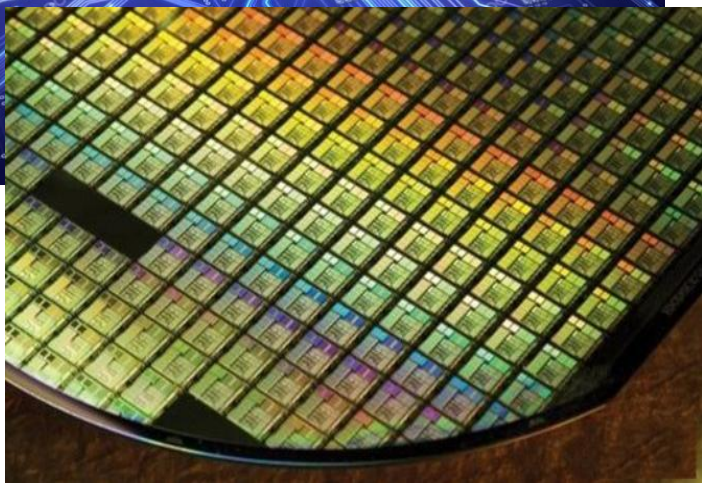
Від класичних механічних систем їх відрізняє розмір – матеріали в такому масштабі поведуться дещо інакше, ніж в об'ємному вигляді, хоча мікросистеми ще підпадають під дію законів класичної фізики на відміну від наносистем. Проте класична фізика пророкує для мікропристроїв особливі властивості. Усе це вимагає ряду абсолютно нових підходів до проектування і виготовлення МЕМС, у тому числі і до вибору модельного матеріалу як основи створюваної мікросистеми.

Мікромашини, механізми та прилади МСТ за вартістю, надійністю, ресурсом, габаритними показниками, енергоспоживанням, широтою та ефективністю застосування істотно перевершують традиційні аналоги.

У навчальному посібнику розглядаються базові технології виготовлення компонентів МСТ, наводяться аналіз та принципи побудови найбільш поширених типів МЕМС з описом фізичних принципів, що лежать в основі їх роботи, а також сфери їх застосування.



Частина І



МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Розділ 1. Структурні елементи мікромеханічних систем

Мікросистема техніка являє собою черговий етап розвитку електроніки, що забезпечує продовження дії емпіричного закону Мура³ за темпами мікромініатюризації.

Безліч різновидів МСТ, таких як мікроелектромеханічні, мікрооптоелектромеханічні, мікроакустоелектромеханічні та інші об'єднують під єдиним терміном MEMS.

Мікроелектромеханічна система - це сукупність взаємопов'язаних об'ємних структур мікронних розмірів (механічних, зазвичай рухомих, і електричних) в єдиній конструктивній реалізації.

Принцип дії MEMS ґрунтується на електрофізичних, електромеханічних, електрохімічних, електронно-оптичних, фотохімічних процесах і явищах з урахуванням ефектів масштабування за переходу від макрорівнів до мікрорівнів.

Для виготовлення MEMS використовують методи, розроблені для індустрії мікроелектроніки, зокрема для виробництва інтегральних мікросхем, які доповнені технологіями виробництва об'ємних структур мікросистемної техніки (мікробалок, шестерень, діафрагм, пружин тощо).

Особливість технологій MEMS полягає в можливості одночасного створення на поверхні матеріалу підкладки безлічі механізмів без єдиної складальної операції. Тому виготовити на підкладці мільйон механізмів так само просто, як і один. Саме це і визначає дешевизну виробництва MEMS.

На основі MEMS-технологій створено велику кількість мініатюрних пристроїв, які мають механічні підсистеми, що перетворюють вплив зовнішніх сил в електричні сигнали (акселерометри, гіроскопи, магнітометри і т. ін.), або самі рухаються під дією електричних сигналів (мікродвигуни, мікрозатискачі, мікродзеркала).

Комбінуючи мікропідсистеми різного принципу дії можна створювати складні MEMS-пристрої в єдиному корпусі, що у свою чергу, приводить до додаткової мініатюризації пристроїв і зниження витрат на їх виробництво.

³ Емпіричне спостереження Гордона Мура щодо подвоювання кожні 24 місяці кількості транзисторів на кристалі мікросхеми. Існує безліч подібних тверджень, що характеризують процеси експоненціального зростання, і які також названі «законами Мура».

1.1. Мікросистеми, мікропристрої та їх елементи

За конструктивним виконанням розрізняють два типи мікросистем на основі МЕМС: *Перший тип* – це інтегральна (монолітна) мікросистема, мікропристрої та елементи якої нероздільно виконані та з'єднані в об'ємі або на поверхні кристала.

Таке об'єднання є основним принципом мехатроніки⁴, який зумовлює підвищення надійності, автономності, зменшення кількості та довжини ліній зв'язку із зовнішніми пристроями та в самій мікросистемі, до зниження електроспоживання пристрою. У свою чергу, за рахунок зменшення кількості та довжини ліній зв'язку знижуються шуми та вплив наводок. Використання групових мікроелектронних технологій для виготовлення як електронних, так і мікромеханічних компонентів у єдиному циклі дозволяє скоротити витрати на їх виробництво.

Приклад інтегральної мікросистеми демонструє (рис. 1.1) однокристальний акселерометр компанії *Analog Devices* з одновісною вимірювальною структурою, оточений електронними схемами оброблення сигналу.

До *другого типу* належать гібридні мікросистеми. Гібридні мікросистеми містять компоненти, виконані з використанням різних матеріалів і технологій та потім з'єднані між собою на єдиній конструктивній основі (рис. 1.2).

Розглядаючи МЕМС як інформаційно-керувальні мікросистеми, їх можна також класифікувати за виконуваними ними функціями.

Мікроелектромеханічні системи

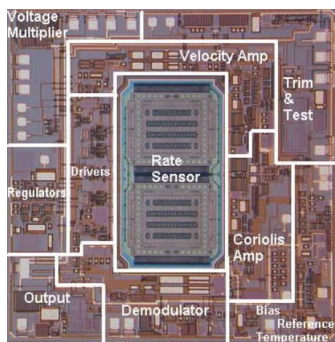


Рис. 1.1

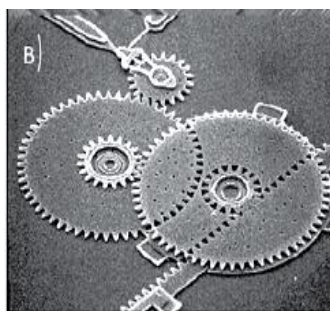


Рис. 1.2

⁴ Об'єднання вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними та комп'ютерними компонентами.

у функціонально завершеному вигляді являють собою інформаційно-керувальні мікросистеми різного призначення, які структурно об'єднують мікропристрої збирання та оброблення інформації, обчислювальні пристрої, що виробляють керувальні впливи, та виконавчі пристрої, які безпосередньо керують об'єктом.

Функціональними *мікропристроями інформаційної частини* мікросистем є: перетворювачі фізичних величин, які виділяють в окрему групу – групу МЕМС-датчиків, а також різного роду електронні пристрої (підсилювачі, аналогові ключі й комутатори, подільники частоти, цифро-аналогові й аналого-цифрові перетворювачі, мікроконтролери та мікропроцесори, цифрові й логічні схеми, запам'ятувальні пристрої), які також можуть формувати окрему групу – групу обчислювальних пристроїв, або інтегруватися в групу МЕМС-датчиків.

Функціональними *виконавчими мікропристроями* керувальної частини мікросистем є мікродвигуни, мікроелементи гідравліки, мікросопла, мікропоршні, мікроредуктори, мікродзеркала, які конструктивно виконані в об'ємі та на поверхні напівпровідникового кристала із застосуванням базових і модифікованих процесів мікроелектроніки, оптоелектроніки, п'єзоелектроніки та ін.

Залежно від виду рухомого елемента мікромеханічних систем розрізняють їх конструктивні варіанти (рис. 1.3): об'ємні (рис. 1.3, а); пластинчасті (рис. 1.3, б); стрижневі (рис. 1.3, в).

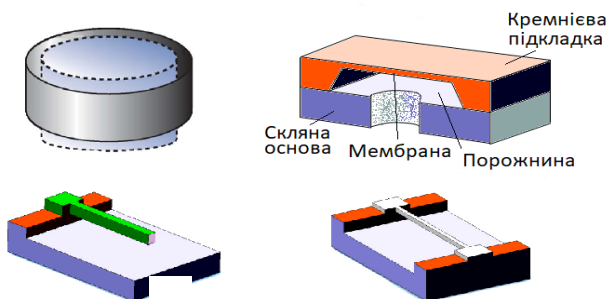


Рис. 1.3

Для кожного з цих конструктивних варіантів є свої сфери застосування.

Об'ємні елементи, зазвичай, є об'єктами високої жорсткості, які мають зосереджену масу.

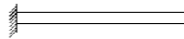
Стрижневі елементи – це елементи, довжина яких істотно перевищує характерні розміри поперечного перерізу (товщину та ширину). Стрижні, які працюють на вигин, називаються *балками*. Стрижні, які працюють на кручення, називаються *торсіонами*.

Типи балок:

1) консоль – балка з одним жорстко закріпленим та іншим вільним кінцями;



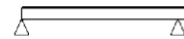
2) міст – балка з двома жорстко закріпленими кінцями. Тонка мостова балка називається струною;



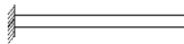
3) проста – балка, що має по кінцях шарнірні опори, відстань між якими називається прольотом балки;



4) консольна – проста балка, що має одну або дві консолі. Під консоллю розуміється частина балки, що продовжується за опору;



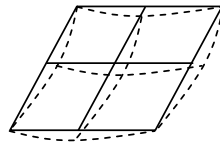
5) балка з одним жорстко закріпленим кінцем і одним кінцем на шарнірній опорі.



Пластина – це тіло, товщина якого значно менша за довжину та ширину.

Типи пластин:

1) пластина, що має по краях шарнірні опори;



2) пластина з однією жорстко закріпленою стороною;

3) пластина з двома жорстко закріпленими протилежними сторонами;

4) пластина з жорстко закріпленими сторонами – мембрана.

У конструкціях МЕМС виділяють **елементи та компоненти мікросистем**. Елемент – це фрагмент конструкції, що не може бути відокремлений від мікросистеми, а компонент як об'єкт, що виконує певну функцію, навпаки може бути відокремлений від системи і розглядатися як самостійний виріб.

У конструкціях МЕМС можна виділити такі види елементів мікросистем:

- мікропідвіс – елемент мікросистеми, що з'єднує дві рухомі частини мікросистеми;

- мікробалка – елемент мікросистеми з одним або двома закріпленими кінцями;

- мікропора – елемент мікросистеми, що з'єднує рухому частину конструкції з нерухомою основою (підкладкою);

- мікроякір - нерухомий елемент мікросистеми, призначений для закріплення інших його частин або виконує допоміжні конструктивно-технологічні функції;

- мікроважіль – елемент мікросистеми, що має точку опори і під впливом керувального сигналу виконує функцію зрівноваження більшої сили меншою;

- мікрообмежувач – елемент мікросистеми, призначений для задання рівня обмеження переміщень інших рухомих частин;

- мікропружина – елемент мікросистеми, що виконує функцію тимчасового нагромадження енергії за рахунок пружної деформації під впливом керованого навантаження;

- мікрогребінь – елемент мікросистеми у формі зустрічно-штирових консолей, який здійснює заданий рух під впливом керувального сигналу;

- мікроклапан (мікрозаслінка) – елемент мікросистеми, що виконує функцію керування витратою рідини, пари або газу шляхом керованої зміни площі прохідного перерізу;

- змінний мікроіндуктор – елемент мікросистеми, що виконує функцію перетворення електричної енергії в енергію змінного магнітного поля, індуктивність якого змінюється шляхом керованого переміщення елементів мікроструктури;

- змінний мікроконденсатор – елемент мікросистеми, що виконує функцію керованого конденсатора, ємність якого змінюється шляхом переміщення елементів мікроструктури;

- мікросопло – елемент мікросистеми, що являє собою канал спеціального профілю, призначений для керованого розгону мікрооб'єму рідини або газу до заданої швидкості у заданому напрямку.

У конструкціях МЕМС також можна виділити такі види **компонентів мікросистем** :

– мікропривод – компонент мікросистеми, що використовується для приведення мікрооб'єктів у стан гармонічних коливань або обертань під впливом керувального сигналу;

– мікротрансмісія – компонент мікросистеми, що використовується для передавання обертання від мікродвигуна до споживачів енергії;

– мікроредуктор – компонент мікросистеми, що використовує зубчасту або черв'ячну передачу для керованої зміни кутової швидкості та моменту обертання мікрооб'єкта;

– мікропоршень – компонент мікросистеми, який щільно перекриває поперечний переріз мікрооб'єкта і переміщується в напрямку його осі для подавання керувального сигналу або енергії, що його активує;

– мікромембрана – компонент мікросистеми у вигляді тонкої плівки або пластини, закріпленої вздовж контуру, яка працює на прогин або вібрацію під впливом керувального сигналу;

– зубчаста мікропередача – компонент мікросистеми, призначений для подавання обертального руху, зміни частоти, напрямку та характеру обертання під впливом керувального сигналу;

– зубчасте мікроколесо – компонент мікросистеми, що має форму зубчастого колеса й призначений для подавання лінійного руху, зміни швидкості, напрямку та характеру руху під впливом керувального сигналу;

– мікроперемикач – компонент мікросистеми, що виконує функцію керованого фізичного замикання або розмикання контактів.

1.2. Фізичні основи роботи пристроїв мікромеханічних систем

1.2.1. Основні фізичні ефекти, що використовуються в мікромеханічних системах

В основу функціонування мікропристроїв покладено використання класичних принципів механіки, оптики, електротехніки та фізики твердого тіла. Основними фізичними ефектами, що реєструються датчиками фізичних величин, є:

- електроємність, магнетизм, індукція, електричний опір;
- п'єзоелектричний ефект (прямий та зворотний);
- піроелектричний ефект;

- ефект Холла та магніторезистивний ефект;
- ефекти Зеебека та Пельтьє;
- звукові хвилі;
- теплові властивості матеріалів;
- світлове випромінювання, радіометрія та фотометрія.

У багатьох МЕМС-пристроях чутливим елементом (датчиком) є консоль або мембрана, що змінює свої характеристики внаслідок зовнішнього впливу. Зміни параметрів цих пристроїв зумовлено різними явищами, зокрема п'єзоелектричним ефектом, термічним розширенням тощо.

Розглянемо найпростіші приклади, що дозволяють зрозуміти суть фізичних процесів у разі використання таких чутливих елементів у МЕМС-пристроях.

Видовження консолі за рахунок п'єзоефекту. П'єзоелектричний ефект – це ефект виникнення поляризації діелектрика під дією механічного напруження (прямий п'єзоелектричний ефект). Існує і зворотний п'єзоелектричний ефект – виникнення механічних деформацій під дією електричного поля.

За прямого п'єзоефекту деформація зразка п'єзоелектричного матеріалу призводить до виникнення електричної напруги між поверхнями деформованого твердого тіла, у разі зворотного п'єзоефекту прикладання напруги до тіла викликає його деформацію.

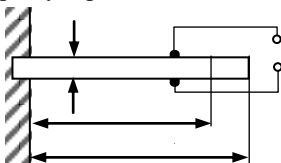


Рис. 1.4

Розглянемо консоль (рис. 1.4) у вигляді прямокутного стрижня з одним жорстко закріпленими кінцем і другим – вільним. Геометричні розміри: L – довжина, a – ширина, b – товщина. Передбачається, що матеріал, з якого виготовлена консоль, має зворотний п'єзоелектричний ефект, який реалізовується у зміні лінійних розмірів матеріалу, зокрема у подовженні консолі на величину ΔL з прикладанням до неї електричного поля E .

При цьому $\Delta L = K_{\text{пе}} \cdot E \cdot L_0$,

де $K_{\text{пе}}$ – п'єзоелектричний модуль; L_0 – вихідна довжина консолі; E – напруженість електричного поля.

Як приклад розглянемо кварцову консоль у вигляді балки довжиною $L_0 = 5 \text{ мкм}$ з квадратним перерізом зі сторонами $a = b = 200 \text{ нм}$. (1 нанометр [нм] = 0,001 мікрон [мкм] = 0,000001 міліметр [мм]). П'єзоелектричний модуль для кварцу $K_{\text{пе}} = 2,31 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$.

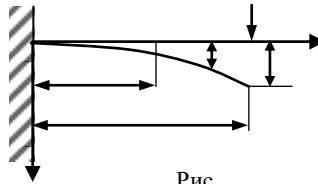
Якщо прикласти до бічних сторін консолі напругу $U = 80$ В і врахувати зв'язок між напруженістю електричного поля E та напругою U , тоді $\Delta L = 4,6$ нм.

Видовження консолі при нагріванні. Розглянемо попередній приклад консолі у вигляді прямокутного стрижня з одним жорстко закріпленими кінцем і другим – вільним. Нагрівання консолі від температури T_0 на величину ΔT буде здійснюватися за рахунок зовнішніх впливів, наприклад джоульового тепла, що виділяється під час протіканні електричного струму. Під час нагрівання консоль видовжиться на величину $\Delta L = K_{\text{ТКР}} L_0 \Delta T$.

Температурний коефіцієнт розширення (ТКР) кремнію дорівнює $K_{\text{ТКР}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. У разі нагрівання кремнієвої консолі довжиною $L_0 = 5$ мкм на величину $\Delta T = 10$ К видовження консолі становитиме $\Delta L = 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 0,13$ нм.

Вигин консолі під впливом зовнішньої сили. Розглянемо, як залежить величина вигину y_0 консолі довжиною L із жорстко закріпленим кінцем під дією зовнішньої сили F . Схему, яка використовується для розрахунку, показано на рис. 1.5.

Припустимо, що поперечні розміри (ширина і товщина консолі) враховані у пружних параметрах консолі (у моменті інерції J та у модулі пружності E).



Аналіз на основі рівнянь теорії пружності показує, що розрахунок вигину консолі ліній $y = f(x)$ шляхом інтегрування диференціального рівняння зігнутої осі консолі або із застосуванням графоаналітичних методів істотно ускладнює отримання аналітичних формул. Тому для розв'язання цього завдання доцільно використовувати метод вихідних параметрів, який у поєднанні з принципами незалежності дії сил і перетворення східчастих балок в еквівалентні постійного перерізу, дозволяє отримати аналітичні залежності для пружних ліній

$y = f(x)$ у вигляді

$$y(x) = \frac{FL^3}{6EJ} \left(3 \frac{x^2}{L^2} - \frac{x^3}{L^3} \right),$$

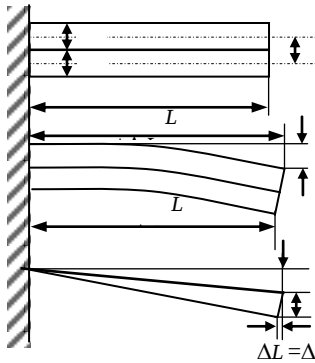
$$\text{Максимальний вигин консолі } y_0 = \frac{1}{3} \frac{FL^3}{EJ},$$

а сила F , необхідна для такого вигину, визначається як $F = \frac{3EJ}{L^3} y_0$.

Залежність вигину консолі від відстані до точки опори x нелінійна. На половині довжини консолі $L/2$ величина вигину становитиме

$$y_{(x=L/2)} = 0,3y_0.$$

Вигин біморфної консолі при нагріванні. Розглянемо консоль, (рис. 1.6), що складається із двох жорстко з'єднаних матеріалів, які мають



Ри

різні значення коефіцієнта теплового розширення $K_{\text{ТКР}}$. В умовах рівноваги, наприклад за кімнатної температури, біморфна консоль має довжину L_0 , а товщини a обох шарів однакові. При цьому відстань між центрами першого та другого шарів також дорівнює a . Припускаємо, що коефіцієнт теплового розширення першого шару більший, ніж другого шару. У цьому випадку за рівномірного нагрівання біморфної консолі на величину ΔT довжина обох частин консолі збільшиться на різні величини

$\Delta L_1 > \Delta L_2$, що спричинить видовження та вигин консолі.

Величина відхилення y_0 від горизонтального положення за умов малого відхилення буде визначатися співвідношенням:

$$\frac{y_0}{L_0} = \frac{(\Delta L_1 - \Delta L_2)}{a} = L_0 \frac{(K_{\text{ТКР}}^1 - K_{\text{ТКР}}^2)}{a} \Delta T, \text{ або } y_0 = L_0^2 \frac{(K_{\text{ТКР}}^1 - K_{\text{ТКР}}^2)}{a} \Delta T,$$

$$\text{а видовження центра консолі } \Delta L = \frac{(\Delta L_1 + \Delta L_2)}{2} = \frac{(K_{\text{ТКР}}^1 + K_{\text{ТКР}}^2)}{2} L_0 \Delta T$$

Для біморфної консолі з матеріалів «платина–кремій» коефіцієнти теплового розширення $K_{\text{ТКР}}^{\text{Pt}} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $K_{\text{ТКР}}^{\text{Si}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Тоді за вихідної довжини консолі $L_0 = 5 \text{ мкм}$ і товщини $a = 200 \text{ нм}$ величина вигину y_0 дорівнюватиме 8 нм .

1.2.2. Закони пропорційної мініатюризації

Під час вивчення мікросистем наслідки пропорційного зменшення розмірів становлять особливий інтерес.

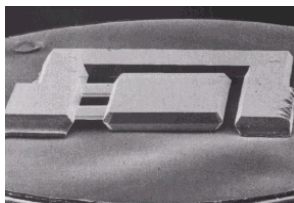
Розміри мікромеханічних компонентів МЕМС – від 1 до 100 мкм. У цьому діапазоні розмірів функціонування елементів і компонентів мікросистем багато в чому відрізняється від функціонування відповідних систем у макродіапазоні. Важливою є оцінка цих відмінностей за пропорційного зменшення всіх лінійних розмірів тіла, тобто зміни масштабу, яку можна здійснити, аналізуючи характеристичні числа, які у цьому випадку відіграють роль критеріїв подібності.

Характеристичні числа, які залежать від масштабу, надають інформацію для висловлювання про релевантність (адекватність) фізичних процесів у мікродіапазоні. Розглянемо деякі характеристичні числа, які особливо цікаві при розробці мікросистем.

Число Коші (пружні коливання). Число Коші $C_a = \rho(\omega L)^2 / E$ визначає співвідношення інерційних сил і сил пружності у твердому тілі. Воно характеризує рух або вібрацію з урахуванням інерційних сил (маси) і сили пружності (пружини). Число Коші залежить від квадрата довжини L і частоти коливань ω , а також від властивостей матеріалу (від щільності ρ та властивості матеріалу чинити опір розтягуванню, стисненню за пружних деформацій, яка характеризується модулем Юнга E).

За пружної вібрації це означає, що масштаб частоти коливань обернено пропорційний довжині. Із цього випливає, що механічні мікросистеми мають дуже високі власні частоти. Хоча власні частоти й обмежують робочий діапазон, мініатюризовані системи виявляють значно кращі динамічні характеристики і менш тривалий час реакції ніж системи макродіапазону.

Типове застосування – це мікромеханічний сенсор прискорення (рис. 1.7), виконаний у вигляді сейсмічної маси, підвішеної на балках, які використовуються як пружини.



Ри

Число Вебера (інерція, поверхневий натяг). Число Вебера $We = \rho(\sigma_s)^{-1} V^2 L$ – це критерій подібності в гідродинаміці, що визначає співвідношення інерції рідини до поверхневого натягу. Тут V – швидкість, ρ – щільність і σ_s – коефіцієнт поверхневого натягу, для води $\sigma_s = 0,073$ Н / м.

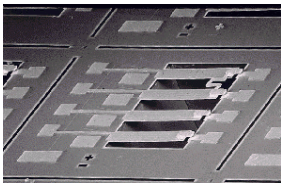
Число Вебера має значення для формування хвиль на вільних поверхнях, для потоків рідини в капілярах і каналах, а також для формування краплинок.

Для макросистем, що мають великі числа Вебера, більш значущими є інерційні сили, а *за мікронних розмірів* (для малих чисел Вебера) *домінують сили поверхневого натягу*.

Число Фур'є (перехідний процес перенесення тепла). Число Фур'є $F_0 = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{t}{L^2}$ характеризує співвідношення між швидкістю

зміни теплових умов у навколишньому середовищі та швидкістю перебудови поля температури всередині даної системи (тіла), яка залежить від розмірів тіла та коефіцієнта його теплопровідності $\chi = \aleph(c_p \rho)^{-1}$. Тут $\aleph$ – коефіцієнт теплопровідності, c_p – питома теплоємність, ρ – щільність тіла. Число Фур'є обернено пропорційне квадрату довжини L та прямо пропорційне часу і визначає перехідні процеси перенесення тепла, зокрема ступінь проникнення та розповсюдження тепла.

Якщо $F_0 < 1$, тіло має однорідну температуру і перехідний ефект не має значення. Якщо розміри зменшені до коефіцієнта 10, то перехідні процеси перенесення тепла пришвидшуються в 100 разів.



Рис

Цей ефект використовується, наприклад, у тепловому мікромеханічному реле, показаному на рис 1.8. Актюатори (виконавчі пристрої) макродіпазону надто повільні через свою теплову інерцію. Проте *у мікросистемах, теплові актюатори мають достатню швидкодію для того, щоб виконувати механічну функцію.*

Число Фруда (механіка, конвекція, механіка рідини). Число Фруда $F_r = V^2/gL$ має важливе значення для всіх динамічних переміщень у гравітаційному полі. Воно характеризує співвідношення між інерційними силами та силами гравітації залежно від швидкості V , прискорення сили тяжіння g і масштабу довжини L . За великих значень числа Фруда ефектом сили тяжіння нехтують, у той час як за малих значень числа Фруда можна нехтувати силами інерції. Оскільки число Фруда обернено пропорційне довжині, то *ефект гравітації зменшується за зменшенням розмірів*. Дійсно малі тварини та мікроорганізми використовують більш високу частоту кроку, ніж великі

Закон Кулона (електростатика) Закон Кулона $F_{\text{ест}} = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$ (тут $\epsilon_0 = 8,84 \text{ Ф/м}$ – електрична стала) описує електростатичні сили двох точкових зарядів, які пропорційні добутку цих зарядів (q_1, q_2) і обернено пропорційні квадрату відстані r між ними. У повсякденній практиці ці сили порівняно невеликі. *Але в масштабах мікросвіту ці сили надвеликі.*

Під час проектування МЕМС розробник повинен враховувати зміну фізичних величин зі зменшенням розмірів системи від макророзмірів до мікророзмірів. При цьому природно цікаві ті переваги мініатюризації, які дозволяють поліпшити електрофізичні, експлуатаційні та виробничі характеристики компонентів, приладів, систем. Зокрема, зменшення розмірів компонентів забезпечує підвищення швидкодії пристроїв.

Діючі в МЕМС сили змінюються пропорційно лінійним розмірам. Електростатичні сили конденсаторних елементів істотно збільшуються, тому електростатичні мікродвигуни стають ефективнішими від електромагнітних. Для мікромоторів сила поверхневого натягу настільки велика, що істотно впливає на їх функціонування. Швидкодія теплових виконавчих пристроїв стає достатньою, щоб виконувати механічну функцію. Підвищується чутливість конденсаторних датчиків неелектричних величин. Мікробалки стають ефективними датчиками температури. Знижується енергоспоживання МЕМС-пристроїв.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Що являє собою мікросистема?
2. Які відомі технології лежать в основі МЕМС-технологій і в чому особливості цих технологій?
3. Які можна відокремити типи мікросистем за конструктивним виконанням?
4. Які мікропристрої входять до складу функціонально завершеної мікросистеми?
5. Які конструктивні варіанти мікромеханічних систем розрізняють залежно від виду рухомого елемента?
6. Назвіть деякі види елементів мікросистем.
7. Назвіть деякі види компонентів мікросистем.
8. Назвіть деякі з фізичних ефектів, що реєструються датчиками фізичних величин, у мікромеханічних системах.
9. Які елементи, що змінюють свої характеристики в результаті зовнішнього впливу, використовуються в багатьох МЕМС як чутливі елементи?
10. Що таке прямий та зворотний п'єзоелектричний ефект?
11. Від яких параметрів залежить зміна лінійних розмірів консолі внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту?
12. Від яких параметрів залежить зміна лінійних розмірів консолі в результаті її нагрівання?
13. Від яких параметрів залежить вигин консолі в разі впливу зовнішньої сили?
14. Яким чином змінюються динамічні характеристики мініатюрних систем?
15. Яким чином змінюються перехідний процес перенесення тепла в мініатюрних системах?
16. Яким чином змінюються динамічні переміщення в гравітаційному полі для мікромеханічних систем?
17. Як зі зменшенням розмірів змінюються електростатичні сили?

Розділ 2. Базові матеріали для мікромеханічних систем

У технологіях виготовлення мікросистем використовують дві основні групи матеріалів.

Першу групу становлять конструкційні (композиційні) матеріали. Спочатку основним конструкційним матеріалом для виготовлення МЕМС був монокристалічний кремній та його похідні (полікристалічний кремній, пористий кремній, діоксид кремнію тощо), але з часом стали використовуватися й інші матеріали. Прикладами можуть бути: скло, кераміка, деякі види пластику, вольфрам, нікель, мідь, золото, алмазоподібний вуглець і т. ін. Ці матеріали використовують для формування несних конструкцій і опор, для механічних рухомих частин, для струмозведення і для змащування.

Другу групу утворюють активні або «інтелектуальні» матеріали. Вони виконують у МЕМС функції джерел руху, механізмів передачі руху, сенсорних середовищ і середовищ активації, геометричної і об'ємної пам'яті. Ці функції виконуються за рахунок електростатичних, електромеханічних, п'єзоелектричних, магнітних і оптичних сил та ефектів пам'яті форми. До матеріалів цієї групи належать: різні сплави титану і нікелю, пермалой, оксид цинку, кварц, п'єзокераміка, напівпровідникові сполуки.

У процесі створення мікросистем різного функціонального призначення на основі композицій різнорідних матеріалів потрібно враховувати такі параметри:

- кристалохімічну сумісність;
- термомеханічну сумісність;
- теплову стійкість;
- електричну стійкість;
- механічну стійкість;
- механічну втому.

2.1. Кремній

Світовий досвід виготовлення МЕМС заснований на широкому використанні кремнію - дешевого та доступного матеріалу.

Кремній має значні переваги перед іншими матеріалами завдяки своїм фізичним властивостям.

Монокристал кремнію майже ідеально підпорядковується закону Гука⁵. Це означає, що при деформації він не схильний до гістерезису, тому енергія деформації майже не розсіюється.

Також кремній дуже надійний під час високочастотних рухів, оскільки як йому притаманна дуже мала втома і він може працювати в діапазоні від мільярдів до трильйона циклів без руйнування.

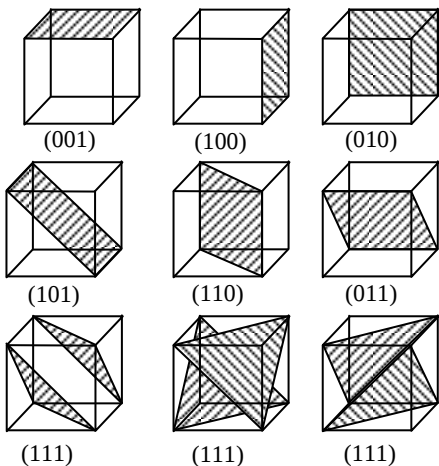


Рис.2.1

Кристалічна ґратниця кремнію – кубічна гранецентрована (за типом алмазу) з періодом 0.54307 нм. Розташування кристала (кристалографічна орієнтація) відносно поверхні пластини кремнію може бути різним (див. рис. 2.1). Таке розташування називається базовою площиною і вказується виробником пластин кремнію. Його потрібно враховувати під час виготовлення MEMS, оскільки швидкість рідинного травлення кремнію

(одна з технологічних операцій виготовлення MEMS) різниться залежно від кристалографічної орієнтації кристала.

Популярність кристалічного кремнію для виготовлення MEMS пояснюється рядом причин.

По-перше, кремній механічно стійкий і має великий модуль Юнга⁶ (до 200 ГПа). У поєднанні з невисокою щільністю (2,3 кг/м³) це робить кремній чудовим матеріалом для механічних мікропристроїв.

По-друге, низький температурний коефіцієнт розширення та висока температура плавлення кремнію (1400°C) роблять його придатним для створення пристроїв, що працюють в умовах високих температур або широкого температурного діапазону.

⁵ Деформація, що виникає в пружному тілі, пропорційна силі, яка прикладається до цього тіла. Закон справедливий тільки за малих деформацій.

⁶ Модуль поздовжньої пружності – фізична величина, яка характеризує властивості матеріалу опиратися розтягуванню (стисненню) за пружних деформацій.

І нарешті, методи оброблення кремнію добре відпрацьовані в електронній промисловості, тому виробничі процеси виготовлення МЕМС можуть ефективно інтегруватися в наявну виробничу інфраструктуру мікроелектроніки. При цьому механіка й електроніка МЕМС можуть бути створенні на одному кристалі.

Виробництво пластин з високочистого (чистота порядку 99,9999999%), монокристалічного кремнію починається з виготовлення монокристалічної колони (рис. 2.2, *а*) методом Чохральського. Вихідним матеріалом для виробництва високочистого монокристалічного кремнію є подрібнений полікристалічний кремній⁷, отриманий з кремнезему, за технологіями карботермічного відновлення за температури $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ та очищення. Полікристалічний кремній занурюють у тигель і нагрівають до утворення розплаву.

Метод Чохральського ґрунтується на вирощуванні кристалів шляхом витягування їх від вільної поверхні розплаву з ініціалізацією початку кристалізації затравним кристалом (або декількома кристалами) заданої структури і кристалографічної орієнтації. Тигель з розплавом містяться в інертній аргонівій атмосфері за тиску не більшого ніж 30 мм рт. ст. Тримач із затравним кристалом і тигель з розплавом обертають у протилежних напрямках. У міру росту колони тримач піднімають вгору, формуючи тим самим кристал циліндричної форми.

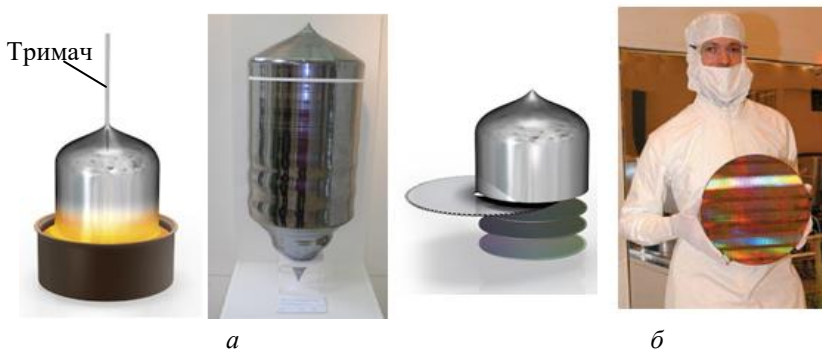


Рис. 2.2

⁷ Матеріал, що складається з дрібних кристалітів кремнію. Займає проміжне положення між аморфним кремнієм, у якому відсутня упорядкованість у взаємному розташуванні атомів або молекул, і монокристалічним кремнієм.

Отриманий кристал (злиток) масою близько 100 кг піддають багатоступеневому обробленню; краї злитка обрізають і злиток сточують до потрібного діаметра. Максимальний стандартний діаметр злитку – 300 мм, але є й інші стандарти: 100 мм, 150 мм, 200 мм. Після сточування злиток розрізають поперек (рис. 2.2 б). Для розрізання використовуються верстати з алмазними різальними дисками або дріт'яно-абразивні установки. Потім робочі поверхні шліфують і полірують з одного або обох боків. Із краю пластини знімається фаска і маркується головна площа пластини.

Кремнієва пластина (підкладка) є вихідною точкою виготовлення пристроїв мікроелектроніки, а у разі використання об'ємного мікрооброблення – основним матеріалом для механічної підсистеми. Для виготовлення підкладки використовують пластини кремнію з *n*-типом або дірковим *p*-типом провідності, що важливо для електронних пристроїв МЕМС. Для надання потрібного типу і значення провідності в тигель у процесі плавки можуть бути додані різні домішки. При цьому для надання провідності *p*-типу використовуються хімічні елементи III групи (бор, алюміній, галій, індій, талій) атоми яких заміщають у формованому кристалі атоми кремнію, а для надання провідності *n*-типу – хімічні елементи V групи (азот, фосфор, арсен, сурма, вісмут).

Крім монокристалічного кремнію для виготовлення МЕМС використовується полікристалічний кремній, плівки якого наносяться на підкладку методом хімічного осадження з газової фази (Chemical Vapor Deposition – CVD). Істотним недоліком полікристалічного кремнію є те, що він має ділянки із зернистими межами, які погіршують його якість як конструкційного матеріалу.

Отримані плівки використовують в електричних підсистемах, наприклад для створення резисторів, або в механічних для створення резистивних нагрівників. Останнім часом полікристалічний кремній використовують для виготовлення вільностоячих структур МЕМС як жертвний шар, що видаляється сухим травленням на останньому кроці вивільнення сформованих структур.

2.2. Двооксид кремнію. Кремній на ізоляторі

Крім кремнієвих пластин базовим матеріалом для виробництва МЕМС є пластини з окисненою поверхнею, тобто пластини

кремнію, що пасивовані⁸ шаром двооксиду кремнію SiO_2 . Тонка поверхнева плівка двооксиду кремнію захищає кремній від подальшого окиснення і слугує непроникним бар'єром для більшості домішок. Двооксид кремнію також має хорошу діелектричну міцність і широко застосовується для формування високоякісного ізоляційного шару.

Шари SiO_2 використовуються для ізоляції окремих елементів мікроелектроніки один від одного, як ізоляційний матеріал у схемах з багатошаровою металізацією, як маски для дифузії легувальних домішок тощо. Перевагою системи Si-SiO_2 також є можливість селективного травлення з використанням протравлювачів, що діють тільки на один з цих двох матеріалів.

Щодо переваг, які зумовлюють використання цього діелектрика, слід зазначити те, що SiO_2 є «рідним» матеріалом для кремнію, легко з нього одержується шляхом окиснення, не розчиняється у воді та легко контролюється.

У мікроелектроніці та виробництві МЕМС використовуються оксиди кремнію товщиною від кількох нанометрів до 1...2 мкм. Поверхня пластин кремнію містить тонкий природний шар оксиду товщиною 1...2 нм, проте для виготовлення більш товстих плівок необхідний спеціальний процес окиснення, який зазвичай виконується в дифузійній печі при температурах від 800 ... 13000 °C в атмосфері високочистого кисню – сухого або вологого. Вологе окиснення зазвичай застосовують для утворення більш товстих шарів оксиду.

Значним досягненням останнього часу стало додавання в окиснювальне середовище у процесі окиснення хлоровмісних компонентів. Головна роль хлору в плівках двооксиду кремнію полягає в перетворенні випадково прониклих у SiO_2 домішкових іонів, наприклад, натрію або калію в електрично неактивні.

Термічне окиснення є основним технологічним процесом пасивування поверхні кремнієвих пластин, однак існують і інші технології активного та пасивного окиснення кремнію, наприклад, плазмове окиснення кремнію або метод CVD.

⁸ Пасивація - перехід поверхні матеріалу в неактивний, пасивний стан, пов'язаний з утворенням тонких поверхневих шарів.

Крім монолітних кремнієвих пластин як підкладку можна використовувати тришарову структуру кремній-діелектрик-кремній, так званий – **кремній на ізоляторі**. Для пластин кремнію на ізоляторі застосовують два різні методи:

- іонну імплантацію атомарного кисню;
- метод склеювання двох пластин.

У першому випадку (рис. 2.3) у результаті бомбардування пластини Si іонами кисню формується шар з атомарним киснем. Для ініціалізації процесів окиснення проводять високотемпературний відпал, за якого в збагаченому шарі формується ізолятор SiO_2 .

У другому випадку (рис. 2.4) пластину термічно окиснюють, імплантують водень, перевертають і склеюють за допомогою герметичного клею із ще однією пластиною кремнію. Потім пластини нагрівають, і відбувається розшарування кремнієвої пластини за тріщиною в шарі з імплантованим воднем.

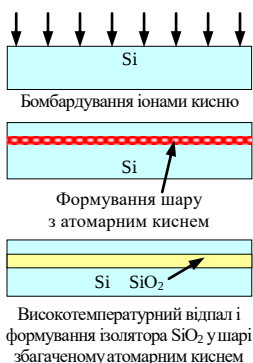


Рис. 2.3

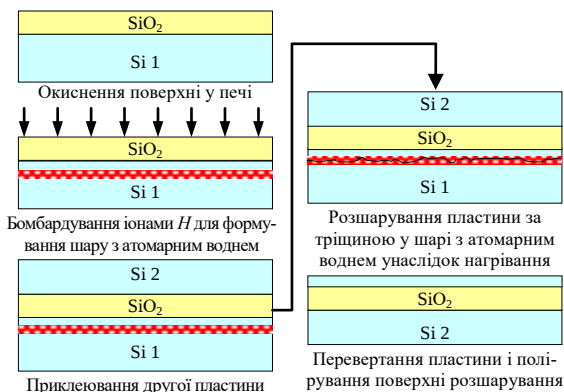


Рис. 2.4

Таким чином, знову утворюються дві пластини – одна кремнію на ізоляторі і одна кремнієва.

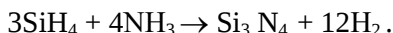
2.3. Нітрид і карбід кремнію

У механічних підсистемах MEMC застосовують такі хімічно стійкі і механічно стабільні матеріали, як карбід кремнію SiC і нітрид кремнію Si_3N_4 .

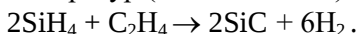
Нітрид кремнію Si_3N_4 , крім чудових механічних властивостей (модуль Юнга до 385 ГПа, низькі механічні напруження, межа

плинності до 14 ГПа), має бар'єрні властивості для дифузії іонів металів і хімічно стійкий. Його використовують і як поширений засіб пасивації електричних кіл, і як матеріал елементів механічних структур (мікробалки, мікромістки) у МЕМС. Малі коефіцієнти температурного розширення і теплопровідності дозволяють використовувати його як теплоізоляційний матеріал.

Плівки нітриду кремнію формують методом CVD, використовуючи як робочий газ суміші силану SiH_4 і аміаку NH_3 , або силану і азоту N_2 . Для здійснення реакції підкладку нагрівають до температури близько 600 °C:



Карбід кремнію використовують для пристроїв, що працюють за високих температур (температура плавлення 2730 °C). При його нанесенні методом CVD в якості речовин, що беруть участь в реакції, використовується силан SiH_4 і етилен C_2H_4 . Процес відбувається за високих температур (понад 1500 °C):



Карбід кремнію хімічно інертний, майже не пошкоджується більшістю використовуваних розчинників. Він також стійкий до механічного стирання, і тому застосовується як захисне покриття для пристроїв, що працюють в екстремальних умовах, наприклад у космічних програмах.

2.4. Інші матеріали

Однієї тільки технології кремнієвої мікромеханіки недостатньо для успішного розвитку МЕМС. Тому велике значення мають системи, у яких поряд з кремнієм і іншими напівпровідниковими матеріалами використовують полімери, кераміку, метали.

Так для ряду додатків (мікроканали, лабораторія на чипі) в як підкладку застосовують пластини кристалічного кварцу або кварцове скло, а в оптомеханічних пристроях використовують напівпровідникові підкладки з таких сполук як арсенід галію GaAs, фосфід галію GaP, нітрид галію GaN, індій-галій арсенід InGaAs, фосфід індію InP.

Механічні елементи оптомеханічних підсистеми з таких сполук не виготовляють через невдалі порівняно з нітридом кремнію Si_3N_4 характеристики міцності, наприклад кристалічний GaAs має

низький модуль Юнга і вузьку межу максимальних навантажень, під дією яких починає розвиватися пластична деформація (межу плинності). Однак порівняно з кремнієм ці матеріали є напівпровідниками, які більш ефективно реагують на світло (прямозонними напівпровідниками), і тому ідеально підходять для виготовлення оптикоелектричних пристроїв.

Найпоширенішими варіантами таких пристроїв є мікрохвилюводи, оптичні перемикачі, керовані оптичні фільтри. Недоліком таких матеріалів є дорожнеча вихідних матеріалів та обладнання для виготовлення з них плівок. Для виготовлення високоякісних кристалічних плівок з цих матеріалів використовують методи молекулярно-променевої епітаксії (осадження випарених компонентів на нагріту монокристалічну підкладку) за надвисокого вакууму.

Для виготовлення мікроканалів і біосумісних пристроїв дедалі частіше останнім часом використовують полімерні матеріали, такі як полідиметилсилоксан, парилен, негативний фотополімер SU-8. Вони мають ряд переваг: дешевизна, простота нанесення (у тому числі центрифугування, аерозольне напылювання, наноімпринт-літографія), хімічна стійкість до ряду розчинників, висока еластичність, прозорість у видимому діапазоні світла. Із полімерних матеріалів легко виготовляти мембрани, мікрозатискачі і виконувати герметизацію МЕМС. Біосумісність дозволяє використовувати їх у медичних датчиках і мікропристроях.

Полімерні матеріали можуть бути модифіковані під впливом оптичного випромінювання або електронного пучка зі зміною своїх хімічних і механічних властивостей, тим самим підсилюючи гнучкість їх застосування в МЕМС. Крім того, у полімер можуть бути додані наночастинки і вуглецеві нанотрубки із заданими властивостями, що дозволяє виготовляти мікроструктури з поліпшеною електропровідністю, чутливістю до певних газів або механічних навантажень. Наприклад, полімер SU-8 з доданими частинками оксиду цинку ZnO дає змогу створювати мікроструктури з п'єзоефектом.

Нові конструктивно-технологічні варіанти компонентів МЕМС також створюються на основі сучасних матеріалів, що мають унікальні властивості. До них належать: модифіковані форми вуглецю (графен і графан, фулерени та фулерити); феромагнітні рідини; фотонні кристали; нанопориста кераміка; біологічні та інтелектуальні матеріали, у тому числі зі змінними властивостями.

2.5. Матеріали, що використовуються у виробництві корпусів MEMC

У 2003 році країни Європейського союзу прийняли директиви про порядок використання та утилізації електричного та електронного обладнання, відповідно до якого забороняється застосування в електронному обладнанні ряду екологічно небезпечних матеріалів. Ці директиви змушують керівників промисловості звернути увагу на проблему заміни свинцю, що входить до складу припою, на більш екологічно безпечний матеріал.

В основному зазначені директиви стосуються поверхонь, покритих припоєм. У разі використання корпусів, призначених для поверхневого монтажу, олов'яно-свинцеві (SnPb) покриття замінюються на чисто олов'яні, а в технології BGA (Ball Grid Array – масив кульок) кулькові виводи, що наносяться на контактні площинки зі зворотного боку, формуються з олов'яно-срібно-мідного сплаву (SnAgCu). Зміна складу паяльної пасти безпосередньо впливає на технологічний процес покриття друкованої плати припоєм. Особливо сильно це позначається у разі заміни олов'яно-свинцевих паст, температура плавлення яких становить +179 °C, олов'яно-срібно-мідними з температурою плавлення +217 °C. Відповідно тепловий вплив на напівпровідникові компоненти у процесі їх паяння істотно збільшується.

Окрім проблеми виробництва електронних компонентів, які не містять свинцю, існує проблема створення пластикових корпусів, що не містять вогнезахисних домішок на основі сполук бромів. Вогнезахисні домішки в матеріали забезпечують їх захист від займання у процесі нагрівання. Однак, з точки зору захисту навколишнього середовища, матеріали, що містять бром, не є екологічно безпечними. Замінювати їх на більш екологічні матеріали потрібно одночасно з переходом на безсвинцеві технології виробництва корпусів MEMC.

Таким чином, корпус MEMC може вважатися екологічно «чистим», якщо в його склад не входять свинець та вогнезахисні домішки, що містять бром. Це передбачає також, що процес паяння буде виконуватися з використанням безсвинцевих припоїв.

Виробництво більшої частини електронної продукції пов'язане з використанням великої кількості різноманітних матеріалів, ре-

човин і хімічних процесів. Їх вибір безпосередньо впливає на якість продукції та її екологічну безпеку протягом всього терміну експлуатації, а також на екологічну безпеку її утилізації після закінчення терміну експлуатації.

З урахуванням зростаючих вимог до екологічної безпеки вміст важких металів у пластикових матеріалах, використовуваних у виробництві корпусів електронних компонентів, не повинно перевищувати таких значень:

- за масовою часткою кадмію – не більше ніж 5 ppm, тобто 0,0005%; (1% = 10000 ppm);

- за загальним змістом кадмію, ртуті, свинцю і шестивалентного хрому – не більше ніж 100 ppm.

Дотримання цих вимог дає змогу уникнути забруднення навколишнього середовища важкими металами, або звести його до мінімуму.

Полімерні матеріали, що використовуються у виробництві пластикових корпусів, у нормальних умовах містять незначну кількість таких радіоактивних елементів, як уран і торій, які є джерелами альфа-частинок.

Свинець, який входить до складу кулькових виводів корпусів, також «виробляє» альфа-частинки. Проблема альфа-випромінювання в матеріалах корпусів інтегральних мікросхем, а також заходи, щодо захисту від впливу цього випромінювання, відомі досить давно.

Оскільки натеper превалює тенденція до зменшення розмірів транзисторів і зниження їх робочих напруг, підвищується ймовірність того, що альфа-випромінювання радіоактивних матеріалів впливатиме на стан SRAM – напівпровідникової оперативної пам'яті (тобто в разі потрапляння альфа-частинки в комірку пам'яті значення біта може змінитися з 1 на 0). Тому, проектуючи мікросхеми SRAM з технологічною нормою 0,18 мкм і менше необхідно передбачати відповідні заходи щодо захисту від впливу альфа-випромінювання. Наприклад, як заповнювач (компаунд) слід використовувати матеріал, який не містить радіоактивних елементів. Проблема альфа-випромінювання свинцю, що входить до складу кулькових виводів корпусів, вирішується через застосування матеріалів, що не містять свинцю.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які дві основні групи матеріалів використовують у процесі виробництва МЕМС?
2. Які параметри потрібно враховувати для створення мікросистем на основі композицій різномірних матеріалів?
3. Чим пояснюється популярність кристалічного кремнію перед іншими матеріалами в конструкціях мікросистем?
4. Чому в технологіях виготовлення МЕМС потрібно враховувати кристалографічну орієнтацію кремнію?
5. Опишіть виробництво кремнієвих пластин.
6. Домішки яких хімічних елементів додаються у процесі плавлення в тигель для надання пластині кремнію провідності n-типу або діркового р-типу?
7. У чому недоліки полікристалічного кремнію як конструкційного матеріалу?
8. Як зазвичай використовується полікристалічний кремній в технологіях виготовлення МЕМС?
9. Як використовується двооксид кремнію в технологіях виготовлення МЕМС?
10. Які технології дозволяють одержати товсті шари двооксиду кремнію і яка роль хлору в плівках двооксиду кремнію?
11. Які розроблено методи формування пластин кремнію на ізоляторі?
12. Які хімічно стійкі і механічно стабільні похідні кремнію можна застосовувати в механічних підсистемах МЕМС?
13. Які властивості арсеніду галію GaAs роблять його незамінним для виготовлення оптикоелектричних пристроїв?
14. Які переваги мають полімерні матеріали і як їх використовують для виготовлення МЕМС?

Розділ 3. Базові технології мікроелектроніки, що застосовуються для виготовлення МЕМС

Існує три характерні особливості технологій виготовлення МЕМС – мініатюризація, множинність, мікроелектроніка.

Мініатюризація дозволяє виробляти компактні мініатюрні механічні системи, які не доступні звичайним методам механічного оброблення. Датчики і приводи – найдорожча і складна частина макромасштабних електромеханічних систем. Технологія МЕМС дозволяє виготовляти мініатюрні і не дуже дорогі зразки таких складних систем.

Множинність належить до групового виготовлення, яке властиво виробництву мікросхем. Множинність дозволяє легко і одночасно виготовити тисячі або навіть мільйони компонентів на одній підкладці. Використання методів групового виготовлення, зменшує вартість МЕМС, зрівнюючи її з вартістю інтегральних мікросхем.

Мікроелектроніка дозволяє реалізовувати монолітне злиття механічних елементів МЕМС (датчиків і приводів) і тракту оброблення інформації, забезпечуючи інтеграцію механічних систем з електронікою, тобто нівелює розбіжності між складними механічними системами і електронікою інтегральних схем.

Найбільш важливі частини технології виготовлення МЕМС взято від технологій мікроелектроніки. Наприклад, майже всі пристрої МЕМС базуються на пластинах кремнію, а їх структури реалізуються в нанесених на пластини кремнію тонких плівках. У виробництві МЕМС використовуються технології виготовлення мікросхем, такі як окиснення, нанесення плівок, легування, металізація, літографія, травлення тощо.

Однак існують технологічні процеси, які не є розвитком технологій мікроелектроніки. Так, на відміну від мікросхем, МЕМС, як правило, мають тривимірну структуру. Тому й розроблені спеціальні технологічні операції, наприклад хімічне анізотропне травлення, що дозволяє формувати об'ємні структури у гальванічно вироблених товстих, зокрема металевих шарах. Освоєно процеси селективного травлення залежно від концентрації домішок, метод анодного зварювання або плавлення для з'єднання пластин кремнію. І оскільки технології виробництва МЕМС продовжують розвиватися, їх відрив від технологій інтегральних мікросхем також збільшується.

Спрощено схему виготовлення будь-якого MEMC пристрою можна зобразити у вигляді рис. 3.1.

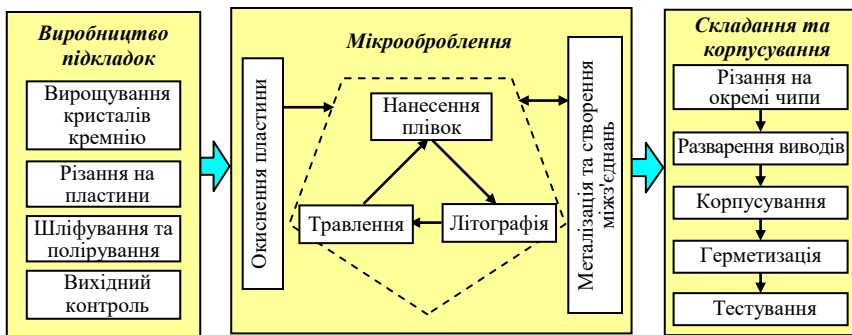


Рис. 3.1

Основні технологічні операції виготовлення MEMC можна згрупувати в три основні будівельні блоки технологій:

- виробництво підкладок;
- мікрооброблення;
- складання та корпусування.

Підкладки – основи будь-якого MEMC пристрою створюються з вирощених кристалів конструкційних матеріалів, основним з яких є кремій. Вирощений кристал ріжеться на пластини певної товщини, які потім шліфуються і поліруються.

Існує кілька способів різання. В одному з них використовується алмазний диск з внутрішньою різальною кромкою, який обертається зі швидкістю 3000...5000 об/хв. Тримач зі злитком переміщується поступально відносно диска до тих пір, поки не відбувається повне відділення пластини. Після цього тримач відводиться у вихідне положення, висота кромки кристала відносно диска калібровано змінюється і відрізається наступна пластинка. Для відведення тепла із зони контакту алмазної кромки диска з кристалом туди протягом всього процесу різання подається охолоджувальна рідина. Від застосовуваної охолоджувальної рідини і її витрати (2...4 л/хв) істотно залежить якість різання.

Інший спосіб – це розрізання злитка дротом із застосуванням абразиву. Використовується як зворотно-поступальний рух намотаного на валики дроту, так і перемотування дроту з великою швидкістю з одного валика на інший. Заготівку, яка підлягає розрізанню, підводять до дроту, що безперервно рухається, і встановлюють не-

обхідну швидкість подачі злитка. При цьому на дріт безперервно летіє абразивна суспензія. Зазвичай використовують дріт з вольфраму, сталі, нікелю, ніхрому. Діаметр дроту дорівнює 0,05...0,15 мм, ширина розрізу – 0,08...0,2 мм.

Одержані безпосередньо після розрізання пластини містять безліч дефектів. Їх поверхні не плоскі і не паралельні одна одній, на них наявні мікро- і макронерівності, зовнішні шари пластини пластично деформовані і мають механічні напруження. Тому відрізані пластини-підкладки завантажують в установки для шліфування та полірування, у яких спочатку за допомогою оберткових алмазних шліфувальних дисків (15000...18000 об/хв) видаляється механічно пошкоджений поверхневий шар. Для зменшення нагрівання в зону шліфування подають охолоджувальну рідину. Потім проводиться полірування на дисках, обтягнутих м'яким матеріалом, на поверхню якого наноситься паста з мікропорошком абразиву. Полірування зазвичай виконується у кілька етапів із заміною полірувальних мікропорошків на більш дрібні. На заключній стадії полірування поверхня знежирюється за допомогою спеціальних розчинників, залишки розчинника видаляються відмиванням у надчистій деіонізованій воді.

Остаточне згладжування рельєфу поверхні пластини проводиться за допомогою хіміко-механічного полірування – процесу, що поєднує хімічне (використання агресивних, наприклад, колоїдних суспензій) і абразивне оброблення поверхні. Ідея хімічного полірування полягає в тому що мікро і нановиступи, які ще залишилися на поверхні, містять структурні порушення і тому травляться набагато швидше, ніж гладка поверхня. У поєднанні з абразивним поліруванням вдається одержати атомно-гладку поверхню, нерівність якої не перевищує декількох ангстремів.

Для формування конструкцій МЕМС використовується технологічний процес мікрооброблення, який являє собою структуровану послідовність таких дій:

- окиснення кремнієвої пластини підкладки;
- нанесення тонких плівок матеріалу на підкладку;
- літографічне нанесення на плівки зображень рисунків;
- травлення плівок вибірково до зображень.

Додання до складу МЕМС виробів електронних пристроїв і створення електричних з'єднань проводять з використанням стан-

дартних напівпровідникових технологій. Для цього попередньо проводять металізацію МЕМС-виробів. Металізація – це покриття поверхні виробу шаром металу або сплаву для надання поверхні необхідних фізичних, хімічних і механічних властивостей. Металізація може проводитися з використанням золота, срібла або інших металів.

Кінцевим етапом технологічної схеми виготовлення МЕМС є складання та пакування готового пристрою в корпус (корпусування), яка для МЕМС дуже важлива, оскільки як пристрої МЕМС можуть потребувати додаткових умов (герметизації, заповнення робочої області інертними газами). Особливістю МЕМС є корпусування окремих чипів.

3.1. Нанесення покриттів і плівок

Оскільки складні деталі МЕМС мають вигляд шаруватих структур з різних матеріалів, то ця група технологічних операцій дозволяє додавати потрібний шар матеріалу до основи або до вже наявних шарів. Перед початком кожного циклу поверхня пластини піддається хіміко-механічному поліруванню. Для нанометрового діапазону цей процес обов'язковий, оскільки дозволяє перед формуванням чергового шару прибрати нерівності, що виникли в ході попереднього оброблення.

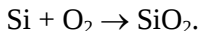
Вибираючи матеріали шарів, необхідно враховувати такі фактори: сумісність кристалічних ґраток; узгодження температурних коефіцієнтів лінійного розширення; допустиме теплове навантаження і т. ін. Крім того, необхідно керуватися і такими традиційними вимогами, як електрична та механічна міцність, висока тепло- і електропровідність, стійкість до зовнішніх впливів.

3.1.1. Термічне окиснення кремнієвої пластини

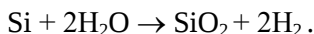
Шар двооксиду кремнію на підкладці формується зазвичай за рахунок хімічної сполуки атомів кремнію з киснем, який подається до поверхні кремнієвої підкладки, нагрітої в технічній печі до високої температури. Окиснення відбувається близько шести годин залежно від товщини оксиду та способу окиснення.

Для формування тонких плівок оксиду (одиниці і десятки нанометрів) кремнієві пластини поміщають у піч, у яку подається киснева суміш, а пластини нагріваються до температури від 800 °С до

1200 °С. Цей метод називається сухим оксидуванням і дає змогу формувати більш щільні та якісні шари SiO_2 , однак швидкість росту плівки невисока (<100 нм/год). Під час окиснення відбувається така хімічна реакція:



Для виготовлення мікромеханічних структур потрібні товсті шари оксиду (до 1 мкм), які одержують, застосовуючи метод волого оксидування з додаванням до кисневої суміші водяної пари. У ході оксидування кисень поглинається, а газоподібний водень виділяється:



Швидкість вологого окиснення досягає 1 мкм/год. Одержуваний оксид більш рихлий і зазвичай використовується там, де не критичні електричні параметри плівки.

Для того щоб плівка оксиду кремнію мала точно задану товщину і не містила дефектів, необхідно суворо підтримувати постійну температуру в усіх точках пластини у процесі окиснення. Процеси окиснення добре досліджені і для них розроблені відповідні технологічні режими, які широко використовують у мікроелектронній промисловості.

У сучасній мікроелектроніці, зазвичай, для окиснення використовуються (рис. 3.2) вертикальні печі, в яких забезпечується кращий контроль забруднень і більш рівномірне термічне оброблення. До того ж такі печі порівняно легко дозволяють окиснювати пластини великого діаметра і, крім того, економлять площу чистих приміщень.

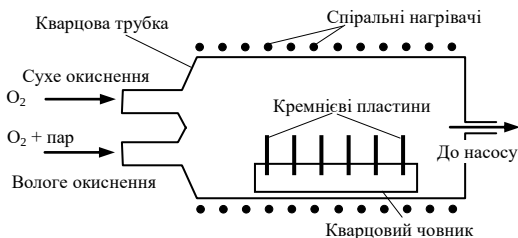


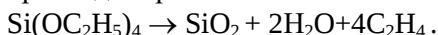
Рис. 3.2

Одним зі способів стабілізації отриманих оксидів є відпал, який призначений для зняття механічних напружень і усунення структурних дефектів на межі Si–SiO₂. Внутрішні механічні напруження впливають на поверхневий натяг, структурну досконалість і рівномірний розподіл електрофізичних характеристик уздовж пластини.

3.1.2. Піролітичне осадження діоксиду кремнію

Піролітичне осадження застосовують для одержання товстих шарів оксиду кремнію за низьких температур, коли термічне окиснення неприйнятне через істотні зміни параметрів попередніх дифузійних шарів у кремнії. Піролітичне осадження забезпечує більшу продуктивність, високу рівномірність шарів, якісне покриття уступів металізації і дозволяє створювати ізолювальні шари не тільки на поверхні кремнію, але і германію, арсеніду галію, а також інших матеріалів.

Під час піролітичного осадження оксиду кремнію відбувається термічний розклад складних сполук кремнію (алкоксисіланів) з виділенням SiO₂, наприклад тетраетоксілана:



Установки піролітичного розкладання відрізняються від установок термічного окиснення лише тим, що у зволожувач заливають алкоксисілан, а замість кисню використовують аргон.

На ділянках поверхні підкладки, не захищених оксидним шаром, може проводитися кілька технологічних операцій. Одна з таких операцій – легування.

3.1.3. Легування

Оточуючі МЕМС напівпровідникові мікросхеми формуються на одному і тому самому монокристалі напівпровідникового матеріалу, в поверхневому шарі якого методами літографії та вибіркового легування створюються транзистори, діоди, резистори та конденсатори, а сполуки між ними формуються по поверхні кристала за допомогою тонкоплівкової технології.

Легування у технологіях МЕМС – це процес імплантації домішок у матеріал підкладки або в епітаксціальний шар для зміни типу електропровідності (*n*-тип або *p*-тип) шарів підкладки.

У технології виробництва напівпровідникових мікросхем використовують два основні способи легування:

- дифузійне легування;
- іонна імплантація.

Дифузійне легування напівпровідникового матеріалу здійснюється за високої температури $T = (1150 \dots 1300)^\circ\text{C}$ шляхом дифузії⁷ матеріалу домішок, у напівпровідниковий матеріал. У термо-дифузійному легуванні підкладок або епітаксіальних шарів розрізняють загальну і локальну дифузію.

Загальна дифузія здійснюється по всій поверхні напівпровідникової підклади. У результаті дифузії в напівпровідниковій пластині створюється тонкий дифузний шар, наприклад, n -типу провідності, що створює структуру $n-p$ переходу (рис. 3.3).

Локальна дифузія здійснюється на певних ділянках пластини через вікна в масці, наприклад у шарі оксиду SiO_2 (рис. 3.4). У разі локальної дифузії домішки поширюються не тільки вглиб пластини, але і під маску, тобто у всіх перпендикулярних напрямках. У результаті цієї бічної дифузії ділянка $p-n$ переходу, що виходить на поверхню, буде захищена оксидом SiO_2 .

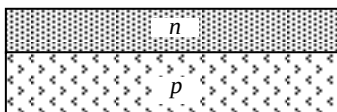


Рис. 3.3

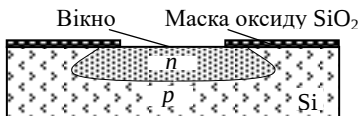


Рис. 3.4

Дифузію можна проводити в одну й ту саму пластину не більш ніж три рази. У результаті двократної дифузії отримують $n-p-n$ перехід.

Для цього в епітаксіальний n -шар спочатку на велику глибину проводиться дифузія акцепторної домішки, при цьому формується базова ділянка майбутнього транзистора p -типу. Потім на меншу глибину проводиться дифузія домішки, що створює емітерну ділянку n -типу провідності. Під час проведення багаторазової дифузії концентрація кожної наступної домішки повинна перевищувати концентрацію попередньої, а глибина легування навпаки

⁷ Дифузія (розтікання, розсіювання, розчинення) – процес взаємного проникнення молекул або атомів однієї речовини між молекулами або атомами іншої, наприклад внаслідок теплового руху.

бути меншою. В іншому випадку тип провідності напівпровідника не зміниться, а отже, не утвориться $p-n$ перехід.

Таким чином, для кожної наступної дифузії слід вибирати легувальну домішку (дифузанти) з більшим значенням граничної розчинності, ніж для попередньої дифузії. Джерелами дифузанти є їх хімічні сполуки у вигляді рідин, твердих тіл або газів. Імплантація домішок зазвичай здійснюється за допомогою газотранспортних реакцій – так само, як при окисненні. Як газ-носіє зазвичай використовують аргон. У разі твердих дифузанти використовують двозонні дифузійні печі.

Іонною імплантацією (ІоІм) називають метод легування напівпровідникової пластини (або епітаксійного шару) шляхом бомбардування сфокусованим пучком іонів легувальної домішки, які пришивджені до енергії, достатньої для їх проникнення вглиб пластини.

Цей процес більш точний, ніж дифузний метод легування і забезпечує досить високу локальність впливів, яка визначається діаметром іонного пучка. Метод є універсальним: у будь-який матеріал можна імпантувати будь-яку кількість іонів будь-якої суміші незалежно від ступеня її розчинності в підкладці, якщо існують відповідні джерела іонів цієї суміші.

Іонізація атомів домішки, прискорення і фокусування іонного пучка, здійснюється в спеціальних установках аналогічних прискорювачам частинок в ядерній фізиці. Спрощену схему установки для ІоІм показано на рис. 3.5 а.



Рис. 3.5

Джерело іонів 1 містить газорозрядну камеру, яка перебуває під високою напругою близько 25 кВ та власне джерело іонів, що

містить іонну плазму частинок під тиском 1 Па або менше. Низький тиск у газорозрядній камері забезпечує переміщення іонів з малим розсіюванням і запобігає процесу їх нейтралізації. Створення низького тиску забезпечує вакуумний насос.

Систему прискорення та відхилення установки для ІоІм побудовано на системах електродів 2 і 5. Апертурні діафрагми 6 – це роздільні щілини, крізь які іонні частинки потрапляють у мас-спектрометр 7, а потім проходять між відхильними пластинами 5. Діаметр іонного пучка становить усього 1...2 мм. Тому до відхильних пластин прикладається пилкоподібна напруга, яка змушує сканувати пучок іонів по рядках площі мішені підкладки 8, яка утримується тримачем 9, як це показано на рис. 3.5, б.

Магнітний сепаратор (мас-спектрометр) 7 забезпечує високу чистоту легування, відокремлюючи непотрібні іони від легувальних. Принцип дії магнітного сепаратора ґрунтується на взаємодії магнітного поля, створеного в сепараторі, з рухомими іонами. У результаті дії сили Лоренца іони рухаються за дугою кола, радіус якого залежить від маси іона, і це дає змогу налаштувати сепаратор таким чином, щоб крізь його вихідну щілину проходили тільки іони легувальних домішок. Як легувальні домішки використовуються газоподібні фториди (хімічні сполуки фтору) тих самих легувальних матеріалів, що використовуються для дифузії.

Концентрація домішок в імплантованому шарі залежить від густини струму в іонному пучку та від часу експозиції. Цей час становить від декількох секунд до 3...5 хв, а іноді потрібно 1...2 год.

Так само, як для і дифузії, є два варіанти ІоІм:

- загальна імплантація, коли опромінюється відкрита поверхня пластини;
- локальна (вибіркова) імплантація.

У другому випадку опромінення відбувається через маску з попередньо нанесених плівок матеріалів, які використовують у технології мікроелектроніки (фоторезисти, нітриди, оксиди, полікремній). Іони поглинаються маскою і не досягають поверхні напівпровідника. У відкритих місцях відбувається імплантація домішки в поверхню, як показано на рис. 3.6.

Головною перевагою ІоІм є низька температура процесу, його хороша контрольованість, мала товщина імплантованих шарів (усього 0.1 ... 0.4 мкм, що на порядок менше за глибину дифузійних шарів), відсутність бічної дифузії під маску через прямолінійний рух іонів легуювальної домішки.

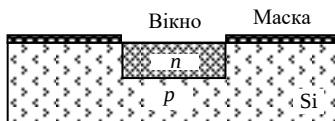


Рис. 3.6

Недоліками ІоІм слід вважати зростання кількості радіаційних дефектів зі збільшенням часу експозиції. Ці дефекти виникають у результаті того, що первинні іони вибивають атоми підкладки з вузлів кристалічної ґратки, при цьому, як правило, погіршуються електричні характеристики оброблюваного шару. Тому після імплантації доводиться проводити додатковий термічний відпал для того, щоб звести до мінімуму концентрацію подібних дефектів.

Недоліком ІоІм є також труднощі створення багатошарової структури. Тому цей метод легування набув поширення здебільшого для створення тонких одинарних шарів.

Ще однією технологічною операцією, яка виконується у вікнах оксидної маски є нанесення плівок різних речовин із зовнішніх джерел того чи іншого типу.

3.1.4. Нанесення плівок

Нанесення плівок у процесі виробництва МЕМС в основному реалізовується шляхом осадження з газової фази. Осадження з газової фази передбачає використання газу з частинок, що є складовими покриття, транспортування їх до поверхні підкладки й осадження цих частинок з формуванням плівки матеріалу.

Осадження з газової фази зазвичай поділяють на фізичне вакуумне напилювання (Physical Vapour Deposition – PVD) і хімічне осадження (Chemical Vapor Deposition – CVD). У разі хімічного осадження плівка матеріалу формується тільки після хімічної реакції на поверхні підкладки.

Фізичне вакуумне напилювання (PVD)

Методи вакуумного напилювання тонких плівок з парової (газової) фази здійснюються шляхом прямої конденсації пару напилюваного матеріалу на поверхню підкладки. У більшості методів використовують герметичні камери, в яких створюється необхідне

розрядження за допомогою вакуумних насосів. З метою модифікації матеріалу плівок, що наносяться, в герметичні камери можуть подаватися активні реакційні гази. Методи PVD можна розділити на дві групи: термічне випаровування й іонно-плазмове розпилення.

Використовуючи **термічне випаровування**, матеріал напильовання нагрівають до досить високої температури, за якою деякі атоми або молекули набувають достатньої енергії для того, щоб розірвати хімічні зв'язки і покинути речовину. У цьому процесі рідини випаровуються, а тверді речовини сублімують. Термічне випаровування використовує два фізичних процесу: випаровування нагрітого вихідного матеріалу та конденсація його на підкладці. Схожим чином з'являються краплі води на кришці киплячій каструлі.

Використовуючи **іонно-плазмове розпилення**, наприклад магнетронне, поверхню мішені бомбардують атомами, іонами або молекулами, які мають енергію, що перевищує енергію зв'язку атомів мішені. Для бомбардування, зазвичай, використовують іони інертних газів, оскільки їх легко розігнати до потрібної енергії в електричному полі, і вони хімічно інертні.

Методи PVD з використанням термічного випаровування.

Ключовим для процесу термічного випаровування є те, що він відбувається у вакуумі. У високому вакуумі довжина вільного пробігу частинок, що випаровуються, більше відстані до підкладки, і вони можуть потрапляти на неї без розсіювання на молекулах залишкового газу (на відміну від наведеного вище прикладу з каструлею, де водяна пара повинен спочатку витіснити з-під кришки повітря). Вакуум також є захисним середовищем, що дозволяє випаровувати хімічно активні матеріали без порушення їх хімічного складу (наприклад, окиснення).

Частинки матеріалу, випаровуючись, потрапляють на підкладку переважно з одного напрямку, тому, якщо підкладка має виступні деталі рельєфу, то це перешкоджає потраплянню матеріалу на деякі ділянки поверхні. Це явище нерівномірного напильовання називають маскуванням або затіненням.

Можливі установки, що використовують термічне випаровування такі:

1. *Термічні резистивні випарники з прямим нагріванням.* Це виконаний зі струмопровідної кераміки або тугоплавкого металу «човник» (названий так завдяки своїй формі), через який пропуска-

ється електричний струм, що розігріває «човник». Випарний матеріал розміщується в поглибленні «човника», де і випаровується.

2. *Тигель з непрямим нагріванням* – електронним або індукційним. У першому випадку нагрівання здійснюється електронним потоком, що надходить на тигель з кільцевого катода, розташованого навколо тигля, у другому – вихровими струмами в самому тиглі, збуджуваними індуктором.

3. *Електронно-променеві випарники*, в яких матеріал може нагріватися і випаровуватися локально, залишаючись в основній своїй масі холодним, що дозволяє мати дуже великий запас матеріалу в тиглі.

4. *Лазерна абляція* (винесення речовини з поверхні). Матеріал випаровується за рахунок нагріву в фокусі лазерного променя великої миттєвої потужності. Температура в зоні нагріву може бути досить високою для утворення ізотермічної плазми, тобто частинки матеріалу, що випаровуються іонізуються. Метод дозволяє випаровувати тугоплавкі метали і матеріали складного складу.

5. *Катодно-дугові випарники*, в яких матеріал катода випаровується в електричній дузі.

Як приклад на рис. 3.7 наведена схема установки фізичного вакуумного напилювання з *термічним випарником*. Для забезпечення рівномірності напилювання використовують різні варіанти обертових тримачів підкладок. Установка також оснащується системою іонного очищення підкладок та нагрівником для забезпечення необхідної чистоти поверхні й адгезії (зчеплення приведених у контакт різномірних матеріалів). Напилювання можна модифікувати введенням у камеру активного газу (кисню, азоту) для формування оксидних і нітридних плівок. Однак цей метод найчастіше використовують для формування шарів металізації через високу швидкість розпилення матеріалів металізації.

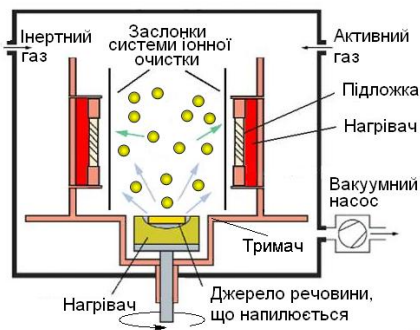


Рис. 3.7

Катодно-дугове напилювання передбачає нанесення тонких плівок на матеріал підкладки з плазмової фази матеріалу катода. Плазма створюється вакуумним дуговим розрядом між анодом і охолоджуваним катодом безпосередньо в парах матеріалу катода, що розпорошується.

Плазма емітується (випромінюється) катодною плямою (плямою емісії) мікронних розмірів, у якій розвивається температура, достатня для випаровування будь-яких матеріалів катода, навіть тугоплавких, та перетворення їх у високошвидкісні іонні потоки плазми, які поширюються в навколишній простір. Під час контактування іонного потоку плазми з підкладкою на її поверхні конденсується шар катодного матеріалу, товщина якого пропорційна густині іонного потоку та часу експозиції.

Прикладаючи від'ємний потенціал до підкладки, можна за допомогою електричного поля, регулювати в широких межах енергію конденсованих іонів. Це, у свою чергу, забезпечує можливість синтезувати покриття із заданими хімічними та фізико-механічними властивостями.

У разі використання атмосфери з реакційними газами у камері можуть ефективно перебігати реакції з утворенням нових хімічних сполук. Наприклад, за наявності в камері азоту можуть формуватися плівки з нітриду матеріалу катода.

Кожна катодна пляма протримується обмежену кількість часу (одиниці мікросекунд). Після цього розряд, асоційований з цією ділянкою, згасає, залишаючи на поверхні катода невелике заглиблення. Далі відбувається самозародження нової катодної плями в іншій ділянці катода, поруч з попереднім заглибленням.

Високий ступінь іонізації плазми, який досягає для деяких матеріалів майже 100%, дозволяє використовувати магнітні поля для керування рухом плазмових потоків, зокрема переміщати емісійні зони по площі катода.

Оскільки випаровування матеріалу з катодних плям має вибухоподібний характер, то разом з атомами та іонами відбувається також викид мікрокрапель – частинок розплавленого матеріалу діаметром до 10 мкм, які також осідають на підкладку, пошкоджуючи поверхню зростаючої плівки. Для боротьби з мікрокраплинною фракцією використовують системи екранів, магнітні сепаратори, системи модуляції струму дуги та ін.

Якщо температура плавлення матеріалу катода невелика, то є ризик проплавлення катода аж до тримача і як наслідок потраплянням сторонньої домішки в плівку, що наноситься на підкладку.

Для уникнення подібних ситуацій застосовують масивні катоди великих лінійних розмірів, а катодну пляма швидко пересувають від однієї частини катода до іншої. У разі використанні циліндричних катодів їх можна під час роботи обертати.

Установка катодно-дугового напилювання (рис. 3.8) зазвичай складається з вакуумної камери, в якій вакуумним насосом створюється наднизький тиск, системи подачі реакційних газів і катодно-дугового випарника, який являє собою масивну циліндричну мішень з електропровідного матеріалу, відкрити з одного кінця. Катод оточений екраном, який

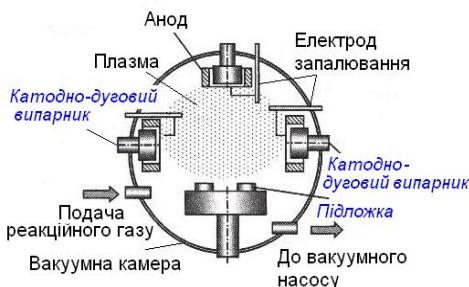


Рис. 3.8

оберігає робочу камеру від впливу дуги. Анодом зазвичай є стінка камери або спеціальний електрод. Для запалювання дуги використовується механічне стикання електродів запалювання анода та катода й плавне їх роз'єднання. Одержана дуга утворює емісійні зони, які за допомогою магнітного поля та руху катода переміщуються по площі відкритого робочого кінця катода, забезпечуючи його рівномірну ерозію (випалювання).

Зазвичай катодно-дугове нанесення покриттів можливе тільки з матеріалу катода, який з початку є електропровідним. Однак отримані плівки можуть мати і слабку електропровідність унаслідок формування плазми низько провідних хімічних сполук матеріалу катода і реакційного газу, що подається у вакуумну камеру. Катодно-дугове напилювання активно застосовується для формування надтвердих і захисних покриттів, наприклад, нітриду титану та композитів на його основі, і навіть для формування плівок алмазоподібного вуглецю.

Методи PVD з використанням іонно-плазмового розпилення
доцільно розглянути на прикладі магнетронного напилювання, який ґрунтується на явищі фізичного розпилення матеріалу катода, що є

ються атоми матеріалу напилювання. Одна частина атомів «закручується» магнітним полем, і вибивання атомів з мішені підсилюється, друга частина атомів осідає на підкладку, розташовану поруч з мішенню, утворюючи на ній тонку плівку.

Магнетронне напилювання є одним з найпоширеніших методів фізичного вакуумного напилювання як струмопровідних, так і діелектричних тонких плівок.

Напилювання металів і сплавів проводять у середовищі тільки одного інертного газу – аргону. Для напилювання складних сполук, наприклад оксидів або нітридів, застосовується реактивне магнетронне напилювання. У цьому випадку до плазموутворювального газу додають активний газ (наприклад, кисень, діоксид вуглецю та ін.). У плазмі магнетронного розряду реактивний газ дисоціює (розпадається), вивільняючи активні вільні радикали, які взаємодіють з осадженими на підкладку розпилим атомами мішені, формуючи хімічні сполуки.

Залежно від складу робочої атмосфери (частинок активного газу) можна формувати плівки різних матеріалів: тонкі плівки металів (Ag, Au, Al, Cu та ін.); плівки напівпровідників (Si, Ge, SiC, GaAs та ін.); плівки діелектриків (Al_2O_3 , SiO_2 та ін.).

На рис. 3.10 показана установка магнетронного напилювання AJA ORION 5.

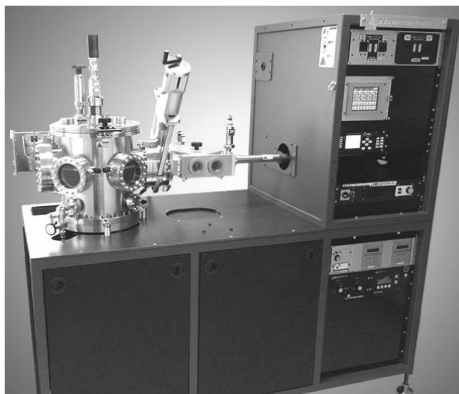


Рис. 3.10

Зліва показано робочу камеру, праворуч – блок управління.

Основні переваги магнетронного методу розпилення – це висока швидкість розпилення і точність відтворення складу матеріалу розпилення.

Хімічне осадження з газової фази (CVD)

Хімічне осадження з газової фази відрізняється від описуваної вище групи процесів (PVD) тим, що при ньому відбувається хі-

мічна реакція безпосередньо на поверхні нагрітої підкладки з осадженням на ній необхідного матеріалу. Для перебігу хімічних реакцій зазвичай потрібна висока температура – до 1100 °C.

На відміну від процесів PVD, за яких тверді матеріали покриття переводяться в газоподібну фазу випаровуванням або розпиленням, за процесів CVD у камеру для нанесення покриття подається суміш газів. Робочі гази можуть подаватися з балонів за допомогою п'єзоелектричних клапанів тонкого регулювання, джерелами хімічних елементів можуть бути також дрібнодисперсні аерозолі. Такі аерозолі утворюються за допомогою ультразвукового розпилювача або інжектора, який безпосередньо розпилює рідину в робочому об'ємі камери.

На поверхні підкладки, яка міститься в робочій камері, суміш газів, вступаючи в реакцію або розкладаючись, формують необхідну плівку речовини. Газоподібний продукт хімічної реакції виноситься з камери з потоком газу.

Процеси CVD розрізняються за умовами перебігу процесу і за способами запуску (активування) хімічних реакцій.

Залежно від тиску в робочій камері розрізняють процеси:

- CVD за атмосферного тиску;
- CVD за тиску нижчого за атмосферний;
- вакуумний CVD, що перебігає за дуже низького тиску, зазвичай нижче за 10^{-6} Па.

Знижений тиск зменшує імовірність небажаних реакцій в газовій фазі і сприяє більш рівномірному осадженню плівки на підкладку. Однак плівки за зниженого тиску ростуть повільніше, ніж за атмосферного.

Для активування процесу CVD використовують один з трьох основних методів: термічний, фотохімічний, включаючи лазерний, та плазмовий

Зазвичай, хімічне осадження з газової фази проводять на нерухомій підкладці. Однак відомі конструкції апаратів для хімічного осадження з газової фази, в яких підкладки переміщуються уздовж реакційної зони, обертаються в ній, а також перебувають в підвищеному стані. Це дозволяє виготовляти плоскі, циліндричні та сферичні покриття, стрічки, конуси, нитки, стрижні та тіла довільної форми, а в поєднанні з фотолітографією – складні мікроструктури.

За допомогою хімічного осадження з газової фази формують плівки близько 200 речовин, серед яких прості речовини і неорганічні сполуки, а також декілька органічних сполук (наприклад, різновиди поліетилену), сплави металів, аморфні плівки, які не мають кристалічної структури, полікристалічні плівки, а також епітаксіальні плівки, атоми яких відтворюють монокристалічну структуру підкладки.

Схему пристрою з автономним двозонним випарником для осадження шарів на плоскі зразки методом CVD зображено на рис. 3.11. В установці формування плівок і покриттів ґрунтується на двох процесах: переходу з твердої фази в рідку молекулярного попередника (вихідний матеріал) під впливом теплової енергії та його розкладання за високої температури з одночасною хімічною взаємодією з газом-реагентом. На схемі показано:

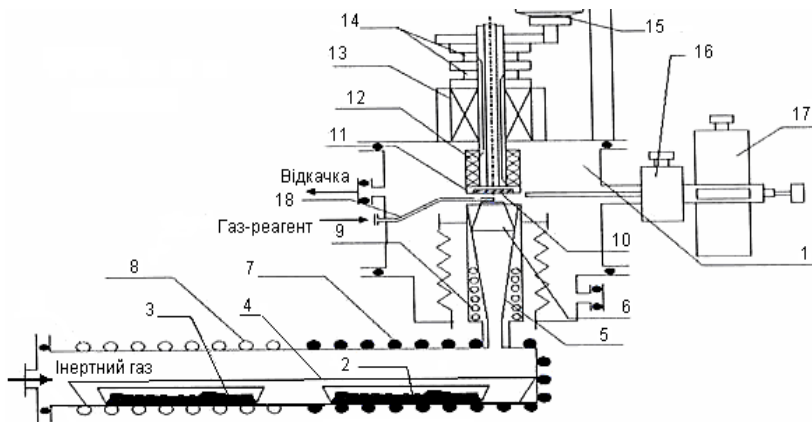
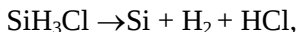
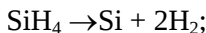


Рис. 3.11

1 – реактор з нержавіючої сталі; 2 – кварцовий човник з вихідною сполукою I; 3 – кварцовий човник з вихідною сполукою II; 4 – контейнер; 5 – трубопровід, що прогрівається; 6 – формувач газового потоку; 7...9 – резистивні нагрівники; 10 – підкладка; 11 – тримач підкладки; 12 – нагрівник підкладки; 13 – соленоїд; 14 – рухомі електричні контакти; 15 – вузол обертання підкладки; 16 – шлюзовий пристрій; 17 – камера для зразків; 18 – трубка для подачі газу-реагенту.

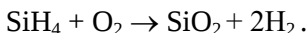
Продукти, що утворюються під час реакції, видаляються з робочої камери через фільтри системи відкачування.

Для формування плівки полікристалічного кремнію Si в камері за зниженого атмосферного тиску (25...150 Па) напускається суміш азоту із силаном SiH₄ або трихлорсиланом SiH₃Cl, а підкладка нагрівається до температури 600...650 °С. При цьому відбуваються реакції розкладання газів:



а на підкладці осідає полікристалічний кремній Si. Швидкість осадження плівки 10...20 нм/хв.

Плівки діоксиду кремнію SiO₂, крім сухого або вологого оксидування можуть формуватися і шляхом хімічного осадження з газової фази (із суміші кисню O₂ та силану SiH₄):



Однак такі плівки мають неякісні електричні характеристики, тому основним їх застосуванням є формування жертвних шарів, які видаляються в процесі сухого або рідинного травлення.

До хімічних і електрохімічних методів також належать процеси, що відбуваються в реакційних рідинах і розчинах електролітів. При цьому перша група процесів передбачає створення необхідної концентрації та температури розчину, а друга – додатково передбачає протікання електричного струму через цей розчин. З використанням електрохімічного осадження зазвичай формуються металеві плівки.

Електрохімічне осадження ґрунтується на розкладанні солей і оксидів у розчинах під дією постійного струму. У розчині сіль металу дисоціює з утворенням катіона металу. Катіон осаджується на негативно зарядженому катоді, забираючи при цьому необхідну кількість електронів. Цей метод можна застосовувати для формування товстих (десятки мікронів) плівок, проте їх якість істотно нижча, ніж плівок, створюваних вакуумним напилюванням. Однак висока швидкість осадження, яка легко регулюється величиною струму і простота виготовлення електрохімічних ванн є істотною перевагою даного методу.

3.2. Літографія

У технології виготовлення мікросистем дуже важливими є технології створення сукупності отворів у шарі суцільного матеріалу, так звані маски, які забезпечує локальний характер напилювання, легування, травлення. Формуванням відбитків зображення таких масок у технології мікросистем займається літографія. Літографія - це формування у спеціальному чутливому шарі (резисті), нанесеному на поверхню підкладки, рельєфного зображення, з подальшим перенесенням відбитка цього зображення на підкладку. Залежно від способу формування відбитків зображення розрізняють такі види літографії: фотолітографію, електронно-променеву, рентгенівську та іонно-променеву.

Фотолітографія є основним технологічним процесом у мікроелектронному виробництві. Зазвичай її застосовують для нанесення ліній шириною до 100 нм, а використовуючи спеціальні методи – імерсійної літографії, можна теоретично зменшити цю здатність на порядок.

У технології фотолітографії передусім необхідно виготовити шаблон із заданим зображенням, на якому показано розташування вікон, яке відповідає певній стадії технологічного процесу. Зображення шаблону зазвичай має складну конфігурацію з розміром елементів у декілька мікронів. Усе це потребує спочатку виготовлення топографічного зображення у збільшеному в 100...2000 разів масштабі.

Наступний етап в процесі формування шаблону полягає у фотографуванні оригіналу великою фотокамерою. Подальші фотографії виготовляються зі зменшенням первинного зображення спочатку в 100 разів, а потім ще в 10 разів, щоб остаточне зображення на підкладці мало необхідний розмір.

Фотошаблони виготовляють або на скляних пластинах, або на полімерних плівках. Виготовлення фотошаблону за допомогою збільшеного оригіналу з подальшим фотографічним зменшенням в кілька етапів не викликає ускладнень, але не дозволяє переносити зображення елементів розміром меншим за 5 мкм.

Останнім часом у практиці виготовлення фотошаблонів застосовуються системи машинного проектування. Геометрична топологія шаблону, яка створюється за допомогою графічних редак-

торів на екрані дисплея, зберігається в цифровому вигляді на магнітних дисках. Елементи зображення формуються на скляному шаблоні, вкритому оксидам заліза, хрому або кремнію, електронним променем, що керується генератором зображення.

Отримані таким чином фотошаблони використовуються у фотолітографії для перенесення зображення-маски на поверхню підкладки, або методом контактного друку, або переданням зображення маски на поверхню через лінзи об'єктива (рис. 3.12) для

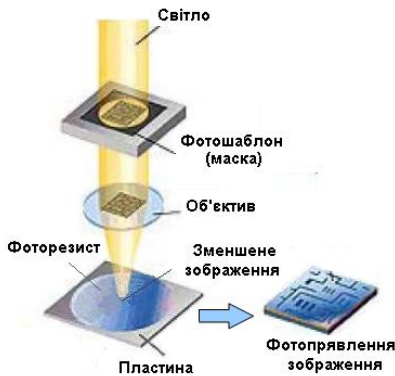


Рис. 3.12

додаткового його зменшення. На поверхню підкладки перед цим наноситься плівка фоторезисту – полімерної світлочутливої речовини, на яку і переноситься зображення. Експоновані ділянки фоторезисту змінюють свої властивості, що дає змогу під час проявлення вибірково видаляти резист, формуючи маску у вигляді набору вікон, які відкривають локальний доступ до поверхні підкладки.

Найпоширенішим методом нанесення фоторезистів на поверхню підкладки є центрифугування. Для досягнення однорідності плівки фоторезист летиться на пластину, яка обертається зі швидкістю кілька тисяч обертів за хвилину навколо вертикальної осі. Під дією відцентрових сил фоторезист рівномірно розподіляється по поверхні пластини. Змінюючи швидкість обертання, можна задавати товщину плівки фоторезисту, яка залежить від його типу і варіюється від 0,6 до 6 мкм.

Для нанесення фоторезисту на складні поверхні використовується аерозольне розпилення, однак товщина плівки з використанням такого методу нанесення може бути неоднорідною.

Фоторезистивна плівка експонується в синьому або ультрафіолетовому світлі, після чого відповідно до зображення фотошаблону на ній створюються засвічені та не засвічені ділянки. Під час проявлення відбувається селективне видалення резисту відповідно до одержаної експозиції. Розрізняють позитивні і негативні фоторезисти. У разі проявлення позитивних фоторезистів видаляються

освітлені ділянки, а за умов проявлення негативних фоторезистів – неосвітлені області. Відповідно і фотошаблони залежно від використовуваного фоторезисту поділяють на негативні фотошаблони, на яких зображення геометричної фігури виконано світлими лініями на темному полі, та позитивні фотошаблони з темними лініями на світлому полі.

Для перенесення зображення на поверхню пластини крім проекції через лінзи об'єктива також застосовують метод контактного друку, ілюстрація якого на прикладі формування в шарі двооксиду кремнію SiO_2 , нанесеному на крем'яну підкладку вирізу певної конфігурації, показана на рис. 3.13.

Спочатку на оксидний шар наноситься фоторезист (рис. 3.13, а), а потім до фоторезисту прикладається скляний фотошаблон (маска) із зображенням, що відповідає тій частини оксиду, яка повинна бути видалена. Після цього виконується експонування структури в ультрафіолетових променях (рис. 3.13, б).

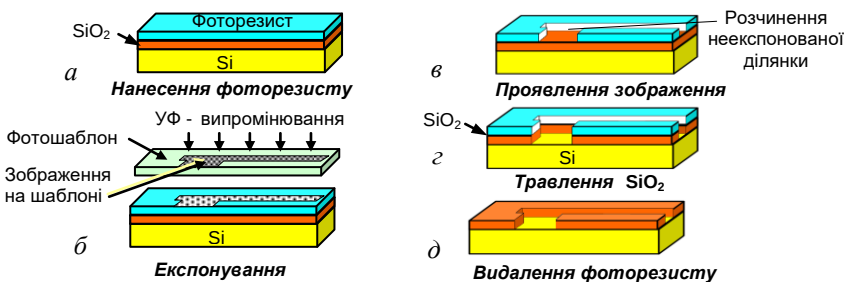


Рис. 3.13

На наступному етапі (рис. 3.13, в) – на етапі проявлення неекспоновані ділянки фоторезисту розчиняються, залишаючи при цьому вікна у фоторезисті.

Фоторезист, який покриває решту оксиду, хімічно стійкий до кислотного розчину, що зазвичай використовується на етапі травлення оксиду SiO_2 (рис. 3.13, д) з метою формування в оксидному шарі елементів мікросистем певної конфігурації (глухі та наскрізні отвори, щілини, пази тощо).

Наостанок шар фоторезисту, що залишився, видаляється з підкладки (рис. 3.13, д), і підкладка стає готовою для проведення наступного технологічного етапу. Основним з яких є вибіркоче травлення нанесених на підкладку плівок різних матеріалів.

3.3. Травлення

Травлення – це група технологічних прийомів для керованого видалення поверхневого шару матеріалу, нанесеного на підкладку. Процеси травлення можна умовно поділити на дві групи – рідинні та сухі. Для рідинного травлення використовують рідкі травильні реагенти (протравлювачі), що являють собою водні розчини хімічних реактивів, а для сухого травлення – реагенти у вигляді пари або плазми. Процес травлення характеризується *селективністю, швидкістю та анізотропією*.

Селективність травлення це відношення швидкостей травлення маски та плівки, яка підлягає травленню. Селективність важлива для зупинення процесу травлення після повного витравлювання незахищеною маскою плівки певного матеріалу, тобто при високій селективності процес травлення не повинний спричиняти значних пошкоджень шарів інших матеріалів, розміщених нижче. Для будь-якого процесу травлення бажано мати максимальну селективність. Наприклад, для рідинного травлення плівки діоксиду кремнію SiO_2 , напиленого на підкладку з кремнію Si , застосовують водні розчини фтороводневої кислоти. Відношення швидкостей травлення діоксиду кремнію до кремнію в таких розчинах становить 100 до 1, тобто за час травлення 100 нм плівки діоксиду кремнію підкладка кремнію буде підтравлена лише на 1 нм.

Іншим параметром процесу травлення є **швидкість травлення**. Чим вона вища, тим краще. Однак, як правило, висока швидкість травлення призводить до більшої неоднорідності травлення за товщиною і, як наслідок, до більшої шорсткості поверхні травлення. Швидкість травлення залежить від багатьох факторів:

- типу протравлювача та його температура;
- швидкості відведення продуктів реакції та підведення реагентів до поверхні матеріалу;
- наявності або відсутності дефектів, як у самому матеріалі, так і в захисній масці, що забезпечує локальність травлення;
- випаровування протравлювача, що зумовлює зміну його концентрації тощо.

Більшість цих факторів погано піддається контролю. Це призводить до того, що навіть незначні зміни швидкості травлення зу-

мовлюють неоднаковість відтворення геометрії однакових елементів МЕМС. Так, у разі рідинного травлення діоксиду кремнію у водному розчині фтороводневої кислоти з підвищенням температури з 18 до 26°C швидкість травлення зростає з 65 до 120 нм/хв.

Важливим параметром є також **анізотропія** процесу. Травлення може бути *ізотропним* або *анізотропним* залежно від травильних реагентів і структури матеріалу підкладки.

Ізотропне травлення. Це один з найвідоміших і поширених способів локального мікропрофілювання. Характерною особливістю ізотропного травлення є той факт, що кристалографічна орієнтація підкладки не впливає на профіль травлення, тому ізотропне травлення відбувається з однаковою швидкістю в усіх напрямках. Таке травлення називають хімічним поліруванням і використовують, наприклад, для прикінцевого згладжування рельєфу поверхні розрізаних пластин кремнію. Під час локального травлення (травлення через маску) ізотропне травлення поширюється (рис. 3.14) як углиб, так і під маску.

Як ізотропні протравлювачі для рідинного травлення використовують реагенти на основі плавикової та азотної кислот. Швидкість травлення двооксиду кремнію (SiO_2) в усіх застосовуваних протравлювачах виявляється значно нижчою від швидкості травлення кремнію. Тому під час локального травлення захист поверхні кремнієвої пластини від травлення може здійснюватися за допомогою оксидної плівки, яка локалізує процес травлення.



Рис. 3.14

Анізотропне травлення. У разі анізотропного травлення різні кристалографічні напрямки кристала травляться з різною швидкістю (зазвичай максимальна швидкість спрямована вглиб кремнієвої підкладки). Це зумовлюється різною щільністю пакування атомів у різних площинах, а також різним характером зв'язку поверхневих атомів між собою і з атомами, розташованими в глибині кристалічної структури матеріалу. Процес анізотропного травлення являє собою поетапне видалення атомних шарів (шар за шаром) з поверхні кристала. У процесі травлення залишається поверхня з найменшою швидкістю травлення і ділянка, що витравлюється,



Рис. 3.15

не заходить під плівку маски (рис. 3.15), на відміну від ізотропного травлення (див. рис. 3.14).

Анізотропні протравлювачі являють собою багатокомпонентні розчини, які складаються з окиснювача, що перетворює кремній до гідратованого діоксиду кремнію, розчинника, сповільнювач або прискорювача процесу травлення, а також спеціальних домішок, які забезпечують, наприклад, вибіркове травлення. Склад протравлювачів, зазвичай, підбирається дослідним шляхом.

У більшості технологічних процесів використовують анізотропне травлення, проте в окремих випадках ізотропія необхідна. Зокрема, виготовлення мікроста – балки, що приєднана до підкладки з двох протилежних торців (рис. 3.16), може бути реалізовано за допомогою сильного горизонтального підтравлення нижчих шарів підкладки

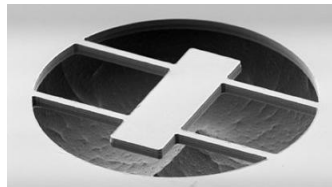


Рис. 3.16

3.3.1. Рідинне травлення

Розрізняють два механізми рідинного травлення: хімічний та електролітичний. У технологіях мікроелектроніки зазвичай використовують хімічне травлення. Рідинні процеси мають велику швидкість травлення і селективність.

За характером взаємодії з кремнієм хімічне травлення є реакцією розчинення. У процесі хімічного травлення на поверхні кремнію протікають окисно-відновлювальні реакції, пов'язані із суто хімічною взаємодією молекул протравлювача з поверхневими атомами.

Рідинні процеси травлення ґрунтуються на хімічних реакціях, тому вони більш ізотропні, ніж газофазні. Під час травлення кристалічних шарів анізотропія рідинних процесів зумовлюється

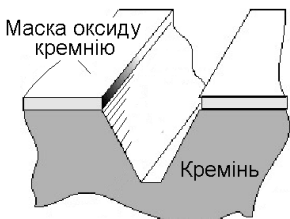


Рис. 3.17

різною швидкістю видалення шарів у різних кристалографічних напрямках. Наприклад, для кремнію відношення швидкостей травлення в різних кристалографічних напрямках досягає 600. Ця властивість активно використовується у виробництві МЕМС під час витравлення глибоких канавок (рис. 3.17).

Рідинне травлення відбувається зануренням підкладки в травильну ванну або обприскуванням її травильними реагентами (кислотами або лугами).

Як травильні ванни зазвичай застосовуються ванни, стійкі до протравлювачів. Наприклад, для водних розчинів фтороводнової кислоти – це тефлонові контейнери. Ці ванни мають нагрівальні системи, які у змозі підтримувати необхідну температуру в широкому діапазоні. Оскільки в процесі травлення концентрація активної речовини протравлювача постійно зменшується, то його необхідно або періодично оновлювати, або проводити процедуру рекуперації – доведення параметрів концентрації до вихідного значення з видаленням продуктів реакції. Крім того, для збільшення швидкості травлення може бути використана ультразвукова агітація (інтенсифікація). Для відведення продуктів реакції та зменшення градієнта концентрації протравлювача в розчині ванна оснащується аераторами, які рівномірно розташовуються по дну ванни.

Незважаючи на простоту, швидкість і селективність процесу рідкофазного травлення він має ряд недоліків. Одним з найбільш важливих недоліків у виробництві МЕМС є проблема злипання та руйнування вільностоячих структур внаслідок дії сил поверхневого натягу рідини. Ці сили виникають під час утворення крапель розчину всередині порожнин і зазорів структур після вилучення підкладок з ванни. На повітрі краплі починають висихати і зменшуватися в об'ємі, тим самим «зліплюючи» механічні елементи структури. В окремих випадках деформаційні напруження можуть бути настільки великими, що відбувається механічне пошкодження деяких елементів МЕМС. Тому останній етап виготовлення структур – видалення жертвних шарів зазвичай проводиться за допомогою (сухого) газофазного травлення.

3.3.2. Сухе травлення

У сухому травленні виділяють газове та іонно-плазмове травлення. У найбільш часто використовуваному варіанті сухого травлення – у реактивному іонно-плазмовому травленні важливою складовою процесу є іонне бомбардування поверхні. Іонно-

плазмове травлення забезпечує більш високу роздільну здатність, ніж рідинне травлення, більш безпечне і допускає автоматизацію.

Варіант установки реактивного іонно-плазмового травлення показано на рис. 3.18. Плазма в робочій камері створюється за ни-

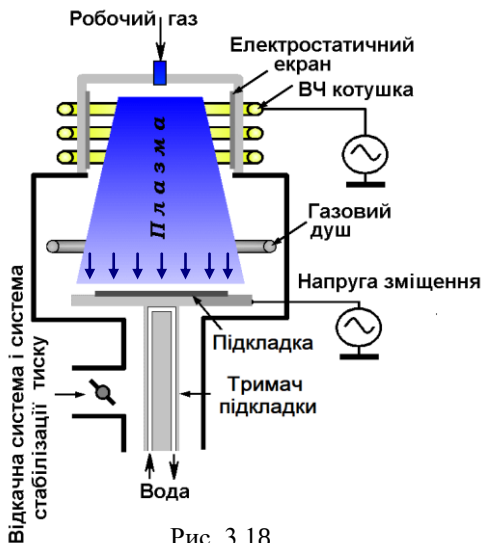


Рис. 3.18

зького тиску за допомогою індуктивного розряду. Для подачі реакційних газів у зону розряду використовується підведення газу через так званий газовий душ, розміщений в дифузійній ділянці індуктивного розряду. Для запалювання плазми зазвичай використовується високочастотний генератор. Після запалювання плазми, газова суміш розкладається на електрони, іони та активні радикали.

Іони, що надходять із плазми, пришвидшуються в напрямку підкладки, розміщеної на електроді, до якого підводиться високочастотна напруга для створення електричного зміщення. Величина зміщення електрода тримача підкладки визначає енергію потоку іонів на поверхню підкладки.

Момент імпульсу прискореного іона передається шару матеріалу підкладки, що стравлюється, «вибиваючи» атоми з цього матеріалу. Якщо плазма хімічно активна, тобто іони газу можуть хімічно взаємодіяти з атомами шару матеріалу, що стравлюється, то, крім фізичного видалення матеріалу, видалення відбувається і за рахунок хімічної реакції.

У плазмохімічному травленні зазвичай використовуються гази, іони яких виявляють високу реакційну здатність, наприклад фториди або сполуки, що містять хлор. Вони дозволяють травити кремній, півки оксидів, нітридів, металів. Для травлення органічних матеріалів використовується киснева плазма.

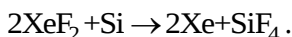
Отже, сумісна дія хімічних реакцій, іонного розпилення і іонної активації призводить до руйнування шару матеріалу підкладки, перетворення його у леткі сполуки з одночасною десорбцією (видаленням) його з поверхні підкладки. Швидкість травлення в газофазних процесах нижча, ніж в рідкофазних, але матеріал видаляється більш рівномірно по всій поверхні пластини (товщина шару, що стравлюється, приблизно однакова).

Анізотропія процесу підвищується зі збільшенням енергії іонів плазми і зменшенням тиску. При цьому зменшується селективність, що зумовлено поступовим переходом від хімічного до іонного травлення – режиму травлення фізичним розпиленням з використанням іонів інертних газів з високою енергією, наприклад, аргону. Оскільки іони цих газів інертні, то під час травлення немає різниці між матеріалом маски і ділянкою, що витравлюється.

Для створення в робочій камері необхідного базового тиску суміші газів (у різних процесах може брати участь суміш з 2...4 газів) в установці є відкачна система і система стабілізації тиску з електрично керованою заслінкою. Незалежне керування густиною плазми і потоком іонів дозволяє значно поліпшити параметри селективності й керування профілем травлення.

За високих швидкостей травлення може спостерігатися перегрівання підкладки. Для поліпшення тепловідведення тримач підкладки обладнується гелієвим або водяним охолодженням, яке мінімізує плазмове нагрівання і підтримує задану температуру.

Ще однією поширеною технологією сухого травлення є газове травлення, наприклад газове травлення кремнію в дифториді ксенону XeF_2 . Це тверда речовина, яка за кімнатної температури утворює газ (сублімація) з парціальним тиском 3,8 мм.рт.ст. Цей хімічний газ реагує з кремнієм з утворенням летких продуктів реакції:



Травлення сильно ізотопне і селективне: швидкість травлення кремнію, яка становить близько 250 нм/хв, приблизно в 1000 разів більша ніж швидкість травлення діоксиду кремнію SiO_2 або його нітриду Si_3N_4 . Установки травлення кремнію на основі дифториду ксенону зазвичай здійснюють циклічний його напуск в робочу ка-

меру і з наступним промиванням її газоподібним азотом. Для вида-лення продуктів реакції використовують форвакуумний насос.

Оскільки травлення ізотропне то такий процес часто викори-стовують як останній крок у вивільненні вільностоячих структур.

Травлення жертвового шару SiO_2 у плавиковій кислоті (HF), що міститься в газовій фазі (ангідрид кислоти), дозволяє виключити наступні складні процеси промивання і сушіння, які використовують у рідинних методах травлення. Використанням безводної су-міші $\text{HF}/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ за низького тиску вирішується проблема конденсації води, що утворюється у процесі травлення в парах HF , і до-зволяє застосовувати це сухе травлення в MEMC технологіях.

3.4. З'єднання підкладок

Існує багато методів з'єднання підкладок з різних матеріалів між собою для виготовлення складних пристроїв. Одним з найпо-ширеніших методів з'єднання кремнію зі склом є метод анодного або електростатичного сплавлення. Для цього кремнієва і скляна підкладки з'єднуються разом і нагріваються до високої температу-

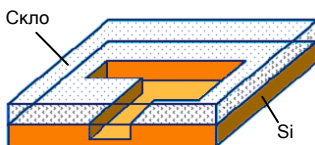


Рис. 3.19

ри. До цього з'єднання прикладається висока напруга, унаслідок чого між підкладками утворюються дуже міцні зв'язки. Скляну пластину, з'єднану з каналом, витравленим у кремнієвій підкладці показано на рис. 3.19

Для з'єднання двох кремнієвих підкладок підходить метод прямого з'єднання, який полягає у скріпленні двох кремнієвих пластин під водою з прикладанням до них невеликого тиску. Також популярні методи з'єднання, у яких використовують проміжні адгезійні шари, такі як скло і фоторезист. Хоча методи анодного сплаву і прямого скріплювання підкладок дають змогу одержати міцні з'єднання, вони мають і досить істотний недолік: для них дуже важлива чистота і гладкість з'єднувальних поверхонь. Методи з'єднання підкладок використовують для скріплювання мікроструктур під час виготовлення мембран, консолей, клапанів тощо, які є складовими частинами різних датчиків.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Назвіть три характерні особливості технологій виготовлення МЕМС. Яка з них істотно зменшує вартість?
2. У які три стандартні будівельні блоки можна згрупувати технологічні операції виготовлення МЕМС?
3. Яку структуровану послідовність дій являє собою технологічний процес мікрооброблення?
4. Для чого і як виконується технологічна операція окиснення кремнієвої підкладки?
5. Що являє собою операція легування?
6. Які існують варіанти термодифузійного легування?
7. Що являє собою метод легування шляхом іонної імплантації?
8. Які існують методи нанесення плівок шляхом осадження з газової фази?
9. Назвіть методи вакуумного напилювання плівок фізичним осадженням з газової фази.
10. Як реалізовується метод хімічного осадження з нанесенням плівок і покриттів?
11. Сформулюйте поняття літографічного процесу. Які існують види літографії?
12. Назвіть технології формування фотошаблону.
13. Що являють собою фоторезисти?
14. Опишіть етапи літографічного процесу одержання зображення на пластині методом контактного друку.
15. Назвіть основні параметри процесу травлення.
16. На які дві групи залежно від травильних реагентів і структури матеріалу підкладки можна умовно розділити процеси травлення?
17. На яких процесах ґрунтується рідкофазне травлення, які його головні недоліки при виробництві МЕМС?
18. Опишіть технологію реактивного іонно-плазмового травлення.
19. Наведіть приклади сухого газового травлення.
20. Наведіть приклади методів з'єднання підкладок з різних матеріалів.

Розділ 4. Технології виготовлення об'ємних структур MEMC

Мікромеханічні системи на відміну від мікроелектронних чипів зазвичай містять рухомі елементи або елементи, що деформуються і являють собою тривимірні структури (3D структури). Тому особливість технологічних процесів виробництва MEMC полягає саме у формуванні об'ємних структур.

Однією з основних відмінностей технологій виготовлення MEMC є використання жертвовного шару для створення вільностоячих структур. Зразком такої структури є мікроміст – балка, приєднана до підкладки з двох протилежних торців (рис. 4.1). Для створення таких структур необхідно використовувати проміжний шар, названий жертвовним, який буде механічно підтримувати цю струк-

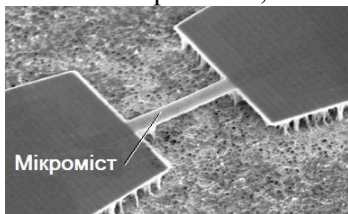


Рис. 4.1

туру на етапі нанесення плівки – основи для моста. Після виконання всіх необхідних операцій напилювання і літографії останнім етапом виготовлення є фаза вивільнення, під час якої жертвний шар видаляється, і структура з планарної (пласкої) перетворюється у тривимірну.

Як жертвні шари використовуються як неорганічні матеріали, такі як полікристалічний кремній, так і органічні, наприклад поліаміди. Для їх видалення застосовують ізотропне селективне газофазне або рідкофазне травлення. Газофазному травленню віддається перевага, оскільки у процесі рідкофазного травлення в зазор між елементами структури потрапляє рідина, яка під час висихання силами поверхневого натягу може пошкодити витравлені елементи. А ізотропія у поєднанні з високою селективністю травлення дозволяє видалити жертвний шар повністю в усіх порожнинах MEMC-пристрою. Жертвних шарів може бути декілька, що дозволяє створювати досить складні тривимірні мікроб'єкти.

Для створення електричних між'єднань використовують технологію виготовлення електронних схем, яка передбачає нанесення струмопровідного шару з подальшим його травленням і осадженням захисної плівки. Вертикальні між'єднання формуються шляхом травленням наскрізних отворів через всю товщину пластини

знову ж на базі технологій чергування процесів травлення та осадження струмопровідної та захисної плівки. У 3D системах за наявності елементів, які рухаються або деформуються, для електричних між'єднань використовують виготовлені за технологіями MEMS пружні контакти.

Технології виготовлення MEMS можна умовно поділити на два найбільш поширені типи:

- **об'ємне мікрооброблення**, що реалізовує субтрактивний підхід (вибіркове видалення непотрібного), за якого від цілого, як під час створення статуї, відсікається зайве (усередині кремнієвої підкладки пошарово витравлюється необхідна структура);
- **поверхневе мікрооброблення**, що реалізовує адитивний підхід (складання частинок), за якого ціле створюється, як під час будівництва будинку з цеглинок (шари-цеглинки формуються з плівок, осаджених на поверхні вихідної підкладки).

Крім зазначених існує і ряд інших технологій: MUMPs; SUMMiT; LIGA; індивідуального формоутворення тощо.

Але, наприклад технології індивідуального формоутворення поряд з низкою можливостей унікальних за роздільною здатністю, проте складних за відтворюваністю мають невисоку продуктивність, високу вартість і використовуються у виняткових випадках. Тому тут основна увага приділяється об'ємно та поверхневому мікрообробленню.

4.1. Об'ємне мікрооброблення

Об'ємне мікрооброблення (виробничий процес, що проходить від поверхні кремнієвої пластини вглиб) – це мікроелектронна технологія, яка дозволяє виготовляти тривимірні MEMS на кремнієвій підкладці за допомогою анізотропного травлення кремнію з використанням як масок плівок SiO_2 , Si_3N_4 , хрому і навіть золота. Під час травлення послідовно видаляються непотрібні об'єми кремнію, у наслідок чого залишаються механічні структури необхідної форми.

Недолік цього методу – залежність геометрії мікроструктури від кристалічної структури підкладки. Тому для формування MEMS-систем проводять або глибоке анізотропне сухе травлення,

наприклад реактивне іонне травлення (РІТ) газової плазмою, або з'єднують дві підкладки (кремнієву з кремнієвою або кремнієву зі скляною), на кожній з яких виготовлені МЕМС-структура і мікросхема. Це дозволяє створювати більш складні тривимірні МЕМС-елементи. Об'ємну технологію в багатьох випадках використовують для виготовлення МЕМС-пристроїв, що входять у дво- або навіть у три -кристальні конструкції.

У технології об'ємного мікрооброблення розрізняють: передньостороннє об'ємне мікрооброблення; задньостороннє об'ємне мікрооброблення і комбінацію передньо- і задньосторонніх об'ємних методів виготовлення.

Передньостороннє об'ємне мікрооброблення ґрунтується на селективному травленні передньої (лицьової) поверхні підкладки. Основною перевагою об'ємного мікрооброблення є формування інтегральних елементів МЕМС селективним травленням на останньому етапі процесу виготовлення, безпосередньо в об'ємі підкладки.

Детально технологічні етапи передньостороннього об'ємного мікрооброблення представлені на рис. 4.2.

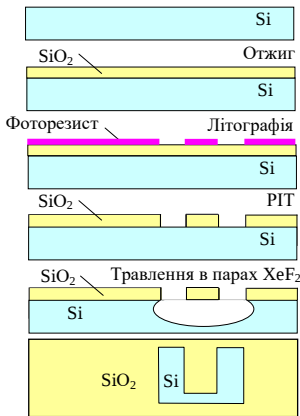


Рис. 4.2

У технологіях об'ємного мікрооброблення мікропристрої формуються на відносно товстій підкладці. Підкладку зазвичай виготовляють з кремнію (Si) завдяки його чудовим електричним, механічним і тепловим властивостям, іноді застосовують підкладки зі скла, кварцу, сапфіра, карбіду кремнію (карборунду), кераміки, п'єзокераміки.

Підкладка дозволить спростити поводження з мікроелектронним пристроєм у процесі його виробництва. Зазвичай, на одній підкладці розміщуються сотні й тисячі пристроїв, які виготовляються од-

ночасно і які розділяються тільки наприкінці виробництва.

На кремнієвій підкладці (рис. 4.2) методом термічного окиснення формується плівка діоксиду кремнію (SiO_2) товщиною 0,2...0,5 мкм, на якій за допомогою традиційних літографічних методів з використанням фоторезисту формується шаблон, який захищає ті ділянки, які необхідно залишити.

Після завершення технологічного процесу залишки фоторезисту з лицьового боку пластини видаляються.

Після літографії пластини проходять необхідні етапи травлення, у ході яких незахищені шаблоном ділянки видаляються. Наприклад, реактивним іонним травленням (RIT) витравлюються незахищені ділянки плівки двооксиду кремнію (SiO_2), а з використанням ізотропного травлення в парах XeF_2 витравлюються необхідні об'єми кремнієвої підкладки.

Задньостороннє об'ємне мікрооброблення передбачає травлення підкладки із задньої сторони. Існують два способи виготовлення елементів MEMC за задньостороннього об'ємного мікрооброблення.

Перший спосіб починається з легування (рис. 4.3) передньої сторони підкладки. У результаті легування на передній стороні підкладки створюється тонкий шар, що виконує функцію стоп-шару. Стоп-шари – це ділянки спеціально сформовані в кремнії з концентрацією легувального елемента, наприклад бору або оксиду хрому (Cr_2O_3), із досягненням яких швидкість травлення різко сповільнюється.

Одночасно виконується додаткове маскування задньої сторони підкладки. Як маски на кремнії, крім двооксиду кремнію (SiO_2), використовують нітрид кремнію (Si_3N_4), хром, золото та ін.

Далі, як і в технології передньостороннього об'ємного мікрооброблення, здійснюється селективне травлення задньої сторони підкладки – жертвового шару і матеріалу самої підкладки до стоп-шару.

Застосовуючи такий спосіб селективного травлення задньостороннього мікрооброблення, необхідно забезпечити високу селективність системи «підкладка – стоп-шар».

Перевагою такої технології виготовлення є можливість страхувати до декількох сотень мікрометрів матеріалу підкладки і зупинитися на глибині, точно визначеної стоп-шаром. Таким чином, ця техніка виготовлення дозволяє створювати елементи MEMC малої товщини.

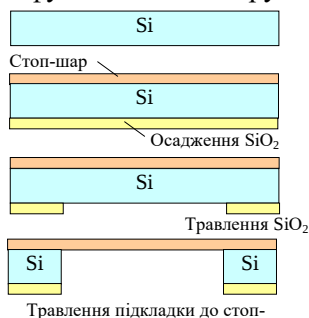


Рис. 4.3

Другий спосіб формування елементів МЕМС передбачає використання спеціальних керувальних отворів (рис. 4.4), які створюються з передньої сторони підкладки. Далі виконується маску-

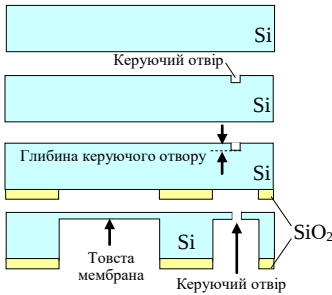


Рис. 4.4

вання і витравлення задньої сторони підкладки. Травлення зупиняється, коли передньосторонні керувальні отвори стають видимими. Глибина керувальних отворів визначає товщину створюваних елементів МЕМС.

Така техніка виготовлення дозволяє створювати елементи МСТ великої товщини безпосередньо в підкладці. Істотним її недоліком є немож-

ливість створення структур сенсорних і актуаторних елементів малої товщини.

Комбінований метод об'ємного мікрооброблення заснований на використанні передньосторонньої та задньосторонньої об'ємних технологій виготовлення елементів МСТ.

Технологічні етапи комбінованого методу об'ємного мікрооброблення з використанням рідкого анізотропного травлення показано на рис. 4.5.

На етапі 1 здійснюється вхідний контроль кремнієвої підкладки.

На етапі 2 методом легування на передню сторону підкладки наноситься шар зупинення травлення.

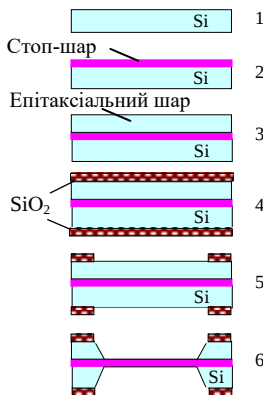


Рис. 4.5

На етапі 3 на стоп-шарі нарощується епітаксiальний шар. *Епітаксiя* – це закономірне наростання одного кристалічного матеріалу на іншому. Розрізняють *гетерепітаксiю*, коли речовини підкладки і наростаючого кристала різні і *гомоепітаксiю*, коли вони однакові. Гетероепітаксiя можлива тільки для речовин, які хімічно не взаємодіють, наприклад, так виготовляють інтегральні мікросхеми зі структурою кремній на сапфірі.

Етап 4 – це етап маскуванню верхньої і нижньої пластин заготовки тонкими плівками. Маскування можна виконувати методами окиснення, наприклад плівкою двооксиду кремнію SiO_2 , або відпа-лу, або металізації.

На етапі 5 за допомогою літографічних методів формується шаблон і витравлюються незахищені ділянки маски.

Етапом 6 є анізотропне травлення підкладки. У цьому процесі різні кристалографічні напрямки кристала підкладки травляться з різною швидкістю (максимальна швидкість спрямована вглиб кремнієвої підкладки). За анізотропного травлення залишається повер-хня з найменшою швидкістю травлення і ділянка, що витравлюється, не заходить під плівку маски.

Багато бюджетних МЕМС датчиків виготовляють на основі об'ємного мікрооброблення. Мікрозахват і мікробалки, виготовлені за технологією об'ємного мікрооброблення показано на рис. 4.6.

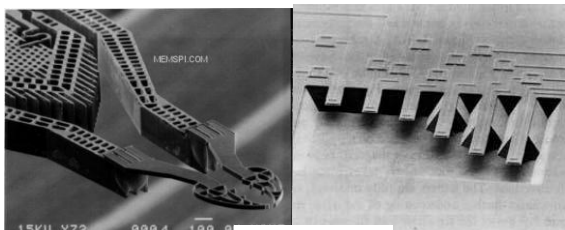


Рис. 4.6

4.2. LIGA технологія

LIGA технологія є також технологією об'ємного мікрооброблення, яка заснована на послідовності процесів літографії (*Lithographie*), гальваноосадження (*Galvanoformung*) і мікроформування (*Abformung*). LIGA-технологія пропонує широкий спектр матеріалів для створення ультраточних тривимірних елементів МСТ з вертикальними бічними сторонами товщиною 100...1000 мкм і поперечними розмірами в межах декількох мікронів.

Сутність процесу полягає у використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для формування глибоких, з прямовисними стінками топологічних картин у полімерному матеріалі. Випромінювання синхротрона має надмалий кут розходження пучка. Джерелом випромінювання є високоенергетичні електрони, що рухаються з релятивістськими швидкостями (близькими до швидкості світла). Глибина проникнення випромінювання досягає оди-

ниць міліметрів. Це зумовлює високу ефективність експонування за малих часових витрат.

Детально етапи LIGA технології показано на рис. 4.7.

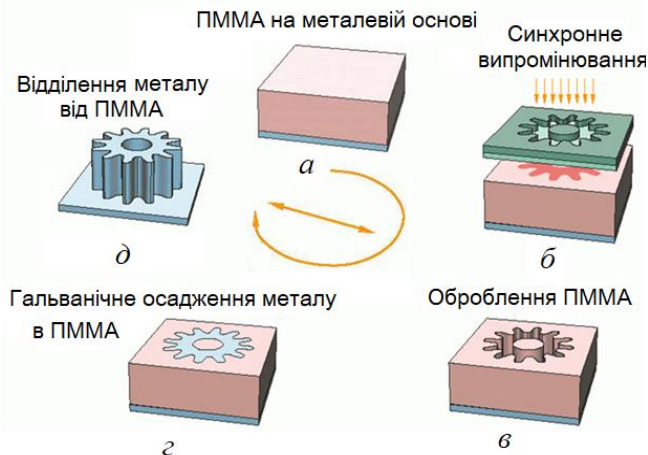


Рис. 4.7

Для досягнення більшої товщини (висоти) елементів МСТ використовується товстий шар резисту, що наноситься на підкладку. Як позитивний електронний резист в рентгенолітографії може використовуватися поліметилметакрилат (ПММА) – оргскло. Розчин ПММА наносять на підкладку, у цьому випадку на металеву основу, за допомогою центрифуги, унаслідок чого утворюється плівка резисту (рис. 4.7, а).

Фотоелектронне зображення в резисті створюється з використанням сфокусованих рентгенівських променів від синхротрона (рис. 4.7, б), які проходять крізь товстий шар резисту з дуже малою бічною експозицією. У тих місцях плівки ПММА, куди потрапили електрони, міжмолекулярні зв'язки розриваються, через що в плівці створюється приховане зображення.

На наступному етапі (рис. 4.7, в) обробляється ПММА – за допомогою проявника-розчинника засвічені ділянки ПММА видаляються. Потім шляхом гальванічного осадження металу в ПММА формується об'ємний металевий елемент (рис. 4.7, г).

Заключним етапом технологічного процесу є звільнення металу від ПММА (рис. 4.7, д).

Перевагою LIGA-технології є можливість створення елементів мікросистемної техніки великої товщини з вертикальними сторонами, що не в змозі забезпечити технології об'ємного технології на основі травлення.

Основними недоліками цієї технології є необхідність використання унікальних джерел синхротронного випромінювання і нетрадиційність технології, що пов'язана з гальванопластикою на мікрорівні. Крім того, наявність в процесі виготовлення елементів МСТ операцій мікроскладання не дозволяє використовувати LIGA-технологію для їх групового виготовлення.

4.3. Поверхнєве мікрооброблення

На відміну від об'ємного мікрооброблення, суть якого гає в пошаровому видаленні матеріалу підкладки за допомогою травлення, під час поверхневого мікрооброблення відбувається послідовне нарощування шарів матеріалу. Головною особливістю цієї технології є те, що вона сумісна з технологією побудови електронних схем.

Найчастіше як основу використовують кремнієву пластину. Типовий процес включає в себе кілька циклів нанесення на поверхню пластини тонких (від десятків нанометрів до десятків мікрометрів) структурних плівок, формування на плівках методом літографії захисного шаблону і подальшого травлення плівок, у результаті чого сукупність плівок конструкційного матеріалу набуває необхідної геометричної форми.

Як методи отримання тонких плівок в основному використовують хімічні (CVD) і фізичні (PVD) методи осадження з газової фази. Підкладка для поверхневого мікрооброблення слугує механічною основою, на яку осаджуються шари структурного і жертвовного матеріалу.

Щоб створити рухливі функціонуючі механізми, у шарах чергують тонкі плівки конструкційного матеріалу і захисні (жертвні) шари. Із конструкційного матеріалу створюються механічні елементи, а жертвний шар заповнює порожнини між ними. На останньому етапі жертвний шар видаляється селективним травленням, і конструкційні елементи набувають рухливості і функціональності.

Найбільш широко як структурний матеріал використовують полікремній, а як жертвний матеріал – двооксид кремнію SiO_2 . Це зумовлено тим, що, регулюючи температуру високотемпературного відпалу полікремнію, можна одержувати вільні від механічного напруження, або навпаки, механічно напружені шари. Механічні напруження двооксиду кремнію контролювати складно. Ось чому шар SiO_2 використовується як жертвний. Крім SiO_2 як жертвні



Рис. 4.8

шари можна використовувати такі матеріали: Si_3N_4 , GaAs, AlGaAs, Al, фосфоросилкатне скло (PSG), боросилкатне скло (BSG) тощо.

Основні етапи виготовлення електростатичного мікродвигуна, зображеного на рис. 4.8, шляхом кремнієвого поверхневого мікрооброблення показано на рис. 4.9.

1. Осадження ізолювального шару нітриду кремнію Si_3N_4 і основи з полікристалічного кремнію.



1

2. Осадження першого жертвного шару із заглибленнями для формування виступів на роторі мікродвигуна.

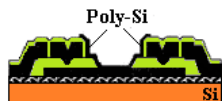


2



3

3. Осадження полікристалічного кремнію і витравлення з нього статора та ротора мікродвигуна.



4

4. Осадження другого жертвного шару, нанесення зображення центральної опори на перший та на другий жертвні шари, осадження другого шару полікристалічного кремнію і витравлення з нього конструкції центральної пори.



5

5. Травлення жертвних шарів і звільнення ротора.

Рис. 4.9

У 1992 р. розробникам MEMS пристроїв компанією *Cronos Integrated*

Microsystems Inc презентовано технологію універсального тришарового полікристалічного поверхневого мікрооброблення – MUMPs (**M**ulti-**U**ser **M**EMS **P**roduction), розраховану для багатьох користувачів. Детально етапи виготовлення того ж електростатичного мікродвигуна (див. рис. 4.8) за технологією MUMPs показано на рис.

4.10. Слід відзначити, що основні етапи поверхневого мікрооброблення (див. рис. 4.9), присутні й в технології MUMPs.

1. Формування дифузійного шару шляхом легування кремнієвої підкладки хлоридом фосфору POCl_3 ; осадження нітриду кремнію Si_3N_4 ; осадження першого шару полікристалічного кремнію Poly-Si.

2. Формування основи з плівки Poly-Si за допомогою реактивного іонного травлення.

3. Осадження першого жертвовного шару з фосфосилікатного скла.

4. Формування шляхом реактивного іонного травлення поглиблень під виступи на роторі, які запобігають злипанню ротора і основи.

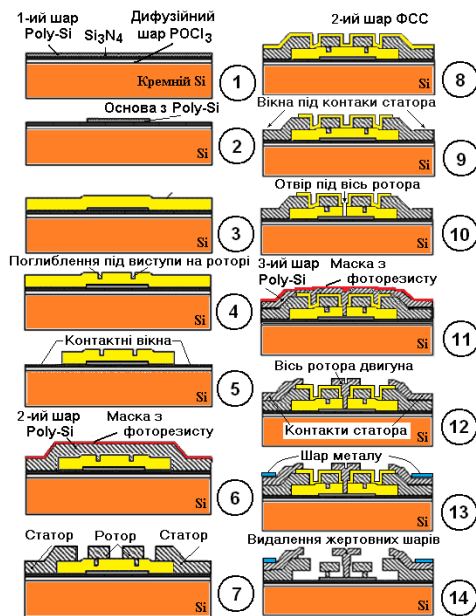


Рис. 4.10

5. Витравлювання контактного вікна до шару нітриду кремнію за допомогою реактивного іонного травлення.

6. Осадження другого шару Poly-Si; осадження жорсткої маси з фоторезисту.

7. Витравлювання вікон у масці з фоторезисту за допомогою реактивного іонного травлення; витравлювання у другому шарі Poly-Si статора і ротора мікродвигуна; видалення залишків фоторезисту.

8. Осадження другого жертвовного шару фосфосилікатного скла (0,5 мкм).

9. Витравлювання у другому жертвовному шарі контактного вікна до другого шару Poly-Si під контакти статора.

10. Витравлювання у другому і першому жертвних шарах отвору до першого шару Poly-Si (до основи) під вісь – опору для обертової частини двигуна (ротора).

11. Осадження третього шару Poly-Si; осадження жорсткої маски з фоторезисту.

12. Витравлювання вікон у масці з фосфосилікатного скла за допомогою реактивного іонного травлення; витравлювання у третьому шарі Poly-Si нерухомої осі-опори, яка центрує ротор мікродвигуна, що вільно сидить на ній, а також розташовані за периферією контакти статора; видалення залишків жорсткої маски.

13. Нанесення шару металу на контакти статора.

14. Формування остаточної структури мікродвигуна шляхом селективного травлення жертвних шарів у плавиковій кислоті (HF), що перебуває в газовій фазі, і звільнення ротора.

До поверхневого мікрооброблення належить і технологія SUMMiT (Sandia Ultra-planar, Multi-level MEMS Technology), яка являє собою чотиришаровий полікремнієвий процес стандартного поверхневого мікрооброблення. Особливістю технології SUMMiT є застосування методу планарізації (видалення нерівностей, згладжування), заснованого на хіміко-механічному поліруванні. Така операція виконується над верхніми шарами полікремнію і дозволяє зменшити похибки виготовлення інтегральних елементів МСТ, спричинених текстуруванням (шорсткістю) поверхонь верхніх шарів і зберегти планарність виготовлення елементів MEMC.

Поверхнєве мікрооброблення є нащадком технології об'ємного мікрооброблення і потребує більшої кількості технологічних операцій, що збільшує її вартість. Однак вона дає змогу створювати більш складні механічні елементи MEMC підсистем, наприклад (рис. 4.11) систему зубчастої передачі.

Після створення MEMC-структури до неї за допомогою стандартної напівпровідникової технології можуть бути додані електронні пристрої. Це дозволяє формувати MEMC-структуру в центрі кристала, електронні компоненти мікросхем – за його периферією і захистити MEMC кристаломковпачком. Саме такий підхід використано при виробництві MEMC та інтегрованих MEMC-датчиків (iMEMC) компанії Analog Devices, багатоосьових акселерометрів, висувних (pop-up) мікродзеркал, тобто систем на кристалі (System-on Chip – SoC).

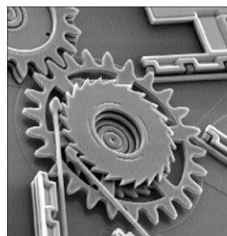


Рис. 4.11

Запитання та завдання для самоперевірки

1. У чому полягає особливість технологічних процесів виготовлення МЕМС на відміну від виробництва мікроелектронних чипів?
2. На які два основні типи можна умовно поділити технології виготовлення МЕМС? Назвіть інші популярні технології.
3. Сформулюйте поняття об'ємного мікрооброблення.
4. Який головний недолік методу об'ємного мікрооброблення?
5. Які методи виготовлення МЕМС містить технологія об'ємного мікрооброблення?
6. Прокоментуйте технологічні етапи передньостороннього об'ємного мікрооброблення.
7. Прокоментуйте технологічні етапи задньостороннього об'ємного мікрооброблення з використанням легування передньої сторони підкладки.
8. Прокоментуйте технологічні етапи задньостороннього об'ємного мікрооброблення зі створенням спеціальних керувальних отворів.
9. Прокоментуйте технологічні етапи комбінованого методу об'ємного мікрооброблення.
10. Прокоментуйте технологічні етапи LIGA-технології.
11. У чому основна відмінність поверхневого мікрооброблення від об'ємного мікрооброблення?
12. За рахунок чого створюються рухомі функціонуючі механізми у технологіях поверхневого мікрооброблення?
13. Прокоментуйте основні етапи виготовлення електростатичного мікродвигуна шляхом поверхневого мікрооброблення.
14. Прокоментуйте основні етапи виготовлення електростатичного мікродвигуна за MUMPs-технологією.
15. У чому полягає особливість SUMMiT-технології?

Розділ 5. Технології корпусування мікромеханічних систем

5.1. Системи пакування

У мікроелектронному виробництві корпусування мікросхем є заключним етапом виготовлення напівпровідникового пристрою, у якому крихтний блок з напівпровідникового матеріалу упакований для збереження. Корпусування запобігає фізичним пошкодженням та корозії. Корпусування, або пакування, підтримує і надає доступ до електричних контактів з тим, щоб підключити чип до монтажно́ї плати. Термін «корпусування» не слід плутати з електронним пакуванням, що є з'єднувальною (монтажною) операцією електронних пристроїв з іншими компонентами друкованої плати.

У системах пакування виділяють три рівні (рис. 5.1):

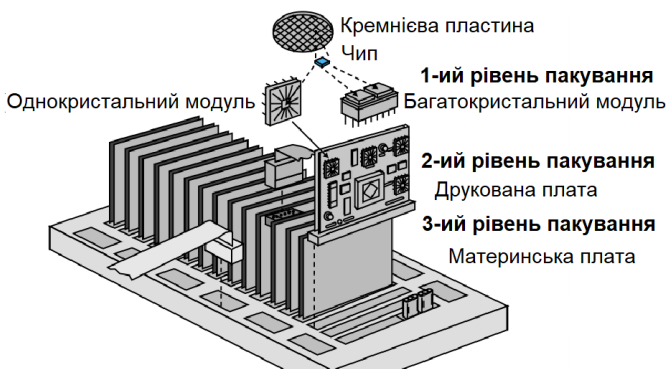


Рис. 5.1

1) корпусування окремого чипа (MEMS пристрою або складання MEMS і мікросхеми на фрагменті напівпровідникової пластини, а також міжелементні з'єднання та контактні площинки). У вітчизняній літературі поряд з терміном «чип» використовується еквівалентне йому поняття «кристал»;

2) пакувальні системи на рівні однієї друкованої плати, які містять процесор, пам'ять, інші електронні елементи і чипи;

3) пакування на материнській платі з використанням з'єднувачів і кабелів декількох друкованих плат.

На другому і третьому рівнях пакування пристроїв на основі MEMS застосовують такі самі технологічні операції, як і в мікроелектроніці. Особливістю MEMS є корпусування окремих чипів.

5.2. Технології корпусування окремого чипа

Корпусування окремого чипа – Single Chip Package (SCP) є завершальною стадією мікроелектронного виробництва, у процесі якої напівпровідниковий кристал встановлюється у корпус.

Корпусування МЕМС-структур відіграє важливу роль у процесі виробництва, впливаючи на ціну виробу. Кошторис виробництва МЕМС показує, що вартість корпусування, складання та тестування становить понад 50% (або навіть 60...80%) від вартості системи. Вимоги захисту і ціна корпусування значно варіюються з урахуванням умов експлуатації, але для всіх без винятку МЕМС потрібне особливе корпусування, яке забезпечує захист структури від зовнішніх впливів. Цілком зрозумілі, наприклад, підвищені вимоги до корпусування МЕМС, що працюють у хімічно активному середовищі (наприклад, датчики тиску палива або датчики кров'яного тиску людини). У цих випадках кремнієва підкладка МЕМС повинна бути добре захищеною.

Технологічну послідовність корпусування окремого чипа МЕМС показано на рис. 5.2.

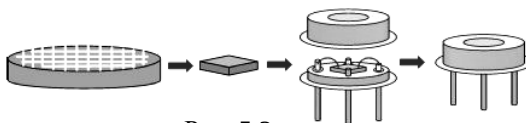


Рис. 5.2

Спочатку чип, будучи багатократно дубльованою частиною кремнієвої підкладки, акуратно вирізається з пластини. Потім чип прикріплюється до основи індивідуального корпусу, а контактні площинки чипа електрично з'єднуються з виводами корпусу. Корпуси МЕМС можуть бути повністю герметичними зазвичай металеві, металокерамічними або металоскляними (рис 5.3, *а*), або негерметичними, зазвичай пластиковими (рис 5.3, *б*). Після корпусування йде остаточне тестування виробу.

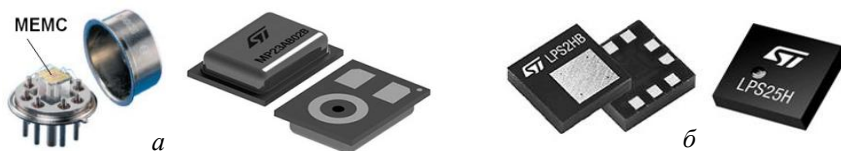


Рис. 5.3

Особливістю складання виробів у металевий (металокерамічний, металоскляний) корпус є використання для корпусування шовно-роликового або лазерного зварювання для герметизації корпусів. На цій операції дуже важливо забезпечити високий ступінь герметичності зварного шва і контрольований склад атмосфери у внутрішньому об'ємі корпусу. Якщо відповідно до технології виконується корпусування в пластиковий корпус, то шовно-роликове зварювання замінюють литтям під тиском. Для цього рухливі елементи MEMC на рівні плати закриваються ковпачком для захисту від механічних руйнувань та мікрозабруднень (рис. 5.4).

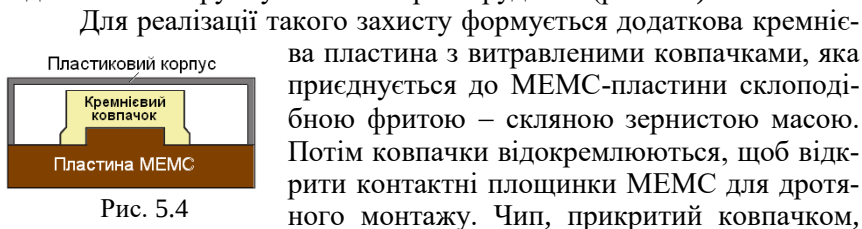


Рис. 5.4

Для реалізації такого захисту формується додаткова кремнієва пластина з витравленими ковпачками, яка приєднується до MEMC-пластини склоподібною фритою – скляною зернистою масою. Потім ковпачки відокремлюються, щоб відкрити контактні площинки MEMC для дрютяного монтажу. Чип, прикритий ковпачком, вирізається з пластини і пакується у пластиковий корпус з використанням стандартних технологій.

Кріплення чипа MEMC до основи корпусу потребує ретельної підготовки і є самостійною завданням, оскільки помилки в позиціонуванні, навіть незначне зміщення кристала від заданого положення, порушує роботу приладу. Матеріали кріплення, що сполучаються, повинні мати мінімальну різницю значень коефіцієнтів термічного лінійного розширення. Неузгодженість коефіцієнтів термічних розширень конструктивних матеріалів мікромеханічного елемента і підкладки викликає механічні напруження у структурі пристрою і знижує його надійність.

5.2.1. Монтаж чипа в корпус

Основними вимогами монтажу чипа MEMC до основи корпусу є висока надійність з'єднання, механічна міцність і в ряді випадків високий рівень передачі тепла від кристала до основи. Операцію з'єднання виконують за допомогою паяння або приклеювання.

Клейові з'єднання. Клеї для монтажу чипів можуть бути умовно поділені на дві категорії: електропровідні та діелектричні. Клеї складаються із зв'язувальної речовини і наповнювача. Для забезпечення електро- і теплопровідності до складу клею, зазвичай, вводять срібло у вигляді порошку або пластівців. Для створення

теплопровідних діелектричних клеїв як наповнювач використовують скляні або керамічні порошки.

Склеювання двох матеріалів відбувається за рахунок зчеплення плівки клею з поверхнями цих матеріалів. У результаті хімічних реакцій, що перебігають у плівці клею, остання перетворюється на тверду речовину, яка міцно з'єднує матеріали, що склеюються. Зчеплення плівки клею з поверхнею виникає не тільки внаслідок хімічних реакцій, але також у результаті виникнення міжмолекулярних і електростатичних сил між плівкою клею і поверхнями матеріалів, що склеюються.

Основні вимоги до клейових з'єднань: механічна стійкість, висока (не менше 2... 3 МПа) адгезійна міцність (міцність зчеплення) і тривала стабільність електроізоляційних властивостей під час роботи чипа в діапазоні допустимих температур.

Міцність клейового шва залежить від товщини та суцільності клейової плівки, об'ємної усадки її після склеювання, складу і структури матеріалів, що склеюються, а також від якості підготовки поверхонь склеювання. Клей мусить повністю, без пор заповнювати зазор між частинами, що склеюються. Товщина клейової плівки не повинна бути занадто великою, водночас вона повинна забезпечувати суцільність клейового шару на всій площі склеювання. Суцільність клейової плівки оптимальної товщини і проникнення клею в пори поверхонь, що склеюються, забезпечується попереднім припасуванням їх одна до одної та ретельним їх очищенням від забруднень. Основною умовою формування якісних з'єднань є повна змочуваність клеєм сторін корпусу та кристала, що з'єднується.

Для приєднання кристала в основному використовують епоксидні клеї, які для затвердіння вимагають нагрівання до температури 90... 180 °С і вище. Найчастіше застосовують ступеневий режим затвердіння клейового шва: 6...8 год за температури 120 °С, потім 4...6 годин за 150 °С. Для затвердіння клейових швів деталі, що з'єднуються, повинні перебувати під тиском (0,3 ... 3) МПа.

Клейові з'єднання мають ряд загальних недоліків:

- недостатню механічну міцність примежового шару, яка виникає в результаті порушення технології склеювання, концентрації напружень у з'єднанні через наявність пу-

стот і прихованих дефектів у вигляді тріщин, порожнин тощо у матеріалах, що склеюються. Зниження міцності може статися і внаслідок проникнення у клейовий шов води та агресивних речовин, а також через механічні та температурні впливи;

- чутливість до термоциклів, особливо під час складання матеріалів з великою різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення;
- клейові з'єднання важко, а іноді і неможливо ремонтувати, вони мають відносно невисоку стійкість до впливу динамічних навантажень циклічного характеру;
- велику тривалість часу склеювання.

З'єднання припоями. Паяння металевими припоями виконується за допомогою прокладок припою заданої форми, які розміщуються між кристалом і підкладкою. У масовому виробництві застосовують спеціалізовану паяльну пасту для монтажу кристалів.

Початковий етап процесу з'єднання припоями – термічне напилювання металевих шарів на поверхню підкладки та на основу корпусу. На основу корпусу (рис. 5.5) послідовно напилюють: шар ванадію товщиною ~ 20 нм, шар міді $\sim 0,8$ мкм, шар припою.

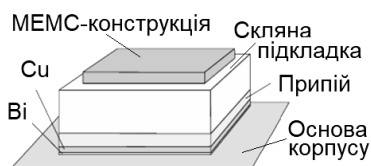


Рис. 5.5

На поверхню підкладки, наприклад скляної, наносять шар припою. Потім основу корпусу встановлюють на нагрівник, а на шар металізації (шар міді) наносять припій у вигляді порошку. На порошок установлюють чип і за допомогою спеціальної оснастки легко притискають його до основи корпусу, одночасно суміщаючи чип з площиною основи.

Конструкція нагрівається у вакуумі до температури плавлення припою, потім плавно охолоджується до кімнатної температури. Основні параметри технологічного процесу: температура – 125 ± 5 °C і час з'єднання – 15 ± 5 с.

Паяння також можна виконувати за допомогою скляних припоїв. Скляні припої – це матеріали, що складаються з оксидів металів. Вони мають хорошу адгезію до широкого спектра кераміки,

оксидів, напівпровідникових матеріалів, металів і характеризуються високою корозійною стійкістю.

Технологія паяння склом зводиться до нанесення розчину суспензії скляного порошку на очищену поверхню, стиснення з'єднувальних деталей, сушіння й подальшого оплавлення в печі.

5.2.2. Формування електричних між'єднань

Електричні між'єднання контактних площинок чипа з виводами корпусу формуються або із застосуванням розварювання дрітчастих виводів – за технологією «wire bond» (рис. 5.6, а), або за технологією «flip-chip» (рис. 5.6 б).

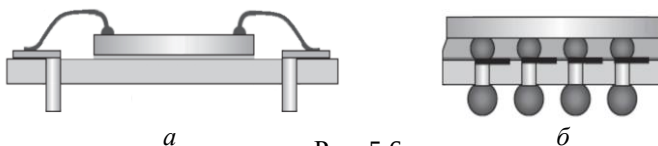


Рис. 5.6

Технологія «flip-chip» – приєднання перевернутих кристалів з кульковими виводами до основи корпусів або підкладок набула значного поширення в сучасній мікроелектроніці. Приклад лицьового боку flip-chip-виробу показано на рис. 5.7.

Кульки припою формуються методами електродітного або вакуумного наплення, заповнення готовими мікросферами або методом трафаретного друку. Кристал зі сформованими виводами перевертається і монтується на основу корпусу.



Рис. 5.7

Цей метод знімає пов'язані зі складанням обмеження для кристалів із субмікронними розмірами і дозволяє повністю автоматизувати процес складання.

Дрітчастий монтаж за технологією «wire bond» здійснюється лазерним, електроконтактним або ультразвуковим зварюванням за допомогою золотих, алюмінієвих або мідних дрітів.

5.2.3. Технологія WLP корпусування

Технологією корпусування, що протиставлена традиційному корпусуванню пристрою – корпусуванню після розрізання пласти-

ни на кристали є технологія WLP (Wafer-Level Packaging) – корпусування на рівні пластини. Тобто застосування технології WLP передбачає, що всі операції процесу корпусування виконуються до поділу пластини на чипи. Технологія WLP складається із процесів створення міжз'єднань струмопровідних ділянок, формування вер-



Рис. 5.8

хніх і нижніх зовнішніх шарів пакування, а також припаювання контактів-кульок, сформованих з припою, до чипа MEMC, який все ще перебуває у складі пластини й тільки після цього пластина розрізається на вже упаковані чипи (рис. 5.8).

Якщо розмір кристала не дозволяє розмістити необхідну кількість виводів на корпусі, то застосовується модернізована WLP технологія, за якою пластину розділюють на кристали перед корпусуванням. Потім окремі кристали розміщуються у полімерній матриці, так щоб кожний кристал був по периметру оточений полімером. Далі полімерна матриця з установленими кристалами піддається

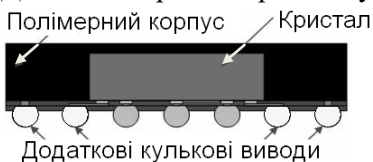


Рис. 5.9

операціям класичної WLP технології. Таким чином, ключова перевага компонентів WLP, виготовлених із застосуванням полімерних матриць полягає у розміщенні більшої кількості виводів (рис.5.9) на компоненті.

Очевидними перевагами WLP технології є:

- відсутність зовнішнього корпусу, оскільки сам чип є корпусом, захищеним від зовнішніх впливів;
- відсутність довгих вивідних контактів, через які можуть виникати паразитні ємності;
- відсутність дріт'яних мікроз'єднань, які потребують спеціального захисту від зовнішніх впливів, наприклад, заливку спеціальним розчином – компаундом.

WLP корпусування успішно справляється із захистом від усіх зовнішніх шкідливих факторів і дозволяє створювати високоякісні мікромеханічні системи. Технологія WLP корпусування для зниження вартості MEMC є найбільш перспективною.

5.3. Технології корпусування гетерогенних елементів MEMC

Сьогодні розвиваються багато альтернативних концепцій корпусування і монтажу MEMC. Серед них найбільш актуальною є концепція гетерогенної (різномірної) інтеграції механічних елементів MEMC та мікросхем керувальної електроніки – мікросхем (ASIC). Цю концепцію корпусування MEMC супроводжують два ключові поняття: система на кристалі та система в корпусі.

Визначення системи на кристалі або **System-on-Chip (SoC)** запозичене MEMC у інтегральних мікросхем з високими функціональними та робочими характеристиками. SoC на відміну від багатокристалівних модулів являють собою системи, усі елементи яких, в тому числі MEMC і ASIC, виготовлені в одному кристалі (рис. 5.10).

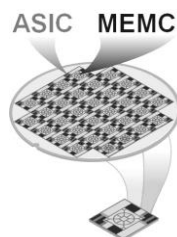


Рис. 5.10

За технологією SoC структури MEMC можуть формуватися над шарами ASIC структур (рис. 5.11, а), або всередині шарів ASIC (рис. 5.11, б), або схеми ASIC можуть оточувати MEMC структури (рис. 5.11, в).

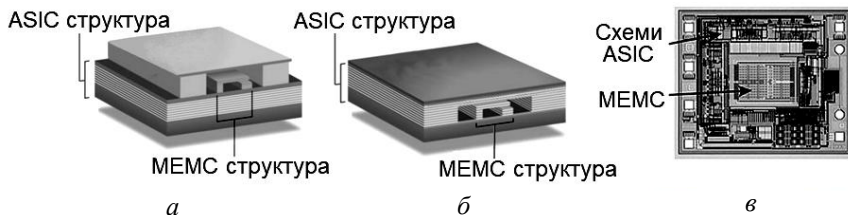


Рис. 5.11

Однак розміщення MEMC на іншому кристалі та ідея безпосереднього з'єднання кристалів з подальшим їх пакуванням у єдиний корпус є більш обґрунтованим, у тому числі, економічними, технічними і технологічними факторами.

У цьому випадку йдеться про концепцію корпусування – **System in Package (SiP)** – система в корпусі. Технологія SiP забезпечує підвищення функціональності на одиницю об'єму електронного модуля.

Однією з перших виникла концепція інтеграції на рівні пластини з дріт'яним або «flip-chip» з'єднанням кристалів і з подальшим їх пакуванням в єдиний корпус – концепція 2D SiP (рис. 5.12).

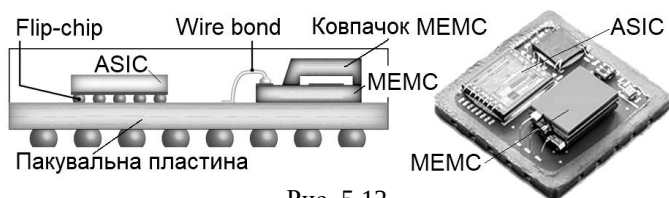


Рис. 5.12

Додатковими перевагами перед 2D SiP корпусуванням є використання для MEMC можливості 3D SiP корпусування. 3D SiP корпусування – це такий тип корпусування MEMC, який включає два або більше компонентів, стекированих (штабельованих із застосуванням електричних з'єднань) вертикально у корпусі.

Існує кілька типів тривимірних конструкцій пакування, що використовують технологію 3D SiP.

В одній з перших конструкцій стекирування корпусів – конструкцій типу «етажерка», названі як Stacked Package (укладені корпуси) або Pop (Package on Package – корпус-на-корпусі) зменшення габаритів досягається за рахунок застосування міжз'єднань і шарів, розміщених на корпусах. Укладені корпуси з'єднуються з підкладкою методом розварювання дрітчастих виводів по їх краях (рис. 5.13, а). На рис. 5.13, б показано конструкцію «етажерки корпусів» MEMC-гіроскопа і керу-

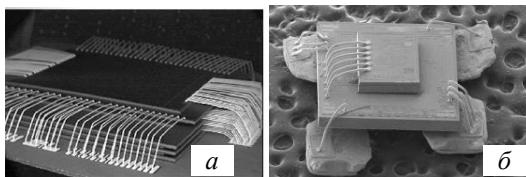


Рис. 5.13

вальної електроніки – витвір Apple- Iphone.

Конструкція PiP (Package-in-Package – корпус в корпусі) складається з двох або більше корпусів, з'єднаних разом і змонтованих таким чином, що зрештою виходить окремий корпус, що з'єднується з платою (рис. 5.14).

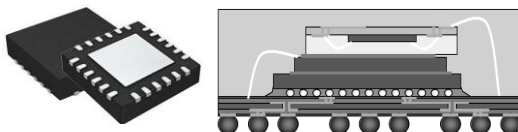


Рис. 5.14

Корпуси можуть бути безпосередньо прикріплені до підкладки (пряме компонування чипа) або спочатку упаковані в конфігурацію "корпус розміром з кристал" – технологія Chip Scale Package (CSP).

У технології CSP корпусом може слугувати захисний ковпачок-кристал, одержаний під час корпусування MEMS (рис. 5.15), або корпус інтегральної мікросхеми, або корпус наступного рівня із закінченим набором функцій. Корпуси з'єднуються між собою методом «flip-chip» або методом TSV.



Рис. 5.15

Міжз'єднання TSV (Through-Silicon Vias) формуються шляхом витравлювання перехідних отворів у шарах кристалів, що з'єднуються (див. рис. 5.16). Отвори заповнюються струмопровідним металом (найчастіше міддю). Технологія TSV дозволяє вилучити операцію розварювання з технологічного ланцюжка.

Паралельно з ідеєю укладання у трирозмірне складання корпусів виникла концепція безпосереднього з'єднання самих кристалів з подальшим пакуванням їх у єдиний корпус. Таке складання отримало назву «Stacked Die» і дозволило зекономити простір за рахунок монтажу кристалів один на одному. Конструкція Stacked Die складається з декількох кристалів, з'єднаних з підкладкою методом термокомпресійного мікрозварювання «wire bond» (рис. 5.17, а), або за допомогою технології наскрізних металізованих отворів через кремній (рис. 5.17, б) – методом TSV, забезпечивши тим самим максимально можливий натеper рівень інтеграції.

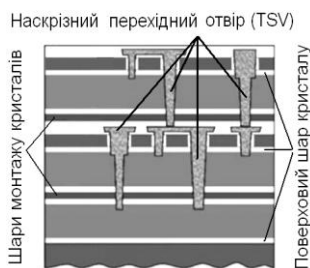


Рис. 5.16



Рис. 5.17

Між кристалами одного розміру можуть використовуватися прокладки.

Існують такі різновиди 3D-монтажу кристалів один на одному: C2W (Chip to Wafer - «кристал до пластини») і W2W (Wafer to Wafer - «пластина до пластини»).

Типовий технологічний процес підготовки пластини до 3D корпусування (рис. 5.18) з подальшим міжз'єднанням методом TSV передбачає витравлювання перехідних отворів під TSV

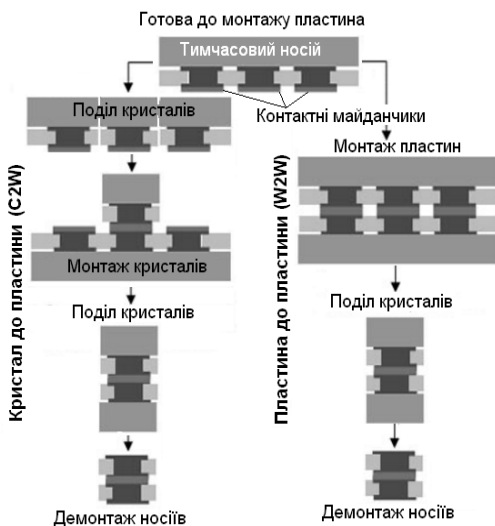


Рис. 5.18

міжз'єднання, а для розкриття «глухих» перехідних отворів виконується операція потоншення пластины. Операції потоншення передують операції монтажу на тимчасовий носій. Зі зворотного боку стоншеної пластини готують контактні площинки під складання.

Для подальшого складання кристалів за технологією C2W (рис. 5.18) готова до монтажу пластина поділяється на окремі кристали, після чого проводять монтаж придатних

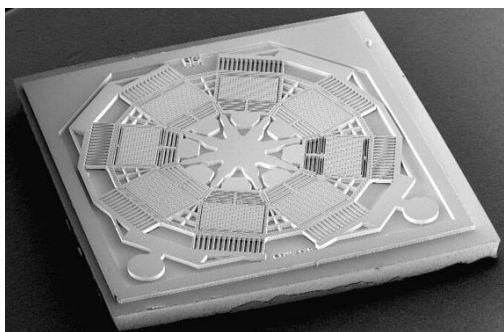
кристалів на другу пластину. У разі W2W пластини монтуються безпосередньо одна до одної і тільки після цього вони надходять на розрізання. Після розрізання тимчасові носії демонтуються.

Кожен варіант має свої переваги і недоліки. Так, наприклад, для методу «кристал до пластини» характерний більш високий коефіцієнт виходу якісної продукції, однак зі зменшенням розміру кристала та підвищенням необхідної точності монтажу метод «пластина до пластини» вважається економічно більш ефективним.

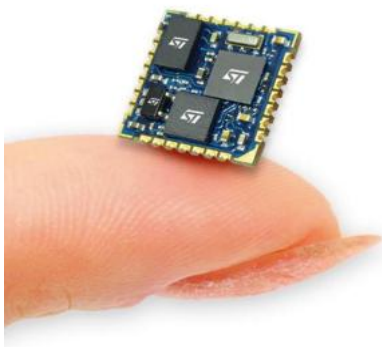
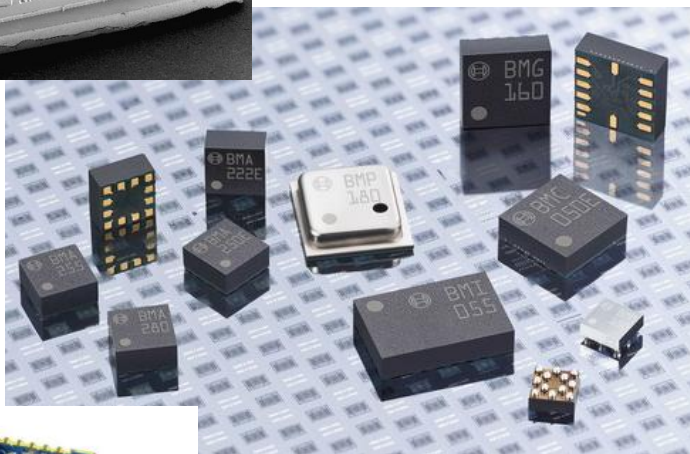
Поява перспективних МЕМС викличе потребу у складному корпусуванні, наприклад, щоб керувати газами, рідинами та наночастинками. Тому тепер в усьому світі ведуться активні дослідження щодо об'єднання технологій виробництва кристалів і корпусування.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які три рівні можна видокремити в системах пакування?
2. Прокоментуйте технологічну послідовність корпусування окремого чипа МЕМС?
3. З яких матеріалів зазвичай виготовляють повністю герметичні корпуси МЕМС?
4. Яким чином захищаються рухомі елементи МЕМС під час пакування в пластиковий корпус?
5. Які застосовують технології з'єднання чипа МЕМС з основою корпусу?
6. Назвіть загальні недоліки клейових з'єднань.
7. Прокоментуйте технологічну послідовність з'єднання чипа МЕМС з основою корпусу металевими припоями.
8. Що являє собою паяння скляними припоями?
9. За якими технологіями виконують електричні з'єднання контактних площинок чипа з виводами корпусу?
10. Що являють собою технології WLP корпусування та WLP корпусування із застосуванням полімерних матриць?
11. Які головні переваги WLP технологій?
12. Що являють собою системи SoC на відміну від багатокристальних модулів?
13. Яким чином за технологією SoC може здійснюватися гетерогенна інтеграція механічних елементів МЕМС зі схемами ASIC структур?
14. Що являє собою технологія SiP корпусування?
15. Що являє собою концепція 2D SiP корпусування?
16. Що таке 3D SiP корпусування?
17. Які різновиди 3D корпусування ви знаєте?
18. Що являє собою однокристальна інтеграція МЕМС і ASIC, відома як CSP?
19. Якими методами з'єднують компоненти під час 3D корпусування?
20. Що являє собою різновид 3D-монтажу «Stacked Die»?



Частина II



МІКРОЕЛЕКТРОННІ ДАТЧИКИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Стрімкий розвиток технології мікроелектроніки відкриває широкі можливості оснащення об'єктів ракетно-космічної, авіаційної та цивільної техніки сучасними датчиками фізичних величин, окремі з яких можна класифікувати так:

- датчики швидкості, прискорення, напрямки руху (акселерометри, гіроскопи і компаси);
- датчики сили механічної напруги та дотику (тензодатчики, тактильні чутливі елементи, п'єзоелектричні датчики сили);
- датчик температури (контактні: термопари, терморезистори, термістори, напівпровідникові; безконтактні – пірометри);
- датчик тиску (п'єзорезистивні, ємнісні, індуктивні та резонансні);
- витратоміри (теплові, ультразвукові, електромагнітні);
- акустичні датчики (резистивні, електростатичні, оптоволоконні, п'єзоелектричні та електретні);
- детектори положення, переміщень і рівня (потенціометричні, гравітаційні, ємнісні, індуктивні, магнітні, оптичні та ультразвукові);
- датчики вологості і вмісту води (резистивні, ємнісні та термісторні датчики вологості; оптичні та вібраційні гігromетри).

Використовувані до 60-х років XX століття системи вимірювання фізичних величин базувалися в основному на застарілих конструкторсько-технологічних рішеннях. У цей же час почалися науково-технічні розробки в галузі мініатюризації датчиків різного призначення. Ряд провідних фірм розробників інформаційних систем (*Draper Laboratory, Rockwell International, Systron Donner, Analog Device, SAGEM, Murata* та ін.) запатентували різні технології і технічні рішення щодо розробки мікромеханічних чутливих елементів. Ці технології мікроелектроніки дозволили почати виробництво мікромеханічних датчиків на кремнієвих кристалах, які об'єднують чутливі елементи та електронні компоненти.

Нові покоління МЕМС-датчиків фізичних величин, на основі сучасних досягнень мікроелектроніки, інтегрального мікрооброблення та мікроскладання об'ємних кремнієвих структур мікронних розмірів натеper почали широко впроваджуватися в сучасні інформаційно-вимірювальні системи.

Далі розглянемо більш детально технічні рішення з побудови чутливих елементів деяких типів датчиків фізичних величин.

Розділ 6. Датчики тиску

Принципом дії будь-якого датчика тиску є перетворення тиску, що діє на чутливий елемент, в електричний сигнал. Чутливі елементи, які входять до складу датчиків тиску, є механічними пристроями, які деформуються або пересуваються під дією зовнішнього впливу, – саме це і фіксується в процесі вимірювань.

Першу групу чутливих елементів створюють пристрої, в яких тиск перетворюється в силу, яка переміщує математичну точку її прикладання. Найпоширенішими чутливими елементами цього типу є трубка Бурдона, яка «розгинається» під дією тиску, а також сильфон і мембранна коробка, жорсткий центр яких здійснює поступальний рух.

Другу групу, яку найчастіше використовували в МЕМС-датчиках, утворюють чутливі елементи, в яких тиск перетворюється в деформацію пружної мембрани. Тут тиск залишається розподіленою силою, а чутливим елементом стає вся поверхня мембрани, яка прогинається під дією тиску.

Крім чутливого елемента, наприклад, мембрани відомої площі A , до складу датчиків тиску обов'язково входить детектор, вихідний сигнал P якого пропорційний прикладеній силі F :

$$P = \frac{dF}{dA}$$

Існує кілька методів перетворення відхилення мембрани або пластини в електричний сигнал, які описано нижче.

6.1 Тензо- і п'єзореzystивні датчики тиску

Тензо- і п'єзореzystивний принципи вимірювання тиску, засновані на зміні питомого електричного опору матеріалу вразі його деформації під дією тиску. Тензореzystивний (п'єзореzystивний) ефект виникає під час деформації через зміну міжатомних відстаней, що у свою чергу спричиняє зміну структури енергетичних зон кристала. Останнє зумовлює зміну концентрації носіїв струму (електронів), їх ефективної маси та їх перерозподіл між енергетичними максимумами в зоні провідності і мінімумами у валентній зоні. Крім того, деформація впливає на процеси розсіювання носіїв.

Термін «тензорезистивний» зазвичай вживається стосовно сенсорів, у яких пружним елементом є металева мембрана, на яку наклеюється тензоперетворювач.

Як тензоперетворювачі можуть використовуватися тонкоплівкові напівпровідникові тензорезистори, або пластини сапфіра з кремнієвими тензосхемами – структури КНС (кремній на сапфірі).

П'єзорезистивними зазвичай називають монокристалічні кремнієві сенсори, в яких пружним елементом слугує витравлена кремнієва мембрана, у поверхневому шарі якої вибірково дифузійним легуванням сформовані п'єзорезистори.

Приклад чутливого елемента тензорезистивного датчика тиску показано на рис. 6.1, *а*. Під час виготовлення чутливого елемента такого датчика на пластині сапфіра (рис. 6.1, *б*) способом епітаксії вирощується монокристалічна плівка кремнію, на якій методом іонної імплантації або дифузійним методом формується вимірювальний міст Уінстона з кремнієвих тензорезисторів.

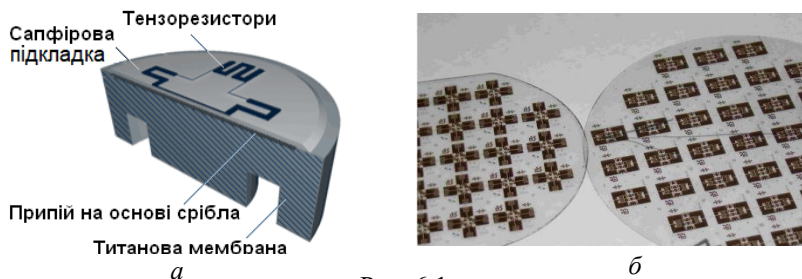


Рис. 6.1

Після розрізання пластини, окремий елемент методом вакуумного високотемпературного паяння (850 °C) з'єднується з пружною титановою мембраною датчика. Сапфір надзвичайно хімічно інертний матеріал, але за наявності титану допускає дифузію атомів срібла за вакансіями кисню у своїй кристалічній ґратці. У результаті «листовий пиріг» метал-діелектрик-напівпровідник виявляється сполученим на атомарному рівні.

Під впливом тиску на мембрану опір тензорезисторів унаслідок деформації змінюється на величину ΔR , що зумовлює зміну вихідної напруги датчика:

$$\Delta R = k\varepsilon \cdot R,$$

тут R – вихідний опір тензорезистора; k – коефіцієнт тензочутливості; ε – деформація.

Іноді замість кремнієвих тензорезисторів використовують металеві – мідні, нікелеві, залізні – які змінюють під час деформації свій опір. Однак тензочутливість у напівпровідниках у десятки і сотні разів більша ніж у металах. Крім високого коефіцієнта тензочутливості, перевагами кремнієвих тензорезисторів є їх хороші характеристики пружності.

Перевагами тензорезистивного принципу вимірювання тиску є порівняльна простота у виготовленні, невисока вартість і потенційно широкий діапазон робочих температур.

Недоліки тензорезистивних сенсорів:

- низька чутливість (у межах 1%);
- значні гістерезисні явища і нестабільність (через неоднорідність конструкції і втому металу мембрани);
- сильний вплив температури (за рахунок різниці коефіцієнтів температурного розширення елементів сенсора і зміни електропровідності кремнію);
- нелінійність.

Такий тип сенсора знайшов застосування у галузях, що потребують працездатності датчиків у жорстких умовах експлуатації (Пентагон, НАСА, атомна енергетика). Основним виробником тензорезистивних сенсорів є фірма *Sensonetics* (США). Інші провідні світові виробники тензорезистивні датчики тиску тепер майже не

випускають, а вдосконалюючи технології виробництва кремнієвих мікросхем, використовують їх у виробництві кремнієвих п'єзорезистивних датчиків тиску.

Чутливим елементом п'єзорезистивних датчиків тиску (рис. 6.2) слугує кремнієва мембрана, яка витравлена з монокристалічного кремнію і встановлена на діелектричну основу з використанням легкоплавкого скла або методом анодного зрощування. Оскільки монокристалічний кремній має абсолютні пружні властивості, у мембрані такого датчика відсутні гістерезис і повзучість навіть при високому тиску. На мембрані методом дифузії формуються п'єзорезистори, які у свою чергу створюють міст Уїнстона. Резистори розміщують

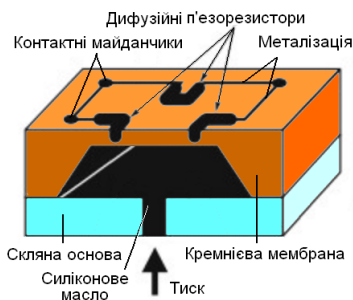


Рис. 6.2

на мембрані методом дифузії формуються п'єзорезистори, які у свою чергу створюють міст Уїнстона. Резистори розміщують

на мембрани таким чином, щоб поздовжні і поперечні коефіцієнти тензочутливості були різних знаків, тоді і зміни опорів резисторів будуть протилежними. Одні з п'єзорезисторів формуються паралельно орієнтації решітки мембрани, а другі (див. рис. 6.2) – перпендикулярно.

Деформація мембрани і як наслідок зміна опорів п'єзорезисторів призводить до розбалансу моста Уїнстона (рис. 6.3). Розбалансування лінійно залежить від ступеня деформації резисторів і, отже, від прикладеного тиску. Максимальна вихідна напруга таких датчиків становить лише кілька сотень мілівольтів, тому на виході моста зазвичай ставлять підсилювач сигналів.

Недоліки п'єзорезистивних датчиків, окрім гістерезису, здебільшого такі самі, що і тензорезистивних датчиків, але виражені в менше.

Оскільки кремнієві п'єзорезистори мають сильну

температурну чутливість, то необхідно під час розроблення п'єзорезистивних датчиків передбачити засоби температурної компенсації. Крім того, чутливість, зміщення нуля та діапазон вихідних напруг не тільки залежать від температури, але і мають технологічні відмінності від зразка до зразка. Термокомпенсування і калібрування істотно підвищують стабільність вихідних характеристик датчиків. Для діапазону температур від 0 до 85 °C достатньо схеми з простим терморезистором R_t (рис. 6.4), сформованим на тому ж кристалі, але для більш широкого діапазону температур, наприклад 40...125 °C, потрібна і більш складна схема компенсації.

Така додаткова компенсація реалізовується зовнішніми схемами. Ці датчики, крім чутливих елементів додатково містять убудовані в кристал тонкоплівкові термістори, які калібровані за допомогою лазерної пригонки з тим щоб забезпечити відносно стабільний вихідний сигнал.

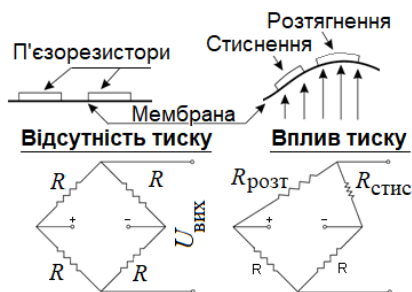


Рис. 6.3

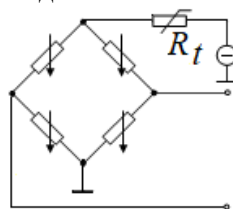


Рис. 6.4

Існує кілька способів виробництва кремнієвих датчиків тиску з однаковою тензочутливістю.

Традиційний спосіб передбачає використання кремнієвої підкладки, в якій методом анізотропного травлення формується мембрана. Як жертвні шари застосовуються SiO_2 , для формування захисного шару з нижнього боку підкладки – SiN_4 . Кінцева товщина діафрагми дорівнює приблизно 30 мкм.

На мембрані створюється епітаксialний шар n -типу для забезпечення ізоляції. Далі, методом іонної імплантації або дифузійним методом формуються p -резистори.

У зоні підкладки навколо діафрагми формуються інші елементи схеми датчика, які, зокрема, використовуються для температурної компенсації.

Ще один спосіб виготовлення діафрагм (рис. 6.5) для датчиків тиску ґрунтується на методі сплавлення двох підкладок з монокристалічного кремнію.



Рис. 6.5.

Пірамідальна порожнина за розміром діафрагми формується в нижній закріпленій підкладці методом анізотропного травлення кремнію. Верхня підкладка складається з кремнію p -типу з нанесеним епітаксialним шаром n -типу. Методом сплавлення вказані підкладки з'єднуються одна з одною. Потім видаляється частина верхньої підкладки контрольованим травленням, до тонкого шару з монокристалічного кремнію, і шар, що залишився, утворює діафрагму датчика.

Після цього методом іонної імплантації формуються резистори, а травленням робляться контактні отвори. Нижню підкладку шліфують до необхідної товщини пристрою (близько 140 мкм) і заземлюють. Такий датчик має значно менші розміри за традицій-

ний. За таких самих розмірів діафрагми і товщини кристала, датчик, отриманий методом сплавлення, майже в два рази менший.

Мікромеханічні датчики тиску виготовляють двох видів: диференціальні та абсолютні. Базові корпуси датчиків абсолютного та диференціального тиску ідентичні. Розглянемо будову базового корпусу детальніше.

Основним елементом датчика тиску є кристал (рис. 6.6), на якому міститься кремнієва діафрагма з чутливим елементом – імплантованим тензорезистивним ланцюжком. Відмінність між кристалами датчиків диференціального

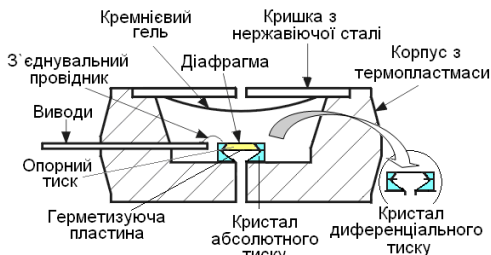


Рис. 6.6

та абсолютного тиску (рис. 6.6) полягає в тому, що останній не має отвору в нижній – герметизуючій кремнієвій пластині, а порожнина, витравлена над пластиною, містить вакуум – опорний тиск. Внутрішня частина корпусу заповнюється силіконовим гелем, який ізолює поверхню кристала та місця з'єднань, але дозволяє тиску впливати на діафрагму; так здійснюється захист пристрою від шкідливого впливу навколишнього середовища.

Як приклад на рис. 6.7 показано інтегральний п'єзорезистивний MEMC-датчик вимірювання барометричного тиску BMP180. Кристал датчика тиску міститься на кремнієвому кристалотримачі, приклеєному до корпусу датчика.

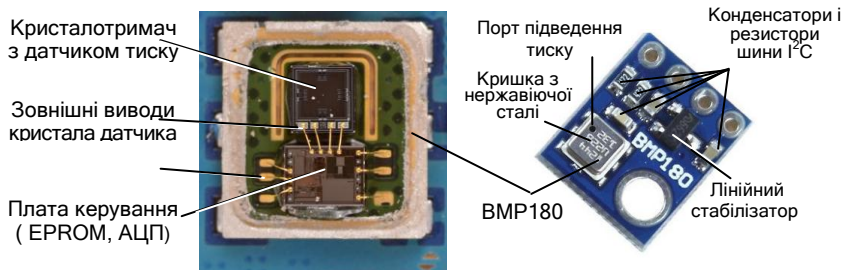


Рис. 6.7

Пластмасовий корпус з одним або двома портами підведення тиску закритий кришкою з нержавіючої сталі. У корпус впресовані

зовнішні виводи, які за допомогою золотих провідків з'єднуються з рамкою виводів кристала датчика тиску.

Датчик калібрується і має схему температурної компенсації. Індивідуальні калібрувальні коефіцієнти закладені у вбудовану пам'ять датчика. Датчик додатково містить схему керування та підсилювач вихідного сигналу, що дозволяє підключити його до входу АЦП датчика.

Крім тиску, датчик може видавати інформацію про температуру навколишнього середовища.

На платі VMP180 (рис. 6.7), крім датчика міститься лінійний стабілізатор напруги з конденсаторами і резистори підтягання живлення шині I²C.

Деякі з корпусів п'єзорезистивних датчиків тиску показано на рис. 6.8, а упакований тензорезистивний сенсор – на рис 6.9.

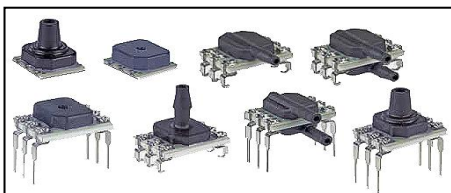


Рис. 6.8



Рис. 6.9.

Корпуси датчиків можуть призначатися як для приєднання до рознімачів, так і для установлення на друковану плату.

6.2. Ємнісні датчики тиску

У ємнісних датчиках деформації мембрани під дією тиску перетворюються в зміну ємності конденсатора, одна з обкладинок якого і є пружною мембраною, що у свою чергу, викликає зміну відповідного електричного сигналу. Ємнісну комірку датчика тиску фірми *Rosemount* зображено на рис. 6.10.

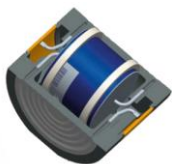


Рис. 6.10

Таке рішення є єдиною розробкою ємнісного сенсора, що випускається у промислових масштабах. Схему перетворювача *Rosemount* зображено на рис. 6.11.

Ємнісний перетворювач являє собою конденсатор, утворений діелектричною оболонкою сенсора, уміщеною всередину міцного металевих корпусу 1, тонкоплівковими металевими електродами

2, які виконують функцію обкладинок конденсатора, і пружною металевою або керамічною сенсорною мембраною 3. Таким чином, між металевою мембраною і електродами, розміщеними по обидва боки від неї, формуються дві ємності конденсаторів.

Простір між мембраною і електродами заповнений розділовою рідиною (силіконовим маслом) 5, яка слугує для передачі тиску на мембрану і одночасно для збільшення ємності конденсатора. Вимірювані тиски P_1 , P_2 передаються через розділювальні мембрани 4 і розділювальну рідину до сенсорної мембрани 3, розміщеної в центрі ємнісної комірки. Дія тиску спричиняє зміну положення вимірювальної мембрани.

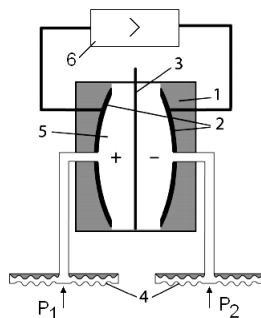


Рис. 6.11

Зміна положення мембрани спричиняє появу різниці ємностей між вимірювальною мембраною і пластинами конденсатора 2, розташованими по обидва боки від вимірювальної мембрани. Ця диференційна зміна ємностей комірки під дією тиску перетворюється і обробляється в електронному модулі датчика 6, підключеному до обкладинок сенсора. Крім того, сенсор зазвичай містить ще термоперетворювач (на рисунку не показано).

Перевагами ємнісного принципу вимірювання є порівняно проста конструкція сенсора і досить висока чутливість.

Однак ємнісні сенсори мають досить істотні недоліки і обмеження, які впливають з базових законів фізики і є до кінця непереможними навіть за рахунок удосконалення конструкції, матеріалів і технології виготовлення. Такими недоліками є:

- нелінійний вихідний сигнал сенсора на відміну від лінійної деформації діафрагми;
- значний гістерезис (через неідеальні пружні властивості мембрани);
- сильний вплив статичного тиску (через зміни діелектричної проникності рідини, що заповнює сенсор);
- істотний вплив температури (за рахунок температурного розширення елементів сенсора);
- недостатня стабільність (через втому матеріалу мембрани);
- чутливість до вібрації (резонансна частота коливань мембрани перебуває в межах спектра промислових вібрацій).

Частина цих недоліків (нелінійність і вплив температури) компенсується в сучасних серійних датчиках шляхом калібрування датчиків на заводі-виробнику з подальшим розрахунком і прошиванням таблиці поправкових коефіцієнтів у пам'ять мікропроцесорного електронного модуля.

Інші недоліки (гістерезис, дрейф нуля, залишковий вплив статичного тиску, чутливість до вібрації) не можуть бути компенсовані калібруванням. Щоб зменшити ці недоліки, виробники застосовують сучасні прогресивні матеріали для центральної мембрани сенсора, а також різні варіанти конструкції сенсора. Однак кардинальні рішення, що усувають зазначені недоліки, неможливі в принципі, оскільки ці недоліки закладені в самому ємнісному принципі вимірювання.

Також слід зазначити, що датчики тиску на основі ємнісної комірки фірми *Rosemount* можна віднести до МЕМС-датчиків велими умовно.

6.3. Резонансні датчики тиску

У вимірювальних перетворювачах, заснованих на явищі механічного резонансу, збуджуються коливання чутливого елемента з резонансною частотою, яка визначається властивостями матеріалу та геометрією елемента. Під дією вимірюваної фізичної величини змінюється геометрія чутливого елемента і як наслідок частота і (або) амплітуда резонансних коливань, за якими кількісно оцінюють вимірювану величину.

Резонансний принцип використовується в датчиках тиску на основі віброуючого циліндра, струнних датчиках, кварцових датчиках, резонансних датчиках на кремнії.

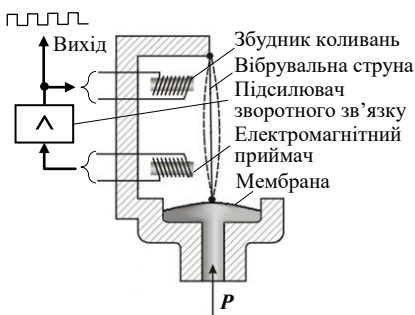


Рис. 6.12

Принцип дії резонансних чутливих елементів найбільш наочно виражений у струнних датчиках, що використовують ефект зміни частоти коливань струни під дією сил розтягування.

У струнних датчиках тиску (рис. 6.12), які не є мікромеханічними, деформація мембрани через

дію зовнішнього тиску приводить до зміни довжини з'єднаної з мембраною струни, яка вводиться в коливання електромагнітним збудником. Зміна довжини струни зумовлює зміну частоти її коливань. Контур зворотного зв'язку (від приймача до збудника) підтримує безперервні коливання струни на резонансній частоті, величина якої залежить від вимірюваного тиску.

Резонансні МЕМС-датчики тиску можуть будуватися на кварцових резонаторах (рис. 6.13). Принцип роботи кварцового резонатора заснований на п'єзо-електричному ефекті та явищі механічного резонансу. Кварцовий резонатор являє собою сплюснений кристал, захищений герметичною капсулою і вбудований в кремнієву мембрану. Збудження кварцового резонатора змінною напругою резонансної частоти викликає у ньому завдяки п'єзоелектричного ефекту механічні коливання. Механічні

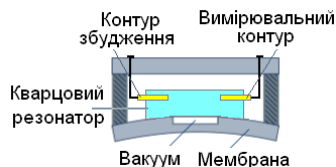


Рис. 6.13

коливання кристала у результаті зворотного п'єзоелектричного ефекту створюють в зовнішньому контурі збудження додаткову протиелектрорушійну силу. Підбираючи параметри зовнішнього контуру збудження (змінюючи ємність конденсаторів або індукційних котушок), можна домогтися того, що частоти коливань електричного сигналу і кристала збігаються – настає резонанс.

У результаті зміни тиску мембрана прогинається, кристала резонатора деформується і як наслідок змінюється його частота коливань. Механічні коливання резонатора вловлюються, наприклад, тензорезисторами вимірювального контуру, розташованими на резонаторі, і перетворюються в коливання електричного струму. При цьому частота коливань резонансного контуру прямо пропорційна величині прикладеного тиску.

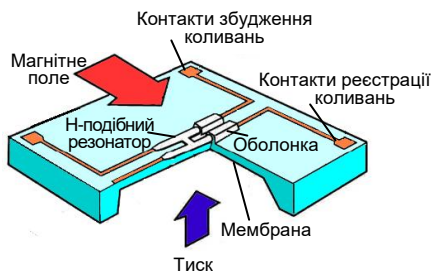


Рис. 6.14

Подальшим розвитком резонансних МЕМС-датчиків тиску, є розроблені фірмою *Yakogawa* датчики (рис. 6.14) з резонаторами Н-подібної форми, витравленими в кремнієвій підк-

ладці за допомогою рідинного анізотропного травлення. Підтравлена кремнієва підкладка з Н-подібним резонатором відіграє роль мембрани.

Сенсор являє собою двоконтурний резонатор, що складається з двох балок розміром кілька десятків мікронів, сполучених перемичкою (Н-подібна форма) і виконаних у вигляді єдиного монокристала кремнію. Одна з балок слугує для збудження коливань, друга – для реєстрації. Для підвищення добротності коливань і збільшення рівня вихідного сигналу резонатор поміщений у вакуумну порожнину.

У технології формування резонаторів у вакуумованій капсулі на мембрані використовуються послідовно виконувані процеси епітаксiального нарощування і селективного травлення. Високий рівень вакууму в капсулі досягається за рахунок високотемпературного відпалу в середовищі чистого азоту, який призводить до дифузії водню і залишкових газів з капсули.

Принцип роботи перетворювача тиску такий. Відповідно до принципу електромагнітної індукції збудження коливань і перетворення частоти механічних коливань в електричний сигнал відбуваються шляхом поміщення резонаторів у постійне магнітне поле і пропускання змінного електричного струму крізь тіло резонатора в контурі збудження.

За рахунок п'єзоелектричного ефекту, який притаманний кремнію, балка збудження починає коливатися. Коливання через зворотного п'єзоелектричного ефекту у вимірювальному контурі генерується синусоїдальна змінна напруга на власній частоті резонатора, яка посилюється і повертається назад на вхід схеми, що зумовлює саморезонанс (автоколивання) системи.

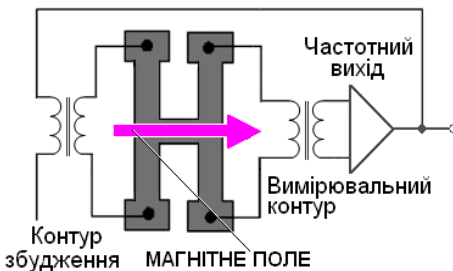


Рис. 6.15

лює саморезонанс (автоколивання) системи.

Зворотний зв'язок контуру збудження за вимірювальним контуром (рис. 6.15) забезпечує відповідність частоти електричних коливань резонансній частоті механічних коливань Н-подібних балок, тобто формує резона-

нський контур. Залежно від величини прикладеного тиску мембрана деформується, резонатор розтягується або стискається, у результаті чого частота його власних механічних коливань змінюється. При цьому на виході чутливого елемента формується сигнал, частота якого пропорційна величині вимірюваного тиску.

Перевагою резонансних датчиків є висока точність і стабільність характеристик, яка залежить від якості використовуваного матеріалу. Похибка датчиків становить не більше ніж 0,01%, включаючи вплив нелінійності, повторюваності, гістерезису, а стабільність вихідного сигналу протягом 10 років – близько 0,1%.

Як недоліки можна вважати індивідуальну характеристику перетворення тиску, значний час відгуку, неспроможність проводити вимірювання в агресивних середовищах без утрати точності показань приладу.

6.4. Індуктивні датчики тиску

Досить добре відомий принцип роботи індукційного датчика тиску показано на рис. 6.16. Чутлива частина датчика складається з Е-подібної пластини, у центрі якої міститься котушка, і чутлива до тиску мембрана, виготовлена з магнітопровідного матеріалу. Мембрана розміщується на невеликій відстані від краю пластини. Підключення котушки до джерела струму, створює магнітний потік, який проходить через пластину, повітряний зазор і мембрану. Магнітна проникність зазору приблизно в тисячу разів менша за магнітну проникність пластини і мембрани. Тому навіть невелика зміна зазору через деформацію мембрани тягне за собою помітну зміну індуктивності котушки.

Однак в індукційних МЕМС-датчиках тиску реалізується спосіб, що ґрунтується на реєстрації вихрових струмів (струмів Фуко). Датчики цього типу (рис. 6.17) містять генера-

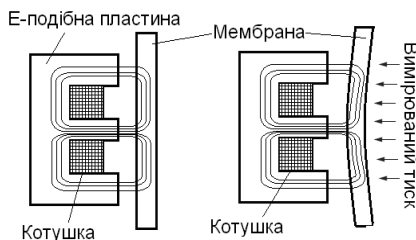


Рис. 6.16



Рис. 6.17

тор магнітного поля у вигляді рухомої котушки індуктивності, з'єднаної з мембраною датчика, і котушки реєстрації, за допомогою якої визначається величина індукції вторинних магнітних полів. Котушки ізолювані між собою металевим екраном. Рухома котушка-генератор створює магнітне поле, яке, пронизуючи металевий екран, породжує в його об'ємі вихрові струми (струми Фуко), які, у свою чергу, створюють вторинне магнітне поле. Параметри вторинного поля фіксуються котушкою-реєстратором, і на основі цих параметрів обчислюється відстань до рухомої котушки-генератора, тобто величина зміщення мембрани, оскільки чим екран ближче до генератора, тим більший магнітний потік буде пронизувати металевий екран, що, у свою чергу, підсилить вихрові струми та індукцію вторинного магнітного поля.

Електричний сигнал змінного струму генерується у котушках таким чином, що заряд і розряд котушок відбуваються через однакові проміжки часу. Зсув характеристик котушки, що реєструє параметри вторинного поля, дає змогу перетворити тиск у стандартизований сигнал за своїми параметрами прямо пропорційний прикладеному тиску.

Можливі геометрії котушок можна поділити на дві категорії: планарні (плоскі) спіральні одно- або багат шарові котушки, що створюють вертикальний магнітний потік (рис. 6.18, *а*) і тривимірні гвинтові або меандричні котушки, що створюють горизонтальне магнітне поле (рис. 6.18, *б*).

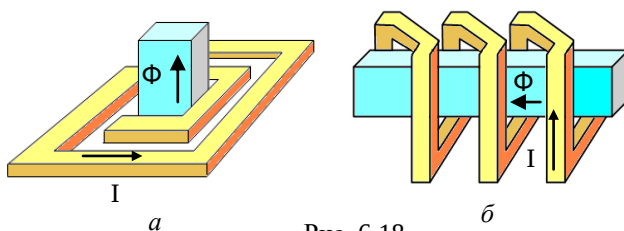


Рис. 6.18

Для таких датчиків розроблено спеціальні технології виготовлення мікрокотушок. Процес виготовлення мікрокотушок містить такі кроки: глибока УФ-літографія, гальванічне нанесення міді (провідної структури), нікелю (магнітної структури) і полімерної ізоляції, вирівнювання проміжних шарів. Використання адитивних

процесів із застосуванням глибокої УФ-літографії і гальванопокриттів дозволяє формувати мікроструктури висотою десятки мікронів. Структуру плоскої мікрокотушки, підвішеної над підкладкою показана на рис. 6.19, *а*, а структури об'ємних мікрокотушок – на рис. 6.19 *б, в*.

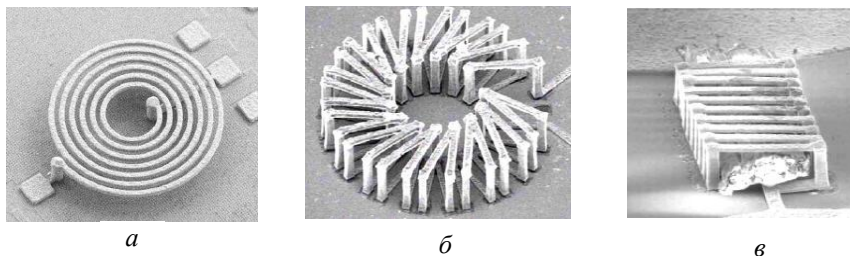


Рис. 6.19

Об'ємні котушки виконано послідовним складанням окремих частин витків – вирощуванням на першому етапі вертикальних стрижнів витків з використанням в'язкого резисту і подальшого формування верхньої частини витка (перемички).

Чутливість датчиків може бути істотно підвищено використанням котушок з магнітним'яким сердечником, незважаючи на додаткові втрати від вихрових струмів у провідному магнітному матеріалі (рис. 6.19, *в*).

Перевагою індукційних датчиків є можливість вимірювання низьких надлишкових і диференціальних тисків, досить висока точність і незначна температурна залежність. Однак індукційний датчик чутливий до магнітних впливів, що пояснюється наявністю котушок, у яких під дією зовнішніх магнітних полів викривлюється власне магнітне поле.

Крім розглянутих принципів побудови датчиків тиску, існують й інші, наприклад оптичні датчики тиску оптоелектронного та оптоволоконного варіантів їх конструктивного виконання, датчики тиску на основі поверхневих акустичних хвиль, магнітометричні датчики тиску тощо. Проте найбільш поширеними поки залишаються п'єзорезистивні та резонансні датчики тиску.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які чутливі елементи датчиків тиску найчастіше використовуються в МЕМС-датчиках?
2. На чому ґрунтуються тензо- і п'єзорезистивні принципи вимірювання тиску?
3. До яких датчиків тиску вживається терміни «тензорезистивний», а до яких «п'єзорезистивний»?
4. Як формуються тензоперетворювачі в тензорезистивних датчиках тиску і яким чином вони з'єднуються з металевою мембраною?
5. Із якого матеріалу формується мембрана в п'єзорезистивних датчиках тиску?
6. У чому головна перевага п'єзорезистивних датчиків тиску перед тензорезистивними?
7. Прокоментуйте дві технології виробництва п'єзорезистивних датчиків тиску.
8. У чому відмінність між кристалами датчиків диференціального і абсолютного тиску?
9. Як враховуються індивідуальні відмінності п'єзорезистивних датчиків тиску?
10. Що являє собою ємнісний перетворювач датчика тиску?
11. Які істотні недоліки і обмеження, що впливають з базових законів фізики, притаманні ємнісним сенсорам?
12. Прокоментуйте принцип дії резонансних чутливих елементів на прикладі струнного датчика тиску.
13. Що являє собою кварцовий резонатор резонансного датчика тиску та з якого матеріалу виготовлений резонатор Н-подібної форми в МЕМС-датчику тиску?
14. Прокоментуйте принцип дії датчика тиску з резонатором Н-подібної форми. Яку функцію виконує зворотний зв'язок контуру збудження за вимірювальним контуром?
15. Навіщо резонатор резонансного МЕМС-датчика тиску поміщують у вакуумовану порожнину?
16. Наведіть приклади принципів дії індукційних датчиків тиску.
17. Які категорії геометрії мікрокотушок використовують в індукційних МЕМС-датчиках тиску?

Розділ 7. Мікровитратоміри

Існує багато галузей промисловості, техніки та комунального господарства, в яких необхідний контроль витрати тієї чи іншої газової суміші або рідини. Прикладами можуть бути облік витрат побутового газу, рідкого вуглеводневого палива, гарячої та холодної води, газова хроматографія, різні виробничі процеси, що відбуваються у середовищі інертних газів (азот), а також контроль витоків повітря в системах телекомунікаційних кабелів зв'язку, які перебувають під надлишковим тиском. Натепер на світовому ринку продається близько 40 млн витратомірів на рік. Найбільш широко застосовують такі методи контролю витрат газових і рідких середовищ: метод змінного перепаду тиску; діафрагмовий метод; метод постійного перепаду тисків (ротаметри); тахометричний метод (турбінні витратоміри); гідродинамічний частотний метод (вихрові витратоміри); тепловий метод (датчики масової витрати) тощо. Ці методи відомі давно і визнані класичними. Однак нові технологічні процеси виробництва прецизійних напівпровідникових пристроїв, хімічних і фармацевтичних препаратів, а також необхідність у вдосконаленні інструментарію для проведення біомедичних досліджень потребують створення мініатюрних витратомірів на основі MEMS технологій.

Найперспективнішими щодо комерціалізації є розроблення і впровадження теплових мікромеханічних витратомірів, що мають плівкову структуру і виготовляються із застосуванням групових технологій кремнієвої мікромеханіки.

У теплових витратомірах вимірювання виконують або на основі вимірювання конвективних втрат теплоти нагрітого тіла, поміщеного в потік рідини або газу – термоанемометри (рис. 7.1, а, витратомір TFG-H), або за перенесенням теплової енергії між двома розташованими вздовж потоку точками – калориметричні витратоміри. На рис. 7.1 б показано витратомір стисненого повітря PF2A7.



Рис.7.1

Теплові витратоміри належать до класу прямих вимірників масових витрат рідин і газів, тобто середовищ зі змінною густиною за зміни температури та/або тиску.

Принцип вимірювання масових витрат за виміром конвективного теплоперенесення базується на законі Кінга:

$$h = A + B(\rho V_f)^C, \quad (7.1)$$

де h – коефіцієнт теплопередачі тіла, що нагрівається і перебуває в термодинамічній рівновазі з навколишнім середовищем; A , B , C – константи, які визначаються емпірично (у процесі калібрування витратоміра); ρV_f – масова швидкість потоку (кількість рідини, що протікає за одиницю часу через одиницю площі), яка характеризує масову витрату $G = \rho V_f S$ (S – площа перетину потоку).

Оскільки електрична потужність, яка підводиться до тіла, що нагрівається, у рівноважному стані дорівнює втраті теплової енергії Q під час охолодження тіла молекулами оточуючого його середовища, то

$$I^2 R = Q = h \Gamma (T - T_f), \quad (7.2)$$

де I – струм; R , T – опір та температура тіла, що нагрівається, відповідно; Γ – площа поверхні нагріву; T_f – температура потоку.

Зі співвідношень (7.1) і (7.2) видно, що швидкість масового потоку ρV_f і відповідно масова витрата є функцією двох змінних – температури потоку та температури тіла, що нагрівається:

$$\rho V_f = f(T, T_f).$$

7.1. Термоанемометричний МЕМС-витратомір

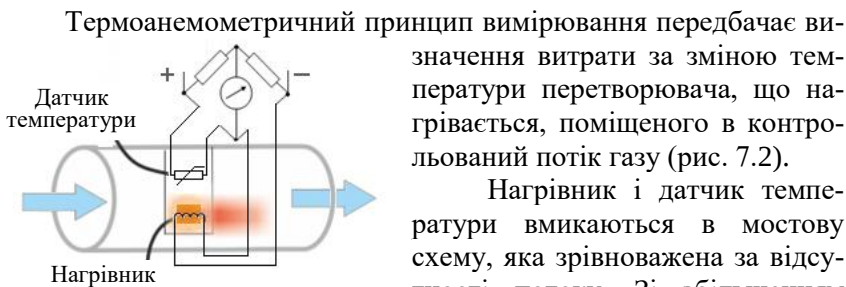


Рис.7.2

Термоанемометричний принцип вимірювання передбачає визначення витрати за зміною температури перетворювача, що нагрівається, поміщеного в контрольований потік газу (рис. 7.2).

Нагрівник і датчик температури вмикаються в мостову схему, яка зрівноважена за відсутності потоку. Зі збільшенням швидкості потоку нагрівник охолоджується і міст розбалансується. Охолоджувальний ефект речо-

дується і міст розбалансується. Охолоджувальний ефект речо-

вини, яка протікає через нагрівник, характеризує масову витрату, тобто завдяки зміні через охолодження опору нагрівального перетворювача на покажчику, увімкненому в діагональ мостової схеми, відображається масова витрата речовини.

Охолодження нагрівника залежить від швидкості потоку газу, фізичних властивостей газу (теплопровідності, температури та густини) і від різниці температур перетворювача та газу.

Відомі два методи термоанемометричного вимірювання витрати:

Метод постійного струму. Струм (або напруга) перетворювача, що нагрівається, наприклад дроту або металеві плівки, підтримується постійним і вимірюється зміна опору, яка викликана його охолодженням. Параметри та живлення мостової схеми (див. рис. 7.2) підбираються так, щоб при нульовій швидкості потоку вона перебувала у рівновазі. Відхилення стрілки індикатора слугує мірою швидкості потоку.

Метод постійної температури. Опір охолоджуваного контрольованим потоком перетворювача підтримується постійним шляхом регулювання напруги нагріву (напруги живлення мостової схеми). Зміна напруги (сили струму) сприймається в блоці керування і є вимірюваним параметром для визначення витрати повітря. Датчик температури слугує для того, щоб температура потоку повітря не спотворювала результати вимірювань.

За таким принципом працюють датчики серій FS5 і FS7. Конструкцію чутливого елемента таких витратомірів показано на рис. 7.3. На керамічну підкладку з діоксиду цирконію наносяться струмопровідні доріжки – платинові мікронагрівник і датчик температури, між якими передбачено з'єднання. Уся конструкція покрита тонким ізолювальним шаром зі скла.



Рис.7.3

Анемометрична схема вимірювань придатна для реєстрації потоків від $0,2 \text{ м}^3/\text{год}$. Отже, цей тип вимірювання дає змогу вимірювати значні витрати газу в побутових і промислових магістралях. Однак така система не дозволяє точно визначати малі зміни витрат, які можуть бути зумовлені течами в системі або появою мікротріщин. У таких випадках використовується калориметрична схема вимірювання витрат.

7.2. Калориметричний MEMС-витратомір

Калориметричний принцип вимірювання ілюструється схемою, наведеною на рис. 7.4.

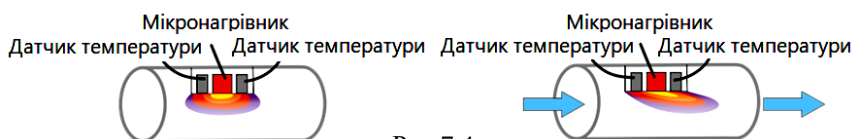


Рис.7.4

Калориметричний датчик складається з трьох елементів – мікронагрівника і двох датчиків, що вимірюють температуру до і після нього. У відсутності потоку тепла пляма, що випромінюється нагрівником, нерухома, тому справа і зліва від нагрівника середовище має одну і ту ж температуру. Із виникненням потоку тепла пляма «зсувається» відповідно до напрямку та швидкості потоку. Таким чином, за відомих параметрів труби і характеристик середовища швидкість потоку може бути виміряна за різницею показів датчиків.

Зазвичай чутливий елемент калориметричного MEMС-витратоміра виготовляється у вигляді тонкоплівкового термоанометра (рис. 7.5).

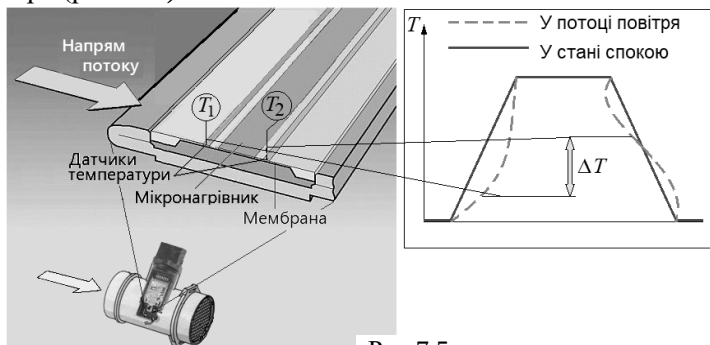


Рис.7.5

Під час обтіканні діафрагми потоком газу, що нагрівається мікронагрівником у вигляді центрального резистора, відбувається зміна температурного розподілу по плівці діафрагми. Розподіл температури по діафрагмі реєструється двома терморезистивними датчиками температури, які встановлюються симетрично до і після мікронагрівника (точки вимірювання T_1 і T_2). За відсутності потоку повітря (у стані спокою) температурна характеристика (рис. 7.5) однакова для кожної сторони вимірювальної зони. Як тільки потік повітря починає обтікати чутливий елемент датчика, розподіл температури по діафрагмі змінюється. Із боку входу повітря температурна характеристика є більш крутою, оскільки вхідне повітря, що обтікає цю поверхню, охолоджує її.

Зміна в температурному розподілі (ΔT) приводить до перепаду температур між точками вимірювання T_1 і T_2 . Різниця температур, таким чином, є мірою масової витрати повітря і при цьому вона не залежить від абсолютної температури потоку повітря. Крім цього, різниця температур є спрямованою. Це означає, що масовий витратомір не тільки реєструє кількість вхідного повітря, але також визначає його напрям.

Завдяки тонкій мікромеханічній діафрагмі датчик має дуже високу динамічну чутливість (<15 мс), що дуже важливо у випадку значних пульсацій вхідного повітря.

Різниця опорів у точках вимірювання перетворюється вбудованим у датчик обчислювальним контуром в напругу, пропорційну масовій витраті повітря.

У чутливий елемент (рис. 7.6) може також бути вмонтований додатковий компенсаційний датчик температури. Він умикається у коло нагрівального елемента і в калориметричному режимі підтримує сталість температури нагрівання мікронагрівника при його охолодженні у рухомому потоці (хоча це не обов'язково).

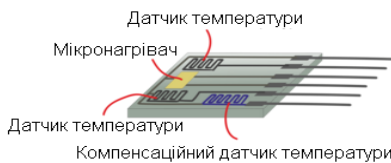


Рис.7.6

Діапазон калориметричного режиму вимірювань витрати обмежується самим принципом вимірювання – за певної швидкості потоку теплова пляма «зсувається» надто далеко і різниця показів правого і лівого датчиків уже не дозволяє судити про швидкість потоку. Це властивість калориметричних датчиків легко обходить-

ся шляхом перемикання витратоміра на роботу в термоанемометричному режимі, використовуючи нагрівник і необов'язковий у калориметричному режимі компенсаційний датчик температури.

Технології створення мікросистемної техніки дають змогу виготовляти тонкі багат шарові мембрани витратомірів груповим способом. Формування зображення на функціональних шарах виконується за допомогою фотолітографії з роздільною здатністю близько 0,6 мкм. Термокомпенсований діелектричний шар, на який потім напилюються терморезистори, формується за допомогою термічного окислення і піролітичного осадження шарів оксиду та нітриду кремнію. Для створення терморезисторів використовується процес магнетронного напилювання платини, що дозволяє формувати шари товщиною близько 0,3 мкм. Діелектрична мембрана утворюється за рахунок локального витравлювання кремнію під термокомпенсованим діелектричним шаром. Товщина шарів, що утворюють мембрану, підбирається так, щоб забезпечити мінімальні теплові втрати через підкладку і мінімальний тепловий зв'язок між терморезисторами. Наприкінці технологічного циклу кремніє-



а



б

Рис.7.7

ний витратомір показано на рис. 7.7, б.

Технологічна схема виготовлення терморезисторів для рідких середовищ така сама, як і для газових потоків, за винятком захисного покриття платинових резисторів. Крім терморезисторів як детектори температури можуть використовуватися термопар.

Покази теплового витратоміра залежать від орієнтації терморезисторів відносно потоку. Тому іноді термоперетворювачі мають

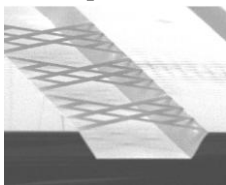


Рис.7.8

хрестоподібну конструкцію. Мікрофотографію термоперетворювача хрестоподібної конструкції з діелектричної мембраною показано на рис. 7.8

Зазвичай верхня межа вимірювання теплових витратомірів становить близько 200 л/хв. Однак у багатьох випадках потрібно ви-

мірювати значно більші витрати газу. Для цього можна скористатися найпоширенішим на практиці методом розширення діапазону вимірювання - це розміщення датчика в байпасі, тобто в обвідному каналі (рис. 7.9). У цьому випадку тільки частина від загального потоку газу проходить через датчик.

Натепер продовжуються дослідження з розроблення МЕМС-витратомірів, побудованих за іншими принципами вимірювання, наприклад, вихрових витратомірів, витратомірів на основі ємнісних датчиків тиску і т. ін.

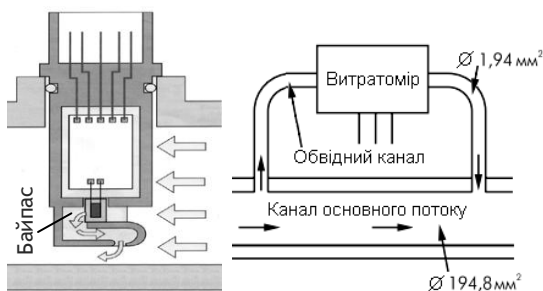


Рис.7.9

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які методи вважаються найбільш перспективними для впровадження в мікромеханічні витратоміри?
2. На основі яких вимірювань можуть бути побудовані теплові витратоміри?
3. На якому законі базується принцип вимірювання масових витрат?
4. На зміні яких параметрів потоку ґрунтується термоанемометричний принцип вимірювання масових витрат?
5. Які методи термоанемометричного вимірювання витрат вам відомі?
6. Назвіть основні елементи конструкція датчика термоанемометричного витратоміра.
7. У яких випадках використовується калориметрична схема вимірювання витрат?
8. Із яких трьох основних елементів складається датчик калориметричного витратоміра?
9. Для чого призначений додатковий компенсаційний датчик температури калориметричного витратоміра?
10. Для чого і як калориметричний витратомір перемикається в термоанемометричний режим?
11. Що таке байпас і для чого його використовують?

Розділ 8. Датчики температури

Принцип роботи цих датчиків ґрунтується на використанні фізичних закономірностей, які визначаються тепловими процесами. Найвідоміші датчики температури: контактні термоелектричні, терморезистивні і напівпровідникові датчики; безконтактні оптичні датчики, а також акустичні і п'єзоелектричні датчики. Деякі приклади таких датчиків розглянуто нижче.

8.1. Пристрої на основі термоелектрики

Термоелектричними явищами називається сукупність фізичних явищ, зумовлених взаємозв'язком між електричними і тепловими явищами в напівпровідниках і металах. До термоелектричних явищ належать: ефект Зеебека, ефект Пельтьє, ефект Томсона.

Ефект Зеебека лежить в основі роботи термоелектричного генератора (на елементах Пельтьє). Термоелектричний генератор на основі цього ефекту складається з блока термопар, електрично з'єднаних між собою, нагрівника, що забезпечує приплив тепла до їх гарячих спайів, і системи охолодження холодних шарів.

Ефект полягає в тому, що в замкненому ланцюжку, що складається з різних матеріалів (p - і n -напівпровідників) з різними коефіцієнтами Зеебека, виникає термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС), якщо місця контактів мають різні температури. Якщо ланцюжок складається тільки з двох різних провідників, то такий ланцюг називається термоелементом або *термопарою*.

Величина термо-ЕРС, що виникає, залежить від матеріалу провідників і температур гарячого T_1 і холодного T_2 контактів. Для невеликого інтервалу температур величину термо-ЕРС беруть пропорційною різниці температур:

$$E = \alpha_{12}(T_2 - T_1)$$

де E – величина термо-ЕРС; α_{12} – коефіцієнт термо-ЕРС або термоелектрична здатність термопар.

Ефект Пельтьє – це явище, за якого при проходженні електричного струму в місці контакту двох різнорідних провідників відбувається виділення або поглинання тепла. Величина виділюваного тепла або холоду залежать від виду контактуючих напівпровідників, напрямку і сили електричного струму, що протікає через місце контакту:

$$Q = (\Pi_1 - \Pi_2) I t,$$

де Q – кількість поглиненого або виділеного тепла; I – сила струму; t – час протікання струму; Π – коефіцієнт Пельтьє.

На основі цього ефекту створюються (рис. 8.1) елементи Пельтьє.

Ефект Томсона

полягає в такому: при пропусканні постійного електричного струму через нерівномірно нагрітий напівпровідник (або провідник), у ньому, крім джоульового тепла, залежно від напрямку струму буде виділятися або поглинатися додаткова кількість тепла (теплота Томсона).

У загальному випадку кількість тепла, що виділяється в об'ємі dV , визначається співвідношенням

$$dQ^T = -\tau(\nabla T j) dt dV,$$

де τ – коефіцієнт Томсона; j – густина струму; t – час, за який виділилося тепло; ∇T – градієнт температури вздовж зразка.

Коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт Томсона) залежить від природи матеріалу. Явище Томсона проявляється у всьому об'ємі термоелектричної речовини.

Практичного застосування ефект Томсона не знайшов, але його можна використовувати для визначення типу домішкової провідності напівпровідників.

Ефект Пельтьє проявляється в охолодженні або нагріванні сторін матеріалу при пропусканні крізь нього електричного струму. Це зумовлює його застосування в елементах охолодження електронних пристроїв. Перевагами цих елементів є малі габарити, відсутність рухомих деталей і можливість каскадного з'єднання для отримання великих перепадів температур. Крім цього, ефект Пельтьє конвертований – якщо поміняти полярність струму, що протікає через модуль, то охолодження зміниться на нагрівання. Використовуючи цю властивість, на елементах Пельтьє реалізуються системи точного підтримання температури – термостати.



Рис. 8.1

Добре відомим застосуванням термоелектричних модулів в автомобільній індустрії є регулювання підігріву сидінь. Одно- і багатоступеневі термоелектричні модулі також застосовуються для температурної стабілізації мікроболометрів⁸, підтримання постійної в'язкості чорнила в принтерах, для зниження тіньового струму в ІЧ-детекторах шляхом їх термоелектронного охолодження тощо.

Ефект Зеебека широко застосовують у датчиках температури. Найбільш відомим датчиком температури, що реалізує ефект Зеебека, це термопара – пара провідників з різних матеріалів, з'єднаних на вимірювальному кінці (гарячий спай). На вільних кінцях термопари, які з'єднуються з вимірювальним приладом, виникає різниця потенціалів, пропорційна різниці температур гарячого і холодного контактів. Термопари використовують для вимірювання температури різних об'єктів і середовищ. Наприклад, термопари з вольфрамowego сплаву є найбільш високотемпературними контактними датчиками температури, які незамінні в металургії для контролю температури розплавлених металів.

Виглядати термопари можуть так, як показано на рис.8.2, *а* (термопари серії А-106) і на рис. 8.2, *б* (мікротермопари з інтерфейсною платою на базі чипа MAX6675).

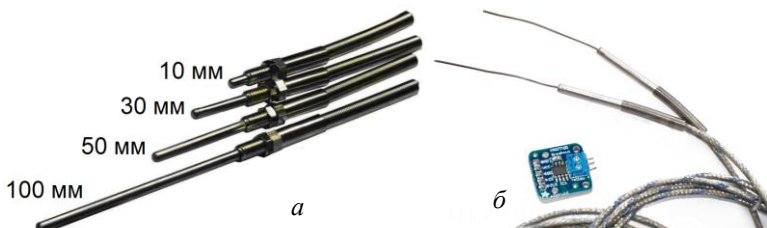


Рис. 8.2.

Діапазон вимірюваних термопарами температур – від -200 до 2200 °С і прямо залежить від використовуваних у них матеріалів.

Прикладом використання термопар у мікротехнологіях є зонди на основі термопар для сканувальної теплової мікроскопії, за допомогою якої можна отримати температурні карти (картографії), топографічне зображення поверхні з високою роздільною здатністю.

⁸ Болومتر - приймач променевої енергії, найчастіше оптичний.

тю. Зонди на основі термопар також використовуються в портативних мікропроцесорних цифрових вимірниках температури.

Вільні кінці термопари мають бути віддаленими від точки вимірювання температури, але виготовляти термопари надто довгими не завжди економічно виправдано. Тому для подовження електродів термопари застосовують спеціальні компенсаційні дроти, основне призначення яких – відведення вільних кінців термопари в зону з відомою і постійною температурою. Як компенсаційні використовуються дроти, виготовлені з металів, які розвивають таку саму термо-ЕРС, як і матеріали самої термопари. Мініатюрну термопару з дуже тонкого дроту слід підключати лише з використанням компенсаційних проводів більшого діаметра.

Конструкцію компенсаційного дроту показано на рис. 8.3.

Як інший приклад, але вже безконтактного термометричного датчика, що поєднує весь спектр MEMS сенсорних технологій, можна навести датчик компанії *OMRON*. Датчик (рис. 8.4, а) є надчутливим сенсором ІЧ випромінювання, в основі роботи якого лежить ефект Зеєбека, згідно з яким термо-ЕРС генерується внаслідок різниці температур у точках контакту двох металів.

Датчик складається з кремнієвої лінзи, яка фокусує теплове випромінювання на масив чутливих термопарних комірок, сформованих послідовним з'єднанням великої кількості термопар, які складаються з напівпровідників полікремнію та алюмінію *p*- і *n*-типу (рис. 8.4, б) в термопілі. Такий MEMS-термопіл містить підкладку та підвішену мембрану з безліччю термопар.

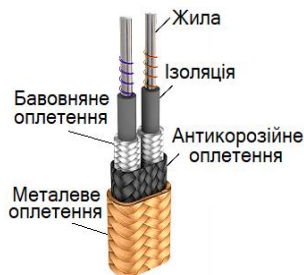
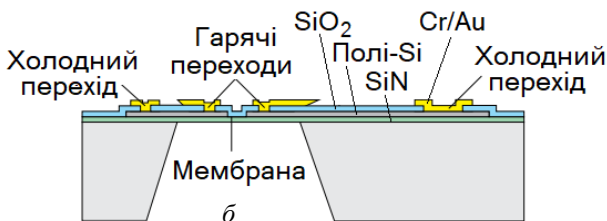


Рис. 8.3.



а



б

Рис. 8.4

Технології кремнієвих МЕМС і підвішених мембранних структур дозволили збільшити швидкодію термопілів за рахунок зниження теплової ємності і високої теплової ізоляції.

Гаряче з'єднання термопілу розташоване біля центра мембрани, холодні з'єднання – на краях об'ємної кремнієвої підкладки. ІЧ випромінювання через кремнієву лінзу діє на мембрану, яка має низьку теплопровідність, і це створює температурну різницю між мембраною і оточуючим об'ємним кремнієм, тобто енергія ІЧ-променів перетворюється в різницю температур. У свою чергу, різниця температур термопілами перетворюється в термо-ЕРС.

Генерована температурою напруга підсилюється за послідовного з'єднання термопар у термопіли. Вихідна напруга термопілів дорівнює напрузі однієї термопари, помноженої на їх кількість, і буде відповідати різниці температур між температурним об'єктом і детектором.

Там, де досяжні високі температури (сотні градусів) та існує значний температурний градієнт, актуальним є застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ). Прикладом є автомобільні системи відновлення тепла вихлопів. Вихідна потужність автомобільних ТЕГів може досягати сотні ватів. Наприклад, *BMW* вже заявляла про розробку ТЕГа з виходом в 500 Вт.

Термоелектричні генератори використовують напівпровідникові $p-n$ -переходи (найбільш поширеним матеріалом є телурид вісмуту), тому їх розміри можуть бути мініатюрними. Перспективними для ТЕГ можуть стати наноструктуровані, тонкоплівкові та інші матеріали.

Компанія *Global Thermoelectric* спеціалізується на створенні промислових генераторів із заявленим навантаженням 5000 Вт. Головним компонентом кожного ТЕГ фірми *Global* є термопіли з масивом напівпровідникових елементів з олов'яно-свинцевого телуриду (рис. 8.5). Різниця температур на термопілі (близько 540 °С з одного боку, 140 °С – з другого) генерує на виході напругу постійного струму.

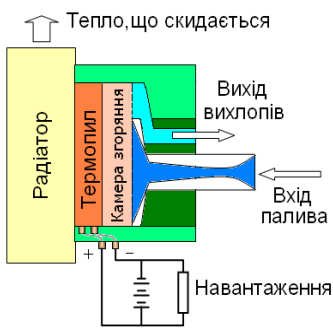


Рис. 8.5

8.2. Терморезистивні датчики температури

Терморезистивні термодатчики ґрунтуються на принципі зміни електричного опору (напівпровідника або провідника) через зміну температури. Залежно від матеріалів, використовуваних для виробництва терморезистивних датчиків, розрізняють: резистивні детектори температури, кремнієві резистивні датчики і термістори.

Резистивні детектори температури (РДТ) являють собою датчики, чутливі елементи яких сприймають зміну температури навколишнього середовища. Резистивні детектори температури зазвичай належать до металевих датчиків температури. Як матеріал для РДТ використовують метали з хорошою електричною провідністю, наприклад, платину, нікель і мідь. Мідь застосовують для температур від -50 до 200 °С, нікель від -60 до 180 °С, платину від -220 до 750 °С. У діапазоні від 0 до 650 °С опір платинового РДТ можна знайти з виразу

$$R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2),$$

а в діапазоні від 0 до -200 °С функція перетворення має вигляд

$$R = R_0 \left[1 + \alpha t + \beta t^2 + \lambda (t - 100)^3 \right],$$

де R_0 – опір при нульовій температурі; t – температура; α , β , λ – відповідні температурні коефіцієнти опору.

Вибір металу для РДТ визначається його хімічною активністю до вимірюваного середовища в інтервалі певних температур.

Мідні та нікелеві РДТ випускають з литого мікродроту в скляній ізоляції.

Тонкоплівкові платинові РДТ (рис. 8.6) виготовляються методом вакуумного наплення платини на підкладку 1 з Al_2O_3 з подальшою фотолітографією та витравленням термочутливої доріжки 2 і електродів 7 з одержаної плівки. Таким чином, електроди та термочутлива доріжка складаються з одного і того самого матеріалу та не мають додаткових перехідних контактів.

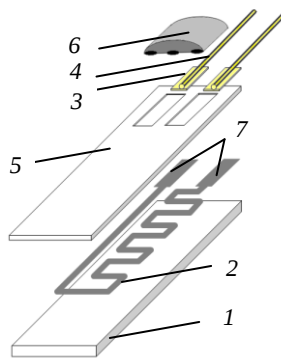


Рис. 8.6

Термочутливі доріжки 2 являють собою протяжний плоский платиновий меандр. Після створення зображення на контактні площадки 3 наноситься припійний матеріал для припаювання дрітних виводів 4, решта площі 5 пасивується оксидом SiO_2 . Ділянка контактних площадок з метою їх захисту додатково пасивується склокерамічною самотвердіючою пастою. Конструкція датчика залежить від його цільового призначення. Технологічні допуски при виготовленні не перевищують трьох мікронів.

Для вимірювань температури понад 600°C зазвичай використовується вольфрам, але неділка цих датчиків є висока вартість і нелінійність характеристик.

Порівняно з іншими датчиками РДТ відрізняються високою точністю. Деякі дають змогу виконувати вимірювання з точністю $0,026^\circ\text{C}$. Найбільш поширені датчики мають часову нестабільність опору менше ніж $0,1^\circ\text{C}$ за рік, а деякі екземпляри – $0,0025^\circ\text{C}$ за рік.

Крем'яні резистивні датчики. Кремній широко використо-

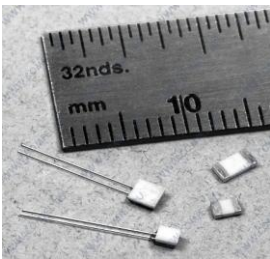


Рис. 8.7

вують для виготовлення сенсорів температури, що мають додатний температурний коефіцієнт опору. На рис. 8.7 показано крем'яний резистивний датчик (КРД) фірми *Honeywell International*, діапазон виміру якого від -50 до $+130^\circ\text{C}$.

У заданому діапазоні вимірювань опір КРД від температури описується виразом

$$R_T = R_{25} \left(1 + \alpha \Delta T_A + \beta \Delta T_A^2 \right),$$

де R_{25} – номінальний опір за температури $+25^\circ\text{C}$ ($298,15\text{ K}$); $\alpha = 0,0078\text{ K}^{-1}$; $\beta = 1,874 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-2}$ – коефіцієнти; ΔT_A – відхилення від номінальної температури (у кельвінах).

Крем'яний резистивний датчик часто вбудовуються в МЕМС-структури для здійснення температурної компенсації або проведення прямих вимірювань температури. Також існують дискретні кремнієві датчики, наприклад, детектори температури КТҮ фірми *Philips*. Такі датчики мають досить хорошу лінійність (яка може бути поліпшена за допомогою простих термокомпенсаційних ланцюжків) і високу часову стабільність (зазвичай $\pm 0,05^\circ\text{C}$ за рік).

Термістори (терморезистори) – це детектори температури, які виготовляються за технологіями мікроелектроніки з оксидів металів у формах плоского герметичного диска (бусінкового типу, рис. 8.8, а), стрижня, циліндра, прямокутної пластини або товстої плівки. Термістори складаються з шару оксиду нанесеного на відповідну підкладку зі скла, алюмінію, кремнію і т. ін.

За рахунок напівпровідникових властивостей оксидів, термістори мають від’ємний температурний коефіцієнт, тобто опір термістора зменшується зі збільшенням температури (рис. 8.8, б). Однак є термістори і з додатним температурним коефіцієнтом, їх опір зростає зі збільшенням температури. На відміну від РДТ або КРД термістори мають нелінійну залежність опору від температури:

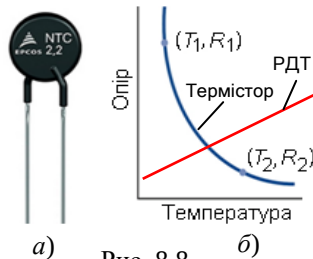


Рис. 8.8

$$R = Ae^{B/T}$$

де A , B – константи, які визначаються властивостями оксидів.

Така залежність дозволяє використовувати термістори лише у вузькому діапазоні температур від T_1 до T_2 (рис. 8.8, б)

Переваги термісторів:

- висока швидкість реакції на зміни температури;
- висока точність;
- висока чутливість;
- низька вартість.

Термістори не мають певної температурної характеристики. Вона залежить від конкретної моделі датчика і його застосування. Тому істотними недоліками термісторів є необхідність їх калібрування, істотна нелінійність, а також старіння, однак при проведенні всіх необхідних налаштувань вони можуть використовуватися для прецизійних вимірювань.

8.3. Напівпровідникові датчики температури

Цей тип датчиків працює на принципі зміни характеристик p – n -переходу під впливом температури. Оскільки як залежність напруги на транзисторі від температури завжди пропорційна, можна зробити датчик з високою точністю вимірювання. Безперечними

плюсами такого рішення є дешевизна, висока точність даних і лінійність характеристик на всьому діапазоні вимірювання.



Рис. 8.9

Як приклад на рис. 8.9 зображений напівпровідниковий датчик температури LM75A. Діапазон вимірювання цього датчика від -55 до $+150$ °C.

Такі датчик виготовляються здійснюється масовими методами планарної технології, які забезпечують отримання значень опорів з досить високою точністю, а також дозволяють використовувати під час виготовлення лазерні методи пригонки номінальних опорів. Крім того, їх можна монтувати безпосередньо на напівпровідниковій підкладці, що робить цей тип датчиків незамінним у складі MEMS-виробів.

Основним недоліком таких датчиків є низька верхня межа робочих температур, зумовлена погіршенням ізолюючих властивостей $p-n$ -переходу за температур понад 400 K.

Значні можливості щодо подальшого вдосконалення плівкових термодатчиків виникли з появою в MEMS технологій кремній на сапфірі (КНС), які являють собою тонку плівку монокристалічного кремнію, вирощену на підкладці з монокристалічного сапфіру.

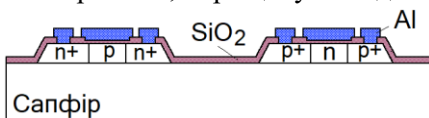


Рис. 8.10

Датчики такого типу (рис. 8.10) включають кілька послідовних $p-n$ -переходів, сформованих на однокристалній кремнієвій плівці, із шаром діоксиду кремнію SiO_2 , що

виконує роль ізолятора. Кремнієва плівка, у свою чергу, міститься на об'ємній сапфіровій підкладці.

Використання гетероепітаксійних структур КНС дозволяє створювати термодатчики, які характеризуються поєднанням переваг датчиків з монокристалічними і плівковими кремнієвими чутливими елементами. Застосування монокристалічної плівки кремнію забезпечує підвищену стабільність характеристик термодатчиків. Хороші ізоляційні властивості сапфіру аж до температур близько 1300 K дозволяють створювати термодатчики, верхня межа робочих температур яких обмежена тільки фізичними властивостями кремнію.

8.4. Безконтактні вимірники температури

Безконтактне вимірювання температури ґрунтується на реєстрації теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні хвиль. Найбільшого поширення набули два типи приладів: безконтактні датчики температури – пірометри і тепловізори. Кожен з них має свою специфіку роботи і функціональні особливості.

Пірометри застосовують в багатьох галузях, де потрібні віддалений дистанційний контроль і оцінка температури локальної зони об'єкта без безпосереднього контакту.

Пірометри класифікують так:

Яскравісні пірометри (пірометри зі зникаючою ниткою розжарювання) – визначають температуру, візуально порівнюючи яскравість розігрітого тіла з яскравістю вбудованої в пірометр нитки розжарювання. Регулюючи яскравість випромінювання нитки розжарювання шляхом пропускання через цю нитку електричного струму, підбирається таке значення струму, за якого яскравість випромінювання нитки збігається з яскравістю об'єкта і вона як би «розчиняється» в ньому. За значенням струму і визначають температуру нагрітого тіла.

Колірні пірометри за принципом дії аналогічні яскравісним, але визначають температуру методом порівняння кольору нитки розжарювання і кольору теплового випромінювання розігрітого тіла. З огляду на особливості людського зору описаний метод, що ґрунтується на сприйнятті кольору або яскравості людським оком, має суттєві обмеження в точності та повторюваності результатів вимірювання.

Мультиспектральні пірометри також належать до класу колірних пірометрів, але визначають температуру методом порівняння теплового випромінювання тіла у декількох спектрах, зазвичай у двох – червоному та синьому. У мультиспектральних пірометрах візуальні вимірювання були витіснені приймачами теплового випромінювання, які працюють у різних спектральних діапазонах. Виміряна температура відображається у вигляді символічних значень на екрані пірометра (рис. 8.11).



Радіаційні (інфрачервоні) пірометри викори- Рис. 8.11

стовують для визначення температур потужність теплового випромінювання, яка сприймається теплоприймачем. Радіаційні пірометри, які виконують вимірювання в широкій смузі спектральних випромінювань, називаються пірометрами повного випромінювання.

Найбільш поширені пірометри за своїм принципом роботи є детекторами інфрачервоного випромінювання; вони здатні визначати як дуже низькі температури до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, так і дуже високі температури аж до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основні переваги інфрачервоних датчиків температури: малий час відгуку та швидкодія.

Мультиспектральні пірометри мають більш високу точність у визначенні температури об'єкта порівняно з пірометрами інфрачервоного випромінювання, тому натеper професіонали вибирають саме такі пірометри.

Пірометри застосовують для дистанційного визначення температури об'єктів у промисловості, побуті, медицині, на підприємствах, де велике значення набуває контроль температур на різних технологічних етапах виробництва (сталеливарна промисловість, нафтопереробна галузь).

Тепловізори – це пристрої для спостереження за розподілом температури, вони дозволяють візуалізувати температурні значення від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхні великої площі. Тепловізори є інструментом для проведення моніторингу термічного стану тіл, що мають нерівномірне нагрівання. Розподіл температури відображається як кольорова картинка, де різним температурам відповідають різні кольори. Вивчення теплових зображень називається термографією.



Рис. 8.12

Використовуються в медицині, в машинобудуванні, будівництві для оцінювання теплоізоляційних властивостей конструкцій, у системах охорони і т.ін. Зовнішній вигляд універсального приладу нічного бачення показано на рис. 8.12

Важливою характеристикою тепловізорів є роздільна здатність сенсора. У деяких високоточних пристроях вона досягає 2048×1536 пікселів.

8.4.1. Чутливі елементи безконтактних вимірників температури

Як чутливі елементи теплових приймачів випромінювання використовують напівпровідникові (болометри) і піроелектричні приймачі. Тепловими приймачами також можуть контактні термоелектричні, наприклад МЕМС-термопіл, або терморезистивні датчики температури, на які фокусують теплове випромінювання. Для фокусування теплових променів виготовляються комплекти оптики зі спеціальних матеріалів, таких як германій, халькогенідне скло, селенід цинку, а для недорогих виробів – навіть поліетилен.

Піроелектричні теплові приймачі. Піроелектричний ефект проявляється у властивості деяких діелектричних кристалів змінювати величину електричної поляризації зі зміною температури. Такі кристали містять у собі домени – елементарні частинки кристала, які відрізняються фізичними властивостями від суміжних ділянок. Під час нагрівання або охолодження в різних напрямках кристала відбувається зміна відстані між доменами та кутів між ними, унаслідок чого зміщуються заряди диполів у кристалі. За рахунок зміщення зарядів диполів у кристалі з'являється поляризація вздовж напрямку, так званої електричної осі, що зумовлює появу електричних зарядів на гранях піроелектричного кристала.

Поляризація оцінюється як зміна щільності зарядів $\Delta\rho$ на протилежних гранях кристала, нормальних до напрямку поляризації. Зовні ефект описується нелінійним рівнянням

$$\Delta\rho = \gamma_1 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2,$$

де γ_1, γ_2 – коефіцієнти піроелектричного ефекту; ΔT – зміна температури.

Нерідко достатньою апроксимацією є лінійна:

$$\Delta\rho = \gamma \Delta T.$$

У модельному поданні це відповідає конденсатору, що електрично заряджається від потоку тепла. У такому поданні піроелектричного датчика зміна напруги ΔU на ньому через зміну температури ΔT описується співвідношенням

$$\Delta U = \gamma \frac{S}{C} \Delta T = \gamma \frac{\varepsilon_n \varepsilon_0}{h} \Delta T,$$

де C – ємність датчика; S – площа перекриття електродів; h – товщина піроелектричної плівки; ε_n – відносна діелектрична проник-

ність піроелектричної плівки; ϵ_0 – абсолютна діелектрична проникність вакууму.

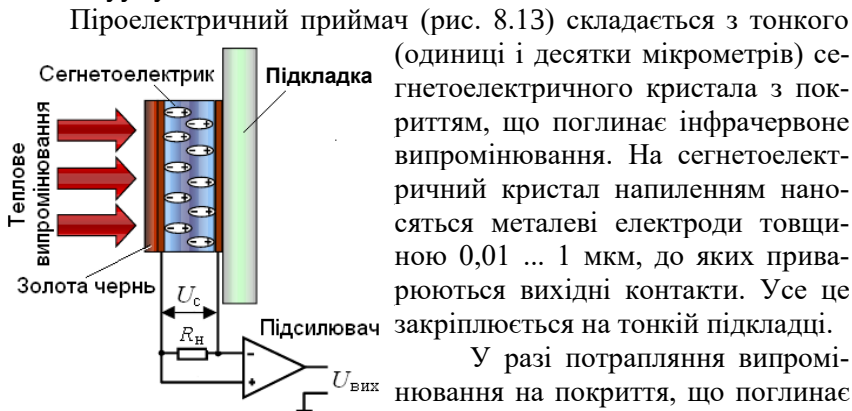


Рис. 8.13

У разі потрапляння випромінювання на покриття, що поглинає теплове випромінювання, наприклад золота чернь, піроелектричний матеріал нагрівається, дипольний момент змінюється і на поверхні сегнетоелектрика появляются електричні заряди U_c . Ці заряди викликають у колі навантаження R_n електричний струм. Очевидно, що напруга сигналу виявляється прямо пропорційною опорі навантаження. Тому в піроелектричних прийमाх опір навантаження вибирається не меншим, ніж 1 ГОм і використовуються диференціальні підсилювачі з великим входним опором на польових транзисторах.

За допомогою піроелектричних приймачів випромінювання можна реєструвати температурні зміни $10^{-7} \dots 10^{-8}$ К при чутливості 20 В/градус. Крутизна перетворення піроелектричних приймачів приблизно в 105 разів більша, ніж термоелементів. Гранична чутливість становить приблизно $0,5 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц.

Основні матеріали для виготовлення піроелектричних приймачів належать до тригліцинсульфатної групи (TGS). Також використовуються монокристали танталату і ніобату літію. Із полікристалічних піроелектриків можна виділити кераміки на основі титану-цирконату свинцю і титанату барію. Набули поширення відкриті недавно плівки полімерів на основі полівінілфлюориду (PVF) і (PVF₂).

Існує досить велика кількість варіантів конструкцій піроелектричних сенсорів, у тому числі і в мікроелектронній реалізації. Структуру піроелектричного приймача у вигляді конденсатора, виконаного за МЕМС-технологією показано на рис. 8.14, *а*, а фрагмент матриці підтримуючої мембрани теплових приймачів, виконаний також з використанням МЕМС-технології, – на рис. 8.14, *б*.

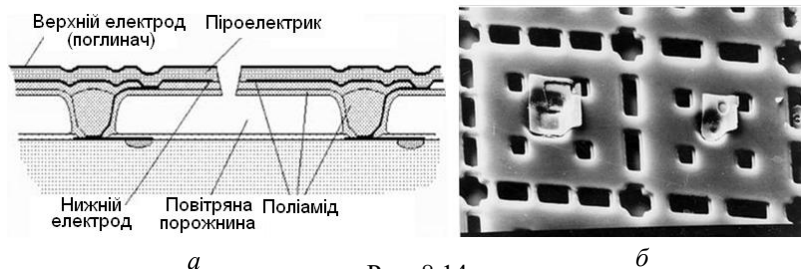


Рис. 8.14

Зазвичай в конструкції піроелектричних сенсорів використовують два чутливі елементи, з'єднані послідовно або паралельно для кращої компенсації швидких змін теплових потоків і механічних навантажень, які виникають через акустичні шуми і вібрації. При цьому один з елементів покривається барвником для збільшення поглинання, а другий екранується від випромінювань, а для поліпшення його відбивної здатності на нього наноситься шар золота. Типову конструкцію датчика на основі здвоєних сенсорів зображено на рис. 8.15.

Піроелементи розміщують в металевих (рис. 8.15, *а*) корпусах, які забезпечують хороше екранування і захист від навколишнього середовища. Віконце, що пропускає випромінювання, зазвичай виготовляють з кремнію. Внутрішній простір корпусу заповнюють сухим повітрям або азотом.

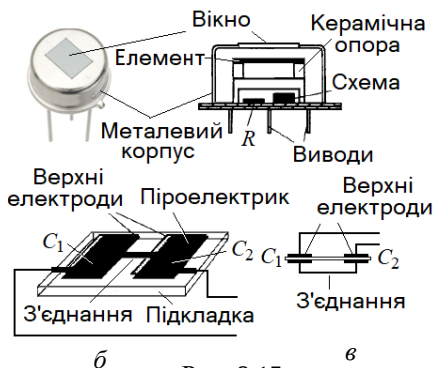


Рис. 8.15

Електроди піроелектричного чутливого елемента найчастіше виготовляють з ніхрому. Ніхром має високу випромінювальну (поглинальну) здатність, і тому електроди з нього виконують відразу дві

функції: поглинають теплове випромінювання і збирають електричні заряди.

Подвійний елемент виготовляють на одній підкладці з кристалічного матеріалу (рис. 8.15, б). Металеві електроди, що нанесені з двох боків матеріалу, формують два послідовно з'єднані конденсатори C_1 і C_2 . Еквівалентну схему подвійного піроелектричного елемента зображено на рис. 8.15, в. Така конструкція дає змогу добре відбалансувати обидва елементи і, отже, усунути всі синфазні перешкоди. Слід зазначити, що чутливі зони розташовані тільки у просторі між електродами, інша частина піроелектричного матеріалу, що непокрита електродами, у генерації корисного сигналу участі не бере.

Піроелектричні детектори дуже чутливі до механічних навантажень і вібрацій, що значно ускладнює їх проектування. На додаток до цього всі піроелектрики також є і п'єзоелектриками, тому для них характерний так званий мікрофонний шум. Для боротьби з такими перешкодами кристалічний елемент відокремлюють від зовнішніх частин детектора (особливо важливо забезпечити відсутність механічних зв'язків між піроелектриком і металевим корпусом, а також між ним і выводами).

Світовим лідером у виробництві пірометрів є компанія *LumaSense Technologies Inc*, яка об'єднала бренди *LUXTRON*, *MIKRON* та *IMPAC Infrared*.

Болометри. Болометр є приймачем променевої енергії, дія якого ґрунтується на зміні електропровідності чутливого елемента під час його нагрівання унаслідок поглинання випромінювання. Болометри бувають металеві і напівпровідникові.

Металеві болометри зазвичай виготовляють або з тонкої фольги, або напиленням металу у вакуумі на тонку плівку або тверду підкладку. Як матеріали використовують платину, нікель, вісмут, сурму. Щоб зменшити теплопровідність, приймальну площинку роблять дуже тонкою – декілька мікрометрів. Через малу товщину приймальна площинка під дією випромінювання швидко нагрівається і її опір підвищується. Приймальну площинку покривають золотою або платиновою черню, що забезпечує неселективне поглинання промінів видимого спектра з довжиною хвиль до 20 мкм і більше.

Підвищення температури зумовлює збільшення опору металу

$R = R_0 [1 + \beta_0 (T - T_0)]$, або у відносних одиницях $\Delta R/R = \beta_T / T$,

де β_0 , β_T – температурні коефіцієнти опору за температури T_0 та температури T відповідно.

Для більшості металевих болометрів $\beta_0 = (0,3 \dots 0,4) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$, а β_T – у широкому діапазоні температур обернено пропорційний температурі, тобто $\beta_T = 1/T$.

За допомогою сучасних металевих болометрів можна фіксувати зміну температур до $10^{-7} ^\circ\text{C}$ і виявляти порогові потоки випромінювання до 10^{-11} і навіть до субміліметрових хвиль. Працює болометр зазвичай у мостовій схемі, яка живиться постійним або змінним струмом.

Напівпровідниковий болометр є напівпровідниковим плівковим термістором (рис. 8.16) товщиною не більшою десяти мікронів, на який проектується сфокусований тепловий промінь. Для фокусування теплових променів виготовляють комплекти оптики зі спеціальних матеріалів. Головна умова – матеріал повинен пропускати випромінювання в інтервалі хвиль довжиною 2...15 мкм. Під впливом електромагнітного потоку елемент нагрівається і змінює свій електричний опір. Він включається в мостову схему, гілки якої ретельно збалансовані. Завдяки цьому реєструються дуже малі резистивні зміни.

Для компенсації впливу навколишнього середовища використовують екрановану компенсаційну плівку з такими самими параметрами. Усю конструкцію поміщають у герметизований корпус.

Болометр – досить температурно-чутливий сенсор, тому для отримання необхідних характеристик застосовують методи температурної стабілізації. Для збільшення крутизни перетворення болометра необхідно зменшувати теплоємність матеріалу чутливого

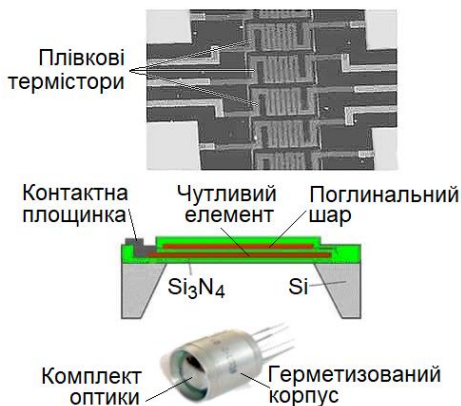


Рис. 8.16

шару. Дослідження показали, що теплоємність чутливого елемента через охолодження зменшується пропорційно T^3 . Охолодження також спричиняє зменшення внутрішніх шумів болометра. У сукупності це дає змогу поліпшити граничну чутливість. Наприклад, охолодження нікелевих болометрів до температури рідкого азоту дозволяє підвищити граничну чутливість більш ніж в 5 разів.

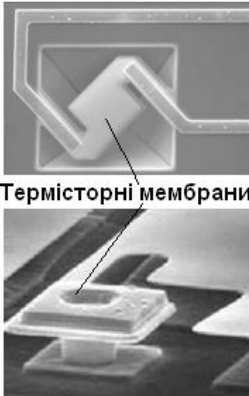


Рис. 8.17

Низькотемпературна реалізація болометра дозволяє реєструвати від'ємні температури навіть до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Короткохвильові сенсори високотемпературних приладів фіксують значення до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мікроболометр (рис. 8.17) формується на багатошарових монокристалічних структурах, виконаних у вигляді тонких плівок, а як чутливі елементи використовують температурно-чутливі (термісторні) мембрани різної форми. Чутливість до температурного зміни таких елементів дуже висока і дає малий шум.

Технологічний процес виробництва МЕМС-болометрів показано на рис. 8.18.

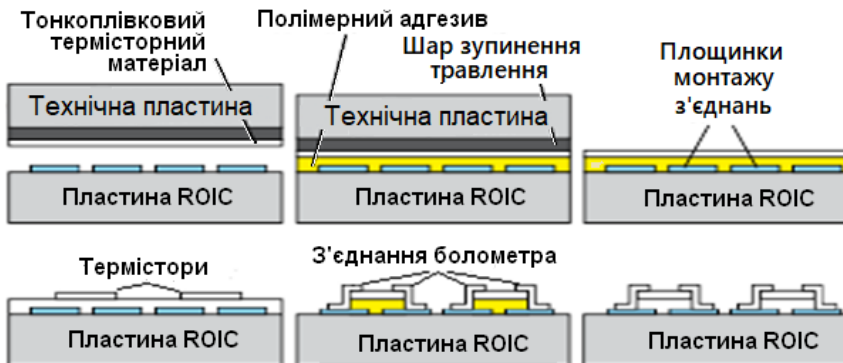


Рис. 8.18

Масив болометра формується поверх пластини інтегральної схеми зчитування – ROIC (Read-Out Integrated Circuit). Кожен

елемент детектування мікроболометра включає мембрану, підвішену над підкладкою, для забезпечення теплової ізоляції. І оскільки окремі детектори мають дуже малі теплові маси і термічно ізольовані від схеми ROIC і підкладки, то мікроболометр досить чутливий до ІЧ випромінювання. Мембрана передбачає температурно-чутливий елемент, наприклад, на основі модифікацій оксиду ванадію, і два електроди, що зв'язують температурно-чутливий матеріал і ROIC на підкладці. Схеми ROIC забезпечують узгодження вхідних опорів схем зчитування та відповідних елементів детектування.

Випромінювана ІЧ-енергія, що отримується кожним детектором мікроболометра, збільшує температуру детектора. Зміна температури змінює опір кожного детектора, що реєструється схемою ROIC, розміщеною на тій же напівпровідниковій підкладці.

Корпусування датчиків зазвичай виконують із застосуванням модернізованої WLP технології. ROIC кріпиться на термоелектричному охолоджувачі в металевому корпусі. Прозоре для ІЧ-хвиль вікно доповнює корпус. Перш ніж розрізати підкладки, кристали поміщають у герметичний корпус. Деякі компанії, наприклад *Infineon*, виконують корпусування датчиків за допомогою прикріплення підкладки-кришки.

Удосконаленні технологій виробництва МЕМС-болометрів і застосування методів оброблення сигналу дають можливості створення неохолоджуваних теплових датчиків, що є значною перевагою порівняно з охолоджуваними пристроями на основі, наприклад, рідкого азоту. Це знижує складність сенсорного корпусу, зниження ціни виробництва і споживаної потужності.

Існують й інших типи термодатчиків, зокрема, акустичні, кварцові п'єзоелектричні, оптичні тощо, але принципи дії таких термодатчиків у МЕМС-датчиках температури поки не використовуються.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які явища називають термоелектричними?
2. У чому полягає ефект Зеебека?
3. У чому полягає ефект Пельтьє?
4. У чому полягає ефект Томсона?
5. Який ефект знайшов застосування в таких датчиках температури, як термопари?
6. Що таке термопіли?
7. На якому принципі ґрунтується робота терморезистивних датчиків температури?
8. Які матеріали використовують для виготовлення резистивних детекторів температури?
9. Що таке термістори?
10. У чому головна відмінність термісторів від РДТ або КРД?
11. Який фізичний принцип роботи напівпровідникових датчиків температури?
12. Які два типи приладів для безконтактного вимірювання температури набули найбільшого поширення?
13. Яка існує класифікація пірометрів?
14. Яким чином проявляється піроелектричний ефект у разі зміни температури?
15. Для чого в конструкції піроелектричних сенсорів використовують два чутливі елементи?
16. Що являє собою болометр?
17. Яким чином охолодження впливає на технічні характеристики болометра?
18. Прокоментуйте технологічний процес виробництва МЕМС-болометрів.

Розділ 9. Електроакустичні мікромеханічні датчики

9.1. МЕМС-мікрофони

Самим типовим електроакустичним датчиком є мікрофон. Мікрофон – це електроакустичний прилад для перетворення звукових (механічних) коливань в електричні. Існують різні версії мікрофонів: вугільні, електромагнітні, електродинамічні, конденсаторні, електретні, п'єзоелектричні та транзисторні мікрофони. Але найважливішу роль в еволюції мікрофонних технологій відіграли конденсаторні та електретні конденсаторні мікрофони.

У конденсаторному мікрофоні (рис. 9.1, *а*) жорстко натягнута мембрана 1, яка є одночасно рухомою обкладкою електричного конденсатора, під впливом звукового тиску може коливатися відносно нерухомої обкладки 2. Під час коливань мембрани ємність конденсатора змінюється з частотою звукового тиску, що діє на мембрану, у зв'язку, з чим в електричному колі виникає змінний струм тієї ж частоти, а на опорі навантаження виникає падіння напруги, яке і є вихідним сигналом мікрофона. Для того щоб конденсатор міг функціонувати як мікрофон, на нього необхідно подати напругу зміщення.

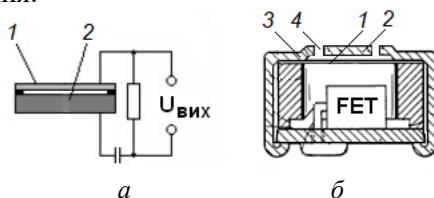


Рис. 9.1

Електретні конденсаторні мікрофони (Electret Condenser Microphone – ECM) (рис. 9.1 *б*), фактично це ті ж конденсаторні, але постійна напруга для них забезпечується не звичайним джерелом, а електричним зарядом мембрани, виготовленої з електрети – діелектрика, здатного зберігати поляризацію тривалий час. Тому ECM дуже простий: він являє собою металевий корпус, у якому міститься постійно заряджена рухома діафрагма 1, яка отримує звук через апертури (отвори) 4 в паралельній їй жорсткій обкладці 2, що є центральною частиною корпусу 3. Для підсилення вихідного сигналу в корпусі також розміщується польовий транзистор (Field Effect Transistors – FET).

Мікрофони ЕСМ були винайдені співробітниками знаменитої лабораторії *Bell Labs* на початку 1960 р. Ці пристрої (рис. 9.2) застосовувалися і застосовуються тепер у портативних пристроях, у тому числі в стільникових телефонах і ноутбуках. Стандартний розмір ЕСМ, використовуваних в портативних електронних пристроях: діаметр 4 ... 6 мм, висота 1 ... 2 мм. Але застосування ЕСМ у таких пристроях обмежується технологічними можливостями.



Рис. 9.2

Проблеми, що асоціюються з розробленням та використанням аудіосистем на основі ЕСМ, зводяться до трьох основних: шуми, розмір і ручне складання (монтаж).

Зниження шуму є головною проблемою ЕСМ. Шум ЕСМ являє собою складну функцію: електричний шум унаслідок флуктуацій в напрузі зміщення, шум FET, шум плати, акустичний шум діафрагми, зовнішні електромагнітні та радіочастотні завади, що впливають на високоімпедансний вхід FET.

Мініатюризація ЕСМ не безмежна, зменшення їх розмірів досягається через зниження характеристик чутливості, частотного спрацьовування і шумових характеристик. До того ж матеріали діафрагм не здатні протистояти високим температурам, необхідних для поверхневого монтажу, без значної деградації характеристик. Тому для з'єднання мікрофона з друкованою платою використовують електричні рознімачі (сокети або еластомерні компресійні з'єднувачі), що додає висоту до компонентів ЕСМ.

І нарешті, оскільки ЕСМ не призначені для поверхневого монтажу, ціна їх ручного складання висока, а рівень надійності падає.

Тому з початку 1980-х років, у зв'язку з розвитком МЕМС-технологій з'явилися перші розробки, і стала розвиватися технологія МЕМС-мікрофонів.

МЕМС-мікрофони мають більші можливості для системної та функціональної інтеграції та досягнення технологічності виробництва. Хоча ЕСМ є компактними, дешевими пристроями, але ціна та розміри (рис. 9.3) МЕМС-мікрофонів істотно нижчі. Кілька МЕМС-

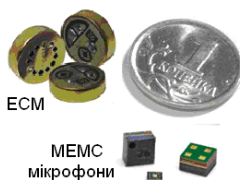


Рис. 9.3

мікрофонів можуть бути розміщені на одному кристалі з використанням SiP або SoC технології корпусування, а інтеграцію з підсилювачем можна здійснити в одному корпусі або навіть на одному кристалі. При цьому MEMC-мікрофони позбавлені більшості недоліків ECM.

Можна вирізнити такі переваги, які відрізняють MEMC-мікрофони від ECM:

- висока функціональність;
- малий розмір;
- низька ціна.

Комбінація цих переваг забезпечила масове поширення технології MEMC-мікрофонів передусім в мобільних телефонах (рис. 9.4). Надалі технологія MEMC-мікрофонів поширилася на ноутбуки для голосових IP-технологій.

Розміри MEMC-мікрофонів на порядок менше ніж ECM і тому внаслідок малої маси їх діафрагми менш схильні до вібрації. MEMC-мікрофони більш стійкі до вологості та високих температур, якщо вони краще захищені та ізольовані, що можливо за MEMC-технологій корпусування.

MEMC-мікрофони характеризуються також вихідним сигналом, який стійкий до високочастотних і електромагнітних завад. Спеціальне програмне забезпечення використовує алгоритми формування променя, скасування шумів і видалення луни, зокрема технології ANC (Active Noise Cancellation) – технології активного скасування шумів. При цьому MEMC-мікрофони можуть включати попередні підсилювачі, мікропроцесори, АЦП, фільтри, тобто пропонують не тільки менший розмір, а й комбінацію меншого розміру з функціональними перевагами.

Основна відмінність між ECM і кремнієвим MEMC-мікрофоном полягає в тому, як підтримується заряд на підкладці. Кремнієвий мікрофон після виготовлення не має заряду. Використовуючи напругу 12 В, заряд закачується в підкладку за допомогою CMOS-схеми. Мікросхема підтримує цей заряд, коли мікрофон ак-



Рис. 9.4

тивований. В ЕСМ заряд підкладки формується у процесі виготовлення. Якщо з якої-небудь причини заряд зменшиться або зникне, то динамічний відгук мікрофона швидко деградуватиме. Найчастіше деградація спричиняється перегрівом. Тому ЕСМ не експлуатують за температури понад 85 °С і не можуть припаюватися шляхом автоматичного поверхневого монтажу. Натомість МЕМС-мікрофони під час поверхневого монтажі здатні протистояти високим температурам паяння – до 260 °С, тому їх монтаж можна здійснювати в автоматичному режимі. Для ЕСМ аналогічні технології виробництва не застосовують, тому їх ручне складання підвищує ціну виробництва.

Таким чином, перспективи зниження ціни для МЕМС-мікрофонів вагоміші оскільки вони передбачають не тільки ціну виробництва самого компонента, а і високу продуктивність, надійність, ціну складання.

За принципом роботи МЕМС-мікрофони є конденсаторними мікрофонами, а структурно і функціонально схожі, наприклад, з МЕМС-датчиками тиску.

МЕМС-мікрофон (рис. 9.5, *а*) складається з нерухомої конденсаторної обкладки, нанесеної на жорстку пластину основи, і рухомої діафрагми (мембрани), яка відіграє роль другої конденсаторної обкладки (деякі конструкції МЕМС-мікрофонів (рис. 9.5, *б*) передбачають дві нерухомі обкладки, між якими міститься рухома мембрана). Нерухома обкладка (рис. 9.5, *а*) доповнена кільцем, яке підтримує мембрану, що дозволяє зберігати рознесення між обкладкою і мембраною постійним.

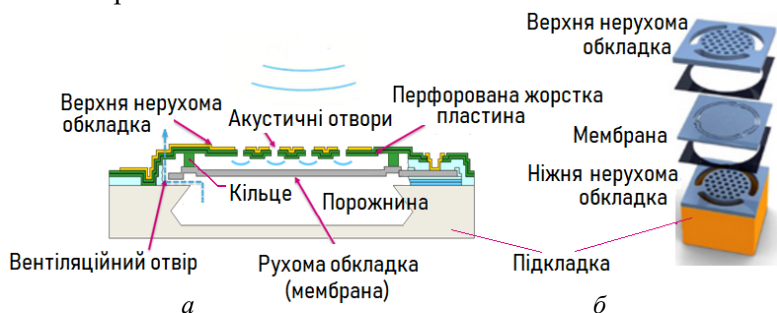


Рис. 9.5

Під мембраною витравлюється порівняно велика порожнина, яка являє собою акустичний резонатор, з обов'язковим вентиляцій-

ним отвором. Вентиляційний отвір дозволяє витікати повітря, стисненому в нижній порожнині, щоб мембрана могла здійснювати вільні коливання.

Щоб мінімізувати вплив тиску повітря на нерухому обкладку, а також для забезпечення акустичного демпфування повітря в повітряному зазорі нерухома обкладка перфорується акустичними отворами (рис. 9.6).

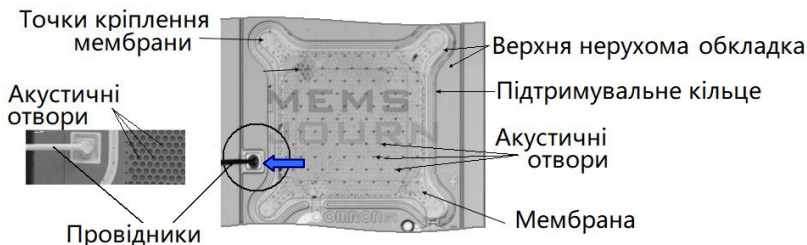


Рис. 9.6

Колівання мембрани призводять до зміни ємності між нею і нерухомою обкладкою. Ці зміни вимірюються і перераховуються в амплітуди та частоти звукової хвилі.

Зовнішній вигляд типового MEMC-мікрофона показано на рис. 9.7, а, а його мікрофонне складання – на рис. 9.7, б. Мікрофон у складанні (ASIC + MEMC) розміщується в екранованій ЕМІ-оболонці (Electro Magnetic Interference), яка створює ефект клітки Фарадея⁹.

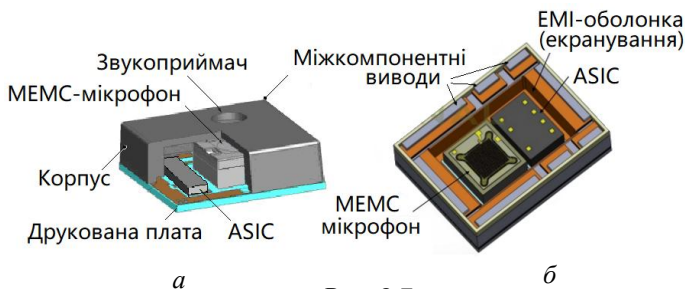


Рис. 9.7

⁹ Клітка Фарадея або «щит Фарадея» – пристрій для екранування електронної апаратури. Являє собою замкнуту оболонку (клітку), виконану із струмопровідного матеріалу. Коли така клітка потрапляє в електромагнітне поле, в ній створюється власне поле, яке компенсує зовнішнє

Спеціалізована мікросхема ASIC містить фільтрувальні конденсатори для захисту від наводок. На ній же формується підсилювач сигналу, різного виду фільтри, а також АЦП. Сучасні ASIC можуть містити мікропроцесори, що формують алгоритми технології ANC.

Крім використання в MEMC-мікрофонах, акустичні сенсори знаходять й інші застосування. Акустичні датчики застосовуються в автомобільній індустрії (датчики крутильного моменту і тиску в шині), медицині (хімічні датчики) і у багатьох інших сферах (як датчики вологості, температури тощо). Наприклад, акустичні сенсори, вимірюючи нечутні звукові емісії високої частоти, які викликаються тертям і зіткненням матеріалів рухомих деталей, можуть «прослуховувати» роботу машин і обладнання, визначати неполадки і в разі потреби вимикати обладнання.

Нарешті акустичні датчики широко використовуються для вимірювання відстаней – в акустичних далекомірах.

9.2. Ультразвукові датчики відстані

Ультразвукові хвилі є акустичними хвилями, частота яких (понад 20 кГц) лежить за межами чутності людського вуха. Однак сигнали цих частот сприймаються деякими тваринами. А деякі види ссавців, таких як кажани і дельфіни, використовують принцип ехолокації ультразвуку (УЗ) для виявлення перешкод і орієнтування в просторі. Цей само принцип ехолокації покладено в основу побудови УЗ датчика відстані.

Ультразвукові датчик відстані складається з таких основних елементів: передавача (випромінювача), приймача (мікрофона) і



Рис. 9.8

перетворювача. Роль мікрофонів і випромінювачів у сфері УЗ виконують пристрої, які називаються трансдуктори. Оскільки звук з високою частотою розсіюється в навколишньому середовищі менше, то це зумовлює променевий характер поширення УЗ хвилі, тобто УЗ легше фокусувати і відповідно отримувати більш концентроване, вузьке і напрямлене випромінювання. А чим вужча діаграма головного пелюстка (рис. 9.8) випромінювача, тим вища чутливість датчика. Малий же період

коливань дозволяє випромінювати УЗ у вигляді імпульсів і здійснювати в середовищі точну часову селекцію сигналів, що поширюються у просторі. Перевагами УЗ-датчиків є велика відстань виявлення (до 10 м) і можливість виявляти будь-які об'єкти, що відбивають звук, незалежно від їх форми та кольору.

Принцип випромінювання і приймання УЗ-сигналів лежить в основі УЗ-датчиків відстані. Трансдуктор-випромінювач датчика випромінює короткий УЗ-імпульс. Зіткнувшись з об'єктом, частина енергії імпульсу відбивається. У разі УЗ-хвиль відбита енергія розсіюється в просторі. Це означає, що незалежно від напрямку падаючого променя, усі відбиті промені майже рівномірно розподіляються всередині широкого просторового кута, який може досягати значення 180° . Відбиту від об'єкта енергію вже як «відлуння» вловлює трансдуктор-приймач датчика. Знаючи швидкість поширення звуку в навколишньому середовищі $V_{зв}$ і час T , заміряний таймером датчика, розраховується відстань до об'єкта:

$$D = (T \cdot V_{зв}) / 2. \quad (9.1)$$

Для генерації будь-яких механічних хвиль, включаючи УЗ-хвилі, потрібно організувати обернено поступальний рух поверхні, під час якого створюються зони розрядження і стиснення робочого середовища: газового (повітряного), рідинного або твердого. Для збудження УЗ-хвиль найчастіше застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі (9.9), які працюють в режимі зворотного п'єзоелектричного ефекту і безпосередньо перетворюють електричну енергію в механічну. Для створення сфокусованих УЗ-пучків поверхні металевої мембрани п'єзоелектричного випромінювального елемента надається конусоподібна форма.

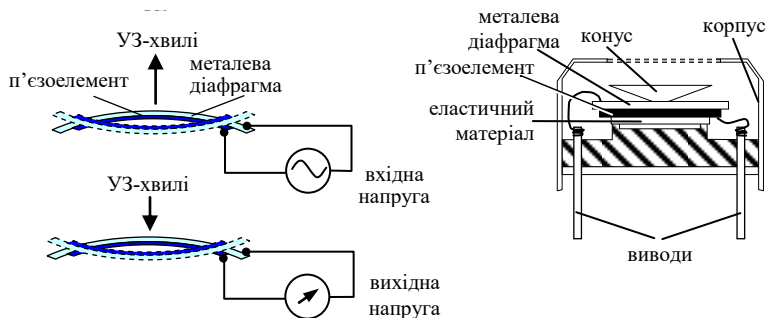


Рис. 9.9

Вхідна напруга, що прикладена до п'єзокерамічних елементів, змушує його згинатися, збуджуючи тим самим УЗ-хвилі. Оскільки п'єзоелектрик є зворотним ефектом, вплив УЗ-хвиль на той же керамічний елемент призводить до появи на його поверхні електричних зарядів. Інакше кажучи, елемент може працювати і як випромінювач, і як мікрофон. Типова робоча частота випромінювального п'єзоелемента становить близько 32 кГц. Для підвищення ефективності частота генератора, який задає робочу частоту, має дорівнювати резонансній частоті керамічного елемента. Дотриманням цієї умови вдається реалізовувати кращу чутливість і ефективність елемента. Швидкість переміщення УЗ-хвилі в повітрі становить 340 м/с за температури 20 °С, тобто для виявлення об'єкта на відстані 1 м потрібно 3 мс.



Рис. 9.10

У разі роботи схеми в імпульсному режимі для передавання і приймання сигналу можна використовувати один і той же п'єзоперетворювач. Для безперервного режиму роботи потрібні два п'єзоелементи. Ультразвуковий далекомір HC-SR04 (рис 9.10) є зразком далекоміра з безперервним режимом роботи.

Далекомір HC-SR04 складається з генератора УЗ-імпульсів, двох трансдукторів (випромінювача і приймача) і підсилювача-формувача вихідного сигналу (рис. 9.11).

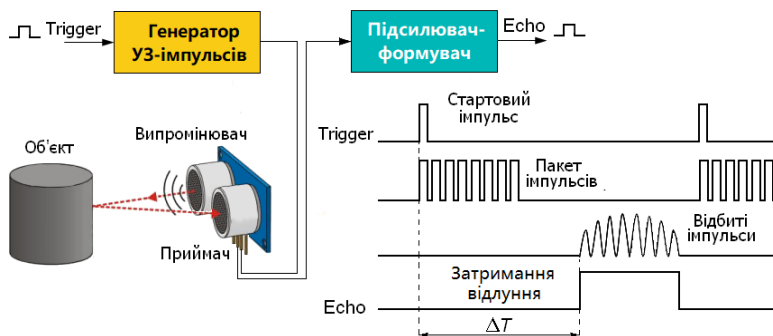


Рис. 9.11

Коли на вхід генератора УЗ-імпульсів приходять стартовий імпульс «Trigger» тривалістю 10 мкс, електронна схема далекоміра

генерує пакет з 8 імпульсів УЗ-частоти (40 кГц), що надходить на випромінювач і запускає лічильник, убудований в мікроконтролер. Відбившись від поверхні, УЗ імпульси сприймаються приймачем далекоміра і надходять на підсилювач-формував, на виході якого формується імпульс Echo (відлуння) з логічним рівнем і команда зупинення лічильника. Наступний імпульс може бути випромінюваний, тільки після зникнення відлуння від попереднього. Цей час називається періодом циклу. Рекомендований період між імпульсами має бути не меншим за 60 мс.

Знаючи час надходження відбитого імпульсу і швидкість звуку, в зовнішньому пристрої обчислюється відстань, яка пройде на звуковою хвилею через інтервал часу між фронтами пускового імпульсу і відлуння за формулою (9.1).

Факторів, що погіршують УЗ-вимірювання відстані:

1. Великі кути між площиною поверхні відображення і віссю головного пелюстка випромінювача. У випадках, коли цей кут відрізняється від 90 °, відбита хвиля відхиляється від осі датчика, що знижує максимальну дистанцію виявлення. Чим більша відстань між об'єктом і датчиком, тим сильніше виявляється цей ефект;

2. Звукобирні поверхні відображення можуть призвести до неправильних вимірювань унаслідок поглинання (ослаблення) сигналу.

3. Висока вологість (дощ, сніг) викликає паразитний сигнал-відлуння, оскільки сигнал може частково відбиватися від крапель (сніжинок).

4. Сильні потоки повітря можуть пришвидшити або навпаки уповільнити звукову хвилю.

5. Коли поверхня відображення випромінює велику кількість тепла, виникають різні температурні області, які змінюють швидкість поширення хвилі, що призводить до неточності роботи датчика.

Ультразвуковий далекомір на відміну від далекомірів, наприклад оптичного типу, має значно меншу швидкість вимірювань. Однак існують і його переваги: досить висока точність, низька чутливість до забруднення повітря, до фарбування поверхні об'єктів, а також великий експлуатаційний діапазон температур. Крім того, обладнання УЗ-далекоміра практично не потребує техобслуговування.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які взагалі існують версії мікрофонів?
2. Які типи мікрофонів відіграли найважливішу роль в еволюції мікрофонних технологій?
3. Назвіть основні переваги, які відрізняють MEMS-мікрофони від ЕСМ.
4. У чому полягає основна відмінність між ЕСМ і кремнієвим МЕМС-мікрофоном?
5. До якого типу (за принципом роботи) мікрофонів належать МЕМС-мікрофони?
6. Які два принципово важливі елементи обов'язкові для будь-якого МЕМС-мікрофона?
7. Для чого МЕМС-мікрофонне складання розміщується в ЕМІ-прокладці?
8. Навіщо в акустичному резонаторі під мембраною МЕМС-мікрофона формується отвір?
9. Для чого нерухома обкладка МЕМС-мікрофона перфорується акустичними отворами?
10. Який принцип покладено в основу побудови УЗ датчиків відстані?
11. За якою формулою розраховується відстань до об'єкта?
12. Які перетворювачі найчастіше застосовують для збудження УЗ хвиль?
13. Якою повинна бути робоча частота УЗ-генератора, щоб забезпечити максимальну ефективність вимірювання відстані?
14. Із яких елементів складається далекомір HC-SR04?
15. Який рекомендований період повинен бути між двома пакетами імпульсів УЗ-частоти?
16. Які фактори, погіршують УЗ-вимірювання відстані?

Розділ 10. Датчики магнітного поля

Принцип дії датчиків магнітного поля ґрунтується на фізичних ефектах, які виникають у матеріалах, що перебувають у магнітному полі. Практичне застосування в датчиках магнітного поля в основному знайшли ефект Холла і магніторезистивний ефект. Обидва ефекти зумовлено зміною траєкторії руху заряджених частинок у магнітному полі.

Сфери застосування датчиків магнітного поля вельми широкі: зчитування даних з магнітних карток; датчики наближення; датчики швидкості обертання; системи електронного запалювання; вимірювання магнітного поля; вимірювання струму; лінійні (кутові) перетворювачі; магнітні головки; вимірювання повітряних зазорів і т. ін.

Зокрема на основі ефекту Холла працюють датчики, які виявляють магнітне поле і видають електричну напругу, пропорційну його інтенсивності.

10.1. Датчики Холла

Датчики Холла є основою багатьох типів датчиків, зокрема МЕМС-магнітометрів. Датчики класифікуються залежно від сфери застосування на автомобільні, індустриальні та загального застосування і залежно від призначення розрізняються за конструктивними і електричними характеристиками та робочим діапазоном температур. Однак, незважаючи на відмінності, всі прилади мають схоже функціонально закінчене ядро. Це елемент Холла і схема оброблення сигналу.

Елементу Холла схематично показаний на рис. 10.1. Смугова пластина з певного матеріалу заданої геометрії через контакти 1 і 2 проводить струм I у поздовжньому напрямку і зазнає впливу магнітного поля B , що діє перпендикулярно до пластини. Різниця потенціалів, яка виникає на краях пластинки в поперечному напрямку (під впливом магнітного поля викривляється траєкторія руху носіїв струму, і вони зміщуються до краю пластини) і яка отримала назву напруга Холла U_H , знімається

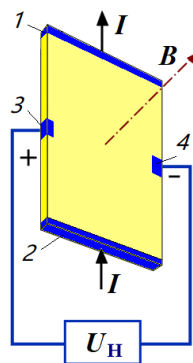


Рис. 10.1

з контактів 3, 4. Напруга Холла, пропорційна добутку індукції магнітного поля B і струму I , залежить від типу матеріалу пластини⁹, її геометрії (ефективної площі активної зони) і температури.

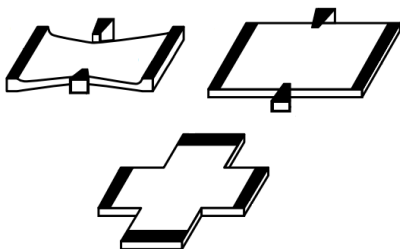


Рис. 10.2

Ефективна площа датчика Холла обмежується кінцями електродів. За рахунок зміни розмірів і геометрії датчики можуть бути оптимізовані для виконання різних функцій. Три найпоширеніші форми пластин датчиків Холла зображено на рис. 10.2. Хрестоподібний симетричний датчик і датчик з геометрією метелика мають високу чутливість до магнітних полів, а прямокутний датчик – підвищену напругу Холла.

Пластину, яка містить мініатюрні магніточутливі елементи, що виконані за МЕМС-технологіями показано на рис. 10.3. Ці мініатюрні елементи мають різні варіанти компонування: вони можуть об'єднуватися в двоконтактні або триконтактні магніточутливі зонди (магнітометри), складатися у вигляді матриць та ін.



Рис. 10.3

Умовно всі датчики Холла можна поділити на дві групи: з лінійним і логічним виходом. Датчики з лінійним виходом зазвичай застосовують для визначення невеликих переміщень і побудови більш складних датчиків.

Лінійні датчики магнітного поля на ефекті Холла складаються з напівпровідникового елемента Холла, стабілізатора живлення, диференціального підсилювача і вихідного каскаду (рис. 10.4, а). Вихідна напруга цих датчиків перебуває в лінійній залежності (рис. 10.4, б) від величини магнітного поля, яка в робочому діапазоні може бути як додатною, так і від'ємною.

⁹ Для виготовлення елементів Холла найчастіше використовують: InSb – антимонід індію, GaAs – арсенід галію і InAs – арсенід індію.

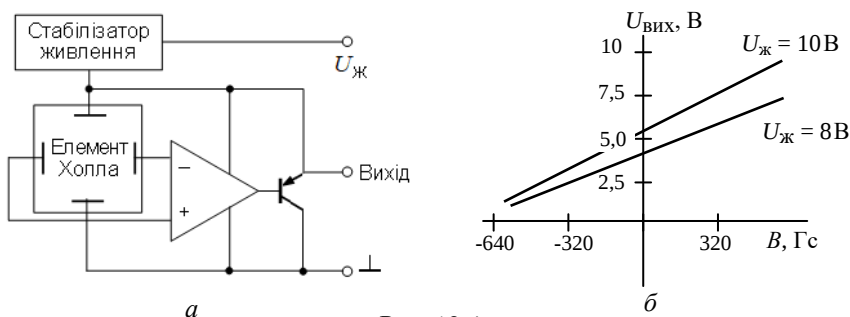


Рис. 10.4

Датчик Холла SS495A як один із шести представників популярної серії SS490, що розрізняються за температурною стабільністю і робочим діапазоном магнітних полів, показано на рис. 10.5. Цей датчик виконаний в мініатюрному корпусі TO-92 з трьома виводами. Висока температурна стабільність приладу забезпечується вбудованою схемою температурної компенсації, елементи якої проходять лазерну пригонку в процесі виробництва. Датчик має нелінійність характеристики близько 1% у діапазоні магнітних полів ± 670 Гс і зберігає працездатність у діапазоні напруг живлення 4,5 ... 10 В.



Рис. 10.5

На рис. 10.6 наведено кілька прикладів застосування лінійних датчиків на основі ефекту Холла: *а* – вимірювання тиску, *б* – контроль положення дросельної заслінки, *в* – датчик струму.

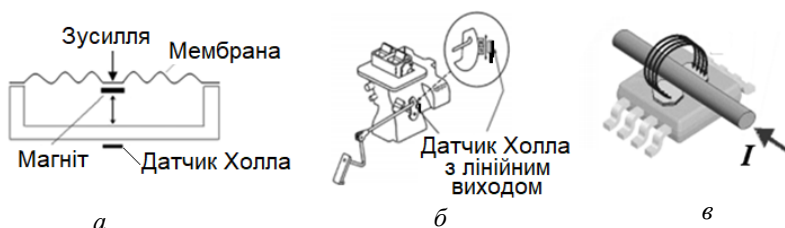


Рис. 10.6

Датчики Холла з логічним виходом застосовують для визначення наявності будь-якого феромагнітного об'єкта в полі «зору» датчика. На відміну від лінійних датчиків магнітного поля вихід

цих приладів, залежно від величини прикладеного магнітного поля, набуває лише двох станів: високий рівень або низький.

Вихідний сигнал конвертується з лінійного в логічний триге-

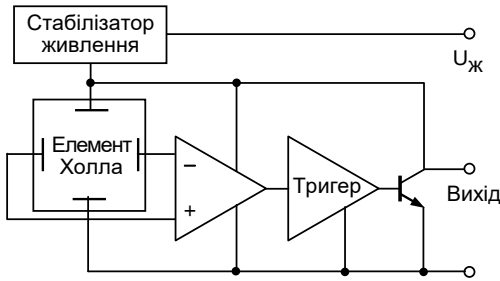


Рис. 10.7

ром Шмідта (рис. 10.7). Завдяки гістерезисної характеристики тригера підвищується стійкість датчика та усуваються помилкові спрацьовування. У вихідній характеристиці датчика принципово важливі лише дві точки: точка вмикання (відпові-

дає величині діючого магнітного поля, за якої вихід переходить у ввімкнений стан) і точка вимикання (навпаки).

На рис. 10.8 наведено кілька прикладів використання датчиків магнітного поля з логічним виходом: *а* – лічильник оборотів лопаті витратоміра; *б* – визначення точки зупинки стрічки транспортера; *в* – визначення положення осі.

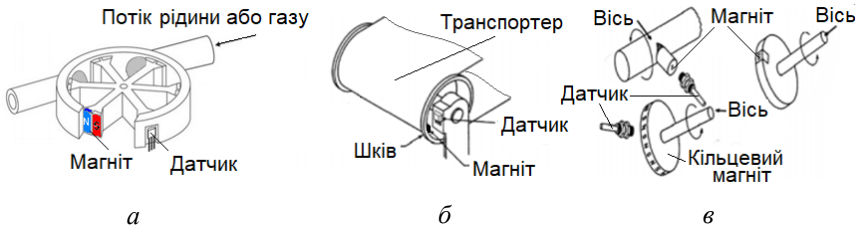


Рис. 10.8

Для побудови сенсорних систем визначення положення, відстані, кута повороту, вібрації, переміщення на базі розглянутих датчиків – як лінійних, так і з логічним виходом - необхідне джерело зовнішнього магнітного поля. Зазвичай для цього використовують постійні магніти, які закріплюються на контрольованих об'єктах. Так, компанія *Honeywell* з метою логічного завершення лінійки сенсорів Холла випускає кілька типів постійних магнітів у різному конструктивному виконанні (рис. 10.9). Точні габарити, діапазон робочих температур, залежність величини магнітного поля від від-

стані та рекомендації щодо застосування детально відображені в технічній документації на виробі.

Конкурентами датчиків Холла є магніторезистивні датчики, які відрізняються максимально високою чутливістю, у той час як датчики Холла мають більш лінійну вихідну характеристику.



Рис. 10.9

10.2. Магніторезистивні датчики

Магніторезистивний ефект (магнетоопір) виявляється в зміні електричного опору матеріалу в магнітному полі. Уперше ефект був виявлений у 1856 р. Вільямом Томсоном, згодом за значні наукові заслуги йому було пожалувано перство з титулом барона Кельвіна (лорд Кельвін).

Магнітоопір можна класифікувати за знаком зміни опору матеріалів у магнітному полі та за відмінностями причин, які зумовлюють зміну траєкторій руху носіїв струму. У найпростіших уявленнях причиною магніторезистивного ефекту є викривлення траєкторій і спін-залежне розсіювання носіїв струму в магнітному полі, що спричиняє до зміну величини провідності матеріалу.

Серед ефектів, які призводять до зміни магнетоопору можна відокремити такі.

Від'ємний магнетоопір – одноелектронний квантовий інтерференційний ефект, який призводить до додаткового розсіювання носіїв, що зменшує електричну провідність.

Анізотропний магнетоопір, що зумовлюється квантово-механічним ефектом, який полягає в зміні електричного опору феромагнітних матеріалів залежно від кута між напрямком руху носіїв струму і напрямком намагніченості у зразку внаслідок спін-орбітальної взаємодії між носієм струму та його власним магнітним моментом, обумовленим спіном носія. Величина анізотропного магнетоопору описується виразом:

$$\Delta R = \frac{R_H - R_0}{R_H},$$

де ΔR – відносна зміна електричного опору; R_0 – електроопір за відсутності магнітного поля; R_H – електроопір за появи магнітного поля H .

Величина ефекту анізотропного магнітоопору залежить від взаємної орієнтації напрямку струму і намагніченості.

Гігантський магнетоопір – спостерігається в тонких багатошарових металевих пластинках, які складаються з послідовної ротації плівок феромагнітних і струмопровідних немагнітних матеріалів. Гігантський магнетоопір зумовлюється квантомеханічним ефектом істотної зміни електричного опору такої структури через зміни взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів. Напрямок намагніченості можна керувати, наприклад, прикладанням зовнішнього магнітного поля. В основі ефекту покладено розсіювання електронів, яке залежить від напрямку спіну.

Колосальний магнетоопір – квантомеханічний ефект полягає в сильній залежності електричного опору матеріалу від величини зовнішнього магнітного поля. Термін застосовується до деяких феромагнітних і антиферомагнітних напівпровідників, зазвичай оксидів металів на базі манганітів (мінералів, що містять марганець) зі структурою перовскіту (титанат кальцію) на відміну від подібного явища в багатошарових плівках – ефект гігантського магнітоопору.

Натепер як датчики магнітного поля найчастіше застосовують анізотропні магніторезистивні датчики, призначені для вирішення різних завдань – безконтактного вимірювання швидкості та напрямку обертання зубчастих коліс і багатополусних магнітних роторів, визначення кута повороту або величини лінійного переміщення, безконтактного вимірювання струму, а також для визначення курсу об'єкта за магнітним полем Землі в магнітометрії.

Анізотропний магніторезистивний ефект (AMR) найбільше виявляється під час виготовленні чутливого елемента у вигляді тонкої смужки з геометричними розмірами, які задовольняють умови:

$$d < b \ll L,$$

де d – висота; b – ширина; L – довжина смужки.

Принцип дії датчиків AMR полягає в здатності довгої пермалоевої (NiFe) плівки змінювати свій опір залежно від взаємної орієнтації струму I , що протікає через плівку і напрямку вектора її

намагніченості M . Зовнішнє магнітне поле (рис. 10.10) повертає вектор намагніченості плівки M на кут θ . Величина θ залежить від напрямку і величини зовнішнього магнітного поля. При цьому змінюється електроопір плівки $R = R_0 + \Delta R \cos(2\theta)$.

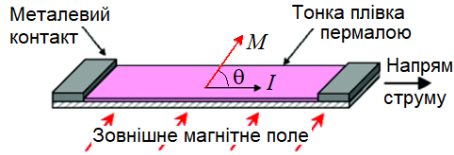


Рис. 10.10

Для побудови датчика чотири ідентичні магніторезистивні плівки з'єднуються за мостовою схемою і утворюють плечі моста (рис. 10.11). Плівки формуються осадженням тонкого шару пермалою на кремнієву пластину.

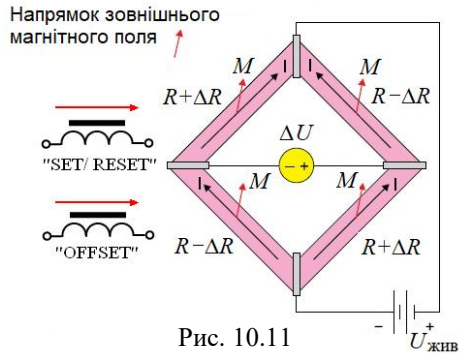


Рис. 10.11

У вихідному стані, відразу після виготовлення або в результаті впливу руйнівного магнітного поля величиною понад 15 ... 20 Гс, магнітну структуру плівок моста не визначено. Це пояснюється хаотичною орієнтацією і взаємною компенсацією магнітних доменів, які її утворюють (рис. 10.12, а). Такий стан датчика не придатний для вимірювання через його нульову чутливість. Для примусового формування осі вектора намагнічування (так званої легкої осі) мостового магніторезистивного датчика використовується спеціальну вбудовану плоску котушку SET/RESET (установлення /скидання) (рис. 10.11, 10.13). Подача короткого установлювального імпульсу струму 2 ... 5 А тривалістю 1 ... 2 мкс через цю котушку формує сильне магнітне поле, яке орієнтує магнітні домени всіх плівок сенсора в одному напрямку (рис. 10.12, б), визначаючи тим самим напрямок вектора намагнічування. Ця процедура повертає прилад у режим максимальної чутливості і відновлює

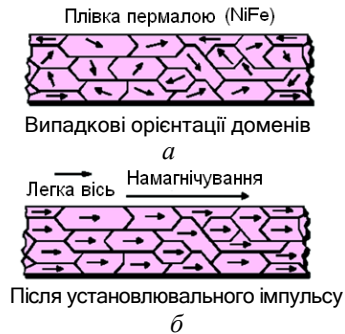


Рис. 10.12

усі його характеристики, які зберігаються до чергового потрапляння сенсора в сильне магнітне поле. Напрямок легкої осі завжди вказується в технічній документації на прилад (рис. 10.14).

Друга котушка OFFSET (рис. 10.11, 10.13) призначена для компенсації впливу паразитних магнітних полів, створених, наприклад, будь-яким феромагнітним об'єктом або металевими предметами.

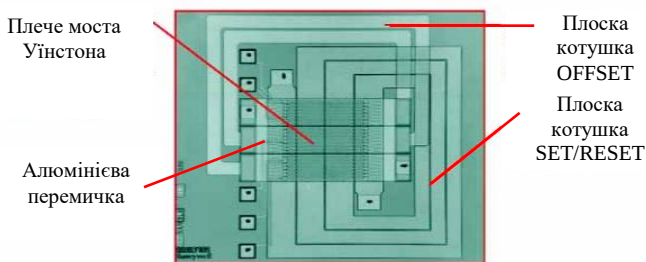


Рис. 10.13

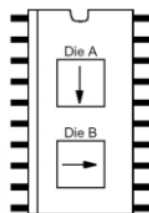


Рис. 10.14

Під час вимірювання на міст подається напруга, і через магніторезистори починає протікати струм. Під час впливу на вимірювальний міст зовнішнього магнітного поля H , вектор намагніченості починає обертатися або змінювати кут. При цьому в двох протилежно розташованих резисторах моста вектор намагніченості зміщується у напрямку струму, що викликає збільшення їх опору (див. рис. 10.11). В останніх двох протилежно розташованих резисторах моста вектор намагніченості зміщується проти напрямку струму, у результаті опір їх зменшується. Таким чином, вихідна напруга моста змінюється залежно від напруженості прикладеного магнітного поля.

Уразі використання магніторезистора у вигляді суцільної чутливої смужки пермалою опір датчика залежно від напрямку намагніченості буде змінюватися нелінійно (рис. 10.15, *a*); крім того така схема має низьку чутливість. Тому для побудови лінійного АМР-датчика відмовляються від застосування суцільної смужки пермалою як магніторезистора, а використовують спеціальні пермалоеві плівки, у яких пермалою перекривається особливими низькоомними алюмінієвими або срібними смужками, розміщеними під кутом в 45° до довжини магніторезистора (рис. 10.16). Вектор намагніченості при цьому спрямований також зліва направо. Однак

струм у пермалойі (завдяки розташуванню смужок перекриття під кутом 45° до довжини магніторезистора), вибираючи найкоротший шлях, на пермалоевих ділянках також тече під кутом 45° . Застосовуючи цей метод, створюють датчики із залежністю $\Delta R(H)$, яка має яскраво виражену лінійну ділянку (рис.10.15, б), яка і використовується для вимірювання величини поля H в напрямку осі чутливості датчика.

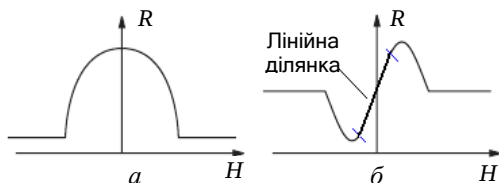


Рис. 10.15

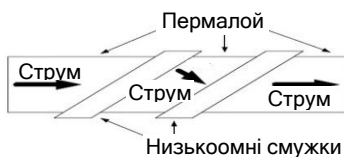


Рис. 10.16

На практиці для збільшення чутливості датчика кожне плече моста формують з декількох магніторезистивних плівок, паралельно орієнтованих на підкладці, послідовно з'єднаних між собою за допомогою алюмінієвих перемичок і захищених зверху шаром нітриду танталу (див. рис. 10.13).

АМР-датчики можуть використовуватися там, де використовуються датчики Холла. До того ж порогові одновісні (одномостові) АМР-датчики дозволяють легко працювати з полями, індукція яких нижча за 20...25 Гс, що для датчиків Холла є вже критично низьким значенням.

Порогові датчики застосовують лише для визначення наявності магнітного поля та оцінювання його величини. Поширеним застосуванням таких датчиків є визначення граничного стану (наближення) рухомих деталей верстатів і машин. У цьому випадку датчик працює як релейний елемент, його характеристика має всього два рівні – високий або низький, які відповідають наявності або відсутності феромагнітного об'єкта (об'єкта з магнітною міткою) поряд з датчиком.

Але більшість АМР-датчиків призначені для роботи в лінійному режимі. На основі одновісних датчиків розробляють сучасні безконтактні МЕМС-датчики вимірювання різних параметрів об'єктів: датчики наближення; датчики швидкості та частоти обертання; вимірники кутів повороту; вимірники струму; вимірники повітряних зазорів тощо.

Відомо, що деякі компанії почали розробляти датчики магнітного поля на основі гігантського магніторезистивного ефекту (GMR). Датчики на основі GMR усувають слабе місце АМР-датчиків і датчиків Холла, яке пов'язане з їх високою чутливістю до флуктуацій повітряного зазору. У зв'язку з тим, що ці магнітні датчики реагують на силу магнітного поля, навіть найменші зміни зазору між магнітом і датчиком призводять до істотних змін сигналу, чого позбавляються додатковим обробленням сигналу датчика.

Натомість GMR-датчики, які компанія *Infineon* спеціально розробила для застосувань, пов'язаних з детектуванням положення, вимірюють тільки напрямок зовнішнього поля незалежно від його інтенсивності, завдяки чому допускаються досить великі зазори і установлювальні допуски. За відповідного збудження повітряні зазори досягають 25 мм, що відкриває абсолютно нові застосування у сфері магнітного детектування.

Дво- і тривісні сенсори здебільшого використовують для побудови МЕМС-датчиків курсу за магнітним полем Землі.

10.3. МЕМС-компаси

Магнітне поле Землі (МПЗ) може бути апроксимоване дипольною моделлю (рис. 10.17), магнітна вісь якої відхилена від осі обертання Землі на кут близько $11,5^\circ$. Лінії магнітного поля орієнтовані майже вертикально в центрах північної та південної півкуль, і горизонтально на ваторі. Причому у всіх випадках вони вказують на північний магнітний полюс.

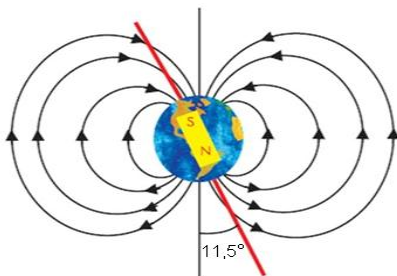


Рис. 10.17

Магнітне поле Землі характеризується напруженістю T , тобто величиною і напрямком сили, що діє в даній точці на одиничну масу. У навколорем-

ному просторі значення T змінюються залежно від координат місцеположення від $5 \cdot 10^{-5}$ Тл на широті 50° до $3,1 \cdot 10^{-5}$ на екваторі.

Напрямок вектора напруженості МПЗ визначається трьома складовими по осях X_g , Y_g і Z_g у прямокутній системі координат (рис. 10.18), пов'язаній із Землею. Також магнітне поле Землі можна описати горизонтальною складовою напруженості H , магнітним схиленням D (кутом між H і площиною географічного меридіана) і магнітним нахилом I (кутом між T і площиною горизонту). Напрямок горизонтальної складової напруженості МПЗ H називають напрямком магнітного меридіана. Саме горизонтальні компоненти МПЗ використовуються в навігації для визначення курсу.

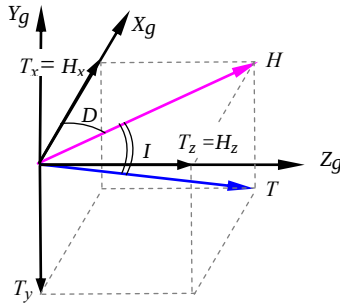


Рис. 10.18

В існуючих бортових системах навігації для вимірювання магнітного курсу, як правило, використовують індукційні компаси на основі ферозондів. Однак таким датчикам притаманні порівняно значні масогабаритні параметри, а також наявність карданних, кренових і віражних помилок через особливості поплавкового підвісу чутливого елемента в корпусі з рідиною для утримання його в горизонті.

Для побудови електронних компасів на основі ефекту Холла або магніторезистивного ефекту розроблено компасні набори, засновані на сукупності високочутливих датчиків магнітного поля і МЕМС-акселерометрів (визначення горизонтальності об'єкта), якими керує мікропроцесорна система.

У найпростішому випадку, коли магнітометр розташовується паралельно поверхні землі без нахилу відносно осей Z_g і X_g для обчислення магнітного курсу ψ_m використовують дві (за віссю X та за віссю Z) складові вектора МПЗ, що вимірюються магнітометром у системі координат пов'язаної з об'єктом – ($H_x = T_x$) та ($H_z = T_z$), а потім обчислюють курс за найпростішою тригонометричною формулою

$$\psi_m = \arctg \frac{H_z}{H_x}. \quad (10.1)$$

Але якщо магнітометр розташовується під певним кутом до поверхні землі, то у формулі (10.1) необхідно враховувати нахил магнітометра за креном і тангажем. Для цих цілей до складу компасного набору входить MEMC-акселерометр. Використовуючи тривісний акселерометр як інклінометр, вимірюють кути крену γ і тангажа ϑ об'єкта. Перераховуючи показання тривісного магнітометра із системи координат пов'язаної з об'єктом в земну систему координат, обчислюють магнітний курс за формулою

$$\psi_1 = \arctg \frac{H_{zg}}{H_{xg}} = \arctg \frac{T_z \cos \gamma + T_y \sin \gamma}{T_x \cos \vartheta - T_y \cos \gamma \sin \vartheta + T_z \sin \gamma \sin \vartheta}. \quad (10.2)$$

За відомого значення магнітного схилення можна також визначити справжній географічний курс об'єкта.

Одним з лідерів на ринку датчиків магнітного поля, лінійку яких складають MEMC-компаси та датчики для споживчої електроніки, є японська компанія *Asahi Kasei Microsystems (AKM)*.

Яскравим представником продукції фірми *AKM* є AK8973S – бренд датчиків магнітного поля, самий малогабаритний тривісний MEMC-компас. Завдяки застосуванню монтажу SoC (рис.10.19), розміри мікросхеми доведені до $2,5 \times 2,5 \times 0,5$ мм. Електронний компас є монолітним кремнієвим датчиком магнітного поля на основі трьох взаємно перпендикулярних (рис. 10.20, а) датчиків Холла з круговим феритовим концентратором, який фокусує силові лінії МПЗ в область розташування датчиків Холла, збільшуючи їхню магнітну чутливість в 2...6 разів. Електронні схеми підсилювача і логічних



Рис. 10.19

Датчики Холла з круговим феритовим концентратором, який фокусує силові лінії МПЗ в область розташування датчиків Холла, збільшуючи їхню магнітну чутливість в 2...6 разів. Електронні схеми підсилювача і логічних

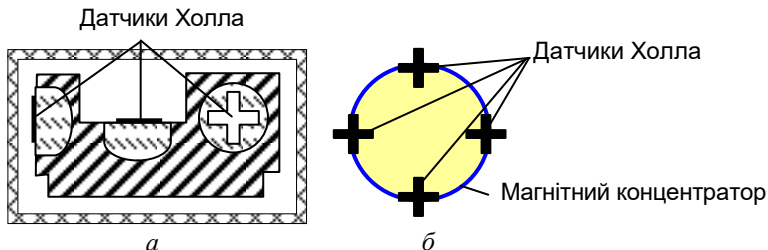


Рис. 10.20

схем формуються на тому самому кристалі. Під концентратором (рис. 10.20, б) по периферії розміщено вісім спарених тонкоплівкових елементів Холла, які формують датчик Холла (чотири комірки хрестоподібної форми з фазовим зсувом в 90°), виготовлених із застосуванням МВЕ-технології¹⁰.

Фотографію інтегральної мікросхеми МЕМС-компасу з елементами Холла (з великим збільшенням) показано на рис. 10.21.

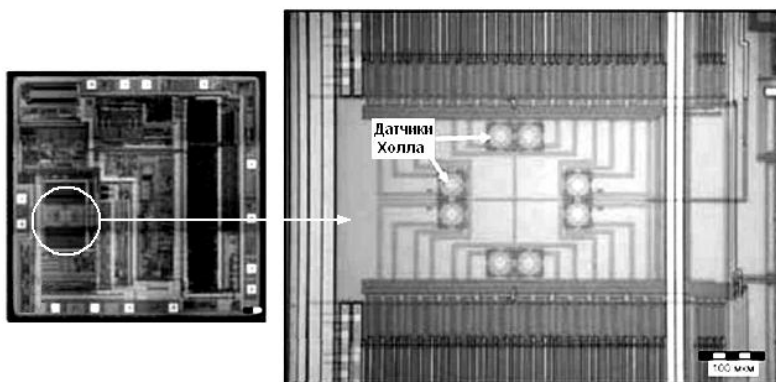


Рис. 10.21

Альтернативною цифровим компасам *Asahi Kasei* є компасні набори *Honeywell* та цифрові компаси *STMicroelectronics*, що побудовані на основі дво- і тривісних магніторезистивних датчиків магнітного поля, а також МЕМС-акселерометрів для компенсації нахилу. Після калібрування електронні компаси на магніторезисторних датчиках можуть досягати точності, що перевищує один градус.

Датчики *Honeywell* та *STMicroelectronics* за принципом своєї дії, методу зв'язку з керувальним пристроєм і навіть за структурою регістрів не сильно відрізняються один від одного. Так, наприклад, HMC5883L (рис. 10.22) за своїми характеристиками дуже схожий на магнітометр у складі інерціальної системи LSM303 компанії *STMicroelectronics*.



Рис. 10.22

¹⁰ МВЕ-технологія забезпечує епітаксії (наращування) тонких плівок напівпровідникових з'єднань у надвисокому вакуумі на поверхні підкладки.

Магнітометр складається з двох частин – чутливого елемента і електронного вимірювального блока. Для виготовлення чутливих елементів таких магнітометрів використовують AMR-технологію (осадження тонкого шару пермалою на кремнієву пластину). Нелінійна характеристика сенсорного елемента виправляється алгоритмами вбудованої цифрової частини магнітометра, тобто без перекриття пермалоєвої плівки низькоомними срібними смужками.

Структурну схему магнітометра виробництва *STM* показано на рис. 10.23. Основу схеми складає трикомпонентний пристрій вимірювання магнітного поля Землі. Дані, що містять інформацію про поточний азимут, надходять на ASIC пристрою перетворення. За рахунок високої чутливості АМР-сенсорів магнітного поля може спостерігатися ефект залишкової намагніченості магнітометра.

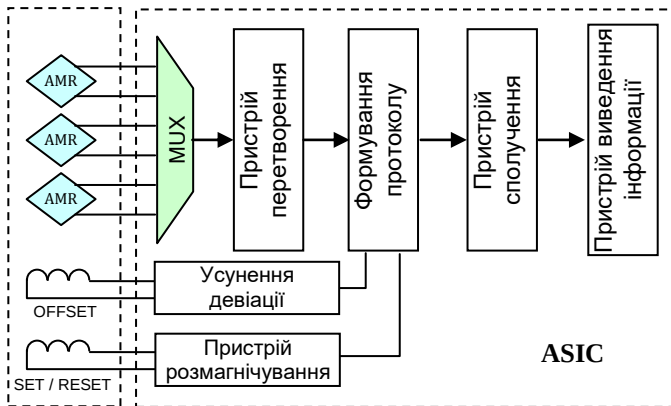


Рис. 10.23

Для запобігання спотворенням показань магнітометра залишкова намагніченість знімається пристроєм розмагнічування, який подає імпульс розмагнічування через котушку SET/RESET. При цьому котушка SET/RESET виконує не тільки функцію примусового формування осі вектора намагнічування, а також інвертує передавальну характеристику датчика шляхом її дзеркального відображення відносно двох зсувів, тобто змінює напрям осі вектора намагнічування на протилежний.

Інвертування необхідно для реалізації двоступеневої методики вимірювання величини магнітного поля, яка усуває вплив температурного дрейфу елементів АМР-моста та схеми оброблення

сигналу, а також похибок, що викликані нелінійністю та міжосьовим ефектом. а також запобігає втраті слабкого сигналу на фоні сильних паразитних полів.

Кожен цикл вимірювання складається з такої послідовності:

- генерація імпульсу Set убудованими котушками розмагнічування та запам'ятовування вихідної напруги моста U_{set} ;
- генерація імпульсу Reset та запам'ятовування результату (U_{reset});

- обчислення вихідного значення $U_{вих} = (U_{set} - U_{reset})/2$, що виключає початковий зсув і температурні ефекти як самого АМР-моста, так й зовнішньої схеми оброблення сигналу;

- переміщення обчисленого значення у вихідний регістр.

Після перетворення по каналу даних цифровий сигнал надходить на пристрій формування протоколу, конструктивно виконаний на базі мікроконтролера. Формувач протоколу є пристроєм, який виконує функцію узгодження та формування даних для подальшого оброблення інформації.

Зчитування інформації відбувається в момент надходження сигналу дозволу на формувач протоколу, комутований пристроєм перетворення в той момент часу, коли пристрій перетворення готовий до видачі інформації.

Інформація про поточний курс, що закодована в біти даних, далі надходить на пристрій сполучення. У пристрої сполучення сигнал перетворюється в послідовний код, який і видається на пристрій виведення інформації.

Після зчитування даних з вихідних регістрів трьох осей магнітометра розраховується арктангенс магнітного курсу з урахуванням показів акселерометра відповідно до формули (10.2).

У разі застосування магнітометрів на об'єктах, де наявні додаткові магнітні поля, наприклад на літаку, на датчик діють завади, які спотворюють його показання – з'являється магнітна девіація (похибка показань магнітного компаса).

Спотворення від магнітних матеріалів «залізо, нікель, сталь, кобальт і т. ін.», які створюють додаткові магнітні поля можна уявити як суму магнітного поля Землі та магнітного поля транспортного засобу. У цьому випадку для визначення магнітного поля Зе-

млі необхідно заздалегідь скомпенсувати додаткове магнітне поле транспортного засобу.

Магнітне поле транспортного засобу спотворює розподіл магнітного поля у місті розташування магнітометра, перетворюючи його з кола в еліпс і зміщуючи його центр (рис. 10.24, а).

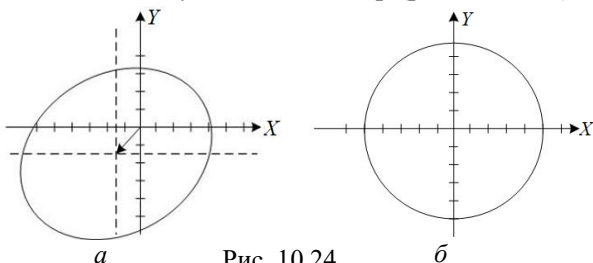


Рис. 10.24

Для компенсації додаткового магнітного поля транспортного засобу (для усунення девіації) використовується котушка OFFSET (див. рис. 10.23). Котушка OFFSET розміщена поруч з АМР-мостом і має визначену геометрію. Котушка здатна згенерувати магнітне поле в тому ж напрямку, що і додаткове поле. Для цього необхідно пропустити через неї струм певної величини і полярності. Магнітне поле транспортного засобу і поле, що формується котушкою OFFSET, додаються один до одного з урахуванням знака і сприймаються мостом АМР-сенсора як єдине ціле.

Для внесення компенсації у виміряні значення горизонтальних складових магнітного поля Землі $X_{\text{вим}}$, $Y_{\text{вим}}$ необхідно визначити два коефіцієнти масштабування $X_{\text{м}}$ і $Y_{\text{м}}$, що перетворюють еліпс у коло, і дві коригувальні величини $X_{\text{кор}}$ і $Y_{\text{кор}}$, які повертають центр окружності в точку початку координат (рис. 10.24, б).

Найпростіший метод калібрування полягає в такому:

- рухомий об'єкт зі встановленим на ньому компасом повертається на 360° у горизонтальній площині;

- визначаються максимальні X_{max} , Y_{max} і мінімальні X_{min} , Y_{min} показання компасу за осями X і Y ;

- за допомогою чотирьох таких виразів визначаються коефіцієнти $X_{\text{м}}$, $Y_{\text{м}}$ і $X_{\text{кор}}$, $Y_{\text{кор}}$:

$$X_{\text{м}} = \max \left[1, \frac{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \right]; \quad Y_{\text{м}} = \max \left[1, \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}} \right];$$

$$X_{\text{кор}} = - \left[\frac{X_{\text{max}} + X_{\text{min}}}{2} \right] X_{\text{м}}; \quad Y_{\text{кор}} = - \left[\frac{Y_{\text{max}} + Y_{\text{min}}}{2} \right] Y_{\text{м}}.$$

Знайдені коригувальні величини використовують для розрахунку справжніх значень горизонтальних складових магнітного поля Землі:

$$X = X_{\text{м}} X_{\text{вим}} + X_{\text{кор}}; \quad Y = Y_{\text{м}} Y_{\text{вим}} + Y_{\text{кор}},$$

або для формування коригувального магнітного поля котушок OFFSET.

Існують і інші принципи вимірювання магнітного поля, наприклад, на основі магнітного резонансу, індукційні датчики магнітного поля, датчики на основі ефекту Виганда тощо. Але ці принципи вимірювання поки не знайшли свого застосування в MEMC-магнітометрах.

А ось розробки MEMC-магнітометра, що використовує силу Лоренца¹¹ (так стверджують розробники), увінчалися успіхами. Зокрема іспанська компанія *Baolab Microsystems* – перша компанія, яка розробила MEMC-датчик сили Лоренца і новий цифровий тривісний MEMC-компас (BLBC3-D NanoCompass) на основі цього датчика.

Цей прилад має ряд переваг, а саме: більш високу чутливість за зниженої потужності і зменшених розмірів корпусу та значно низку ціну. Додаткова унікальна ознака – автокалібрування, яка підтримує узгоджену точність.

BLBC3-D NanoCompass являє собою перший виріб на основі технології Baolab NanoEMS, які допускають можливість побудови нанорозмірних MEMC з використанням стандартних SoC технологій, тобто монолітно інтегрувати структури MEMC усередині шарів аналогової та цифрової електроніки.

MEMC-елементи формуються впродовж процесу виробництва CMOS усередині пластини міжз'єднань шарів електроніки. За рахунок того, що під час створенні мультисенсора всі елементи, в тому числі MEMC і ASIC, інтегровані на одному кристалі, технологія Baolab NanoEMS дозволяє знизити ціну виробництва, корпу-

¹¹ Сила Лоренца – це сила, що діє на рухомий точковий електричний заряд у зовнішньому магнітному полі.

сування і тестування. Інноваційний дизайн Baolab для компасів включає датчики сили Лоренца для виявлення магнітного поля Землі.

Основою BLBC3-D NanoCompass, є (рис. 10.25) рухома алюмінієва пластина (чутливий елемент), яка підвішена в просторі за допомогою мініатюрних пружин. Чутливий елемент сформований на основі шарів металу між'єднань пластини CMOS за допомогою витравлювання прихованого в метал діелектрика з використанням пара фтороводню.

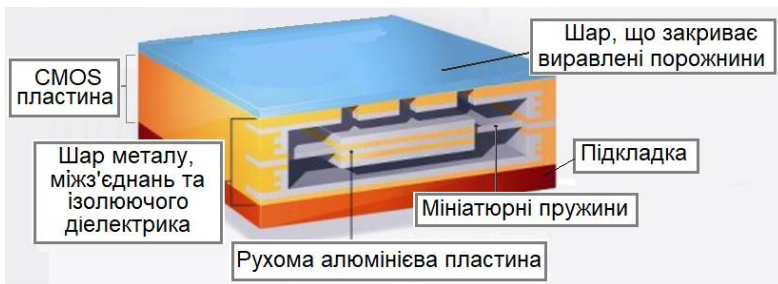


Рис. 10.25

Струм, що протікає через пластину, і оточуюче магнітне поле Землі відтворюють сили Лоренца, які змушують пластину, завдяки її рухливості на пружинах, змінити своє положення, яке вимірюється методом ємнісного детектування.

Цей факт, на наш погляд, ставить під сумнів коректність назви датчика як датчика сили Лоренца, оскільки відповідно до класичної електродинаміки сила Лоренца діє на точкову заряджену частинку, викривляючи траєкторію її руху, але роботи не здійснює. Тут, імовірно, виявляється дія в мікродіапазоні сили Ампера, яка є макроскопічним проявом сили Лоренца.

Зміна ємності між рухомою пластиною і фіксованими електродами навколо неї дозволяє вимірювати магнітне поле за трьома координатами, а на основі цих даних обчислювати напрямок магнітного поля Землі, який вказує на положення компаса в просторі. Таким чином, пропонується метод відкриває нові можливості для електронних MEMC-компасів, побудованих на одному кристалі NanoEMS chip. Вони забезпечують роздільну чіткість (роздільний дозвіл) курсу 5° , сенсорний дозвіл $0,3 \text{ мкТл}$ і 13 біт на вісь в діапазоні $\pm 1,2 \text{ мТл}$.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які фізичні ефекти знайшли поширене практичне застосування в МЕМС-датчиках магнітного поля?
2. Що являє собою елемент Холла?
3. На які дві групи можна умовно поділити всі датчики Холла?
4. Що являє собою джерело зовнішнього магнітного поля, яке працює спільно з датчиками Холла?
5. Як проявляється маніторезистивний ефект?
6. Яким чином класифікують ефекти, які призводять до зміни магнетоопору?
7. У чутливому елементі якого виду найкраще проявляється АМР-ефект?
8. У чому полягає принцип дії датчиків на основі АМР?
9. Яким чином забезпечується примусове формування осі вектора намагнічування?
10. Яке призначення котушки OFFSET в АМР-датчиках?
11. У чому основна перевага датчиків на основі гігантського магнетоопору?
12. Скількома складовими визначається напрямок вектора напруженості МПЗ?
13. Якими параметрами можна описати МПЗ?
14. Наведіть найпростішу формулу для обчислення магнітного курсу, коли магнітометр не нахилений відносно горизонту?
15. З якою метою до складу компасного набору введений МЕМС-акселерометр?
16. Що являє собою електронний компас на основі датчиків Холла?
17. Яка послідовність кожного циклу вимірювання цифрового АМР-компаса?
18. Наведіть алгоритм найпростішого методу калібрування електронного АМР-компаса.

Розділ 11. Мікроелектромеханічні акселерометри

Основним датчиком, що видає інформацію про рух об'єкта під дією активних сил, є акселерометр – прилад, який вимірює проєкцію уявного прискорення (різницю між справжнім прискоренням об'єкта та прискоренням сили тяжіння). Обов'язковою складовою чутливого елемента акселерометра (рис. 11.1) є інерційна маса

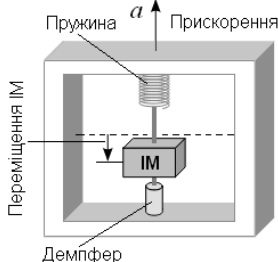


Рис. 11.1

(ІМ), яка закріплюється в пружному підвісі. Відхилення ІМ у корпусі приладу від її початкового положення за наявності уявного прискорення корпусу a містить інформацію про величину цього прискорення. Демпфер у конструкції акселерометра гасить коливання ІМ. Чим більше уявне прискорення, тим сильніше деформується пружина, змінюючи показання приладу.

У разі розташування акселерометра на нерухомому відносно поверхні землі об'єкті $\vec{w} = 0$ він буде вимірювати уявне прискорення $\vec{a} = -\vec{g}$, що створюється силою опори, яка дорівнює за величиною, але протилежна за напрямком вектору напруженості поля сил тяжіння в точці перебування об'єкта.

Площина горизонту в умовах нерухомої відносно Землі основи визначається таким напрямком осі чутливості акселерометра, за якого його показання дорівнюють нулю. Нагадаємо (рис. 11.2),

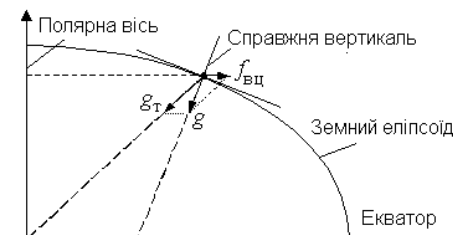


Рис. 11.2

що саме напрямок вектора напруженості поля сил тяжіння (вектора прискорення сили тяжіння g , зумовленого прискоренням сили земного тяжіння g_T та відцентровим прискоренням від обертанням Землі $f_{вц}$, яке спрямоване перпендикулярно до полярної осі) визначає справжню вертикаль. Це положення широко використовують для горизонтування площин деяких об'єктів, зокрема гіроплатформ інерціальних навігаційних систем (ІНС) за допомогою акселерометрів.

Відомо, що за вільного падіння акселерометра з прискоренням, що дорівнює прискоренню сили тяжіння $\vec{w} = \vec{g}$, його показання $\vec{a} = \vec{w} - \vec{g}$ будуть дорівнювати нулю. Проте у горизонтальному польоті, коли піднімальна сила літака компенсує силу тяжіння, можна стверджувати, що акселерометр буде вимірювати уявне прискорення маси свого чутливого елемента $\vec{a} = -\vec{g}$, яке створюється піднімальною силою горизонтального польоту і дорівнює за величиною, але протилежно за напрямком вектору напруженості поля сил тяжіння $\vec{g}$.

Під час руху об'єкта зі швидкістю V уздовж меридіана Землі (рис. 11.3), яка обертається з кутовою швидкістю Ω_z , на нього діє сила Коріоліса I_K – сила інерції, зумовлена впливом обертального руху системи на рух об'єкта відносно цієї системи. Сила Коріоліса I_K викликає коріолісове прискорення $\vec{a}_K = 2(\vec{\Omega}_z \times \vec{V})$. Щоб утриматися на меридіані, літак повинен створити бічну силу, протилежно спрямовану силі Коріоліса (за аналогією з горизонтальним польотом, коли піднімальна сила спрямована протилежно силі тяжіння). У цьому випадку горизонтальний акселерометр, вісь якого збігається з напрямком коріолісового прискорення, буде вимірювати уявне прискорення маси свого чутливого елемента $\vec{a} = -\vec{a}_K$, яке створюється бічною силою прямолінійного польоту і яке дорівнює за величиною, але протилежне за напрямком вектору коріолісового прискорення.

Якщо така бічна сила не буде створена, то показання горизонтального акселерометра дорівнюватимуть нулю, а літак під час руху на північ буде відхилятися на схід у північній земній півкулі і на захід – у південній півкулі.

Акселерометр може застосовуватися як для вимірювання проєкцій абсолютного лінійного прискорення (якщо в його показаннях ураховуються складові вектора напруженості гравітаційного поля і коріолісові прискорення), так і для непрямих вимірювань

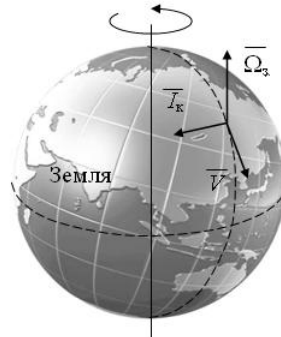


Рис. 11.3

проекції гравітаційного прискорення. Перша властивість використовується для створення ІНС, де отримані за допомогою акселерометрів вимірювання проекцій абсолютного лінійного прискорення інтегрують, отримуючи інерційну швидкість і координати носія. Друга властивість дозволяє використовувати акселерометри для вимірювання кутової орієнтації, тобто як інклінометри.

За останні роки найширшого застосування у практиці побудови технічних систем набули акселерометри, засновані на мікроелектромеханічних системах – МЕМС-акселерометри.

МЕМС акселерометри можна класифікувати за методами перетворення відхилення ІМ в електричний сигнал (ємнісні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні акселерометри); за конструктивним виконанням (МЕМС акселерометри поверхневої і об'ємної конструкції), а також за кількістю вимірювальних осей (одно-, дво- і тривісні акселерометри); за характером переміщення чутливого елемента відносно корпусу приладу (осьові та маятникові акселерометри). Можуть бути запропоновані й інші ознаки класифікації МЕМС-акселерометрів.

Мікромеханічні інерціальні датчики і зокрема МЕМС-акселерометри почали розробляти в лабораторії Ч. Дрейпера¹² у 1984 р. Натеper МЕМС-акселерометри випускають близько 50 фірм. За рік реалізуються сотні мільйонів таких датчиків.

11.1. Ємнісні МЕМС-акселерометри

Компанія *Analog Devices* виробляє сім'ю **ємнісних** акселерометрів ADXL **поверхневої** конструкції, виконаних на полікристалічному кремнії. Кристал кремнію розміром 3,05×3,05 мм заповнений головним чином схемами формування сигналу, що оточують мініатюрний датчик розміром 1×1 мм, розташований в його центрі. Датчик виготовляють методом осадження тонких плівок певного матеріалу на основу кристала з подальшим витравлюванням необхідної конструкції його рухомої частини.

¹² Лабораторія вимірювальних приладів Масачусетського технологічного інституту. Лабораторія пізніше була відокремлена від інституту і перейменована в Лабораторію Чарльза Старка Дрейпера - американського вченого засновника цієї лабораторії.

Основним конструктивним вузлом такого датчика є опорна рамка і чутливий елемент, який складається з ІМ і пружних елементів підвісу (рис. 11.4).

Розрізняють хрестоподібні (рис. 11.4, *а*), Z-подібні кососиметричні (рис. 11.4, *б*), та симетричні (рис. 11.4, *в*), а також паралельні підвіси (рис. 11.4 *г*).

Перетворювач вихідних сигналів акселерометра являє собою

конденсаторну структуру з повітряним діелектриком, рухомі полікрем'яні обкладки якого витравлюються у вигляді зубців гребінки (пальцеподібних виступів) по краях плоскої ІМ. Нерухомі обкладки-зубці цього конденсатора – це алюмінієві консольні стрижні, що розміщені на висоті 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікрем'яних стовпчиках-анкерах, приварених до кристала на молекулярному рівні. На рис. 11.5 показано схему (рис. 11.5, *а*), конструкцію (рис. 11.5, *б*) і багаторазово збільшені елементи кристала акселерометра типу ADXL (рис. 11.5, *в*).

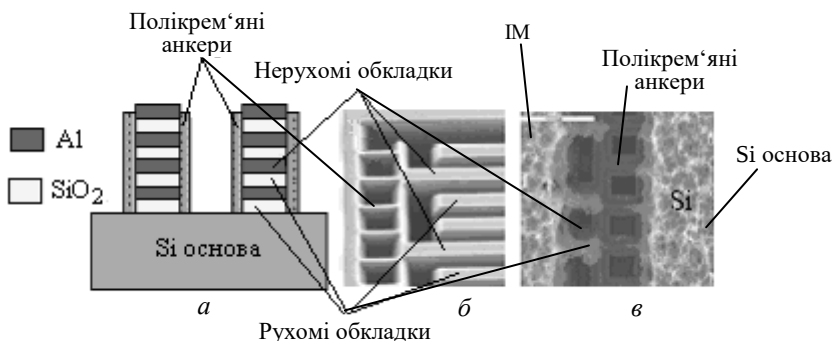


Рис.11.5

Отже чутливий елемент МЕМС акселерометра являє собою підвішену на пружинах ІМ (рис. 11.6), краї якої мають вигляд двох гребінок. Гребінки ІМ можуть здійснювати обмежені переміщення всередині інших, нерухомих гребінок, формуючи таким чином дві конденсаторні схеми. Зміна ємностей цих конденсаторів унаслідок

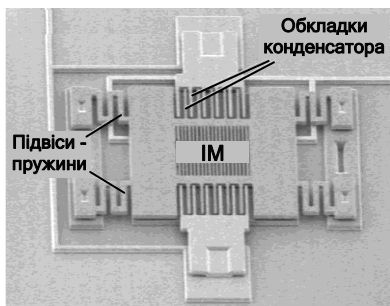


Рис. 11.6

збільшення та зменшення відстані між «пальцями» гребінок пропорційна лінійному прискоренню. Чутливий елемент герметично ущільнюється на рівні підкладки об'ємним мікромеханічним ковпачком, який створює середовище, що забезпечує газове демпфування, та виконує функцію захисту від механічних ударів.

Оскільки переміщення ІМ має відбуватися в площині полікрем'яної плівки, то і вісь чутливості датчика лежить в цій площині, яка паралельна площині друкованої плати, до якої припаюється датчик.

Мікросхеми, що оточують датчик, формують вихідний сигнал акселерометра за схемою, зображеною на рис. 11.7.

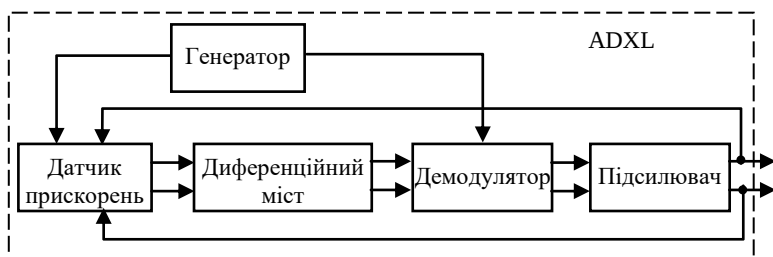


Рис. 11.7

На верхню і нижню нерухомі обкладки конденсаторних схем датчика прискорень, які увімкненні в плечі диференційного моста, від генератора надходять протифазні сигнали прямокутної форми частотою 1 МГц однакової амплітуди. Ємності між нерухомими і рухомими обкладками за відсутності прискорення однакові тому сигнал з диференційного моста дорівнює нулю. Під дією прискорення змінюються ємності конденсаторів датчика, і на виході моста з'являється сигнал, причому його амплітуда залежить від величини зсуву рухомих зубців відносно нерухомих, тобто від різниці ємностей конденсаторів датчика, а фаза визначається знаком прискорення.

Фазочутливий демодулятор перетворює цей сигнал у низькочастотний (смугою 0...1000 Гц), який характеризує величину та

знак прискорення. Низькочастотний сигнал надходить на підсилювач і з його виходу на зовнішній вивід датчика.

Щоб зменшити вплив температури навколишнього середовища, часові зміни параметрів, знизити нелінійність перехідної характеристики акселерометра, розробники ввели від'ємний зворотний зв'язок за положенням інерційної маси. Для цього напруга з виходу підсилювача подається на рухомі обкладки датчика. Ця напруга створює електростатичні сили між рухомими і нерухомими обкладками, які прагнуть встановити ІМ у вихідне положення, реалізуючи тим самим силове розвантаження чутливого елемента.

Оскільки в цьому випадку датчик стає датчиком компенсаційного вимірювання, то ІМ ніколи не буде відхилятися від свого вихідного положення більш ніж на 0,01 мкм. При цьому точність акселерометра залежить в основному від характеристик кола зворотного зв'язку.

Компанія *Analog Devices* також випускає тривісні MEMS-акселерометри типу ADXL375 (рис. 11.8), що розраховані на прискорення до $\pm 200g$.

Одна з найбільших європейських мікроелектронних компаній – компанія *STMicroelectronics* як і компанія *Analog Devices* очолює передові дослідження в MEMS-технологіях. Асортимент MEMS-датчиків компанії *STM* переважно складають акселерометри та гіроскопи.

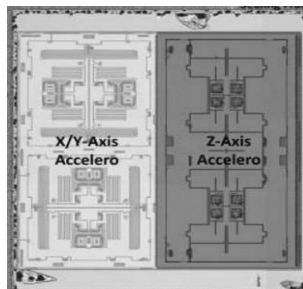
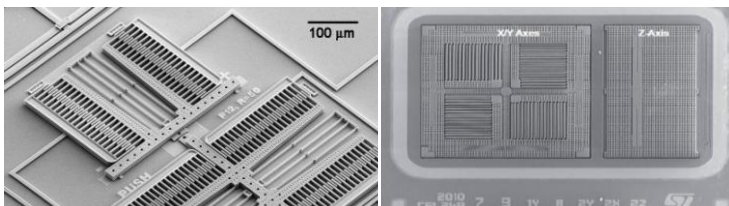


Рис.11.8

Сенсорний елемент MEMS-акселерометрів компанії *STM* є елементом ємнісного типу за конструкцією аналогічний акселерометрам типу ADXL і формується з використанням процесу, що отримав назву THELMA (**T**hick **E**pi-**P**oly **L**ayer for **M**icroactuators and **A**ccelerometers). Технологічний процес THELMA – поверхневий процес мікрооброблення, заснований на змінному формуванні на підкладці товстих і тонких шарів полікремнію для створення об'ємних мікромеханічних структур. Це дозволяє формувати в одному чипі механічні елементи з лінійними та кутовими переміщеннями, які прикріплюються до підкладки в декількох анкерних точках.

Компанія *STM* випускає низку двовісних (рис. 11.9, *а*) і тривісних (рис. 11.9, *б*) інтегральних лінійних акселерометрів типу LIS, в яких сенсорний чип комбінується із чипом ASIC.



а

Рис. 11.9

б

Компанія *Freescale Semiconductor* також є широко відомим виробником напівпровідникових компонентів, серед яких є і ємнісні MEMC-акселерометри.

Інтегральний акселерометр компанії *Freescale Semiconductor* являє собою ємнісну мікромеханічну поверхневу структуру, яка називається G-коміркою, що об'єднує в одному корпусі датчик і схеми оброблення сигналу та температурної компенсації.

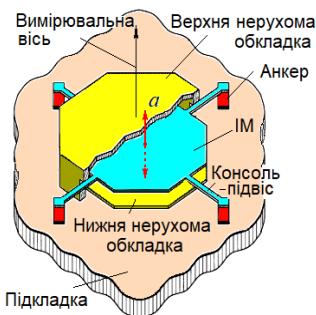


Рис.11.10

G-комірка (рис. 11.10) це мікро-механічна структура з полікремнію, в якій ІМ являє собою рухома обкладку конденсатора. Інерційна маса закріплена в декількох точках на підкладці та здатна переміщатися під дією прискорення a між нерухомими верхнім і нижнім електродами. Даний принцип реалізований, наприклад, в двокристалічному акселерометрі M1220D.

G-комірка, сформована за допомогою стандартних технологій поверхневого мікрооброблення, герметично ущільнюється на рівні підкладки за допомогою об'ємної підкладкової ковпачка, яка виконує функцію захисту G-комірки від механічних ударів. Крім того під ковпачком створюється середовище, яке забезпечує газове демпфування рухомої обкладки.

На відміну від акселерометрів *Analog Devices* чутливою віссю акселерометрів *Freescale* є вісь, що перпендикулярна до лицьової поверхні датчика.

Залежно від характеру переміщення ІМ відносно корпусу приладу розрізняють акселерометри з лінійним переміщенням чутливого елемента відносно корпусу – *осьові акселерометри* й акселерометри з кутовим переміщенням чутливого елемента відносно корпусу – *маятникові акселерометри*.

Основними схемами (рис. 11.11) побудови маятникових MEMC-акселерометрів є схеми з одинарними (рис. 11.11, а) і подвійними (рис. 11.11, б) маятниками з пружними елементами у вигляді балок, а також схема з одинарним маятником з пружними елементами у вигляді торсіонів (рис. 11.11 в). Вимірювати переміщення ІМ можна ємнісними або п'єзореzystивними датчиками.

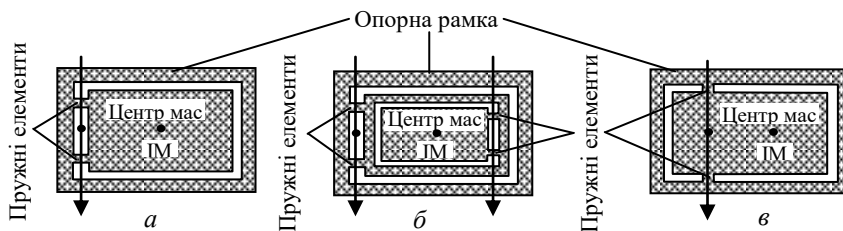


Рис. 11.11

У деяких датчиках прискорення німецької компанії *Robert Bosch GmbH* реалізується саме маятниковий принцип побудови MEMC-акселерометрів (рис. 11.12). В акселерометрі з одинарним маятником, підвішеним на торсіонах, прискорення у вертикальному напрямку буде утворювати нахил ІМ, в бік якої зміщений центр маси рухомого крила обертової рамки.

Акселерометри Bosch реалізують ємнісний диференційний принцип вимірювання. Маса й електроди ущільнюються на рівні підкладки з використанням об'ємної підкладки-ковпачка. Розміщення сенсорного елемента й ASIC ґрунтується на концепції 3D SiP корпусування.

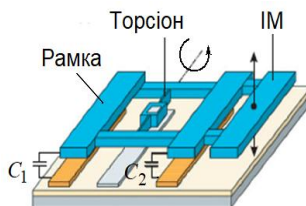


Рис. 11.12

Ємнісні акселерометри – найбільш масова категорія серед сучасних MEMC-датчиків. Утім натепер досить актуальні ще дві категорії акселерометрів: п'єзоелектричні та п'єзореzystивні.

11.2. П'єзоелектричні МЕМС акселерометри

В основу п'єзоелектричних сенсорів вібрацій і прискорень покладено п'єзоелектричний ефект (не плутати з п'єзореzystивним). Цей ефект полягає у прямому перетворенні механічної енергії в електричну в матеріалах, що мають кристалічну структуру, яка включає в себе електричні диполі. Ці датчики працюють в частотному діапазоні менше 2....5 кГц. Вони також мають хороші пригнічення поза осьових шумів, високу лінійність і широкий температурний діапазон (до 1200 °С). Хоча іноді в них як чутливі елементи застосовують кварцові кристали, більшого поширення для цих цілей набули керамічні п'єзоелектричні матеріали, такі як титанат барію, титанат-цирконат свинцю і метаніобат свинцю.

Принципову схему п'єзоелектричного маятникового акселерометра показано на рис. 11.13. Кристал п'єзоматеріалу поєднується з ІМ, а електричний контакт п'єзоелемента в системі здійснюється за допомогою двох тензодатчиків, розташованих на кожному боці кристала.

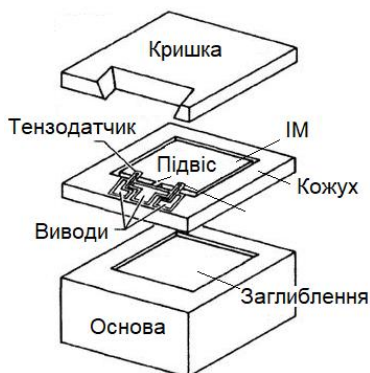


Рис. 11.13

Прискорення, що діє на датчик призводить до різниці переміщень кожуха та ІМ, в результаті чого виникає сила, яка деформує кристал п'єзо-матеріалу. Відбувається перерозподіл зарядів з обох сторін кристала, при цьому вихідний сигнал акселерометра прямо пропорційний прискоренню. За допомогою елементів виводів зміни в системі передаються блоку керування.

Конструкція простого одновісного акселерометра повністю аналогічна звичайним п'єзоелектричним датчикам. Але через дуже великий вихідний опір чутливого елемента, на підкладці також розташований польовий транзистор, що виконує роль підсилювача напруги.

Комбінована тривісна конструкція має більш складне виконання. За допомогою одного чутливого елемента акселерометр може бути орієнтований так, щоб вимірювати прискорення відразу у

трьох напрямках. Така технологія отримала назву «Оригамі». Конструкцію маятникового акселерометра з чутливим елементом, виконаним за цією технологією, схематично показано на рис. 11.14.

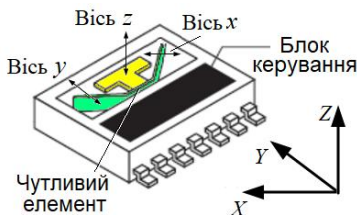


Рис.11.14

Провідні виробники сучасних п'єзоелектричних акселерометрів – це компанії: *Kistler, Endevco, Bruel & Kjaer, Bosch, PCB Piezotronics, Honeywell та SiemensVDO.*

11.3. П'єзореzystивні МЕМС-акселерометри

Електричний опір чутливих елементів п'єзореzystивного акселерометра змінюється пропорційно механічній напрузі, прикладеній до встановленої на пружинах рухомій масі, дозволяючи створювати вихідний сигнал.

П'єзореzystивний акселерометр (рис. 11.15) являє собою кремнієву структуру 2 з консольними балками, які підтримують ІМ 3, сформовану на основі 1. Для детектування прискорення використовуються згинальні імплантовані кремнієві резистори 4 (вимірники механічної напруги, відомі як strain gauges, або strain gages), що приєднані до мікромеханічних кремнієвих консольних балок. Прискорення ІМ a викликає вигин балок і змінює опір резисторів, увімкнених у міст Уітстона 5, створюючи розбалансування цього моста. У діагональ моста 6, як правило, вмикаються вимірники напруги, які фіксують діючі прискорення.

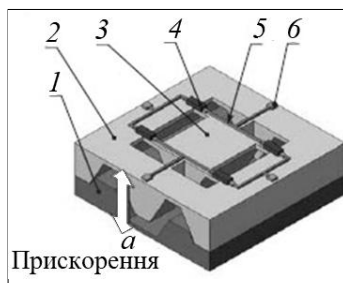


Рис. 11.15

Процес виготовлення п'єзореzystивної структури заснований на технологіях об'ємної кремнієвої мікромеханіки. Монтаж механічних елементів здійснюється методом розварювання дрітчастих виводів або за допомогою технології наскрізних металізованих отворів через кремній – методом TSV. П'єзореzystивні акселерометри допускають і мультиосьове виконання.

Підвищена жорсткість кремнію забезпечує високу резонансну частоту – близько 10 кГц, яка у свою чергу, визначає робочу частотну смугу та динамічні характеристики (динамічний діапазон) датчика.

Провідними виробниками сучасних п'єзорезистивних MEMC-акселерометрів є компанії *Endevco*, *Entran*, *Measurement Specialities (ICSensors)*, *Sensor One Technologies*.

Є кілька важливих характеристик, які відрізняють п'єзорезистивні акселерометри від п'єзоелектричних. П'єзоелектричні акселерометри чутливі тільки до динамічних змін прискорення і не чутливі до статичних. Нижня межа частот таких акселерометрів – 1...3 Гц. П'єзорезистивні акселерометри чутливі як до статичних, так і до динамічних змін прискорення. Тому, крім основного завдання – завдання вимірювання прискорення, такі прилади можна застосовувати для вимірювання нахилу або орієнтації в просторі.

Додаткова характеристика, яка заслуговує уваги, це резонансна частота. П'єзоелектричні акселерометри мають резонансну частоту в діапазоні 10...30 кГц, п'єзорезистивні – у діапазоні 500...5000 Гц. Такий діапазон змушує забезпечувати амортизацію більшості п'єзорезистивних приладів. Амортизація проводиться повітрям або кремнійорганічним маслом. Це необхідно як для захисту приладу, так і для розширення діапазону частоти. У п'єзоелектричних акселерометрах амортизацію зазвичай не виконують.

11.4. Інші варіанти побудови MEMC-акселерометрів

Крім розглянутих є і більш екзотичні типи MEMC-акселерометрів, наприклад, оптоволоконний акселерометр OS-7100

(рис. 11.16) фірми *Micron Optics*, заснований на технології оптичної решітки Бреґґа (різновид дифракційної ґратки).

Чутливим елементом датчиків є оптична ґратка Бреґґа. Принцип роботи датчиків на основі оптичних ґраток Бреґґа такий: під час прохо-

дження світла по оптоволокну відбувається його часткове відбиття від неоднорідностей в серцевині оптоволокна, тобто від бреґґівсь-

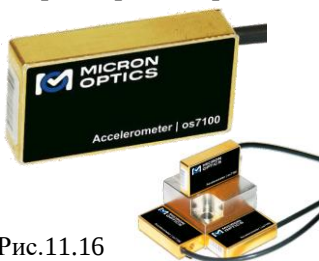


Рис.11.16

кої ґратки. Довжина хвилі відбитого світла кратна періоду неоднорідностей в решітці. Під час деформації під впливом прискорення оптоволокна датчика деформується решітка Брегга, таким чином, змінюється період неоднорідності у ґратці і, як наслідок, змінюється відбита довжина хвилі датчика. За величиною зміни відбитої довжини хвилі визначається величина відносної деформації і відповідно величина діючого прискорення.

Оригінальний принцип роботи покладено і в термічні датчики прискорення компанії *MEMSIC Inc* (рис. 11.17, а). У них як чутливий елемент використовується гарячий газ. Елементарна комірка датчика при цьому має герметичну структуру з нагрівником і датчиками температури (рис. 11.17, б).



Рис. 11.17

У спрощеному вигляді принцип роботи такої структури такий: нагрівник нагріває молекули газу в камері, а надчутливі датчики фіксують диференціальну температуру цього газу.

Як датчики температури використовують або інтегровані в підкладку терморезистори, або нанесені на її поверхню термопари.

У стані спокою газ рівномірно розподіляється по камері. За найменшого прискорення нагріті молекули починають рухатися у бік прискорення. При цьому різниця кількостей молекул, що потрапляють на датчики 1 і 2 збільшується, відповідно змінюються і показання датчиків температури. За різницею показань можна визначити прискорення. Без прискорення відсутня й конвекція, гази різних температур вільно дифундують і показання термодатчиків вирівнюються.

Така система не має механічних рухомих частин, а отже, теоретично вільна від виникнення резонансу і несприйнятлива до ударних навантажень.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Який параметр руху вимірює акселерометр?
2. Який елемент є обов'язковим в конструкції акселерометра?
3. Що показує акселерометр під час вільного падіння?
4. Що показує акселерометр на нерухомому відносно поверхні землі об'єкті?
5. Що показує горизонтальний акселерометр під час польоту літака точно по меридіану?
6. За якими ознаками можна класифікувати MEMS-акселерометри?
7. Які типи підвісів використовують в акселерометрах поверхневої конструкції?
8. Що являє собою чутливий елемент ємнісних акселерометрів ADXL поверхневої конструкції?
9. Яким чином забезпечується демпфірування чутливого елемента?
10. За допомогою якої технології формується сенсорний елемент MEMS-акселерометра компанії *STM* ?
11. Назвіть основні схеми побудови маятникових MEMS-акселерометрів?
12. За рахунок чого з'являється вихідний сигнал п'єзоелектричного маятникового акселерометра?
13. Яка технологія отримала назву «Оригамі»?
14. За рахунок чого формується вихідний сигнал п'єзорезистивного акселерометра?
15. Наведіть найбільш важливі характеристики, які відрізняють п'єзорезистивний акселерометр від п'єзоелектричного.
16. Яку технологію покладено в основу побудови MEMS-акселерометрів OS-7100 фірми *Micron Optics*?
17. Яку технологію покладено в основу побудови термічних акселерометрів компанії *MEMSIC Inc*?

Розділ 12. Мікромеханічні гіроскопи

Зазвичай гіроскопом називають навігаційний прилад, основним елементом якого є швидкообертовий ротор, поміщений в підвіс – у карданний підвіс. Головною властивістю карданового підвісу є те, що закріплений в ньому обертовий ротор буде завжди зберігати напрямок осі обертання незалежно від орієнтації самого підвісу. Саме ця властивість гіроскопа – здатність зберігати в просторі незмінно напрямок осі обертання за відсутністю впливу на нього моментів зовнішніх сил і визначило його використання в системах орієнтації рухомих об'єктів. Зокрема авіаційні гіроскопічні прилади призначені для вимірювання кутового положення та кутових швидкостей літального апарата.

12.1. Вібраційні гіроскопи

Водночас поряд з гіроскопічними датчиками кутової швидкості, основним елементом яких є обертовий механічний ротор, відомі пристрої, які виконують функції вимірювання кутової швидкості, але не мають ротора. Зокрема, до таких датчиків належать вібраційні гіроскопи, які містять вібрувальні деталі, що реагують на обертання об'єкта.

Принцип роботи таких гіроскопів ґрунтується на тому, що під час обертання вібруючого в одній площині тіла, наприклад, стрижня (рис. 12.1) в ортогональній цим вібраціям площині з'являються знакозмінні сили Коріоліса F_K , які вигинають стрижень в площині дії цієї сили, тобто в цій площині викликаються вторинні вібраційні коливання.

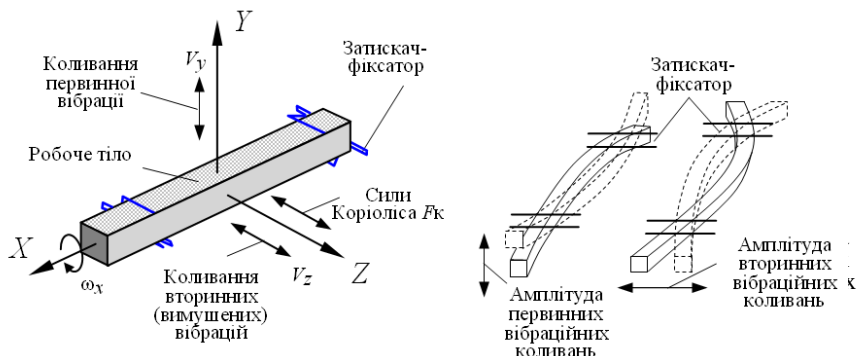


Рис.12.1

У загальному випадку сила Коріоліса, що діє на тіло, визначається як:

$$F_K = 2m[\Omega \times V],$$

де Ω – вектор кутової швидкості (тут кутова швидкість ω_x); V – вектор лінійної швидкості тіла відносно обертової основи (тут лінійна швидкість центра мас стрижня V_y відносно затискачів-фіксаторів); m – маса тіла.

Модуль $F_K = 2m\Omega V \sin\varphi$, де φ – кут між векторами лінійної та кутової швидкості.

Сила Коріоліса напрямлена перпендикулярно до напрямку коливань (див. рис. 12.1) та осі обертання. У разі протилежних напрямків руху сила Коріоліса також діє в протилежних напрямках. На цьому і заснований принцип дії вібраційного гіроскопа, який дозволяє вимірювати величину кутової швидкості тіла під час обертання його навколо осі вимірювання (яка у розгляданому випадку збігається з поздовжньою віссю стрижня).

Визначивши силу Коріоліса та знаючи лінійну швидкість тіла, нескладно визначити кутову швидкість та її зміну (кутове прискорення). Завдання спрощується, якщо лінійна швидкість коливань V змінюється за синусоїдальним законом $V = V_0 \sin(\omega t)$.

Тоді визначення сили Коріоліса зводиться до детектування сигналу Ω , модульованого несучою частотою ω :

$$F_K = 2V_0\Omega \sin(\omega t).$$

Детектування параметрів вторинної вібрації дозволяє визначати кутову швидкість обертання основи.

Розглянутий принцип роботи вібраційного гіроскопа стрижневого типу був втілений в датчик кутової швидкості, що отримав назву гіротрон. Гіротрон не був доведений до прецизійного приладу через низку непереборних на той час здебільшого технічних причин, але на новому витку розвитку мікротехнологій ідея гіротрона була втілена в мініатюрні MEMC-датчики кутової швидкості або у вібраційні мікромеханічні гіроскопи (ММГ).

За виглядом руху вимірювальної маси (ВМ) у режимах первинних і вторинних вібрацій розрізняють ММГ LL-типу, RR-типу і LR-типу. У датчиках LL-типу ВМ здійснює поступальні переміщення, у гіроскопах RR-типу – обертальні переміщення, а в мікромеханічних гіроскопах LR-типу – різні комбінації поступальних і

обертальних переміщень. Кожний тип ММГ характеризується набором класифікаційних ознак, найважливіші з яких такі:

- кількість вимірювальних осей (одно-, дво- і тривісні);
- тип підвісу (механічні і неконтактні підвіси. У свою чергу, механічні підвіси можуть бути зовнішніми або внутрішніми, а неконтактні підвіси – електростатичними, магнітними та ін.);
- тип приведення ВМ у режим вібрації та тип датчика знімання сигналу (магнітоелектричні, електростатичні, п'єзоелектричні);
- режим вимірювання (пряме або компенсаційне вимірювання з від'ємним зворотним зв'язком).

Усі конструкції ММГ, попри широку їх різноманітність, можна звести до декількох типів. Одними з найперших були балкові ММГ.

12.1.1. Балкові та стрижневі гіроскопи

Принцип дії *балкових* гіроскопів LL-типу повторює розглянутий вище принцип роботи вібраційного гіроскопа на основі довгого стрижня: консольну балку змушують коливатися за допомогою п'єзоелементів у напрямку осі Y (рис. 12.2, *а*). Під час обертання балки відносно осі Z під дією сили Коріоліса збуджуються коливання уздовж осі X . Вони реєструються іншими п'єзоелементами. Конструкції балок можуть бути різними. Наприклад, у *стрижневих* гіроскопах компанії «Елта» використовується триполюсний вібратор – сталевий стрижень у пружному двосторонньому підвісі з поперечним перерізом у вигляді рівностороннього трикутника (рис. 12.2, *б*).

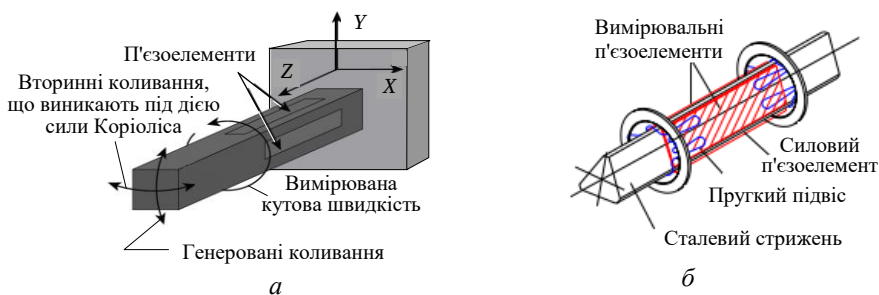


Рис. 12.2

Аналогічну конструкцію стрижневого ММГ використовують і японські виробники вібраційних гіроскопів. До кожної грані стрижня приклеєні п'єзoelementи: на нижньому боці силовий (що збуджує вібрацію), на бічних гранях – вимірювальні. Основний недолік таких гіроскопів – їх низька технологічність (складно забезпечити стабільні параметри клейового з'єднання металу та п'єзокераміки і т. ін.). Тому в усьому світі поширення набули біморфні вібраційні гіроскопи, які належать до класу стрижневих ММГ.

У біморфних гіроскопах резонатор являє собою послідовний біморф – дві склеєні п'єзоелектричні пластини, що поляризовані в протилежних напрямках). До пластин (або однієї з них) прикладається напруга, одна пластина починає стискатися, друга розтягуватися, у результаті виникають коливання. Під час обертання біморфа під дією сили Коріоліса збуджуються вторинні коливання, які можна детектувати одними і тими самими електродами. За даним принципом побудований, зокрема, вібраційний гіроскоп БВГ-500 фірми «Елта».

Відзначимо, що конструкція резонатора може бути набагато складніше описаної. Так, один з лідерів промислового освоєння вібраційних п'єзоелектричних гіроскопів – компанія *Murata* запатентувала структуру, в якій резонатор являє собою пару коливних у протифазі пластин (біморфних, або наклеєних на металеву основу – уніморфних).

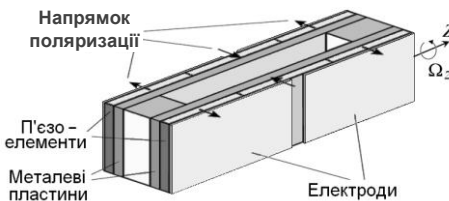


Рис. 12.3

Кожна з пластин (рис. 12.3) складається з трьох частин з протилежними напрямками поляризації, в яких електродами генерації збуджуються первинні коливання. Під час обертання

відносно осі Z виникають вторинні коливання пластин. Хоча первинні коливання пластин відбуваються в протифазі, сигнали їх генерації синфазні. Вторинні ж коливання, що зумовлені силою Коріоліса, викликають додаткові протифазні сигнали на електродах, різниця яких пропорційна кутовій швидкості обертання. Таким чином, за допомогою диференціальної схеми можна виділяти ці сиг-

нали. При цьому використовуються ті самі електроди, що і для генерації первинних коливань.

Компанія *Murata* презентувала гіроскоп ENC-03RC масою 0,2 мг і в мініатюрному корпусі (8×4×2 мм) (рис. 12.4).



Рис. 12.4

П'єзоелектричний сенсор змонтований на кристалі за унікальною технологією, розробленою фірмою *Murata*, завдяки чому досягається поліпшена точність датчика, яка в 100 разів перевищує точність подібних виробів інших виробників. Схему підключення пристрою показано на рис.12.5.

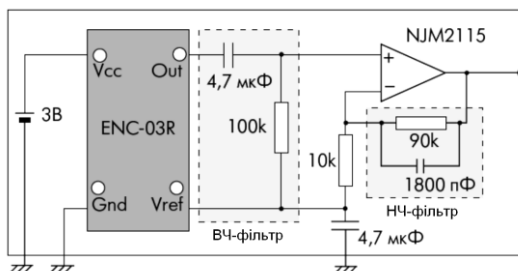


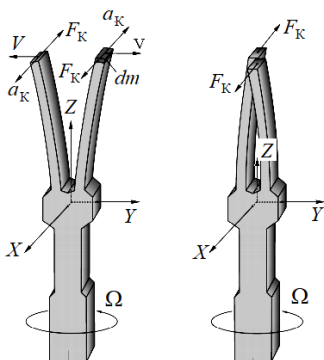
Рис. 12.5

Основний недолік п'єзокерамічних вібраційних гіроскопів – температурна нестабільність параметрів, спричинена властивостями п'єзокераміки. Компенсувати його спробували, і не без успіху, фахівці компанії *Epson*, які створили разом з компанією *NGK Insulators* новий п'єзоелектричний гіроскоп XV-3500CB. Його відрізняє, крім оригінальної конструкції, використання кварцу як п'єзoeлемента. У результаті в діапазоні вимірювань ± 100 °C вдалося досягти прийнятної температурної стабільності – 5%.

12.1.2. Гіроскопи-камертони

Однією з конструкцій резонатора гіроскопа є форма камертона – *tuning fork* (TF). Принцип роботи вібраційного гіроскопа, чутливим елементом якого є мініатюрний камертон, ілюструє рис. 12.6.

Обидві пластини (гілки) чутливого елемента приводяться в протифазний коливальний рух у площині ZY. Це збудження здійснюється внутрішнім генератором. Кожен елемент гілки масою dm переміщується з лінійною швидкістю V . Якщо тепер основа, на якій закріплений камертон, буде обертатися з кутовою швидкістю Ω



12.6

навколо осі Z (цю швидкість потрібно виміряти), то для кожного елемента маси виникає сила Коріоліса $\mathbf{F}_K = 2m[\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V}]$ та відповідне прискорення a_K .

Сили Коріоліса підсумовуються за кожною з гілок і спричиняють їх вигин у площині XZ . Обертання основи в інший бік змінює напрямок вигину гілок. Таким чином, коливання гілок у площині XZ містять інформацію про кутову швидкість обертання основи Ω .

Однак лінійні прискорення та вібрації, що діють на корпус приладу, спотворюють корисний сигнал. Крім того, зняття інформації з таких датчиків є дуже складним. Тому для ТГ-гіроскопів було розроблено іншу конструкцію (рис. 12.7). Базова запатентована конструкція ТГ-гіроскопа, який належить до двомасових гіроскопів LR-типу, являє собою рамку з двома осциляторами¹³, які коливаються у протифазі (зустрічно) уздовж осі X .

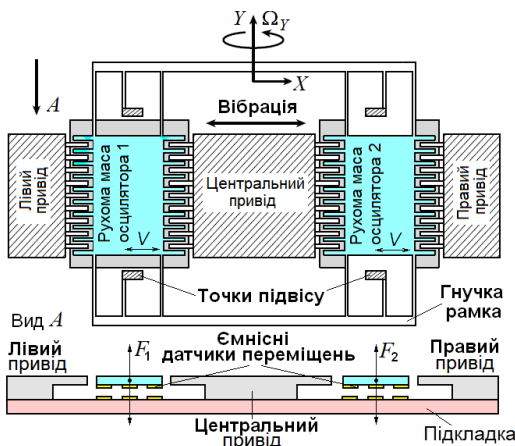


Рис. 12.7

Рухомі маси осциляторів підвішені на гнучких рамках відносно підкладки. Маса за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури здійснюють вібраційний рух (двигуни зближують робочі тіла осциляторів, а мікропружини повертають їх назад). Вектори швидкостей вібрацій V паралельні площині підкладки і перебувають у протифазі один до одного. Із появою кутової швидкості

¹³ Осцилятор - система, яка здійснює коливання

Ω_y навколо вимірювальної осі рухомі маси осциляторів під дією сил Коріоліса F_1 і F_2 почнуть здійснювати разом з рамкою кутові коливання (тому такий гіроскоп вважається гіроскопом LR-типу). Зміни положень осциляторів (один осцилятор буде підніматися, другий – опускатися і навпаки) вимірюються ємнісними датчиками переміщень.

Обкладинки ємнісних датчиків переміщення, розташовані на рухомих масах (знизу) і на підкладці зафіксують переміщення, які можна детектувати і визначити кутову швидкість обертання Ω_y . Одним з перших ММГ такої конструкції став гіроскоп, створений з використанням поверхневого мікрооброблення в лабораторії Ч. Дрейпера Масахусетського технологічного інституту.

Технологія виготовлення такого гіроскопа ґрунтується на травленні кремнієвої пластини. Для отримання кінцевої структури застосовується реактивне іонне травлення та дифузія бору. Потім структура анодним зварюванням прикріплюється до підкладки зі скла марки Рутех, на якій розміщуються електроди.

Описаний принцип реалізований також компанією *Fujitsu* в серії МЕМС-гіроскопів S1BG. TF-резонатор цих гіроскопів виконаний з ніобату літію (LiNbO_3) – добре відомого п'єзоелектрика.

А одна з найвідоміших європейських мікроелектронних компаній – компанія *STMicroelectronics* презентувала новий оригінальний тривісний гіроскоп L3G4200D (рис. 12.8, а).

На рис. 12.8, б представлена фотографія того ж L3G4200D, але зі значним збільшенням.

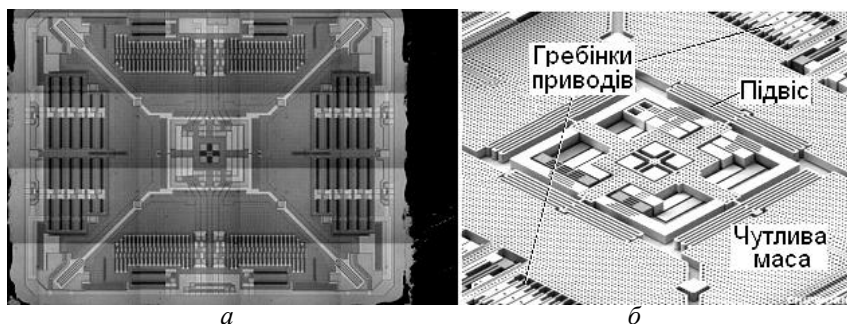


Рис. 12.8

Тривісний L3G4200D істотно відрізняється від попередніх розробок у бік поліпшення робочих характеристик за рахунок розширення діапазону контрольованих кутових швидкостей. Домогтися такого істотного відриву у робочих характеристиках вдалося завдяки використанню єдиної вимірювальної структури для контролю руху в трьох ортогональних осях. Застосування єдиної вимірювальної структури усуває проблему взаємовпливу, що позитивно позначається на точності вимірювань.

Принцип дії гіроскопів відомої мікроелектронної компанії *Analog Devices* аналогічний принципу побудови TF-гіроскопів.

Основний елемент гіроскопа серії ADXRS – це закріплена на гнучких підвісах відносно анкерів, скріплених з підкладкою, рамка, усередині якої вздовж осі X здійснює поступальні коливальні рухи чутлива маса (рис. 12.9, *a*). Коливання чутливої маси збуджуються, як і в базовій патентованій конструкції TF-гіроскопа (рис. 12.7), за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури (рис. 12.9, *б*).

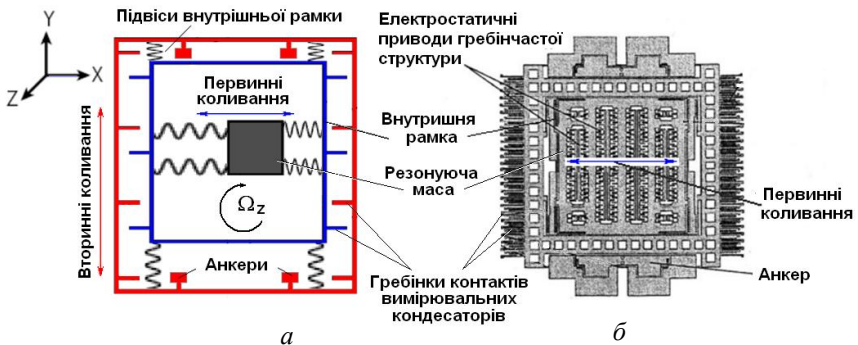


Рис. 12.9

Коли підкладка нерухома (або рухається прямолінійно та рівномірно), внутрішня рамка не коливається. Якщо ж почати обертати таку структуру навколо осі Z з кутовою швидкістю Ω_z , (див. 12.9, *a*), то під дією сили Коріоліса виникнуть вимушені коливання рамки уздовж осі Y .

На зовнішній поверхні рамки та на підкладці розташовані гребінки контактів, які утворюють систему вимірювальних конденсаторів. Під час коливань рамки відносно підкладки відстані між зубцями гребінки змінюються, відповідно змінюється й ємність.

Проблема компенсації лінійних прискорень і вібрацій корпусу в приладах серії ADXRS вирішена за рахунок розміщення на одній підкладці двох однакових структур, аналогічних, зображеним на рис. 12.9, б. Зовнішній вигляд кристала гіроскопа IMEMS серії ADXRS за великого збільшення показано на рис. 12.10. У цих структурах, як і в запатентованій конструкції TF-гіроскопа, генеруються строго протифазні коливання. Виміряні сигнали, що знімаються з ємностей обох структур, надходять у диференціальну схему. При цьому сигнали, викликані коливаннями під впливом прискорення Коріоліса, будуть складатися, а викликані синфазними складовими, що зумовлені лінійними прискореннями та вібраціями, – відніматися.

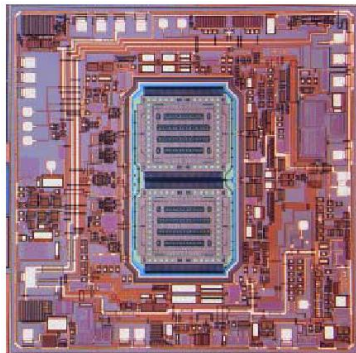


Рис. 12.10

Для збудження коливань чутливих елементів використовують або зовнішнє джерело (генератор) високочастотних сигналів, або резонансний ефект. Сигнали з формувачів високочастотних сигналів надходять на керування електростатичними приводами.

Вочевидь, що для оброблення сигналів з вимірювальних ємностей, потрібні прецизійні підсилювачі, кореляційні методи оброблення і т. ін. Технологія IMEMS (Integrated Micro Electro Mechanical System), що застосовується при виробництві гіроскопів серії ADXRS фірми *Analog Devices*, поєднує на одному кристалі всі електронні компоненти, які необхідні для формування вихідного сигналу, з двома структурами чутливих елементів гіроскопа.

Гіроскопи сім'ї ADXRS – це одновісні прилади з лінійним аналоговим виходом (напруга на виході змінюється за лінійним законом залежно від кутової швидкості).

Компанія *Analog Devices* також випускає групу гіроскопів ADIS, базою для яких є серія ADXRS, але з розширеними функціональними можливостями: із вбудованими АЦП, із засобами термокомпенсації тощо.

Ці гіроскопи працюють у діапазонах ± 80 та $\pm 300^\circ/\text{с}$. Характерний приклад – гіроскоп ADIS16256. Крім датчика кутової швидкості він оснащений основним АЦП для оцифровування сигналу датчика, допоміжними ЦАП і АЦП, датчиком температури, вбудованою системою автотестування та калібрування, SPI-інтерфейсом тощо. (рис. 12.11).

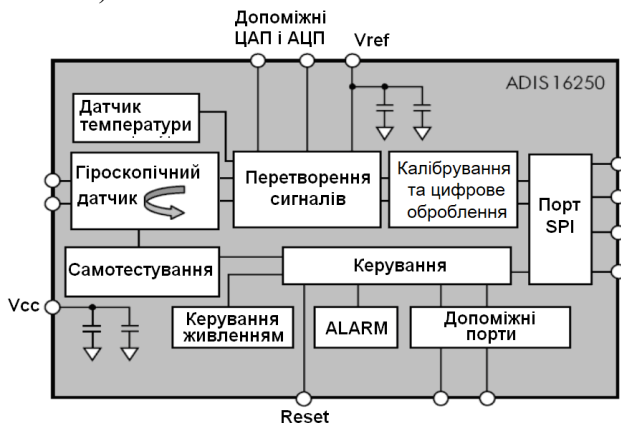


Рис. 12.11

Фірма *Boeing* освоїла випуск таких гіроскопів і успішно застосувала їх в автомобільній промисловості. Подібні гіроскопи були також використані в системах управління та наведення реактивних снарядів ВМФ США.

12.1.3. Гіроскопи з диском-вібратором

Один з перших гіроскопів з дисковим резонатором був створено в лабораторії твердотільної електроніки Мічиганського університету в 1994 р. Тоді був продемонстрований прототип гіроскопа (рис.12.12, а), котрий являв собою нікелевий диск діаметром 1мм – обід з вісьмома напівкруглими спицями, жорстко закріпленими в центрі на полікремнієвій підкладці.

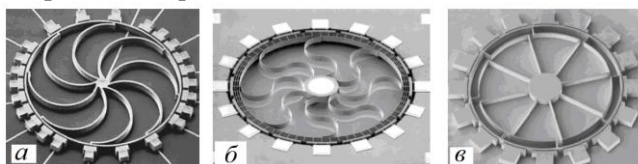


Рис. 12.12

Із зовнішнього від обода боку з невеликим проміжком розташовуються збуджувальні, вимірювальні і коригувальні електроди. Під дією напруги, що прикладається до збуджувальних електродів генерується основна мода коливань¹⁴ (наприклад, уздовж осі X) – диск починає витягуватися вздовж осі X і стискатися уздовж осі Y (рис.12.13, де V_x , V_y – лінійні швидкості первинних і вторинних коливань відповідно; F_K – сила Коріоліса).

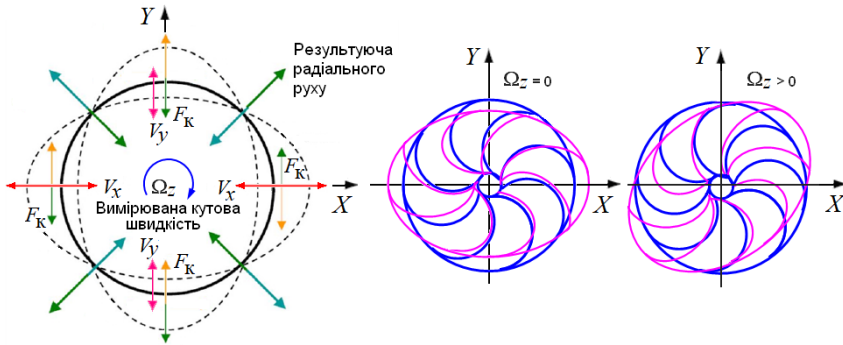


Рис. 12.13

Якщо підкладка (а з нею і диск) починає обертатися навколо осі Z , сила Коріоліса прагне викликати коливання в напрямку осі Y . Виникає вимірювальна мода коливань і головна вісь еліпса зміщується на 45° .

Амплітуда цих коливань $A_{\text{вм}}$ пропорційна кутовий швидкості обертання Ω_z :

$$A_{\text{вм}} = 4 \frac{K_{\omega} Q}{\omega_0 A_0} \Omega_z,$$

де $K_{\omega} \approx 0,37$ – кутове підсилення кільцевої структури (константа, яка визначається геометрією і є високостабільною до змін температури); Q – добротність резонатора; ω_0 – резонансна частота коливань; A_0 – амплітуда в основній моді (без обертання). Ці амплітуди реєструють за допомогою ємнісних датчиків із зовнішнього боку обода у відповідних точках.

¹⁴ Розподіли, які повторюються при одному повному проході резонатора, є найбільш стабільними і називаються власними модами або модами резонатора

Така конструкція має ряд істотних особливостей. Перш за все завдяки симетричній структурі резонансні частоти в основній і вимірювальній модах однакові. Крім того, вузлові точки обох мод збігаються. Такий резонатор має високу добротність, отже, і потенційно велику роздільну здатність вимірювання кутової швидкості. Він мало сприйнятливий до ударів і вібрацій. Крім того, неминучі виробничі дефекти резонатора, наприклад, асиметрію, можна усунути за допомогою електроніки, використовуючи спеціальні електроди налаштування.

Згодом була розроблена технологія створення подібних структур на полікремнії (рис. 12.12, б), а в 2002 р. був представлений ММГ з монокристалічного кремнію на скляній підкладці (рис. 12.12, в). За діаметра диска 2,7 мм і товщини 150 мкм добротність резонатора становила 12000. Це забезпечило роздільну здатність 132 мВ/°с, відповідну точність 0,002°/с (7,2°/год) та нелінійність 0,02%. Дрейф нуля не перевищує 1 °с за 10 годин без термокомпенсації.

Подібний принцип застосований у гіроскопі з резонатором у вигляді восьмикінцевої зірки, утвореної суперпозицією двох квадратів (рис. 12.14). Така конструкція дозволяє використовувати для вимірювань кутової швидкості

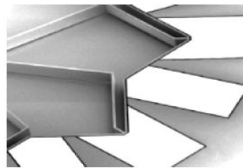
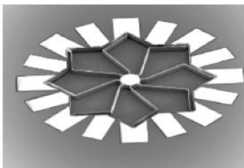


Рис. 12.14

коливальні моди вищих порядків, а також забезпечує більш точне електронне балансування резонатора. Унаслідок добротності резонатора з монокристалічного кремнію складала 25000 і вище.

У серійних приладах дисковий резонатор використаний у гіроскопах компанії *Silicon Sensing Systems*.

Гіроскопи цієї компанії використовують описаний вище принцип, але їх відрізняє не ємнісний, а індукційний метод генерації та визначення амплітуди вимушених коливань. Резонатор перебуває у постійному магнітному полі, перпендикулярному до площини диска. Джерело поля – магніт із самарію-кобальту, розташо-

ваний над вібратором. У перших гіроскопів типу VSG3 (рис. 12.15) діаметр кільця вібратора – 6 мм, товщина кремнієвої структури – 100 мкм, ширина кожного підвісу Z-подібної ніжки – 60 мкм.

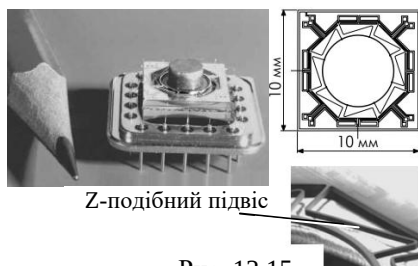


Рис. 12.15

Моделі гіроскопів тієї ж компанії сім'ї CRS використовуючи ту саму базову технологію, забезпечують у кілька разів вищу стабільність і стійкість до температурних впливів. Мінімальний розмір такого гіроскопа в плані: 22×22 мм, герметичний металевий корпус, у якому крім чутливого елемента міститься контур збудження та формування вихідного аналогового сигналу, дозволяє застосовувати прилад в умовах різних зовнішніх впливів, у розширеному діапазоні температур. На рис. 12.16, а показано конструкцію гіроскопів сім'ї CRS.

Черговим поколінням гіроскопів компанії *Silicon Sensing Systems* є гіроскопи з вібруючим кільцем ємнісного типу. Елемент тепер поміщається у металокерамічному корпусі, призначеному для автоматизованого поверхневого монтажу. Найбільш відомий гіроскоп цієї сім'ї CRG20 (рис. 12.16, б) займає вже у 20 разів менший об'єм у приладовому відсіку порівняно з найкомпактнішими гіроскопами типу CRS. П'єзокерамічний чутливий елемент цих гіроскопів діаметром 3 мм, схему керування та формування сигналу вдалося вмістити в більш компактний металокерамічний корпус. У черговий раз розширилася смуга пропускання, зменшилися власні шуми, з'явилася можливість вимірювати кутові швидкості до 1200...2700 °/с.

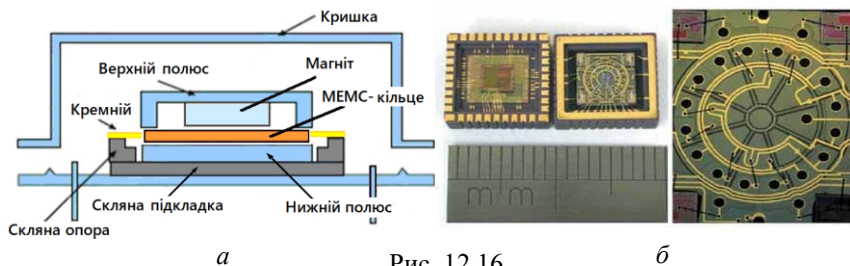


Рис. 12.16

Крім *Silicon Sensing Systems* свої гіроскопи з диском-резонатором на світовий ринок MEMC сенсорів поставляє компанія *Analog Devices*. Так, наприклад, гіроскоп ADXRS290 компанії *Analog Devices* вимірює кутові швидкості крену і тангажа. Пристрій з резонуючим диском підтримує діапазон вимірювання кутових швидкостей $\pm 100^\circ/\text{с}$. ADXRS290 має дуже низький рівень власних шумів і оснащений фільтрами верхніх і нижніх частот, здатними до конфігурування.

12.1.4. Обертальні вібраційні мікрогіроскопи RR-типу

Розвивається і напрямок обертальних вібраційних мікрогіроскопів. Перші роботи у цій галузі почалися у 1990 році. Вони проводилися у Центрі датчиків і приводів Каліфорнійського університету в Берклі, а також у лабораторії Ч. Дрейпера. Конструктивну схему RR-гіроскопа, яка є базовою на ранніх стадіях розроблення у лабораторії Дрейпера, зображено на 12.17.

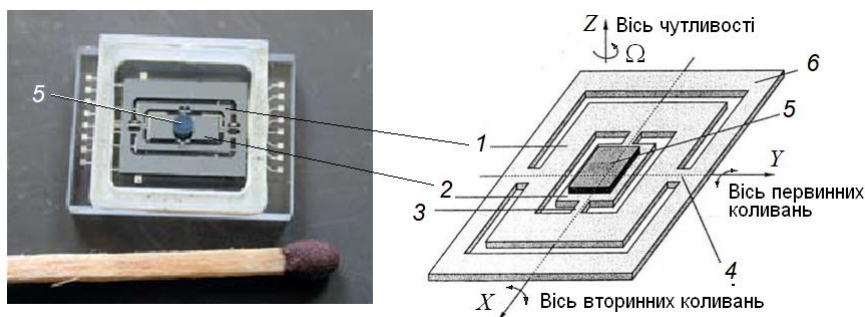


Рис. 12.17

Вона утворена з'єднанням двох рамок, виконаних у вигляді зовнішнього 1 і внутрішнього 2 плоских елементів, з'єднаних між собою і з основою 6 за допомогою торсіонів 3 і 4, осі яких взаємно перпендикулярні. Для збільшення інерційності на внутрішньому елементі розташована додаткова маса 5. За допомогою електростатичних датчиків сили зовнішньому елементу 1 надаються первинні кутові коливання відносно осі Y . Ці коливання через торсіони 3 передаються і на внутрішній елемент, надаючи йому коливальний кінетичний момент. Під час обертання приладу зі швидкістю Ω відносно осі Z виникають сили Коріоліса, які змушують коливатися внутрішній елемент відносно осі X – осі вторинних коливань. Амплі-

літуда вторинних коливань, яка вимірюється розташованим під внутрішнім елементом ємнісним перетворювачем, пропорційна вимірюваній кутовій швидкості.

Існує безліч варіацій такого методу. Наприклад, прилади з дисковими резонаторами, які здійснюють крутильні коливання у площині паралельної підкладці. Такі прилади являють собою резонатори у вигляді диска (рис. 12.18), закріпленого на торсіонах.



Рис. 12.18

За допомогою системи розгону, наприклад, гребінчастих приводів, диск приводиться в крутильні коливання з частотою f_1 навколо осі, перпендикулярної його площині. Під час обертання приладу з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що лежить в його площині, унаслідок дії сил Коріоліса виникають вторинні крутильні коливання з частотою f_2 , але вже навколо осі перпендикулярної до напрямку вектора кутової швидкості Ω .

Унаслідок цього один край диска починає підніматися, а інший – опускатися залежно від поточного напрямку коливань збудження. Інформації знімається електростатичними датчиками, які являють собою конденсатори, одні обкладинки яких містяться на нижній поверхні диска, а другі на підкладці – під диском.

Амплітуда цих коливань пропорційна кутовій швидкості Ω . Зазвичай для підсилення корисного сигналу частоту f_2 вторинних коливань вибирають дещо більші частоти f_1 .

Однак, незважаючи на тривалу історію, такі конструкції поки не знайшли втілення в серійних виробках. Утім були повідомлення про застосування такої конструкції в ММГ компанії «Гірооптика». Фірма заявляла про створення датчиків кутових швидкостей RR-типу та мікроскладань приладів на їх основі.

Насамкінець відзначимо ще один перспективний тип конструкції – гіроскоп з розподіленою масою, створений в лабораторії мікросистем Каліфорнійського університету в Ірвіні.

Пропонована модель являє собою кілька осциляторів, які коливаються з однаковою фазою і частотою і розташовані симетрично відносно центра з'єднувального каркаса (рис. 12.19). Радіальний напрямок вібрацій осциляторів під час обертання гіроскопа навколо вертикальної осі зумовить виникнення сили Коріоліса, направленої по дотичній до каркаса. Ця сила викликає крутильні коливання, які реєструються ємнісними датчиками.

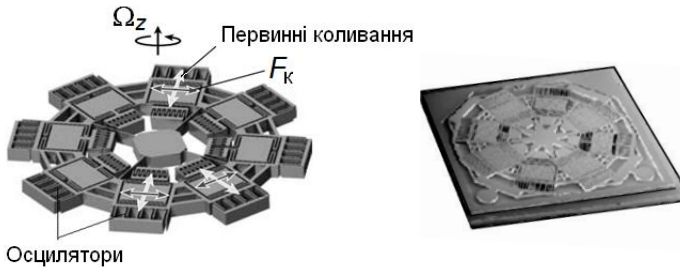


Рис. 12.19

Переваги цієї конструкції зумовлені декількома факторами. По-перше, коливання осциляторів відбуваються одночасно в декількох осьосиметричних напрямках. По-друге, первинні й вторинні (вимірювальні) коливання – коливання різних типів (лінійні і крутильні). Унаслідок істотно знижується вплив первинних коливань на контур вимірювання вторинних коливань. Завдяки цьому сигнал, що відповідає нульовій кутовій швидкості, стає високостабільним. Знижується також і рівень шумів. Принцип детектування кругового зсуву дозволяє позбавитися впливу лінійних прискорень. Крім того, оскільки всі сили, що зумовлюють генерацію, попарно протилежні та рівні за величиною; їх сума в точці кріплення вібратора до підкладки (у центрі конструкції) майже дорівнює нулю. Через це коливання, що генеруються, не передаються на підкладку. І нарешті, багатовісна структура мінімізує вплив різних виробничих дефектів, внутрішніх напружень структури, анізотропних властивостей матеріалу конструкції.

Усе це дозволяє істотно збільшити амплітуду коливань осциляторів, а пропорційно їй і амплітуду вимірювальних коливань. Унаслідок істотно зростають чутливість гіроскопа та ширина його робочої смуги частот.

12.2. Інерціальні вимірювальні модулі

Успіхи в розвитку технологій MEMS привели до мініатюризації і радикального здешевлення інерціальних датчиків, які вимірюють прискорення об'єкта та його кутові швидкості з метою подальшого розв'язання завдань інерціальної навігації. А це, у свою чергу, викликало лавиноподібне зростання попиту на них у багатьох галузях – від промисловості, транспорту та військової техніки до побутових приладів та індустрії розваг. Виробники, виходячи з потреб ринку, почали пропонувати комплексні рішення – інерціальні вимірювальні модулі, які містять три осі гіроскопа, три осі акселерометра, а також мають можливість інтеграції в цей же блок електронного компаса – магнітометра, барометра та навіть приймача супутникової системи навігації. Проте у переважній більшості додатків замовнику достатньо інформації про лінійну та кутову швидкості в тривимірному просторі.

Вирішенню таких завдань найбільшою мірою відповідає концепція вимірювального модуля із шістьма ступенями вільності, що реалізована, наприклад, фірмою *Silicon Sensing* в моделі DMU10.

У модулі застосовано три комбінованих датчика сім'ї Otion CMS300 (CMS390) (рис. 12.20, а). Компонування чутливих елементів у корпусі CMS300 показана на рис. 12.20, б.



Рис. 12.20

MEMS гіроскоп датчика CMS300 має діапазон вимірювання $\pm 300^\circ/\text{с}$, акселерометри датчика забезпечують вимірювання в діапазоні $\pm 10g$. Заявлена точність гіроскопа $\pm 0,1 \dots 0,25^\circ/\text{с}$, акселерометра $\pm 0,01g$, смуга пропускання 117...190 Гц. Обмін даними організований по інтерфейсу RS-422. Основні показники датчиків сім'ї Otion: тільки цифровий вихід, висока точність та стабільність, широка смуга пропускання, висока стійкість до впливу ударів і вібрацій та розширений діапазон робочих температур.

Модульне мікроскладання DMU10 на основі датчиків CMS300, CMS390 доступне у двох варіантах:

- DMU10-01 (рис. 12.21, а) безкорпусний варіант – друкована плата з габаритними розмірами 22×37×11 мм;
- DMU10-02 в міцному анодированому алюмінієвому корпусі з габаритами 25×45×16 мм (рис. 12.21, б).

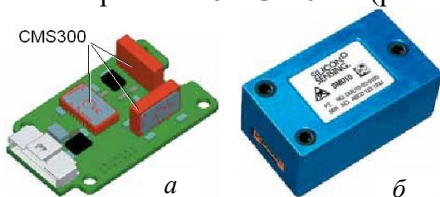


Рис. 12.21

Додатково в модулі встановлено два незалежні датчики температури, градуйованих для вимірювань в діапазоні $-55...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основна сфера застосування DMU10 це, наприклад системи стабілізації відеокамер на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), системи контролю курсу в дистанційно керованих або безпілотних транспортних засобах.

Компанія *Analog Devices* також анонсувала інтегрований модуль ADIS16350 (рис. 12.22), до складу якого, крім тривісного гіроскопа, входить і тривісний акселерометр. Деталі конструкції не оголошуються, але судячи з розмірів модуля ($22,7\times23,2\times23\text{ мм}$), він являє собою мікроскладання.

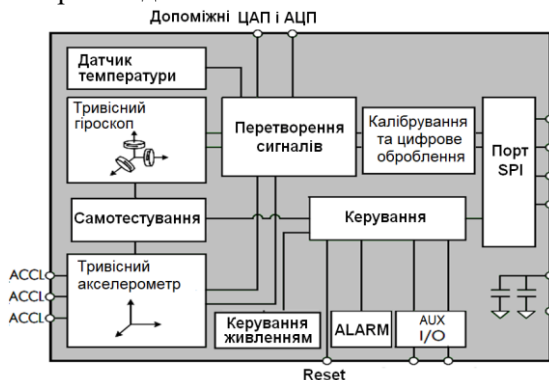


Рис. 12.22

Сигнали обох датчиків оцифровуються. Модуль оснащений допоміжними 12-розрядними ЦАП і АЦП. Обмін даними здійснюється через SPI-інтерфейс.

Голландська компанія *Xsens* виробляє компактні вимірювальні прилади і модулі для їх об'єднання в мережу. Базова модель інерціального модуля МТІ (рис.12.23) являє собою безплатформну інерціальну навігаційну систему середнього класу точності. Вона містить три гіроскопи, три акселерометри і три магнітометри. До складу приладу також входить мікроконтролер, здатний вирішувати завдання орієнтації та навігації. Прилад налаштовується, програмується і керується через інтерфейс RS-232.



Рис. 12.23

У базовій модифікації МТІ встановлені акселерометри з діапазоном вимірювання 5g і датчики кутової швидкості з діапазоном вимірювання 300°/с. У замовних варіантах можливе розширення цих діапазонів до 18g та 150°/с ... 1200°/с.

Існує низка модифікацій приладу, у тому числі безкорпусна версія МТІ – МТІ-ОЕМ, призначена для інтеграції у виробі замовників у вигляді дочірньої плати навігаційного модуля, а також версія МТІ-G – варіант приладу, який комплексується з приймачем системи супутникової навігації. У набір виробника входить безліч заготовок програм керування для різних умов застосування (навігація, стабілізація, орієнтація об'єктів). Прилади *Xsens* активно застосовуються в системах біомеханічних вимірювань, у БПЛА, у робототехніці, на малих судах та в інших галузях.

Піонером у галузі багатовісного інерціального детектування можна назвати компанію *InvenSense*, оскільки саме вона вперше представила компонент IMU-3000 – процесор оброблення сигналів, викликаних рухом – **Digital Motion Processor (DMP)**.

Наступними рішеннями від *InvenSense* став блок оброблення руху MPU (**Motion Processing Unit**), що застосовується в модулях MPU-6000, MPU-6050, які являють собою апаратно-програмну реалізацію дев'ятивісного сенсорного рішення без центрального процесора в корпусі типу QFN розмірами 4 × 4 × 0,9 мм.

Модуль MPU-6050 (GY-521) (рис. 12.24) об'єднує на одному кремнієвому кристалі процесор DMP, тривісний осьовий акселеро-

метр, тривісний гіроскоп, а також датчик температури з цифровим виходом для реалізації схеми температурної компенсації.

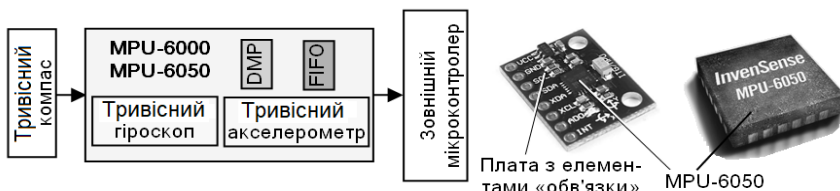


Рис. 12.24

Інтеграція в систему зовнішнього тривісного магнітометра дозволяє реалізувати в процесорі DMP дев'ятивісний алгоритм Motion Fusion і деякі функції інерціальної навігації (матриці обертання, кватерніони, кути Ейлера) без використання зовнішнього процесора. Алгоритм Motion Fusion забезпечує програмне злиття даних від API-інтерфейсів (інтерфейс програмування додатків), керування датчиком, калібрування зміщення. Спеціальна програма мовою команд DMP записується в пам'ять щоразу після подачі живлення. Це займає близько секунди. Програма фільтрує показання акселерометра і гіроскопа. Дані передаються в буфер системної комунікації FIFO (**F**irst-**I**n, **F**irst-**O**ut).

Дані про сенсорні елементи MPU-6050 не розголошуються. Можливо тут використовується багатокомпонентний гіроскоп-акселерометр, здатний одночасно вимірювати складові кутової швидкості та прискорення.

Натепер найбільш досконалим продуктом компанії *InvenSense* є перший у світі дев'ятивісний датчик MPU-9255 (рис. 12.25), що включає в себе тривісний гіроскоп, тривісний акселерометр, тривісний компас і цифровий процесор (DMP).

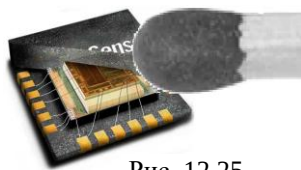
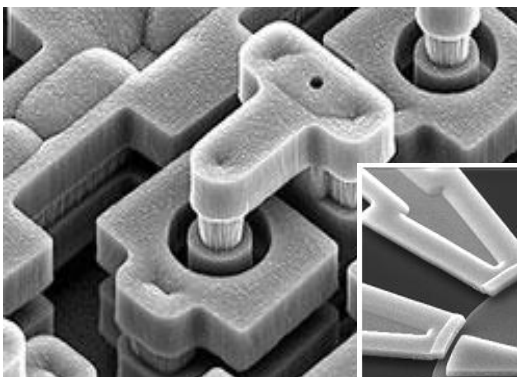


Рис. 12.25

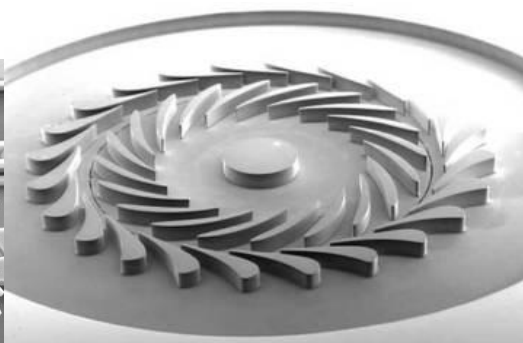
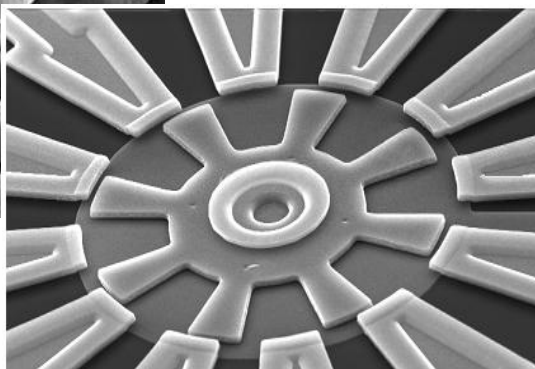
Під час виробництва MPU-9255 використано гібридну технологію (кілька кристалів розміщуються на одній підкладці і з'єднуються за допомогою мікрозварювання). Модуль MPU9255 включає два кристала. На одному з них реалізовані MEMС-гіроскоп і MEMС-акселерометр. Другий кристал – це тривісний магнітометр виробництва компанії *Asahi Kasei Microdevices Corporation*.

Запитання та завдання для самоперевірки

18. На чому ґрунтується принцип роботи вібраційних гіроскопів?
19. Який параметр руху вимірює вібраційний гіроскоп?
20. Назвіть основні класифікаційні ознаки ММГ.
21. Поясніть принцип дії балкових і стрижневих ММГ.
22. Яким чином у біморфних гіроскопах резонують первинні коливання пластин і детектують вторинні коливання?
23. До якого типу гіроскопів належать TF-гіроскопи?
24. Яким чином рухомі маси осциляторів TF-гіроскопів уводяться у вібраційний рух?
25. Яким чином у приладах серії ADXRS вирішено проблему компенсації лінійних прискорень і вібрацій?
26. Як основна і вимірювальна моди коливань змінюють геометрію диска-резонатора ММГ?
27. Який метод генерації та визначення амплітуди вимушених коливань використовують у гіроскопах CRS компанії *Silicon Sensing Systems*?
28. Прокоментуйте принцип дії обертового гіроскопа з дисковим резонатором.
29. Що являє собою ММГ з розподіленою масою?
30. Якою може бути максимальна комплектація інерціальних вимірювальних модулів?
31. Що являє собою концепція вимірювального модуля із шістьма степенями вільності?
32. Що являє собою модульне мікроскладання DMU10 фірми *Silicon Sensing*?
33. Що являє собою інерціальний модуль МТІ голандської компанії *Xsens*?
34. Що являє собою блок оброблення руху MPU компанії *InvenSense*?
35. Які завдання виконує процесор DMP у блоці оброблення руху MPU-6050 компанії *InvenSense*?
36. Яка технологія використовується під час виробництва MPU-9255 компанії *InvenSense*?



Частина III



МІКРОМЕХАНІЗМИ ТА МІКРОПРИВОДИ

Розділ 13. Актюаторні елементи МЕМС

Слово «актюатор» походить від англійського терміна *actuator* – елемент будь-якого пристрою, який може «діяти». Як правило, коли говорять про актюатори, ідеться про елементарні елементи і про елементарні механічні дії, наприклад, про лінійне переміщення або обертання. Слово актюатор у вітчизняній літературі стало вживатися як технічний термін для описання мікромеханічних елементів.

Якщо слово «актюатор» (актуатор) вживається у значенні механічного виконавчого пристрою, то мається на увазі, що це *елементарний* пристрій, що переміщує (обертає) певний об'єкт, наприклад чутливу масу МЕМС-гіроскопа.

Двигун (мотор, привід) це виконавчий пристрій в широкому сенсі цього слова, зазвичай містить в собі кілька взаємодіючих актюаторів, наприклад конденсаторну «гребінку» або ряд п'єзоелементів, а також інші механічні елементи (редуктори, муфти, важелі, тощо) і додаткові блоки.

Сервопривод (слідкувальний привід) – це привід (двигун, виконавчий пристрій), охоплений від'ємним зворотним зв'язком, що дозволяє точно керувати переміщенням вихідної ланки.

Мікроактюатори мають розміри від декількох квадратних мікрометрів до одного квадратного сантиметра. Діапазон застосування мікроактюаторів надзвичайно широкий, і він постійно зростає. Їх використовують в робототехніці, керувальних пристроях, космічній галузі, біомедицині, у вимірювальних приладах, в індустрії розваг тощо.

Залежно від способу активації виділяють такі типи мікроелектромеханічних актюаторів:

- електростатичні актюатори;
- магнітні актюатори;
- п'єзоелектричні актюатори;
- теплові (біметалеві) актюатори

Найпоширенішими методами перетворення сигналу в механічний рух вважаються п'єзоелектричний та електростатичний, хоча й інші методи мають важливе значення. Електростатична активація застосовується приблизно в одній третині актюаторів і, ймо-

вірно, це найбільш добре розроблений метод, його головні недоліки – це знос і злипання. Магнітні актюатори на відміну від електростатичних потребують відносно значного електричного струму навіть на мікроскопічному рівні, тобто споживана потужність цих актюаторів підвищена. Крім того на мікроскопічному рівні за однакових розмірів вихідний сигнал електростатичного актюатора на відносну одиницю розмірності більше, ніж при використанні магнітних методів.

Теплові актюатори також споживають відносно велику кількість електричної енергії, і їх головний недолік полягає в тому, що тепло, яке генерується, розсіюється.

І, нарешті, в як ремарку слід зазначити, що натепер «модним» словом «актюатор» стали називати, незрозуміло навіщо, і лінійні макродвигуни.

13.1. Електростатичні актюатори

Робота більшості мікроактюаторів ґрунтується на зворотному ефекті (електрична напруга, що прикладається переміщує кремнієві структури). Зокрема, електростатичні актюатори працюють за рахунок електростатичного притягання і відштовхування, яке виникає між обкладками конденсатора.

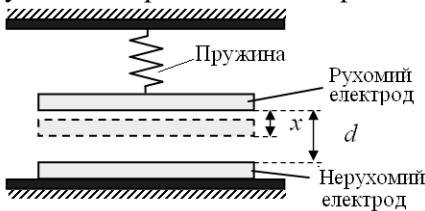


Рис. 13.1

У загальному вигляді електростатичний актюатор містить рухомий і нерухомий електроди (рис. 13.1). Рухомим електродом є консольні балки і мембрани.

Принцип дії цих актюаторів ґрунтується на виникненні електростатичної сили між рухомих і нерухомих електродами. Із поданням на обкладки відхильної напруги на рухомий електрод починає діяти електростатична сила, яка визначається виразом

$$F_{\text{ел}} = \frac{C}{d} \int_0^U U dU = \frac{CU^2}{2d},$$

де d – відстань між рухомих і нерухомих електродами; C – ємність, створювана електродами.

Під час подання на електроди відхильної напруги U між ними виникає електростатична взаємодія і рухомий електрод притягується до нерухомого. У міру відхилення рухомого електрода від початкового положення відстань між електродами d буде зменшуватися, що зумовлює збільшення електростатичної сили $F_{\text{ел}}$. Отже, у розрахунках електростатичної сили, що діє на рухомий електрод відносно нерухомого, необхідно враховувати вже здійснене відхилення x :

$$F_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2(d-x)}.$$

Сила, що створюється пружиною (див. рис. 13.1), компенсує електростатичну силу, зупиняючи переміщення рухомого електрода.

Існує кілька варіантів реалізації електростатичних актюаторів на основі плоскопаралельних конденсаторів. Приклад використання електростатичного актюатора для обертання мікродзеркала показано на рис. 13.2.

Для генерації в такому пристрої значних сил, які будуть здійснювати корисну роботу, необхідно, щоб зі зміною відстані сильно змінювалися ємності. Саме так працюють електростатичні мікродвигуни, що отримали назву «гребінка».

Електростатичний гребінчастий мікродвигун являє собою структуру, показану на рис. 13.3, а, і складається з двох обкладок складної форми. Зубці кожної з них поміщаються у виїмки іншої (рис. 13.3, б). У разі прикладання до обкладок напруги U одного знака

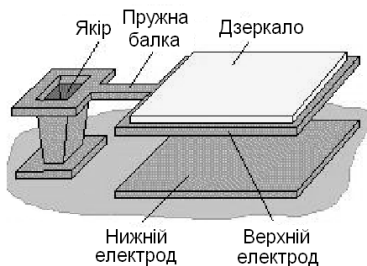


Рис. 13.2

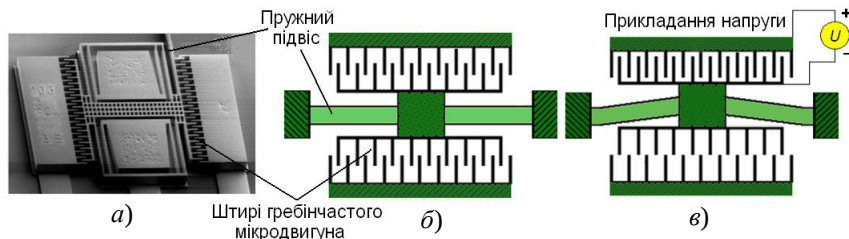


Рис. 13.3

зубці починають виходити з виїмок, відсуваючи обкладки одну від одної, а прикладання напруги різних знаків навпаки наближає обкладки одна до одної (рис. 13.3 в). Крім того форма «гребінця» позбавляє такий актюатор від можливості зміщення у напрямку, перпендикулярному до зубців.

Ємність збільшується пропорційно кількості штирів тому для генерації великих сил, потрібна велика кількість штирів. Саме гребінчасті мікроактюатори приводять у вібраційний рух чутливі маси осциляторів ТФ-гіроскопів.

Крім планарної реалізації гребінчастих електростатичних актюаторів, можливі варіанти обертових гребінчастих мікродвигунів. Варіант електростатичного гребінчастого мікродвигуна, пальці гребінок ротора якого розташовуються над пальцями статора, показано на рис. 13.4. Із прикладанням напруги двигун завдяки пруж-

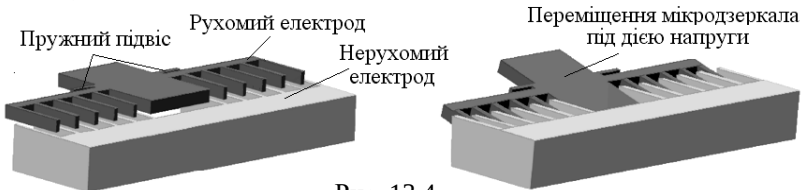


Рис. 13.4

ному підвісу повертає мікродзеркало на кут, пропорційний поданій напрузі.

13.2. Магнітні актюатори

Принцип дії магнітних актюаторів ґрунтується на здатності магнітноточувливих матеріалів намагнічуватися до насичення в слабких магнітних полях і взаємодіяти з цими полями. Тому основним компонентом більшості магнітних актюаторів є тонка пластина, з нанесеним на неї шаром магнітноточувливого матеріалу – пермалой (NiFe). При поміщенні такої пластини (рис. 13.5) у зовнішнє магнітне поле з напруженістю $H_{\text{зовн}}$ всередині пермалоевої ділянки виникає вектор намагніченості H_{NiFe} , який взаємодіючи з $H_{\text{зовн}}$, генерує дві компоненти магнітної сили F_N і F_S , які визначаються виразами:

$$F_N = q_m H_{\text{зовн}}; \quad F_S = -q_m H_{\text{зовн}},$$

де q_m – магнітний заряд; $H_{\text{зовн}}$ – напруженість зовнішнього магнітного поля.

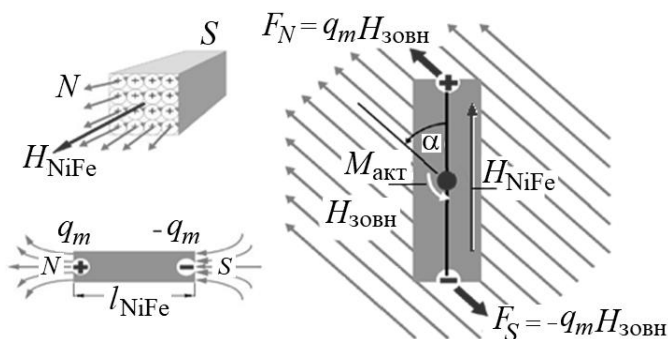


Рис. 13.5

Обертальний момент актюатора, створюваний цим силами, визначається за допомогою виразу:

$$M_{акт} = q_m l_{NiFe} H_{зовн} \sin \alpha,$$

де l_{NiFe} – довжина шару пермалою;

α – кут між напрямком вектора напруженості магнітного поля і площиною актюатора.

Обертальний момент завжди прагне зменшити повну енергію в системі актюатора вирівнюванням вектора намагніченості H_{NiFe} із силовими лініями зовнішнього магнітного поля $H_{зовн}$.

Роботу магнітного актюатора ілюструє рис. 13.6.

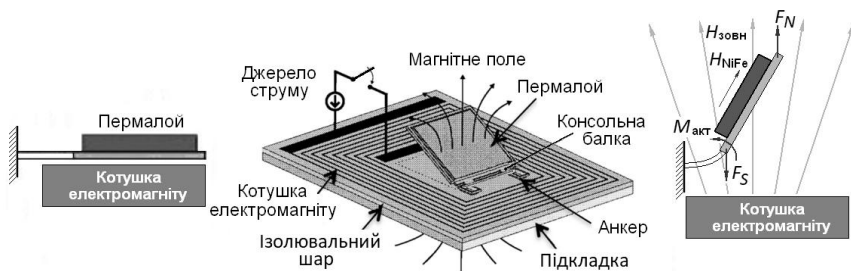


Рис. 13.6

Коли зовнішнє магнітне поле, створюване котушкою електромагніту, дорівнює нулю пластина з шаром пермалою є паралельною площині підкладки. Із поданням струму в котушку електромагніт формує зовнішнє магнітне поле $H_{зовн}$, що прикладене нормально до площини пластини. Усередині півки пермалою виникає

вектор намагніченості H_{NiFe} . Як було розглянуто, взаємодія вектора намагніченості із зовнішнім магнітним полем створює обертальний момент актюатора ($M_{\text{акт}}$), який діє на вільний кінець консольної балки, змушуючи її згинатися.

Технологічний процес виготовлення магнітних актюаторів це процес багат шарового полікристалічного поверхневого мікрооброблення (рис. 13.7) та глибинного реактивного іонного травлення (що особливо характерно для MUMPs технології). Як магнітний матеріал найчастіше використовують пермалой. До речі, саме пермалой як феромагнітний матеріал і став першопричиною появи магнітних актюаторів. Актюатори розрізняються за видом механічної підтримки, яка розташована або на консольних балках (рис.13.7), або на торсіонах. Як структурні пластини, так і підтримувальні балки зроблені з полікристалічних плівок.

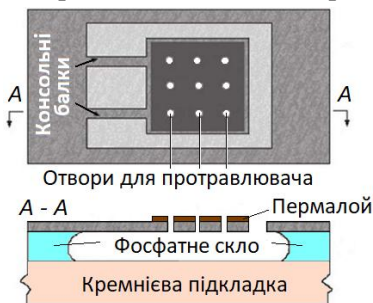


Рис. 13.7

Істотною проблемою, пов'язаною з магнітними актюатором, є проблема виготовлення обмоток електромагніту. В основному магнітні актюатори виготовляють з двовимірними обмотками, оскільки тривимірні обмотки дуже складно виготовити на мікрорівні. Крім того вибір магнітного матеріалу дуже обмежений. Обираються тільки ті матеріали, які легко обробити на мікрорівні, тобто не завжди матеріал магніту обирається оптимально. Багато в чому через це магнітні актюатори споживають велику кількість енергії та розсіюють багато тепла.

13.3. П'єзоелектричні актюатори

П'єзоелектричний мікроактюатор – це актюатор, побудований на використанні зворотного п'єзоелектричного ефекту, який проявляється в зміні розмірів п'єзoeлектрика під дією зовнішнього електричного поля.

Основна формула для зворотного п'єзоелектричного ефекту формулюється так:

$$\varepsilon_k = d_{\text{зв}} E,$$

де ε_k – величина відносної деформації п'єзоелектрика; $d_{зв}$ – коефіцієнт зворотного п'єзоефекту; E – напруженість електричного поля.

Для отримання п'єзоелектричного ефекту п'єзоелектричну кераміку треба піддавати процесу поляризації, а для поліпшення п'єзоелектричних властивостей структура кристала повинна бути асиметричною.

Два прості приклади, які демонструють принцип дії згинальних юніморфних (одношарових) п'єзоелектричних актюаторів показано на рис. 13.8. На рис. 13.8, а шар п'єзоелектрика осаджений на балку. Коли на п'єзокерамічну пластину впливає керувальна напруга, вона або стискається, або розширюється пропорційно прикладеній напрузі. Оскільки підкладка не змінює своєї довжини, то через стиснення або розширення п'єзокераміки актюатора вигинається пропорційно прикладеній напрузі. Такий же принцип можна застосувати і до тонкої кремнієвої мембрани (рис. 13.8, б). Якщо прикласти напругу, то мембрана деформується.



Якщо як підкладку використовують другу п'єзокерамічну пластину, то замість юніморфа отримують біморф. У такому актюаторі кожна пластина працює на розтяг або стискання зустрічно іншій пластині. Найбільшого поширення в п'єзомеханіці набули саме біморфи.

Як матеріали підкладок і мембран можна використовувати: кремній, діоксид та нітрид кремнію, карбід кремнію та навіть алмази. Струмопровідні плівки виготовляють з платини, титану, молибдену, алюмінію, золота, хрому. Шари п'єзоелектрика формуються з цирконат-титанату свинцю (PZT), нітриду алюмінію, оксиду цинку та ін.

П'єзоелектричні актюатори бувають таких видів: блокові актюатори, біморфні актюатори, а також п'єзоелектричні двигуни.

П'єзоелектричні блокові актюатори

Принцип конструкції п'єзоелектричних блокових актюаторів демонструє рис. 13.9. Виконавчим елементом блокового актюатора є щільний пакет окремих шарів п'єзоелектричної кераміки, які кон-

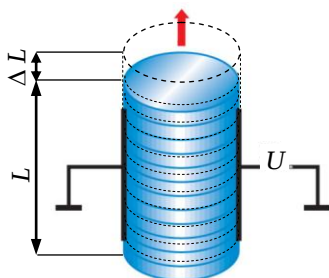


Рис. 13.9

тактують один з одним. Електроди, які використовують для приведення в дію актюатора, з'єднані паралельно, тому полярність прикладеного електричного поля викликає однакову поляризацією у кожному шарі.

Якщо хід одиночного п'єзокерамічного елемента $d_{\text{од}}$ вимірюється в мікронах, то для кількох таких елементів, складених разом у пакет, хід збільшується. Результируючий вихідний зсув актюатора складається з відносних деформацій всіх п'єзоелементів блока, що мають однаковий знак:

$$\Delta L = d_{\text{од}} n U.$$

Максимальна деформація (відношення ходу до висоти пакета) для блокового актюатора може становити від 0,15% до 0,2% від висоти пакета.

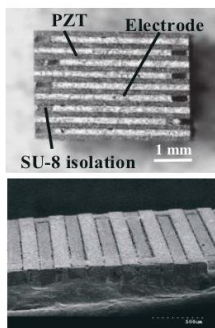


Рис. 13.10

Такі виконавчі механізми є оптимальними, коли потрібен великий зсув, оскільки амплітуда вихідного зміщення актюатора підсилюється залежно від кількості шарів у блоці.

Основним матеріалом для твердотільних блокових актюаторів залишається цирконат-титанату свинцю (PZT). Зображення мікроскопічної структури десятишарового PZT МЕМС-актюатора, що отримані за допомогою оптичного мікроскопа, показано на рис 13.10.

Головною перевагою блокових п'єзоелектричних актюаторів є безпрецедентна точність позиціонування – соті та навіть тисячні частки нанометра. Крім того, вони надійні, довговічні, мають високу швидкість спрацьовування (у діапазоні мікросекунд), розвивають високі прискорення та мають велику вихідну потужність. Саме тому п'єзоелектричні механізми покладені в основі сучасних напівпровідників літографічних інструментів,

атомно-силових мікроскопів та інших нанорозмірних прецизійних систем.

Ще однією конструкцією, що використовує блокові актюатори, є конструкція згинально-натяжних актюаторів. Такі пристрої перетворюють невеликий зсув багат шарового п'єзокерамічного елемента в деформацію вигину двох металевих пластин, що охоплюють цей елемент.

Завдяки механічному підсиленню такого перетворення згинально-натяжні актюатори демонструють багаторазове збільшення зсуву порівняно з блоковими актюаторами.

Залежно від форми їх конструкції (рис. 13.11) згинально-натяжні актюатори отримали назву «мууні» (еліпсоїдні) і «кімвал» (тарілкові). Модифікація «кімвал» може демонструвати набагато більші переміщення (зсув) порівняно з базовою конструкцією.

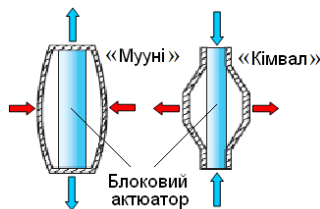


Рис. 13.11

П'єзоелектричні біморфні актюатори.

Біморфна (двошарова) конструкція збільшує зміну розмірів п'єзопластин, чим досягається значне відхилення актюатора, яке досягає рівня декількох міліметрів за відносно малих розмірів актюатора. Єдине обмеження це те, що плівки повинні бути досить товстими для запобігання діелектричному пробою або короткому замиканню, це може статися за надто високої напруги керування.

Біморф складається з двох тонких склеєних між собою п'єзокерамічних пластин з прокладкою між ними або без неї. П'єзокерамічні пластини найчастіше виготовляються з модифікованого цирконат-титанату свинцю. На п'єзокерамічні пластини наносяться електроди зі срібла або нікелю.

Після нанесення на п'єзокерамічні пластини електродів, вони поляризуються в сильному постійному електричному полі і набувають п'єзоелектричних властивостей.

Зазвичай біморфи монтуються у вигляді консолі (рис. 13.12), стандартна вільна довжина L_B якої становить приблизно 85% від загальної довжини L .

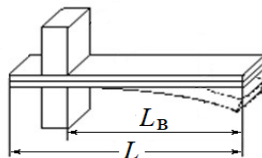


Рис. 13.12

Біморф, складений з двох пластин, напрямок поляризації яких однаковий, називають паралельним біморфом. Біморф, у якому поляризація пластин має протилежний напрямок, позначають як послідовний біморф.

Керування формою біморфа здійснюється поданням електричної напруги на електроди, що нанесені на п'єзопластини.

У послідовному біморфі пластини з'єднані з джерелом живлення послідовно (рис. 13.13, а). У цьому випадку на пластину з

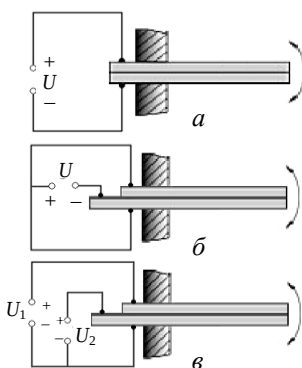


Рис. 13.13

додатною поляриністю впливає додатна напруга і завдяки зворотному п'єзоелектричному ефекту вона подовжується, тоді як пластина від'ємної поляризації не працює і перешкоджає цій зміні довжини, що і призводить до вигину біморфа.

Спосіб умикання паралельного біморфа такий (рис. 13.13, б): два зовнішні електроди підключають до одного виводу. Другим виводом слугує центральний електрод. Паралельний біморф розвиває зусилля у два рази більші ніж послідовний біморф.

У послідовному біморфі одна з пластин завжди буде перебувати під напругою, зворотною напрузі поляризації, що створює небезпеку деполяризації. Це також справедливо і для паралельного біморфа (див. рис.13.13, в).

Для усунення можливого дефекту деполяризації пластин доцільно вмикати біморф за схемою (рис. 13.13, в), де обидві пластини збуджуються в напрямку поляризації, а подача напруги зсуву дозволяє уникнути дрейфу характеристик, що викликається деполяризацією, підвищує чутливість та збільшує термін експлуатації.

Забезпечуючи переміщення до 5 мм, біморфні актюатори здатні розвивати прийнятне значення зусилля до 5Н за низьких значень напруги збудження 20 ... 150 В.

Біморфні п'єзоелектричні актюатори знаходять широкое застосування в сучасних мікромеханічних системах, де потрібні відносно невеликі механічні переміщення з максимальною чутливістю.

Приклад використання біморфних актюаторів для регулювання з нанометричною точністю лінз, дзеркал, оптичних приладів

показано на рис. 13.14, *а*, а приклад біморфів як пристроїв керування гідравлічними та пневматичними клапанами – на рис. 13.14, *б*.

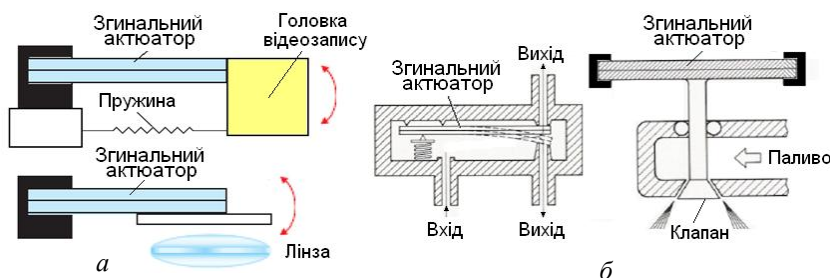


Рис. 13.14

Біморфи можна використовувати і як окремі мініатюрні пристрої. На рис. 13.15, *а* показано зовнішній вигляд мініатюрних біморфних п'єзоактюаторів серії PI-140, які поставляються з керувальним контролером (рис. 13.15, *б*).

Такі актюатори з датчиком положення – ідеальні пристрої для сканування, позиціонування та керування відхиленням лазерного променя, які застосовуються у сканерах атомносилової мікроскопів (рис. 13.16). Вони забезпечують значно вищу точність, повторне позиціонування та швидкість відгуку, ніж стандартні актюатори без зворотного зв'язку.

Основні переваги біморфів порівняно з аналогічними електронними елементами: низька вартість; мале споживання енергії; значна величина переміщення (до 5 мм) і достатнє зусилля (до 5 Н); висока швидкодія та довговічність (до 100 млн циклів).

Різновидом згинальних актюаторів є дискові згинальні актюатори (рис. 13. 17, *а*). Дискові згинальні актюатори затискаються по діаметру і під дією прикладеної напруги набувають форми купола. Переміщення, які можуть здійснювати дискові біморфи, невеликі – до 200 мкм, але при цьому вони мають субнанометричну роздільну здатність.



Рис.

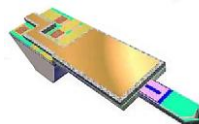


Рис. 13.16



Рис. 13.17

Як переваги дискових актюаторів порівняно з пакетними повторювачами можна відзначити відносно невисоку вартість і плоску конструкцію. Використовують як у статичному, так і в динамічному режимі роботи. Дискові актюатори можуть бути одно- і дводисковими. На фото (рис. 13.17, б) показані дискові повторювачі німецької компанії *Physic Instrumente* (PI), які співмірні з розмірами мікропроцесора.

13.4. Термоактюатори

Принцип роботи термоактюаторів ґрунтується на тепловому розширенні структурних матеріалів елементів мікросистемних виробів.

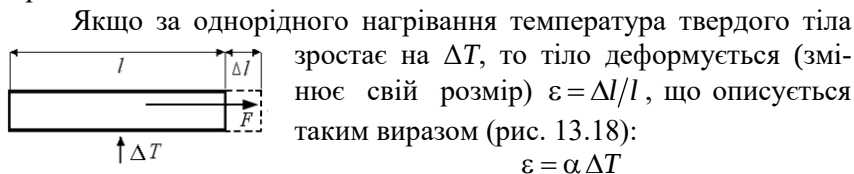


Рис. 13.18

Якщо за однорідного нагрівання температура твердого тіла зростає на ΔT , то тіло деформується (змінює свій розмір) $\varepsilon = \Delta l / l$, що описується таким виразом (рис. 13.18):

$$\varepsilon = \alpha \Delta T$$

де α – коефіцієнт теплового розширення; ΔT – зміна температури; Δl – абсолютне подовження; l – первісна довжина тіла.

Використовуючи формулу для розрахунку ε , отримаємо вираз, що дозволяє визначати абсолютне подовження термоактюатора:

$$\Delta l = l \alpha \Delta T. \quad (13.1)$$

Відповідно до закону Гука, сила розтягування або стиснення, що прикладена до тіла у формі стрижня, викликає зміна довжини тіла на величину Δl :

$$F = k \Delta l, \quad (13.2)$$

де F – сила, яка розтягує (стискає) стрижень; Δl – абсолютне подовження (стиснення) стержня; k – коефіцієнт пружності.

Коефіцієнт пружності залежить як від властивостей матеріалу, так і від розмірів стрижня. Виділяючи залежність коефіцієнта пружності від розмірів стрижня (площі поперечного перерізу S і довжини l), запишемо вираз для коефіцієнта пружності у вигляді

$$k = \frac{ES}{l}, \quad (13.3)$$

де E – модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга).

Підставляючи вирази (13.1) і (13.3) в (13.2), отримаємо вираз для визначення сили, створюваної термоактюатором:

$$F = \alpha E S \Delta T,$$

де $S = z h$ (z, h – ширина і товщина стрижня відповідно).

Таким чином, сила, що розвивається термоактюатором, залежить від механічних характеристик матеріалу виконавчого елемента актюатора (від коефіцієнта теплового розширення і модуля поздовжньої пружності) та від його геометричних розмірів.

Теплова деформація $\varepsilon = \alpha \Delta T$ також залежить від кристалографічної орієнтації матеріалу виконавчого елемента.

Прикладом біморфного актюатора, заснованого на використанні матеріалів з різним коефіцієнтом теплового розширення може слугувати біметалевий актюатор (рис. 13.19), що виготовляється за технологією поверхневого мікрооброблення і MUMPs-технології.

Основою для виготовлення мікроактюатора є кремнієва пластина, на поверхні якої формується шар діоксиду кремнію, на який зверху наноситься шар алюмінію. Зверху на алюмінії формується нагрівальний елемент. Зазвичай як нагрівник використовують плівкові або звивистої форми резистори, які можна легко виготовити з використанням тонко- або товстоплівкової технології.

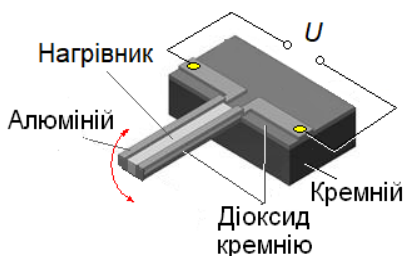


Рис. 13.19

Процес вивільнення балки з кремнієвої основи відбувається шляхом глибокого селективного травлення кремнію. Під час звільнення актюатора спостерігається початковий вигин балки через напругу стискання у шарі алюмінію і напругу розтягування у нижньому шарі діоксиду кремнію. Для повернення балки у початковий плоский стан проводять контрольний прогрів структури балки.

Зафіксувавши один кінець балки, отримують біморфний актюатор, у якого у разі пропущення електричного струму через нагрівник один матеріал балки розширюється швидше, ніж інший через різні коефіцієнти теплового розширення, і балка згинається. Використовуючи контрольований нагрів, можна внаслідок біметалевого ефекту отримувати необхідні форми руху вільного кінця балки.

Закріпивши на вільному кінці балки переміщуваний об'єкт, наприклад мікродзеркало, отримаємо конструкцію біморфного

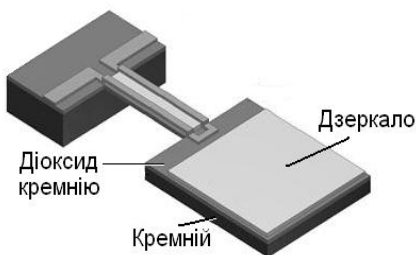


Рис. 13.20

термоактюатора для повороту цього дзеркала (рис. 13.20). За умови оптимального підбору товщини шарів і оптимізації стадій технологічного процесу, особливо глибокого селективного травлення кремнію, можуть бути отримані показники, які забезпечують відхилення дзеркала з високою швидкістю і на великий кут (десятки гер-

ців і десятки градусів).

Теплові виконавчі мікропристрої можуть також використовувати об'ємне розширення рідини або газу завдяки зміні температури. Газу і рідини мають набагато більший коефіцієнт теплового розширення, ніж тверді тіла, і це можна використовувати в термопневматичних і терморідинних мікроактюаторах. Даний тип актюаторів містить нагрівальний елемент і закриту пружною мембраною герметичну порожнину, заповнену газом або рідиною (рис. 13.21). Унаслідок нагрівання відбувається розширення робочого середо-

вища в герметичній зоні, що в свою чергу призводить до деформації мембрани.

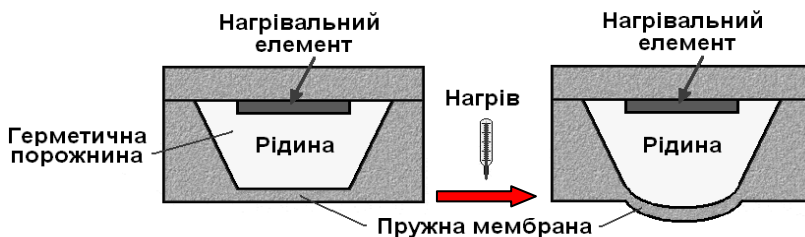


Рис. 13.21

Термопневматичні актуатори виготовляються за технологією об'ємного мікрооброблення та LIGA-технології.

В інтегральних технологіях нагрівником є напівпровідниковий резистор меандрового типу. Електричний струм, що тече крізь нього, за елементарний проміжок часу dt призводить до виділення

тепла $dQ = \frac{U^2}{R} dt$, де U – прикладена напруга; R – опір нагрівника.

Переваги теплових мікроактуаторів:

- проста конструкція – робочими елементами є резистор нагрівання, а для біметалевого ефекту використовують плівкову структуру.
- розмір, що лежить в мікродіапазоні, оскільки згідно із законом Фур'є швидкодія зі зменшенням розмірів зростає квадратично.
- як активні елементи застосовні майже будь-які матеріали, які, крім різних коефіцієнтів розширення, повинні мати достатню міцність.

Недоліки:

- нагрівальний елемент споживає дуже багато енергії для того, щоб теплової актуатор зміг розвинути відносно велику силу, тому ККД теплових мікроактуаторів не перевищує 10%.
- нагрівальний елемент необхідно охолоджувати, щоб повернути актуатор у вихідне положення, а отже тепло має бути розсіяно в навколишнє середовище. Це природно займає деяку кількість часу, що обмежує швидкодію теплового мікроактуатора.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Коли слово «актюатор» доцільно вживати у значенні механічного виконавчого пристрою?
2. Які залежно від способу активації виділяють типи мікроелектромеханічних актюаторів?
3. За рахунок якого ефекту працюють електростатичні актюатори?
4. Наведіть приклади використання електростатичного актюатора на основі плоскопаралельних конденсаторів?
5. Що являє собою електростатичний гребінчастий мікродвигун?
6. На чому ґрунтується принцип дії магнітних актюаторів?
7. Що є основним компонентом більшості магнітних актюаторів?
8. Яким чином у магнітних актюаторах формується зовнішнє магнітне поле?
9. Яка істотна проблема виникає в технології виготовлення магнітних актюаторів?
10. На використанні якого ефекту побудований п'єзоелектричний мікроактюатор?
11. У чому відмінність між юніморфними і біморфними п'єзоелектричними актюаторами?
12. Із яких матеріалів можна формувати шари п'єзоелектрика?
13. Що являє собою виконавчий елемент блокового п'єзоактюатора?
14. Які залежно від форми конструкції існують типи згинально-натяжних актюаторів?
15. На чому ґрунтується принцип роботи термоактюаторів?
16. Від яких характеристик залежить сила, що розвивається термоактюатором?
17. Що є перевагами і недоліками термоактюаторів?

Розділ 14. Мікродвигуни

Мікродвигун – це двигун малих розмірів і потужності, що виконує функції автономного або керованого руху шляхом перетворення будь-якого виду енергії в роботу. Мікродвигун зазвичай містить в собі кілька взаємодійних актюаторів, а також інші механічні елементи, що дозволяють значно розширити порівняно з мікроактюатором діапазон вихідного переміщення. У попередньому розділі розглянуто деякі варіанти побудови електростатичних і магнітних мікродвигунів, які разом з п'єзоелектричними найчастіше застосовують у мікромеханічних системах.

14.1. П'єзоелектричні мікродвигуни

Мініатюрні п'єзодвигуни використовують для точного позиціонування у сферах мікросистемної техніки.

В основу принципів роботи мініатюрних п'єзодвигунів покладено метод побудови п'єзоактюаторів. Не зважаючи на те, що п'єзоактюатори мають незначний зсув, вони можуть використовуватися для значних лінійних переміщень або обертання в конструкціях, які називаються п'єзоелектричними двигунами, більшість з яких працюють шляхом здійснення послідовності малих кроків.

Лінійні крокові п'єзоелектричні мікродвигуни

Базова конструкція лінійного крокового п'єзодвигуна містить Н-подібну групу п'єзоактюаторів (рис. 14.1), два з яких діють як актюатори затискачі (гальма), а два других блокових актюатора – як ходові двигуни.

Актюатори затискачі керуються прямокутними сигналами, а ходові – пилоподібними. Завдяки цьому є можливість реалізовувати принцип дроблення кроку і зупиняти п'єзодвигун на будь-якому такті напруги, яка формує ходову пилу.

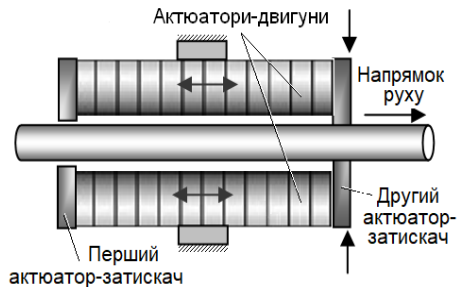


Рис. 14.1

Робочий цикл такого п'єзодвигуна складається з декількох етапів (рис. 14.2): перший гальмувальний актюатор приводиться в дію і затискає один кінець штока двигуна; на актюатор-двигун подається напруга, і він приводиться в дію – подовжується; другий актюатор-затискач після максимального кроку актюатора-двигуна затискає його; з першого гальмувального актюатора знімається напруга, і він розблоковує шток двигуна; блоковий актюатор-двигун, з якого знята напруга, стискається в напрямку пересування і т. ін.

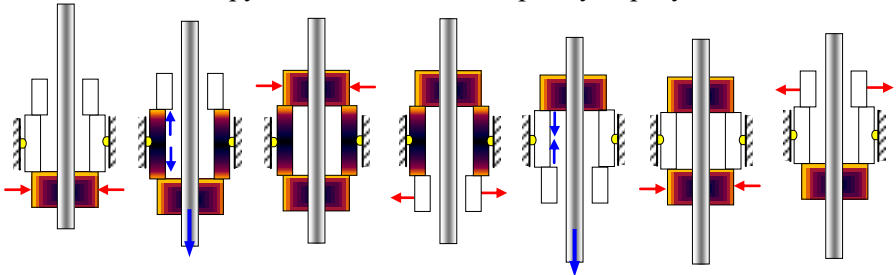


Рис. 14.2

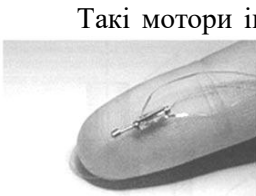


Рис. 14.3

Такі мотори іноді називають «двіймовим хробаком», досить характерна назва для такого типу пересування. Швидкість такого мотора регулюється зміною кроку (величиною амплітуди) і частоти. Саме на цьому принципі ґрунтується робота п'єзоелектричного моторчика (4 мм завдовжки і 1,8 мм завширшки), створеного групою вчених з університету штату Пенсільванія (США) (рис. 14.3). Такий моторчик знаходить застосування передусім у медицині, наприклад у мікрохірургії або для керування дзеркальцем ендоскопа.

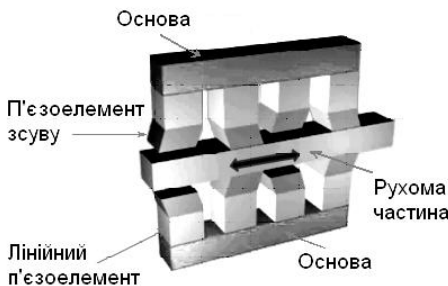


Рис. 14.4

NEXLINE ґрунтується на використанні двох типів п'єзоелементів:

Дещо іншу конструкцію має кроковий п'єзопривід NEXLINE компанії *Physik Instrumente*. Принципова схема такого привода показана на рис. 14.4. Принцип роботи

лінійного п'єзоелемента і п'єзоелемента зсуву. Лінійні п'єзоелементи закріплюються на основі, на яку діє сила попереднього навантаження. П'єзоелементи зсуву, контактуючи з рухомою частиною, переміщують її у двох напрямках, реалізуючи ідею фрикційного передавання руху. Чим більше таких модулів, тим вище розвиваються зусилля штовхання. Величина кроку п'єзодвигунів залежить від величини навантаження. Ефект гістерезису, який полягає в неоднозначності зміни розмірів п'єзокерамічних елементів від напрямку зміни електричного поля, не дозволяє приводу переміщатися з однаковими кроками. Для позиціонування і досягнення високої повторюваності переміщення двигун оснащується лінійним датчиком положення, що забезпечує роздільну здатність 5 нм на всьому діапазоні переміщення. Таким чином, п'єзодвигун NEXLINE дозволяє здійснювати переміщення на великі відстані з високою точністю.

Складений активний модуль п'єзодвигуна NEXLINE показано на рис. 14.5, а, а його зовнішній вигляд – на рис. 14.5, б.

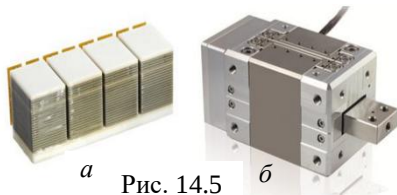


Рис. 14.5

Схему чотирьох тактів

робочого циклу такого двигуна зображено на рис. 14.6. Стрілками показано напрямок деформації кожного із сегментів активного модуля.

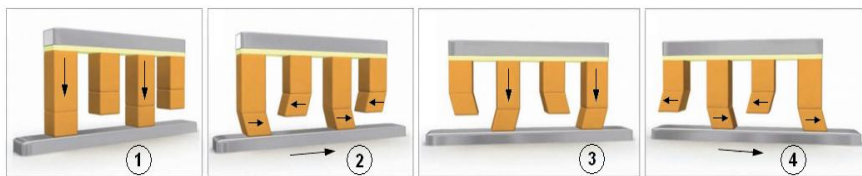


Рис. 14.6

П'єзодвигуни NEXLINE чутливі до перегріву. Тривале позиціонування на граничних швидкостях може призвести до нагрівання активного модуля і до зниження терміну експлуатації.

П'єзоелектричний роторний мікродвигун

Принцип роботи роторних п'єзоелектричних мікродвигунів ґрунтується на перетворенні коливань п'єзоелектричного статора в обертальний рух напівпровідникового ротора.

Структуру п'єзоелектричного мікродвигуна, що складається зі статора і ротора, показано на рис. 14.7, *а*. Статор являє собою мембрану, закріплену на підкладці за допомогою пружного підвісу (рис. 14.7, *б*). У центрі мембрани розташований п'єзоелектричний шар ZnO. Діаметр статора – 2 мм.

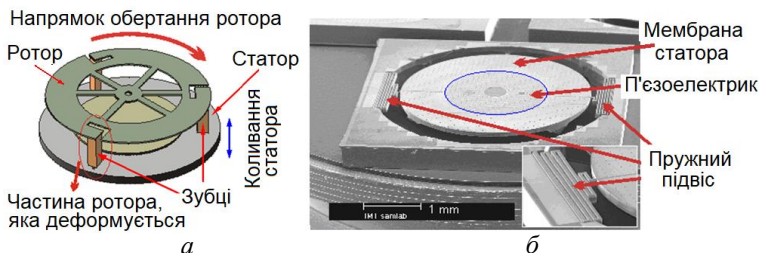


Рис. 14.7

Фотографію п'єзоелектричного мікродвигуна з ведучою зіркою з великим збільшенням показано на рис. 14.8, *а*. Розміри ротора двигуна становлять (рис. 14.8, *б*): довжина – 5 мм, діаметр – 2 мм. Висота зубця ротора (рис. 14.8 *в*) – 100 мкм.

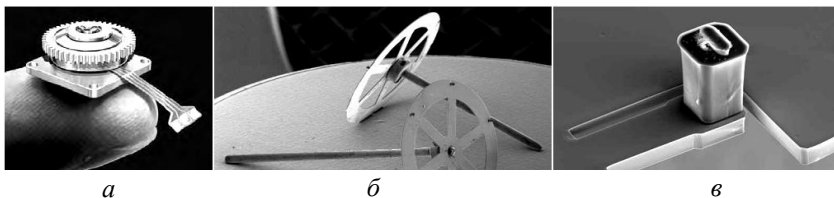


Рис. 14.8

За відсутності зовнішньої напруги статор і ротор перебувають у стані спокою (рис. 14.9 *а*). Після подачі імпульсу напруги на статор п'єзоелектричного актюатора відбувається зміна геометричних розмірів статора, що в свою чергу приводить до деформації зубців ротора (рис. 14.9, *б*). Таким чином, ротор під дією сил пружності зміщується на деяку відстань навколо своєї осі. Коли напруга знімається, статор повертається у вихідне положення, а ротор опиняється зміщеним на деяку відстань відносно свого вихідного положення. Далі цикл повторюється.

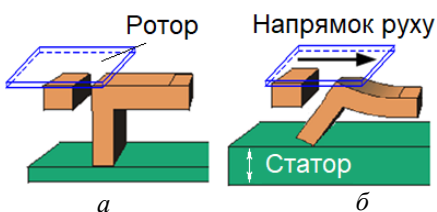


Рис. 14.9

Далі цикл повторюється.

П'єзоелектричні інерційні мікродвигуни «stick-slip»

П'єзодвигуни серії PIShift ґрунтуються на ефекті переривчастого руху (stick-slip effect). Основа приводу – п'єзоактуатор, до одного боку якого прикріплений попередньо навантажений фрикційний елемент. На п'єзоактуатор подається пилоподібний сигнал з контролера. У процесі наростання напруги імпульсу п'єзоелемент повільно «розтягується» і переміщує напрямну, оскільки зусилля штовхання не перевищує статичної сили тертя між напрямною і фрикційним елементом. У разі різкого спадання напруги відбувається швидко «скорочення» п'єзоактуатора, при цьому напрямна залишається на своєму місці, оскільки зусилля, що розвивається п'єзоелементом, перевищують кінетичне тертя, а це, у свою чергу, призводить до проковзування (рис. 14.10). Перевищення сили штовхання сили кінетичного тертя зумовлено тим, що в момент початку спадання напруги напрямна продовжує рух за інерцією.



Рис. 14.10

Конструкція п'єзоприводу накладає обмеження на сфери можливого застосування. Не допускається піддавати напрямну впливу бічних сил. П'єзоелектричний двигун серії PIShift не призначений для тривалого режиму роботи. Максимальний час безперервної роботи не повинен перевищувати 10 с, після чого привід повинен перебувати у спокої щонайменше такий самий проміжок часу. Для таких умов роботи, за кімнатної температури і нормального атмосферного тиску п'єзопривід у змозі за час експлуатації пройти дистанцію до 2000 м.

Мікродвигун з ударним механізмом

У мікродвигунах з ударним механізмом також використовується сила тертя спокою та сила удару внаслідок різкої деформації п'єзоелемента.

Спочатку п'єзоелемент швидко за допомогою керувальної напруги розтягується, генеруючи таким чином велику інерційну

ударну силу. Вихідна ланка переміщується протилежно напрямку прикладання сили тертя спокою (рис. 14.11).

Потім п'єзоелемент повільно стискають, використовуючи напругу протилежного знаку. За цих умов інерційні елементи приводу переміщуються, а ходова частина залишається нерухомою.

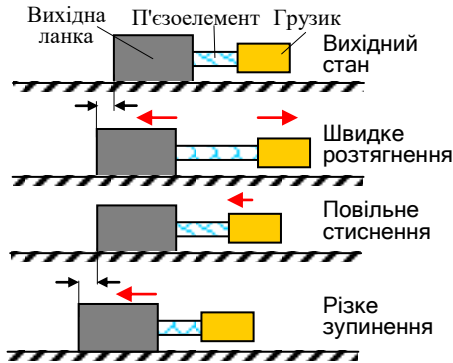


Рис. 14.11

Останній етап – скидання напруги та різке зупинення. Під час різкого зупинення сили, які утримують п'єзоелемент у деформованому стані, перестають діяти, і п'єзо-елемент стає навантаженим на інерційний елемент (грузик) і вихідну ланку, що

приводить до зміщення елементів кінематичної пари і переміщення вихідної ланки приводу. Через високу швидкість двигуна зсув вихідної ланки має грубий, ударний характер, тому неможливо активно керувати пристроєм. До деякої міри можна контролювати тільки початкову швидкість. Використання у структурі п'єзоелемента трубчастої конструкції дещо поліпшує позиціонування та сприяє формуванню більш потужної ударної хвилі.

Резонансні п'єзодвигуни

Останнім часом активно розвиваються резонансні п'єзодвигуни, які є сучасною альтернативою двигунам постійного струму, вони також відомі як вібраційні двигуни. Перевагами подібних двигунів є висока нанометрична роздільна здатність, швидкість та потужність, несумірна з їх розмірами.

Конструкцію резонансного п'єзоприводу показано на рис. 14.12, а. Основними елементами п'єзоприводу є: чотиригранна металева муфта (з немагнітного матеріалу) з внутрішньою різьбою, ходовий гвинт (черв'як) і чотири пластини п'єзокераміки. Пластини п'єзокераміки прикріплені на гранях металевої муфти, черв'як закручений в муфту.

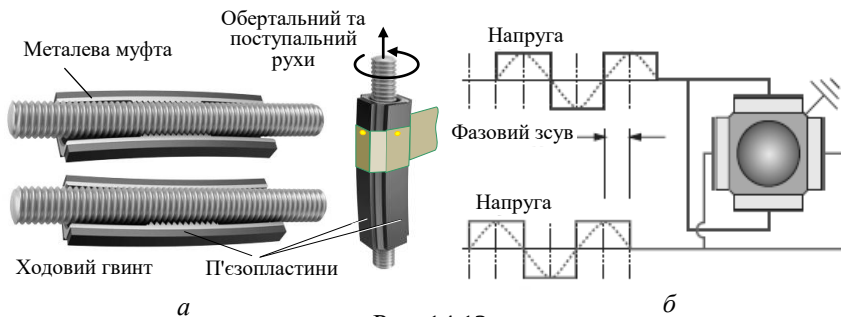


Рис. 14.12

Із подачею двофазної напруги на протилежні пари пластин п'єзокераміки в них виникають механічні рухи типу «хула-хупа» (рис. 14.12, а), які передаються металевій муфті. Якщо є зсув фаз між поданими електричними напругами (рис. 14.12 б), то на межі дотичних поверхонь муфти та черв'яка виникають сили здавлювання з поворотом. Унаслідок ходовий гвинт обертається і лінійно переміщується відносно муфти. Змінюючи зсув фаз, можна змінювати напрямок руху гвинта (черв'яка). Ці п'єзоприводи працюють в резонансному режимі на частотах 30...200 кГц залежно від їх розмірів. Мінімальні габарити п'єзоприводу Squiggle фірми NST – 1,55×1,55×6 мм (рис. 14.13), споживана потужність ~ 500м Вт, діапазон лінійних переміщень 5... 30 мм, роздільна здатність 0,5 мкм.

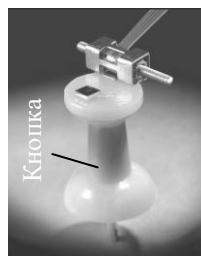


Рис. 14.13

14.2. Електростатичні мікродвигуни

Принципи побудови найпоширенішого електростатичного гребінчастого мікродвигуна – лінійного планарного й обертового розглянуто в попередньому розділі (див. рис 13.3, 13.4).

Проте існують й інші типи планарних *роторних електростатичних* мікродвигунів:

- електростатичні повітряні (безконтактні) мікродвигуни;
- електростатичні діелектричні (контактні) мікродвигуни.

Електростатичні безконтактні мікродвигуни

Основна відмінність електростатичних безконтактних (повітряних) мікродвигунів від класичних електростатичних макродвигунів – малий зазор між статором і ротором, який дорівнює $1...2$ мкм (у класичних електростатичних макромашинах він дорівнює $1...2$ мм). Малий зазор у міжелектродному просторі МЕМС-двигунів визначає відносно високу густину електричної енергії, що «накачується» у зразок і, отже, високу ефективність двигуна. Електростатичні безконтактні двигуни обертального руху (їх ще називають електростатичними двигунами кочення) у першому наближенні можна трактувати як електростатичні гребінчасті мікродвигуни, у яких ротор і статор згорнуті у кругову конструкцію. Проте на відміну від гребінчастого мікродвигуна у роторному двигуні (рис. 14.14) напруга циклічно прикладається до різних полюсів статора, унаслідок чого ротор здійснює обертальні рухи, тобто електростатичні двигуни обертального руху слід віднести до класу крокових двигунів.

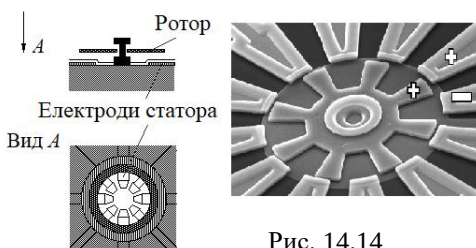


Рис. 14.14

В електростатичних безконтактних двигунах ротор не торкається поверхні статора, а його силове зчеплення зі статором здійснюється завдяки концентрації електричного поля над зубцями ротора і статора. При цьому не зношуються поверхні ротора і статора, що можна вважати перевагами двигунів цього типу.

Основний недолік (недолік крокових двигунів) – це низька точність позиціонування, яка визначається розмірами зубців ротора і статора. Високої точності позиціонування можна досягти тільки у разі надзвичайно малих розмірів зубців і дуже високої точності їх виготовлення. Це значно ускладнює технологію виготовлення двигуна, яка передбачає дорогі операції: виготовлення розмірів деталей з точністю не нижче $0,1$ мкм; глибоке прецизійне хімічне травлення і та інші, що істотно збільшує вартість виробництва. Тому малоімовірно, що такі двигуни знайдуть застосування як приводи точного позиціонування.

Планарний електростатичний мікродвигун з дванадцятьма полюсами статора ($n_1 = 12$) і вісьмома полюсами ротора ($n_2 = 8$) ілюструє рис. 14.15

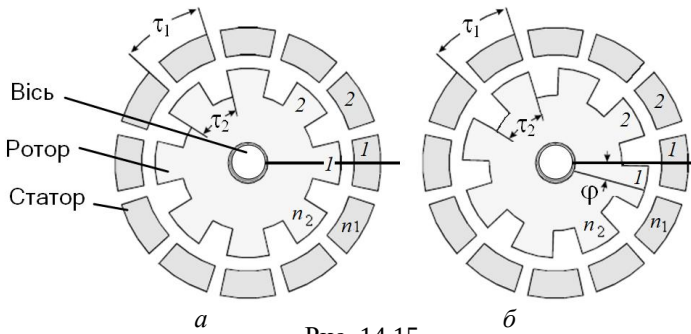


Рис. 14.15

Додатковими перевагами такого виду електростатичних мікродвигунів є простота конструкції і не дуже жорсткі вимоги до матеріалів деталей мікродвигуна.

Як структурний матеріал мікродвигунів використовуються здебільшого електропровідні матеріали.

Кутовий крок розміщення полюсів статора і ротора визначається (див. рис. 14.15, б) як

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{n_1}; \quad \tau_2 = \frac{2\pi}{n_2},$$

де τ_1, τ_2 – кутовий крок полюсів статора і ротора відповідно; n_1, n_2 – кількість полюсів на статорі та роторі відповідно.

Розглянемо роботу електростатичного мікродвигуна. Припустімо, що напруга прикладена до полюса статора 1 (рис. 14.15, а), тобто мікродвигун перебуває у відносній рівновазі. Якщо напруга буде прикладена до полюса 2 статора, то стан ротора зміниться так, що він займе нове положення відносно даного полюса, тобто обертальний момент, що діє на ротор, поверне його на деякий кут φ (рис. 14.15, б). Далі цикл повторюється.

Крок збільшення кута повороту ротора τ_s такого мікродвигуна може бути визначений за допомогою такого виразу:

$$\tau_s = \min(|\tau_1 - i\tau_2|) = \frac{2\pi}{n_1 n_2} \min(|n_1 - i n_2|), \quad i \in [0, n_2 - 1] \quad (14.1)$$

Якщо кількість полюсів статора змінюватиметься в діапазоні $j \in [0, q-1]$, де q – кількість фаз, то вираз (14.1) набуде такого вигляду:

$$\tau_s = \min(|j\tau_1 - i\tau_2|) = 2\pi \min\left(\left|\frac{j}{n_1} - \frac{i}{n_2}\right|\right) = \frac{2\pi}{n_1 n_2} \min(|jn_2 - in_1|),$$

$$i \in [0, n_2 - 1], \quad j \in [0, q - 1].$$

Кутову частоту планарного електростатичного двигуна можна визначити за допомогою виразу:

$$n = f \tau_s (2\pi)^{-1},$$

де f – частота перемикання фаз.

Обертальний момент, що діє на ротор мікродвигуна, можна описати у вигляді:

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta \phi} = 0,5 \frac{\Delta C}{\tau_s} U^2,$$

де ΔC – зміна ємності між статором і ротором; U – напруга між статором і ротором.

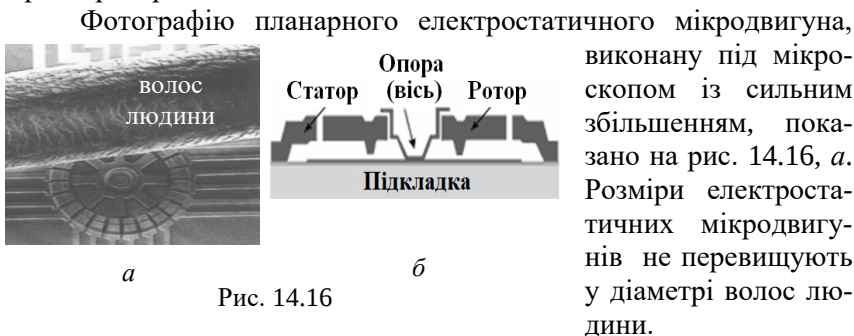


Рис. 14.16

Мікродвигуни виготовляють з використанням MUMPs-технології (рис. 14.16, б) шляхом осадження основи і жертвового шару, формування вихідного рисунка, витравлювання маски та жертвових шарів і звільнення ротора.

Мікродвигуни можуть бути монолітно інтегровані на одному кремнієвому кристалі з необхідними електронними компонентами схеми керування приводу, що містять генератори, подільники частоти, лічильники і транзистори.

Електростатичні діелектричні мікродвигуни

В електростатичних діелектричних мікродвигунах рух створюється шляхом електростатичного нахату (розпластування з прилипанням) тонкої металевої стрічки ротора на поверхню сегнетоелектричної плівки статора. Основним елементом такого двигуна є пелюсток-петля з гнучких і тонких провідних стрічок або металевих плівок. Товщина цих плівок повинна бути невеликою, така, щоб забезпечувався їх вигин під дією електричного поля в момент електростатичного нахату на поверхню діелектрика (сегнетоелектрика) ротора.

Пелюсток ротора, що переміщається у просторі під дією імпульсу електричного поля, згинається, відбувається його прилипання та натяг на поверхню діелектрика статора. Через натяг ротор переміщується відносно статора. Після припинення дії імпульсу електричного поля пелюсток повертається у вихідне положення.

Конструктивну схему сегнетоелектричного мікродвигуна показано рис. 14.17.

Статор мікродвигуна являє собою кремнієву підкладку 1, на поверхню якої нанесений шар металу 6 і сегнетоелектрична плівка 2. Ротор 4 у вигляді металевої гнучкої пластини (пелюстка)

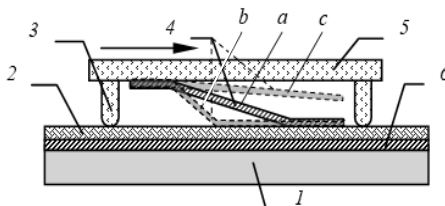


Рис. 14.17

переміщається відносно статора. Двигун працює в повітряному середовищі за нормального атмосферного тиску. Механічний контакт здійснюється за напрямними 3. При подачі імпульсу напруги між статором і ротором під дією електростатичних сил відбувається електростатичний накат гнучкого пелюстка ротора 4 (штрихпунктирне зображення пелюстка на рис. 14.17) на поверхню сегнетоелектрика, в результаті чого пелюстка згинається і передає імпульс руху скляній платформі 5.

Накат пелюстка починається з моменту його торкання поверхні сегнетоелектрика - "захоплення" пелюстка (положення *a* на рис. 14.17) і закінчується "електронним приклеюванням" пелюстка до поверхні (положення *b* на рис. 14.17).

Після припинення дії імпульсу напруги в розпластаній час-

тині пелюстка виникає протидія пружних сил локально деформованих ділянок пелюстка електростатичним, зумовленим залишковими зарядами в діелектрику. Пелюсток 4 відліпає від поверхні сегнетоелектрика і під дією пружних сил повертається у вихідне положення (положення c на рис. 14.17), при цьому платформа за інерцією просувається ще на деяку відстань. Із поданням другого імпульсу напруги процес поновлюється.

Планарні ємнісні мікродвигуни даного типу можуть забезпечити шлях переміщення 10 ... 40 мм; крок переміщення ротора 0,01 ... 10 мкм за частоти тактів керувальних імпульсів прямокутної форми 100 ... 10000 Гц і напруги до 100 В. Питома енергоємність планарних мікродвигунів досягає 1 Дж/м^3 , що значно перевищує енергоємність індуктивних і п'єзоелектричних аналогів.

12.3. Електромагнітні мікродвигуни

Мініатюризація істотно збільшує електростатичні сили конденсаторних елементів тому електростатичні пристрої, у тому числі і мікроскопічні електростатичні двигуни, стають ефективнішими від електромагнітних. Однак це не виключає використання електромагнітних двигунів у мікротехніці.

Більшість електромагнітних мікродвигунів є кроковими. Кроковий електродвигун – це синхронний електродвигун, що має на статорі явно виражені полюса з котушками обмоток керування. Струм, що подається в одну з обмоток статора, спричиняє поворот ротора з подальшою його фіксацією. Послідовна активація обмоток двигуна через подачу імпульсів напруги від, наприклад, електронного комутатора викликає дискретні кутові переміщення (кроки) ротора.

За конструкцією ротора виділяють такі основні різновиди крокових двигунів: активний з ротором на основі постійного магніту і реактивний, що має зубчасті ротор з магнітним якого матеріалу.

Активні крокові двигуни мають один істотний недолік: у них великий крок, який може досягати десятків градусів.

Відмітною особливістю *реактивного крокового двигуна* є наявність зубців на полюсах статора. Змінюючи кількість зубців на статорі та роторі, переходять до схеми *реактивного редукторного крокового двигуна*, який дозволяє редукувати частоту обертання ротора. Принцип дії редукторного крокової двигуна демонструється на рис 14.18. Через велику кількість зубців ротора Z_p кутовий крок редукторного двигуна стає значно меншим від кута повороту поля статора і може складати частки градуса.

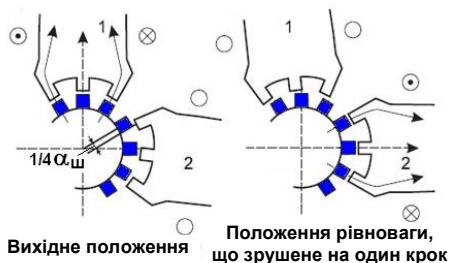


Рис. 14.18

Величина кутового кроку редукторного реактивного крокового двигуна визначиться виразом

$$\alpha_{\text{ш}} = \frac{360}{Z_p K_T},$$

де кількість тактів $K_T = m_k n_1 n_2$ залежить від числа обмоток керування (фаз статора) m_k . У виразі для K_T величини n_1 і n_2 слід брати рівними 1, вважаючи систему комутації симетричною ($n_1 = 1$) і однополярною ($n_2 = 1$).

Електромагнітні крокові мікродвигуни обертання

Конструкція електромагнітних крокових МЕМС двигунів обертання аналогічна конструкції електростатичних безконтактних двигунів з тією відмінністю, що в них використовується магнітна взаємодія (притягання / відштовхування) між котушками статора та ротором (рис. 14.19). Для того щоб керувати напрямком магнітних потоків, у котушки повинні бути інтегровані магнітнотіні серцевини.

Планарні крокові мікродвигуни мають кілька полюсів на статорі та ротор зубчастої форми з магнітнотіні матеріалу (намагніченість ротора відсутня). На рис. 14.19, а ротор має 10 зубців (полюсів), а статор має 6 полюсів з трьома незалежними обмотками, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора.

На рис. 14.19, б ротор крокового мікродвигуна має 50 зубців і 8 полюсів.

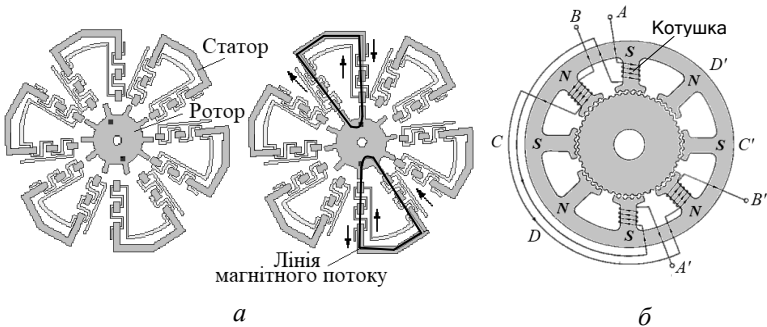


Рис. 14.19

Із подачею імпульсу постійного струму в одну з котушок статора (рис. 14.19, б) ротор прагне зайняти таке положення, коли різноименні полюси ротора і статора стають один навпроти одного. Як тільки ротор проходить першу намагнічену пару полюсів, імпульс струму подається на наступну пару. Для безперервного обертання потрібна безперервна подача імпульсів. На практиці полюси живляться багатофазною багатосхідчастою напругою для згладжування обертового поля. Швидкість обертання регулюється частотою імпульсів, а момент – струмом імпульсу. Конструкцію планарного крокового МЕМС-двигуна з великим збільшенням показано на рис. 14.20.

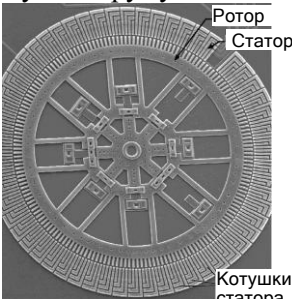


Рис. 14.20

У реальних системах потрібні додаткові елементи електроніки для здійснення процесу керування двигуном.

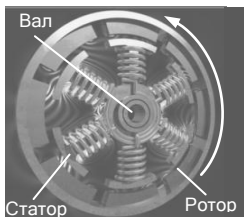


Рис. 14.21

Інша конфігурація електромагнітного крокового мікродвигуна являє собою двигун із зовнішнім ротором – «двигун навиворіт». Ротор такого мікродвигуна (рис. 14.21), що складається із 6 або 12 магнітних полюсних наконечників (з полімерних або спечених магнітів) обертається навколо закріпленого на валу багатополюсного статора з обмотками.

Послідовне ввімкнення полюсних наконечників статора забезпечує обертальний рух ротора з дискретними кроками зі швидкістю 20 об/хв.

Типові конструкції мікроелементів, що застосовуються в магнітних мікродвигунах із зовнішнім ротором показано на рис. 14.22. На роторі і статорі мікродвигуна видно зубці, які забезпечують більшу кількість еквівалентних полюсів, на відміну від основних полюсів, на яких розташовані обмотки, що підвищує точність позиціонування ротора. Крок зубців становить 100 мкм, а ширина – 33,3 мкм або 16,7 мкм, що відповідає (для діаметра ротора 8 мм) кутам одиночних поворотів на $0,64^\circ$ і $0,32^\circ$ відповідно.

Крім розглянутих можливі й інші конфігурації конструкцій електромагнітних крокових МЕМС-двигунів.

Синхронні мікродвигуни

Синхронний мікродвигун (рис. 14.23) складається зі статора (діаметром 1,0 ... 5,5 мм), що містить три плоскі двошарові спіралеподібні мікрокотушки. Кожна котушка підключається до мережі трифазного струму і утворює обертове магнітне поле.



Рис. 14.23

Ротор синхронного двигуна виготовляється з феромагнітних матеріалів, наприклад зі спечених магнітів (неодим-залізо-бор) або з полімерних магнітів і повинен мати явно виражені полюси з осьовими намагніченостями, що чергуються.

Обертове магнітне поле статора намагнічує ротор. При цьому створюється реактивний момент, який обертає ротор синхронно з

полем статора. Конфігурація котушок (три або шість фаз) і магнітів дозволяє синхронному мікродвигуну здійснювати до 7000 об/хв.

Температура нагрівання двигуна за максимального навантаження становить усього 32 °С, тому такі двигуни не потребують примусового охолодження. Обертальний момент двигунів з полімерними магнітами за навантаження 70 мА становить $\approx 1,2$ мкН·м, що на порядок менше ніж двигунів зі спеченими магнітами.

Лінійні магнітні мікродвигуни

Лінійний магнітний двигун – це електродвигун, статор магнітної системи якого розімкнутий і розгорнутий в лінійній площині (рис. 14.24), і тепер замість того, щоб виробляти обертальний момент він створює лінійну силу вздовж довжини статора, що забезпечує лінійне переміщення рухомої частини двигуна (колішнього ротора). Синхронні лінійні двигуни розпрямляються у версії синхронних двигунів з ротором на основі постійних магнітів.

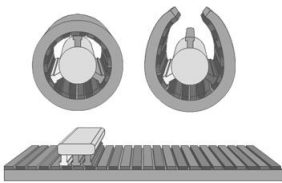


Рис. 14.24

Відзначимо, що активна частина лінійного двигуна має початок і кінець на відміну від традиційних двигунів, які забезпечують безперервний цикл обертання.

Лінійні двигуни генерують силу тільки в напрямку руху і прикладають її безпосередньо до навантаження, тому не потребують будь-якого проміжного механізму для перетворення обертального руху в поступальний. Лінійні магнітні двигуни здатні розвивати надзвичайно високу швидкість та прискорення і виконувати точне позиціонування.

Прикладом магнітного мікродвигуна такої конструкції може

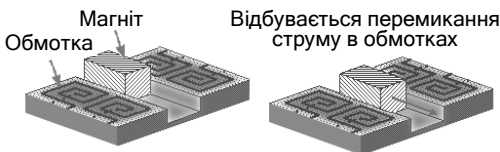


Рис. 14.25

служити лінійний двигун, показаний на рис. 14.25.

Бігунок, який містить постійні магніти з осью намагніченості, що чергуються, розташо-

вується в напрямному каналі статора і рухається по ньому при перемиканні струму в спіралеподібних обмотках керування, розташо-

ваних по обидва боки напрямного каналу статора. Крім постійних магнітів у конструкції бігунка можуть використовуватися полімерні або спечені магніти.

Варіант такого лінійного мікрокрокового двигуна був розроблений і успішно пройшов випробування в Гановерському університеті. MEMC-двигун розмірами 10×10 мм містить систему статора із шістьма котушками у формі меандру (прямокутної форми), намотаними навколо зубчастих магнітних полюсів, які, розмішуючись паралельно, створюють горизонтальний магнітний потік. Рухомий магнітний бігун гребінчастої форми рухається між полюсами статора з кроком 16,7 мкм, загальний хід двигуна становить 3,5 мм.

Сили тертя долаються пасивними магнітними силами, які зрушують бігун на невелику величину у вертикальному напрямку, створюючи ефект левітації (рис. 14.26).

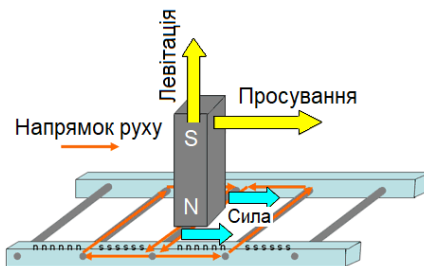


Рис. 14.26

Основний недолік такого лінійного магнітного мікродвигуна – це висока температура (близько 160°C), яка виникає через безперервне збудження статора (струм у котушках статора становить близько 2,5 А). Таким чином, двигун потребує безперервного активного охолодження.

Істотною проблемою, пов'язаною з магнітними мікродвигунами, це проблема виготовлення обмоток електромагніта. В основному магнітні MEMC-двигуни виготовляють з двовимірними обмотками, оскільки технологія виготовлення тривимірних мікрокошук досить складна.

14.4. Інші типи мікродвигунів

Мікрогазотурбінні та рідинно-реактивні двигуни

Дослідники США та Європи ведуть інтенсивні розробки мікрокошуків двигунів (MEMC турбін, поршневих мікродвигунів внутрішнього згорання, двигунів Ванкеля), які, використовуючи енергію вуглеводневого палива, могли б приводити в рух крихітні електрогенератори.

Піонерами розроблення MEMC-турбін вважаються Алан Епштейн та його колеги з Масачусетського технологічного інституту, які розробили мініатюрні газотурбінні двигуни для живлення портативної електроніки, побудували і випробували їх компоненти. Такий двигун легко вміщується на долоні.

MEMC-турбіна складається з мікрокомпресора (рис. 14.27,

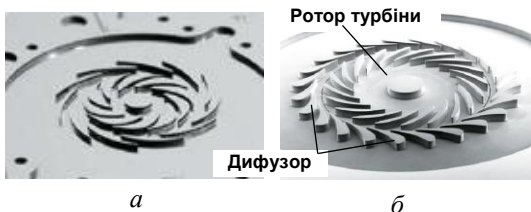


Рис. 14.27

а), камери згоряння з дифузором і ротора турбіни (рис. 14.27, б). Компресор і ротор розташовуються на загальній осі. На цій же осі може монтуватися (рис. 14.28) ротор однофазного генератора змінного струму (компресор на рис. 14.28 не показаний).

Повітря, що надходить усередину газотурбінного двигуна, стискається за допомогою обертових лопатей компресора. Потім стислий повітряний потік потрапляє в порожнину турбіни, яка одночасно є камерою згоряння, де змішується з розпиленим паливом і підпалюється. Частина повітря, що нагнітається компресором, спрямовується не в камеру згоряння, а в порожнині корпусу турбіни, забезпечуючи її охолодження.

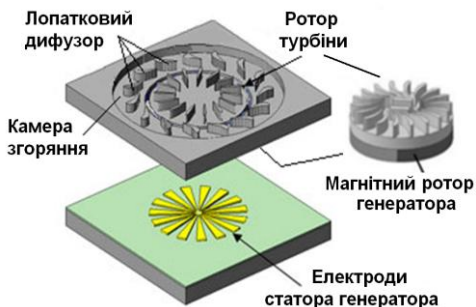


Рис. 14.28

Паливо в камеру згоряння вприскується через 90 абсолютно однакових отворів, що містяться в безпосередній близькості від впускних повітряних каналів. Таким чином, без додаткових систем змішування утворюється однорідна повітряно-паливна суміш.

Запалювання суміші здійснюється від нагрівального елемента. Температура згоряння суміші за рахунок прискорення теплових процесів у мікросистемах досягає температури плавлення сталі. Утворений вихлоп лопатковим дифузором камери згоряння спря-

мовується на лопаті ротора турбіни. Геометрична структура лопаток ротора і профіль дифузора багато в чому визначають ефективність газотурбінного МЕМС-двигуна. Ротор МЕМС-турбіни обертається зі швидкістю 20 тис. об/с. – у 100 разів швидше, ніж турбіна реактивного двигуна.

Конструктивно МЕМС-турбіни складаються з окремих кремнієвих пластин, накладених одна на одну (рис. 14.29), на яких за допомогою фотолітографії виготовляються деталі мікротурбіни.

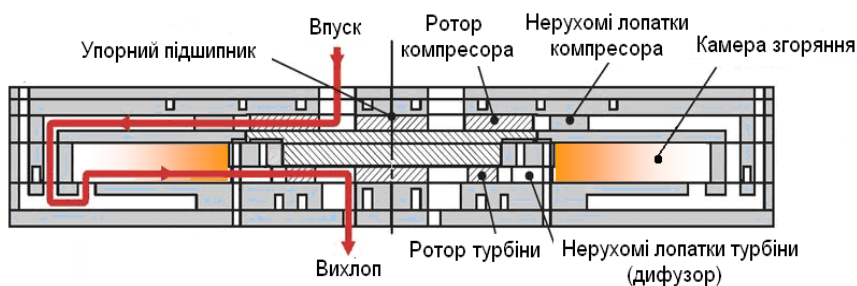


Рис. 14.29

Потім пластини прецизійно стикуються і склеюють під впливом високих температур. На одній стандартній пластині діаметром 300 мм одночасно формується безліч однакових компонентів. Кремнієву пластину із заготівками роторів турбіни показано на рис. 14.30. Щоб звільнити ротор, його витравлюють з обох боків: спочатку пластину обробляють окремо, а потім приклеюють її лицьовим боком до загального пакету і вже з іншого боку дотравлюють перемички. Готовий пристрій складається з п'яти-шести кремнієвих шарів.

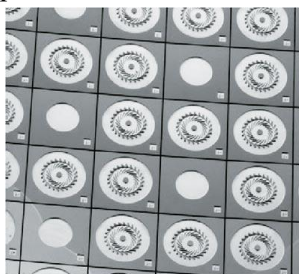


Рис. 14.30

Одним з перших застосувань газотурбінного мікродвигуна (мікро-ГТД) – його використання як джерела тяги мініатюрного БПЛА. В даному застосуванні основна частина енергії газоповітряної суміші, що розширюється, витрачається на прискорення газового потоку в соплі мікро-ГТД і створення реактивної тяги.

Одночасно розробляються технології виготовлення мікро-ГТД методами вдосконаленого газофазного осадження карбиду кремнію. Перехід на матеріал, який має істотно вищу жароміцність, повинен забезпечити можливість більш ефективно використовувати потенціал палива і досягати істотного поліпшення характеристик розроблюваної схеми мікро-ГТД.

Паралельно в межах проекту "*The MIT Microengine Project*" ведуться розробки мікро-рідинно-реактивних двигунів (мікро-



Рис. 14.31

РРД), що ґрунтуються, на тих же концептуальних і технологічних принципах, що і розробки мікро-ГТД. Демонстраційний варіант мікро-РРД (рис. 14.31), що має габаритні розміри $15 \times 7,5 \times 3$ мм і масу близько 1 г, повинен забезпечувати 15 Н тяги, витрачаючи 5 г/с палива (рідкого кисню і метанолу), за тиску в камері згоряння 125 атм. Паливо в камеру згоряння надходить з бічних стінок по системі зустрічних інжекторів (по 242 інжектори для пального і окиснювача). Двигун має систему охолодження камери і сопла; для охолодження використовується метанол.

Мікро-РРД виконаний на основі планарної структури за технологією іонного травлення на кремнієвій підкладці з монокристалічного кремнію. Шестишарову структуру і камеру згоряння мікро-РРД з інжекторами зображено на рис. 14.32, а; його зовнішній вигляд – на рис. 14.32 б; один з варіантів конструкції мікро-РРД – на рис. 14.32 в.

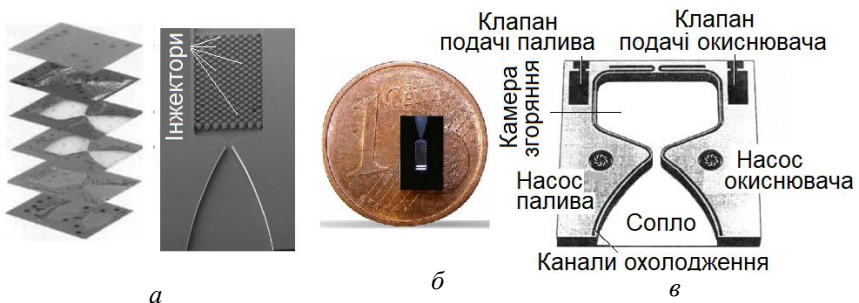


Рис. 14.32

Подальші дослідження ведуться у напрямку відпрацювання технологій жаростійких матеріалів і вдосконалення проточних частин плоских сопел (рис. 14.33), які можуть також застосовуватися у вузлах друкування струменевих принтерів, у мікронасосах тощо.

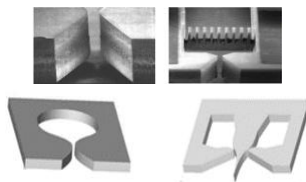


Рис. 14.33

Оригінальний нанодвигун класу реактивних двигунів був створений вченими Каліфорнійського університету в Сан-Дієго, США для мікроскопічних роботів (нанітів), що доставляють частинки лікарських засобів усередині живого організму (рис. 14.34, а). Молекулярний двигун наніта являє собою набір крихітних трубок довжиною 20 нм і діаметром 5 мкм, який закінчується реактивним соплом (рис. 14.34, б). Паливом для нанодви-

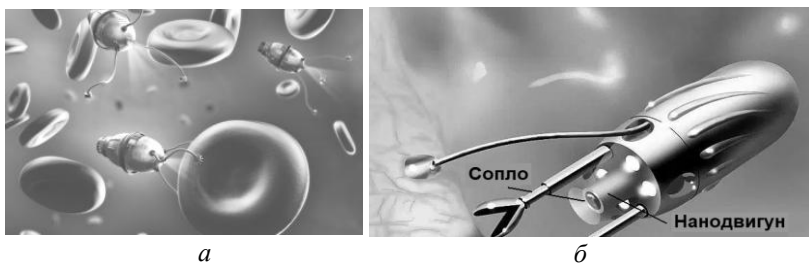


Рис. 14.34

гуна слугують бульбашки газу, що утворюються внаслідок хімічної реакції всередині шлунка живої істоти. Швидкість руху наніта всередині організму становить 60 мкм/с.

Поршневі двигуни внутрішнього згоряння

Роботи зі створення мікроскопічного поршневого двигуна внутрішнього згоряння ведуться в лабораторіях університетів Кембриджу і Бірмінгема. Проектуються двигуни з об'ємом камери згоряння порядку одного кубічного міліметра. Головні деталі мікродвигуна показані на рис. 14.35 (внизу – міліметрова лінійка).

Передусім потрібно відзначити, що деталі цих двигунів - плоскі. Ті ж поршні – це крихітні пластинки, виконані методом ультрафіолетової

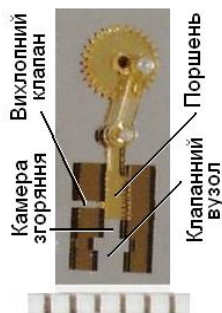


Рис.14.35

літографії. Є також розробки двоциліндрового мікродвигуна внутрішнього згоряння.

Поршні рухаються, будучи закритими з країв фігурною пластинною, яка відіграє роль корпусу, а зверху і знизу – такими ж плоскими кришками.



Рис. 14.36

Дослідний варіант MEMC-двигуна внутрішнього згоряння з габаритами $5 \times 15 \times 3$ мм і вихідною потужністю в 11,2 вата з частотою обертання колінчастого вала 50 тис. об/хв. показано на рис. 14.36.

MEMC-двигуни внутрішнього згоряння є дизелями. Тільки працюють вони не на солярці, а на метанолових сумішах (з додаванням водню), здатних самостійно спалахувати при такті стиснення.

Перші випробування таких двигунів виявили низку проблем. Наприклад, компоненти на базі кремнію погано поєднуються з високими температурами в зоні згоряння. Перехід на кераміку, на думку розробників, допоможе розв'язати цю проблему.

Інша проблема – це величезні тепловтрати через стінки. Для двигунів міліметрового розміру ці втрати виявляються значно більшими відносно енергії, одержуваної від згоряння палива, ніж для звичайних двигунів внутрішнього згоряння. Для скорочення втрат пропонується нарощувати частоту обертання валу, тобто скорочувати час робочого такту. Причому, для скорочення втрат у десять разів, потрібно і швидкість збільшувати вдсятеро.

MEMC-двигуни внутрішнього згоряння можуть використовуватися в мікроскопічних літальних апаратах, у плеєрах, ноутбуках і навіть в іграшках.

MEMC-двигуни Ванкеля

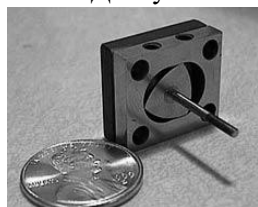


Рис. 14.37

Двигун Ванкеля, зокрема і мікродвигун Ванкеля (рис. 14.37), – це роторно-поршневий двигун внутрішнього згоряння, розроблений в 1957 році інженерами компанії NSU Феліксом Ванкелем в співавторстві з Вальтером Фроїде.

Особливість двигуна – застосування тригранного ротора (поршня), який має ви-

гляд трикутника Рело¹⁴, що обертається у середині циліндра спеціального профілю.

Кожна з вершин тригранного ротора робить рух за дальною¹⁵ поверхнею циліндра і відсікає змінні об'єми камер у циліндрі за допомогою трьох клапанів. При цьому в кожній порожнині двигуна, обмеженій однією зі сторін тригранного ротора і поверхнею циліндра послідовно відбуваються чотири такти роботи двигуна внутрішнього згоряння: впуск, стискання, випуск і випуск (рис. 14.38).

Над проектом створення MEMC двигуна Ванкеля працюють промислово-університетська дослідницька організація *Berkeley Sensor & Actuator Center* ситету Каліфорнії спільно з дослідним агентством Пентагону DARPA, а також ряд компаній США.

Уже створений цілий ряд MEMC двигунів Ванкеля з поперечником ротора всього 10 ... 20 мм і навіть – 1 ... 3 мм з вихідною потужністю відповідно 4...100 Вт і 0,026...0,03 Вт. Кінцева мета – створення мініатюрних пристроїв у габаритах звичних акумуляторів для стільникових телефонів, що включають в себе і запас палива (водень), і двигун внутрішнього згоряння, і генератор.

Ці незвичайні ванкелі призначені обертати генератори і давати струм для електронних приладів, різних датчиків, ноутбуків, телефонів, мікророботів та інших подібних електронних пристроїв

Масове виробництво роторів і корпусів MEMC двигунів Ванкеля базується на MUMPs-технологіях (рис. 14.39).

Продовжуються роботи з мініатюризації і підвищення технічних характеристик MEMC-двигунів Ванкеля.

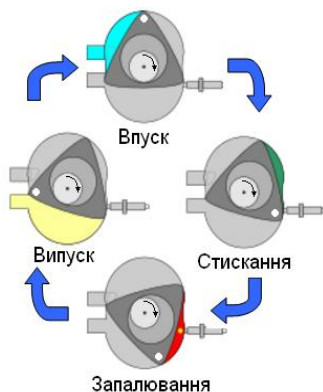


Рис. 14.38

¹⁴ Трикутник Рело є область перетину трьох рівних кіл з центрами в вершинах правильного трикутника і радіусами, рівними його стороні. Негладка замкнута крива, що обмежує цю фігуру, також називається трикутником Рело.

¹⁵ Епітрохіда – крива, що утворена точкою, жорстко пов'язаною з колом, яке котиться за зовнішньою стороною іншого кола

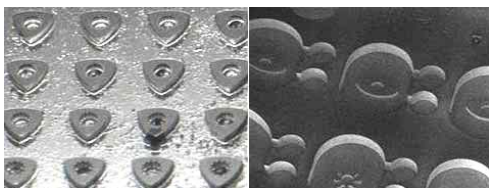


Рис. 14.39

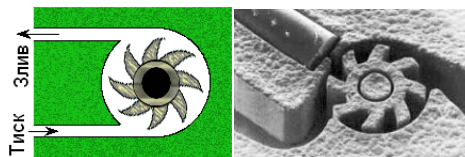
Наприклад японська фірма Casio в 2002 р. створила надмініатюрні паливні елементи для ноутбуків і фотокамер, які за габаритами і формами точно відповідають стандартним акумуляторам. Елементи

доповнені мініатюрними реформерами, які виробляють водень з метанолу.

Гідравлічні мікродвигуни

Гідродвигуни призначені для перетворення гідравлічної енергії в механічну. Незважаючи на проблеми пов'язані з порушеннями герметичності (витоками) і самоблокуваннями (проблема багатьох рідинних мікросистем), гідравлічні мікродвигуни мають значний потенціал.

Гідравлічні мікродвигуни в основному є гідромоторами обертального руху (рис. 14.40, а). Робоча рідина під тиском по дуже вузьких трубках через регульовальну апаратуру надходить у гідравлічний мікродвигун, де гідравлічна енергія перетворюється в механічну енергію обертання мікротурбіни. Гідравлічна енергія або створюється внутрішніми мікронасосами, або надходить від зовнішнього джерела. Після виконання роботи робоча рідина по гідролінії повертається або в бак зовнішнього джерела, або безпосередньо у насос.



а)

Рис. 14.40

б)

У виробництві мікротурбін (рис. 14.40, б) для гідравлічних мікродвигунів в основному використовується LIGA технологія.

Гідравлічні мікродвигуни можуть забезпечувати енергією, наприклад, різальні хірургічні мікроінструменти.

Електротеплові мікродвигуни

Принцип роботи електротеплових мікродвигунів, як і термоактуаторів ґрунтується на тепловому розширенні структурних матеріалів елементів двигуна.

Механічна сила, що розвивається тепловим мікродвигуном термоактюатором, залежить від механічних характеристик від коефіцієнта теплового розширення, модуля поздовжньої пружності і від геометричних розмірів робочого тіла мікродвигуна.

В електротепловому мікродвигуні (рис. 14.41, *а*) використовуються об'єднання Т-подібних термоактюаторів (рис. 14.41, *б*). Теплові мікродвигуни мають значну інерційність і низьку енергетичну ефективність (нижче 5%). Проте відомі приклади їх використання для керування мікродзеркалами.

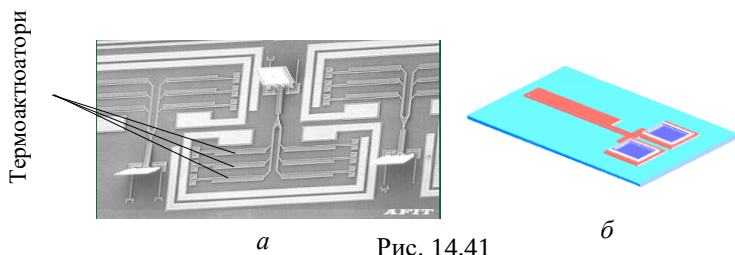


Рис. 14.41

Відомі експериментальні зразки електротеплових мікродвигунів у вигляді матриць багат шарових плівкових електротеплових консолей, середній металевий шар яких є нагрівальним елементом. Однак передавання енергії від вихідної ланки мікродвигуна (матриці теплових консолей, що розташована на нерухомій пластині) до переміщуваного елемента здійснюється досить неефективно.

Досліджувався також електротепловий реактивний двигун резистивного типу, який використовує як ракетне паливо газ, що нагрівається терморезистором. Під час нагрівання газ розширюється і виходить через сопло, створюючи тягу двигуна. Недоліками такого реактивного двигуна – знову ж мала ефективність, обмеження температури нагрівання та потужності імпульсів при створенні тяги.

Основний практичний інтерес до електротеплового мікродвигуна пов'язаний з можливістю використання низьких напруг електроживлення (нижчих за 10 В) за значних струмах споживання (5...50 мА).

Мікродвигуни на основі ефекту «пам'яті форми»

Матеріали з ефектом пам'яті форми є прототипами так званих «інтелектуальних» матеріалів майбутнього. «Інтелектуальні» матеріали, крім звичайних, для металів механічних властивостей мають додаткові функціональні властивості, до яких належить і ефект пам'яті форми.

Ефект пам'яті форми – це фізичне явище, за якого пластично деформований матеріал відновлює (зазвичай при нагріванні) свою первісну форму. Ефект пам'яті форми ілюструє рис. 14.42.



Рис. 14.42

Ефект пам'яті форми може бути заданий, наприклад, прутку спеціального металу за високої температури. Після охолодження прутки з високотемпературного стану, названого аустенітним, переходить в охолоджений стан, названий мартенситним. Різниця цих двох станів полягає у відмінності кристалічних решіток матеріалу, при цьому обидва стану стабільні при відповідних температурах.

У мартенситному стані 1 пруток легко може деформуватися (положення 2). Якщо після деформації прутки нагріти, тобто перевести в аустенітний стан 3, то він «згадає» і відновить свій первісний стан 4, даний йому за високої температури. При цьому вся пластична деформація зникає. Одночасно пруток може зробити якусь механічну роботу, наприклад, підняти вантаж або привести в дію вихідну ланку механічного пристрою.

Такий процес називається прямим і зворотним мартенситним перетворенням матеріалу під час термоцикування, тобто під час охолодження і нагрівання матеріалу. Ефект пам'яті форми може бути закладений в технічні пристрої, наприклад, у МЕМС-приводи, здатні розвивати порівняно великі зусилля і моменти.

Ефект «пам'яті форми» притаманний сплавам на основі Ni–Ti, Pt–Ti, Pt–Ga, Pt–Al.

Особливістю виконавчих елементів зі сплавів з пам'яттю є їх мініатюрність. Це зумовлено простотою механізму їх дії, а також тим, що елемент складається з одного сплаву. На роботу таких ви-

конавчих механізмів не впливає середовище або атмосфера, а впливає лише температура. Отже, можлива робота цих елементів в таких середовищах, як вакуум або вода, при цьому немає потреби в герметизованому вузлі, як, наприклад, для забезпеченні роботи в таких середовищах двигунів інших принципів дії.

Рис. 14.43 демонструє МЕМС-затискач з пальцями на основі двостороннього ефекту пам'яті форми. Плоска за кімнатної температури структура пальців з Ti-Ni/Si після нагрівання до температури мартенситного перетворення згинається, у результаті чого відбувається захоплення мікрооб'єкта. Відпускання об'єкта може бути реалізований або через зменшення температури, або за рахунок подальшого збільшення температури, щоб викликати поступове відкриття затискача.

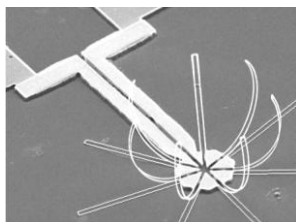


Рис. 14.43

Матеріали з ефектом пам'яті форми можуть застосовуватися в теплових двигунах, що використовують, наприклад, різницю температур гарячої та холодної води. Принцип дії двигуна Гінеля з кривошипно-шатунним механізмом на основі сплавів з пам'яттю форми ілюструє рис. 14.44.

Двигун приводиться в обертання за допомогою шести спіралей зі сплаву Ti-Ni. Осі робочого колеса і кривошипного вала зміщені одна відносно одної. Подовження та скорочення спіралей залежно від різниці температур гарячого та холодного середовищ, що становить 10... 20 °С, діють так само, як зворотно-поступальний рух поршня у звичайних кривошипно-шатунних механізмах, викликаючи обертання робочого колеса.

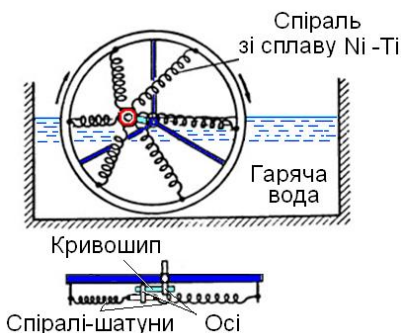


Рис. 14.44

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Із яких п'єзоактуаторів складається базова конструкція лінійного крокового п'єзодвигуна і які п'єзоелементи використовуються в конструкції п'єзоприводи *NEXLINE* компанії *Physik Instrumente*?
2. На чому ґрунтується принцип роботи роторних п'єзоелектричних мікродвигунів?
3. Який принцип роботи п'єзоелектричних інерційних двигунів «stick-slip»?
4. Якого типу механічні рухи виникають у резонансних п'єзодвигунах при подачі напруги на пластини п'єзокераміки металевої муфти, у яку закручений ходовий гвинт?
5. До якого класу двигунів належать електростатичні двигуни обертового руху?
6. За рахунок чого здійснюється мікрорух в електростатичних діелектричних мікродвигунах?
7. Як з збільшенням розмірів змінюється ефективність електромагнітних МЕМС-двигунів?
8. До якого класу двигунів належать більшість електромагнітних мікродвигунів?
9. Яка відмітна особливість статора реактивного електромагнітного крокового мікродвигуна?
10. Яка конфігурація електромагнітного крокового мікродвигуна із зовнішнім ротором?
11. Який принцип роботи синхронного електромагнітного мікродвигуна? Що являє собою його статор?
12. Що являє собою лінійний магнітний мікродвигун?
13. З яких основних елементів складається мікро-ГТД?
14. Які ще мікродвигуни працюють на вуглеводневому паливі, крім мікро-ГТД, ви знаєте?
15. Який тип руху створюють гідравлічні мікродвигуни і звідки вони беруть гідравлічну енергію?
16. На чому ґрунтується принцип роботи електротеплових мікродвигунів?
17. Що таке ефект пам'яті форми?

Розділ 15. Механічні мікропередачі

Для передавання і перетворення механічної енергії від енергетичної машини до виконавчого пристрою слугують механізми передач. Енергії може передаватися зі зміною або без зміни виду (обертання – обертання; обертання – лінійне переміщення або навпаки), швидкості та напрямку руху. Перетворення крутного моменту є найважливішим принципом механіки, використовуваним у вузлах, пристроях і системах мехатроніки. Цей принцип використовується і в багатьох мікромеханічних системах, що дозволяє знизити вимоги до потужності двигуна або до джерела живлення MEMC-двигуна.

15.1. Механічні зубчасті мікропередачі

Зубчаста передача – це механізм або частина механізму механічної передачі, до складу якого входять зубчасті колеса. Основні переваги зубчастих передач – це компактність, точність передавальних відносин, великі швидкості обертання і найбільший ККД. Недоліків зубчастих мікропередач – складність передавання руху на значні відстані.

У мікропередачах MEMC в основному використовуються (рис. 15.1 а) прямозубі з циліндричними колесами і рейкові мікродуктори. Механізми зчеплення мають ті самі профіль зуба і площинну орієнтацію, що і мікродвигун. Щоб утримувати шестерні в площині, використовують спеціальні зати-

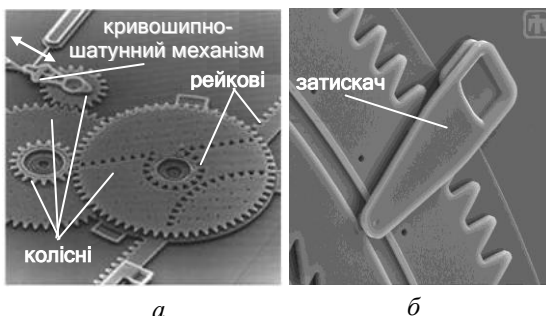


Рис. 15.1

скачі (рис. 15.1, б). Для отримання великих передавальних чисел використовують механізми зчеплення з каскадним з'єднанням зубчастих коліс. Якщо співвідношення передач в редукторі-перетворювачі 10:1, то для виконання роботи на одну умовну одиницю можна використовувати двигун в одну десяту потужності. Ці переваги в повному обсязі застосовують у MEMC. Наприклад, кре-

мнієві механізми площею меншою за 1 мм^2 , що приводяться в дію мікродвигуном і забезпечують перетворення крутного моменту в співвідношенні $3 \cdot 10^6 : 1$, можуть здійснювати регульовальні та прецизійні переміщення вузлів на $0,08 \text{ нм}$.

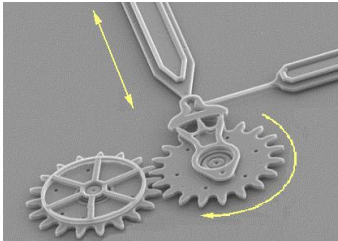


Рис. 15.2

Мікроредуктор, зображений на рис. 15.1, а, працює від зворотно-поступальних рухів лінійного МЕМС-двигуна (на рисунку не показано), які перетворюються в обертальні рухи за допомогою кривошипно-шатунного механізму (рис. 15.2).

Цикли роботи кривошипно-шатунного мікромеханізму показано на рис. 15.3.

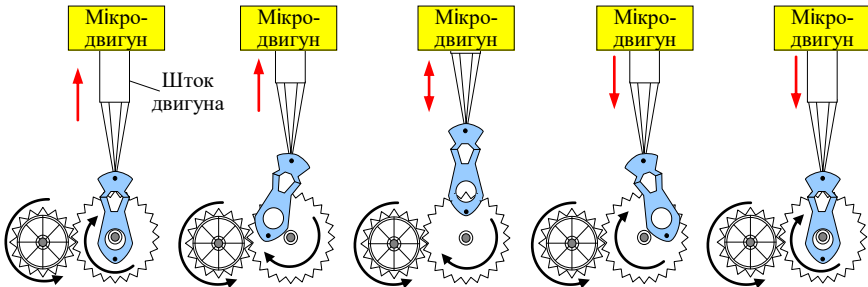


Рис. 15.3

Однією з проблем, які необхідно враховувати під час виготовлення зубчастих мікропередач, є близькість характерних розмірів структурних складових матеріалу деталей передач, самих деталей і шарів вологи, що адсорбовані їх поверхнею. Наприклад, модуль зачеплення надмініатюрних зубчастих коліс ($40 \dots 100 \text{ мкм}$) набуває таких самих розмірів, що і розміри надмолекулярних структур¹⁶ зміцнених композиційних матеріалів, які використовуються для виготовлення зазначених деталей.

¹⁶ Фізична структура полімерних тіл, що обумовлена різними видами упорядкування макромолекул

15.2. Механічні ланцюгові мікропередачі

Ланцюгова передача, використовуючи сили зачеплення, реалізовує передавання механічної енергії за допомогою гнучкого елемента – ланцюга. Ланцюгова передача складається з ведучої та ведених зірочок і ланцюга. Ланцюг складається з рухомих ланок (рис. 15.4, *а*). У замкнуте кільце кінці ланцюга з'єднуються за допомогою спеціальної розбірної ланки.

Порівняно із зубчастими передачами ланцюгові передачі менш чутливі до неточностей розташування валів, ударних навантажень, допускають майже необмежені міжцентрові відстані, забезпечують більш просте компонування, велику рухливість валів відносно один одного.

Мікроланцюг дуже нагадує велосипедний ланцюг – за винятком розмірів. Так у зубчастих мікропередачах відстань між центрами ланки ланцюга (рис. 15.4, *а*) становить близько 50 мкм. Для порівняння варто зазначити, що діаметр людської волосини становить близько 70 мкм, тому кожна ланка може комфортно розміститися на кінці такої волосини.

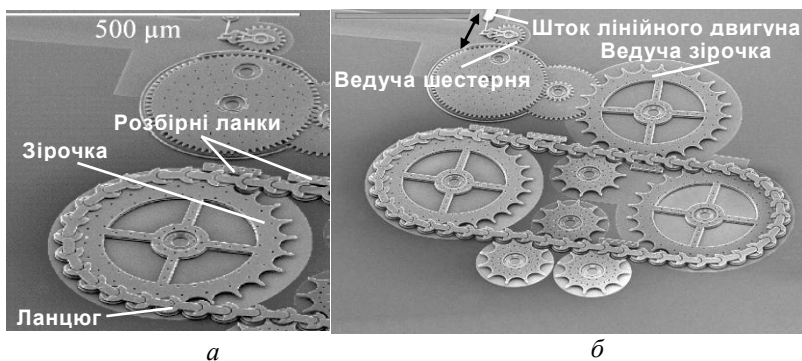


Рис. 15.4

Оскільки один мікроланцюг може обертати кілька привідних валів (рис. 15.4, *б*), то з'являється можливість рознести мікромеханічні елементи, які приводяться в обертання в просторі, тобто стає непотрібним розміщувати їх у безпосередній близькості від МЕМС-двигунів з ведучою шестернею, створюючи таким чином складні об'ємні структури.

15.3. Механічні фрикційні мікропередачі

У фрикційних передачах рух від однієї ланки мікропередачі до іншої передається за рахунок тертя між робочими поверхнями елементів мікропередачі. Наприклад, у п'єзоелектричних двигунах для передавання руху від п'єзоелемента до вихідної ланки використовуються саме фрикційні передачі. Такий спосіб передавання руху розглядався у підрозділі 14.1 під час аналізу принципу роботи крокового п'єзоприводу NEXLINE компанії *Physik Instrumente*. У фрикційних передачах для створення сил тертя-зчеплення обов'язковим є наявність натискних пристроїв. Саме тому вони набули поширення в п'єзоелектричних приводах, здатних розвивати достатні зусилля. Для приводів іншого типу необхідно до складу фрикційних передач уводити спеціальні натискні пристрої.

15.4. Важільні мікропередачі

До механічних пристроїв MEMC виставляють досить високі вимоги з ефективного прикладання сили. Якщо у процесі виготовлення за MEMC-технологіями двигуна зміщення його вихідної ланки є недостатнім, а сили, що розвиваються приводом, вистачає з надлишком, то необхідно під час виготовлення приводу використовувати мікроважелі – механічні вузли зі зміщеною точкою опори у напрямку прикладання сили. Тим самим забезпечується збільшення зміщення вихідної ланки, але при цьому потрібна більша витрата сили двигуна.

Може виникнути і зворотне завдання – збільшити силу, що розвивається вихідною ланкою приводу, за рахунок зменшеного переміщення вихідної ланки. Відомі конструкції мікроважелів забезпечують вигравш в силі до 20: 1. Механічні вузли зі зміщенням – мікроважелі створюються під конкретне технічне або топологічне завдання, що вирішується MEMC, але при цьому потерпає уніфікація.

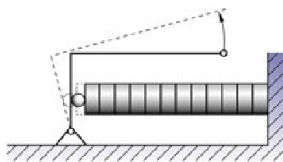


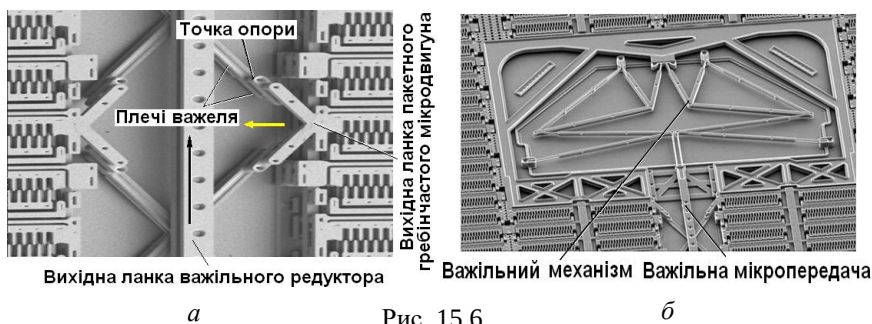
Рис. 15.5

Приклад простого важільного підсилювача переміщення блокового п'єзоелектричного актюатора наведено на рис. 15.5. Підсилювач забезпечує збільшене переміщення вихідної ланки для субнанометричного зсуву п'єзоелектричного актюатора. Головна

вимога до такої важільної системи – це відсутність холостого ходу і тертя, а також достатня жорсткість важільних мікроелементів. Зазвичай елементи мікроважелів виготовляються на основі багатошарового полікремнію товщиною 2 мкм.

П'єзоактюатори з інтегрованими важільними підсилювачами переміщення мають свої переваги і недоліки. Переваги: збільшений хід і компактність порівнянно з пакетними актюаторами, які мають подібний хід, а також зменшене значення струму. Знижена жорсткість і більш низька резонансна частота є недоліками такої конструкції.

Зовнішній вигляд конструкції і принцип дії електростатичного виконавчого приводу з важільними мікропередачами показано на фотографіях, отриманих за допомогою сканувального електронного мікроскопа (рис. 15.6).



Привід сформований на основі пакетів гребінчастих ємнісних мікродвигунів. Керувальна напруга, що прикладається до електростатичних гребінчастих мікродвигунів, викликає мікронні зміщення вихідної ланки досить потужного пакетного двигуна (рис. 15.6, а). Важільна мікропередача перетворює ці мікроскопічні зміщення у значні переміщення вихідної ланки важільного MEMC-редуктора. Вихідна ланка редуктора з'єднана (рис. 15.6, б) з ще одним важільним механізмом, який трансформує горизонтальне рух приводу у вертикальне переміщення піднімального механізму. Такі структури використовують для керування мікродзеркалами, які змінюють напрямок променів світла в оптичних системах.

15.5. Додаткові пристрої в мікропередачах

Пристрої фіксації (мікроблокатори) використовуються для переривання доступу до інших елементів МЕМС з метою їх активації. Як і багато механізмів мікро-блокатори активуються спеціальними сигналами (у тому числі цифровим кодом), які за допомогою традиційних МЕМС-актюаторів переміщують елементи пристроїв фіксації.

Прикладами таких механізмів є (рис. 15.7): кремнієві шпилькові замки 1, клямка-гачки 2, захоплювачі 3, зубці-фіксатори в кодовому замку 4.

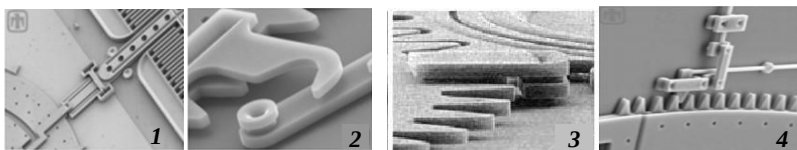


Рис. 15.7

У цих механізмах використано принцип жорсткого блокування переміщень елементів. Мікроблокатори реалізуються в трьох обертових рівнях, виконаних у шарах полікремнію. Кожен такий рівень містить у собі самостійну механічну конструкцію, керовану індивідуально.

Інші пристрої мікропередач – це **пристрої антиреверсу** або **храповики**. Це зубчасті механізми, які дозволяють осі шестерні мікропередачі обертатися в одному напрямку і не дозволяє обертатися в іншому. Варіанти реалізації МЕМС храповиків показано на рис. 15.8.

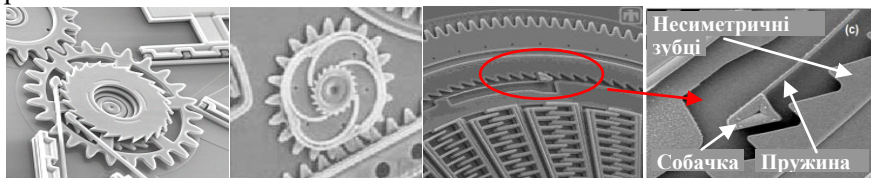


Рис. 15.8

Храповик зазвичай має форму зубчастого колеса з несиметричними зубами, що мають з одного боку упор. Рух колеса у зворотний бік обмежується собачкою, яка притискається до колеса пружиною.

Муфти зчеплення. Муфти зчеплення мікромеханізмів так само, як і «макропристроїв» призначені для безпосереднього кінематичного та силового зв'язку між частинами апаратів або вузлів. Вони також використовуються для включення та виключення виконавчих механізмів працюючого приводу.

Гальмівні п'єзозатискачі 1 у конструкції лінійного крокового п'єзодвигуна (рис. 15.9) фактично являють собою муфти зчеплення, що передають переміщення ходового двигуна 2 вихідній ланці 3.

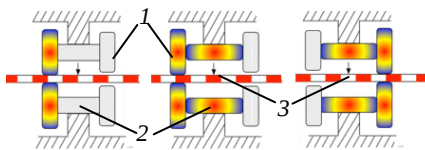


Рис. 15.9

Ще один варіант муфти зчеплення чимось нагадує задні гальмівні колодки автомобіля. Керовані термоактуаторами «колодки» мікромеханічної термомуфти зчеплення (рис. 15.10) притискаються до вібрувальної пластини, що приводиться в рух п'єзоприводом, і зупиняють її.

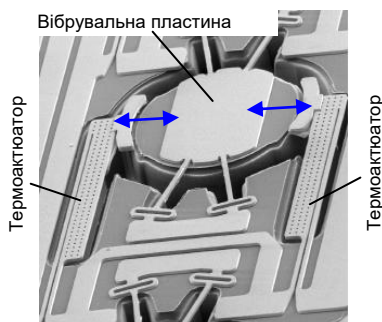


Рис. 15.10

Таку технологію передбачають використовувати в тактильних дисплеях, які складаються з масиву пікселів, вібрації яких збуджуються механічними п'єзомеханізмами і сприймаються кінчиками пальців. Вібрація вибірових пікселів вмикається і вимикається за допомогою пари мікроскопічних термомуфт зчеплення.

МЕМС-муфта зчеплення на основі пристрою антиреверсу, за допомогою якої коливально-обертальні рухи електростатичного гребінчастого мікродвигуна перетворюються в одностороннє обертання ведучої шестірні демонструє рис. 15.11.

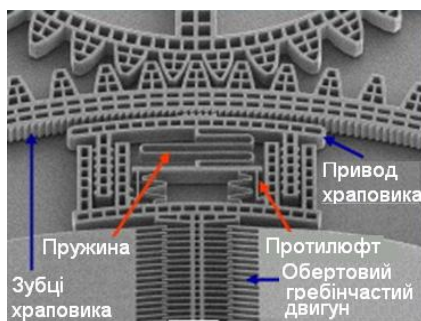


Рис. 15.11

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Для чого призначені механізми передач?
2. Який найважливіший принцип механіки використовується у вузлах, пристроях і системах мехатроніки?
3. Які основні переваги зубчастих передач?
4. Які недоліки зубчастих мікропередач?
5. Які мікроредуктори в основному використовуються в зубчастих мікропередачах МЕМС?
6. Які механізми зчеплення використовують для отримання великих передавальних чисел?
7. Який механізм перетворює зворотно-поступальні рухи лінійного МЕМС-двигуна в обертові рухи?
8. Із яких елементів складається ланцюгова передача?
9. Які переваги мають ланцюгові передачі порівняно із зубчастими?
10. За рахунок чого передається рух від однієї ланки до іншого у фрикційних мікропередачах?
11. У яких приводах набули найбільшого поширення фрикційні мікропередачі?
12. Що є недоліками конструкції п'єзоактуаторів з важільними підсилювачами переміщення?
13. Яке призначення пристроїв фіксації (мікроблокаторів) у мікропередачах?
14. Яке призначення храповиків у мікропередачах?
15. Для чого використовуються муфти зчеплення в мікропередачах?
16. Що являють собою гальмівні п'єзозатискачі в конструкції лінійного крокового п'єзодвигуна з точки зору пристроїв мікропередач?

Розділ 16. Технологічні мікросистеми

16.1 Мікронасоси

За принципом функціонування мікронасоси поділяють на два класи. До першого класу належать немеханічні мікронасоси (що не містять рухомих мікромеханічних частин). Цей клас включає мікронасоси на основі електрогідродинамічного, електроосмотичного і ультразвукового ефектів. До другого класу, найпоширенішого, належать механічні мікронасоси, які містять рухомі мікромеханічні частини з активними та пасивними клапанами.

16.1.1. Немеханічні мікронасоси

Найбільшого поширення, в класі немеханічних мікронасосів набули *електрогідродинамічні мікронасоси* – інжекційного, індукційного та осмотичного типу.

Принцип роботи *інжекційного* електрогідродинамічного насоса ґрунтується на переміщенні рідини в результаті взаємодії зовнішнього електричного поля з електричними зарядами, диполями або частинками, уведеними в діелектричну рідину. Конструкція насоса являє собою дві системи електродів сітчастої структури, які розміщені один над одним і контактують з діелектричною рідиною (рис. 16.1). Заряди можуть бути введені в рідину за допомогою процесів польової емісії або польової іонізації. Електричне поле утворюється між парою електродів – емітером і колектором. Кулонівські сили, створювані зовнішнім електричним полем, діють на заряди у рідині. Завдяки наявності в'язких сил іони, що рухаються до колектора, захоплюють із собою робочу рідину, створюючи ефект інжекційного перекачування.

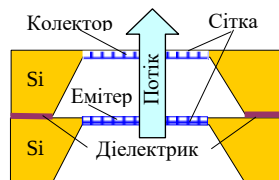


Рис. 16.1

Робота *індукційних* електрогідродинамічних насосів (рис. 16.2) ґрунтується на взаємодії біжучої електричної хвилі з диполями у рідині. Через релаксаційні процеси¹⁷ диполі не встигають переорієнтуватися у напрямку електричного поля і тому переміща-

¹⁷ Процес встановлення термодинамічної, а отже, і статистичної рівноваги у фізичній системі, що складається з великої кількості частинок.

ються внаслідок дії кулонівських сил у напрямку або протилежно напрямку руху біжучої електричної хвилі. Переміщуючись, диполі захоплюють із собою решту рідини.

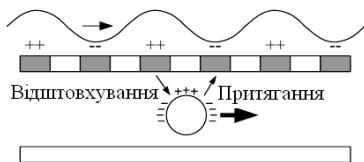


Рис. 16.2

Перебудова роботи електрогідродинамічного мікронасоса полягає тільки в додатку до структур зворотної напруги. За допомогою

електрогідродинамічних мікронасосів можна перекачувати різні масла та полярні рідини, молекули яких притягуються одна до одної (етилловий і метиловий спирти, ацетон, фреон) і безліч інших непровідних рідин з питомим опором $10^{10} \dots 10^{14}$ (Ом·см). Звичайну воду таким шляхом перекачувати не можна, оскільки під впливом електричних полів у ній починається електроліз. Можливими застосуваннями цього класу мікронасосів є мініатюрні системи охолодження електронних компонентів, що ґрунтуються на використанні етилового та метилового спиртів.

Принцип роботи *електроосмотичних мікронасосів* базується на феномені електроосмосу. Електроосмос – це рух рідини через систему пористих діафрагм (осмосів) або капілярів у твердому тілі, який відбувається під впливом електричного поля, прикладеного до такої системи, тобто якщо до двох боків пористої діафрагми (капілярів), яка розділяє два об'єми рідини, прикладається різниця потенціалів, то поряд з протіканням електричного струму виникає електроосмотичне перенесення рідини через діафрагму (капіляри). Доведено, що такий феномен має величезну практичну цінність для застосувань у мікропотоках рідини.

Через надтонкі канали дуже складно організовувати течії, наприклад створювати перепад тисків, який повинен бути досить потужним. При цьому середня швидкість течії буде пропорційною квадрату величини поперечного розміру каналу. Проте якщо замінити перепад тисків електричним полем від невеликої батарейки, то у надтонкому каналі можна створити швидку електроосмотичну течію. Характерною особливістю таких течій є плоский профіль швидкості рідини: вона тече єдиним фронтом без максимуму швидкості в середині каналу, до того ж швидкість течії майже не залежить від розміру каналу. Крім того, завдяки відсутності рухомих

деталей мікронасоси, що ґрунтуються на електроосмосі, надійні і прості в обслуговуванні.

Коли полярна рідина, наприклад вода, і тверде тіло мікроканалу, наприклад скло, починають контактувати (рис. 16.3), поверхня каналу набуває електричного заряду, який впливає на розподіл заряду в рідині. На стінках каналу адсорбується тонкий шар іонів, заряд якого компенсує заряд стінки каналу. Однак через броунівський рух іонів у рідині цей шар розмивається до характерної товщини, яка помітно більша, ніж розмір одного іона. Такий шар називають дифузним шаром. Характерна величина λ_D – десятки нанометрів.

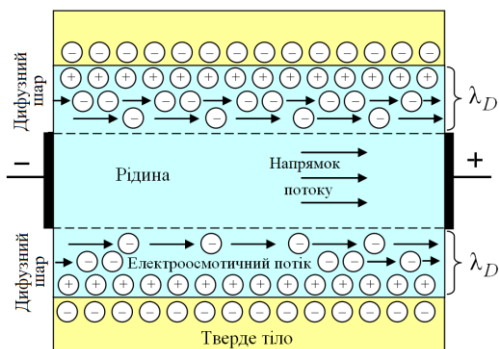


Рис. 16.3

В основі роботи електроосмотичного насоса (рис. 16.3) лежить той факт, що дифузний шар можна привести в рух, якщо прикласти зовнішнє електричне поле вздовж стінки каналу. В'язка рідина буде пошарово розганятися в межах дифузного шару, а потім почне захоплювати за собою навіть ту частину рідини, яка не заряджена. Швидкість електроосмотичної течії пропорційна величині електричного поля і густини заряду поверхні та обернено пропорційна в'язкості рідини та товщині дифузного шару. Елементарний електроосмотичний насос складається із в'язки надтонких капілярів, вбудованих в єдиний широкий канал.

Ще один тип мікронасоса, але для газів, який належить до **насосів Кнудсена** (рис. 16.4) був розроблений вченими з Мічиганського університету.

Ключовим елементом нового насоса є пластини з мінералу клиноптілоліту (різновид цеоліту), який має величезну кількість мікроскопічних пор. Між двома такими пластинами розміщений тонкий гнучкий нагрівник.

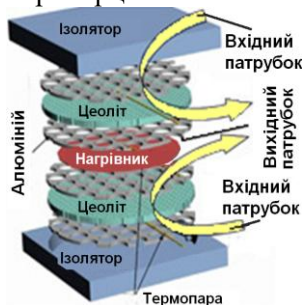


Рис. 16

Усі три шари прокладені перфорованими алюмінієвими пластинами (для більш рівномірного розподілу тепла) і закриті ізоляторами з термопластичного полімеру.

Цей пристрій працює за рахунок різниці тисків між порізному нагрітими частинками газу. Різниця тисків створюється за рахунок теплового потоку транспірації – дрейфу молекул газу від холодного кінця надтонкого (в цьому пристрої – 0,5 нм) каналу до гарячого. Потік транспірації активується градієнтом температури патрубків насоса – вхідних (із зовнішнього боку цеолітних пластин) і вихідного (у центрі поруч з нагрівником). Домінуюча взаємодія молекул зі стінками пор вузьких каналів набагато інтенсивніша, ніж молекул газу між собою (довжина вільного пробігу молекул тут набагато більша за геометричні розміри каналів), що в умовах градієнта температури, підштовхує молекули газу від холодного патрубка до гарячого.

Натепер пошук нових новаторських підходів до розроблення немеханічних мікронасосів триває. Однак дуже часто в мікросистемах доцільніше застосовувати механічні мікронасоси, які містять рухомі деталі. При цьому використовуються мініатюрні реалізації традиційних конструкцій насосів з механічним контактом рідини та виконавчого пристрою.

16.1.2. Механічні мікронасоси

Механічні мікронасоси з активними клапанами. Як активісційний механізм у механічних мікронасосах з активними клапанами використовуються п'єзоелектричні або термопневматичні актюатори.

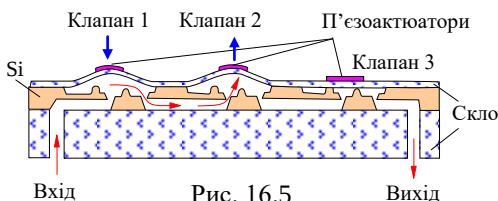


Рис. 16.5

Мікронасоси такого виду (рис. 16.5) містять кілька активних клапанів, розташованих послідовно один за одним.

Під час вмикання актюатора першого активного клапана, відбувається деформація мембрани, що приводить до відкриття першого клапана. Рідина зі входу мікронасоса через відкритий перший клапан надходить на вхід другого активного клапана. Вимкнення актюатора першого клапана відбувається одночасно з умиканням

актюатора другого клапана. Коли другий клапан відкривається, рідина надходить на вхід третього клапана. Потім одночасно відкриваються перший і третій клапани і закривається другий. Рідина зі входу третього клапана потрапляє на вихід мікронасоса, а рідина зі входу мікронасоса надходить на вхід другого активного клапана. Далі цикл повторюється.

Перевагою механічних мікронасосів з активними клапанами є те, що вони дозволяють перекачувати рідину в обох напрямках без зміни конструкції. Перебудова роботи мікронасоса полягає тільки в зворотній послідовності вмикання актюаторів активних клапанів.

Механічні мікронасоси з пасивними клапанами. Поршневий механічний мікронасос з пасивними клапанами містить робочу область; керовані вигинисті мембрани, які відіграють роль поршнів; вхідний і вихідний клапани, керовані потоком рідини. У п'єзоелектричних насосах як мембрани можуть використовуватися вигинисті п'єзокерамічні актюатори. Це може бути комбінація двох п'єзокерамічних дисків (дисковий біморф) або п'єзокерамічного і металевого дисків. Принцип роботи найпростішого п'єзоелектричного насоса показано на рис. 16.6.

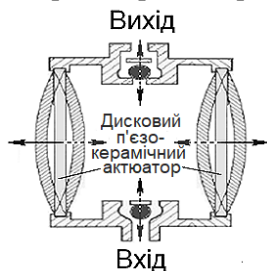


Рис. 16.6

За принципом дії використовуваного актюатора поршневий механічний мікронасоси поділяють на електростатичні, п'єзоелектричні (рис. 16.7, а), магнітні та термопневматичні (рис. 16.7, б).

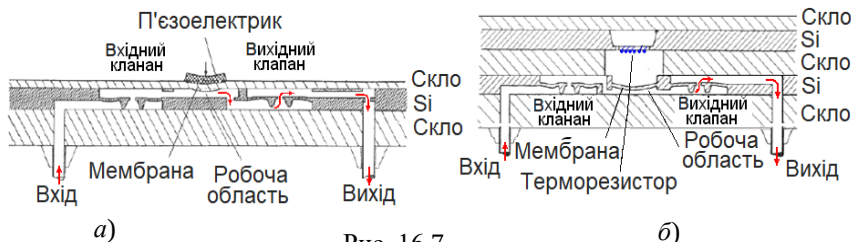


Рис. 16.7

Із увімкненням актюатора деформується рухома мембрана, що, в свою чергу, приводить до зміни об'єму робочої області мікронасоса. Унаслідок виникає різниця тисків рідин у робочій облас-

ті, на вході та виході мікронасоса. Під впливом рідини, яка міститься в робочій області, вхідний клапан закривається, а вихідний – відкривається. При цьому надлишкова рідина видаляється з робочої області мікронасоса через вихідний клапан. Тиск рідини в робочій області, на вході та виході мікронасоса вирівнюються.

Після вимикання актюатора рухома мембрана повертається у вихідне положення і об'єм робочої області мікронасоса відновлюється. У результаті знову виникає різниця тисків рідин у робочій області, на вході та виході мікронасоса. Під впливом рідини, яка міститься на вході мікронасоса, вхідний клапан відкривається, а під впливом рідини на виході мікронасоса вихідний клапан закривається. Робоча область заповнюється рідиною через вхідний клапан.

Поршневі механічні мікронасоси – насоси з пасивними клапанами набули більшого поширення, ніж мікронасоси з активними клапанами, оскільки вони дають змогу перекачувати більший об'єм рідини. Для додаткового збільшення об'ємів рідини мікронасоси

виготовляють з декількома робочими областями.

Конструкцію двокамерного механічного мікронасоса з п'єзоелектричною активацією показано на рис. 16.8.



Рис. 16.8

Відцентрові мікронасоси. У відцентрових насосах перекачується рідина і створюється необхідний тиск за рахунок відцентрової сили, яка виникає від дії лопатей робочого колеса на рідину. Відцентрові мікронасоси конструктивно схожі на турбінні гідравлічні мікродвигуни і майже завжди взаємно оборотні, тобто двигун може працювати в режимі насоса, а насос – у режимі двигуна. Такі насоси відрізняються від поршневих тим, що як робочий орган у них використовується турбінне колесо.

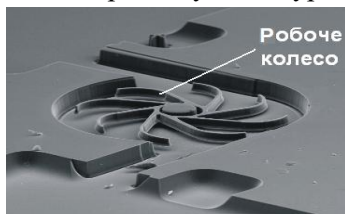


Рис. 16.9

Конструкцію відцентрового МЕМС-насоса, лопати робочого колеса (турбіни) якого відігнуті від радіального напрямку в бік, протилежний напрямку обертання турбіни демонструє рис. 16.9. Рідина під час роботи насосів такого типу надходить

до робочого колеса вздовж осі його обертання і під дією відцентрової сили відкидатися від центра колеса до периферії. У наслідок цього в центральній частині колеса створюється розрідження, а на периферії підвищується тиск. А якщо підвищується тиск, то рідина з насоса починає надходити в напірний трубопровід. Тоді всередині корпусу насоса утворюється розрідження, під дією якого рідина одночасно починає надходити в насос з усмоктувального трубопроводу. Таким чином, відбувається безперервне перекачування рідини відцентровим насосом з усмоктувального трубопроводу в напірний.

Вихрові насоси. Вихрові насоси належать до насосів інерції і тертя. Конструкцію вихрового мікронасоса, що приводиться в обертання синхронним мікродвигуном показано на рис. 16.10. Робоче колесо насоса поєднане з ротором синхронного двигуна, виготовленого з полімерних магнітів з явно вираженими полюсами. Статор двигуна, який одночасно є дном насосної камери, містить три двошарові спіралеподібні мікрокотушки, що підключаються до мережі трифазного струму.

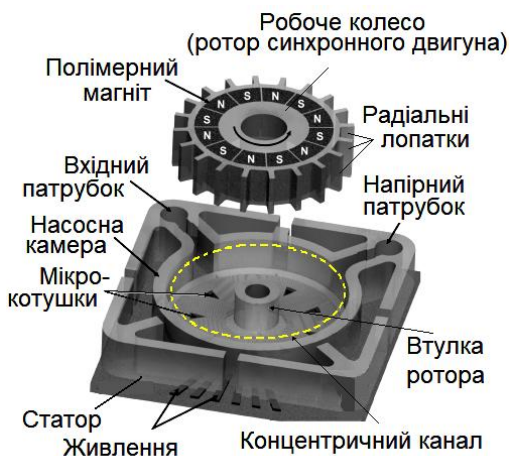


Рис. 16. 10

Робоче колесо насоса з радіальними лопатками, поміщається в циліндричну насосну камеру, при цьому стінки камери і торцеві поверхні лопаток утворюють концентричний канал, який з'єднує вхідний та напірний патрубки насоса.

Принцип дії таких насосів ґрунтується на неодноразовому проходженні рідини через міжлопатеві канали робочого колеса завдяки наявності кільцевого каналу, оточуючого колесо. Рідина, яка надходить в робоче колесо, захоплюється лопатками і, як у відцентровому насосі, відкидається до периферії в кільцевий канал, з якого знову надходить в міжлопатевий простір. За один оберт робочого колеса частки рідини неодноразово захоплюються лопатками та

викидаються в кільцевий канал. Унаслідок цього на шляху від вхідного патрубку в кільцевий канал і до виходу в напірний патрубок рідина багаторазово одержує приріст енергії при проходженні через міжлопатеві простори робочого колеса. Завдяки цьому вихрові насоси розвивають за одного і того ж діаметра робочого колеса напір значно більший ніж відцентрові насоси. Однак ККД вихрових насосів не перевищує 45%.

Шестеренні насоси. Одну з типових схем об'ємного мікронасоса – шестеренного показано на рис. 16.11, а. Насос являє собою дві шестерні, що перебувають у зачепленні. Шестерні розташовані в корпусі насоса з малими зазорами. Одна з шестерень – ведуча, друга – ведена.

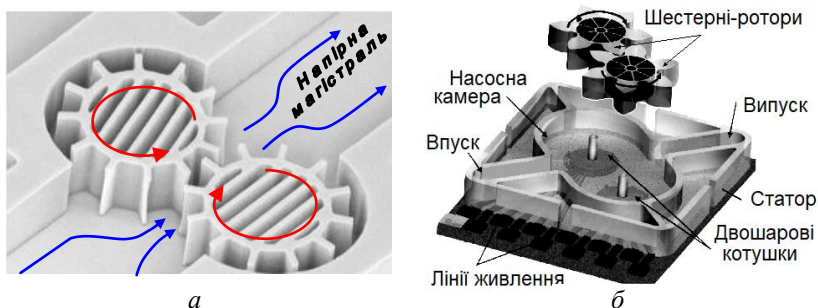


Рис. 16.11

Міжзубні западини і зубці шестерень утворюють робочі камери, об'єм яких збільшується при виході зубців із зачеплення і зменшується при вході в зачеплення. Під час обертання шестерень рідина з усмоктувальної магістралі заповнює міжзубні западини і переноситься обома шестернями в зону входу зубців у зачеплення. Там рідина ізолюється від всмоктувальної магістралі, а потім витісняється зубцями в напірну магістраль.

Конструктивно шестеренний MEMC насос (рис. 16.11, б) мало чим відрізняється від вихрового мікронасоса (див. рис. 16.10).

Натепер не існує інтегральних конструкцій механічних мікронасосів. Окремі частини мікронасосів виготовляють на різних підкладках за допомогою технології об'ємного мікрооброблення або LIGA технології. Потім виготовлені частини складаються за допомогою операції мікроскладання.

У макромасштабах насоси на основі механічних систем досить вигідні і економічні, але в міру зменшення розмірів їх економічність падає, оскільки помітно змінюється співвідношення об'єму деталей до їх площі, а отже, і відносні втрати на тертя. Тому пошук новітніх підходів до розроблення MEMC-насосів триває.

16.2. Мікромеханічні ключі та комутатори

Високочастотні мікромеханічні ключі (RF MEMS) – сегмент ринку, що виник недавно. Застосування RF MEMS значні й охоплюють всі типи бездротової комунікації, стільниковий зв'язок, радари, промислові, оборонні, космічні, телекомунікаційні системи, комп'ютерну периферію, медичні прилади тощо.

Найважливіший напрям розвитку цього сегмента ринку – тенденція до повного заміщення дискретних напівпровідникових компонентів і механічних перемикачів компонентами MEMC. Переваги RF MEMS об'єднують типову для MEMC надійність, можливість інтеграції на одному кристалі мікромеханічні ключі з іншою електронікою, низькі втрати, що вносяться на комутаторах, високу лінійність, мале енергоспоживання, низьку ціну, велике відношення вхідного опору до вихідного опору, широкі можливості налаштування для підвищення пристосованості і реконфігурації системи. Наприклад, RF MEMS перемикачі, демонструючи надійність, здійснювали понад 100 мільярдів циклів перемикань.

Мікромеханічні ключі (рис. 16.12) виготовляються за допомогою технології поверхневого мікрооброблення, що, у свою чергу, дозволить інтегрально виготовляти їх в одному технологічному процесі разом з елементами інтегральних схем.

RF MEMS здатні виконувати ті самі функції, що і механічні або електромагнітні реле, але виготовлені вони в мікромініатюрному форматі за допомогою технологій мікрооброблення, вирізняються високою швидкістю перемикання і високою надійністю.

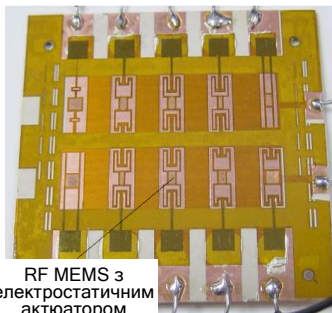


Рис. 16.12

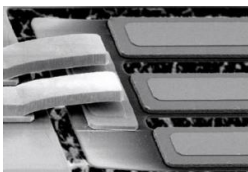


Рис. 16.3

Частіше мікромеханічні ключі будуються на основі електростатичних актюаторів, але, крім електростатичного типу збудження, можливі також магнітне, теплове, п'єзоелектричне (рис. 16.13). Перевага мікромеханічних ключів з електростатичною активацією полягає у відсутності споживання струму, а недолік – у високій напрузі спрацьовування (5 ... 100 В). Ключі з таким видом активації застосовують у мікросистемах, для яких важливим фактором є низька споживана потужність.

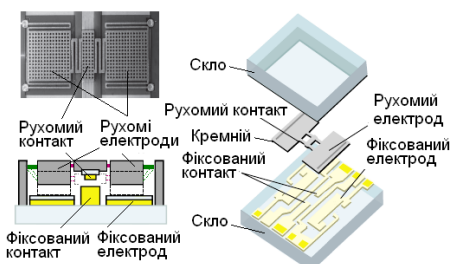


Рис. 16.14

Конструкцію і структуру мікромеханічного ключа виробництва компанії *Omron* показано на рис. 16.14. У конструкції ключів *Omron* під час прикладання напруги між фіксованими і рухомими електродами пружна мембрана з рухомими електродами і контактом згинається, і рухомий контакт торкається фіксованого контакту (ключ переводиться у стан «Вкл»).

Після зняття прикладеної напруги відбувається повернення пружної мембрани в вихідне положення – стан «Викл».

У компанії *Omron* досягли цього за рахунок геометрії контактів і застосування власних сплавів. Рухоме контактне складання з оригінального матеріалу розміщується між двома шарами скла. Донний шар скла має доріжки для стаціонарних контактів і електростатичного приводу, що притягує рухомий контакт. Верхній шар скляного ковпачка закриває кристал, два кристали з'єднуються і корпусуються разом у кінцевому продукті.

Ключі компанії *Omron* розраховані на 100 млн робочих циклів і були протестовані протягом 1 млрд циклів.

Більшість мікромеханічних ключів з електростатичною активацією у ролі рухомого елемента містить консольну балку. Структуру такого мікромеханічного ключа компанії *Radant MEMS* показано на рис. 16.15, а, мікрофотографію консольної балки і мікро-

фотографію деталі контакту ключа ще з більшим збільшенням – на рис. 16.15, б.

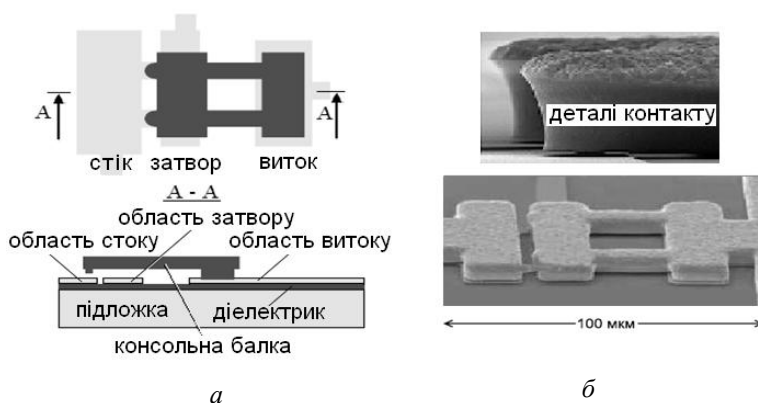


Рис. 16.15

Ділянка, до якої безпосередньо приєднана консольна балка, називають витоком (рис. 16.15, а). Ділянка, що розташована під консольною балкою і яка використовується для створення електростатичної сили, називають затвором (ділянка електростатичного актюатора). Ділянку, з якої відбувається механічний контакт консольної балки під час її відхилення від вихідного положення під дією електростатичної сили, називають ділянкою стоку.

Мікромеханічний ключ може працювати в інверсному і нормальному режимах.

В *інверсному режимі* роботи ділянка витоку підключена до шини живлення, а ділянка стоку – до шини нульового потенціалу. За відсутності відхильної напруги між ділянкою затвора і консольною балкою, з'єднаною з ділянкою витоку, виникає електростатична сила, яка притягує консольну балку до затвора. Це призводить до виникнення електричного контакту між витоком і стоком – мікромеханічний ключ замкнутий. Із поданням відхильної напруги на затвор і консольну балку, остання повертається у вихідне положення. Мікромеханічний ключ переходить у розімкнутий стан.

У *нормальному режимі* роботи ділянка стоку підключена до шини живлення, а ділянка витоку – до шини нульового потенціалу. За відсутності відхильної напруги між ділянкою затвора і консольною балкою, остання перебуває у вихідному положенні й електри-

чний контакт «витік – стік» відсутній. Мікромеханічний ключ перебуває у розімкнутому стані. Із поданням відхильної напруги на ділянку затвору відносно консольної балки між ними виникає електростатична сила.

Коли прикладена напруга досягає граничного значення вмикання, консольна балка притягується до нижніх електродів. Це призводить до виникнення електричного контакту між витком і стоком. Мікромеханічний ключ замикається. Зі зменшенням відхильної напруги до деякого граничного значення вимкнення консольна балка повертається у вихідне положення. Мікромеханічний ключ розмикається.

Оцінюючи мікромеханічні ключі, розглядають багато технічних параметрів. Найістотніші з них такі:

Тривалість перехідних процесів. Тривалість перехідних процесів залежить від швидкості зміни стану ключа. Для операції вмикання вона визначається як час наростання вихідного сигналу з 10% до 90% від його значення, а для операції вимикання – як час спаду вихідного сигналу з рівня 90% до рівня 10%.

Для простого механічного ключа цей час визначається від моменту відриву рухомого контакту від одного стаціонарного контакту до моменту його дотику з іншим стаціонарним контактом.

Час перемикання. Цей час визначається швидкістю перемикання ключа з одного стану в інший. У випадку операції вмикання цей час визначається від моменту досягнення керуючою напругою рівня 50% до моменту переходу вихідним сигналом рівня 90%. Аналогічно, у випадку вимкнення ключа час вимірюється до моменту досягнення сигналом 10% рівня від початкового значення. Отже, час перемикання характеризує реакцію ключа на зміну керувальної напруги. Механічні ключі мають меншу швидкодію, ніж електронні; їх швидкість перемикання лежить в діапазоні від мікросекунд до мілісекунд залежно від матеріалу та конструкції.

Напруга спрацьовування. Для всіх ключів, що працюють в автоматичних системах, необхідний сигнал керування, що координує їх стан (вмикання/вимикання). Рівень напруги таких сигналів для різних ключів може сильно відрізнятись. У сучасних електромеханічних ключах цю напругу бажано знизити до рівня, на якому працюють інші компоненти схеми.

Незважаючи на те, що багато мікромеханічних ключів мають відмінні електричні характеристики, у них дуже низька швидкодія. Звичайно час перемикання таких ключів становить 2...50 мс, і вони розраховані тільки на кілька мільйонів перемикань. Це зумовлено тим, що електромеханічні ключі здійснюють реальний розрив і з'єднання лінії передавання усередині пристрою. Максимальна швидкодія таких ключів (їх швидкість перемикання) визначається механічною резонансною частотою рухомих частин.

16.3. Мікродзеркала

Рухомі мікродзеркала знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах (як оптичні ключі) та системах аналізу й оброблення зображень (для відхилення лазерного променя та/або світлового потоку).

Структуру відхильного мікродзеркала, виготовленого за допомогою технології об'ємного мікрооброблення, показано на рис. 16.16

Для відхилення структури мікродзеркала використовують два електростатичні актюатори, створювані двома електродами, розташованими під структурою мікродзеркала. Структуру мікродзеркала заземляють і на керувальні електроди поперемінно подають напругу. Між структурою мікродзеркала та керувальними електродами виникає електростатична сила, яка відхиляє мікродзеркало то в один, то в інший бік. Рух мікродзеркала здійснюється за рахунок кручення торсіонних балок. Для повороту дзеркала можна використовувати й інші типи актюаторів.

Поворотні мікродзеркала широко застосовують в проекторах і телевізорах високої роздільної здатності, які використовують технологію цифрового оброблення світла – DLP (Digital Light Processing). Основа будь-якої проєкційної системи DLP типу – оптична напівпровідникова мікросхема, відома також як DMD (цифровий мікродзеркальний чип) (рис. 16.17) – найскладні-



Рис. 16.16



Рис. 16.17

ший в світі оптичний перемикач (тут дзеркало, як і будь-який цифровий сигнал, має тільки два стани: «0» і «1»). Мікросхема складається з двох мільйонів збудованих у формі прямокутника мікроскопічних дзеркал, які змінюють



Рис. 16.18

своє положення відносно джерела світла. Кожне таке мікродзеркало розміром не більше однієї п'ятої товщини людської волосини, і кожен з мільйонів використовуваних в мікродзеркальній матриці елементів сформований, як показаний на рис. 16.18 оптичний перемикач.

В одному з двох положень дзеркальце відбиває світло, що потрапляє на нього, на лінзу і далі на екран, у другому положенні – на-

прямає світловий потік убік уловлювача. У першому випадку на екрані з'являється біла точка, у другому – чорна. Якщо на вхід DMD чипа подати цифровий відеосигнал, то в результаті злагодженої дії всієї матриці можна проектувати на екран або другу поверхню відеофільми та графічні зображення, які складаються з двох кольорів: чорного та білого.

Для формування півтонів застосовується дизерінг - перемикання мікродзеркала з одного стану в інший з великою частотою. Таким чином, відбувається дозування необхідної кількості світла; чим довше мікродзеркало перебуватиме у «ввімкненому» стані, тим світліший відтінок буде відображений даним пікселем. Використовуючи дизерінг, за допомогою DMD-матриці можна форму-

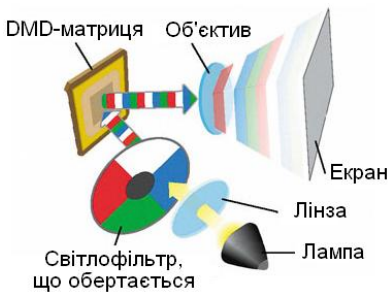


Рис. 16.19

вати монохромне напівтонування. Для створення кольорового зображення, у DLP-проекторів на базі однієї DMD-матриці застосовують світлофільтр, який обертається з високою швидкістю (рис. 16.19). Коло світлофільтра розділено на кілька секторів, кожен з яких пропускає лише певну спек-

тральну складову – червону, зелену або синю. Таким чином, у кожен момент часу DMD-матриця дозволяє формувати зображення одного з кольірних шарів – субкадр. Послідовне чергування субкадрів з високою частотою створює ілюзію повнокольорової картинки. У сучасних моделях частота обертання світлофільтра досягає 11 тис. об./хв.

Мікродзеркальна матриця – окремий випадок оптичних МЕМС. Існують й інші мікросистеми, що працюють зі світлом. Наприклад, в астрономії є досить важливе завдання боротьби зі спотвореннями, що виникають під час проходження світла крізь атмосферу. Така ж проблема актуальна і для мікроскопії.

Ще один приклад використання мікродзеркал як перемикачів – це комутація оптоволоконних мереж. Перемикач використовують у волоконних кільцевих мережах, щоб вилучити несправні комп’ютерні вузли та підвищити надійність мережі, а також як оптичний комутатор реконфігурованих оптоволоконних телекомунікаційних мереж (рис. 16.20).

Оптичний комутатор являє собою рухоме, кероване електромагнітним актюатором мікродзеркало (рис. 16.24 *а*), розташоване між торцями оптичних волокон (рис. 16.24 *б*).

За соті частинки секунди лінійне переміщення актюатора,

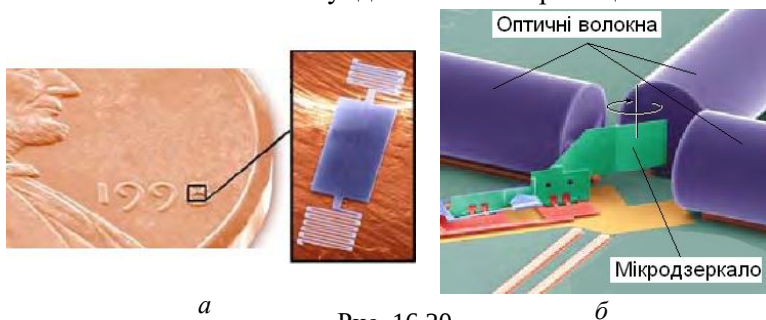


Рис. 16.20

який має довжину всього 300 мк, викликає поворот дзеркала, переводячи тим самим промінь світла з одного оптоволоконна в інше.

Як дзеркало використовується покрита золотом полікремнієва пластина. Відбивна здатність дзеркала становить близько 93%. У такій конструкції перемикача критичним моментом є вирівнювання волокон відносно дзеркала і відносно один одного.

Оптомеханічні перемикачі мають низку переваг перед звичайними хвилеводними перемикачами. За їх допомогою можна домогтися дуже низьких унесених втрат і перехресних завад. Для виготовлення оптомеханічних перемикачів використовують методи об'ємного мікрооброблення і скріплення пластин.

Мікродзеркала можна також використовувати як відбивачі і як елементи систем сканування. Кероване мікродзеркало сканера напрямляє відбитий промінь на потрібний об'єкт. Для сканування променя застосовують теплові та електростатичні актюатори.

Конструкцію 2D-сканера, реалізовану за MUMPS-технологією показано на рис. 16.21. Сканер являє собою рамку, до якої за допомогою торсіонів прикріплюється дзеркало розміром 400×400 мкм. Рамка у процесі самоскладання за допомогою електростатичних актюаторів піднімається над поверхнею підкладки на висоту 70 мкм і фіксується в такому положенні.



Рис. 16.21

Для приладів, які вимагають від дзеркал максимально можливого відбиття та малого рівня розсіювання, наприклад в лазерних пристроях, розроблені діелектричні мікродзеркала. Діелектричне дзеркало – дзеркало, відбивні властивості якого формують завдяки покриттю з декількох тонких шарів з різних діелектричних матеріалів. За належного вибору матеріалів шарів певної товщини можна створити оптичні покриття з необхідним відбиттям на обраній довжині хвилі. Діелектричні дзеркала можуть забезпечувати дуже великі коефіцієнти відбиття (супердзеркала), які забезпечують відбиття понад 0,99999 падаючого випромінювання. Такі дзеркала також можуть забезпечити чітке відображення в широкому діапазоні довжин хвиль, наприклад у всьому видимому діапазоні спектра. Діелектричні дзеркала, завдяки розвиненій технології, яка зробила їх виробництво відносно недорогим, майже витіснили в науці та техніці дзеркала з металевим покриттям. Прикладами використання діелектричних дзеркал є резонатори лазерів, тонкоплівкові подільники, інтерферометри. Крім

того, пара тонкоплівкових дзеркал, що напиляні на одній і тій самій підкладці, можуть використовуватися як спектральні фільтри. Дзеркала мають велику стійкість до впливу інтенсивних потоків оптичного випромінювання, що важливо для потужних лазерів, у яких на дзеркалах зосереджується величезна оптична щільність випромінювання.

Виробництво діелектричних дзеркал ґрунтується на різних методах нанесення тонких плівок. Найпоширенішими є методи хімічного парофазного осадження, яке здійснюється у високовакуумних камерах за допомогою щільних високоенергетичних електронних або іонних пучків (іонне осадження). Діелектричне мікродзеркало, діаметром близько 13 мкм, вирізане з більшої підкладки показано на рис. 16.22. Зображення отримано за допомогою електронного мікроскопа. На нижньому краї дзеркала добре видно шари Ta_2O_5 і SiO_2 , що чергуються. Хімічне осадження здійснюється за допомогою молекулярно-променевої епітаксії.

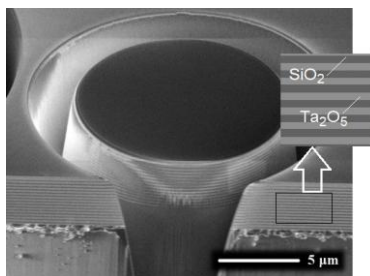


Рис. 16.22

16.4. Мікроінструменти та пристрої

Медичні мікроінструменти. Останнім часом у галузях науково-технічної діяльності людства, особливо, в медицині дедалі ширше використовують МЕМС, зокрема, мікромеханічні сенсори тиску, вібрації, високоточні хімічні сенсори, мікроінструменти та інші мікро- і наноконструкції. Так, на рис. 16.23 демонструється МЕМС-інжектор для генетичної модифікації хромосом клітин, який утримує полімерну сферу розміром із зиготи (запліднена яйцеклітина) миші.

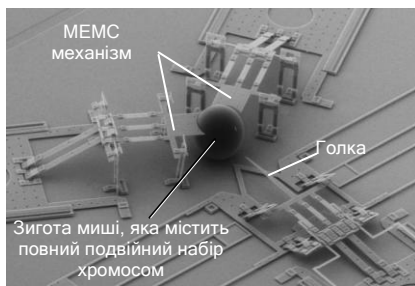


Рис. 16.23

Мільйони мікродатчиків тиску вбудовують в медичне обладнання, яке використовується для моніторингу кров'яного тиску, виявлення ознак життя і аналізу крові. МЕМС знаходять застосування і в медичних інструментах. Так, у хірургів з'явилися мініатюрні затискачі (рис. 16.24, *а*), надмініатюрні медичні фрези (рис. 16.24, *б*), щипці для мікрохірургії ока (рис. 16.24, *в*). Розміри головки щипців – близько $1,5 \times 1,5$ мм. Товщина губ – кілька десятків мікронів. До речі, людська волосина для таких щипців занадто товста.

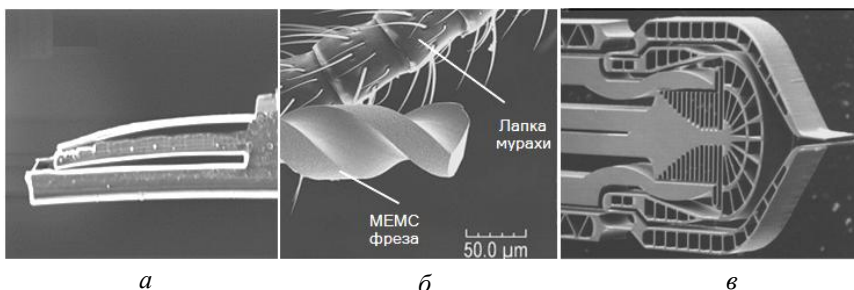


Рис. 16.24

та.

У хірургічні інструменти вбудовують мікродатчики тиску, які передають інформацію про медичні процедури і стан організму в режимі реального часу. Такі ж датчики вбудовують і в цифрові скальпелі (рис. 16.25, *а*) (data knives), що використовують для операцій, де важлива виняткова точність і безпека, наприклад, у хірургії головного мозку.

Датчик тиску, вбудований в самий кінчик леза скальпеля (16.25, *б*), може просигналізувати хірургу, що скальпель поблизу

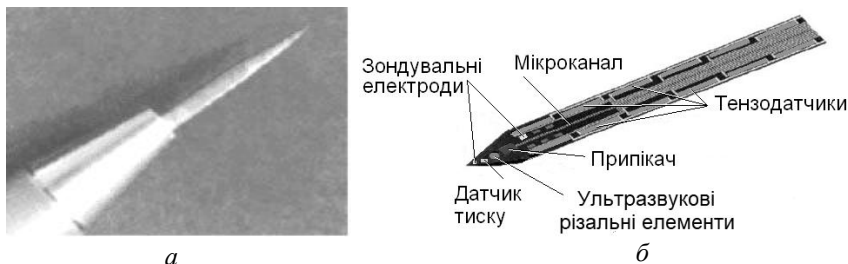


Рис. 16.25

кровоносної судини. У кінчик різального інструмента можуть бути

також вбудовані припікач і випромінювач ультразвукової частоти, а вздовж усього леза – тензодатчики. Такий пристрій може швидко і легко різати навіть жорсткі тканини (наприклад, застиглий очний кришталік пацієнта з катарактою). Пристрій, показаний на рис. 16.25, *б* містить вбудований мікроканал через який можна при різанні видаляти рідину і хірургічні залишки.

Багато хірургічних завдань, таких як стерилізація, коагуляція, деструкція, можуть бути успішно вирішені шляхом застосуванням локального впливу високої температури. Створення такого локального впливу забезпечують мікронагрівальні пристрої, наприклад, для термокоагулювального скальпеля з різальною крайкою, що нагрівається (рис. 16.26, *а*).

Найбільш успішне використання мікроактивації в хірургічних інструментах – це застосування надпотужних крокових двигунів і резонансних мікроструктур. Скальпель, керований п'єзоелектричним мікроактюатором, – це інноваційний приклад використання МЕМС-технології в хірургічних інструментах (рис. 16.26, *б*). П'єзоелектричний кроковий двигун дозволяє точно керувати положенням скальпеля, а вимірюючи силу протидії матеріалу під час різання, можна змінювати силу різання.

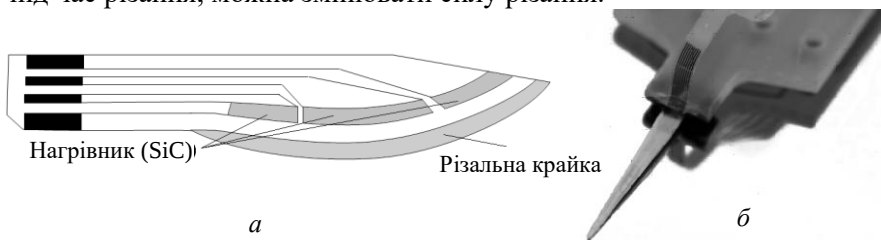


Рис. 16.26

Натепер мікроінструменти, у тому числі й хірургічні, розглядають як комплекс змінних технологічних мікромодулів для виконання різного роду операцій з високою локальністю впливів. Комплекс складається з мікропристроїв, що забезпечують на мікрорівнях захоплення, подачу та видалення, нагрівання, препарування, стимуляцію і надлокальну (аж до нанорівня) діагностику. Це дозволяє виконувати операції дозування, приєднання, видалення, модифікування, вимірювання.

Мінімальна достатність комплекту змінного мікротехнологічного інструменту, що встановлюється у прецизійний мікроманіпулятор, визначається виходячи з можливості локального проведення трьох основних видів мікрооперацій: нанесення, видалення та модифікація речовини. Для окремих операцій та специфічних процесів можлива зміна базових технологічних мікромодулів, оснащених вбудованими засобами контролю.

Базовий комплект мікротехнологічного інструменту сприяє розвитку індивідуальних мікрооперацій та мікроманіпулювання з об'єктами органічної та неорганічної природи, а також забезпечує необхідну гнучкість в роботі технологічних мікросистем.

Біомедичні МЕМС-технології. Яскравим прикладом застосування біомедичної МЕМС-технології є так звана лабораторія на чипі. Ці пристрої являють собою симбіоз кремнієвих чипів і матеріалів з дуже дрібними порами, діаметр яких вимірюється нанометрами.

Лабораторія на чипі відрізняються від звичайних біомікрочипів, які виконують, як правило, одну реакцію (наприклад, гібридизацію нуклеїнових кислот) можливістю здійснювати послідовні хімічні перетворення вихідних зразків, включаючи стадії поділу, концентрування, змішування проміжних продуктів, переміщення їх у різні реакційні мікрокамери і зчитування кінцевих результатів. Основні переваги лабораторії на чипі полягають в простоті їх використання, високій швидкості проведення аналізу, малій кількості зразків і реагентів, необхідних для отримання результату.

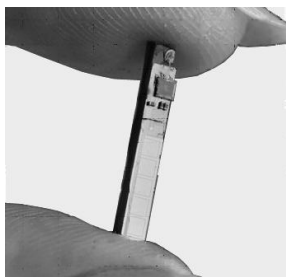


Рис. 16.27

Так, французькі вчені Федеральної політехнічної школи Лозанни розробили чип, що є мініатюрною персональною лабораторією дослідження крові (рис. 16.27). Чип імплантується під шкіру людини і забезпечує миттєвий аналіз концентрації кількох речовин у крові, а додатковий радіомодуль у безпечному частотному діапазоні

передає ці дані лікарям за допомогою стільникового зв'язку, наприклад на планшетний комп'ютер лікаря.

У склад електронного імплантату, який займає об'єм усього кілька кубічних міліметрів, входить п'ять сенсорів, радіопередавач і система живлення.

Мікрозонди. Мікрозонди є основним робочим інструментом сканувальних зондових мікроскопів – приладів для аналізу поверхні за допомогою твердотільних зондових сенсорів.

Із використанням сканувальних зондових мікроскопів є можливість отримувати карти розподілу ряду фізичних і фізико-хімічних характеристик поверхні з високою просторовою роздільною здатністю аж до атомної. Це стало можливим завдяки створенню зондів спеціальних типів.

Зондами в таких мікроскопах є гострі голки. У тунельних мікроскопах – це спеціальним чином заточені металеві або напівпровідникові струмопровідні голки, у близькопольній оптичній мікроскопії – загострені світлові волокна, у сканувальній силовій мікроскопії – голки, що закріплені на пружних балках – кантілевери.

Кантілевер являє собою масивну прямокутну основу розмірами приблизно $1,5 \times 3,5 \times 0,5$ мм з виступною з нього балкою (власне кантілевер) шириною близько 0,03 мм і довжиною 0,1...0,5 мм (рис. 16.28, а). Одна зі

сторін балки є дзеркальною, що дозволяє використовувати для контролю вигину пластини-кронштейна кантілевера систему вимірювань на основі оптичного лазера.

Відбитий пластиною лазерний промінь реєструє профіль сканованої поверхні за допомогою звичайного оптичного детектора, як показано на рис. 16.28, б. Для дзеркальності зворотного боку пластини-кронштейна кантілевера її покривають тонким шаром алюмінію або золота шляхом термічного напilenня у вакуумі.

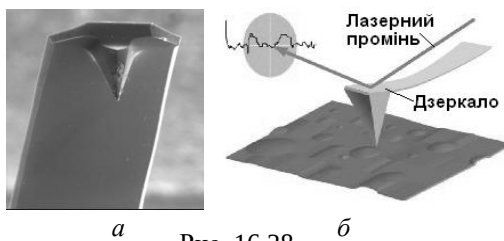


Рис. 16.28

На протилежному вільному кінці пластини-кронштейна є голка, яка взаємодіє з вимірюваним зразком. Форма голки може значно змінюватися залежно від способу виготовлення (рис. 16.29). Радіус вістря голки промислових консолей становить 5...90 нм, лабораторних – від 1 нм.

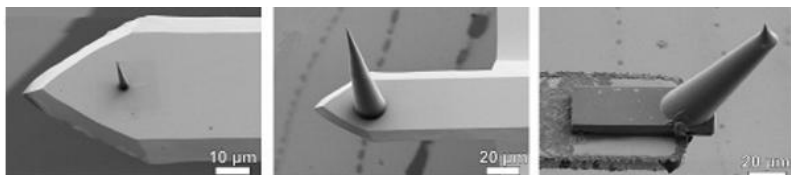


Рис. 16.29

За допомогою такої голки можна «обстежити» поверхню і навіть окремі молекули на ній, переміщувати їх, робити хімічні експерименти з настільки малими кількостями речовини, які не можна зважити навіть на найточніших лабораторних вагах.

Від довжини, ширини, товщини, а також природи матеріалу, з якого зроблений кантилевер, залежить його жорсткість. Чим кантилевер довше і тонше – тим легше він гнеться. Можна зробити такий м'який кантилевер, сила тиску якого на поверхню дорівнюватиме лише мільярдній частці ньютонів. Це в тисячу разів менше, ніж сила, з якою пилінка тисне на стіл, на якому вона лежить, а використовуючи жорсткі кантилевери (і алмазні голки), можна виконувати гравіювання і проводити «наночеканку» – видавлювати на поверхні крихітні зображення (наноіндентори).

Виробництво кантилеверів ґрунтується на використанні двох матеріалів – кремнію і нітриду кремнію. Вістря для «атомно-силової мікроскопії» виготовляють з тих же матеріалів або з алмазу, а також використовують покриття з TiN, W₂C, Pt, Au, або з магнітних матеріалів Fe-Ni/Cr, Co/Cr, CoSm/Cr.

Щоб виготовити такі мініатюрні деталі, використовують процеси літографії, хімічного і фізичного травлення. Крім того, покриття кантилеверів п'єзоелектричною керамікою на основі цирконату-титанату свинцю дозволяє керувати рухом кантилевера, прикладаючи до контактів різницю потенціалів або безпосередньо зчитувати частоту його вільних коливань.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. На які два класи за принципом функціонування поділяють мікронасоси?
2. Який принцип роботи інжекційного електрогідродинамічного насоса?
3. Що являє собою конструкція інжекційного електрогідродинамічного насоса?
4. На чому ґрунтується робота електроосмотичного насоса?
5. За рахунок чого працюють насоси Кнудсена?
6. Які активаційні механізми використовують в механічних мікронасосах з активними клапанами?
7. У чому переваги механічних мікронасосів з активними клапанами?
8. Які елементи складають конструкцію поршневого механічного мікронасоса з пасивними клапанами?
9. За рахунок чого в відцентрових насосах забезпечується перекачування рідини?
10. До якого типу насосів належать вихрові насоси?
11. На чому ґрунтується принцип дії вихрових насосів?
12. Які технічні параметри RF MEMS є найістотнішими?
13. Прокоментуйте інверсний і нормальний режим роботи мікромеханічного ключа.
14. Назвіть сфери застосування відхиляються мікродзеркал.
15. На чому базується технологія DLP?
16. Як отримати кольорове зображення, в DLP-проекторах?
17. Як формуються відбивні властивості діелектричного дзеркала?
18. Наведіть приклади використання MEMS у медичних інструментах.
19. Які датчики можуть вбудовуватися у цифрові скальпелі?
20. Що являє собою лабораторія на чипі?
21. Що являють собою сканувальні зондові мікроскопи та зонди в таких мікроскопах?
22. Що являє собою кантилевер в скануючій мікроскопії?

ПІСЛЯМОВА

Технічний прогрес рухається вперед, і основний напрям його подальшого розвитку – це мікромініатюризація. Безумовно, МЕМС-технологій чекає велике майбутнє. Мікромеханіка дозволить виробляти механічні маніпуляції з дуже високою точністю на мікрорівні, де звичайна механіка безрезультатна.

МЕМС-пристрої перетворюються в мікромініатюрні інформаційно-керувальні системи, здатні задовольнити різні вимоги (інтелектуальність, цифрове надання інформації, багатофункціональність, висока чутливість і точність, низька вартість при використанні групових технологій виробництва).

Номенклатура сенсорних і актюаторних елементів мікросистемної техніки продовжує розширюватися. Елементна база МСТ значною мірою розвивається завдяки розробленню та застосуванню нових структурних матеріалів, технологій виготовлення, фізичних ефектів, а також принципів функціонування сенсорних і актюаторних елементів.

Використання теорії подібності та законів пропорційної мініатюризації дозволяє поліпшити електрофізичні, експлуатаційні та виробничі характеристики компонентів, приладів, систем. Урахування характеру зміни діючих сил у мікросистемі допомагає раціональному вибору принципу функціонування пристроїв.

Підвищується чутливість і швидкодія датчиків неелектричних величин. Електростатичні двигуни стають ефективнішими електромагнітних. Мікробалки стають ефективними датчиками температури і стають перспективними чутливими елементами для інфрачервоного бачення. Знижується енергоспоживання МСТ-пристроїв.

Найбільш яскравими конструктивно-технологічними особливостями мікросистемної техніки нового покоління є:

- активне використання третього виміру (3D-системи);
- інтеграція електричних і оптичних зв'язків з механічними;
- інтеграція фізико-хімічних і технологічних базисів мікро- і біотехнології;

- інтеграція виконавчо-технологічних і контрольнo-діагностичних процедур у мікрооб'ємах і на поверхні твердого тіла.

Основними напрямками розробок і області застосування мікросистемної техніки нового покоління є:

- сенсорні мікросистеми для мініатюрних систем орієнтації, навігації та управління транспортними, аерокосмічними і ракетно-артилерійськими системами;
- мініатюрні мікроприводи і мікромашини на основі мікро-мініатюрної елементної бази (радіо- і оптоелектронних компонентів, керованих конденсаторах, резисторів, дзеркал, модуляторів, елементів мікроприводу);
- аналітико-технологічні мікросистеми на основі мініатюрних аналітико-діагностичних чипів і мікрохімічних реакторів;
- медичні мікро- та наноманіпулятори, nanoінструменти для технологічних пристроїв спеціального призначення;
- мініатюрні робототехнічні системи для медицини, ядерної енергетики, хімічної промисловості, для розвідки і бойових дій.

Мікросистемна техніка є з'єднувальною ланкою з нанотехнологіями – методами виробництва продуктів і пристроїв із заданою атомною структурою шляхом контрольованого маніпулювання окремими атомами і молекулами. Дослідження в нанодіапазоні проводять з використанням мікросистемних інструментів, а приладова реалізація квантово-механічних ефектів, властивих нанорозмірної галузі, здійснюється у вигляді МЕМС-пристроїв.

Кількість науково-дослідних установ, що займаються саме наномеханікою – nanoінструментами, нанотрубками, фотонними кристалами, тощо у багатьох найбільш розвинених країнах в останні роки істотно збільшилася. Основні відкриття, що пророкуються в цій галузі, поки не зроблені. Проте проведені дослідження вже дають практичні результати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Автоматизація проектування МЕМС з використанням системи COMSOL* : навч. посіб. / В. М. Теслюк, Р. З. Кривий, М. Р. Мельник . – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 216 с
2. *Гірняк Ю.* Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні / Ю. Гірняк // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 69. – С10 - 15.
3. *Головатий А.* Розрахунок і конструювання робочих органів мікромеханічних гіроскопів / А. Головатий // Вісник Тернопільського технічного університету. – 2007. – Том 12, № 4. – С.20 - 25.
4. *Гуртов В.А.* Микроэлектромеханические системы / Беляев М. А., Бакшеева А.Г.– Петрозаводск: Из-во. ПетрГУ, – 2016. – 171 с.
5. *Качяев И.А.* Микроэлектронные сенсорные системы опыт создания и применения / Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. С. 32-35.
6. *Кашикаров А.П.* Микромеханические системы и элементы. – М.: ДМК Пресс. – 2018. – 150 с.
7. *Колясников В.А.* Микрожидкостные системы и их реализация с использованием LIGA-технологии / Рахимбабаев Т.Я. // Микросистемная техника. – 1999. – №1. С. 15-21.
8. *Коноплев Б.Г.* Моделирование микрозеркала с электростатической активацией / Лысенко И.Е. // Микросистемная техника.– 2002.– №12.– С.22-25.
9. *Лобур М.* Основи мікросистемних пристроїв / Мельник М. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 258 с.
10. *Староверов К.* Новое семейство одно- и двухосевых гироскопов / Новости электроники, – 2009. – №14 – С.16-18.
11. *Сысоева С.* Ключевые сегменты рынка МЭМС- компонентов. Инерциальные системы — от lowend до high-end / Компоненты и технологии. – 2010. – № 5
12. *Jeremie Bouchaud, Richard Dixon.* MEMS market brief, Isuppli, January – 2009. – P. 23-32.
13. *N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi.* Micromachined Inertial Sensors, Proc IEEE, Aug. – 1998, Vol. 86, No. 8.– P. 15-25.
14. *MEMS Gyro Markets.*// Report of Yole Developpment. April 2006, Lyon, France. – P. 22-37.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	5
Частина I. МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА	
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	7
Розділ 1. Структурні елементи мікромеханічних систем	8
1.1. Мікросистеми, мікропристрої та їх елементи	9
1.2. Фізичні основи роботи пристроїв мікромеханічних систем	13
1.2.1. Основні фізичні ефекти, що використовуються в мікромеханічних системах.....	13
1.2.2. Закони пропорційної мініатюризації.....	17
Розділ 2. Базові матеріали для мікромеханічних систем	21
2.1. Кремній	21
2.2. Двооксид кремнію. Кремній на ізоляторі.....	24
2.3. Нітрид і карбід кремнію	26
2.4. Інші матеріали	27
2.5. Матеріали, що використовуються у виробництві корпусів МЕМС	29
Розділ 3. Базові технології мікроелектроніки, що застосовуються для виготовлення МЕМС	32
3.1. Нанесення покриттів і плівок.....	35
3.1.1. Термічне окиснення кремнієвої пластини	35
3.1.2. Піролітичне осадження діоксиду кремнію	37
3.1.3. Легування	37
3.1.4. Нанесення плівок	41
3.2. Літографія	51
3.3. Травлення	54
3.3.1. Рідинне травлення	56
3.3.2. Сухе травлення	57
3.4. З'єднання підложок	60
Розділ 4. Технології виготовлення об'ємних структур МЕМС	62
4.1. Об'ємне мікрооброблення	63
4.2. LIGA технологія	67
4.3. Поверхнєве мікрооброблення.....	69
Розділ 5. Технології корпусування мікромеханічних систем	74
5.1. Системи пакування	74

5.2. Технології корпусування окремого чипа	75
5.2.1. Монтаж чипа в корпус	76
5.2.2. Формування електричних міжз'єднань	79
5.2.3. Технологія WLP корпусування	79
5.3. Технології корпусування гетерогенних елементів MEMC....	81
Частина II. МІКРОЕЛЕКТРОННІ ДАТЧИКИ ФІЗИЧНИХ	
ВЕЛИЧИН	86
Розділ 6. Датчики тиску	88
6.1. Тензо- і п'єзорезистивні датчики тиску.....	88
6.2. Ємнісні датчики тиску	94
6.3. Резонансні датчики тиску.....	96
6.4. Індуктивні датчики тиску.....	99
Розділ 7. Мікровитратоміри	103
7.1. Термоанемометричний MEMC-витратомір.....	104
7.2. Калориметричний MEMC-витратомір	106
Розділ 8. Датчики температури	110
8.1. Пристрої на основі термоелектрики.....	110
8.2. Терморезистивні датчики температури	115
8.3. Напівпровідникові датчики температури.....	117
8.4. Безконтактні вимірники температури	119
8.4.1. Чутливі елементи безконтактних вимірників температури	121
Розділ 9. Електроакустичні мікромеханічні датчики	129
9.1. MEMC-мікрофони	129
9.2. Ультразвукові датчики відстані	134
Розділ 10. Датчики магнітного поля	139
10.1. Датчики Холла	139
10.2. Магніторезистивні датчики	143
10.3. MEMC-компаси	148
Розділ 11. Мікроелектромеханічні акселерометри	158
11.1. Ємнісні MEMC-акселерометри	160
11.2. П'єзоелектричні MEMC-акселерометри	166
11.3. П'єзорезистивні MEMC-акселерометри	167
11.4. Інші варіанти побудови MEMC-акселерометрів.....	168
Розділ 12. Мікромеханічні гіроскопи	171
12.1. Вібраційні гіроскопи	171
12.1.1. Балкові та стрижневі гіроскопи	173

12.1.2. Гіроскопи-камертони	175
12.1.3. Гіроскопи з диском-вібратором	180
12.1.4. Обертальні вібраційні мікрогіроскопи RR-типу	184
12.2. Інерціальні вимірювальні модулі	187
Частина III. МІКРОМЕХАНІЗМИ ТА МІКРОПРИВОДИ.....	192
Розділ 13. Актюаторні елементи MEMS	193
13.1. Електростатичні актюатори	194
13.2. Магнітні актюатори	196
13.3. Пієзоелектричні актюатори	198
13.4. Термоактюатори	204
Розділ 14. Мікродвигуни	209
14.1. Пієзоелектричні мікродвигуни	209
14.2. Електростатичні мікродвигуни	215
14.3. Електромагнітні мікродвигуни	220
14.4. Інші типи мікродвигунів	225
Розділ 15. Механічні мікропередачі	237
15.1. Механічні зубчасті мікропередачі	237
15.2. Механічні ланцюгові мікропередачі	239
15.3. Механічні фрикційні мікропередачі	240
15.4. Важільні мікропередачі	240
15.5. Додаткові пристрої в мікропередачах	242
Розділ 16. Технологічні мікросистеми	245
16.1. Мікронасоси	245
16.1.1. Немеханічні мікронасоси	245
16.1.2. Механічні мікронасоси	248
16.2. Мікромеханічні ключі та комутатори	253
16.3. Мікродзеркала	257
16.4. Мікроінструменти та пристрої	261
ПІСЛЯМОВА.....	268
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	270

Навчальне видання

ФІЛЯШКІН Микола Кирилович
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ
СИСТЕМИ

Навчальний посібник

Редактор *С.С. Сидоров*
Технічний редактор *А.І. Лавринович*
Коректор *І.І. Іванов*

Підписано до друку 00.00.2019. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Ум. фарбовідб. . Ум. друк. арк. . Обл-вид. арк. .
Тираж прим. Замовлення № -1. Вид. № /Л.

Видавництво НАУ
03058, Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК №977 від 00.00.2005