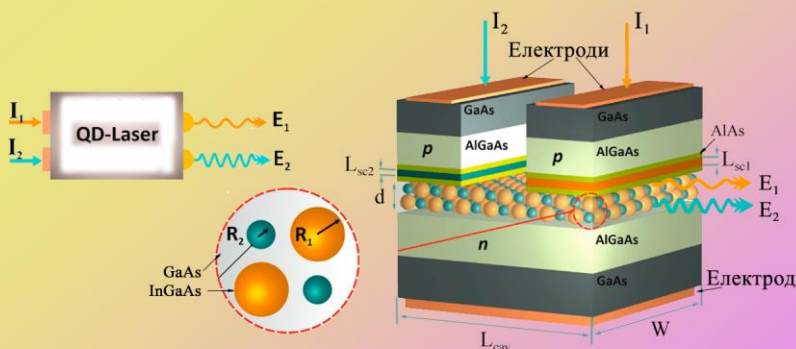




Однодворець Л. В., Пазуха І. М.,
Лукавенко І. М.

ОПТОЕЛЕКТРОННІ І ЛАЗЕРНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА МЕДИЦИНІ

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

**Однодворець Л. В., Пазуха І. М.,
Лукавенко І. М.**

ОПТОЕЛЕКТРОННІ І ЛАЗЕРНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА МЕДИЦИНІ

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету

Суми
Сумський державний університет
2022

УДК 621.373.8; 681.7.069

О-43

Рецензенти:

С. М. Данильченко – кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу радіаційної біофізики Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми);

Ю. О. Шкурдода – доктор фізико-математичних наук, доцент Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
як навчальний посібник
(протокол № 13 від 23 червня 2022 року)*

Однодворець Л. В.

О-43 Оптиoeлектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 127 с.

ISBN 978-966-657-911-2

У навчальному посібнику розглянуті питання стосовно принципів функціонування, конструкції та галузей застосування оптиoeлектронних і лазерних систем: електрооптичних, електроадсорбційних, акусто- й магнітооптичних модуляторів, елементів інтегральної оптики, хвилевідних фільтрів, оптиoeлектронних інтегрованих мікросхем, аналогово-цифрових перетворювачів. Проаналізовані основи лазерних технологій, процеси взаємодії лазерного випромінювання з твердими тілами і біологічними тканинами та можливості їх застосування в електроніці й медицині.

Навчальний посібник рекомендовано для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за галузями: «Електроніка та телекомунікації», «Середня освіта (фізика)» та «Медицина».

УДК 621.373.8; 681.7.069

© Сумський державний університет, 2022

© Однодворець Л. В., Пазуха І. М.,

Лукавенко І. М., 2022

ISBN 978-966-657-911-2

ЗМІСТ

	С.
Передмова	5
Розділ 1 Оптикоелектронні системи.....	6
1.1 Активні елементи інтегральної оптики.....	6
1.1.1 Електрооптичні пристрої.....	6
1.1.2 Модулятори-перемикачі	
інтерференційного типу.....	13
1.1.3 Електрооптичні модулятори на основі	
ефекту Брега.....	15
1.1.4 Електроадсорбційні модулятори.....	16
1.2 Акусто- і магнітооптичні модулятори.....	18
1.3 Інтегральна оптика.....	22
1.3.1 Датчики фізичних величин	
та пристрої на основі ґратчастих елементів	
введення-виведення.....	23
1.3.2 Кутовимірювальні датчики.....	25
1.3.3 Хвилевідні фільтри.....	29
1.4 Оптикоелектронні інтегровані мікросхеми	
для інформаційних систем.....	32
1.5 Аналогово-цифрові перетворювачі.....	45
Розділ 2 Лазери як системи квантової електроніки.....	48
2.1 Основи генерації лазерного	
випромінювання.....	49
2.2 Основні параметри та режими роботи	
лазерів.....	56
2.3 Класифікація лазерів.....	57
2.4 Основні параметри лазерного	
випромінювання технологічних лазерів.....	74
2.5 Фізика процесів поглинання лазерного	
випромінювання в матеріалах електроніки.....	76
Розділ 3 Лазерні технології в електроніці.....	81
3.1 Технологічні процеси виготовлення	
елементної бази електроніки.....	81

3.2 Типові операції та основні процеси лазерних технологій в електроніці.....	89
3.3 Лазерна пригонка номіналів резисторів.....	94
3.4 Технологія лазерного експонування друкованих плат.....	96
3.5 Лазерне скрайбування напівпровідникових пластин.....	98
3.6 Маркування виробів.....	100
3.7 Використання лазерних технологій для реалізації термомагнітного запису інформації.....	102
Розділ 4 Застосування лазерних систем у медицині....	104
4.1 Взаємодія лазерного випромінювання з біологічними тканинами.....	104
4.2 Лазерна хірургія.....	107
Висновки.....	122
Список літератури.....	123

Передмова

Галузі застосування оптоелектронних та лазерних систем дуже різноманітні: матеріалооброблення, вимірювання і контроль у технологічних процесах, мікроелектроніка, локація й навігація, маркування матеріалів, поверхневе очищення, волоконно-оптичні системи зв'язку, голографія та медичні галузі.

Використання лазерних технологій – прогресивний напрямок у сучасній електроніці та медицині, який останніми роками набув істотного розвитку. Властивості сфокусованого пучка лазерного випромінювання як універсального інструменту унікальні та відрізняються від традиційних методів впливу можливістю точно дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу або біологічної тканини; локальністю за глибиною та площею фізичних процесів у зоні термічного впливу; можливістю оброблення різних матеріалів із високою якістю і продуктивністю, безболісністю для пацієнта та відсутністю швів після оперативного втручання. Лазерні технології мають високий рівень енергозбереження та екологічності.

У навчальному посібнику викладені основні принципи формування лазерного випромінювання; подана інформація щодо конструктивно-технологічних особливостей і принципів роботи оптоелектронних та лазерних систем, їх практичного використання. Розглянуто властивості лазерного випромінювання як універсального інструменту.

Автори адресують посібник студентам та аспірантам фізико-технічних і медичних спеціальностей, ним також можуть зацікавитися й викладачі ЗВО та науковці.

РОЗДІЛ 1

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

1.1 Активні елементи інтегральної оптики

До активних елементів інтегральної оптики відносять різного роду *модулятори, дефлектори, перемикачі*. Принцип дії їх практично один і той самий. Різниця визначається режимами роботи, конструктивними особливостями та їх призначенням.

1.1.1 Електрооптичні пристрої

Електрооптичні пристрої реалізуються на широкому класі матеріалів, які включають як напівпровідникові матеріали $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ і $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ (наприклад, GaAs), так і активні діелектрики – ніобати літію, танталу, калію тощо. Найбільшу цікавість викликають модулятори-перемикачі. До них належать модулятори-перемикачі на основі ефекту *тунельного перекачування світла* (або модулятори-перемикачі на *зв'язаних хвилеводах*, модулятори-перемикачі інтерференційного типу).

В основу роботи електрооптичних модуляторів-перемикачів покладений *електрооптичний ефект Погкельса*. Суть його полягає в тому, що в деяких оптичних матеріалів показник заломлення змінюється пропорційно прикладеній напруженості електричного поля.

Величина лінійного електрооптичного ефекту, що визначається зміною показника заломлення Δn , пов'язана з напруженістю поля виразом

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} r_{ij} E, \quad (1.1)$$

де n – показник заломлення матеріалу за відсутності електричного поля; r_{ij} – електрооптичний коефіцієнт (тензорна величина). У результаті світло, яке пройде в такому матеріалі шлях l , набуває фазової затримки величиною

$$\Delta\Phi = -\frac{\pi^3}{\lambda} r_{ij} E l. \quad (1.2)$$

Таким чином, відбувається модуляція хвилі за фазою. На відміну від об'ємних оптичних пристроїв, де для аналізу подібного типу модуляції широко використовують додаткові пристрої (наприклад, поляризатори), в інтегральній оптиці перетворення фазової модуляції на амплітудну здійснюється за допомогою різних інтерференційних схем. Якщо між інтерферувальними пучками існує різниця фаз, то в результатуючому полі це проявляється як модуляція інтенсивності.

До основних характеристик модуляторів належить *глибина модуляції (коефіцієнт модуляції) M та ширина смуги модулювальних частот Δf* , яка визначає обсяг оброблюваної інформації.

Узагальненим показником якості є величина *питомої потужності $\Delta P/\Delta f$ або фактор якості*, який визначається як потужність збудження до одиниці смуги частот за еквівалентної 84%-вої модуляції інтенсивності.

Зазвичай основа хвилевідного модулятора – це діелектричний хвилевід, наприклад, ніобат літію LiNbO_3 або танталу LiTaO_3 . Далі технологією дифузії або епітаксialного росту формують структуру із заданими властивостями.

Принципова схема дії таких модуляторів наведена

на рисунку 1.1. Величини електрооптичних коефіцієнтів, які визначають величину зміни коефіцієнта заломлення, залежать від кристалографічної орієнтації матеріалу (взаємного розміщення кристала і напрямку електромагнітної хвилі), що використовується для створення активного елемента. У разі анізотропних кристалів (наприклад, ніобату літію), оптимальними орієнтаціями для хвилевідної структури є y - і z -зрізи, як показано на рисунку. Загально прийнято, що для того, щоб зв'язати з координатами x , y , z кристалографічні напрямки, вісь z повинна бути спрямована вздовж оптичної осі кристала. Тому якщо йде мова про y - або z -зріз, то це означає, що відповідна вісь перпендикулярна до великої площини кристала.

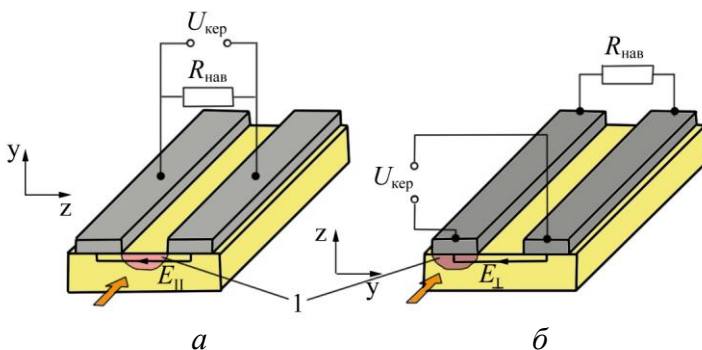


Рисунок 1.1 – Принципова схема дії хвилевідного модулятора з y -зрізом (конфігурації хвилевідних активних елементів із зосередженими параметрами) (а) та із z -зрізом (конфігурації хвилевідних активних елементів типу *біжучої хвилі*) (б)

Для отримання максимальних електрооптичних коефіцієнтів керувальне електричне поле повинно бути

спрямоване вздовж осі z . Це зі свого боку накладає обмеження на конструкцію електродів модулятора. У випадку використання y -зрізу (рис. 1.1 а) електроди розміщені симетрично по обидва боки хвилеводу. Як наслідок, керувальною складовою електричного поля є його паралельна складова $E_{\parallel}$. В активних елементах на z -зрізі (рис. 1.1 б) для зберігання напрямку модульовального поля вздовж осі z один з електродів наноситься зверху на хвилевідний шар 1 і робочою складовою є вертикальна складова електричного поля $E_{\perp}$. Акцентуємо увагу на тому, що матеріалом керувального електрода є метал. Як наслідок, хвилевідна мода, що поширюється по хвилеводу з металевою межею, є затухальною. Для того щоб уникнути цього, між електродом та хвилеводом нанесений тонкий ізолювальний шар із низьким (відносно хвилеводу) показником заломлення. Це загальноприйнятий технологічний прийом. І далі, коли ми будемо говорити про те, що на поверхню хвилеводу нанесений шар, який є провідником (за винятком спеціальних випадків, коли необхідно створити виведення випромінювання з хвилеводу), то будемо мати на увазі, що він відокремлений від хвилеводу ізолятором. Переважно як буферний шар використовують окисні плівки алюмінію ($n \approx 1,6$) або кремнію ($n \approx 1,5$) товщиною близько 20 мкм.

Схема, наведена на рисунку 1.1, ілюструє також основні схемні конфігурації хвилевідних активних елементів із *зосередженими параметрами* (рис. 1.1 а) та типу *біжучої хвилі* (рис. 1.1 б). Для схем із зосередженими параметрами електроди створюють зосереджену ємність модулятора перемикача. Його смуга частот обмежується добутком ємності електродів на величину опору навантаження $R_{\text{нав}}$ і часом поширення світлового потоку

через перемикач-модулятор.

У схемі типу біжучої хвилі світло і модульовальна хвиля надвисокої частоти (близько 1 гігагерц) поширюються в одному напрямку. Якщо фазові швидкості керувального електричного поля й оптичного випромінювання рівні, величина ємності електродів і час поширення світла через модулятор не впливають на смугу частот. Смуга частот обмежується ступенем розузгодження швидкостей оптичної та надвисокочастотної хвиль. Якщо таке розузгодження невелике, то характеристики модулятора погіршуються мало. Додамо, що модулятори-перемикачі типу біжучої хвилі характеризуються також більш високою ефективністю порівняно зі структурами із зосередженими параметрами. Для модуляторів із паралельними пластинами відношення факторів якості становить

$$\frac{(\Delta P / \Delta f)_{\text{біж. хв}}}{(\Delta P / \Delta f)_{\text{зосередж. пар}}} = 1/3. \quad (1.3)$$

Основу електрооптичних модуляторів-перемикачів на базі зв'язаних хвильоводів складають два (або більше) близько розміщених паралельних керованих хвильоводи. На рисунку 1.2 наведений модулятор-перемикач Х-типу. За збудження одного з них у процесі поширення випромінювання відбувається перерозподіл енергії між хвильоводами, який залежить від прикладеної до керувальних електродів напруги. Суть явища перерозподілу енергії полягає в такому. Якщо хвильоводи розміщені на невеликій відстані h_c , то хвости хвильовідних мод, які виходять за межі хвильоводів, перекриваються. Отже, виникає розподілений зв'язок між полями

хвильоводів. Такий розподілений зв'язок має низку унікальних властивостей. Насамперед це те, що для його виникнення не потрібні інші конструктивні елементи. Необхідно лише зсунути хвильоводи на достатньо малу відстань. Зв'язок такого типу має неперервний характер. Наприклад, якщо змінювати відстань між хвильоводами вздовж структури, отримаємо в кожному місці свій коефіцієнт зв'язку, що дозволяє формувати складні інтегрально-оптичні пристрої різного функціонального призначення.

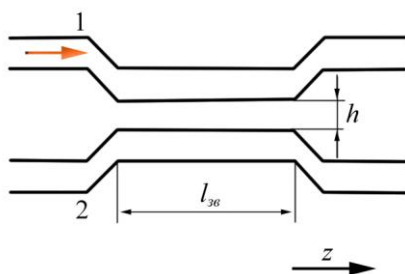


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення модулятора-перемикача X-типу

Комплексні амплітуди електричного поля змінюються у хвильоводах за закономірністю

$$\begin{cases} U_1 = A_0 e^{j\beta z} \cos \sigma z, \\ U_2 = -j A_0 e^{j\beta z} \sin \sigma z, \end{cases} \quad (1.4)$$

де σ – коефіцієнт зв'язку. Спочатку енергія з хвильоводу 1 перекачується у хвильовід 2, а потім починається обернений процес.

Отже, в системі з двох хвильоводів виникає щось

подібне до коливного процесу.

Повне перекачування енергії між хвилеводами відбувається на так званій *довжині зв'язку* $l_{zv} = \pi/2\sigma$. Якщо на довжині l_{zv} відбувається повне перекачування енергії, то такий стан системи називають *схрещеним*. Якщо перекачування енергії не відбувається і світло виходить із того самого хвилеводу, в який потрапляло, то такий стан системи називають *паралельним*.

Відзначимо, що як впливає із співвідношення (1.4), фази випромінювання у хвилеводах зсунуті на $\pi/2$. Водночас додамо, що 100%-ва ефективність перекачування відбувається лише в разі, якщо константи поширення мод в обох хвилеводах абсолютно узгоджені, з цією метою товщини та коефіцієнти заломлення хвилеводів ретельно контролюються.

Основний недолік таких елементів – неможливість реалізації на практиці 100%-вої ефективності. Наприклад, неможливе виготовлення хвилеводів із довжиною, яка точно дорівнює l_{zv} . Проте схему можна зробити двосмуговою і одночасно змінювати асиметрично параметри у двох хвилеводах. Крім того, напругу можна подавати на таку схему на різні лінії з різною полярністю. Тоді в одному хвилеводі показник заломлення буде збільшуватися, а в іншому – зменшуватися:

$$\begin{cases} n_1 = n_0 + \Delta n, \\ n_2 = n_0 - \Delta n. \end{cases} \quad (1.5)$$

Таким чином, отримуємо відносну зміну константи поширення $\Delta\beta$ удвічі більшу, ніж у системі з одним електродом.

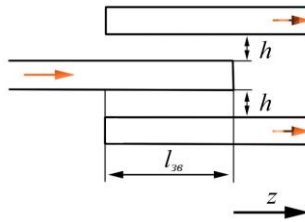


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення модулятора-перемикача Y-типу

На рисунку 1.3 наведена конструктивна схема Y-розгалужувача, який працює за аналогічним принципом, але перекачування енергії хвилі відбувається одночасно через два канали.

1.1.2 Модулятори-перемикачі інтерференційного типу

Основу інтегрально-оптичних модуляторів-перемикачів інтерференційного типу складають планарні інтерферометри Маха – Цандера. Він створюється двома паралельно розміщеними хвилеводами, які на вході та на виході зв'язані Y-розгалужувачами (рис. 1.4). Вхідний сигнал за допомогою першого розгалужувача поділяється на дві частини. Обидві частини сигналу, кожна з яких проходить через своє плече інтерферометра, сумуються на виході другим Y-розгалужувачем з урахуванням фазових змін, що відбуваються в процесі поширення. На хвилеводи в плечах інтерферометра наносять керувальні електроди.

Електричне поле через ланцюг керування індукуює фазовий зсув такої величини, за якого хвилі надходять у загальну точку або в фазі, або в протифазі. Отже, на виході Y-розгалужувача або маємо, або не маємо сигналу.

Природно, що глибина модуляції на виході

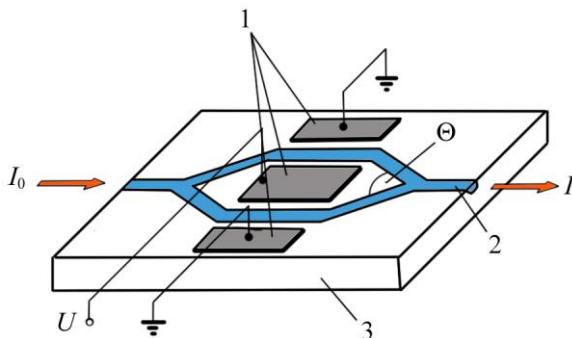


Рисунок 1.4 – Схема модулятора перемикача інтерференційного типу: 1 – керувальні електроди; 2 – хвилевід; 3 – підкладка

інтерферометра визначається співвідношенням інтенсивностей у плечах інтерферометра. Стівідсоткова модуляція досягається лише у випадках, якщо ці інтенсивності абсолютно однакові. Зауважимо, що існують активні засоби корекції інтенсивності в плечах, але вони вимагають додаткових джерел живлення (> 30 В) та значно ускладнюють схему модулятора. Проте сучасна техніка фотолітографії дозволяє виконувати Y-розгалужувачі з високою точністю (саме від неї залежить співвідношення інтенсивностей) та досягати практично 100%-вої модуляції.

Сьогодні для модуляторів, побудованих на основі z-зрізів LiNbO_3 , досягаються такі характеристики: керувальна напруга $\sim 3,5$ В, смуга частот ~ 17 ГГц, фактор якості ~ 7 мкВ/МГц.

1.1.3 Електрооптичні модулятори на основі ефекту Брега

Типовий модулятор на основі ефекту Брега, показаний на рисунку 1.5, складається з пари електродів, «переплєтених» між собою подібно до двох гребінок. За подання напруги на електроди коефіцієнт заломлення хвильоводу під ними змінюється. Як наслідок, у хвильоводі формується «товста» фазова ґратка з періодом T , який дорівнює подвійній відстані між штирками.

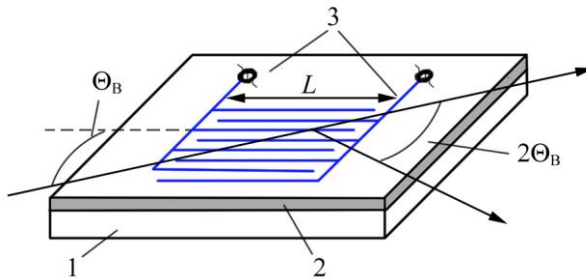


Рисунок 1.5 – Брегівський модулятор: 1 – підкладка;
2 – хвильовід; 3 – додатний та негативний електроди

Водночас виконується умова, що характеризує ґратку як товсту:

$$2\pi\lambda L \gg T^2, \quad (1.6)$$

де L – довжина штирків модулятора.

Світло, що поширюється у хвильоводі, дифрагує на такій ґратці. Водночас унаслідок того, що ґратка товста, результат дифракції залежить від кута, під яким вона освітлюється Θ_B . Через так званий ефект Брега

ефективною є дифракція лише за умови, якщо кут дифракції вдвічі більший, ніж Θ_B . Можна показати, що кут освітлення ґратки задається співвідношенням

$$\sin \Theta_B = \frac{\lambda}{2Tn_w}. \quad (1.7)$$

За зміни кута освітлення ґратки відбувається зменшення інтенсивності дифрагованої хвилі. Діапазон зміни кутів освітлення (кути Θ_B невеликі і $\sin \Theta_B \approx \Theta_B$), за яких інтенсивність знижується до 50 % від максимальної, становить величину

$$\Delta \Theta_B = 2T / L. \quad (1.8)$$

Природно, що інтенсивність дифрагованої хвилі залежить від напруги U , що подається на модулятор:

$$I / I_0 = \sin^2 Ub, \quad (1.9)$$

де b – коефіцієнт, що характеризує ефективність модулятора та залежить від коефіцієнта заломлення середовища хвилеводу та інших параметрів структури.

1.1.4 Електроабсорбційні модулятори

Електроабсорбційні модулятори також можна вважати електрооптичними, оскільки електричне поле змінює їх оптичні характеристики. Проте ефект, який використовують за цих обставин, не є ефектом Погкельса. Замість цього в електроабсорбційних модуляторах застосовують ефект Франца – Келдиша. Під час подання

сильного електричного поля межа смуги поглинання в напівпровідниках зсувається в бік довгих довжин хвиль (рис. 1.6). Як бачимо, за відсутності напруги (крива А) коефіцієнт поглинання на довжині хвилі $\lambda = 0,9$ мкм становить величину 25 см^{-1} . Під час прикладання напруги крива поглинання зсувається в довгохвильову область та коефіцієнт поглинання для цієї довжини хвилі збільшується практично на три порядки.

У сучасних електроабсорбційних модуляторах напруга живлення не перевищує десятків вольт за зміни коефіцієнта поглинання в межах 20 дБ та робочої смуги пропускання ~ 1 ГГц.

Останнім часом такого типу модулятори набувають дедалі більшого поширення як в інтегральній оптиці, так і у волоконно-оптичних системах зв'язку.

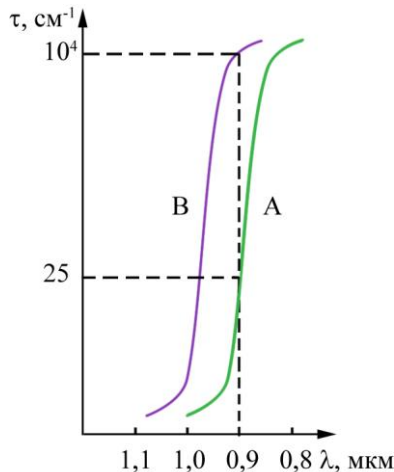


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі оптичного випромінювання для GaAs за подання напруги $1,3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. Крива А відповідає випадку, коли напруга відсутня, крива В – до структури прикладена напруга

1.2 Акусто- і магнітооптичні модулятори

Один з ефективних методів керування хвилею у хвилевідних пристроях – використання з метою модуляції хвилі результатів взаємодії звукових коливань з елементами інтегрально-оптичної структури.

Акустична хвиля є процесом перенесення механічних деформацій – об’ємних і зсувових. За поширення звукових хвиль у середовищі завдяки *фотопружному ефекту* виникає регулярна зміна показника заломлення середовища, яке визначається характеристиками акустичної хвилі. Такими характеристиками є інтенсивність хвилі, період звукових коливань та ін. Взаємодія світла з такою наведеною структурою аналогічна дифракції світла на дифракційних ґратках. Фотопружний ефект є лінійним ефектом – величина зміни показника заломлення пропорційна деформації δS :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} P n^3 \delta S, \quad (1.10)$$

де P – характеризує пружні властивості матеріалу. В області прозорості цей коефіцієнт практично не залежить від довжини хвилі світла, але залежить від напрямку поширення та поляризації світла і звуку.

Акустооптичні активні елементи можуть бути побудовані з використанням як об’ємних, так і *поверхневих* (ПАХ) *акустичних хвиль*. Енергія, яка переноситься ПАХ, зосереджена в приповерхневому шарі товщиною, що приблизно дорівнює довжині хвилі. Отже, якщо така хвиля поширюється в зоні оптичного хвилеводу, то враховуючи товщину оптичного хвилеводу, яка такого самого порядку,

можна стверджувати, що перекриття звукової та оптичної хвиль практично повне. Як наслідок, відбувається достатньо ефективна модуляція випромінювання, яке поширюється у хвилеводі. Додамо, що практична реалізація ПАХ-модуляції відносно проста. Саме тому такий тип модуляції широко використовують в інтегральній оптиці.

Збудження ПАХ здійснюється за допомогою так званих *зустрічно-штирових перетворювачів* (рис. 1.7), які формуються з електродів, аналогічних до електродів електрооптичного Брегівського модулятора. На попередньо нанесеному діелектричному шарі з ефективними п'єзоелектричними властивостями формуються металеві електроди у формі вкладених одна в одну гребінок. До їх кінців прикладається керувальна напруга. Зауважимо, що такий відносно простий перетворювач забезпечує ефективне перетворення модуляції електричного сигналу на модуляцію оптичного сигналу в смузі шириною близько 100 МГц.

Найбільш ефективно перетворюються акустичні хвилі з довжиною, що дорівнює подвійній величині

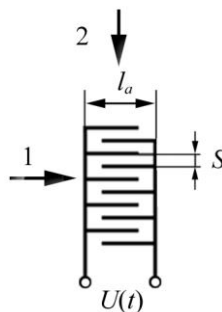


Рисунок 1.7 – Принципова схема зустрічно-штирового перетворювача: 1 – колінеарна модуляція хвилі 2

відстані між сусідніми електродами s . Методи розширення смуги перетворювальних частот будуть розглянуті трохи пізніше.

Розрізняють дві схеми модуляції хвилі, поширюваної у хвилеводі:

1 *Колінеарна* – хвиля поширюється в напрямку, паралельному напрямку акустичної хвилі, тобто створюється динамічний ґратчастий елемент введення-виведення. Параметри випромінювання, що виводиться з хвилеводу (насамперед інтенсивність та кут, під яким воно поширюється в покривному шарі), однозначно зв'язані з характеристиками наведеної ґратки, а отже, пов'язані з характеристиками керувальної напруги.

2 *Неколінеарна* – хвиля поширюється в напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення акустичної хвилі. У цьому разі відбуваються дифракційні явища, які за природою аналогічні явищам, що розглядалися за опису планарних дифракційних оптичних елементів.

Більш поширений і перспективний саме другий спосіб модуляції. Тому й розглянемо його більш детально.

Для неколінеарних перетворювачів можливі дві схеми дифракції хвилі, що поширюється у хвилеводі (рис. 1.8).

1 Перша схема (рис. 1.8 *a*) – аналогічна схемі дифракції на тонкій ґратці. Умова такого процесу:

$$l_a \ll \frac{\lambda_a^2}{\lambda}. \quad (1.11)$$

Маємо набір дифракційних порядків. Ефективність дифракційної ґратки залежить від l_a . Проте ця величина не може бути відносно великою, оскільки можливі акти повторної дифракції.

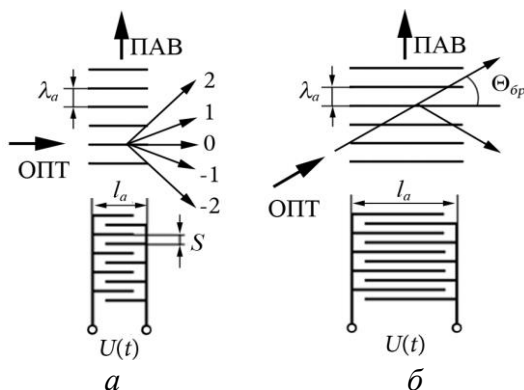


Рисунок 1.8 – Схеми дифракції хвилі на ПАХ-модуляторах: дифракція подібна до дифракції на тонкій ґратці (а); дифракція подібна до дифракції на товстій ґратці (б)

2 Друга (рис. 1.8 б) – аналогічна дифракції на товстій ґратці (як і у випадку Брегівського електрооптичного модулятора). Умова такого процесу:

$$l_a \gg \frac{\lambda_a^2}{\lambda}. \quad (1.12)$$

У цьому разі, якщо світло падає на ґратку під кутом (кут Брега), який визначається співвідношенням

$$\sin \Theta_{\text{бр}} = \frac{\lambda}{2\lambda_a}, \quad (1.13)$$

відбувається інтерференційний резонанс, та після дифракції на ґратці в ідеальному випадку маємо лише один пучок, що має напрямок першого порядку дифракції.

Таким чином, навіть якщо не виконуються оптимальні умови дифракції світла на брегівському модуляторі, його ефективність значно вища, ніж ефективність попереднього модулятора. Крім того, селективність модулятора за кутом Брега дає додаткові можливості під час створення інтегрально-оптичних пристроїв, наприклад селекторів (фільтрів) певної частоти електричного сигналу або спектроаналізаторів, якщо використовувати оптичні пучки з широким кутовим спектром (пучки, які сходяться або розходяться).

Основою роботи інтегрально-оптичних активних елементів із магнітним керуванням є перетворення хвилевідних мод унаслідок намагнічування хвилевідної плівки. У багатьох матеріалах, що використовують в інтегральній оптиці, в тензорі діелектричної проникності не дорівнюють нулю недіагональні компоненти. Тому системи рівнянь (для кожної компоненти) для електричного та магнітних полів не є незалежними, тобто ТЕ- і ТМ-моди також залежні. Водночас спостерігається перекачування енергії з ТЕ- в ТМ-моду. До того ж для повного (ефективного) перекачування енергії з одної моди в іншу необхідне узгодження констант поширення ТЕ- і ТМ-мод. Зміну різниці між цими константами (з метою отримати $\Delta\beta = 0$) можна, наприклад, здійснити, змінюючи орієнтацію магнітного моменту хвилевідної плівки.

1.3 Інтегральна оптика

За аналогією з пристроями мікроелектроніки системи інтегральної оптики дуже часто називають *оптичними інтегральними схемами* (ОІС). З попереднього розгляду випливає, що такі пристрої повинні мати унікальні властивості та характеристики. Перелічимо

основні з них:

1 Засоби інтегральної оптики дозволяють досягнути мінімальних розмірів оптичних схем і реалізувати (принаймні в одновимірному варіанті) більшість алгоритмів традиційної оптики.

2 Технологічні можливості інтегральної оптики (здебільшого технологія ОІС – відпрацьована технологія електронної промисловості) дозволяють отримувати великі партії ОІС із порівняно невеликими затратами.

3 Фізичні особливості поширення оптичного сигналу, властиві лише інтегральній оптиці, дозволяють побудувати низку принципово нових оптичних пристроїв.

До таких особливостей належать насамперед селективні властивості інтегрально-оптичних систем, які проявляються в модовому характері поширення випромінювання.

Найголовніша вимога до джерел когерентного світла в інтегрально-оптичному пристрої (крім того, що потрібно задовольнити принципові технічні вимоги до когерентності, потужності довжини хвилі тощо) – легка інтеграція джерела випромінювання в інтегральну схему. Перший шлях – це утворення нерознімного з'єднання стандартного випромінювача з інтегральною схемою. Другий – утворення лазера в самій схемі. Найбільше для цих цілей підходять *інжекційні напівпровідникові лазери з розподіленим оберненим зв'язком та розподіленими брегівськими відбивачами*.

1.3.1 Датчики фізичних величин та пристрої на основі ґратчастих елементів введення-виведення

Нагадаємо, що в реальних хвилеводах поширюється суцільний спектр випромінювання. Співвідношення

інтенсивностей (модулів амплітуд) цих хвиль визначається такими характеристиками хвильоводів: коефіцієнтом пропускання середовища хвильоводу, довжиною хвильоводу, розсіянням середовища хвильоводу, станом границі між хвильоводом та середовищами, що межують.

Відповідно, якщо вводити світло в таку систему, наприклад, за допомогою ґратчастого елемента введення-виведення, то в ОІС буде вводитися не лише хвиля, узгоджена з модами хвильоводу, а й хвилі, що поширюються в близьких напрямках. Отже, в реальних ОІС існує деяка область кутів, у межах яких плоска хвиля може бути введена у хвильовід. Ця область кутів має назву *області введення*.

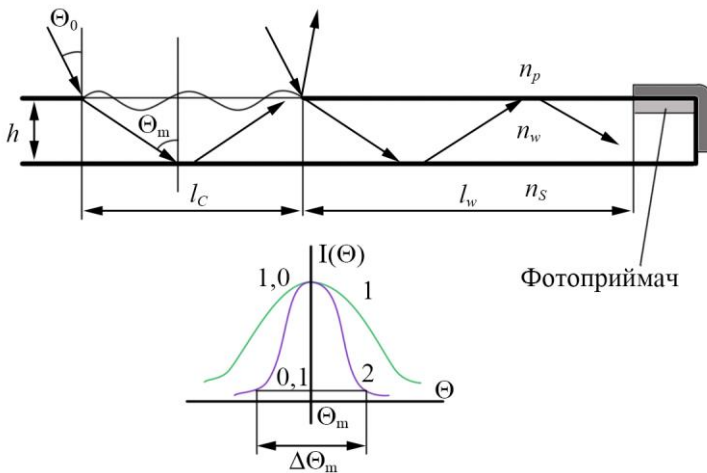


Рисунок 1.9 – Залежності інтенсивності, в межах яких можуть поширюватися коливання в зоні хвильоводу з ґраткою (крива 1) та в зоні безпосередньо хвильоводу (крива 2)

Ширина цієї області $\Delta\Theta_m$ визначається кутами, в

межах яких інтенсивність випромінювання, яке вводиться у хвилевід, спадає до рівня 0,1 від максимальної інтенсивності. Природно, що для різних мод ця величина різна.

Зауважимо, що $\Delta\Theta_m$ визначається як характеристиками хвилеводу (його довжиною, втратами), так і характеристиками елемента введення-виведення, такими як довжина зв'язку та глибина модуляції ґратки.

На рисунку 1.9 наведені залежності інтенсивності, в межах яких можуть поширюватися коливання в зоні хвилеводу з ґраткою (крива 1) та в зоні безпосередньо хвилеводу (крива 2). Кінцева $\Delta\Theta_m$ визначається більш вузькою кривою, в нашому випадку кривою 2, тобто характеристиками безпосередньо хвилеводу. Така ситуація виникає практично завжди, за винятком спеціальних випадків, які ми не будемо розглядати.

1.3.2 Кутовимірювальні датчики

Як характерний приклад пристроїв, в яких використані кутові селективні властивості ОІС, розглянемо роботу датчика кутів, який схематично зображений на рисунку 1.10. Елементом введення-виведення в ОІС використаний фокусувальний ґратчастий елемент введення-виведення. Такий елемент виконаний за допомогою голографічної технології та є низкою концентричних кіл, центр яких розміщений на приймальній площинці центрального фотоприймача матриці планарних фотоприймачів.

Завдяки такій конструкції елемента введення-виведення випромінювання, що вводиться в ОІС, фокусується в площині матриці фотоприймачів. Водночас характеристики, що впливають на процес введення хвилі в

ОІС, залишаються такими самими, як і у звичайній ґратці з таким самим періодом, глибиною модуляції та довжиною зв'язку.

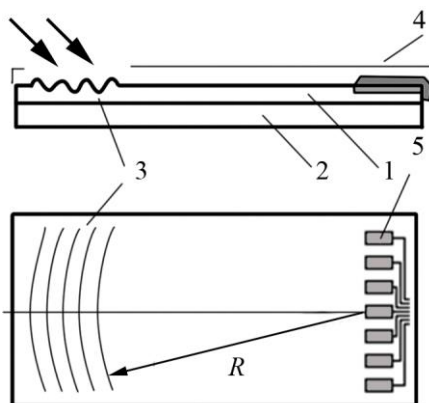


Рисунок 1.10 – Схема кутомірного датчика з ґратчастим елементом введення: 1 – хвилевід; 2 – підкладка; 3 – фокусувальний ґратчастий елемент введення-виведення; 4 – захисний кожух; 5 – матриця планарних приймачів

Ширина області введення в такого датчика становить величину від 10 кутових секунд до половини градуса залежно від параметрів хвилеводу. ОІС призначена для вимірювання кутів, під якими поширюються паралельні пучки випромінювання з певною довжиною хвилі. Саме на цю довжину хвилі розраховується датчик (характеристики хвилеводу та елемента введення-виведення). ОІС спроможна проводити вимірювання кутів у двох площинах. В одній площині зміна напрямку пучка призводить до зміни сигналу на будь-якому приймачі та зумовлена ступенем узгодженості напрямку опромінювального пучка з напрямками хвилевідних мод. У

другій площині зміни кута опромінення призводять до дрейфу світлової плями вздовж матриці приймачів, що також дозволяє проводити вимірювання цього кута.

Другий тип кутомірного датчика наведений на рисунку 1.11. Елемент введення-виведення (ЕВВ) ОІС виконаний у вигляді двовимірної ґратки. Період такої ґратки розрахований так, щоб для робочої довжини хвилі введення у хвилевід відбувалося під кутом, близьким до 0° (див. рис. 1.12, пунктирна крива), тобто максимальна інтенсивність введеної хвилі спостерігається за кута опромінення Θ_{max} . Зауважимо, що параметри елемента введення-виведення і хвилеводу розраховувалися для поляризації пучка, в якого напрямок коливання електричного вектора становив 45° зі штрихами ґратки, або для циркулярно-поляризованого пучка. Таке обмеження зумовлене тим, що умови введення та поширення хвиль у хвилеводі різні для ТЕ- і ТМ-мод. Тоді за нормального падіння пучка на ґратку світло вводиться в чотири протилежно спрямовані хвилевідні канали. Інтенсивність сигналу на всіх чотирьох приймачах (див. рис. 1.11 а) за модулем однакова. Напрямок падіння пучка характеризується двома кутами α і β (рис. 1.11 б) відносно нормалі $\vec{n}$ до поверхні датчика.

Будемо вважати, що кут $\alpha = 0$ та пучок нахилений лише в площині $\vec{n}, x$. На рисунку 1.12 наведено зміну інтенсивності в каналах 1, 3 залежно від кута β (рис. 1.12 а). Увімкнемо приймачі 1, 3 та приймачі 2, 4 за диференціальною схемою. У цьому разі, якщо інтенсивності хвиль у каналах однакові, то сумарний сигнал приймачів дорівнює нулю. Зміна сигналу на виході датчика залежно від кута β зображена на рисунку 1.12 б. Максимальний за модулем сигнал відповідає куту

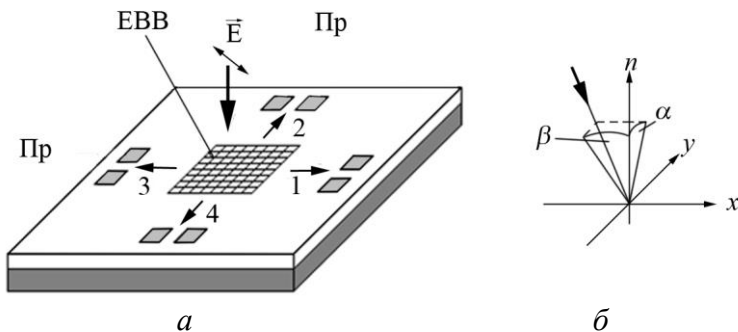


Рисунок 1.11 – Кутомірний датчик із двовимірним елементом введення-виведення: *а* – схема датчика; *б* – орієнтація пучка світла відносно нормалі до поверхні датчика

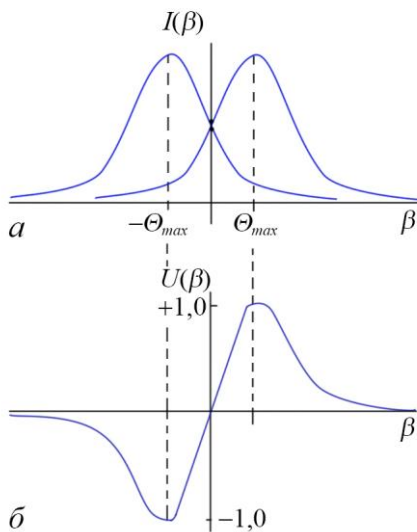


Рисунок 1.12 – Зміна інтенсивності в каналах 1, 3 залежно від кута β (*а*) та сигналу на виході датчика залежно від кута β (*б*)

орієнтації пучка, якій лежить поблизу кута $\Theta_{\max}$. Після цього кута вихідний сигнал датчика починає стихати.

Відповідно область кутів, в якій можна проводити кутові виміри, дорівнює:

$$\Delta\beta \approx \Delta\Theta + 2\Theta_{\max}. \quad (1.14)$$

Водночас чутливість датчика підвищується вдвічі порівняно з одноканальним датчиком із такою самою кутовою селективністю.

Додамо, що робота датчика практично незалежна в площинах $\vec{n}, x$ і $\vec{n}, y$ в широкому діапазоні кутів. За фіксованого кута β кут α може змінюватися в широких межах, які істотно перевищують величину $\Delta\beta$. Так, зміна кутів α може досягати градусів. Усе вищесказане стосується також вимірів кутів у площині $\vec{n}, y$.

1.3.3 Хвилевідні фільтри

Звернемося до рисунка 1.13, на якому зображений хвилевід з однією границею, промодульованою дифракційною ґраткою. Нехай період ґратки такий, що за границею середовищ покривний шар-хвилевід може існувати лише один дифракційний порядок. Відповідно в

Після взаємодії початкової хвилі U_0 з ґраткою маємо такі процеси:

1 Дифракція 0-го порядку на пропускання (поле U_3).

2 Дифракція +1-го порядку у хвилевід.

3 Дифракція 0-го порядку на відбивання (поле U_1).

4 Відбивання хвилевідної хвилі від нижньої границі.

5 Дифракція хвилевідної хвилі в +1-й порядок на

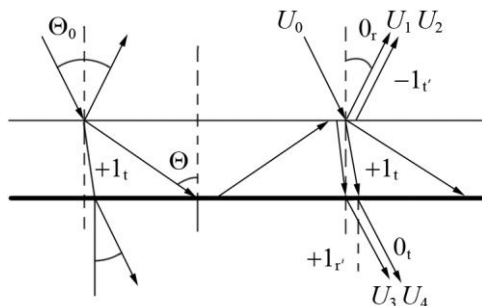


Рисунок 1.13 – Хвилевід з однією границею, промодульованою дифракційною ґраткою

відбивання. Цей порядок поширюється в тому самому напрямку, що й 0_r -й порядок і формує поле U_4 . Покривному шарі може існувати лише один (нульовий) порядок.

6 Дифракція хвилевідної хвилі у -1_t -й порядок у покривне середовище. Цей порядок поширюється в тому самому напрямку, що й 0_r , і порядок формує поле U_2 .

У хвилеводі встановлюється деяке стаціонарне поле. Можна показати, що для ідеального хвилеводу та напрямку опромінення, який збігається з напрямком збудження хвилевідних мод, поля U_3 і U_4 однакові за амплітудою, але розрізняються за фазою на π . Водночас поля U_1 і U_2 , які також поширюються в одному напрямку, однакові за фазою.

Отже, в результаті інтерференційного сумування поле в підкладці має нульову амплітуду, а в покривному шарі – навпаки підсилюється. Таке явище отримало назву аномального відбивання-пропускання. Якщо змінювати довжину хвилі, то таке явище настає за іншого кута освітлення структури.

Типові залежності коефіцієнтів відбивання та пропускання для такої структури наведені на рисунку 1.14.

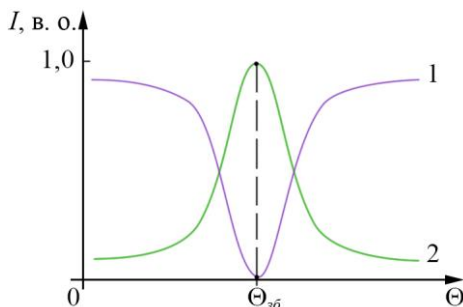


Рисунок 1.14 – Аномальне відбивання-пропускання хвилевідною структурою: 1 – залежність інтенсивності випромінювання, яке пропущено структурою; 2 – залежність інтенсивності

Крива 1 – крива залежності інтенсивності випромінювання, яке пропущено структурою. Крива 2 – крива залежності інтенсивності відбитого випромінювання від структури. Стовідсоткове відбивання (поглинання) спостерігається для кута $\Theta_{зб}$.

Півширина області, в якій спостерігається явище аномального відбивання, пропускання залежить від глибини модуляції ґратки. Чим менша глибина модуляції, тим вужча крива. Якщо структуру освітлювати поліхроматичним випромінюванням, то півширина спектральної лінії, яку можна виділити за допомогою такого фільтра може бути дуже вузькою і за порядком збігатися з подібною характеристикою для інтерференційних фільтрів, тобто не перевищувати $20 \text{ \AA}$.

Подібне явище спостерігається і для неідеального хвилеводу та ґратки, яка формує більше ніж один дифракційний порядок, але погашення і підсилення відбуваються не в повному обсязі.

1.4 Оптиелектронні інтегровані мікросхеми для інформаційних систем

Розгляд загальних принципів оптичного хвилевідного оброблення сигналів та методів побудови оптиелектронних інтегральних схем (ОІС) для інформаційної техніки тісно пов'язаний із класифікацією ОІС, вибором для них базових хвилевідних елементів і матеріалів.

Класифікацію ОІС можна провести багатьма шляхами. Наприклад, за конструкторсько-технологічним і фізичним принципами побудови, за призначенням типу використовуваних матеріалів тощо. З практичної точки зору найбільш істотна різниця між ОІС пов'язана з можливістю та (або) необхідністю їх стикування з волоконно-оптичними системами. Залежно від типу з'єднання можна виділити три основних типи ОІС:

1 ОІС, які вимагають стикування з волоконним світловодом як на вході, так і на виході.

2 ОІС, які вимагають стикування з волоконним світловодом лише на виході.

3 ОІС, які не вимагають стикування з волоконним світловодом.

ОІС другого-третього класу стикуються на вході зазвичай із випромінювачем або з іншою ОІС, а ОІС третього типу стикується на виході з фотоприймачем або іншою ОІС.

З погляду функціонального призначення можна виділити три основні класи ОІС для оброблення інформації:

1-й – аналогові ОІС для оброблення сигналів;

2-й – цифрові та логічні ОІС для обчислювальної техніки;

3-й – комутувальні ОІС.

Прикладами ОІС 1-го класу є ІО-спектроаналізатори, корелятори, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП) та ін. До 2-го класу відносять арифметичні та логічні ОІС мультистабільні ОІС тощо. ОІС 3-го класу – це різного роду перемикачі та комутатори.

Схема інтегрально-оптичного аналізатора спектра (підкладка – кремній/окисел кремнію (Si/SiO_2)) наведена на рисунку 1.15. Проведемо оцінювання трансформації просторових параметрів інформаційного сигналу за допомогою ПАХ-модулятора:

- частота модуляції електричного сигналу $\sim 10^6$ – 10^7 Гц;
- частота модуляції звукового сигналу (та сама) $\sim 10^6$ – 10^7 Гц;
- швидкість поширення електричного сигналу $\sim 10^5$ м/с;
- швидкість поширення звукового сигналу $\sim 5 \cdot 10^2$ м/с.

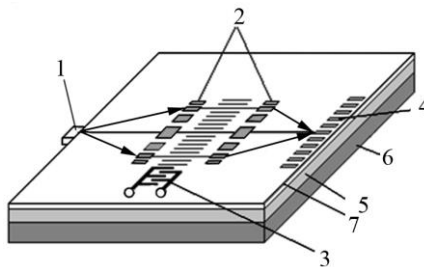


Рисунок 1.15 – Схема інтегрально-оптичного спектроаналізатора: 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – градієнтні лінзи Френеля; 3 – ПАХ-перетворювач; 4 – матриця приймачів; 5 – хвилевід; 6 – підкладка (Si/SiO_2); 7 – шар ZnO

З відомого співвідношення $\lambda = c/f$ випливає, що $\lambda_{\text{електр}} \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ м, а довжина акустичної хвилі і відповідно період наведеної ґратки $\lambda_{\text{акуст}} \sim 1$ мкм–0,1 мм. Природно, що такі періоди ґратки легко вкладаються в межі роздільної здатності більшості матеріалів. Отже, трансформація сигналу з радіо у звуковий діапазон призводить до значного спрощення його аналізу. Додамо, що граничні частоти, які можуть бути проаналізовані за допомогою такого типу аналізаторів, сягають величини 500 МГц.

Істотний недолік такого спектроаналізатора полягає в тому, що штирковий перетворювач спроможний ефективно збуджувати поверхневу акустичну хвилю лише певної відносно невеликої смуги частот (не більше ніж 100 МГц).

Цей недолік може бути значною мірою подоланий, якщо використовують не один, а цілу низку штирових перетворювачів, розрахованих на різні частоти (рис. 1.16). Такі модулятори вмикають паралельно. Різна відстань ПАХ-модуляторів до фур'є-перетворювального об'єктива призводить до виникнення фазового зсуву в площині приймачів. Проте, оскільки фіксується інтенсивність сигналів, цей фазовий множник зникає. Отже, в площині приймачів фіксується спектр потужності електрично-модульованого сигналу. Робоча смуга частот у таких перетворювачах може сягати величини 1 000 МГц.

Проведемо оцінний розрахунок роздільної здатності спектроаналізатора за частотою електричного сигналу.

Нагадаємо, що об'єктив створює у фокальний площині Фур'є образ поля, сформованого перед лінзою:

$$U(\xi) \sim \mathfrak{Z}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(x) \exp(-j \frac{kn_w}{f} x \xi) dx, \quad (1.15)$$

де ξ – просторова координата у фокальній площині; $f = \frac{R}{\left(\frac{n_l}{n_w} - 1\right)}$ – фокальна відстань об'єктива; n_l – показник заломлення лінзи.

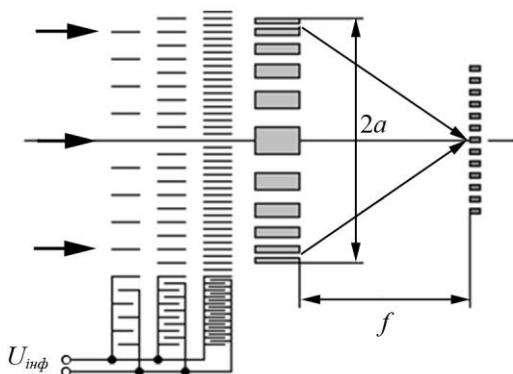


Рисунок 1.16 – Схема модулятора, до складу якого входять декілька штирових перетворювачів, розрахованих на різні частоти

Проте початкове поле U_0 задане в області $2a$, обмеженій робочою ділянкою модулятора (якщо вона менша, ніж вхідний отвір об'єктива), або вхідним отвором об'єктива (якщо робоча ділянка модулятора більша, ніж цей отвір). У цьому разі (1.15) трансформується до такого вигляду:

$$U(\xi) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} P_a(x) U_0(x) \exp(-j \frac{kn_w}{f} x \xi) dx. \quad (1.16)$$

Згідно з (1.16)

$$U(\xi) \sim \mathfrak{I}\{P_a(x)\} \otimes \mathfrak{I}\{\xi\}. \quad (1.17)$$

Таким чином, будь-яка плоска хвиля фокусується об'єктивом у пляму, розміри якої зазвичай визначають як розміри області, що займає нульовий дифракційний

максимум функції $\mathfrak{I}\{P_a(x)\} = 2a \frac{\sin(\frac{kn_w}{f} \xi a)}{\frac{kn_w}{f} \xi a}$. Відповідно

розміри цього порядку (та мінімально можлива величина дифракційної плями) визначається співвідношенням

$$d_{\min} = \frac{\lambda f}{n_w a}. \quad (1.18)$$

З цього співвідношення випливає декілька висновків.

1 Немає сенсу робити розміри приймальних площинок фотоприймача меншими від цієї величини.

2 Роздільна здатність спектроаналізатора визначається різницею кутів дифракції

$$\Delta\varphi > d_{\min} / f, \quad (1.19)$$

яка відповідає періодам біжучих хвиль, що утворюються близькими за частотою сигналами.

Період біжучої «акустичної» ґратки дорівнює довжині акустичної хвилі:

$$T = \lambda_a = \frac{v_a}{F}, \quad (1.20)$$

де F – частота електричного сигналу. Тоді, зважаючи на формулу ґратки $Tn_w \sin \varphi = m\lambda$ (за умови, що $\sin \varphi \approx \varphi$ та використовується перший дифракційний порядок) одержуємо

$$\Delta F > \frac{d_{\min} n_w v_a}{f\lambda}, \text{ або } \Delta F > \frac{v_a}{a}, \quad (1.21)$$

де v_a – швидкість звука в середовищі хвилеводу.

За $v_a = 1\,000$ м/с та $a = 10$ мм $\Delta F = 100$ кГц.

Інтегрально-оптичні корелятори (ІОК) можуть використовуватися для реалізації операцій типу згортки в задачах розпізнавання образів із метою ухвалення рішень.

ІОК умовно можна поділити на два типи:

- 1) корелятори з просторовим інтегруванням;
- 2) корелятори з часовим інтегруванням.

Схема корелятора з просторовим інтегруванням наведена на рисунку 1.17. За допомогою двох ПАХ-модуляторів, які формують акустичні хвилі, що поширюються назустріч одна одній, утворюється дві біжучі ґратки, і тому забезпечується зсув двох модульовальних функцій у часі. Інтегрування здійснюється за допомогою об'єктива 7. У площині фотоприймача формується певний сигнал, якій є згорткою сигналів: еталонного $S_1(t)$ та сигналу порівняння $S_2(t)$.

Схема корелятора з часовим інтегруванням наведена на рисунку 1.18. Еталонний сигнал $S_1(t)$ задається за допомогою модуляції струму накачування джерела випромінювання. Сигнал порівняння $S_2(t)$ – сигнал, що модулює певний високочастотний сигнал (сигнал проміжної частоти). Тоді частота біжучої ґратки залишається сталою. Отже, дифракційний порядок завжди має один напрямок. Глибина модуляції ґратки

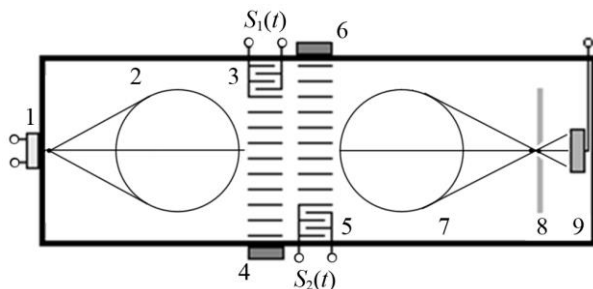


Рисунок 1.17 – Схема корелятора з просторовим інтегруванням: 1 – напівпровідниковий лазер; 2, 7 – планарні об’єктиви; 3, 4 та 5, 6 – ПАХ-модулятори опорного (еталонного) сигналу $S_1(t)$ та сигналу порівняння $S_2(t)$; 8 – частотний фільтр; 9 – приймач

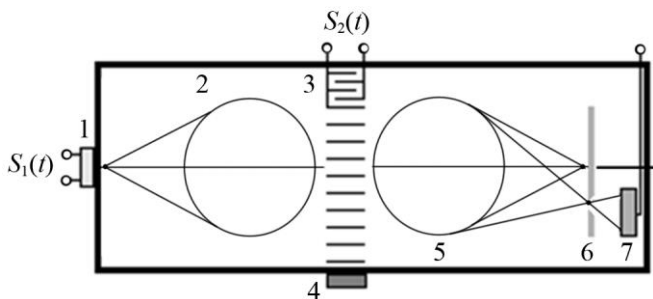


Рисунок 1.18 – Схема корелятора з часовим інтегруванням: 1 – напівпровідниковий лазер – генератор еталонного сигналу $S_1(t)$; 2, 5 – планарні об’єктиви; 3, 4 – ПАХ-модулятор – модулятор сигналу порівняння $S_2(t)$; 6 – частотний фільтр; 7 – приймач

визначається модулювальним сигналом $S_2(t)$, який пересувається вздовж модулятора зі швидкістю поширення акустичної хвилі. Просторовий зсув сигналу τ визначається швидкістю поширення акустичної хвилі.

Поле за модулятором 3, 4 можна розглядати як добуток двох функцій $S_1(t)$ та $S_2(t + \tau)$, що дифрагує на ґратці. Інтегрування здійснюється за допомогою об'єктива 6. У площині фотоприймача формується певний сигнал, що є згортокою сигналів: еталонного $S_1(t)$ та сигналу порівняння $S_2(t)$.

На рисунку 1.19 наведена принципова схема інтегрально-оптичного корелятора цифрових сигналів. Еталонний сигнал, сигнал порівняння («фільтрувальна функція») $U_{етал}$ подається на електрооптичний просторовий модулятор 10.

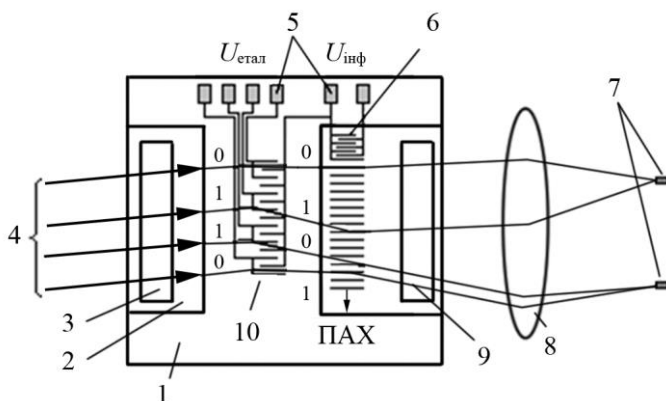


Рисунок 1.19 – Принципова схема інтегрально-оптичного корелятора цифрових сигналів: 1 – хвилевід із ніобату літію; 2 – контактна площадка для призми; 3, 9 – призмові елементи зв'язку; 4 – вхідний пучок; 5 – клеми для подання інформаційних сигналів; 6 – ПАХ-перетворювач; 7 – фотоприймачі; 8 – об'єктив; 10 – електрооптичний модулятор

За роздільного збудження окремих сегментів модулятора можна формувати еталонні функції різного

виду в широкому діапазоні з високою роздільною здатністю. Іншими словами, під час подання напруги до секцій модулятора за рахунок електрооптичної зміни показника заломлення хвилевідного шару формується стаціонарна (нерухома) дифракційна ґратка, яка дає можливість модулювати однорідний пучок 4 паралельно за декількома інформаційними каналами (їх кількість дорівнює кількості секцій модулятора).

ПАХ-модулятор 6 формує біжучу поверхневу акустичну хвилю $U_{\text{нф}}$, яка зі свого боку формує динамічну ґратку.

Вхідні сигнали перетворюються на імпульси ПАХ, довжина яких узгоджена з довжиною елементів модулятора. Одиниця кодується високочастотною ПАХ, нуль – низькочастотною. Операція множення виконується за рахунок подвійної дифракції на двох ґратках (рухомій та нерухомій). Інтегрування здійснюється об'єктивом 8. Геометрія пристрою така (періоди дифракційних ґраток): світловий пучок, який відповідає збіжним розрядам вхідної послідовності (1-1, 0-0), потрапляє на один приймач, а якщо він відповідає незбіжним розрядам (1-0, 0-1) – на інший приймач.

Поданий на рисунку 1.19 інтегрально-оптичний корелятор призначений для оброблення 32-розрядних кодів за швидкодії 32 МБіт/с. Виконання кореляції з такою швидкістю еквівалентне швидкості виконання такої операції у звичайному комп'ютері зі швидкістю $\sim 10^9$ операцій за 1 секунду.

Розглянемо бістабільні та мультистабільні інтегрально-оптичні пристрої. Відомо, що саме на основі бістабільних та мультистабільних елементів і будуються логічні комірки сучасних комп'ютерів. Оптичним бістабільним елементом називають пристрій, залежність потужності оптичного сигналу $P_{\text{вих}}$ якого від потужності на

вході елемента $P_{\text{вх}}$ має вигляд гістерезисної петлі (рис. 1.20).

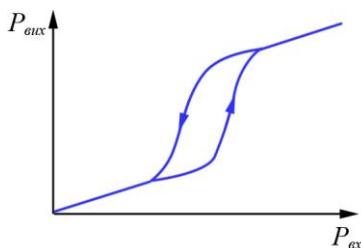


Рисунок 1.20 – Залежність потужності оптичного сигналу $P_{\text{вих}}$ від потужності на вході елемента $P_{\text{вх}}$

Одним із перших пристроїв, у яких спостерігалось явище оптичної бістабільності, є певний резонатор, заповнений нелінійним середовищем (рис. 1.21).

За низької інтенсивності вхідного сигналу певної довжини хвилі λ не виконується умова виникнення в ньому стоячої хвилі:

$$L_r n(I) = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (1.22)$$

де L_r – довжина резонатора; $n(I)$ – показник заломлення нелінійного середовища, яке його заповнює; $m = 1, 2, \dots$ – ціле число.

У такому разі резонатор працює як поглинальний фільтр, інтенсивність випромінювання якого на виході істотно менша, ніж на вході. За зростання інтенсивності збільшується показник заломлення середовища і «частота» настроювання резонатора дедалі більше збігається з частотою хвильових коливань, тобто ліва і права частини співвідношення (1.22) менше відрізняються. Як наслідок,

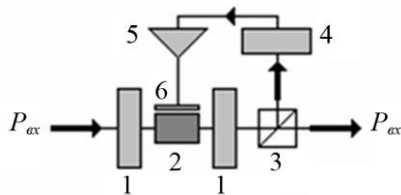


Рисунок 1.21 – 1 – резонатор; 2 – нелінійне електрооптичне середовище; 3 – світлоподільник; 4 – фотоприймач; 5 – підсилювач напруги; 6 – керувальні електроди

інтенсивність випромінювання в самому резонаторі і на його виході починає зростати, що призводить до додаткового збільшення $n(I)$. Фактично утворюється ланка позитивного оберненого зв'язку. Отже, процес буде продовжуватися, поки не буде виконуватися співвідношення (1.22). Крива наростання потужності на виході такого елемента має стрибкоподібний характер, аналогічний характеру кривої, наведеної на рисунку 1.22. За зменшення вхідної інтенсивності наявність нелінійності середовища та виконання умови (1.22) буде «підтримувати» на певному рівні вихідну потужність випромінювання, поки система «не зірветься». У цьому разі рівень вхідної інтенсивності точно недостатній, щоб виконувалася рівність (1.22) та ліва і права його частини різняться на величину, близьку до $\lambda/4$. Таким чином, реалізується гістерезисна петля, аналогічна кривій, наведених на рисунку 1.22.

Проте реалізація таких пристроїв із «чистою» оптичною бістабільністю проблематична, оскільки істотні зміни показника заломлення вимагають значних потужностей лазерного джерела (близько до 1 МВт/см^2). Вийти з цієї ситуації та створити бістабільні елементи, які

працюють за відносно невеликих потужностей дозволяє гібридна технологія. Для цього як нелінійне середовище використовують електрооптичний матеріал. Частина випромінювання на виході елемента відводиться на фотоприймач 4 (див. рис. 1.23). Після цього електричний сигнал підсилюється та подається на керувальні електроди. За рахунок цього показник заломлення середовища 2 додатково змінюється.

Зауважимо, що сучасна технологія дозволяє створити такі пристрої в планарному виконанні у вигляді ОІС.

На рисунку 1.22 зображений бістабільний елемент, виконаний на основі зв'язаних хвильоводів. За малої інтенсивності довжина активної ділянки Х-розгалужувача менша, ніж довжина зв'язку. Отже, світлова хвиля поширюється як у каналі, Б так і в каналі А. Сигнал із виходу каналу Б надходить на фотоприймач 1 та через підсилювач 2 подається на керувальні електроди. За зростання інтенсивності в результаті дії світла відбувається зменшення довжини зв'язку. Відповідно дедалі більша частина світлового потоку перекачується в канал Б. Проте

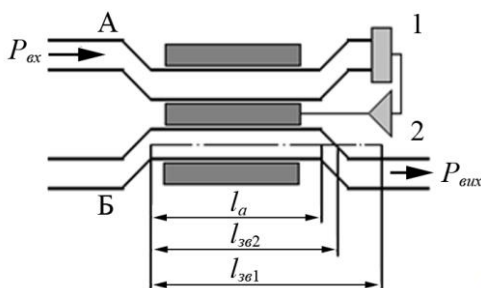


Рисунок 1.22 – Бістабільний елемент, виконаний на основі зв'язаних хвильоводів: 1 – фотоприймач; 2 – підсилювач; А, В – канали поширення світлової хвилі

параметри системи вибрані таким чином, що ще тривалий час інтенсивність у каналі А зростає в абсолютних одиницях виміру. Такий процес буде відбуватися до того часу, поки співвідношення між довжиною активної ділянки й довжиною зв'язку не стане близьким до одиниці та завдяки зменшенню частки інтенсивності, яка залишається в каналі А, сигнал на фотоприймачі не перестане зростати. Водночас зростання інтенсивності в каналі Б відбувається значно швидше, ніж зростання цієї величини на вході ОІС, загасання інтенсивності в цьому каналі відбувається з певною затримкою.

Наступний пристрій виконаний на основі нелінійного хвильоводу і ґратчастого елемента зв'язку (рис. 1.23). За малих інтенсивностей $P_{вх}$ пучок $P_{зб}$ не вводиться у хвильвід, оскільки кут дифракції в середовищі хвильоводу не відповідає напрямку на хвильовідні моди. За зростання вхідної інтенсивності показник заломлення хвильовідного шару починає змінюватися, що зі свого боку призводить до зміни кута дифракції пучка $P_{зб}$.

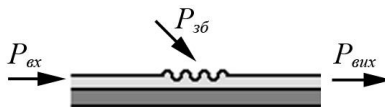


Рисунок 1.23 – Схема пристрою, виконаного на основі нелінійного хвильоводу і ґратчастого елемента зв'язку

Поступово кут дифракції стає близьким до кута, під яким поширюється мода, а інтенсивність сигналу в середині хвильоводу (і на виході ОІС) починає швидко зростати. За зменшення вхідної інтенсивності вихідна поводить себе так само, як і в двох попередніх випадках. Для забезпечення роботи такого елемента бістабільних

пристроїв на низьких інтенсивностях може також бути використана гібридна технологія з організацією електронної ланки додатного оберненого зв'язку.

1.5 Аналогово-цифрові перетворювачі

Основою інтегрально-оптичного аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) є матриця модуляторів інтерференційного типу (рис. 1.24 а). Випромінювання від лазера з частотою дискретизації f_d подається на вхід ОІС. Аналоговий сигнал U подається на керувальні електроди (А) матриці інтерферометрів. Зауважимо, що в кожного наступного інтерферометра довжина їх удвічі менша.

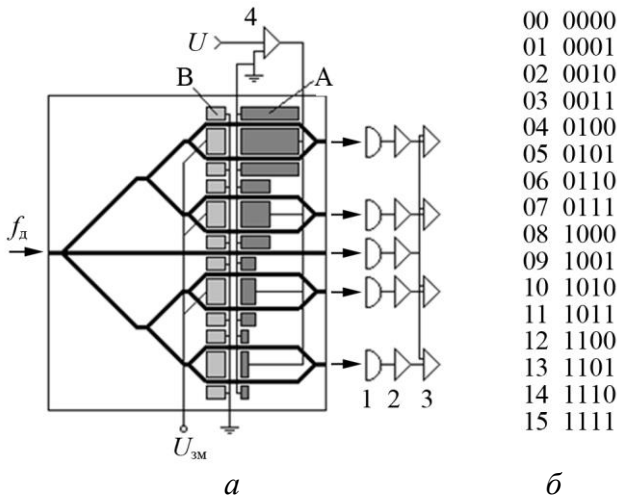


Рисунок 1.24 – Матриця модуляторів інтерференційного типу (а) та коди, що формуються вихідними елементами ОІС (б)

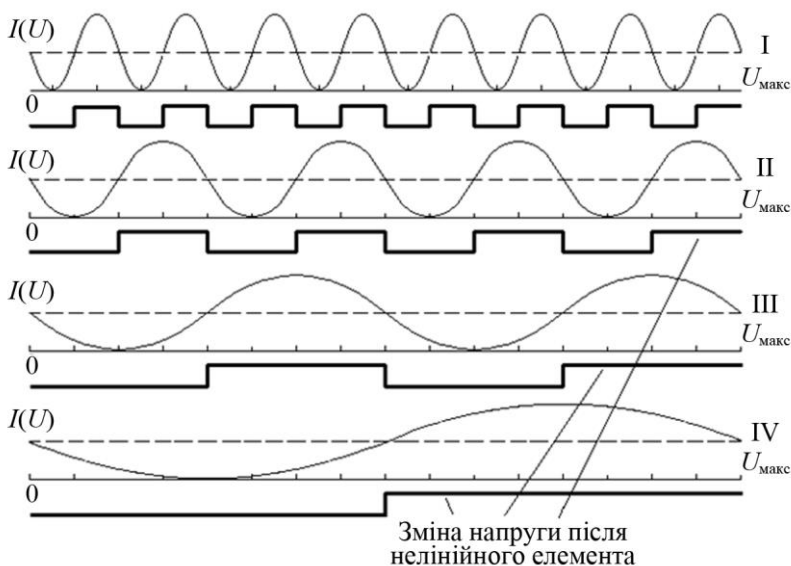


Рисунок 1.25 – Модуляція інтенсивності на інтерферометрах залежно від напруги

Отже, одна й та сама напруга призводить до удвічі меншої зміни показника заломлення. Як наслідок, удвічі менше змінюється різниця фаз. Модуляція інтенсивності на інтерферометрах залежно від напруги наведена на рисунку 1.25.

На виході інтерферометрів розміщені приймачі та нелінійні елементи, які спрацьовують по деякому пороговому рівню, що позначений на рисунку 1.25 пунктиром. Пороговий рівень задається опорним сигналом, який формується світловим потоком, що не пройшов через інтерферометри. Тоді на виході такої схеми будемо мати послідовність імпульсів частотою f_d та величиною U , яка визначається згідно з рисунком 1.25 (товсті лінії).

Початкова різниця фаз в усіх інтерферометрах встановлюється такою, що дорівнює величині $\pi/2$.

Для цього в конструкції АЦП передбачається початкове регулювання інтерферометрів за допомогою напруги $U_{зм}$, яка подається на електроди (В). На виході системи встановлено компаратор. Отже, вихідними елементами ОІС формується код згідно з таблицею, зображеною на рисунку 1.24 б.

РОЗДІЛ 2

ЛАЗЕРИ ЯК СИСТЕМИ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Квантова електроніка – це галузь електроніки, присвяченої теорії та практиці створення приладів і пристроїв посилення й генерації електромагнітних коливань, що базуються на використанні ефекту вимушеного випромінювання в нерівноважних квантових системах. Одним із прикладних напрямків розвитку квантової електроніки стали лазерні технології, що пов'язані з вивченням властивостей лазерного випромінювання з метою створення оптичних квантових генераторів (лазерів) для розв'язування прикладних задач.

На сьогодні лазерні технології набули широкого практичного використання в метрології, технології оброблення матеріалів, хімічній технології та хімічному аналізі, моніторингу довкілля, космічній техніці, медицині, інтегральній і волоконній оптиці, інформаційних системах тощо. Відмінною рисою лазерних технологій, незалежно від галузі застосування, є висока продуктивність процесів та якість виробів, економічність та екологічність.

Лазерні технології можуть бути застосовані під час роботи з будь-якими матеріалами: металами, напівпровідниковими, діелектричними (пластмаси, кераміки, стекла тощо) та навіть біологічними матеріалами. Водночас необхідно знати:

1) які фізичні процеси виникають за взаємодії лазерного випромінювання з різними типами матеріалів залежно від їх структури та властивостей;

2) основні параметри технологічних лазерів та лазерного випромінювання;

3) які оптичні системи (об'єктиви, дзеркала, сканери та системи, що керують діафрагмами) необхідно

застосувати для формування лазерного променя заданих розмірів і форми.

2.1 Основи генерації лазерного випромінювання

Оптичний квантовий генератор або лазер (аббревіатура від «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», тобто підсилення світла в результаті вимушеного (стимульованого) випромінювання) – пристрій, що генерує електромагнітне випромінювання у вигляді спрямованого висококогерентного монохроматичного пучка.

Лазер – пристрій, що перетворює різні види енергії (електричну, світлову, хімічну, теплову) на енергію когерентного випромінювання оптичного діапазону.

На практиці найбільш широко використовуються лазери, що генерують оптичне випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 мкм (ультрафіолетовий діапазон) до 10 мкм (інфрачервоний діапазон).

До основних характеристик лазерного випромінювання відносять:

– *монохроматичність* – лазерне випромінювання, що є потоком фотонів, які виділяються джерелом випромінювання та мають практично однакову довжину хвилі (частоту);

– *когерентність* – узгоджене проходження в часі та просторі декількох хвильових процесів, що виявляється за їх підсумовування. Теоретично лазерне випромінювання можна сфокусувати на пляму, діаметр якої дорівнює довжині хвилі. Таким чином можна отримати дуже високу густину енергії;

– *спрямованість* – визначає розходження світлового пучка в просторі і характеризується плоским

або тілесним кутом, у межах якого поширюється велика частина випромінювання. Кут розходження здебільшого не перевищує часток кутової хвилини, а це означає, що енергія може передаватися променем на великі відстані та фокусуватися на ділянках поверхні, що мають розміри 10–100 мкм;

– *яскравість* характеризує потужність лазерного випромінювання, що випускається з одиниці поверхні в області одиничного тілесного кута в напрямі, перпендикулярному до випромінювальної поверхні.

Розглянемо фізичні основи взаємодії випромінювання з речовиною. Відомо (з квантової механіки), що енергія елементарних частинок в ансамблі може набирати лише цілком певних дискретних значень, тобто займати певні енергетичні рівні або енергетичні стани. Перехід частинки з одного енергетичного рівня на інший можливий лише за умови, що цей перехід дозволений законами квантової механіки. Дозволений перехід із низького рівня E_1 на вищий рівень E_2 частинка може зробити лише отримавши ззовні необхідну енергію ΔE . Зворотний перехід із рівня E_2 на рівень E_1 супроводжується виділенням кванта енергії ΔE . Ця енергія може виділитися у вигляді фону (безвипромінювальний перехід), що сприймається, наприклад, кристалічною ґраткою твердого тіла, або у вигляді фотона (випромінювальний перехід).

Розподіл частинок енергетичними рівнями підлягає законам квантової статистики, що має стосовно частинок із півцілим спіном (ферміони) назву статистики Фермі – Дірака і стосовно частинок із цілочисловим спіном, зокрема й нульовим (бозони), – статистики Бозе – Ейнштейна: $S = 0, h, 2h, \dots$ (до бозонів відносять фонони і фотони, а до ферміонів – електрони, протони, нейтрони).

Розподіл кількості частинок на різних енергетичних рівнях показаний на рисунку 2.1 *а*. За певної температури T_1 ймовірна кількість частинок на заданому енергетичному рівні E_i буде дорівнювати N_i , де $i = 1, 2$ та ін.

Переходи частинок у системі з одного енергетичного рівня на вищий енергетичний рівень можуть відбуватися, наприклад, за підвищення температури, за рахунок отримання додаткової теплової енергії (рис. 2.1 *б*). За умови підвищення температури системи ($T_2 > T_1$) відбувається зміна характеру функції розподілу $F(E)$ (вона описується крутішою експонентою). Якщо температура T_2 не змінюється, то система залишається в новому стаціонарному стані.

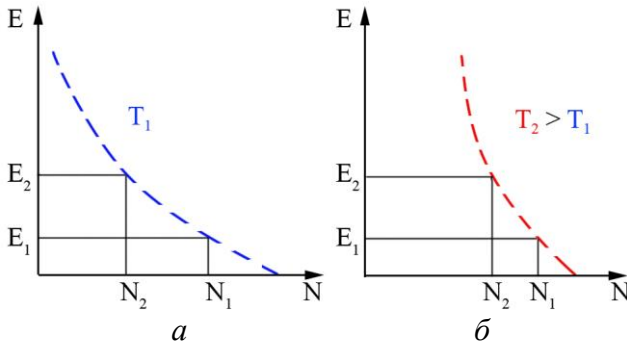


Рисунок 2.1 – Розподіл кількості частинок на різних енергетичних рівнях

Зміна функції розподілу частинок по енергетичних станах може відбуватися і в результаті короткочасної дії збудливого чинника (додаткової енергії ззовні). Після припинення дії збудливого чинника система прагне повернутися в початковий стан, якщо лише переходи частинок на нижчі рівні не заборонені законами квантової

фізики. Перехід частинки на нижчий енергетичний рівень, тобто у не збуджений стан відбувається через інтервал часу τ , який отримав назву середнього часу життя на даному енергетичному рівні. Такий перехід отримав назву *спонтанного переходу*, а випромінювання, яке виникає в цьому разі, – *спонтанного випромінювання*.

Загалом існують три можливі процеси взаємодії квантових систем та електромагнітного випромінювання, які схематично подані на рисунку 2.2.

Принцип роботи лазера базується на використанні індукованого (*вимушеного випромінювання*) світла системою збуджених атомів, іонів, молекул або інших частинок речовини (*активного середовища*), розміщених в оптичному резонаторі. Переходи частинок у системі з одного енергетичного рівня на інший можуть відбуватися під дією зовнішнього електромагнітного поля. У разі якщо фази коливань зовнішнього магнітного поля і частинки синфазні, відбувається процес індуктивного поглинання.

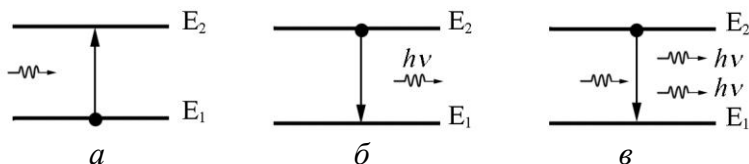


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення процесів взаємодії випромінювання з речовиною: поглинання (а), спонтанне випромінювання (б), вимушене випромінювання (в)

Індуковане поглинання – процес, який виникає за поглинання частинкою кванта енергії і супроводжується переходом на вищий енергетичний рівень. Водночас величина енергії зовнішнього поля буде зменшуватися на величину енергії поглиненого кванта.

Індуковане (вимушене) випромінювання спостерігається під час переходів між певними енергетичними рівнями атомної або молекулярної системи. Для генерації вимушеного випромінювання необхідно забезпечити інтенсивне «заселення» одного або декількох верхніх енергетичних рівнів, тобто забезпечити т. зв. «інверсну населеність».

Інверсна населеність – стан системи, за якого більша частина електронів (атомів, молекул) перебуває на верхніх енергетичних рівнях, із яких починається флуоресцентний перехід (надлишкова концентрація збуджених мікрочастинок).

Для генерації лазерного випромінювання необхідно створити інверсію населеностей за рахунок зміни теплової рівноваги системи, тобто здійснити «накачування» активного елемента. Це досягається, наприклад, опроміненням системи додатковим світлом зовнішнього джерела. У результаті індукованої взаємодії фотона з атомом або молекулою з'являються два фотони, що мають однокову частоту та поширюються в одному напрямку, тобто спостерігається підсилення інтенсивності падаючого світла.

З метою підсилення випромінювання, тобто для збільшення кількості збуджених частинок, що беруть участь у генеруванні, збільшують розміри активного середовища та використовують *резонаторну систему*, що складається з двох дзеркал: непрозорого (повністю відбиває світлові промені) та напівпрозорого (частково відбиває світлові промені). Загальна оптична вісь дзеркал виділяє в просторі напрямок, у якому поширюється лазерний промінь (рис. 2.3).

Необхідно зазначити, що реалізувати інверсну населеність системи, використовуючи лише два енергетичні рівні, неможливо. Під час опромінювання

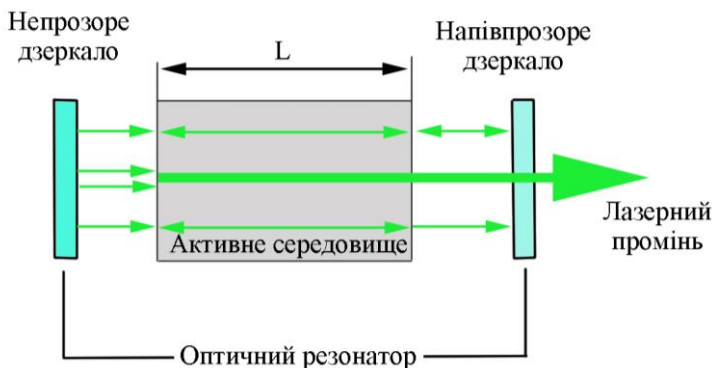


Рисунок 2.3 – Загальна схема пристрою лазера

такої системи зовнішнім полем достатньої інтенсивності переважатимуть переходи частинок із рівня E_1 на рівень E_2 до того часу, поки кількість частинок на цих двох рівнях не стане однакою. Після цього відбудеться насичення переходу між рівнями E_1 та E_2 . Унаслідок цього система перестане поглинати енергію поля, оскільки кількість переходів вгору і вниз буде однією й такою самою.

Для отримання інверсної населеності у квантовій електроніці застосовують різні методи. Один із таких методів ґрунтується на використанні в системі трьох енергетичних рівнів (рис. 2.4).

Якщо дану систему опромінити електромагнітним полем із частотою ν_{1-3} , то почнеться перехід частинок із рівня E_1 на рівень E_3 . Цей процес проходитиме до насичення переходу 1-2, коли кількість частинок на рівнях E_1 та E_3 виявиться однакою.

Водночас на переході 3-2 (рис. 2.4 б) або 2-1 (рис. 2.4 в) залежно від розміщення рівнів виникне інверсія населеностей. Під час опромінювання цієї системи електромагнітним полем із частотою ν_{3-2} або з

частотою ν_{2-1} буде спостерігатися індуковане випромінювання. Цей метод отримав назву *методу енергетичного накачування*.

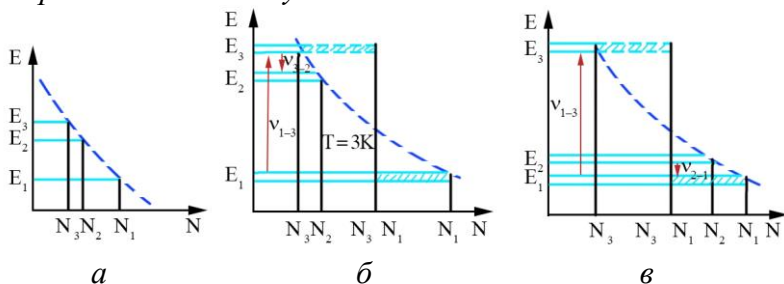


Рисунок 2.4 – Розподіл частинок у трирівневій системі:
в рівноважному стані (а), за наявності накачування
підсилення можливе на частоті ν_{3-2} ($N_3 > N_2$) (б);
підсилення можливе на частоті ν_{3-2} (в)

Також використовується і чотирирівнева система. Особливістю такої системи є те, що канали накачування і генерації є повністю розділеними, що дозволяє отримати інверсію населеностей за мінімальних рівнів накачування.

У результаті порушення рівноважного стану квантової системи, що забезпечує негативну різницю населеностей, виникає стан, який називають інверсією населеностей рівнів.

Окрім енергетичних, лазерне випромінювання має набір спектрально-просторових характеристик і параметрів, визначених властивостями оптичного резонатора. Завдяки цьому лазерне випромінювання характеризується надзвичайно високим ступенем монохроматичності, когерентності, спрямованості та яскравості.

2.2 Основні параметри та режими роботи лазерів

Лазери можуть працювати в таких режимах:

1) безперервному (оптична енергія випромінюється впродовж певного інтервалу часу);

2) імпульсному (генеруються одиночні імпульси або такі, що регулярно повторюються, імпульси лазерного випромінювання). Водночас розрізняють лазери періодичної (частота повторювання імпульсів задається схемою керування) та неперіодичної (імпульси генеруються в момент часу, який задає оператор) дії;

3) імпульсно-періодичному;

4) одномодовому (випромінювання має однорідний поперечний розподіл поля);

5) багатомодовому (реалізується суперпозиція декількох поперечних мод, що генеруються одночасно). У цьому режимі реалізується найбільша потужність випромінювання;

6) одночастотному (випромінювання має лише одну спектральну лінію, яка відповідає поздовжній моді резонатора).

До основних параметрів відносять:

1) енергетичні параметри: потужність випромінювання (для безперервних лазерів); енергія випромінювання (для імпульсних лазерів); середня потужність випромінювання (для імпульсно-періодичних); довготривала і короткочасна нестабільність потужності лазерного випромінювання;

2) просторово-енергетичні параметри: діаметр і розходження лазерного випромінювання, діаграма спрямованості, розподіл інтенсивності в поперечному перерізі;

3) тимчасові: тривалість і частота повторювання імпульсів;

4) спектральні: довжина хвилі (частота) випромінювання; напівширина спектральної лінії випромінювання, модовий склад випромінювання, нестабільність частоти в часі;

5) експлуатаційні: коефіцієнт корисної дії лазера, споживана потужність та потужність системи накачування, час готовності лазера до роботи, маса та габаритні розміри, термін служби, вартість, витрати води і газів.

2.3 Класифікація лазерів

Різноманітність лазерів пояснюється застосуванням різних типів активних елементів, різних способів накачування, різних значень вихідної потужності, довжини хвилі, а також різноманітністю технологічних завдань, що реалізуються за допомогою лазера.

У загальному випадку всі існуючі типи лазерів можна класифікувати за такими ознаками:

- агрегатним станом активного середовища: газові, рідинні, твердотільні напівпровідникові;
- за часовим режимом генерації: безперервні, імпульсні та імпульсно-періодичні;
- за частотним режимом генерації: одномодовий, багатомодовий і одночастотний;
- за рівнем потужності, що генерується;
- за експлуатаційними параметрами.

Розглянемо більш детально деякі типи лазерів за агрегатним станом активного середовища.

Газові лазери. Як активне середовище газових лазерів можуть бути використані всі газоподібні за кімнатної температури елементи, велика кількість елементів у пароподібному стані (наприклад, пари металів) та велика кількість молекул. У разі створення інверсії

населеності широко використовується ударне збудження випромінювальних станів під час зіткнення атомів і молекул з електронами у газових розрядах і електронних пучках.

Розглянемо конструкцію газового лазера на прикладі He-Ne-лазера, який є найбільш поширеним газовим лазером на атомних переходах. Цей тип лазерів широко використовується на різних етапах виготовлення елементної бази мікро- і наноелектроніки, у вимірювальній техніці, голографії тощо. Серед характерних особливостей He-Ne-лазера можна виділити можливість працювати в безперервному режимі з малими вихідними потужностями; надійність і простота конструкції, а також невеликі габаритні розміри.

На рисунках 2.5 та 2.6 подана конструкція He-Ne-лазера та схема рівнів атомів неону та гелію, які беруть участь у генерації лазерного випромінювання відповідно.

У He-Ne-лазері можлива генерація на численних переходах між електронними рівнями атомів неону.

Найбільшого практичного застосування набули лазери з довжиною хвилі 632,8 нм. Створення інверсної населеності відбувається в електричному газовому розряді, водночас заселення верхніх рівнів переважно відбувається за рахунок недружніх зіткнень із метастабільними



Рисунок 2.5 – Конструкція He-Ne-лазера

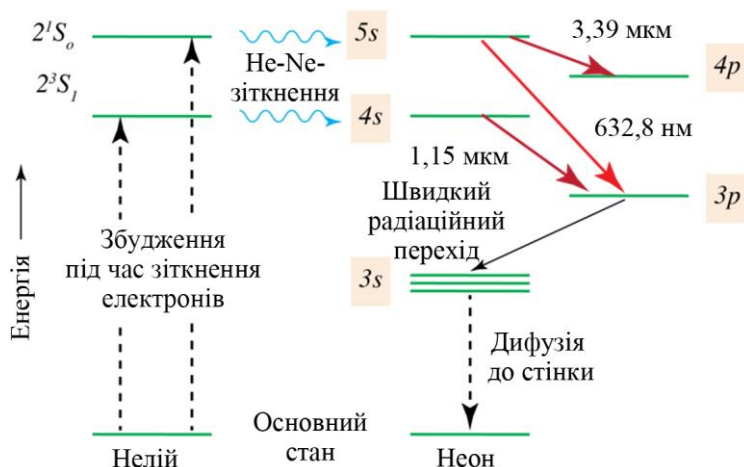


Рисунок 2.6 – Схема рівнів атомів неону та гелію, які беруть участь у генерації лазерного випромінювання

атомами гелію, які збуджуються під час зіткнення з електронами.

Властивості He-Ne-лазера типові для газових лазерів і характеризуються великою довжиною когерентності, високою монохроматичністю, гарною якістю пучка. Потужність гелій-неонових лазерів становить 0,5–100 мВт.

Клас імпульсних газових лазерів, які випромінюють в ультрафіолетовій частині спектра в діапазоні довжин хвиль 157–351 нм, об'єднується спільною назвою ексимерні лазери. Як активне середовище використовують інертні гази (аргон, ксенон або криптон), галогени (фтор або хлор) та буферні гази (неон або гелій).

На рисунку 2.7 наведена схема ексимерного лазера, а на рисунку 2.8 – схема типової потенціальної кривої молекули галогеніду інертного газу в збудженому і основному станах. Верхній лазерний рівень із часом життя

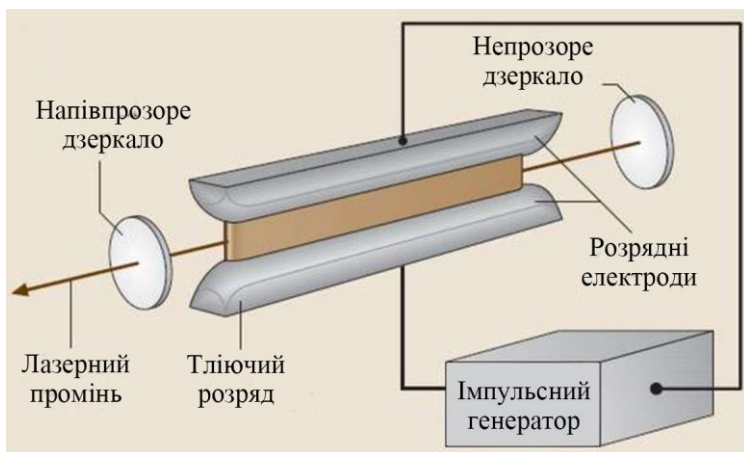


Рисунок 2.7 – Конструкція ексімерного лазера

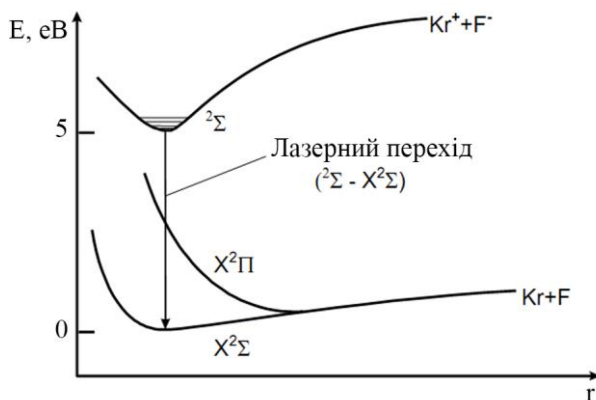


Рисунок 2.8 – Схема потенціальних кривих ексімерних молекул

декілька наносекунд належить збудженому електронами галогеніду інертного газу. Емісія лазерного випромінювання відбувається за переходу з верхнього лазерного рівня, який відповідає збудженому галогеніду

інертного газу.

Серед лазерів видимого та ультрафіолетового діапазонів ексімерні лазери є лідерами з погляду практичного застосування в нелінійній оптиці, фотохімії, фотолітографії, технології як джерело накачування переналаштованих рідинних лазерів, а також у дослідженнях із лазерного розігрівання.

До групи молекулярних газових лазерів відносять CO_2 -лазери. Ці лазери найпоширеніші серед газових лазерів, що випромінюють в інфрачервоній області. Генерація відбувається на переході між двома коливальними рівнями молекули CO_2 , а N_2 і He додаються до складу газу для збільшення коефіцієнта корисної дії приладу. Ці лазери відносять до одних із найпотужніших (приблизно 80 кВт) та найбільш ефективних. Довжина хвиль генерації становить 10,6 та 9,4 мкм.

Існують різні конструкції CO_2 -лазерів. Одна з них наведена на рисунку 2.9. Однією з основних вимог до ефективної роботи CO_2 -лазерів є недопустимість перегрівання лазерної суміші вище за температуру 600–700 К, оскільки це призводить до погіршення умов розселення нижнього лазерного рівня. У зв'язку з тим обов'язковою умовою за конструювання лазерів цього типу є реалізація відведення тепла. Відведення тепла від робочої суміші лазера можна здійснити за рахунок дифузії тепла до стінки розрядної охолоджуваної трубки або заміною нагрітої порції газу на нову.

Схема енергетичних рівнів основних електронних станів молекул CO_2 та N_2 , які беруть участь у генерації лазерного випромінювання, наведена на рисунку 2.10.

Напівпровідникові лазери. Серед різних типів лазерів напівпровідникові лазери є значно поширеними, зокрема і під час виготовлення елементної бази електроніки.

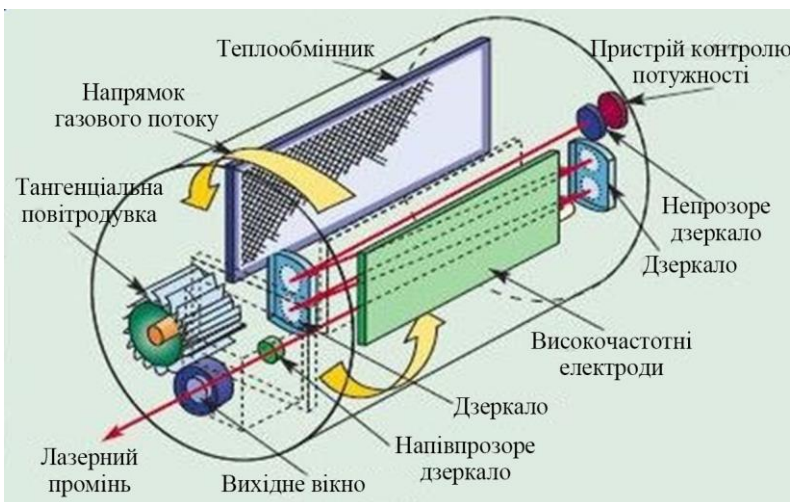


Рисунок 2.9 – Конструкція ексимерного лазера

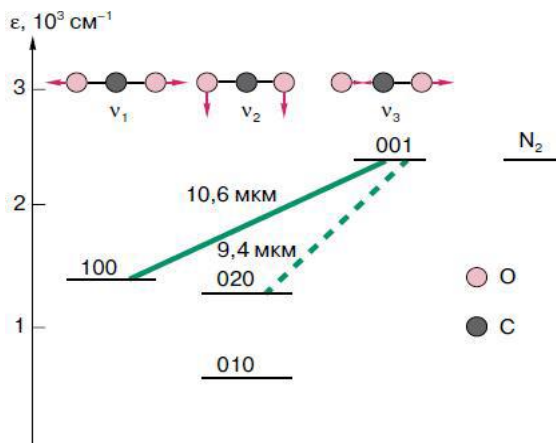


Рисунок 2.10 – Схема енергетичних рівнів основних електронних станів молекул CO_2 та N_2 , які беруть участь у генерації лазерного випромінювання

Переваги цього типу лазерів:

– перекривають широкий діапазон хвиль (від

- ультрафіолетового до дальнього інфрачервоного);
- високий коефіцієнт корисної дії (до 80 %);
 - низька напруга накачування;
 - малі габаритні розміри;
 - висока надійність.

Розроблені охолоджувані та не охолоджувані з різними схемами збудження напівпровідникові лазери на НІІ-матеріалах груп A^3B^5 (GaN, InP та ін.), A^4B^4 (PbS, PbTe та ін.), A^2B^6 (ZnO, CdS та ін.), A^3B^6 (GaSe; InSe та ін.). Найбільш поширені – *інжекційні напівпровідникові лазери*. У цьому типі лазерів інжекція нерівноважних носіїв заряду відбувається за пропускання струму через *p-n*-перехід у прямому напрямі. Розрізняють гомоструктурні (для створення *p-n*-переходу використовується один напівпровідник) і гетероструктурні (для створення *p-n*-переходу використовується декілька напівпровідників) інжекційні лазери.

Розглянемо принцип роботи гомогенного напівпровідникового інжекційного лазера.

Основним елементом інжекційного лазера є *p-n*-перехід. Дія лазера базується на тому, що за прямого зміщення електрони інжектуються в *p*-область, де відбувається їх випромінювальна рекомбінація з розміщеними там дірками. Для створення стану з інверсною населеністю потрібна велика концентрація дірок у валентній зоні, що досягається збільшенням концентрації легувальної акцепторної домішки. Для того щоб інжекція електронів у *p*-область перевищувала інжекцію дірок у *n*-область, необхідно, щоб концентрація донорної домішки в *n*-області була вищою за концентрацію акцепторної домішки в *p*-області. Таким чином, для отримання стану з інверсною населеністю в *p*-області необхідний високий ступінь легування

домішками обох областей p - n -переходу. Інверсна населеність досягається за великої густини прямого струму крізь діод (поріг генерації відповідає густині струму 1–4 кА/см², а за зниженої температури $\sim 10^2$ А/см²).

Конструкція напівпровідникового лазера наведена на рисунку 2.11. Випромінювачем є вузька частина p -області, що прилягає до p - n -переходу. Функцію дзеркал виконують грані напівпровідникового кристалу, який і є активною речовиною. Вимушене випромінювання відбувається паралельно p - n -переходу.

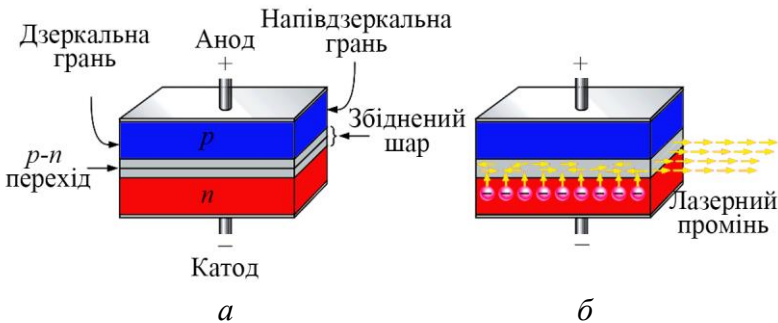


Рисунок 2.11 – Конструкція напівпровідникового інжекційного лазера (а) та принцип генерації лазерного випромінювання (б)

Гетерогенні інжекційні лазери були створені з метою зменшення порогової густини струму. Використання гетеропереходу дозволяє реалізувати односторонню інжекцію за слаболованого емітера лазерного діода та істотно зменшити пороговий струм.

Приклад конструкції інженкційного лазера на гетеропереході наведено на рисунку 2.12.

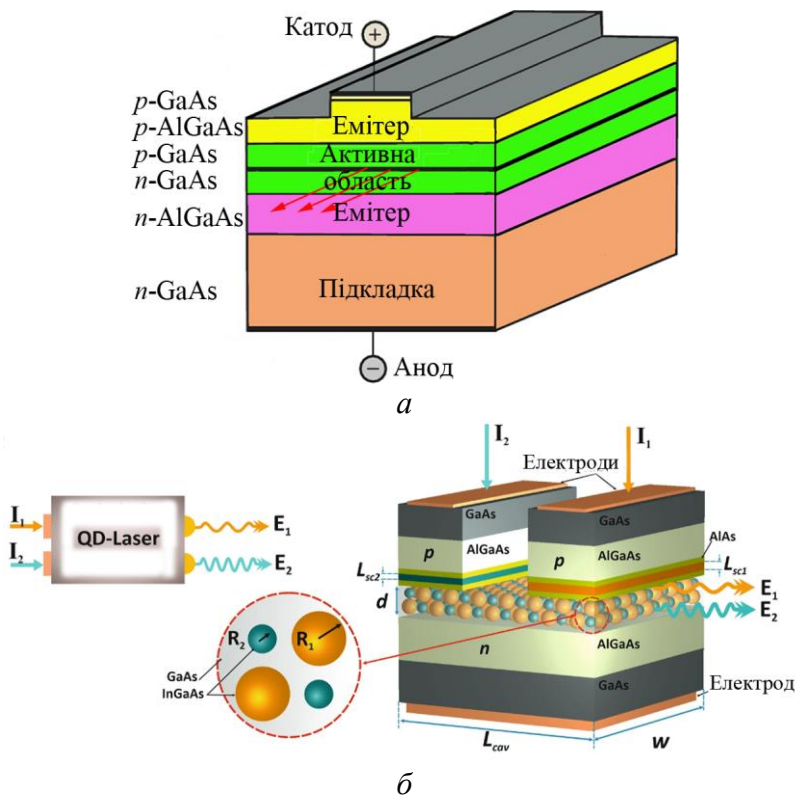


Рисунок 2.12 – Приклади конструкцій інжекційних напівпровідникових лазерів на гетеропереході (*a*) та на основі структур із надграткою (*б*)

На сьогодні вже створені напівпровідникові лазери на основі структур із надграткою. Такі прилади отримали назву гетеролазерів із квантовими ямами. Перевага лазерів із квантовими ямами полягає у високій квантовій ефективності, низькому пороговому струмі (1 мА та менше) та низькій чутливості до змін температури.

На рисунку 2.13 наведено приклад одного з типів напівпровідникових інжекційних лазерів.

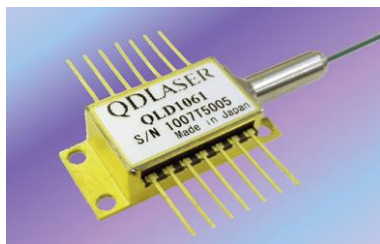


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд одного з типів напівпровідникових інжекційних лазерів

Твердотільні лазери

Активними центрами в лазерах цього типу є іони, які вводяться в кристалічну або аморфну матрицю. Серед матеріалів, які використовуються як активна речовина, найбільш широко використовуються іонні кристали неорганічних з'єднань фторидів (CaF_2 , LaF_3), оксидів (Al_2O_3) та складних з'єднань (CaWO_4 , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) з введеними іонами активних домішок рідкоземельних (Sm^{2+} , Dy^{2+} , Nd^{3+} та ін.), перехідних (Cr^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , V^{2+}) елементів. Концентрація активних домішок у кристалі становить від 0,05 до декількох відсотків. Активні елементи (кристалічна основа + активні іони) виготовляють у вигляді стрижнів із відполірованими торцевими поверхнями, з нанесеними дзеркальними покриттями, а також з обробленою поверхнею для ефективного введення випромінювання накачування.

Випромінювання накачування створюється в імпульсному або безперервному режимах за допомогою ламп різної форми (у формі стрижня або спіралі) і газового наповнення (ксенонові, криптонові, ртутні високого тиску, галогенові), а також за допомогою лазерів інших типів. Найбільш ефективним є накачування саме за допомогою лазера. Основна відмінність цих лазерів від лазерів із

ламповим накачуванням полягає в значно вищій (на порядок) ефективності перетворення випромінювання потужних лазерних діодів, що дозволяє зменшити енергоспоживання та позбутися зовнішнього водяного охолодження.

Твердотільні лазери генерують випромінювання у таких спектральних областях: 0,3–3 мкм в імпульсному режимі та 0,69–2,6 мкм у безперервному режимі. Перевагою оптичних квантових генераторів даного типу є те, що більшість із них працює за чотирирівневою схемою, в якій легко здійснити генерацію за кімнатної температури у безперервному режимі.

Найбільш практичного застосування набули твердотільні лазери, в яких за активну речовину використовується скло, активоване іонами неодиму. Цей лазер випромінює в інфрачервоному діапазоні ($\lambda = 1,06$ мкм). Як активні іони в скло, що використовується як матриця, вводяться іони Nd^{3+} з масовим вмістом 0,5–8 %. Nd-лазер також працює за чотирирівневою схемою. Оскільки нижній лазерний рівень майже не заселений, то цей тип лазера характеризується відносно низькою пороговою потужністю (200 Вт). Це дозволяє реалізувати безперервний режим роботи. Для оптичного накачування найчастіше використовуються стрижневі лампи з еліптичним відбивачем та напівпровідникові лазерні діоди.

Унаслідок особливої структури активної речовини лазери на неодимовому склі найкраще підходять для генерації пікосекундних імпульсів у режимі синхронізації мод. У цьому режимі досягаються максимальні потужності 10^{12} – 10^{13} Вт.

Переваги Nd-го скляного лазера: великі розміри стрижнів, простота виготовлення, висока оптична

однорідність.

Недоліки Nd-го скляного лазера: низька теплопровідність, високий порівняно до іонних кристалів коефіцієнт термічного розширення скляної матриці, що обмежує частоту повторення імпульсів.

Nd-лазери на алюміній-ітрієвому гранаті $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Nd:YAG) характеризується тим, що за відносно простої конструкції (рис. 2.14) досягаються високі потужності в імпульсному режимі за високої частоти чергування імпульсів. Цей лазер працює за чотирирівневою схемою (рис. 2.15), тому характеризується відносно низькою пороговою потужністю накачування. Алюміній-ітрієвий гранат характеризується високою теплопровідністю, великою твердістю і гарними оптичними характеристиками. Кристал гранату – це матриця, яка може бути активована рідкоземельними елементами (ітербій, ербій, гольмій, європій тощо). Фізичний принцип отримання інверсії населеностей у цьому лазері збігається з лазером на неодимовому склі. Відмінність полягає у використанні кристалічної матриці, а не аморфної (скляної). Вміст домішки Nd^{3+} становить 0,5–3,5 %.

Збудження середовища відбувається за допомогою оптичного накачування:

- ксеноновими імпульсними лампами з циліндричним відбивачем (рис. 2.14) в імпульсному режимі;

- галогеновими лампами і криптоновими дуговими лампами з еліптичними відбивачами в безперервному режимі.

Під час створення неодимових лазерів реалізовані всі характерні методи керування параметрами лазерного випромінювання, розроблені у квантовій електроніці. Широко використання набули режими модульованої добротності та синхронізації (самосинхронізації) мод.

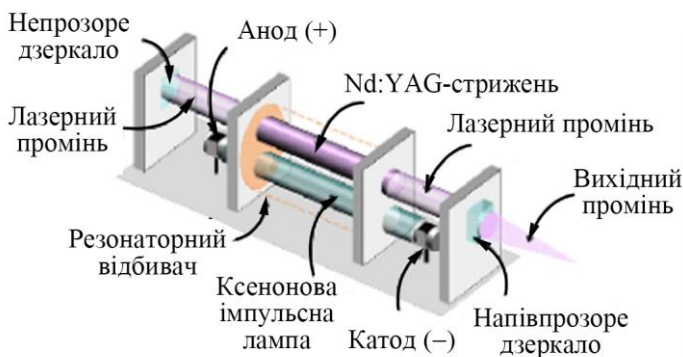


Рисунок 2.14 – Конструкція Nd:YAG-лазера

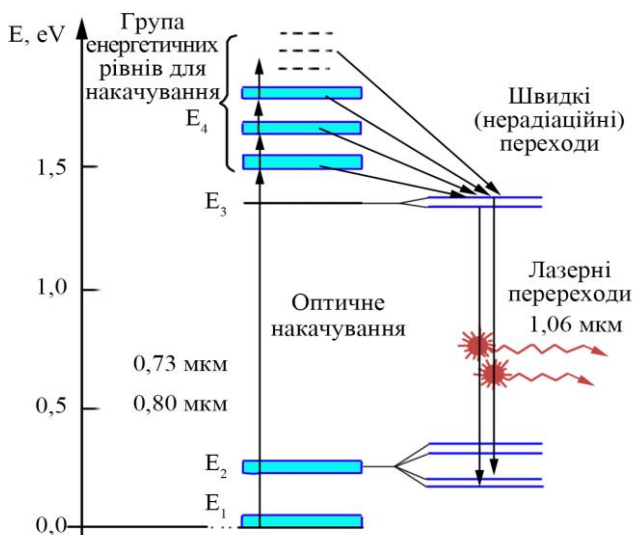


Рисунок 2.15 – Чотирирівнева схема енергетичних рівнів основних електронних станів Nd:YAG, які беруть участь у генерації лазерного випромінювання

Галузі застосування неодимових лазерів:

– технологія виготовлення елементної бази електроніки;

- медицина;
- метеорологія;
- дальнометрія;
- лазерний термоядерний синтез;
- фізичні дослідження.

Волоконні лазери. Логічним розвитком твердотільних лазерів стали волоконні лазери, де як системи накачування використовують лазерні діоди. Ці джерела були розроблені для телекомунікаційних систем волоконного зв'язку, де їх використовують як підсилювачі сигналів. У цьому разі кристал, у якому відбувається генерація корисного лазерного випромінювання, може мати розміри до декількох десятків метрів та є серцевиною волокна діаметром декілька мікрон, яка міститься всередині кварцового волокна. Випромінювання діодів направляється у кварцове волокно, та по всій його довжині відбувається оптичне накачування серцевини.

Застосування лазерного скла як активного елемента є досить ефективним, оскільки на відміну від кристалів лазерні стекла мають неупорядковану внутрішню структуру. Поряд зі склоутворювальними компонентами SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , BeF_2 до їх складу входять Na_2O , K_2O , Li_2O , MgO , CaO , BaO , Al_2O_3 , Sb_2O_3 . Як активні домішки зазвичай вводяться іони неодиму Nd^{3+} , а також використовується гадоліній Gd^{3+} , ербій Er^{3+} , гольмій Ho^{3+} і ітербій Yb^{3+} . Концентрація іонів неодиму Nd^{3+} у стеклах досягає 6 %. У лазерних стеклах досягається висока концентрація активних частинок. Іншою перевагою таких стекол є можливість виготовлення активних елементів великих розмірів і практично будь-якої форми з дуже високою оптичною однорідністю. До недоліків використання стекол як лазерних матеріалів необхідно віднести відносно широку смугу генерації і низьку теплопровідність, яка перешкоджає швидкому відведенню

тепла за потужного оптичного накачування.

Сучасні волоконні лазери мають потужність до 30 кВт, невисоку собівартість, компактні, зручні для сполучення з магістральними волокнами за мінімуму втрат, успішно застосовуються для вирішення різноманітних завдань лазерного оброблення матеріалів. Вони є практично ідеальними перетворювачами світлової енергії лазерних діодів накачування в лазерне випромінювання з ефективним коефіцієнтом корисної дії, який досягає 65 %.

Основою волоконних лазерів є активне волокно, тобто волокно, леговане рідкоземельними елементами. Перші волоконні лазери були створені на кварцових волокнах, легованих іонами неодиму.

Лазерне волокно довжиною до декількох десятків метрів зазвичай складається з двох волокон (рис. 2.16):

- 1) центрального, яке має діаметр 400–600 мкм;

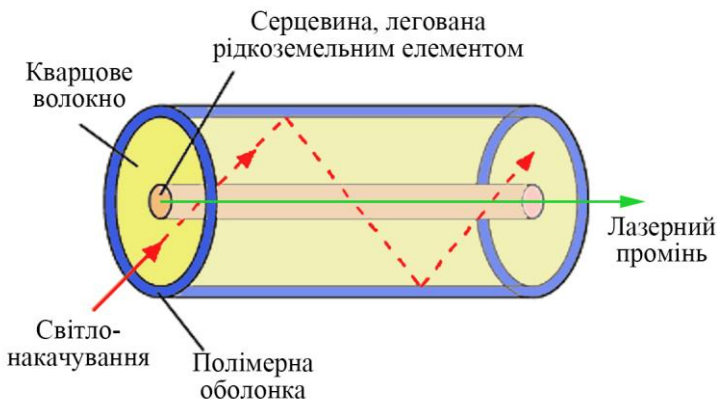


Рисунок 2.16 – Схема генерації лазерного випромінювання у волоконному лазері

- 2) внутрішнього, яке містить активні домішки, має діаметр декілька мкм і знаходиться всередині кварцового

(центрального) волокна.

Внутрішні стінки волокна покриті світловідбивним шаром, тому рухомий потік квантів зазнає багаторазового відбиття. Усі світлові хвилі, багаторазово відбиваючись, утворюють стоячу хвилю.

Довжина хвилі випромінювання визначається типом легувальних іонів, а ширина спектра генерації залежить від матеріалу, в який вони вводяться. Використовуючи різні рідкоземельні елементи як добавки і підбираючи склад волокна, можна отримати великий набір довжин хвиль, що генеруються, зокрема 1,3 і 1,5 мкм, а також перспективний діапазон середнього ІЧ-випромінювання – 2–3 мкм. Для збільшення потужності випромінювання волоконних лазерів необхідно збільшити концентрацію іонів легувальної домішки.

У волоконному лазері накачування здійснюється лазерними напівпровідниковими діодами з одномодовим випромінювання. Схема конструкції волоконного лазера наведена на рисунку 2.17. Випромінювання лазерних діодів накачування (8) вводиться у кварцове волокно (2), крізь яке здійснюється накачування активних іонів, на яких відбувається генерація лазерного випромінювання. На торцях волокна розміщується оптичний резонатор (два дзеркала, одне з яких – напівпрозоре). Крізь напівпрозоре дзеркало виходить ідеальний одномодовий лазерний пучок із рівномірним розподілом потужності, що дозволяє сфокусувати випромінювання на пляму малого розміру.

Загальну довжину волокна і кількість лазерних діодів вибирають, зважаючи на вимоги до потужності і ефективності. Крім того, необхідно зазначити, що завдяки такій властивості волоконних лазерів, як характер поляризації пучка, робить зручним і надійним керування

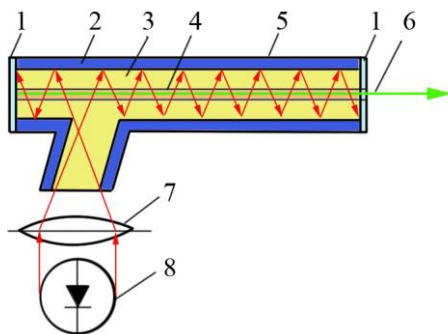


Рисунок 2.17 – Схема волоконного лазера: 1 – торцеве дзеркало; 2 – оптичне кварцове волокно; 3 – активоване світлопровідне волокно; 4 – світловідбивне покриття; 5 – захисна оболонка; 6 – лазерний промінь; 7 – фокусувальна лінза; 8 – світлодіод

цим випромінюванням за допомогою акустооптичних пристроїв і дозволяє реалізовувати багатопроменеві схеми запису зображень.

Оскільки оптичне накачування відбувається по всій довжині волокна, то відсутні такі властиві твердотільним лазерам ефекти, як:

- термолінза в кристалі;
- викривлення хвильового фронту внаслідок дефектів самого кристалу;
- нестабільність променя в часі тощо.

Також необхідно зазначити, що принципи побудови і роботи волоконного лазера гарантують високі експлуатаційні характеристики і роблять ці пристрої досконалими перетворювачами світлового випромінювання на лазерне.

2.4 Основні параметри лазерного випромінювання технологічних лазерів

Основою лазерних технологій є теплова дія світла, тому для їх реалізації зазвичай застосовують лазери, які одержали назву технологічних лазерів. До таких лазерів відносять ті, що здатні забезпечити нагрівання матеріалу до температури, за якої в неї відбуваються різні структурні та фізико-хімічні процеси (наприклад, зміни у структурно-фазовому стані матеріалу, хімічні реакції чи фізичні переходи, такі як плавлення, випарування тощо).

Серед основних параметрів технологічних параметрів необхідно виділити такі:

1 *Довжина хвилі випромінювання λ , мкм.*

Повинна відповідати області найбільшого поглинання матеріалу, тому підбирається залежно від його природи. Зауважимо, що для металів область найбільшого поглинання міститься у видимій частині спектра, для скла – в інфрачервоній, а для полімерів і пластмас – в ультрафіолетовій.

Поглинальна здатність матеріалу залежить від його оптичних характеристик: коефіцієнта відбиття R , коефіцієнта поглинання $A = 1 - R$, показника поглинання α . Глибина проникнення випромінювання δ – величина, обернено пропорційна до показника поглинання, тобто $\delta = 1/\alpha$.

2 *Потужність випромінювання P , Вт.*

Оскільки лазерне оброблення матеріалів пов'язане з тепловою дією випромінювання, то як критерій технологічних лазерів можна розглядати середню потужність випромінювання. Для сучасних лазерів цей параметр знаходиться в межах від декількох мВт до 1 МВт. Зважаючи на те, що технологічні лазери повинні

забезпечувати здатність нагрівати поверхню матеріалу до заданої температури, для більшості матеріалів достатньою є потужність $P \approx 10^3$ Вт, незалежно від того, в якому режимі працює лазер – безперервному чи імпульсному.

3 *Щільність потужності випромінювання безперервних та імпульсних лазерів q , Вт/м².*

Щільність потужності – це потужність P , поглинена одиницею площі плями фокусування S , тобто $q = P/S$. У сучасних лазерах реалізується щільність потужності випромінювання від 10^7 Вт/м² до 10^{15} Вт/м². У виключних випадках досягається величина $q = 10^{24}$ Вт/м².

4 *Тривалість дії випромінювання t , с.*

Визначає такі характеристики оброблення матеріалів, як порогова енергія процесу, глибина нагрітого шару, величина термомеханічних напружень, стабільність розміру опроміненої зони тощо. Для імпульсних лазерів тривалість дії випромінювання відповідає тривалості імпульсу ($\tau = 10^{-2}$ – 10^{-18} с), для безперервних лазерів – час ефективного впливу, який залежить від діаметра плями у фокусі d та швидкості сканування $V_{ск}$: $t = d/V_{ск}$.

5 *Енергія імпульсу E , Дж.*

Параметр імпульсних лазерів, що залежить від типу лазера, становить величину $E = 0,1$ – 1000 Дж.

6 *Питома поверхнева енергія W , Дж/м².*

Фізична величина, яка залежить від тривалості дії t та потужності P випромінювання в плямі фокусування, а також площі плями фокусування і визначається за співвідношенням $W = Pt/S$.

7 *Пікова потужність імпульсних лазерів $P_{п}$.*

Визначається за співвідношенням $P_{п} = E/\tau$ і сягає максимального значення – 10^{13} Вт.

8 *Частота проходження імпульсів f , Гц.*

Залежить від періоду проходження імпульсів T і

визначається за співвідношенням $f = 1/T$. Діапазон зміни величини f знаходиться в межах від 0,1 Гц до 10^3 Гц.

9 *Коефіцієнт корисної дії (ККД).*

ККД технологічного лазера – відношення потужності лазерного випромінювання до потужності збудження, що підводиться до випромінювача. Для твердотільних лазерів ККД становить 0,1 %. Для напівпровідникових і волоконних лазерів ККД становить десятки відсотків (60 % і більше).

10 *Кутова розбіжність променя θ , мрад.*

Визначається за співвідношенням $\theta = 12,2 \cdot \lambda/d$. Залежно від типу лазера кутова розбіжність променя θ змінюється від 0,2 мрад (газовий He-Ne-лазер) до 200 мрад (напівпровідниковий GaAs-лазер).

2.5 Фізика процесів поглинання лазерного випромінювання в матеріалах електроніки

По-перше, необхідно зазначити, що фізичні явища, які відбуваються під час поглинання сфокусованого лазерного випромінювання великої потужності, досить складні. По-друге, фізичні явища під час поглинання лазерного випромінювання залежать від:

- природи і властивостей матеріалу;
- густини і потужності поглинутого випромінювання;
- тривалості впливу лазерного променя на матеріал.

Застосування лазерних технологій в електроніці базується переважно на термічних ефектах поглинання лазерного випромінювання, серед яких необхідно виділити такі:

1) *випарування* – найбільш популярний процес, що є основою більшості промислових технологій будь-яких

матеріалів у мікроелектроніці, мікромеханіці й мікрооптиці. У цей час актуальними залишаються проблеми точності та якості;

2) *нагрівання* до температури розм'якшення (або плавлення) з подальшим деформуванням у в'язко-течучій фазі (доповнюється різними видами механічного впливу: витяжка, обертання тощо) застосовується для виготовлення ближньопольових оптичних зондів, медичного оптичного випромінювання;

3) *направлений локальний розігрів* – процес, який спричинює появу контрольованого поля напружень, а також керовану деформацію матеріалів, до того ж не лише з метою формоутворення, а й прецизійного складання та юстування мікромеханічних компонентів;

4) *пошаровий синтез тривимірних об'єктів* – процес, що реалізується за допомогою використання методу пошарового нарощування, зокрема, стереолітографія, селективне лазерне спікання і пошарове складання з листових матеріалів.

Лазерні технології можуть базуватися не лише на високій густині потужності, а й також і на великій густині фотонів, що важливо для нелінійних процесів (нелінійне поглинання у слабкопоглинальних середовищах) та у селективних технологіях (хімічній та біомедичній). Можуть застосовуватися сильні й надсильні електромагнітні поля в області фокусу пучка. Також останніми роками з'явилися такі технології, як маніпулювання мікрочастинками, атомно-молекулярне збирання, в яких використовується тиск світла.

Термічна дія поглиненого лазерного випромінювання поверхні металу призводить не лише до нагрівання, плавлення та випарування матеріалу, а й досить часто спричинює зміни у структурі та властивостях

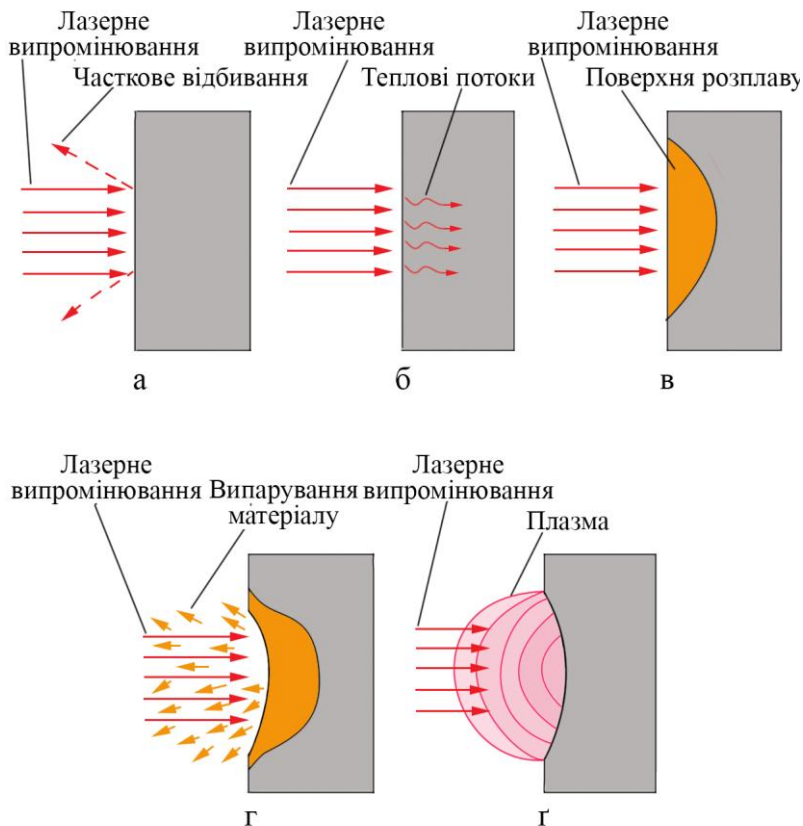


Рисунок 2.18 – Фізичні процеси, що виникають за взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом: падіння й часткове відбиття (а), поглинання і нагрівання (б), плавлення (в), випарування (г), утворення плазми (д)

матеріалу в точці оброблення, а також у зонах, суміжних із місцем впливу лазерного пучка. Характер змін залежить від властивостей оброблюваних матеріалів та від величини енергії і потужності поглиненого випромінювання.

Основною відмінністю між процесами поглинання лазерного випромінювання прозорих і непрозорих матеріалів є об'ємний, а не поверхневий процес поглинання. До особливостей проходження процесу поглинання лазерного випромінювання прозорими матеріалами необхідно віднести:

- велику порогову потужність поглиненого випромінювання, що спричинює руйнування матеріалу;

- появу оптичних явищ, таких як самофокусування лазерного пучка, вимушене розсіювання Бриллюєна, вимушене подвійне променезаломлення, акустичних явищ, таких як ультразвукова хвиля, фотопружність тощо.

Процес поглинання лазерного випромінювання у напівпровідниках проходить по-різному, залежно від довжини хвилі випромінювання, виду напівпровідника, домішок, орієнтації кристалографічних осей і стану поверхні напівпровідника. Механізми поглинання випромінювання напівпровідників пов'язані з певними видами поглинання:

- внутрішньозонне і міжзонне поглинання з утворення пар носіїв електрон – дірка, безвипромінювальна рекомбінація яких пов'язана з передаванням поглиненої енергії кристалічній ґратці зі збільшенням температури напівпровідника;

- поглинання в кристалічній ґратці з утворенням іонів, які можуть спричинити напруження і призводити до утворення мікротріщин у напівпровіднику.

Залежно від інтенсивності лазерного випромінювання можна виділити п'ять стадій його

взаємодії з речовиною (рис. 2.18):

1) відбивання лазерного випромінювання поверхнею оброблюваного матеріалу;

2) нагрівання оброблюваного матеріалу та формування теплових потоків у внутрішні шари об'єму;

3) плавлення матеріалу;

4) випаровування (ерозія) поверхневих шарів матеріалу;

5) утворення плазми.

Завдяки зміні щільності потужності та часу дії лазерного випромінювання можливе керування вищезазначеними стадіями взаємодії лазерного випромінювання з речовиною і, таким чином, реалізація різних технологічних процесів оброблення.

РОЗДІЛ 3 ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

3.1 Технологічні процеси виготовлення елементної бази електроніки

До основних технологічних процесів виготовлення елементної бази, що проводяться з використанням лазерних технологій, відносять:

- фотолітографію;
- лазерне відпалювання плівкових структур;
- імпульсне лазерне нанесення плівкових шарів;
- лазерне очищення поверхні.

Розглянемо коротко кожен із наведених технологічних процесів.

Фотолітографія – один з основних процесів планарної технології, який широко використовують у мікроелектроніці під час виготовлення елементної бази. Суть цього методу полягає в отриманні трафарету на тонкій плівці матеріалу. Для формування відбитка використовується випромінювання певної довжини хвилі. Водночас мінімальний розмір деталей рисунка обмежується дифракцією випромінювання і становить половину довжини хвилі. На рисунку 3.1 наведені схеми трьох типових методик проведення лазерної фотолітографії. Принципова відмінність цього методу від інших типів літографічних процесів полягає в тому, що процес експонування здійснюється видимим або ультрафіолетовим випромінюванням. За реалізації інших видів літографії для цього використовується рентгенівське випромінювання, потік електронів, іонів тощо.

Зауважимо, що традиційна фотолітографія вимагає виготовлення або придбання фотомасок, а також

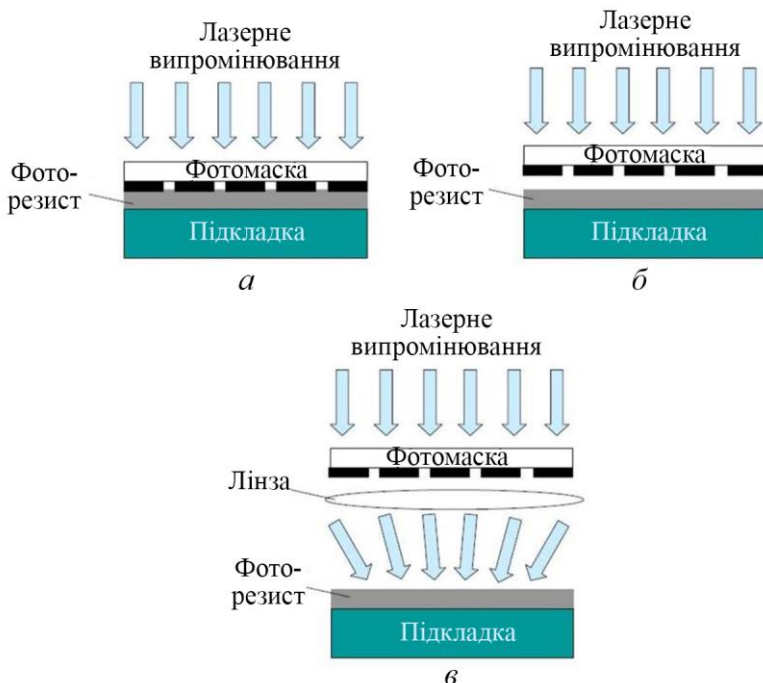


Рисунок 3.1 – Схеми трьох типових методів фотолітографії: контактна (*a*), максимально близька до поверхні підкладки (*б*), проєкційного друку (*в*)

додаткової їх корекції для перенесення CAD-візерунка на пластину, покриту резистом. На сьогодні процес виготовлення фотомасок є добре налагодженим, що дозволяє виготовляти субмікронні конструктивні елементи у великій кількості. Так, наприклад, Heidelberg Instruments випускає системи для виробництва фотомасок із метою їх подальшого застосування в напівпровідниковій, електронній промисловості та під час виготовлення дисплеїв (VPG+, ULTRA).

Однак існує ще один метод фотолітографії, який є

ідеальним інструментом для багатьох інших застосувань, – безмаскова фотолітографія. Ця найсучасніша, швидка, високоточна та надзвичайно універсальна технологія ідеально підходить для використання під час проведення досліджень, розроблення компонентів, а також створення прототипів новітньої елементної бази наноелектроніки. Ця технологія дозволяє перенести спроектований дизайн елемента безпосередньо на пластину, водночас повністю виключаючи необхідність застосування фотомасок. У безмасковій фотолітографії візерунок експонується безпосередньо на поверхню підкладки за допомогою лазера з просторовим модулятором світла, який, по суті, є програмованою маскою (рис. 3.2). Система бере файл дизайну і просто «записує» візерунок на підкладку, покриту резистом (рис. 3.3). Такий процес прямого запису дає можливість не проводити трудомісткий процес

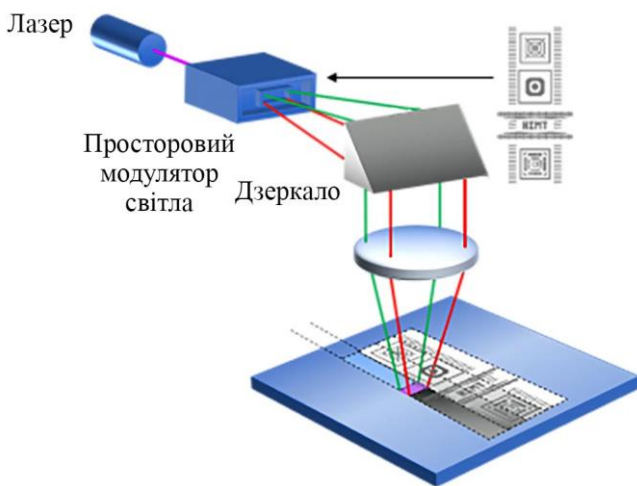


Рисунок 3.2 – Схема проведення безмаскової фотолітографії

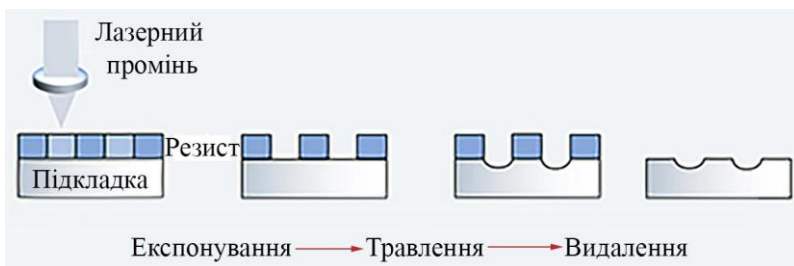


Рисунок 3.3 – Основні етапи проведення безмаскової фотолітографії

виготовлення і корекції фотомасок, який до того ж має високу собівартість. Замість цього існує можливість переробити САД-креслення (знову і знову, якщо необхідно) і повторно експонувати візерунок.

На рисунку 3.4 наведено приклад обладнання для проведення безмаскової фотолітографії та приклад елемента, виготовленого за цією технологією.

Лазерне відпалювання пліткових структур. Кристалічний кремній (с-Si) є основним матеріалом сучасної напівпровідникової мікроелектроніки і залишиться таким ще декілька наступних десятиліть. Однак швидка мініатюризація компонентів сучасних інтегральних схем і оптичних систем потребує знаходження нових шляхів наноструктурування цього матеріалу. Окрім традиційно використовуваних літографічних технологій, існують й інші шляхи високоточного оброблення с-Si. Одним із таких методів є оброблення поверхні потужними надкороткими лазерними імпульсами тривалістю менше ніж 100 фс. У цьому разі за рахунок розділення в часі процесів поглинання випромінювання в речовині і термічної дифузії виникає значне зменшення області термічного руйнування, що в результаті забезпечує високу якість структур, сформованих



Рисунок 3.4 – Обладнання для проведення безмаскової фотолітографії

під час фемтосекундної лазерної дії. Також добре відомий механізм утворення поверхневих ґраток за рахунок інтерференції падаючої і розсіяної поверхневих електромагнітних хвиль. У цьому разі період утворених структур наближається до довжини хвилі лазерного випромінювання. Лазерне відпалювання дозволяє робити локалізоване оброблення зразка, не руйнуючи інші елементи, що містяться на одній підкладці з відпалюваною плівкою.

Імпульсне лазерне нанесення плівкових шарів. Імпульсне лазерне осадження (англ. pulsed laser deposition) – контрольований та керований процес осадження на поверхню підкладки матеріалів, що

утворюються в процесі взаємодії лазерного випромінювання з мішенню у вакуумній камері за участі плазмової плями (рис. 3.5). Загалом весь процес лазерного осадження можна поділити на такі стадії: 1 – взаємодія лазерного випромінювання з мішенню, тобто абляція матеріалу мішені та утворення плазми; 2 – динаміка плазми, процес її розширення; 3 – нанесення матеріалу на підкладку; 4 – ріст плівки на поверхні підкладки. Плівкові зразки, що формуються на поверхні підклади, їх структура і морфологія можуть бути як аморфними, так і кристалічними. За рахунок зміни режимів проведення процесу осадження (зміна енергії лазерного імпульсу та розміру плями фокусування випромінювання на підкладці) можна змінювати кінетичну енергію частинок у плазмі від одиниць до декількох сотень електрон-вольт.

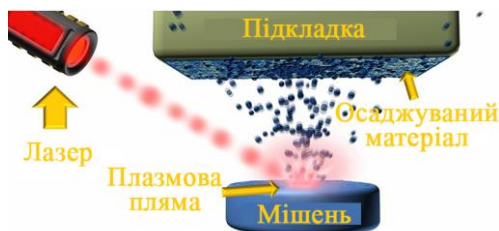


Рисунок 3.5 – Принцип імпульсного лазерного осадження тонкоплівкових матеріалів

До основних переваг методу лазерного імпульсного осадження можна віднести:

- високий ступінь відповідності катіонної стехіометрії плівок, що формуються, складу матеріалу мішені;
- високу морфологічну однорідність плівок, що формуються;

– високу швидкість осадження, що дозволяє отримувати плівки високого ступеня кристалічності;

– повну або практично повну відсутність забруднення плівки компонентами матеріалу камери та інших пристроїв унаслідок малої ширини променя.

Основними технологічними параметрами, що впливають як на ріст, так і на фізико-хімічні і хімічні властивості плівок під час нанесення їх на підкладку, є такі:

1) параметри лазера: густина енергії, довжина хвилі, тривалість імпульсу, частота повторення імпульсів;

2) температура поверхні підкладки;

3) стан поверхні підкладки, тобто від її попереднього оброблення (хімічне оброблення, наявність або відсутність оксидної плівки), морфології шорсткості;

4) відстані від підкладки до мішені;

5) тиск у вакуумній камері.

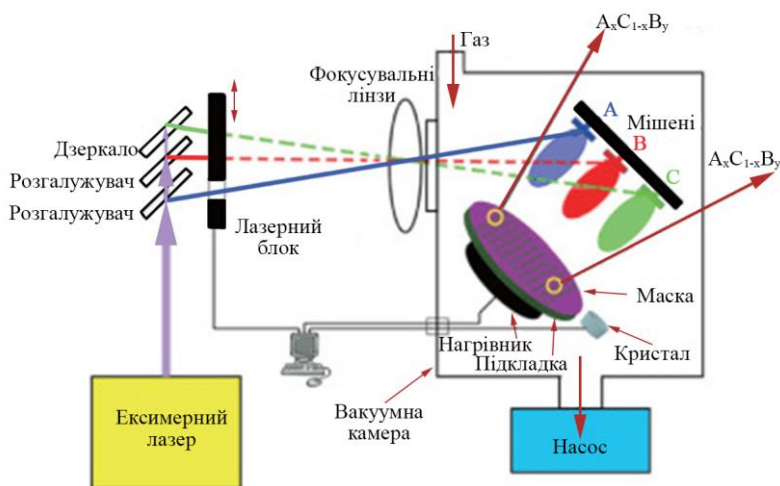


Рисунок 3.6 – Система для отримання трикомпонентних зразків методом імпульсного лазерного осадження

На рисунку 3.6 наведено приклад схеми улаштування установки для отримання трикомпонентних зразків методом імпульсного лазерного осадження. До складу системи входять оптична система, яка дозволяє розділити лазерний промінь на три окремі промені і здійснити осадження з однієї з трьох мішеней, розміщених у вакуумній камері.

Лазерне очищення поверхні. Лазерне очищення поверхні – базова технологія виготовлення елементної бази електроніки, яка забезпечує високу якість очищення поверхні матеріалів та гарантує високий ресурс і надійність роботи компонентів. Процес очищення поверхні – це в загальному випадку операція, пов’язана з видаленням поверхневих шарів матеріалів, утворених будь-якими забрудненнями або в результаті нанесення покриття. Іноді в процесі очищення проводять видалення приповерхневого шару основного матеріалу. Процес очищення також може супроводжуватися такими супутніми ефектами, як покращання трибологічних властивостей поверхні, перерозподіл залишкових поверхневих напружень, що супроводжується зміною механічних, корозійних, фізико-хімічних та інших властивостей поверхні матеріалу тощо.

Порівняно з традиційними методами очищення поверхні матеріалів, такими як механічний, ультразвуковий, хімічний, електрохімічний, метод лазерного очищення поверхні повною мірою задовольняє сучасні вимоги за технологічними, техніко-економічними та екологічними показниками.

Серед вагомих переваг лазерного очищення поверхні металів можна виділити такі:

- високу продуктивність процесу;
- екологічну безпеку;

- відсутність витратних матеріалів;
- високу технологічну відтворюваність процесу;
- можливість комплексно вирішувати проблему очищення поверхні (видаляються одночасно як органічні, так і неорганічні забруднення);
- вирішення питань технологічної спадковості поверхневого шару.

Основою механізмів лазерного очищення є весь спектр процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною на повітрі та в рідких середовищах – нагрівання, випаровування, утворення плазми, виникнення ударних хвиль та ін. (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Лазерне очищення поверхні

3.2 Типові операції та основні процеси лазерної технології в мікроелектроніці

Типові операції та основні процеси лазерної технології в мікроелектроніці зведені в таблицях 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Типові операції лазерної технології в мікроелектроніці

Галузь застосування	Операція	Компонент або пристрій
1	2	3
Напів-провідникові пристрої	ретуш фотошаблонів	фотошаблони
	маркування пластин Si	пластини Si
	літографія ексимерним лазером	пристрої промислової автоматизації та електрообладнання
	відновлення пам'яті	динамічна вибіркова пам'ять (DRAM)
	прицезійне точкове зварювання	оптичні модулі
	маркування корпусів інтегральних мікросхем (IMC)	корпуси IMC
	наскрізне мікросвердлення	корпуси IMC
Пристрої дисплеїв	відновлення тонкоплівкових рідкокристалічних дисплеїв (TFT-LCD)	TFT-LCD-дисплеї
	лазерне відпалювання ексимерним лазером	полікристалічні пластини Si; TFT-LCD-дисплеї
	точкове зварювання електронних гармат	телевізійні трубки

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
Компоненти схем	пригонка резисторів	чипи резисторів
	пригонка частоти резонаторів	генератори, керовані напругою; термостабілізовані генератори
	наскрізне свердлення вбудованих пультів	електронні друковані плати
	прицезійне точкове зварювання	волоконна оптика
	прицезійне точкове зварювання	мініатюрні реле
	маркування корпусів	корпуси компонентів
Периферійні пристрої	текстурування жорстких дисків	жорсткі диски
	точкове зварювання підсвічування супорта жорсткого диска	супорти жорсткого диска
	свердлення насадок введення чорнил у принтерах	головки принтера для введення чорнил
	маркування	клавіатури, набори клавіш
Енергетичні пристрої (пристрої живлення)	шовне зварювання пломб і відсіків батарей	літієві іонні батареї
	формування топології модулів кремнієвих сонячних батарей на основі пластин з аморфного кремнію	сонячні елементи з аморфним Si

Таблиця 3.2 – Основні процеси лазерних технологій у мікроелектроніці

Основний фізичний процес	Лазерне джерело	Технологія
1	2	3
Прицезійна термічна абляція	Ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери; лазери CO ₂	Формування топології, ретуш фотошаблонів, пригонка резисторів, конденсаторів; наскрізне мікросвердлення для електронних друкованих плат, насадок для чорнил принтерів; розрізання пластин напівпровідникових сонячних панелей, скла, кераміки
Фотоабляція	Ексимерні лазери	Субмікронна літографія на полімерах
Вологе термо- і фотохімічне травлення	Ексимерні лазери; Ar-іонні лазери; лазери CO ₂	Виготовлення фотошаблонів інтегральних мікросхем різних типів
3d-мікро-структурування	Ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери	Створення прототипів інтегральних мікросхем різних типів

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Керування мікрогеометрією поверхні	Ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери; лазери CO ₂	Планаризація, полірування скла, текстуровання жорстких магнітних дисків
Осадження тонких плівок, зокрема імпульсне, хімічне осадження з парової фази, лазерно-хімічна променева епітаксія, лазерно-індуковане перенесення плівок	Ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери	Високотемпературні надпровідникові сенсорні пристрої; рентгенівські інтерференційні дзеркала, створення структур на надгратках; ретуш фотшаблонів; створення локальних областей напівпровідників, металів, діелектриків
Відпалювання, нагрівання	Ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери	Іонно-імплантовані структури; α -Si-плоскі панелі дисплеїв; омічні контакти; синтез силіцидів Pt ₂ Si, Pd ₂ Si тощо; дифузія напівпровідникових з'єднань AlSb, CdTe, CdSe

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Дифузія	Nd-YAG-лазери	Селективне легування напівпровідників
Нагрівання, плавлення	Nd-YAG-лазери; лазери CO ₂	Мікрозварювання / паяння напівпровідників, металів, стекол, кераміки
Очищення поверхні	ексимерні лазери; Nd-YAG-лазери	Вилучення уламків мікронних розмірів

Розглянемо більш детально деякі з вищенаведених технологічних операцій.

3.3 Лазерна пригонка номіналів резисторів

За допомогою сфокусованого лазерного пучка можна підганяти (збільшувати) номінали тонко- і товсто-плівкових резисторів у гібридних інтегральних мікросхемах, також номінали циліндричних та металізованих резисторів. Лазерна пригонка полягає у вирізанні доріжки в резистивній плівці випаруванням матеріалу в результаті термічного впливу сфокусованого лазерного випромінювання (рис. 3.8).

Лазерна пригонка номіналів резисторів – це високотехнологічний метод, який найбільш часто використовується в гібридних інтегральних мікросхемах і характеризується такими перевагами:

- безконтактним впливом;
- високою швидкістю і точністю процесу пригонки;
- високою продуктивністю;
- можливістю універсальної автоматизації процесу

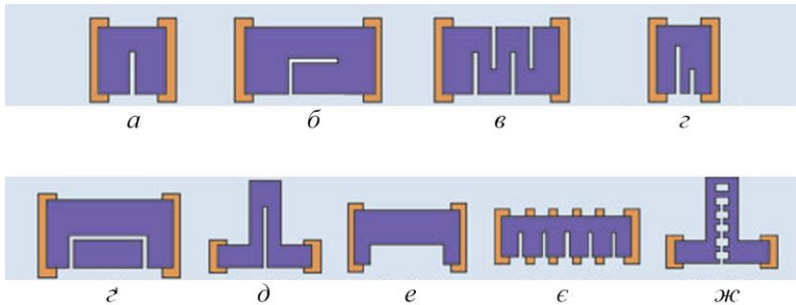


Рисунок 3.8 – Схематичне зображення тонкоплівкових резисторів після лазерної пригонки з прямим (а, в, г, д, є, ж), Г-подібним (б), П-подібними (з, е) прорізами

за рахунок використання обчислювального і керувального пристроїв;

– можливістю зменшення розмірів резистора і отримання більшої компактності інтегральних схем.

У сучасних технологічних пристроях для лазерної пригонки тонкоплівкових резисторів із цифровими системами керування досягнута продуктивність $3 \cdot 10^4$ резисторів за 1 годину. Максимально отримана точність після пригонки досягнута на рівні $\pm 0,02\%$.

Недоліком прямого прорізу (рис. 3.8) є надмірне збільшення густини струму у звуженні резистора. За використання такої процедури важко отримати високу точність пригонки. Значно легше це зробити, використовуючи Г-подібний проріз. Недолік Г-подібного прорізу полягає у збільшенні нестабільності і шумів резистора після пригонки, спричинених локалізацією змін матеріалу біля краю прорізу. Для отримання високої точності пригонки і для запобігання надлишковому звуженню резистора ширина прорізу повинна бути на 20 % більшою за ширину резистора.

3.4 Технологія лазерного експонування друкованих плат

Стрімкий розвиток електроніки та електронної техніки супроводжується посиленням вимог до основ друкованих модулів (друкованих плат). Серед таких вимог можна виділити такі: мініатюризацію пристроїв, інтеграцію в одному пристрої декількох модулів. Водночас відбуваються такі зміни:

1) зменшуються масогабаритні розміри друкованих плат – лінійні розміри провідників (товщина і ширина) та відстані між ними;

2) збільшується загальна кількість провідників та кількості їх шарів;

3) виникає потреба у збільшенні терміну служби друкованих плат за рахунок реалізації високої електричної надійності та механічної стійкості провідників.

Як відомо, одним із найбільш поширених методів виготовлення друкованих плат є фотолітографія. Технологія фотолітографічного процесу складається із значної кількості етапів, одним із яких є експонування зображення.

Методика лазерного експонування полягає у локальному засвічуванні ділянок топології друкованих плат фокусуванням на її поверхню лазерного випромінювання. Незначна частка випромінювання, що потрапляє на поверхні плати, поглинається фотомаскою та спричиняє полімеризацію засвічуваних ділянок.

До основних факторів, що впливають на процес лазерного експонування у фотолітографії, відносять характеристики матеріалу (товщина фотомаски, довжина, ширина і глибина провідників, коефіцієнт теплової провідності матеріалу) та параметри лазера (тип лазера, потужність лазера, швидкість подання газу, швидкість

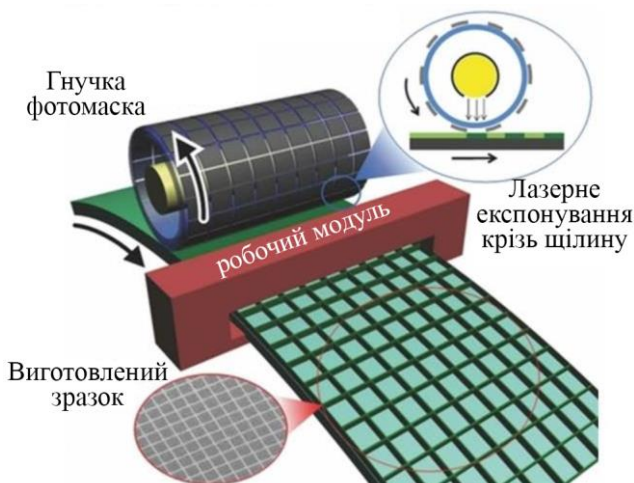


Рисунок 3.9 – Схема проведення фотолітографічного процесу друкованих плат за використання методу лазерного експонування зображення

нарізування). Для проведення процесу лазерного експонування використовуються напівпровідникові, волоконні лазери та твердотільні лазери (найбільш поширеними є Nd:YAG-лазери (Nd:YAG – алюмо-ітрієвий гранат, легований іонами неодиму та Nd:YVO₄-лазери (Nd:YVO₄ – ітрієвий ванадат, легований іонами неодиму)).

Застосування методу лазерного експонування під час виготовлення друкованих плат дозволяє зменшити паразитне засвічення на них, а також зменшити відстань між провідниками. Ще однією перевагою цього методу є висока точність виготовлення виробу та його висока якість за рахунок використання спеціального програмного забезпечення для оброблення креслень та розведення провідникових доріжок мікросхем. Також до переваг методу відносять високу швидкість оброблення, високу

роздільну здатність, що зі свого боку забезпечує зменшення розмірів провідників друкованих плат.

Завдяки вищенаведеним перевагам метод лазерного експонування став одним із провідних методів, доступних для широкого кола споживачів.

Водночас необхідно зауважити, що точність і якість виготовлення друкованих плат залежить від технологічних параметрів обладнання. Лише за рахунок оптимізації технологічних параметрів експонування можна забезпечити необхідні параметри виробу, а саме:

- збереження геометричних розмірів заданій топології друкованої плати;
- точність позиціонування провідників;
- забезпечення електричної надійності друкованих плат;
- збереження механічної стійкості провідників;
- уникнення дефектів у топології друкованих плат.

3.5 Лазерне скрайбування напівпровідникових пластин

Скрайбування пластин (очищення поверхні і виконання надрізів) із напівпровідникових матеріалів (кремнію, германію, арсеніду галію тощо) виконують для подальшого поділу пластин на окремі елементи по лінії надрізу. Глибину надрізу виконують пучками лазерного випромінювання і становить 40–125 мкм, а ширина – 20–40 мкм за товщини пластини 150–300 мкм. Для проведення процесу лазерного скрайбування використовують CO₂-лазери та Nd:YAG-лазери, які працюють в імпульсному режимі з високою швидкістю чергування імпульсів. Фото та схема процесу лазерного скрайбування Si-пластини наведені на рисунках 3.10 та 3.11.

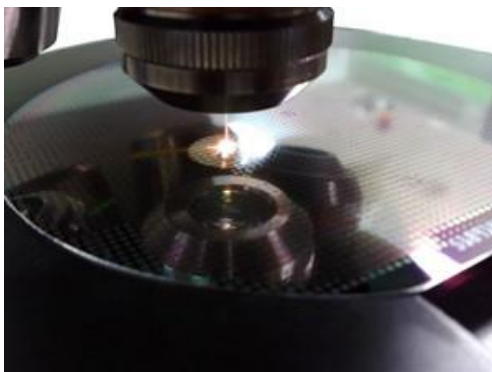


Рисунок 3.10 – Фото процесу лазерного скрайбування Si-пластини

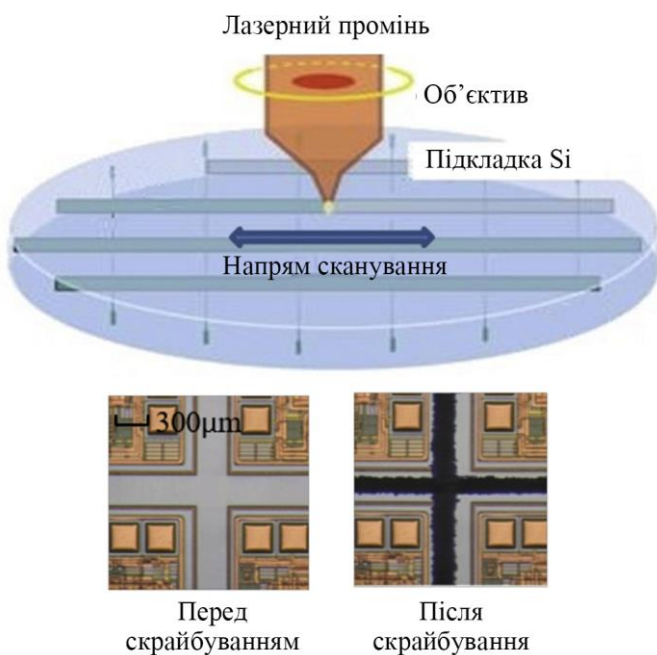


Рисунок 3.11 – Схема проведення процесу лазерного скрайбування Si-пластини

Лазерне скрайбування майже повністю замінило у виробництві алмазне скрайбування.

3.6 Маркування виробів

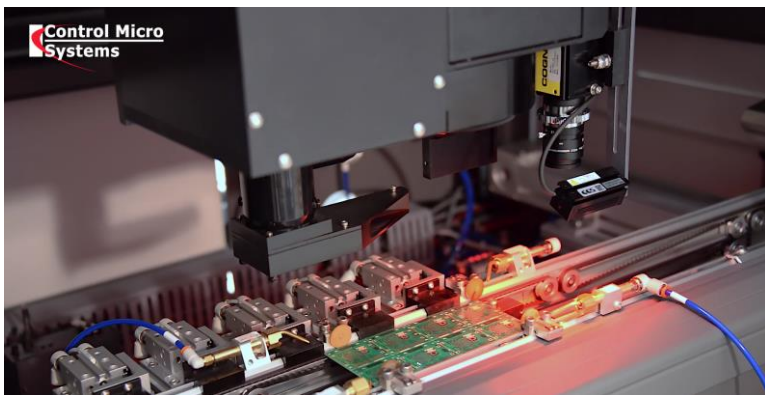
Актуальним на сьогодні залишається питання щодо ідентифікування виготовлених елементів і компонент сучасної мікроелектроніки, а також пов'язана із цим необхідність нанесення / зчитування функціональної інформації. Це пов'язано із значним зростанням номенклатури та об'ємів виробництва.

Технологія лазерного маркування на відміну від інших методів дозволяє реалізувати процес маркування на різних типах матеріалів, наприклад, електро- і неелектропровідних, матеріалів із підвищеною крихкістю тощо. Процес маркування здійснюється безконтактно не лише на поверхні, а й всередині матеріалу, прозорого для лазерного випромінювання, із високою швидкістю. Водночас забезпечується висока якість і точність.

Під час проведення лазерного маркування на поверхні виробу фокусується лазерний промінь, що призводить до локального нагрівання, зміни властивостей матеріалу, плавлення, а також часткового випарування.

Переваги методу:

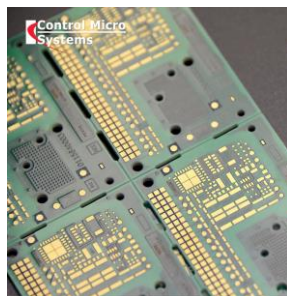
- мініатюрність знака (ширина ліній знака не перебільшує 10 мкм за розмірів самого знака до декількох десятків мкм);
- оскільки метод є безконтактним, то механічний вплив на виріб відсутній;
- гарантія надійності та стабільності під час зчитування нанесених знаків фотоелектронними пристроями за рахунок високої точності та якості;
- висока продуктивність процесу;



a



б



в

Рисунок 3.12 – Лазерне маркування друкованих плат:
установка компанії CMS (Control Micro Systems) Laser (*a*),
вікно програми для контролю за процесом маркування (*б*)
та зовнішній вигляд готової продукції (*в*)

- довговічність і стійкість до зовнішніх впливів (механічного навантаження, коливання температур);
- екологічна чистота;
- можливість маркування виробів складної форми;
- повна автоматизація процесу (лазерні маркувальні системи мають комп'ютерне керування з використанням

спеціально розроблених програм, що дозволяють операторові змінювати програмні установки під час роботи).

Зазвичай для маркування використовуються газові CO₂-лазери та твердотільні Nd:YAG-лазери та волоконні лазери.

На рисунку 3.12 наведено приклад лазерних маркувальних систем компанії CMS (Control Micro Systems) Laser, яку використовують для маркування друкованих плат.

3.7 Використання лазерних технологій для реалізації термомагнітного запису інформації

Термомагнітний запис (Heat-assisted magnetic recording – HAMR) – це гібридна технологія запису інформації, яка поєднує в собі магнітне зчитування та магнітооптичний запис. Принцип роботи пристроїв, що використовують цю технологію, полягає в локальному нагріванні лазером та перемагнічуванні в процесі запису поверхні пластин жорсткого диска. Нагрівання поверхні знижує коерцитивну силу матеріалу поверхні, що дозволяє значно зменшити розміри магнітної області, що зберігає один біт інформації, та збільшити стабільність збереження даних, уникаючи шкідливого впливу суперпарамагнітного ефекту. Технологія дозволяє досягти щільності запису 2,32–7,75 Тбіт/см². Принцип реалізації термомагнітного запису інформації подано на рисунку 3.13 а.

Однією з найбільш перспективних технологій, яку на сьогодні достатньо важко реалізувати для комерційної реалізації, є технологія, яка поєднує в собі термомагнітний запис із структурованим записом інформації (Heat-assisted magnetic recording + Bit-Patterned recording). Принцип

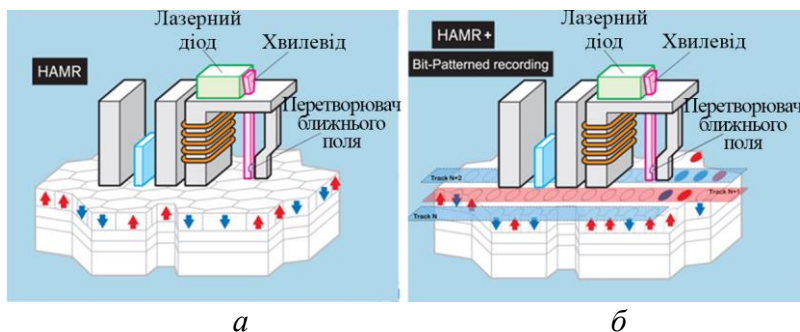


Рисунок 3.13 – Принцип реалізації термомагнітного запису інформації (HAMR) (а) та технології, що поєднує термомагнітний запис із структурованим записом інформації (HAMR + Bit-Patterned recording) (б)

реалізації цього принципу запису інформації наведено на рисунку 3.13 б. Використовуючи технологію нанолітографії та самозбірних блоків-сополімерів, на поверхні пластини створюється масив із магнітних острівців циліндричної форми з кроком близько 4,5 нм розмірами близько 10 нм. Кожен такий магнітний острівець (домен) прирівнюється до 1 біта інформації, що дозволяє збільшити густину запису інформації 1,3–3,3 Тбіт/дюйм².

На сьогодні зазначені технології магнітного запису інформації не мають комерційної реалізації.

РОЗДІЛ 4

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ У МЕДИЦИНІ

4.1 Взаємодія лазерного випромінювання з біологічними тканинами

Інтеграція сучасних фізичних методів у практичну медицину привела до появи нових хірургічних методик, які виконують із використанням ультразвукових досліджень, магніторезонансної томографії, рентгенографії та високоінтенсивного лазерного випромінювання.

Серед великого кола питань, що розглядаються в межах сучасних лазерних технологій, можна виділити:

- лазерну хірургію і деструкцію біотканин;
- лазерну терапію;
- лазерну діагностику.

Особливі властивості світла використовувалися в медицині задовго до винаходу лазерів. Так, традиційна фотобіологія з використанням звичайних (теплових) джерел світла, таких як лампи розжарювання, газорозрядні прилади, випромінювання Сонця, досить успішно розвивалася впродовж багатьох років. Істотні досягнення в розумінні процесів фотосинтезу рослин і бактерій, з'ясуванні природи зору, фотоперіодичних явищ.

Поява лазерів стимулювала подальший швидкий розвиток фотобіології, постановку та успішне вирішення багатьох проблем, які раніше або зовсім не ставилися (через відсутність відповідних джерел випромінювання), або вирішувалися непрямим шляхом. На відміну від теплових джерел світла лазери мають високу міру монохроматичності, тимчасової і просторової когерентності, спрямованості й поляризованості випромінювання за

значної його інтенсивності та яскравості, можуть перелаштовуватися по довжинах хвиль, випромінювати світлові імпульси рекордно короткої тривалості. За період розвитку лазерної фізики і техніки був створений широкий арсенал лазерів і лазерних систем, за своїми параметрами тих, що значною мірою задовольняють потреби лазерної технології, враховуючи біотехнологію. Проте складність будови біологічних об'єктів, значна різноманітність у характері їх взаємодії зі світлом визначають необхідність використання багатьох типів лазерів і лазерних систем у фотобіології, а також стимулюють розроблення нових лазерних засобів, ураховуючи й засоби доставлення лазерного випромінювання до об'єкта дослідження або дії.

Лазери, які в сучасній медицині замінили звичайні хірургічні інструменти для покращання результатів загоєння ран, використовуються для лікування та діагностики різних типів захворювань у хірургії, онкології, мамології, офтальмології, дерматології, для проведення косметологічних та косметичних процедур.

Лазерні апарати є альтернативою хірургічному скальпелю, оскільки мають багато переваг. А саме:

- промінь досить однорідний, а постійний потік енергії забезпечує на всій довжині однаковий за глибиною розріз;

- лазер використовують для припинення кровотеч різного характеру, оскільки він має властивість «спаювати» судини;

- оскільки біотканини не проводять тепло, опіків не виникає;

- висока ефективність хірургічного втручання, швидкість оперування і точковий вплив.

Терапевтичний вплив лазерного випромінювання базується на низці фотоактивованих процесів, які,

починаючись на мембранному рівні з моменту поглинання кванта світла переважно молекулами нуклеїнових кислот і кисню, приводять до утворення вільних радикалів і активації ферментів, що запускають фізіологічні реакції в клітинах, потім ведуть до утворення в тканинах фізіологічно активних сполук, що і дає кінцевий фотобіологічний ефект (рис. 4.1).

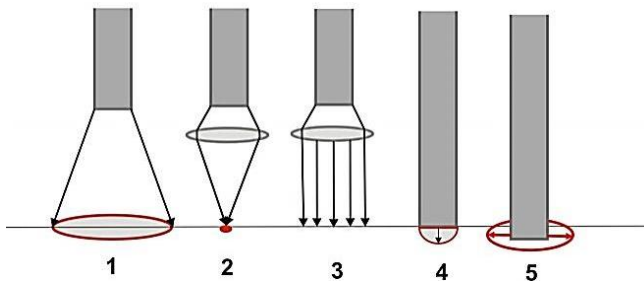


Рисунок 4.1 – Вплив лазерного випромінювання на біологічну тканину: 1 – безконтактний вплив розфокусованим лазерним променем; 2 – безконтактний вплив за допомогою фокусувальної насадки; 3 – безконтактний вплив за допомогою колімуючої насадки; 4 – контактний вплив дистальним кінцем світловоду; 5 – радіальний вихід лазерних променів із дистального кінця світловоду

Під впливом лазерного випромінювання спостерігаються ефекти: протизапальної дії, прискорення регенерації пошкоджених тканин і поліпшення кровопостачання органів. Застосування волоконних лазерів є виключно перспективним у медицині, оскільки вони відповідають ключовим вимогам: простота користування, надійність, широкий вибір параметрів та можливість їх точного контролю, відсутність спеціальних вимог до

приміщення, мобільність і мінімальні експлуатаційні витрати.

4.2 Лазерна хірургія

Лазерна хірургія – це різновид хірургії, за якої потужність лазерного променя використовується для отримання безкровних розрізів у тканині або видалення утворень. Сьогодні спостерігається підвищений інтерес до малоінвазивної хірургії, було вдосконалено методи, в яких використовуються розрізи невеликого розміру або вони взагалі не потрібні. Розроблено декілька типів лазерів, які розрізняються за довжиною хвилі випромінюваного світла, а також їх потужністю і здатністю утворювати згустки, розрізати або випаровувати тканину. Лазери використовуються для полегшення кровотечі та обструкції за деяких захворювань, для зменшення, руйнування або видалення поліпів, кіст та пухлин. Іноді лазерна терапія використовується окремо, але часто вона пов'язана з хірургічним втручанням, хіміотерапією або променевою терапією. Лазери можуть «запаювати» нервові закінчення, щоб зменшити післяопераційний біль, та лімфатичні судини, щоб зменшити набряк і зростання пухлинних клітин.

Дія лазерного скальпеля ґрунтується на тому, що енергія монохроматичного когерентного світлового пучка різко підвищує температуру на обмеженій ділянці живої тканини і призводить до її миттєвого згоряння і випаровування. Тепловий вплив на оточуючі тканини до того ж поширюється на дуже невелику відстань, оскільки діаметр сфокусованого пучка становить 0,01 мм. Під впливом лазерного випромінювання також відбувається вибухове руйнування тканини та миттєвий перехід

тканинної рідини в газоподібний стан.

Методика з використанням високоінтенсивного лазерного випромінювання базується на фотометричних і абляційних ефектах, які полягають у незворотних (коагуляція і денатурація) змінах тканин у діапазоні температур 45–70 °С, що призводять до формування зон некрозу, з її заміщенням сполучною тканиною.

Режим лазерного оброблення тканини, за якого доза лазерного випромінювання нижча від порогу абляції, називається субабляційним. Субабляційна лазерна дія на біотканини відрізняється від низькоінтенсивної лазерної дії тим, що в ній середня температура біотканини підвищується на декілька десятків градусів. У субабляційному режимі здійснюються такі лазерні процедури, як термотерапія (43–60 °С), гіпертермія (60–100 °С), припинення кровотечі (60–150 °С), термопластика хрящів і колагеновміщувальних тканин (65–75 °С). У пластичній хірургії субабляційний режим використовують для лазерного зшивання (притискують 2 частини тканини і нагрівають) і зварювання (між тканинами, що зшиваються, міститься білкове прокладення) пошкоджених хрящових і інших колагеновміщувальних тканин. Водночас температура повинна бути в діапазоні 60–80 °С. Це досягається застосуванням лазерів помірної потужності, порівняно великими інтервалами між експозиціями, достатніми для запобігання акумуляції тепла і перегрівання місця майбутнього зварного шва, нанесенням барвників («припоїв»), що поглинають випромінювання, на поверхню місця зварювання з метою зниження термічних ушкоджень в глибоких шарах опромінюваної тканини.

Лазерне зварювання застосовують і для зшивання дрібних та середнього калібру кровоносних судин, перерізаних нервових стволів, з'єднання стінок порожнистих органів. Порівняно нова технологія зміни

форми хрящів за допомогою лазерного оброблення також здійснюється в субабляційному режимі. Ця технологія вже успішно використовується в клініці для корекції форми носової перегородки. Вона відкриває широкі перспективи для здійснення принципово нових типів операцій у пластичній та естетичній хірургії із застосуванням лазерного випромінювання. За допомогою лазерного випромінювання прогрівання хрящової тканини можна здійснити в усьому обсязі за час, упродовж якого не встигнуть статися істотні руйнування матриксу, а клітини зберігають свою життєздатність, і в той самий час відбуваються процеси, що змінюють фізико-хімічні властивості хрящів. У температурному діапазоні 60–80 °C (залежить від типу сполучної тканини) відбувається денатурація колагенової волокнини, яка входить до складу сполучних тканин і визначає багато їх властивостей. Розрізняють два типи денатурації: термічна і термомеханічна (за тривалої експозиції і температури вище ніж 100 °C виникають градієнти тиску).

Колагенова волокнина зазнає перетворення: високо-організований напівкристалічний стан статистичний клубок, що описується як фазовий перехід першого роду. Водночас спостерігається скорочення колагеновміщувальної тканини, її усадка. Величина усадки залежить як від температури, так і від часу експозиції, причому спостерігається ефект температурно-тимчасової суперпозиції. Максимальна усадка (50 %) спостерігалася під час опромінення Ho:YAG-лазером (650 C⁰ і час експозиції ≥ 1 хвилина). За нагрівання колагеновміщувальної тканини (КТ) до температури денатурації колагену відбувається зміна ультраструктури колагенових волокон.

Розрізняють три зони зміни колагенової волокнини під час оброблення імпульсним CO₂-лазером:

- втрата волоконної структури колагену (денатурація);

- змішані місця з нативними і колагеновою волокниною, що збільшилася в діаметрі;

- нормальна колагенова структура під час опромінення YAG-лазером зі збільшенням потужності зазнає таких змін: 5 Вт – зникнення поперечної покресленої колагенової волокнини; 10 Вт – також нечіткий контур країв волокнини; 15 Вт – збільшення діаметра волокнини і повна втрата контуру волокнини.

За температури понад 43 °С відбувається денатурація білкових молекул і термічна коагуляція тканини; за $T > 100$ °С починається випаровування води; за $T > 300$ °С – горіння з виділенням продуктів згоряння та осадженням їх на поверхні кратера. Руйнування тканини через формування кратера, отвору або розрізу називають абляцією, а умови, за яких вона відбувається, – абляційним режимом роботи лазера. За низької потужності випромінювання і короткочасної експозиції нагрівання тканини відносно невелике і відбувається лише її коагуляція (субабляційний режим роботи лазера). Лазерне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 980\text{--}1\,064$ нм може проникати в тканину на глибину до 7 мм.

До переваг діодних лазерів в амбулаторній хірургії можна віднести:

- безконтактність і безкровність методу;
- загоєння ран без утворення рубців;
- мінімум або відсутність больових ефектів як під час операції, так і в післяопераційний період;
- швидкі терміни загоєння;
- високу стерильність;
- виражений ефект коагуляції та мінімальне руйнування прилеглих тканин.

Останнім часом спостерігається інтенсивне впровадження лазерів в експериментальну і практичну медицину, що пов'язано з унікальними властивостями цих джерел світла, специфічною дією на біологічні тканини і високою ефективністю застосування. Хоча найбільшого поширення лазери набули в хірургії, урології та офтальмології, де використовується переважно руйнівний ефект високоінтенсивного випромінювання під час проведення безкровних операцій (лазерний скальпель), вони також успішно застосовуються в інших галузях медицини, починаючи від терапевтичного опромінення крові і закінчуючи діагностикою захворювань внутрішніх органів.

Розвиток лазерної техніки на цей час досягнув такого рівня, що з її допомогою виявляється можливим вирішувати багато технічних проблем. Лазерна технологія застосовна для об'єктів із найрізноманітніших матеріалів, що перебувають у різних агрегатних станах, із яких найцікавішими і складнішими є біологічні. Лазерна біотехнологія має безпосереднє відношення до низки глобальних проблем людства, таких як рак, СНІД, захист довкілля від забруднень і так далі.

Характер взаємодії лазерного випромінювання із середовищем визначається щільністю потужності падаючого світлового потоку оптичними і теплофізичними характеристиками біологічної тканини. Випромінювання широко використовуваних у лазерній терапії He-Ne і напівпровідникових лазерів потрапляє в зону терапевтичного вікна ($\lambda = 500\text{--}1\,500\text{ нм}$), де процеси динамічного розсіювання однозначно переважають над процесами поглинання. Лазерний пучок у такому разі не поглинається в тонкому шарі шкіри (рис. 4.2), а розподіляється за об'ємом.

Видалення пухлин. Сьогодні лазери – це безпечні методи лікування різних видів онкозахворювань. Пряма

лазерна абляція на основі фотохімічних і фототермічних ефектів успішно використовується для безпосереднього знищення ракових клітин під час лікування поверхневого раку шлунково-кишкового тракту та певних типів уражень раку легенів.

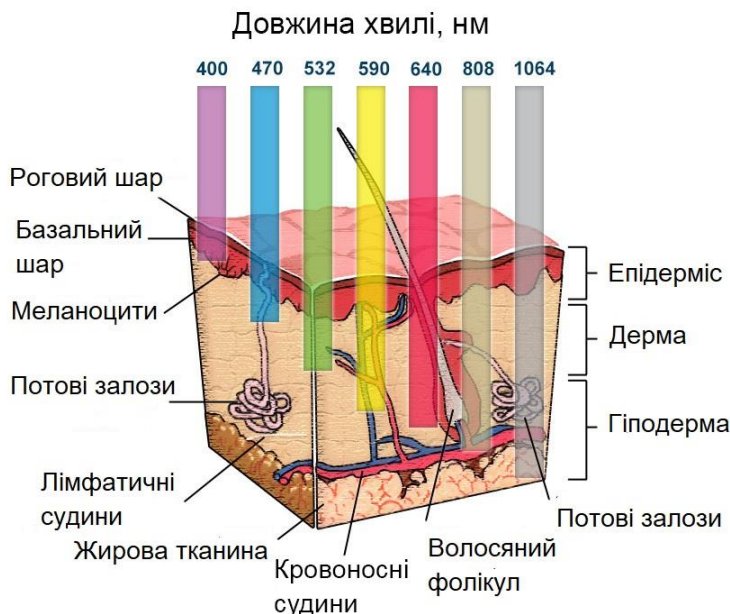


Рисунок 4.2 – Схема впливу лазерного випромінювання на шкіру

Майже століття тому фотодинамічний метод був розроблений для точного впливу на пухлинні клітини. Це лікування передбачає використання фотосинтетичного препарату з подальшим освітленням бажаної області видимим світлом, пропорційним довжині хвилі поглинання фотосинтетичного препарату. Фотосинтезатор, який спочатку формує один збуджений стан, а потім –

триpletний стан, генерує реактивний кисень, деструктивний для неопластичних клітин. Селективна фототермічна терапія використовує найкращі світлопоглинальні барвники для підсилення лазерного руйнування пухлинних клітин.

Серцево-судинна хірургія. Ангіопластика, аортокоронарне шунтування та приймання ліків – це підходи до лікування, що покращують та збільшують кровотік через коронарні артерії. Коли ці терапевтичні методи вичерпані, пацієнт не має альтернативи хірургічному втручанню, за винятком обмежених випадків трансплантації серця. Без життєздатної альтернативи хірургічному втручанню пацієнта зазвичай лікують терапевтичними препаратами, часто разом із значними обмеженнями життя. Трансміокардіальна лазерна реваскуляризація (TMLR), лазерний судинний анастомоз та лазерна ангіопластика за захворювань периферичних артерій – це нові методи, що покращують приплив крові до ділянок серця.

TMLR виконується як метод за ішемічної хвороби серця з ділянками, які не можна обійти через невеликий розріз у лівій частині грудної клітки між ребрами (торакотомія), під загальною анестезією з операцією коронарного шунтування або самостійно. Це єдиний метод лікування тяжкої стенокардії і використовується як додатковий метод коронарного шунтування. Під час використання TMLR лазер CO₂ або Nd:YAG-лазер спрямовується безпосередньо на конкретні ділянки серцевого м'яза. Після TMLR спостерігалися перфузія та супутнє покращання функції міокарда. Також за допомогою лазерів можна лікувати аневризми та накладати анастомози. Лазерна ангіопластика з використанням аргонного лазера відкриває непрохідний просвіт артерії. Діодний лазер із довжиною хвилі 980 нм, розташований у центральному просвіті, виконує абляцію. Енергія лазера випромінюється під кутом 90° до кришки стрижня катетера та забезпечує

колову абляцію навколо кожної легеневої вени. Оксид дейтерію не поглинає лазер, потім він проникає через тканину за ендотелієм, а молекули води поглинають його, спричиняючи тепловий шок та коагуляційний некроз. Енергію, що доставляється, можна описати зміною потужності (до 5,5 Вт) на декількох заздалегідь визначених рівнях. Залежно від того, яка серцева стінка спрямована, рівні енергії змінюються. Для цього зазвичай використовуються лазери Nd:YAG.

Щелепно-лицьова хірургія. Останні розробки в галузі лазерних технологій розширили клінічне використання лазерів у стоматології, а також у косметичних операціях на ротовій порожнині та обличчі. CO₂, Er:YAG, Diode та Nd:YAG – поширені лазери, які використовують в хірургічних операціях на порожнині рота. Також під час проведення процедур дезінфекції та загоснення застосовують низькорівневі лазери. Слизова оболонка порожнини рота, доброякісні новоутворення в ротовій порожнині, рак порожнини рота та ексцизійна біопсія – це низка захворювань порожнини рота, які лікують за допомогою лазерних технологій.

Дерматологія, ліполіз та реконструктивна хірургія. Лазерний ліполіз стає дедалі більш популярним методом косметичної хірургії, в якому використовується оптичне волокно, оскільки менша канюля дає менші розрізи, що призводить до меншої кровотечі та рубців. Лазери з довжиною хвилі 920 нм мають найнижчий коефіцієнт поглинання в жировій тканині і тому проникають у глибші шари тканини, але лазери з довжиною хвилі в діапазоні 1 320–1 444 нм мають найвищий коефіцієнт поглинання в жировій тканині і таким чином забезпечують більше проникнення. Nd:YAG-лазери широко використовують у ліполізі, тому що застосування цих типів лазерів змінює поглинання енергії та середню температуру на різну

величину коефіцієнта поглинання жиру порівняно з іншими тканинами. У цьому методі менше пошкодження тканин, а також коагуляція дрібних кровоносних судин та значне зменшення крововтрати (54 %) порівняно з традиційними методами. Здатність лазерів вибірково впливати на патологічні судини робить їх основним джерелом для лікування судинних дефектів.

Мамологія. Метод лазерно-індукованої коагуляції забезпечується приладом коагулятор лазерний універсальний «Ліка-хірург» (рис. 4.3), призначений для проведення широкого спектра хірургічних маніпуляцій, метою яких є:

- вапоризація (пошарове видалення) біологічних тканин;
- корекція форми та об'єму здорових тканин з естетичною і лікувальною метою;
- забезпечення гемостазу;
- коагуляція біотканин;
- розріз біотканин;
- силова термотерапія.

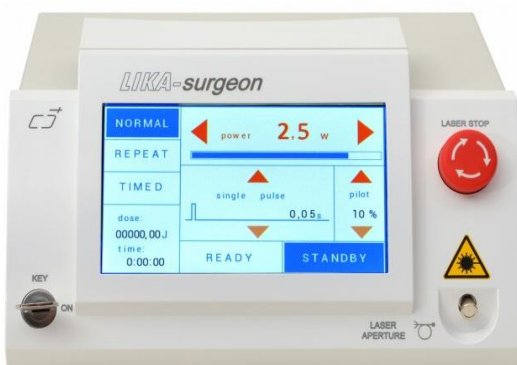


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд хірургічного лазера «Ліка-хірург»

Принцип дії апарата ґрунтується на генерації лазерного випромінювання напівпровідниковими лазерами лазерно-оптичного модуля, подальше поєднання якого за допомогою об'єднувача лазерного випромінювання і виведення через вихідний оптичний рознім (SMA-905) для під'єднання до нього світловода і доставлення лазерного випромінювання до місця проведення операції (рис. 4.4).

Набір режимів роботи і параметрів лазерного випромінювання здійснюється кнопками блока клавіатури, які відображаються на індикаторі блока індикації і подаються на блок керування, що забезпечує керування параметрами лазерного випромінювання. До складу блока керування входять плати драйверів, кількість яких залежить від вихідної потужності лазерного випромінювання. Блоки живлення призначені для подання стабілізованої напруги на блоки, плати та елементи лазерно-оптичного модуля (рис. 4.5).

Субблок безпеки блокує подання робочого випромінювання в разі непід'єднання світловода до гнізда SMA-905, перевищення номінального значення потужності робочого випромінювання більше ніж на 50 %, перевищення номінального значення часу робочого випромінювання більше ніж на 20 %. Програмне забезпечення вводиться в мікропроцесор лазерно-оптичного модуля через програматор – програмне середовище «AVR Studio».

Метод внутрішньотканинної лазерної коагуляції полягає в такому. До ушкодженої ділянки тканини лазерний промінь доставляється волокном через підшкірну голку з одночасним візуальним контролем місця впливу. Під контролем УЗД в порожнину кістки вводять підпункційну голку, потім по просвіту пункційної голки – гнучкий волоконний світловід.

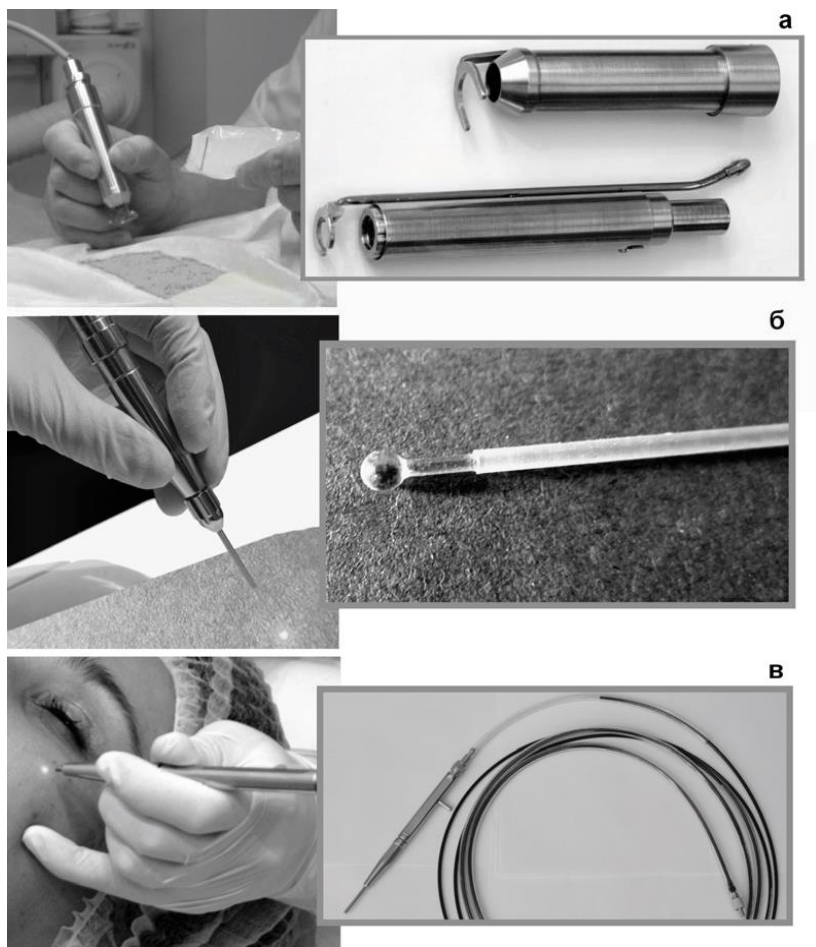


Рисунок 4.4 – Техніка лазерної хірургії

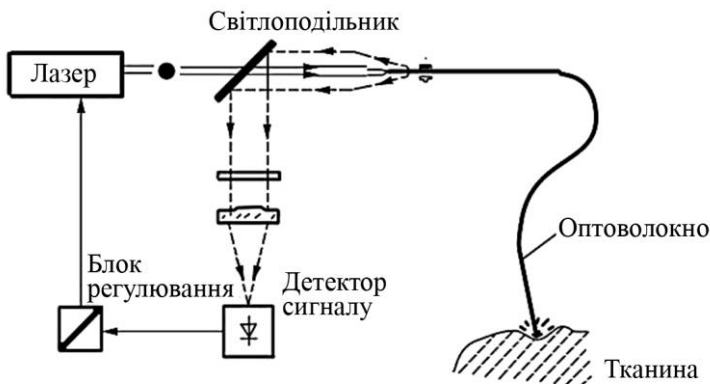


Рисунок 4.5 – Схема доставки лазерного випромінювання під час внутрішньотканинної терапії

Перед лазерним впливом через пункційну голку евакуують не менше ніж 50 % вмісту кісти. Вплив здійснюють безперервним випромінюванням із довжиною хвилі променя наведення $\lambda = 650$ нм, потужністю $P = 5,0$ – $10,0$ Вт, часом опромінення $\tau = 0,1$ – 10 с. Метод дозволяє знизити травматичність за рахунок непрямого термічного впливу на стінки кісти, знизити час проведення операції, забезпечити профілактику рецидиву. Інвазивні втручання на ГЗ проводили під контролем УЗД в режимі реального часу з використанням лінійного датчика з частотою 7,5–12 МГц. Через пластиковий катетер 14 G в порожнину кісти вводили кварцевий електрод діаметром 600 мкм. Випромінювання апарата передається до місця проведення хірургічних маніпуляцій за допомогою гнучких волоконно-оптичних світловодів (кварц-кварц) малого діаметра. Довжина гнучкої ділянки – $D = 2$ м, діаметр оптичного волокна – $d = 400$ – 440 мкм.

Залежно від методу лазерного впливу на біологічні тканини застосовуються різні види світловодів. На

рисунках 4.6 і 4.7 наведені схеми конструкції світловоду SMA-905 та блок-схема лазерного коагулятора відповідно. Метод ефективно застосовують під час лікування кіст ГЗ. Здійснення впливу лазерним випромінюванням на протилежні стінки залишкової порожнини кістки під час руху світловоду з кісточною порожниною назовні вздовж усієї порожнини залишкової кістки і виконання евакуації вмісту порожнини перед введенням світловоду дозволяє підвищити ефективність цього способу лікування кіст ГЗ.

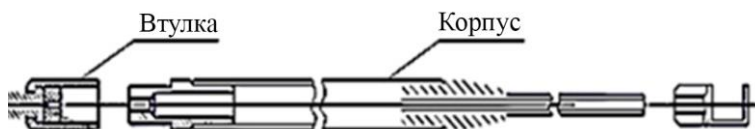


Рисунок 4.6 – Конструкція волоконно-оптичного світловоду SMA-905

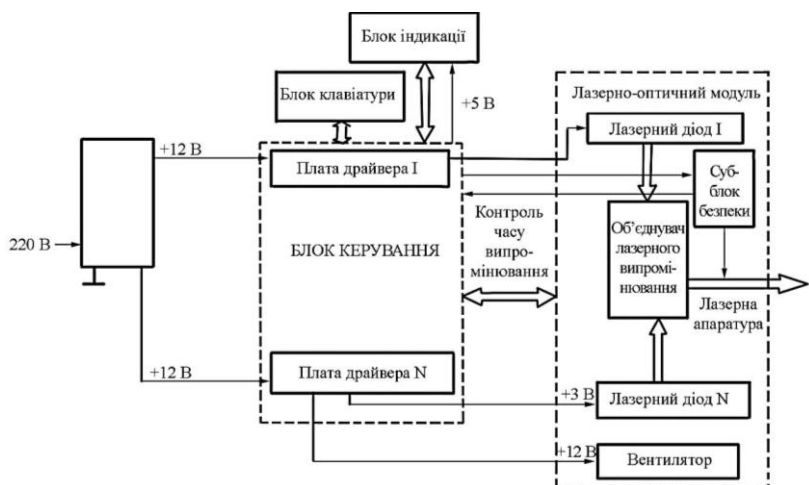


Рисунок 4.7 – Блок-схема лазерного коагулятора

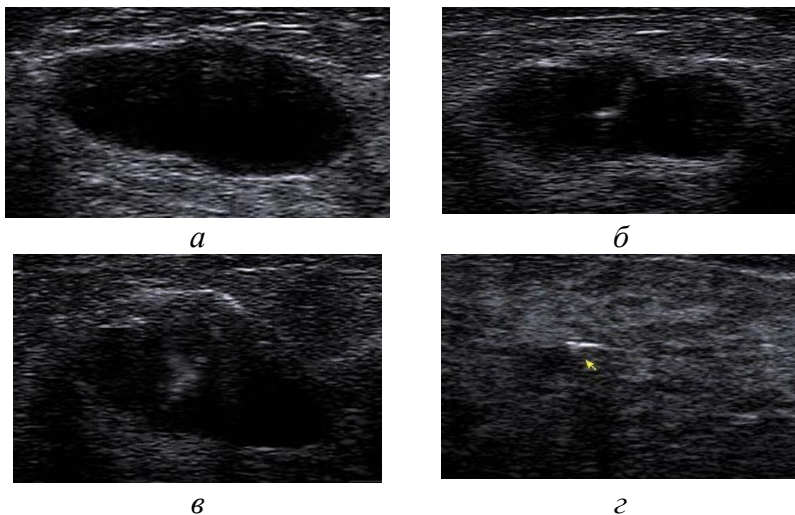


Рисунок 4.8 – Етапи лазерно-індукованої склероблітерації кісти ГЗ. Сонограми: *а* – типова кіста у вихідному стані; *б* – момент введення оптоволокна; *в* – вплив лазерного опромінення (мікробульбашки газу на кінці оптоволокна); *г* – після дії лазерного променя (маркером показане місце лазерної коагуляції кісти, внутрішня стінка – у вигляді гіперехогенної смужки)

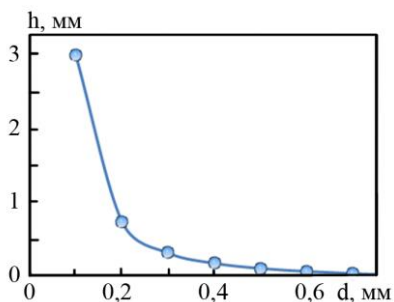


Рисунок 4.9 – Залежність глибини розрізу м'якої тканини від діаметра лазерного променя для скальпеля «Ліка-хірург» за часу опромінення 5 с

За рахунок впливу лазерного випромінювання досягається спорожнення кісти до спадання її стінок та формування лазерного шва, який забезпечує повне зіставлення стінок кісти. Це зі свого боку сприяє запобіганню рецидивів і підвищенню ефективності лікування. За період короткого імпульсу нагрівання тканини відбувається швидше, ніж за безперервного випромінювання, водночас поширення тепла буде мінімальним, що виключає можливість термічного пошкодження оточуючих тканин, сприяє значному зниженню можливості виникнення ускладнень і, як наслідок, скороченню термінів лікування.

На рисунку 4.8 показана залежність глибини розрізу м'якої тканини від діаметра лазерного променя (лазерний скальпель «Ліка-хірург»). Виявлено, що за зменшення діаметра променя від 0,6 мм до 0,1 мм глибина проникнення зростає від 0,2 мм до 3,0 мм.

Використання сучасних методів лазерної деструкції тканин є ефективною й безпечною альтернативою хірургічному лікуванню. Хірургічний лазер є ефективною і сучасною альтернативою традиційному скальпелю. Залежно від довжини хвилі він може використовуватися в різних сферах медицини.

Перевагами і характеристиками лазерного установи є зручність користування, швидкість проведення оперативного втручання, безболісність для пацієнта, відсутність швів і відновного післяопераційного періоду, під час якого можуть виникнути ускладнення.

Висновки

1 Навчальний посібник «Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині» рекомендований здобувачам вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання, галузей «Електроніка та телекомунікації», «Середня освіта (Фізика)» і «Медицина» в рамках професійно спрямованих навчальних дисциплін «Основи оптоелектронних та лазерних технологій», «Прилади і пристрої оптоелектроніки та спінтроники», «Основи мікроелектроніки» та «Хірургія».

2 Розглянуті питання стосовно класифікації, фізичних принципів функціонування, конструктивно-технологічних особливостей, параметрів і характеристик лазерів різного функціонального призначення як елементів сучасних електронних систем. Показано, що оптоелектронні і лазерні пристрої широко застосовуються в різних галузях науки, техніки, промисловості та медицини, а вплив лазерного випромінювання на фізичні та біологічні об'єкти ґрунтується на дії стимульованого електромагнітного випромінювання з такими властивостями, як когерентність, мала розбіжність променя, висока щільність потужності.

3 Матеріал, викладений у навчальному посібнику, дозволить сформулювати в студентів комплексне уявлення про можливість застосування сучасних оптоелектронних приладів та лазерних технологій за впливу як на твердотільні матеріали, так і біологічні тканини. Навчальний посібник спрямований на підвищення рівня професійних знань студентів інженерно-технічного, природничого та медичного напрямів підготовки, а також може бути застосованим під час виконання магістрантами науково-дослідної і кваліфікаційної робіт.

Список літератури

1. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посіб. / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
2. Гаврилюк О. О. Температурний та лазерний відпал нестехіометричних плівок SiOx / О. О. Гаврилюк, О. Ю. Семчук // Поверхность. – 2013. – Вип. 5 (20). – С. 69–82.
3. Колесник Ю. І. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. / Ю. І. Колесник, А. В. Кіпенський. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – 318 с. – (Серія «Фізична та біомедична електроніка»).
4. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці : навч. посіб. / О. К. Шуаїбов, І. І. Опачко, І. Е. Качер, М. П. Чучман. – Ужгород : УжНУ, 2010. – 238 с.
5. Матвієнко М. П. Основи електроніки : підручник / М. П. Матвієнко. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
6. Матвійків М. Д. Елементна база електронних апаратів / М. Д. Матвійків, В. М. Когут, О. В. Матвійків. – Львів : Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 42 с.
7. Однодворець Л. В. Матеріали і компоненти функціональної електроніки [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с. – Режим доступу : <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/79527/1/Odnodvoretz.pdf>.
8. Оптоелектроніка : конспект лекцій для студентів ЗДІА, що навчаються за напрямком «Мікро- та наноелектроніка» денної та заочної форм навчання /

- укладачі: Л. Б. Дмитрієв, В. С. Дмитрієв. – Запоріжжя, 2013. – 51 с.
9. Осадчук В. С. Волоконно-оптичні системи передачі / В. С. Осадчук, В. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 225 с.
 10. Основи оптоелектроніки : конспект лекцій / укладач Л. В. Однорець. – Суми : СумДУ, 2010. – 44 с.
 11. Проценко І. Ю. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) [Електронний ресурс] : навч. посіб. / І. Ю. Проценко, Л. В. Однорець. – Суми : СумДУ, 2020. – 231 с. – Режим доступу : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/77600/1/Protsenko_Tekhnolohiia.pdf.
 12. Пупань Л. І. Лазерні технології в машинобудуванні : навч. посіб. для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 109 с.
 13. Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посіб. / Г. М. Розорінов, Д. О. Соловійов. – Київ : Ліра-К, 2007. – 198 с.
 14. Системи для лазерного маркування виробів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.cmslaser.com/laser-capabilities/laser-marking/>.
 15. Технологія без маскової фотолітографії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://heidelberg-instruments.com/key-features/maskless-laser-lithography/>.
 16. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання : навч. посіб. / Є. П. Калинушкін та ін. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2009. – 175 с.
 17. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного

- випромінювання : навч. посіб. : у 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ : Політехніка, 2019. – Кн. 2. – 336 с.
18. Шмирьова Л. М. Квантова електроніка : навч. посіб. / Л. М. Шмирьова, О. М. Бевза, Н. В. Слободян. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – Ч. 1. – 98 с.
 19. An on-machine error calibration method for a laser micromachining tool / Jian-xiong Chena, Shu-wen Lina, Xiao-long Zhou et al. // Precision Engineering. – 2017. – Vol. 47. – P. 239–248.
 20. Dong L. Fiber lasers: basics, technology and applications / L. Dong, B. Samson. – USA : CRC Press, 2017. – 340 p.
 21. Eichler H. J. Lasers: Basics, Advances and Applications / H. J. Eichler, J. Eichler, O. Lux. – Springer Nature Switzerland AG, 2018. – 220 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-99895-4.
 22. Endoscopic ablation therapy for gastrointestinal superficial neoplasia / N. Muguruma et al. // Dig Endosc. – 2012. – Vol. 24, No. 3. – P. 139–149.
 23. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy / T. A. Labutin, V. N. Lednev, A. A. Ilyin, A. M. Popov // 2016. – Vol. 31, № 1. – P. 90–118.
 24. Fried N. M. Advances в laser technology and fibre-optic delivery systems in lithotripsy / N. M. Fried, P. B. Irby // Nat. Rev. Urol. – 2018. – Vol. 15, No. 9. – P. 563–573.
 25. Lukavenko I. M. Diode laser as an electronic system of surgical influence on soft biological tissues / I. M. Lukavenko // J. Nano- and Electron. Phys. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 01014.
 26. Mao S. S. High-Throughput Multi-Plume Pulsed-Laser Deposition for Materials Exploration and Optimization / S. S. Mao, X. Zhang // Engineering. – 2015. – Vol. 1, No. 3. – P. 367–371.
 27. Matlroud S. Switchable Multi-color Solution Processed QD-laser / S. Matlroud, P. Amini, A. Rostami // Scientific

- Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 5273.
28. Ogugua S. N. Latest Development on Pulsed Laser Deposited Thin Films for Advanced Luminescence Applications / S. N. Ogugua, O. M. Ntwaeaborwa, H. C. Swart // Coatings. – 2020. – Vol. 10. – P. 1078.
 29. Parker S. Verifiable CPD paper: Introduction, history of lasers and laser light production / S. Parker // Br. Dent. J. – 2007. – Vol. 202, No. 1. – P. 21–31.
 30. Pimpin A. Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications / A. Pimpin, W. Srituravanich // Engineering Journal. – 2012. – Vol. 16, No. 5. – P. 37–55.
 31. Radu F. Ferrimagnetic Heterostructures for Applications in Magnetic Recording / F. Radu, J. Sánchez-Barriga // Novel Magnetic Nanostructures. – 2018. – Vol. 9, No. 6. – P. 267–331.
 32. Scalable and High-Throughput Top-Down Manufacturing of Optical Metasurfaces / T. Lee et al. // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – P. 4108.
 33. Slow Intramural Heating With Diffused Laser Light A Unique Method for Deep Myocardial Coagulation / D. L. Ware et al. // Circulation. – 1999. – Vol. 99. – P. 1630–1636.
 34. Watts M. Lasers Trim Embedded Passive Components / M. Watts // Photonic Spectra. – 2003.

Електронне навчальне видання

Однодворець Лариса Валентинівна,
Пазуха Ірина Михайлівна,
Лукавенко Іван Михайлович

ОПТОЕЛЕКТРОННІ І ЛАЗЕРНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА МЕДИЦИНІ

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки І. М. Пазухи
Редактор Н. З. Клочко
Комп'ютерне верстання І. М. Пазухи

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,44. Обл.-вид. арк. 6,96.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.