

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. М. Коваль

ОПТОЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка»,
освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Рецензенти: *Іванько К. С., доц., к.т.н., доц.*

Відповідальний

редактор *Орлов А. Т., проф., к.т.н., доц.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім.Ігоря Сікорського(протокол №10 від 18.06.2020)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол №05/2020 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доц.

ОПТОЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Оптоелектронні інформаційні системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / В.М. Коваль; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,64 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 165 с.

Метою навчального посібнику є ознайомлення студентів з сучасними оптоелектронними інформаційними системи, які знайшли широке впровадження в житті людства. Для кожної системи наведено фізичні основи роботи, структурну схему, основні параметри та порівняльні характеристики різних варіантів реалізації. Навчальний посібник містить 11 розділів, які присвячені опису всіх п'яти класів оптоелектронних інформаційних систем – систем збору інформації; систем обробки інформації; систем передачі інформації; систем запису та зберігання інформації; систем відображення інформації. До кожного розділу наведено контрольні запитання для самостійної перевірки знань.

© В.М. Коваль, 2020

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
РОЗДІЛ 1. Еволюція, класифікація та особливості оптоелектронних інформаційних систем.....	9
РОЗДІЛ 2. Елементи теорії інформації	22
РОЗДІЛ 3. Математична обробка оптичного сигналу	29
РОЗДІЛ 4. Принципи побудови волоконно-оптичних систем передачі інформації.....	42
РОЗДІЛ 5. Фізика світлопередачі інформації по оптоволокону	54
РОЗДІЛ 6. Архітектура волоконно-оптичних мереж	70
РОЗДІЛ 7. Оптоелектронні обчислювальні системи.....	82
РОЗДІЛ 8. Оптоелектронні системи розпізнавання образів	98
РОЗДІЛ 9. Голографічні системи запису та відображення інформації ...	115
РОЗДІЛ 10. Системи безпосереднього відображення інформації	130
РОЗДІЛ 11. Проекційні системи відображення інформації	146
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	163

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач
ВОЛЗ	– волоконно-оптичні лінії зв'язку
ВОСПІ	– волоконно-оптичні системи передачі інформації
ВС	– волоконний світловод
ЕМХ	– електромагнітна хвиля
ІКМ	– імпульсно-кодова модуляція
ІЧ	– інфрачервоне випромінювання
ЛР	– лінійний ретранслятор
ОІС	– оптоелектронні інформаційні системи
ОК	– оптичний кабель
ПЗЗ	– пристрій із зарядовим зв'язком
РК	– рідкі кристали
ТПТ	– тонкоплівковий транзистор
УФ	– ультрафіолетове випромінювання
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
CIS	– Contact Image Sensor, контактні датчики зображення
DLP	– Digital Light Processing, технологія цифрової обробки світла
DMD	– Digital Micromirror Device, цифровий мікродзеркальний пристрій
FDM	– Frequency Division Multiplexing, мультиплексування з частотним розділенням
LCD	– Liquid Crystal Display, рідкокристалічні дисплеї
LCoS	– Liquid Crystal on Silicon, рідкокристалічна технологія на відбивання
MDA	– Multilevel Document Analysis, багаторівневий аналіз документу

NRZ	– Non Return to Zero, код без повернення до нуля
OCR	– Optical Character Recognition, оптичне розпізнавання символів
OLED	– Organic Light-Emitting Diode, органічні світлодіоди
PDP	– Plasma Display Panel, плазмові панелі
RZ	– Return to Zero, код з поверненням до нуля
SLM	– Spatial Light Modulator, просторовий модулятор
TDM	– Time Division Multiplexing, мультиплексування з розділенням в часі
VCSEL	– Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, вертикально випромінюючий лазер
VLC	– Visible Light Communication, зв'язок за допомогою видимого світла
WDM	– Wavelength Division Multiplexing, мультиплексування з розділенням по довжині хвилі

ПЕРЕДМОВА

Розвиток сучасного суспільства характеризується широким впровадженням інформаційних та телекомунікаційних технологій, за основу яких все частіше беруться оптоелектронні елементи та пристрої, що дозволяють задовольняти найвимогливіші стандарти, які ускладнюються щороку на вимогу потреб користувачів.

Оптоелектронні системи знаходять все більш широке застосування в самих різноманітних областях науки, техніки, промисловості, медицини, побуті тощо. Сучасний етап їх розвитку характеризується швидким вдосконаленням елементної бази, зокрема розвитком оптоелектронних мікро- та нанотехнологій.

В останні десятиріччя оптоелектроніка як наука набула бурхливого розвитку, а елементи та прилади оптоелектроніки застосовуються практично в усіх галузях народного господарства від промисловості до побуту. Оптоелектроніка – це розділ електроніки, який вивчає електронно-оптичні принципи одержання, передавання, обробки і зберігання інформації, носієм якої є електрично нейтральний фотон. Через електричну нейтральність фотонів в оптичному каналі зв'язку не збуджуються електричні і магнітні поля, що супроводжують зазвичай протікання електричного струму. Іншими словами, фотони не створюють перехресних перешкод в лініях зв'язку і забезпечують повну електричну розв'язку між передавачем і приймачем, що принципово недосяжно в ланцюгах з електричним зв'язком.

Передача інформації за допомогою світлового променя не супроводжується накопиченням і розсіюванням електромагнітної енергії в лінії. Звідси впливає відсутність істотного запізнення сигналу в каналі зв'язку, висока швидкодія і мінімальний рівень спотворення інформації, що переноситься сигналом.

Крім того, висока частота оптичних коливань (10^{14} — 10^{15} Гц) обумовлює великий об'єм інформації, що може передаватись, тобто забезпечується висока інформаційна ємність такого каналу.

Розвиток оптоелектроніки та оптичних засобів прийому, передачі та обробки зображень викликає необхідність створення систем оптичної обробки інформації, елементна база яких може виконувати із зображеннями функціональні перетворення в реальному масштабі часу.

До елементів та приладів оптоелектроніки відносяться: фотоприймачі для перетворення світлового сигналу в електричний (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори), світлодіоди та лазери для перетворення електричного сигналу в світловий (джерела світла, індикатори), оптопари для послідовного перетворення струм-світло-струм, фотоелектричні перетворювачі, призначені для перетворення енергії Сонця в електричну енергію (відновлювальні джерела енергії), оптоелектронні інтегральні схеми, в яких електричний зв'язок між окремими елементами схеми замінено на оптичний зв'язок.

Спектр застосувань оптоелектронних елементів та приладів є досить широким: від фоточутливих сенсорів, індикаторів, світлодіодних та лазерних джерел світла до плоских екранів телевізорів, моніторів комп'ютерів та мобільних телефонів, напівпровідникових відеокамер, волоконно-оптичних ліній зв'язку, оптичних комп'ютерів та запам'ятовуючих пристроїв. Тому набуття теоретичних знань та практичних навичок роботи в області оптоелектроніки та оптоелектронних систем є необхідним для випускника будь-якої технічної спеціальності.

Даний навчальний посібник містить 11 розділів, які присвячені розгляду основних видів сучасних оптоелектронних інформаційних систем: систем збору інформації (оптоелектронні сенсорні системи); систем обробки інформації (оптичні обчислювальні системи); систем передачі інформації (системи

оптичного зв'язку); систем запису та зберігання інформації (оптичні системи запису та зберігання інформації); систем відображення інформації (оптоелектронні системи візуального відображення інформації).

Головний акцент в посібнику зроблено на сучасні оптоелектронні інформаційні системи, які знайшли широке впровадження в житті людства. Для кожної системи наведено фізичні основи роботи, структурну схему, основні параметри та порівняльні характеристики різних варіантів реалізації. В навчальному посібнику до кожного розділу наведено контрольні запитання для самостійної перевірки знань.

РОЗДІЛ 1.

Еволюція, класифікація та особливості оптоелектронних інформаційних систем

Оптичний зв'язок починає свою історію з винаходу Клаудом Шаппом оптичного телеграфу в 1790 році у Франції, принцип дії якого полягав в наступному. Сигнальніки розташовувались на спеціальних вежах і за допомогою рухомих рейок передавали повідомлення, закодоване різним їх взаємним розташуванням (рис.1). Сигнальник на наступній вежі зчитував повідомлення за допомогою підзорної труби.

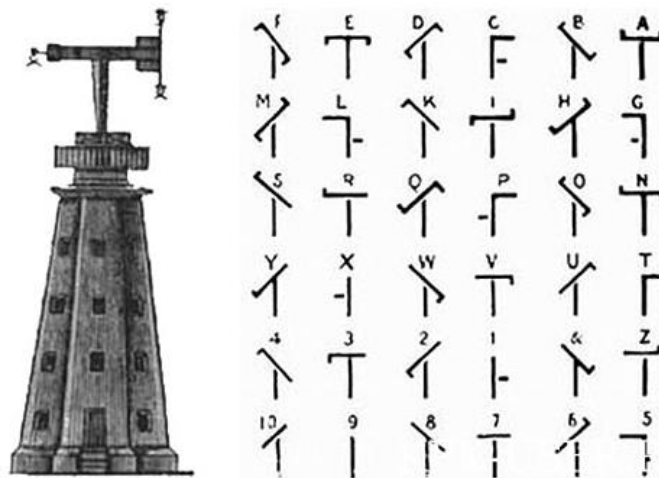


Рисунок 1 – Перший оптичний телеграф Клауда Шаппа та його азбука
(Франція, 1790 р.)

Перший оптичний телеграф представляв собою ланцюг таких веж, розташованих між Парижем та Ліллем на відстані 230 км. Для передачі повідомлення між цими містами вистачало 15 хв. Вважається, що своїми блискучими перемогами Наполеон Бонапарт немало зобов'язаний оптичному телеграфу, за допомогою якого він мав можливість швидко передавати свої

розпорядження на великі відстані. З часом оптичний телеграф був замінений на оптичний.

Наступними важливими винаходами у цьому напрямку були демонстрація Олександром Беллом (США) модуляції дзеркалом оптичного сигналу в 1860 р. та передача мови за допомогою світлового променя в 1881 р. В цьому пристрої за допомогою системи лінз та дзеркал світло направлялось на плоске дзеркало, закріплене на рупорі (рис.2). Під дією звуку дзеркало коливалось, що призводило до модуляції відбитого світла. В приймачі використовувався сенсор на основі селену, електричний опір якого змінювався в залежності від інтенсивності падаючого світла. Даний пристрій отримав назву фотофон і давав змогу передавати мовний сигнал на відстань більшу за 200 м. Таким чином, фотофон був першим у світі VLC-пристроєм (Visible Light Communication – зв'язок за допомогою видимого світла).

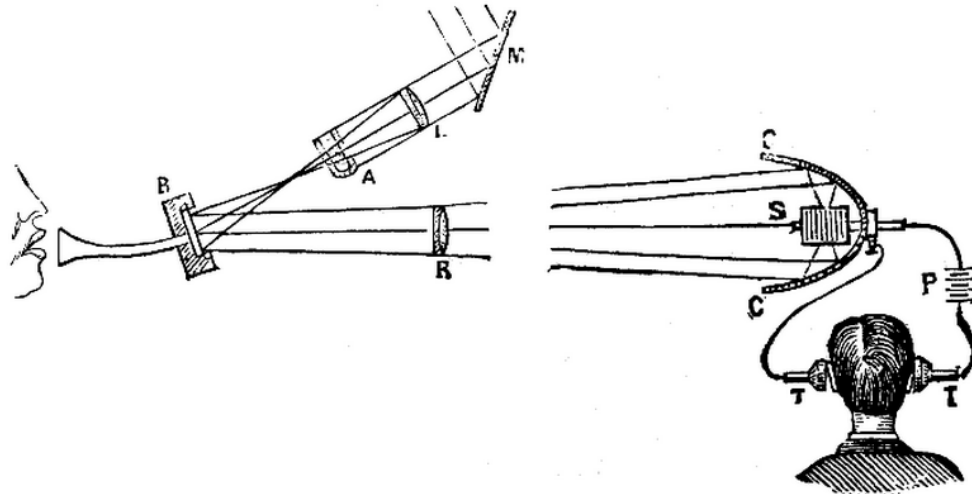


Рисунок 2 – Фотофон, розроблений Олександром Беллом (США, 1881 р.)

В середині ХХ ст. були сформульовані основні принципи роботи лазера як потужного джерела світла (Гордон Голд, 1957 р., США), а дещо пізніше були розроблені перші експериментальні зразки лазерів: в 1960 р. Теодор Меймен

(США) створив перший у світі рубіновий лазер, а співробітники з Bell Laboratories Алі Джаван, Вільям Беннетт та Дональд Херріот (США) – гелій-неоновий лазер, в 1970 р. був розроблений напівпровідниковий лазер, що працює за кімнатної температури, Жоресом Алфьоровим (СРСР) та Гербером Кремером (Німеччина). Потужне випромінювання лазера як носія інформації не було залишене спеціалістами по комунікаціям без уваги. Можливості лазерного випромінювання для передачі інформації у 10 000 разів перевищують можливості радіочастотного випромінювання. Однак лазерне випромінювання непридатне для передачі сигналу на відкритому просторі, оскільки на його роботу сильно впливають погодні умови (дощ, туман, смог тощо), а також наявність різного роду перешкод (рельєф, споруди тощо). На той час, вважалося, що лазерному променю набагато легше подолати відстань від Землі до Місяця, аніж між протилежними околицями міста. Тому спочатку лазер сприймався як комунікаційне джерело світла, однак без придатного середовища поширення.

На початку ХХ ст. були проведені теоретичні та експериментальні дослідження діелектричних хвильоводів, в тому числі гнучких скляних стрижнів. Першим, хто запропонував використовувати скляне волокно у скляній оболонці та ввів термін “волоконна оптика” був доктор Нерайндер Капані з Королівського коледжа Лондона у 1956 році.

В 1966 році Чарльз Као та Джордж Хокхем (Великобританія) опублікували статтю про те, що оптичні волокна можуть використовуватися як середовище для передачі лазерного випромінювання при досягненні ними прозорості, що забезпечує затухання сигналу менше 20дБ/км. Вони дійшли висновку, що високий рівень затухання, властивий першим волокнам на рівні 1000 дБ/км, обумовлений вмістом домішок у склі. Саме цю дату вважають початком ери оптичного зв'язку.

В 1970 році Роберт Маурер з компанії Corning Glass (США) вперше отримав оптоволокло з затуханням меншим, аніж 20 дБ/км, а в 1972 році було налагоджено виробництва оптичного волокна з затуханням 4 дБ/км. Починаючи з цього часу, подальша розробка як активних (лазерних діодів, фотодіодів), так і пасивних елементів системи оптичного зв'язку набуває бурхливого розвитку.

Виділяють 5 поколінь волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ):

1. Перше покоління (1977 – 1980 р.р.) – використовувався діапазон довжин хвиль 0,8 – 0,9 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 45 Мбіт/с.
2. Друге покоління (1980 – 1983 р.р.) – використовувалась довжина хвилі 1,31 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 500 Мбіт/с.
3. Третє покоління (1983 – 1990 р.р.) – використовувались довжини хвиль 1,31 та 1,55 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 2 Гбіт/с.
4. Четверте покоління (1989 – 1994 р.р.) – використовувалась довжина хвилі 1,55 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 10 Гбіт/с.
5. П'яте покоління (з 1994 р.) – використовують діапазон довжин хвиль 1,55 – 1,63 мкм, цифрові потоки обробляються в багатоканальних ВОЛЗ зі швидкістю до 1 – 10 Тбіт/с. Однак роботи по підвищенню швидкості продовжуються.

Військові були першими, хто почав впроваджувати волоконно-оптичні лінії зв'язку. Так, в 1976 році на військовому літаку А-7 Corsair II (США) кабельне оснащення було замінено на оптоволоконне. В результаті кабельна система з 302 мідних кабелів сумарною протяжністю 1260 м та масою 40 кг була замінена на оптоволоконну систему з 12 волокон сумарною протяжністю 76 м та масою 1,7 кг.

В 1977 році в США була встановлені перші телефонні комерційні системи компаніями AT&T та GTE і з цього часу почався їх бурхливий розвиток і впровадження, що зробило революцію в телекомунікаційних системах. Більше мільйона телефонних розмов сьогодні можна одночасно передавати через одне

оптичне волокно. Поява всесвітньої мережі Інтернет та постійно зростаюча потреба в інформаційній пропускній здатності каналів зв'язку посприяли ще більшому розвитку і використанню волоконної оптики в системах передачі даних.

Зі значним запізненням оптоволоконні технології дістались комп'ютерної індустрії після військових та комунікаційних компаній. Так, в 1990 році компанія IBM (США) випустила новий швидкодіючий комп'ютер, що використовував волоконний каналний інтерфейс, який забезпечував обмін інформацією між сервером та периферійними пристроями чи іншим сервером. Це стало першим застосуванням волоконної оптики в серійному виробництві комп'ютерів. Впровадження волоконного контролера (ESCON) дало змогу передавати інформацію з більшою швидкістю і на більші відстані. Попередня модель контролера на мідних провідниках мала швидкість передачі інформації 4,5 Мбіт/с з максимальною довжиною лінії передачі 120 м, в той час як оптоволоконний контролер ESCON працював зі швидкістю 100 Мбіт/с на відстані до 3 км.

Зрозуміло, що впровадження оптоволоконних технологій не обмежилось лише телекомунікаціями, військовою сферою та комп'ютерною індустрією і насправді сьогодні проникли у всі сфери нашого життя. Розглянемо декілька найбільш важливих прикладів сучасних оптоелектронних інформаційних систем (ОІС), що набули широкого поширення.

Одним з найвідоміших застосувань оптоелектронних систем є телекомунікаційні мережі різних рівнів на основі ВОЛЗ – від міжконтинентальних магістралей до корпоративних і домашніх комп'ютерних мереж. Області застосування волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСПІ) досить широкі – це мобільний зв'язок, телефонія, телебачення, інтернет та передача даних. Побудова ВОСПІ ґрунтується на технології виробництва оптоволоконних світловодів та кабелів, технології виробництва

передавачів та приймачів, мережевій технології комутації потоків, технології спектрального ущільнення, технології монтажу, діагностики та вимірювання.

Розглянемо конкретний приклад такої оптоелектронної системи – трансконтинентальні інформаційні мережі. Такі системи складаються з оптоволокна, що поміщається в спеціально захищені оболонки, утворюючи оптоволоконний кабель, та ряду активних та пасивних оптоелектронних приладів (лазера, фотоприймача, підсилювача, модулятора, кодера, декодера тощо). Прокладка кабелю по океанському дну процес тривалий та складний. Кабель змотують у так звані бухти на кораблі, а далі починають процес укладки. Біля берега кабелі прокладають у спеціально підготовлені траншеї для попередження їх пошкодження на міліні транспортними засобами, а далі кабель просто опускається на морське дно.

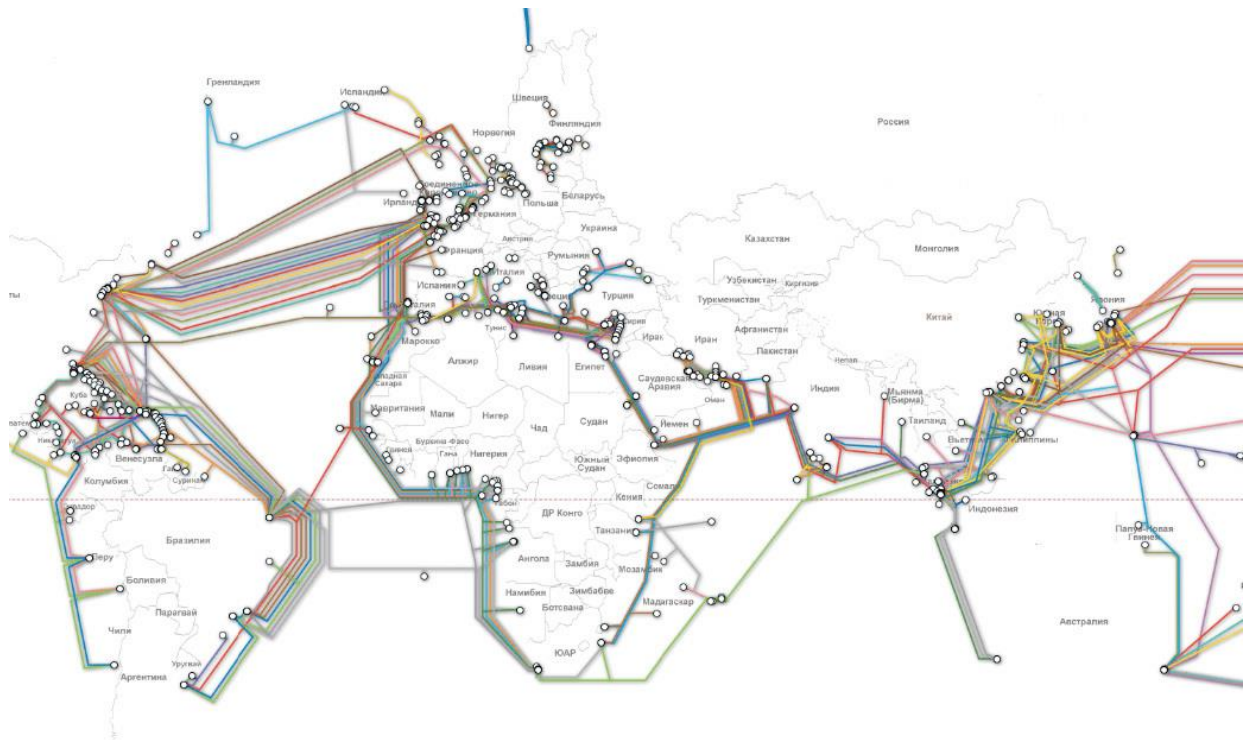


Рисунок 3 – Карта трансконтинентальних мереж (2015 р.)

На сьогоднішній день існує близько 300 трансконтинентальних мереж на основі оптоволокна, які зв'язують між собою континенти. Складені навіть

спеціальні карти або атласи з нанесеними на них мережами та їх назвамим (рис.3). Цікаво, що ці маршрути майже повністю співпадають з старовинними торговими шляхами чи телеграфними лініями, прокладеними в кінці XIX ст. ВОЛЗ прокладають не лише між континентами, а й на суші – це надійний і поширений спосіб передачі інформації. В Україні приватні телекомунікаційні компанії такі, як Укртелеком, Київстар та інші, мають свої оптоволоконні мережі в межах країни. Більше того, сьогодні кожний користувач ПК може замовити оптоволоконний інтернет, таку функцію пропонують більшість інтернет провайдерів. Відомо, що на сьогодні виробництво оптичного волокна перевищує 60 млн. км на рік, тобто щохвилини у світі прокладається понад 100 км оптичного волокна.

Однією з нових областей, де починають широко використовуватися оптоелектронні системи, є транспорт, причому як наземний (автомобільний та залізничний), так і повітряний. Наприклад, системи нічного бачення все частіше починають використовуватись не лише у військовій галузі, а й в автомобілях та локомотивах. Статистичні дані свідчать про те, що майже половина дорожньо-транспортних пригод трапляються у вечірній та нічний час, тому застосування систем нічного бачення на транспортних засобах є вкрай актуальним. В таких системах використовуються фотоелектричні формувачі зображення ІЧ діапазону. Такими системами обладнанні найсучасніші моделі автомобілів компаній Mercedes-Benz (Німеччина), BMW (Німеччина), Toyota (Японія), Audi (Німеччина), Honda (Японія) тощо. Вперше систему нічного бачення було застосовано в автомобілях у 2000 році компанією Cadillac (США). З тих пір ця система набула значної модернізації. Так, компанія BMW (Німеччина) представила інтелектуальну систему ІЧ нічного бачення Dynamic Light Spot з можливістю виявлення пішоходів та тварин на автодорозі та поблизу неї на відстані до 100 м за допомогою сенсорів серцебиття, а також дана система автоматично освітлює пішохода за допомогою поворотних діодних фар.

Одне з найвідоміших застосувань ОІС в авіації – це внутрішня бортова система для пасажирів, яка складається з дисплеїв, що вбудовані на спинці кожного сидіння, та телекомунікаційних засобів, в тому числі на основі оптоволоконних технологій. За допомогою такої системи кожний пасажир має змогу під час польоту отримувати різноманітну мультимедійну інформацію (відео, музика, ігри), а також відомості про деталі польоту в реальному часі. Такими системами обладнані літаки, що використовуються для довготривалих перельотів, наприклад Boeing 787 Dreamliner (США).

Інтенсивно використовуються ОІС і в космічній галузі, зокрема в ІЧ-астрономії. Наприклад, в 2009 році на орбіту був запущений інфрачервоний орбітальний телескоп NASA WISE (англ. Wide-field Infrared Survey Explorer, Ширококутний Інфрачервоний Оглядовий Дослідник). Телескоп призначений для вивчення потоків теплового випромінювання від різних джерел у Всесвіті, зокрема астероїдів та комет, шляхи яких пролягають поруч із Землею. WISE також необхідний був астрономам для вивчення віддалених галактик, оточених хмарами пилу. Пил непроникний для випромінювання видимого діапазону, тому такі об'єкти не можна було вивчати за допомогою звичайних оптичних телескопів (таких як телескоп Хаббл). WISE може вивчати галактики, віддалені від Землі на відстань до 10 мільярдів світлових років. Конструктивно даний супутник представляє собою ІЧ телескоп з діаметром апертури 60 см та цистерни з рідким воднем, що забезпечує охолодження до -270°C , що захищає від теплового шуму. Оптиелектронні системи такого супутника здатні проводити вимірювання в діапазоні довжин хвиль від 2 до 200 мкм та можуть виявляти джерела випромінювання потужністю всього 10 Вт. Основу ІЧ-телескопу складають формувачі зображення, що використовують ефект домішкової фотопровідності у кремнії, легovanому галієм, фосфором, германієм-берилієм, германієм-галієм, що забезпечують реєстрацію випромінювання на 16, 28, 50, 120 мкм відповідно.

Досить поширеними областями використання оптоелектронних систем є безпека та охорона, контрольно-пропускні пункти та боротьба з тероризмом. Зокрема всім відомою є система біометричного сканування – відбитки пальців, сканування райдужної оболонки ока чи сітківки, геометрії обличчя тощо. Так, в основі трьохвимірного сканування обличчя лежить принцип унікальності кожного обличчя, обумовленого особливостями черепа. Трьохвимірний сканер складається з джерела ІЧ підсвітки та високороздільної камери, що працює в тому ж діапазоні. За допомогою підсвітки на обличчя людини проектується невидима для людського ока світлова сітка. Камера здійснює захоплення зображення ІЧ маски, накладеної на обличчя, що відбиває індивідуальні геометричні характеристики. Далі зчитувач виконує розрахунок 3D-геометрії обличчя по більш ніж 40 000 точкам отриманої маски та формує математичний образ – шаблон, що містить дані про унікальні особливості обличчя. Шаблони різних людей зберігаються в базі даних. Точність шаблону настільки висока, що дає змогу розрізняти навіть близнюків.

До оптоелектронних інформаційних систем майбутнього можна віднести наступні розробки:

- оптоелектронні комп'ютери з архітектурою, схожою до людського мозку;
- стереоскопічні системи, що імітують характеристики людського зору з автоматичним розпізнаванням рухомих об'єктів;
- солітонні системи зв'язку зі швидкістю передачі інформації 100 Тбіт/с і більше;
- трьохвимірна комп'ютерна графіка для систем віртуальної реальності.

Класифікація оптоелектронних інформаційних систем здійснюється на основі виду перетворення, яке може бути здійснено над інформацією:

1. системи збору інформації (оптоелектронні сенсорні системи);

2. системи обробки інформації (оптичні обчислювальні системи);
3. системи передачі інформації (системи оптичного зв'язку);
4. системи запису та зберігання інформації (оптичні системи запису та зберігання інформації);
5. системи відображення інформації (оптоелектронні системи візуального відображення інформації).

Які ж переваги надають та обмеження накладають оптичні сигнали порівняно з електричними? Розглянемо особливості використання оптичних сигналів для передачі та обробки інформації:

1. **Висока інформаційна ємність.** При передачі інформації необхідною є умова квазімонохроматичності, тобто ширина спектру сигналу, що передається, має бути набагато меншою, принаймні на 1-2 порядки, аніж середня частота цього сигналу. Оптичний діапазон характеризується частотою несучих порядку 10^{14} Гц, тому ширина смуги частот передачі сигналу може досягати $10^{12} - 10^{13}$ Гц, що недосяжно засобами техніки НВЧ.

2. **Висока швидкодія.** Оптичні системи характеризуються високою швидкодією, так як теоретично швидкість обробки визначається швидкістю поширення світла у середовищі. Однак на практиці швидкість таких систем обмежується швидкістю введення-виведення інформації.

3. **Висока щільність запису інформації.** Когерентний світловий промінь можна сфокусувати на майданчик, розміри якого співвимірні із довжиною хвилі, що дає можливість різко підвищити щільність запису інформації (до 10^8 біт/см²).

4. **Багатоканальна обробка інформації (паралельні алгоритми обробки інформації, оперування образами).** Можливість багатоканальної обробки інформації здійснюється за рахунок подвійної модуляції світлового променя – просторової та часової. Оптичне зображення являється зазвичай функцією мінімум 2-3 незалежних координат (X, Y, Z та час), в той час як

електричний сигнал має лише 1 незалежну змінну – час, тобто для електричних сигналів можливою є лише часова модуляція. Оскільки оптичне зображення залежить від кількох координат, то одна з них може використовуватися в якості незалежної змінної, а інша в якості параметра, що визначає номер каналу. Це дає змогу вести обробку інформації паралельно по багатьом каналам, а також оперувати образами, тобто передавати картинку (зображення) за один машинний такт без попиксельного сканування рядків зображення, як це реалізовано в електронних інформаційних системах.

5. **Квантова природа сигналів.** Наступна особливість оптичного діапазону – це необхідність врахування квантових властивостей випромінювання, які проявляються як при генерації випромінювання, так і при реєстрації фотоприймачем. Через те, що в НВЧ діапазоні енергія кванту є меншою, аніж теплова енергія, а в оптичному діапазоні навпаки, то в першому випадку мають місце теплові шуми, а в оптичному діапазоні – квантові шуми, а в приймачі квантовий (дробовий) шум фотоструму, який потрібно враховувати при розробці ОІС.

6. **Висока завадостійкість.** Передача інформації здійснюється електрично нейтральними фотонами, які не взаємодіють один з одним та із зовнішніми електричними та магнітними полями. Це обумовлює високу завадостійкість каналу зв'язку.

7. **Багатофункціональність.** Когерентний світловий промінь, що несе інформацію, можна обробляти за допомогою аналогових оптичних обчислювальних пристроїв, що складаються з лінз, дзеркал, дифракційних ґраток тощо. Зокрема досить швидко та точно виконуються такі операції як диференціювання, інтегрування, згортка, множення тощо (швидкість обробки до 10^{12} біт/с).

8. **Забезпечення секретності передачі інформації.** Відомо два найбільш поширені способи витоку інформації – під'єднання до мідного кабелю або

перехоплення радіохвиль від працюючого обладнання. Завдяки використанню оптоволокна обидва вони не можуть мати місце. По-перше, до оптоволокна вкрай важко під'єднатися, а по-друге, воно не випромінює хвилі, які можуть бути сприйняті сусідньою антеною. Тому вважається, що оптичне волокно є надбезпечним середовищем для передачі інформації.

9. Менші габаритні розміри обладнання. Висока направленість когерентного оптичного випромінювання дозволяє різко зменшити розміри апертури випромінювача. Крім того, має місце менша маса та розмір оптоволокна в розрахунку на однакову пропускну здатність порівняно з мідними проводами, що особливо критично в літакобудуванні. При цьому волокно дає змогу передавати сигнал на значно більшу відстань без ретрансляції, аніж мідний кабель (до 100 км).

10. Пожежобезпека при використанні оптоволокна. Оскільки оптоволокно є діелектриком і не проводить струм, то його використання є безпечним з точки зору іскро- та пожежобезпеки, що дало змогу використовувати його в небезпечних місцях – наприклад, оптоволокно можна прикладати через паливний бак.

Отже, заміна в інформаційних системах електричних кіл оптичними дозволяє значно (на 3-4 порядки) збільшити швидкодію та ємність таких систем, а перехід до оптоелектронних інтегральних схем дає додатково значний вииграш як по енергоспоживанню, так і в габаритних розмірах та надійності системи в цілому.

Контрольні запитання

1. Назвіть приклади перших оптоелектронних інформаційних систем в історії людства?
2. Що собою являє VLC-пристрій?

3. Наведіть технічні характеристики п'яти поколінь волоконно-оптичних ліній зв'язку.
4. Наведіть сучасні приклади використання оптоелектронних інформаційних систем.
5. Які напрямки розробок в галузі оптоелектронних інформаційних систем Ви можете навести? Які нові системи можуть з'явитись найближчим часом?
6. Наведіть класифікацію оптоелектронних інформаційних систем.
7. Якими є особливості використання оптичних сигналів для передачі та обробки інформації порівняно з електричними сигналами?
8. Чим на практиці обмежується швидкість роботи таких систем?
9. За рахунок чого в ОІС є можливість багатоканальної обробки інформації?
10. Яка властивість фотонів забезпечує високу завадостійкість каналу оптичного зв'язку?

РОЗДІЛ 2.

Елементи теорії інформації

Виникнення теорії інформації зазвичай пов'язують із появою у 1948 р. фундаментальної праці американського вченого Клода Шеннона „Математична теорія зв'язку”. При цьому інформація визначається як характеристика внутрішньої організованості матеріальної системи. Відповідно кількість інформації є мірою організованості (впорядкованості) системи, що є аналогом ентропії фізичної системи. Отже, інформація – це фактор, що сприяє зростанню організованості, порядку у фізичній, хімічній, соціальній та інших системах матеріальних тіл. Одне з вдалих пояснень поняття “інформація” було запропоноване в свій час французьким вченим Леоном Бріллюеном. Нехай в вихідному положенні фізична система має P_0 рівномірних станів. Якщо про стан даної системи отримано додаткові відомості, тобто отримана деяка інформація, то кількість її можливих рівномірних станів зменшиться до величини P_1 . Звідси кількість отриманої інформації I визначається як:

$$I = k \ln P_0 - k \ln P_1 \quad (1)$$

В даному виразі логарифми використовуються для надання інформації властивості адитивності. Коефіцієнт k визначає вибір одиниць вимірювання кількості інформації. Якщо $k=1$, то розмірність кількості інформації – нат, якщо $k=1/\ln 2$ – біт.

Слід відмітити, що поняття “кількості інформації” не містить характеристику цінності інформації. Так, 100 літер у вірші видатного поета містить стільки ж інформації, скільки 100 літер в звичайній газетній статті. Цінність різна, а кількість інформації однакова. Формулювання критерію цінності інформації є доволі складним завданням, яке розглядається в теорії інформації.

Інформація передається у вигляді сигналів. Сигнал – це фізичний процес (електричний, акустичний, електромагнітний тощо), що несе повідомлення. Повідомлення – це сукупність сигналів, що містять інформацію. Данні – це інформація у формалізованому вигляді, що дозволяє реєструвати її на фізичному носії і здійснювати обробку та передачу за допомогою технічних засобів.

Швидкість передачі інформації C дорівнює відношенню кількості інформації I , яку передали, до часу передачі T (біт/с):

$$C = \frac{I}{T} \quad (2)$$

Залежність швидкості передачі інформації від технічних характеристик системи передачі була встановлена у теоремі Шеннона. В даній теоремі стверджується, що теоретична верхня межа швидкості передачі даних, які можна передати з даною середньою потужністю сигналу S через канал зв'язку, підданий дії адитивного білого гаусівського шуму потужності N , дорівнює:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3)$$

Таким чином, теорема Шеннона показує залежність швидкості передачі інформації від ширини B смуги частот, що передаються, та відношення сигнал/шум (S/N) в кінцевому пристрої такої системи.

На рис.4 представлена загальна схема системи передачі інформації, яка включає в себе джерело повідомлення, кодер (АЦП), канал передачі, декодер (ЦАП), отримувач. Процес передачі інформації неминує супроводжується різноманітними випадковими дестабілізуючими впливами, тобто шумами (завадами). Створення систем передачі сигналів, стійких до впливу завад різної природи є основним завданням розробників таких систем, при цьому суттєву роль відіграє спосіб кодування сигналів. В сучасній теорії інформації було доведено, що найбільш достовірне відтворення сигналу на виході системи

передачі забезпечується саме при дискретному (цифровому) кодуванні сигналів. При певних вимогах до дискретного перетворення сигналів в кінцевому пристрої системи можна відновити вхідну послідовність сигналів з будь-якою точністю. Цифрове кодування сигналів здійснюється на основі так званої імпульсно-кодової модуляції сигналу.

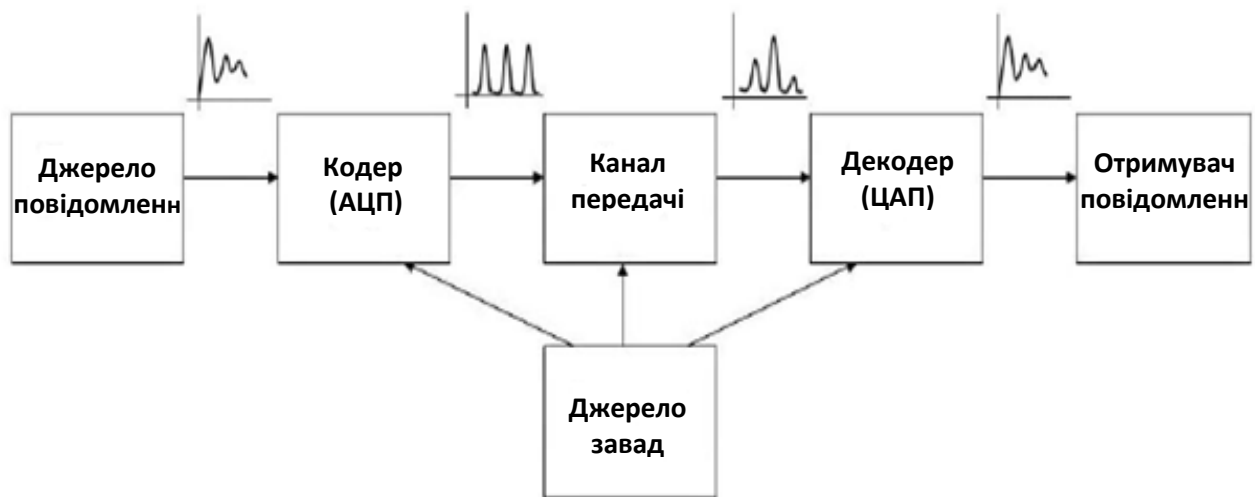


Рисунок 4 – Загальна схема системи передачі інформації

Імпульсно-кодова модуляція (або ІКМ) – це процес перетворення аналогового сигналу у цифровий сигнал, коли через певні інтервали часу беруться відліки аналогового сигналу, незалежно один від одного квантуються і далі кодуються цифрами (рис.5). Відлік – це окреме вибіркове значення функції. Принцип ІКМ базується на теоремі відліків або теоремі Шеннона-Котельникова, в якій доведено наступне. Якщо безперервний сигнал $x(t)$ має спектр, обмежений частотою $f_{\max}$, то він може бути однозначно і без втрат відновлений за своїми дискретними відліками, узятими з частотою $f_{\text{дискр}} = 2 * f_{\max}$, або, по-іншому, за відліками, узятими з періодом $T_{\text{дискр}} = 1 / 2 * f_{\max}$. Теорему відліків можна сформулювати зворотним чином. Для того, щоб відновити сигнал за його відліками без втрат, необхідно, щоб частота дискретизації була хоча б у два рази більша за максимальну частоту первинного неперервного сигналу $f_{\text{дискр}} > 2 * f_{\max}$.

Таким чином, дана теорема стверджує, що передача неперервної функції може бути зведена до передачі її відліків або кодових комбінацій, що містять інформацію про величину відліків, з тактовою частотою не меншою, аніж $2 \cdot f_{\max}$.

Для повного дискретного представлення сигналів та цифрової їх передачі по каналу зв'язку недостатньо виконати відліки значень сигналів в дискретні моменти часу, кратні τ . Необхідно також представити у дискретному вигляді (закодувати) величину кожного відліку та забезпечити її передачу. Принцип ІКМ наочно можна зрозуміти, розглянувши графік на рис.5. Квантування рівня сигналів спочатку здійснюється в десятковому коді з наступним поданням його в зручному для імпульсної передачі бінарному коді. Вказані перетворення вихідного сигналу здійснюються в електронному аналого-цифровому перетворювачу (кодер або АЦП). Цифровий сигнал, що передається по оптичній лінії зв'язку, має також 2 дискретних значення (0 та 1), а фотоприймач працює в пороговому режимі як логічний пристрій з двома вихідними станами – “ТАК” та “НІ”. Навіть при значних спотвореннях амплітуди сигналу на виході фотоприймача бінарні сигнали мають правильну форму. Електронний цифро-аналоговий перетворювач (декодер, ЦАП), на вхід якого подаються сигнали з фотоприймача, здійснює високоякісне відтворення вихідного аналогового сигналу.

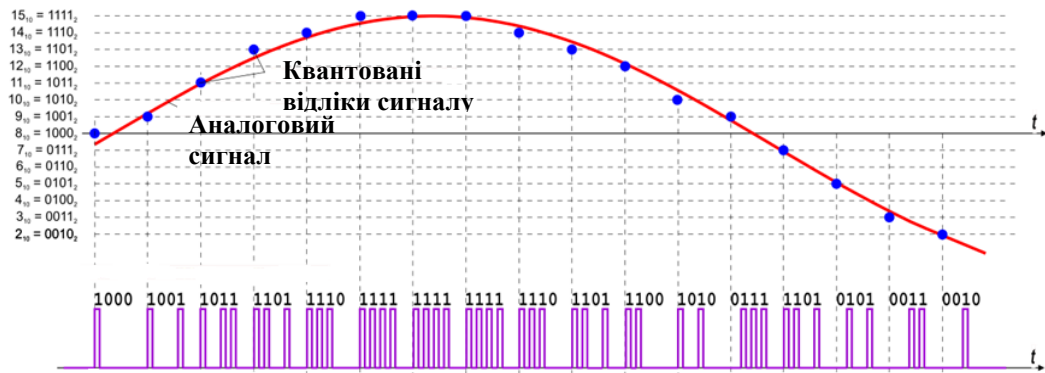


Рисунок 5 – Ілюстрація принципу ІКМ

Яким же чином неперервний сигнал може бути відтворений по його відлікам? Відомо, що будь-яка неперервна періодична функція $f(t)$, що складається з частот від 0 до $f_{\max}$, може бути представлена рядом:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f(k\tau) \frac{\sin \omega_c (t - k\tau)}{\omega_c (t - k\tau)} \quad (4)$$

де τ – період вибірки, який виражається через максимальну частоту спектру сигналу наступним чином $\tau = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{1}{2f_{\max}}$. Звідси маємо $\omega_c = 2\pi f_{\max}$. Згідно

наведеного виразу, точний вид функції $f(t)$ відтворюється за її вибірковими значеннями шляхом множення величин відліків на відповідні функції відліків. Ілюстрація функцій відліків та теореми відліків наведено на рис.6. Графік функції відліків (кардинальний синус) нагадує “мексиканську шляпу”. Згідно теореми, для відтворення функції досить зібрати ці “шляпи” в точках, що відповідають відлікам, причому таким чином, щоб вершини шляп співпали з вимірами у відліках.

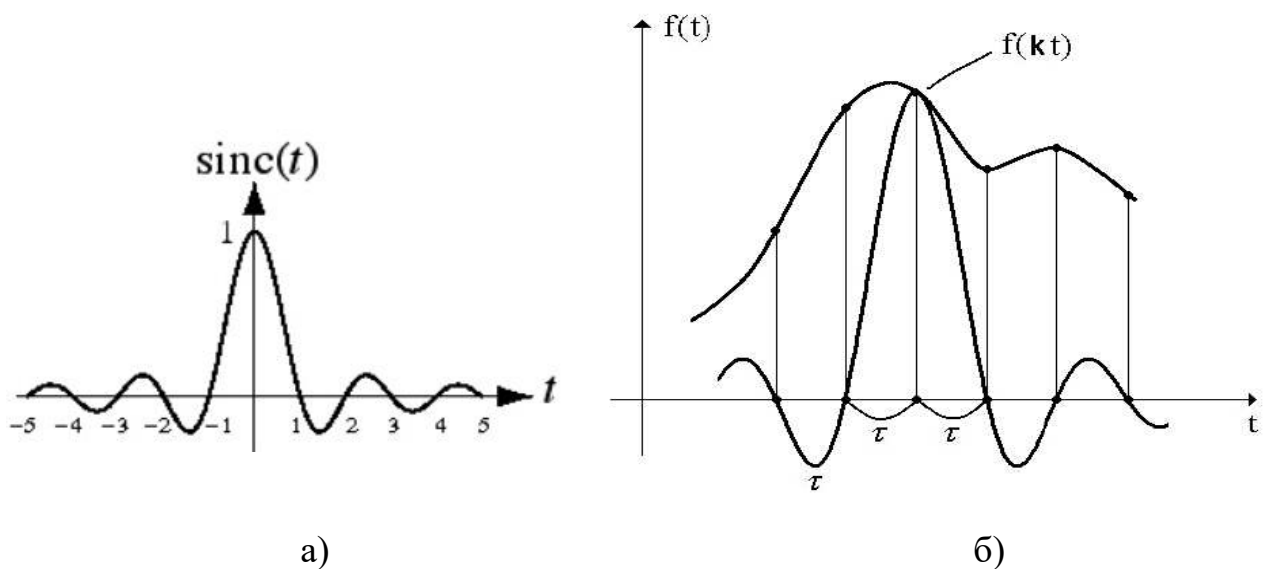


Рисунок 6 – Ілюстрація функції відліків (а) та теореми відліків (б)

Для повного використання інформаційної ємності лінії декілька різних сигналів передають по одній лінії. Пристрій, який дозволяє це зробити

називається мультиплексором. По суті даний пристрій комбінує передачу різних сигналів по одній лінії. Демультиплексор здійснює зворотню операцію – розділяє вхідні сигнали на виході. Мультиплексування може здійснюватись за різними принципами:

1. мультиплексування з розділенням в часі (TDM, Time Division Multiplexing) – технологія мультиплексування, яка відводить кожному сигналу певну часову квоту (за таким принципом працюють телефоні мережі, Wi-Fi, Ethernet, USB);

2. мультиплексування з частотним розділенням (FDM, Frequency Division Multiplexing) – технологія мультиплексування, яка передбачає передачу в межах смуги пропускання каналу декількох сигналів меншої ширини шляхом надання їм несучих різної частоти (за таким принципом працюють кабельне телебачення, мобільний зв'язок та радіомовлення);

3. мультиплексування з розділенням по довжині хвилі (WDM, Wavelength Division Multiplexing) – технологія мультиплексування, яка передбачає передачу по одному каналу сигналів на різних довжинах хвиль (за таким принципом побудовані локальні та магістральні мережі оптоволоконного зв'язку).

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняттям “інформація” та ”кількість інформації”.
2. В яких одиницях вимірюється кількість інформації?
3. Від яких технічних характеристик системи залежить швидкість передачі інформації?
4. Наведіть загальну схему системи передачі інформації та опишіть її роботу?
5. Що собою являє імпульсно-кодова модуляція?

6. Сформулюйте теорему Шеннона-Котельникова.
7. Яким чином неперервний сигнал може бути відтворений по його відлікам?
8. Яке призначення мультиплексора та демультимплексора?
9. В чому полягає мультиплексування з розділенням в часі?
10. В чому полягає мультиплексування з частотним розділенням?
11. В чому полягає мультиплексування з розділенням по довжині хвилі?
12. Яке з трьох видів мультиплексування використовується в оптоелектронних інформаційних системах?

РОЗДІЛ 3.

Математична обробка оптичного сигналу

3.1. Оптичний сигнал та його інформаційна структура.

Електромагнітна хвиля (ЕМХ) являє собою зміну в часі в кожній точці простору електричного та магнітного полів, які пов'язані між собою законом індукції. Зміна магнітного поля викликає появу змінного електричного поля, яке в свою чергу спричиняє появу змінного магнітного поля. Електромагнітна хвиля характеризується взаємно перпендикулярними векторами напруженості електричного та магнітного полів, які змінюються по одному і тому ж гармонічному закону. Оскільки в оптиці найчастіше використовують саме електричне поле для опису ЕМХ, то для електричного поля цей закон виглядатиме так (векторна форма запису світлової хвилі):

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{P}(x, y, z) \cdot E(x, y, z, t) = \vec{P}(x, y, z) \cdot E_0(x, y, z) \cdot \cos(2\pi\nu t + \varphi(x, y, z)) \quad (5)$$

де $\mathbf{P}(x, y, z)$ – одиничний вектор, що визначає пряму, вздовж якої здійснюється коливання електричного поля в точці простору з координатою (x, y, z) , та характеризує площину поляризації в даній точці; функція $E(x, y, z, t)$ – скалярна функція координат простору та часу, яка чисельно рівна миттєвому значенню модуля вектору напруженості електричного поля; $E_0(x, y, z)$ – амплітуда коливань напруженості електричного поля в точці (x, y, z) ; ν – частота коливань; $\varphi(x, y, z)$ – фаза світлової хвилі в точці (x, y, z) . Оскільки розглядаються лише когерентні хвилі, то $\mathbf{P}(x, y, z)$, $E(x, y, z)$, $\varphi(x, y, z)$ не залежать від часу, а модуляція світлової хвилі відповідно здійснюється по просторовим координатам. З рівності (5) випливає скалярна форма запису світлової хвилі:

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \cdot \cos(2\pi\nu t + \varphi(x, y, z)) \quad (6)$$

Зазвичай використовують комплексну форму запису, яка є найбільш зручною для виконання математичних операцій та перетворень:

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \cdot \exp(i(2\pi vt + \varphi(x, y, z))) = E(x, y, z) \cdot \exp(i2\pi vt) \quad (7)$$

де $E(x, y, z)$ – комплексна амплітуда, яка описує просторовий розподіл амплітуди $E_0(x, y, z)$ та фази $\varphi(x, y, z)$ світлової хвилі та являється важливою характеристикою монохроматичної хвилі. Часовий множник $\exp(i2\pi vt)$ зазвичай опускають, він може бути введений на будь-якому етапі перетворень.

В оптичних системах зберігання та обробки інформації працюють, як правило, з двовимірними оптичними сигналами, що описуються розподілом комплексної амплітуди та поляризацією світлової хвилі по точкам простору, які лежать в площині, перпендикулярній напрямку поширення хвилі. Якщо в такій площині ввести координати x та y , то інформація, що міститься в двовимірному сигналі, буде визначатися комплексною амплітудою:

$$E(x, y) = E_0(x, y) \cdot \exp(i\varphi(x, y)) \quad (8)$$

та поляризацією $\mathbf{P}(x, y)$, що є функцією двох просторових координат. Звідси інформація в світлову хвилю може бути введена шляхом модуляції її амплітуди, фази та поляризації по двом просторовим координатам x та y .

3.2. Двовимірне перетворення Фур'є. В основі математичного аналізу ОІС лежить Фур'є перетворення оптичного сигналу. Перетворення Фур'є — інтегральне перетворення однієї комплекснозначної функції дійсної змінної на іншу. В теорії сигналів дане перетворення здійснює перехід від часової до частотної залежності даної функції. Якщо певна функція (сигнал) є функцією часу, то результатом перетворення Фур'є над цією функцією є спектр цього сигналу.

В математиці доведено, що будь-яку періодичну функцію $f(t)$ можна розкласти у ряд Фур'є. Неперіодична функція, якщо вона абсолютно

інтегрована на проміжку $(-\infty, +\infty)$, може бути подана інтегралом Фур'є у комплексній формі:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\nu) e^{i2\pi \nu t} d\nu \quad (9)$$

де

$$\varphi(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi \nu t} dt \quad (10)$$

- Фур'є-образ функції $f(t)$ або її спектр (Фур'є-спектр). Співвідношення (10) називають прямим перетворенням Фур'є, а співвідношення (9) – оберненим перетворенням Фур'є.

Аналіз Фур'є широко використовується у вивченні теорії електричних кіл та теорії сигналів. Оскільки сигнал є функцією однієї змінної, наприклад, залежність струму чи напруги від часу, то використовується аналіз Фур'є функції однієї змінної на основі наведених вище рівностей 9 та 10.

Оскільки оптоелектронні інформаційні системи працюють з оптичними сигналами, які являють собою функцію 2 змінних (x та y), то використовується двовимірне перетворення Фур'є. Пряме перетворення Фур'є (спектр Фур'є або частотний спектр) функції двох незалежних змінних $g(x, y)$ визначається виразом:

$$F\{g\} = G(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (11)$$

де f_x, f_y – просторові частоти. Обернене перетворення Фур'є функції $G(x, y)$ має вигляд:

$$F^{-1}\{G\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (12)$$

Для існування інтегралу (11) на функцію $g(x, y)$ накладаються певні обмеження:

1. функція $g(x, y)$ має бути абсолютно інтегрованою на нескінченній площині xy ;
2. функція $g(x, y)$ повинна мати кінцеву кількість розривів, максимумів та мінімумів в межах будь-якого прямокутника кінцевого розміру;
3. функція $g(x, y)$ не повинна мати розриви другого роду.

Розглянемо основні властивості перетворення Фур'є, які будуть використовуватись у подальшому для спрощення задач аналізу передачі інформації в таких системах:

1. **Лінійність**. Перетворення Фур'є – це лінійна операція, тобто Фур'є образ суми двох функцій дорівнює сумі Фур'є образів цих функцій:

$$F\{\alpha \cdot g(x, y) + \beta \cdot h(x, y)\} = \alpha \cdot F\{g(x, y)\} + \beta \cdot F\{h(x, y)\} \quad (13)$$

Ця властивість випливає з лінійності операції інтегрування і дає змогу зводити більш складні функції та їх Фур'є образи до більш простих.

2. **Трансляція**. Зсув функції в координатній області викликає лінійний фазовий зсув у області частот, тобто має місце незалежність амплітудного спектра від зсуву вхідного сигналу. Якщо $F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$, то:

$$F\{g(x-a, y-b)\} = G(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x a + f_y b)] \quad (14)$$

3. **Масштабування**. Ця властивість означає, що розтягнення координат в просторовій області (x, y) призводить до їх стиснення в частотній області (f_x, f_y) і до зміни амплітуди спектру. Зокрема спектр сигналу скінченної тривалості завжди нескінченно широкий і навпаки спектр скінченної ширини завжди відповідає сигналу нескінченної тривалості. Якщо $F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$, то:

$$F\{g(ax, by)\} = \frac{1}{|ab|} G\left(\frac{f_x}{a}, \frac{f_y}{b}\right) \quad (15)$$

4. **Рівність Парсеваля**. Дана рівність виражає закон збереження енергії і говорить про те, що перетворення Фур'є зберігає енергію сигналу. Крім того, дана теорема показує, що для знаходження енергетичних характеристик ЕМХ

досить знати спектральне розкладання даної хвилі по частотам. Якщо $F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$, то:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x, y)|^2 dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |G(f_x, f_y)|^2 df_x df_y \quad (16)$$

5. Фур'є образ згортки функцій. Фур'є образ згортки двох функцій дорівнює добутку Фур'є образів обох функцій. Якщо $F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$ і $F\{h(x, y)\} = H(f_x, f_y)$, то:

$$F\left\{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta\right\} = G(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (17)$$

6. Фур'є образ автокореляції. Фур'є образ автокореляційної функції дорівнює квадрату Фур'є образу вихідної функції. Дана теорема є частковим випадком теореми згортки. Якщо $F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y)$, то:

$$F\left\{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\xi, \eta) g^*(\xi - x, \eta - y) d\xi d\eta\right\} = |G(f_x, f_y)|^2 \quad (18)$$

7. Інтегральна теорема Фур'є. Послідовно проведене пряме та зворотне перетворення Фур'є дає вихідну функцію:

$$FF^{-1}\{g(x, y)\} = F^{-1}F\{g(x, y)\} = g(x, y) \quad (19)$$

3.3. Дискретизація оптичного сигналу. Для цифрової обробки оптичного сигналу, як і електричного сигналу, він має підлягати дискретизації і здійснюється це на основі теореми Шеннона-Котельникова, що була розглянута в попередньому розділі. Розглянемо двовимірний аналог даної теореми, який використовується для дискретизації оптичного сигналу.

Дискретизація оптичного сигналу (функції $f(x, y)$) здійснюється шляхом подання її набором вибірових значень, узятих в дискретній сукупності точок площини (x, y) (рис.7, а). Очевидно, що чим меншим є крок дискретизації (вибірки), тим точніше вибірові значення будуть відтворювати вихідну функцію $f(x, y)$. В найпростішому випадку теореми Шеннона-Котельникова

розглядається прямокутна вибіркова сітка. Нехай функція $f(x, y)$ підлягає дискретизації за допомогою прямокутної сітки з кроком вибірки вздовж осей x та y – Δx та Δy відповідно, тоді дискретне подання функції $f(x, y)$ зручно записати за допомогою гребінчастої функції (гребінки Дірака).

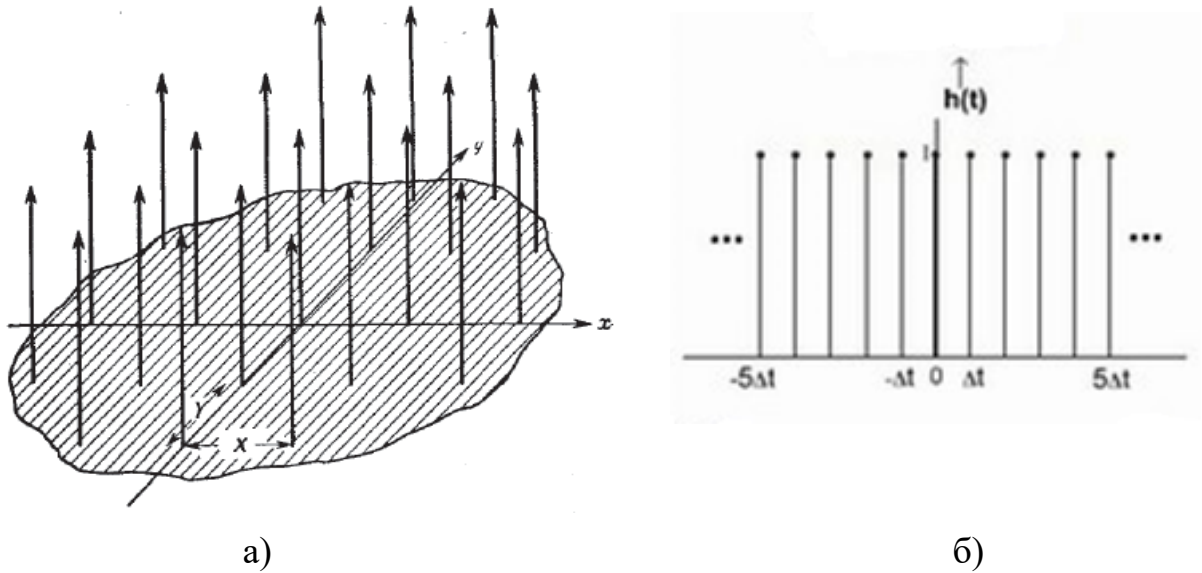


Рисунок 7 – Відліки двовимірної функції $f(x, y)$ (а) та вигляд функції гребінця Дірака в одновимірному випадку (б)

В одновимірному випадку гребінка Дірака являє собою періодичну послідовність дельта функцій, що розташовані з періодом Δx (рис.7, б):

$$\text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n \cdot \Delta x) \quad (20)$$

Спектр Фур'є гребінки Дірака являє собою так само періодичну послідовність дельта функцій, що розташовані з періодом $1/\Delta x$:

$$F\left(\text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}\right)\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f_x - \frac{n}{\Delta x}\right) \quad (21)$$

Звідси дискретне подання функції $f(x, y)$ – двовимірна функція відліків – має наступний вигляд:

$$f_s(x, y) = \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{\Delta y}\right) \cdot f(x, y) \quad (22)$$

З математичної точки зору, дискретизація сигналу являє собою перемноження по точках вихідного сигналу та гребінки Дірака. В результаті замість неперервної функції одержують послідовність дельта-імпульсів певної висоти, яка задається вихідною функцією. Таким чином, в двовимірному випадку вибірка функція складається з ряду дельта-функцій, розташованих на відстані Δx в напрямку осі X та на відстані Δy у напрямку осі Y . Площа під кожною дельта-функцією пропорційна значенню вихідної функції $f(x, y)$ в даній точці прямокутної вибіркової сітки.

Згідно теореми згортки Фур'є-образ вибіркової функції можна знайти як добуток спектрів відповідних функцій і використавши властивості Фур'є перетворення та дельта-функції, можна отримати Фур'є-образ вибіркової функції в наступному вигляді:

$$F_s(f_x, f_y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} F\left(f_x - \frac{n}{\Delta x}, f_y - \frac{m}{\Delta y}\right) \quad (23)$$

Звідси випливає, що спектр функції вибірки $F_s(x, y)$ являє собою суму спектрів функції $f(x, y)$, які побудовані біля кожної точки з координатами $[n/\Delta x, m/\Delta y]$ в площині $f_x f_y$, як це показано на рис. 8. Відстань між сусідніми точками вздовж осей f_x та f_y дорівнює $1/\Delta x$ та $1/\Delta y$. Зміщені один відносно одного спектри в загальному випадку можуть перекриватися. Зрозуміло, що якщо Δx та Δy достатньо малі, тобто вибіркові значення розташовані достатньо близько один до одного, то відстані $1/\Delta x$ та $1/\Delta y$ між різними спектральними областями будуть досить великими, щоб суміжні області не перекривалися (як на рис.8).

Числові допустимі значення для Δx та Δy визначаються з наступних умов:

$$\frac{1}{\Delta x} \geq 2 f_{x \max}; \quad \frac{1}{\Delta y} \geq 2 f_{y \max} \quad (24)$$

Звідси максимальні значення кроків дискретизації сітки вибірки, що задовольняють умову неперекриття Фур'є спектрів в частотній області, визначаються з рівності:

$$\Delta x = \frac{1}{2f_{x\max}}; \quad \Delta y = \frac{1}{2f_{y\max}} \quad (25)$$

Щоб здійснити точне відновлення вихідного спектру $F(f_x, f_y)$ по спектру $F_s(f_x, f_y)$, необхідно пропустити вираз (23) через лінійний фільтр. Такий фільтр повинен пропускати без спотворення члени виразу (23) з індексами $n=0$ та $m=0$, тоді як інші члени повинні повністю виключатися. В такому разі на виході цього фільтру можна отримати точне відтворення функції $f(x, y)$.

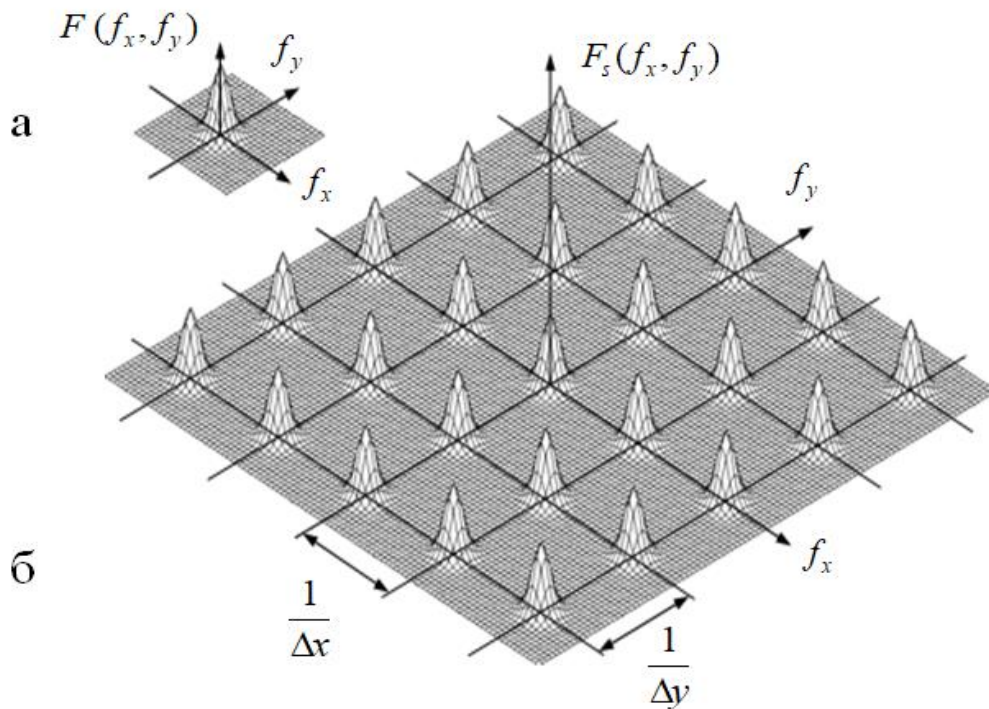


Рисунок 8 – Зображення Фур'є-образу двовимірної функції відліків $F_s(f_x, f_y)$: спектр вихідної функції $F(f_x, f_y)$ (а) та спектр її відліків $F_s(f_x, f_y)$ (б)

Такий фільтр фізично являє собою непрозорий екран з прямокутним отвором зі сторонами $2f_{x\max}$ x $2f_{y\max}$, а математично – необхідно використати передаточну функцію у вигляді прямокутних імпульсів виду:

$$H(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{2f_{x\max}}\right) \text{rect}\left(\frac{f_y}{2f_{y\max}}\right) \quad (26)$$

Звідси випливає, що спектр функції $f(x, y)$, можна записати у вигляді:

$$F(f_x, f_y) = F_s(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (27)$$

Провівши обернене перетворення Фур'є і здійснивши операцію згортки в правій частині рівності (27), можна відновити вихідну функцію $f(x, y)$:

$$f(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} f\left(\frac{n}{2f_{x\max}}, \frac{m}{2f_{y\max}}\right) \text{sinc}\left[2f_{x\max}\left(x - \frac{n}{2f_{x\max}}\right)\right] \text{sinc}\left[2f_{y\max}\left(y - \frac{m}{2f_{y\max}}\right)\right] \quad (28)$$

Це співвідношення є математичним виразом теореми Шеннона-Котельникова для двовимірного сигналу. Теорема може бути сформульована наступним чином: якщо функція $f(x, y)$ має обмежений спектр, що визначається областю $|f_x| \leq f_{x\max}$ та $|f_y| \leq f_{y\max}$, то вона може бути відновлена шляхом інтерполяції sinc -функціями по вибірковим значенням (відлікам), взятими з кроком $\Delta x = \frac{1}{2f_{x\max}}$ та $\Delta y = \frac{1}{2f_{y\max}}$.

3.4. Перетворення сигналу лінійною системою. Система – це сукупність взаємопов'язаних елементів, що взаємодіють з середовищем як єдине ціле, однак відокремлені від нього. Інформаційна система — комунікаційна система, що забезпечує збирання, пошук, обробку та передачу інформації. Оптиелектронна інформаційна система — це інформаційна система, що крім електронної містить оптиелектронну частину, в якій інформація подається у вигляді оптичних сигналів і обробляється за допомогою оптиелектронних пристроїв.

В електричних схемах вхідні та вихідні сигнали являють собою дійсні функції (напруги чи струму) однієї незалежної змінної (часу), тоді як в системах, що створюють зображення, вхідні та вихідні сигнали можуть бути

дійсними (інтенсивність) чи комплексними (амплітуда поля) функціями двох незалежних змінних (просторових координат).

Проаналізуємо проходження двовимірного сигналу через лінійну оптичну систему. Відомо, що будь-яку лінійну систему можна охарактеризувати лінійним математичним оператором, що описує перетворення вхідних сигналів у вихідні. Позначимо цей оператор літерою L . Тоді залежність вихідного сигналу $g_2(x_2, y_2)$ від вхідного $g_1(x_1, y_1)$ має вигляд:

$$g_2(x_2, y_2) = L\{g_1(x_1, y_1)\} \quad (29)$$

Система називається лінійною, якщо для всіх вхідних функцій $s(x_1, y_1)$ та $t(x_1, y_1)$ і для постійних a і b виконується співвідношення:

$$L\{as(x_1, y_1) + bt(x_1, y_1)\} = aL\{s(x_1, y_1)\} + bL\{t(x_1, y_1)\} \quad (30)$$

Таким чином, відгук лінійної системи на довільний вхідний сигнал можна подати у вигляді суперпозиції відгуків на певні елементарні сигнали, на які можна розкласти вхідний сигнал. Власне в цьому полягає перевага лінійних систем, що суттєво полегшує їх аналіз. Для цього необхідно знайти простий та зручний спосіб розкладання вхідного сигналу на елементарні сигнали. Найбільш просте та зручне розкладання в просторовій області можна отримати, використовуючи в якості елементарних сигналів точкові, що описуються δ -функціями Дірака. Фізичною інтерпретацією точкового сигналу являється точкове джерело світла. Використовуючи фільтруючу властивість δ -функції, будь-який оптичний вхідний сигнал можна подати у вигляді:

$$g_1(x_1, y_1) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta \quad (31)$$

Можна вважати, що це співвідношення є поданням $g_1(x_1, y_1)$ у вигляді лінійної комбінації зважених та зміщених δ -функцій. Щоб знайти відгук системи на вхідний сигнал $g_1(x_1, y_1)$, підставимо вираз (31) у вираз (29):

$$g_2(x_2, y_2) = L\left\{ \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta \right\} \quad (32)$$

Величина $g_1(\xi, \eta)$ являє собою ваговий множник, з яким слід брати елементарну функцію $\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)$. Застосовуючи властивість лінійності, подіємо оператором L на окремі елементарні функції:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\xi, \eta) L\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} d\xi d\eta \quad (33)$$

Відгук системи на елементарний вхідний сигнал, що описується δ -функцією, називають імпульсним відгуком системи. Імпульсний відгук системи характеризує розподіл комплексної амплітуди світла в її вихідній площині, що відповідає точковому джерелу світла у вхідній площині. З цієї причини імпульсний відгук в оптиці називають функцією розсіювання точки. Позначимо через $h(x_2, y_2, \xi, \eta)$ імпульсний відгук системи, тобто відгук на виході з координатами (x_2, y_2) на сигнал δ -функції в точці з координатами (ξ, η) на вході:

$$h(x_2, y_2, \xi, \eta) = L\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} \quad (34)$$

Вхідний та вихідний сигнали системи тепер можна зв'язати простим співвідношенням:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\xi, \eta) h(x_2, y_2, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (35)$$

Дане фундаментальне співвідношення, відоме під назвою інтеграл суперпозиції, є основним співвідношенням, що пов'язує вхід та вихід лінійної системи. Згідно виразу (35) лінійна система повністю характеризується її відгуком на вхідний імпульсний сигнал, тобто знаючи імпульсний відгук системи, можна визначити відгук системи на будь-який вхідний сигнал. Щоб повністю визначити вихідний сигнал, необхідно, взагалі кажучи, знати ці відгуки для будь-яких координат та імпульсів в площині вхідного сигналу. У випадку лінійної оптичної системи цей висновок має цікаву фізичну інтерпретацію, що полягає в тому, що дія елементів, які створюють зображення (лінз, діафрагм тощо), може бути повністю описана, якщо визначені зображення точкових джерел, розташованих по всьому полю предмета.

Визначивши для загальної лінійної системи співвідношення між вхідними та вихідними сигналами, звернемося тепер до важливого підкласу лінійних систем, які називаються інваріантними лінійними системами. Лінійну систему називають інваріантною, якщо зсув вхідного сигналу викликає аналогічний зсув вихідного сигналу без зміни його структури. У випадку оптичних систем говорять про просторову інваріантність системи або ізопланарність, що описується рівністю:

$$h(x_2, y_2, \xi, \eta) = h(x_2 - \xi, y_2 - \eta) \quad (36)$$

Таким чином, система, що створює зображення, вважається інваріантною, якщо зображення точкового джерела змінює лише положення, а не свою функціональну форму по мірі того, як це джерело пробігає поле предмета. Реальні оптичні системи, як правило, інваріантні лише в межах обмежених областей вхідної та вихідної площини, що оточують оптичну вісь системи. В цьому полягає одна з відмінностей оптичних систем від електричних, інваріантність яких в часі не обмежена.

Для інваріантної системи інтеграл суперпозиції (35) приймає особливо простий вигляд:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\xi, \eta) h(x_2 - \xi, y_2 - \eta) d\xi d\eta \quad (37)$$

В правій частині рівності (37) знаходиться згортка функції предмету (вхідного сигналу) та імпульсного відгуку системи.

Простота інваріантних систем проявляється особливо наочно, якщо застосувати перетворення Фур'є до згортки (37), в результаті чого видно, що спектри вихідного та вхідного сигналів зв'язані простим співвідношенням:

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (38)$$

де $H(f_x, f_y)$ – Фур'є-образ імпульсного відгуку:

$$H(f_x, f_y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} h(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(f_x \xi + f_y \eta)] d\xi d\eta \quad (39)$$

Функція $H(f_x, f_y)$ називається передавальною функцією системи, яка показує, як діє система в частотній області.

Контрольні запитання

1. Опишіть інформаційну структуру оптичного сигналу.
2. Що собою являє двовимірне перетворення Фур'є?
3. Наведіть основні властивості перетворення Фур'є.
4. Яка стандартна функція використовується для запису двовимірної функції відліків?
5. Яким чином здійснюється дискретизація оптичного сигналу?
6. Що собою являє Фур'є спектр функції вибірки для дискретизації оптичного сигналу?
7. Напишіть, якій умові має відповідати крок дискретизації для точного відтворення вхідного оптичного сигналу?
8. Дайте визначення поняттям “система”, ”інформаційна система” та ”оптоелектронна інформаційна система”.
9. Запишіть вирази, що встановлюють зв'язок між вхідним та вихідним сигналами для лінійної та інваріантної оптичної системи.
10. Що собою являє імпульсний відгук системи?
11. Наведіть вираз для інтегралу суперпозиції та розкрийте його фізичний зміст.
12. Порівняйте електричні та оптичні інформаційні системи з точки зору інваріантності.

РОЗДІЛ 4.

Принципи побудови волоконно-оптичних систем передачі інформації

4.1. Структура волоконно-оптичної системи передачі інформації. Всі системи оптичного зв'язку можна поділити на дві великі групи – системи оптичного зв'язку з відкритим та закритим каналом. У відкритих системах оптичного зв'язку світловий сигнал поширюється у вільному середовищі – в атмосфері або в космічному просторі, в той час як в закритих системах – в оптичних діелектричних хвилеводах. Системи оптичного зв'язку через вільний простір забезпечують низьку та середню швидкість передачі даних і працюють в межах прямої видимості, оскільки всі оточуючі об'єкти створюють перешкоди для поширення сигналу. В основному такі системи використовують для дистанційного керування побутовими приладами – телевізорами, мишками, для відкривання-закривання дверей автомобілів, а також в межах виробничого приміщення для зв'язку між терміналами, мікропроцесорами, промисловими роботами тощо. Натомість хвилеводні системи оптичного зв'язку забезпечують високу швидкість передачі даних на значні відстані. Надалі мова буде йти про хвилеводні системи оптичного зв'язку, а саме про найбільш вживаний їх різновид – волоконно-оптичні системи передачі інформації (ВОСПІ).

Техніка передачі величезних масивів інформації по волоконним світловодам за останні десятиліття практично повністю перетворила телекомунікаційні системи. Існує точка зору, що з часів винаходу телефону телекомунікаційні системи не зазнавали ще такого революційного характеру розвитку, як це трапилось з практичним застосуванням ВОСПІ. Значне зростання інформатизації життя суспільства, що проявляється, наприклад, в споживанні ресурсів інтернет, є основною причиною використання ВОСПІ в мережах різноманітного призначення.

В загальному випадку волоконно-оптична система передачі інформації – це система, що складається із пасивних та активних елементів, яка призначена для передачі інформації у оптичному діапазоні, як правило ближньому інфрачервоному.

В залежності від довжини вони умовно поділяються на локальні (об'єктові), регіональні (міські, міжміські, зонові) та магістральні (міжконтинентальні). Локальні ВОСПІ – це відносно короткі лінії зв'язку протяжністю від 1 до 100 м, які використовуються як бортові лінії на кораблях, літаках, ракетах та космічних апаратах, всередині організацій та підприємств, для передачі світлових імпульсів великої потужності в лазерній технології, медицині тощо. Регіональні ВОСПІ мають середню протяжність до 50-100 км, міжміські – до 200-300 км і призначені для зв'язку ПК з віддаленими терміналами, пристроями збору даних, телефонного, телеграфного та відео-телефонного зв'язку. Призначення магістральних ВОСПІ – передача інформації на великі відстані (сотні та тисячі км), зокрема для зв'язку між континентами.

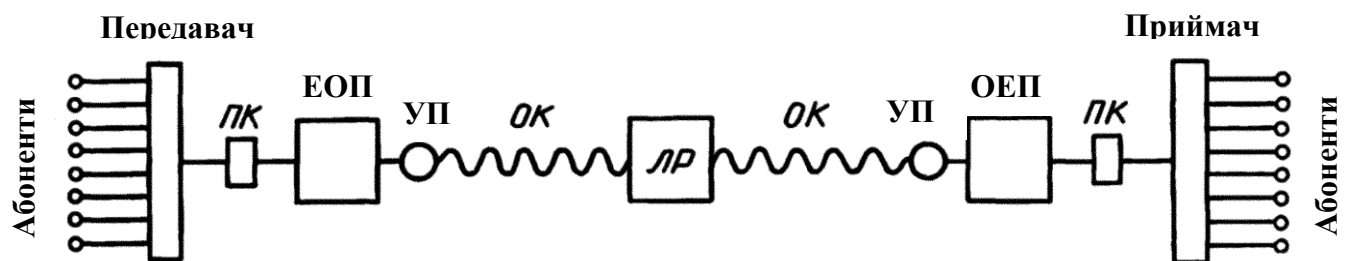


Рисунок 9 – Структурна схема волоконно-оптичної системи передачі інформації, де ПК – перетворювач коду, ЕОП – електрооптичний перетворювач, УП – узгоджувальний пристрій, ОК – оптичний кабель, ЛР – лінійний регенератор, ОЕП – оптоелектричний перетворювач

В системі ВОСПІ умовно можна виділити електронну та оптоелектронну частину (рис.9). В електронній частині здійснюється введення та виведення

інформації у вигляді електричних сигналів. Наприклад, аналоговий електричний сигнал, який поступає від абонентів телефону, перетворюється аналого-цифровим перетворювачем (кодером) в цифровий сигнал (бітовий потік). Крім того, перетворювач коду оптимізує процес передачі за рахунок введення в сигнал надлишковості, яка необхідна для забезпечення заданої завадостійкості та зручності синхронізації. Бітовий потік використовується для модуляції джерела оптичного сигналу, який передає серію оптичних імпульсів в оптичне волокно. Цим електричним сигналом модулюється один з параметрів (амплітуда, частота, фаза, поляризація, інтенсивність) оптичного несучого коливання, що здатне поширюватися у оптичному волокні з малими згасанням і спотворенням форми. В основному використовується спосіб модуляції по інтенсивності оптичної несучої, за якої від амплітуди електричного сигналу залежить потужність випромінювання, що подається в оптоволокно. Далі оптичний сигнал з джерела випромінювання через узгоджувальний пристрій, основним призначенням якого є мінімізація втрат введення випромінювання у волоконний світловод і зменшення зворотного відбивання, та оптичний роз'ємний з'єднувач (коннектор) – вводиться в оптичне волокно. В приймачі оптичного випромінювання здійснюється перетворення серії оптичних імпульсів в послідовність електричних імпульсів. На виході такої системи знаходиться ще один кодер (ЦАП), який здійснює зворотню операцію перетворення цифрового електричного сигналу в аналоговий, який передається абонентам.

Перетворювач коду, випромінювач та оптичні узгоджувальні пристрої з одного боку, та фотодіод, перетворювач коду і узгоджувальні пристрої з іншого боку, як правило інтегруються у вигляді окремих модулів, вхідні та вихідні кола яких мають стандартний інтерфейс для зв'язку з мікросхемами мережевих адаптерів та оптоволокном.

Через певні відстані (5 – 50 км) вздовж оптичної лінії розташовуються лінійні ретранслятори (ЛР) або регенератори, в яких сигнал відновлюється і підсилюється до необхідного рівня. Відстань між ними залежить від величини затухання та дисперсії, які виникають у оптичному кабелі. Структурна схема ЛР наведена на рис.10.

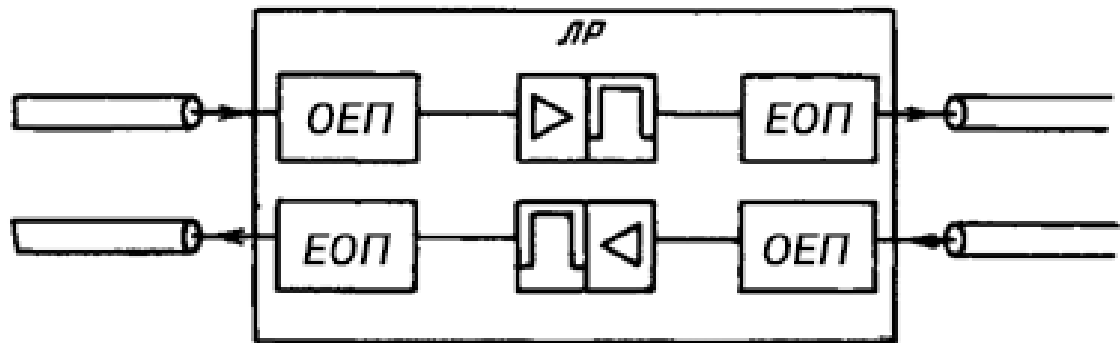


Рисунок 10 – Структурна схема лінійного регенератора

Регенератор складається з двох напівкомплектів – окремо для прямого та зворотного напрямку передачі сигналів. В кожному з цих напівкомплектів здійснюється перетворення оптичного сигналу в електричний, регенерація (відновлення форми та рівня сигналу) та зворотне перетворення в оптичний сигнал. При цьому регенерація здійснюється саме в електричній частині за допомогою електронного перетворювача. На сьогодні ведуться розробки повністю оптичних регенераторів на основі оптичних квантових підсилювачів.

Процес передачі інформації за допомогою електромагнітного випромінювання по ВОСПІ складається з наступних етапів: формування оптичного сигналу, передавання оптичного сигналу, оброблення оптичного сигналу, розподіл оптичного сигналу, перетворення оптичного сигналу.

Формування оптичного сигналу здійснюється за допомогою джерела випромінювання, що виконує електрооптичне перетворення. На практиці широко використовується 2 типи джерела оптичного випромінювання –

лазерний діод та світлодіод. Модулятор – це пристрій, що змінює один з параметрів несучого коливання, створене джерелом випромінювання. Модулятор може бути зовнішнім, тобто встановлюватися на виході джерела випромінювання, або внутрішнім – входити до схеми керування джерелом. Особливістю внутрішнього модулятора є те, що за його допомогою можлива модуляція тільки інтенсивності випромінювання, що використовується в сучасних некогерентних системах передачі. Зовнішні (електро- або акусто-оптичні) модулятори можуть модулювати, крім інтенсивності, також амплітуду, частоту, фазу та поляризацію випромінювання. Зовнішні модулятори більш складні і використовуються в когерентних системах передачі, які в майбутньому замінять більшість некогерентних систем.

Сформований джерелом випромінювання і модулятором оптичний сигнал поширюється по оптичному волокну, що є компонентом оптичного кабелю. Оптичні волокна з'єднуються одне з одним та з термінальним обладнанням за допомогою роз'ємних та нероз'ємних з'єднань. Основними параметрами оптичного волокна з точки зору передавання інформації є згасання потужності світла і спотворення форми оптичного сигналу.

У системах зі спектральним мультиплексуванням, необхідно перетворити довжину хвилі випромінювання в іншу, для чого використовують такий компонент, як хвильовий конвертор. Компенсацію загасання сигналу в оптичному волокну можна здійснити за допомогою оптичного підсилювача, який може входити або до складу передавального модуля (підсилювач потужності), або приймального модуля (попередній підсилювач), або встановлюватися в лінійному тракті (лінійний підсилювач).

В волоконно-оптичних мережах виникає необхідність розподілу оптичного сигналу на декілька напрямків або об'єднання в одне волокно сигналів, що надходять від багатьох терміналів. Цю функцію виконують такі компоненти, як оптичні розгалужувачі. В інших випадках необхідне

переключення оптичних сигналів з одного напрямку на інший, яке здійснюється за допомогою оптичних перемикачів (комутаторів). В системах зі спектральним мультиплексуванням виникає необхідність у фільтрації, спектральному мульти- та демультиплексуванні оптичних сигналів. Ці операції виконуються у відповідних компонентах оптичного тракту – оптичних фільтрах, мультиплексорах та демультиплексорах. Для захисту від відбитих оптичних сигналів застосовується оптичний вентиль.

На приймальному боці за допомогою приймача випромінювання здійснюється оптоелектричне перетворення. В якості приймача використовується рп-фотодіод або лавинний фотодіод. Пристрій виведення світла з волокна, приймач випромінювання та електронний процесор виконують у вигляді функціонально закінченого пристрою приймального оптоелектронного модуля.

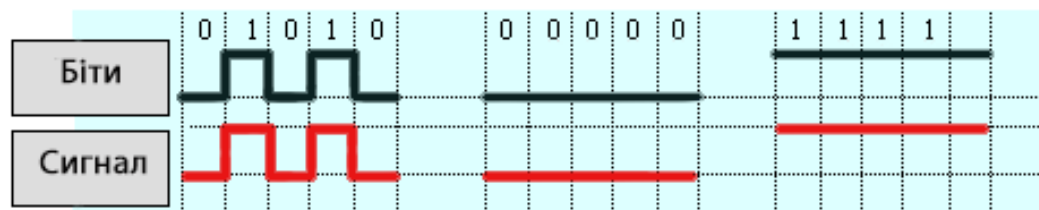
4.2. Кодування та мультиплексування сигналів в ВОСП. При передачі аналогової інформації, а найчастіше первинна інформація має аналоговий вид, вона перед потраплянням в волоконно-оптичну лінію зв'язку зазнає ряду перетворень: дискретизація, кодування та мультиплексування. Дискретизація сигналу була розглянута в попередньому розділі, в даному розділі мова піде про кодування та мультиплексування сигналу.

Цифрове кодування визначає спосіб подання двійкового коду (бітів) в фізичному каналі передачі даних. Для цього використовують, як правило, прямокутні імпульси певної тривалості та певного рівня, який задає логічний нуль та логічну одиницю. При цьому розрізняють двоохрівневі та трьохрівневі коди. В двоохрівневих кодах логічному нулю фізично відповідає напруга низького рівня, а логічній одиниці – напруга високого рівня. Такі сигнали ще називаються уніполярними, бо використовують сигнали однієї полярності. В трьохрівневих сигналах логічному нулю відповідає додатне значення напруги, а

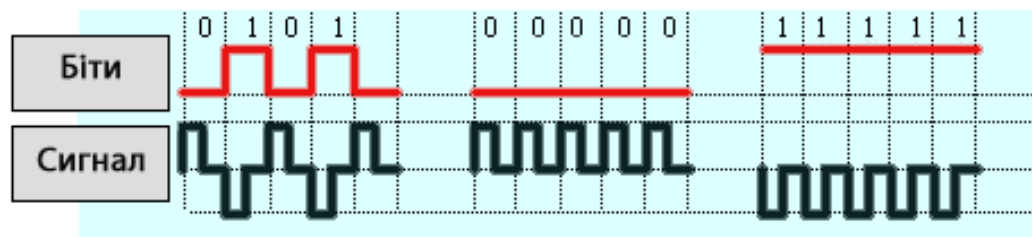
логічній одиниці – від’ємне значення напруги, а після передачі кожного біта здійснюється перехід в стан 0В. Такі сигнали називаються біполярними.

Донедавна в оптичних цифрових системах передача інформації здійснювалася лише уніполярними електричними сигналами, що модулюють оптичну несучу. Це пояснюється тим, що в таких системах модулюється не амплітуда, а потужність оптичного випромінювання. В сучасних оптичних системах передачі можуть використовуватися також трьохрівневі сигнали, якщо додатнім та від’ємним полярностям електричного сигналу будуть відповідати оптичні сигнали двох різних інтенсивностей – низького та високого рівня.

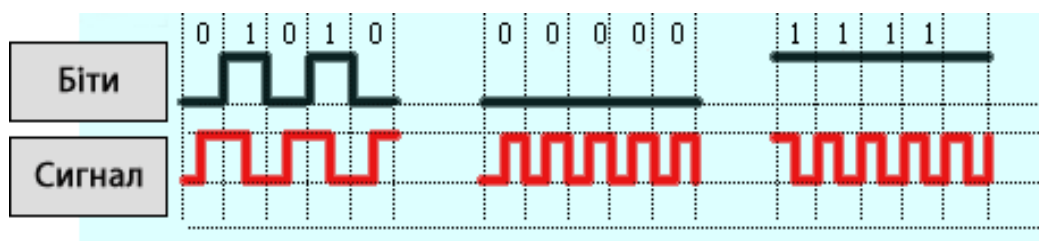
Широкого поширення набули три базових коди – код БПН (код без повернення до нуля, NRZ – Non Return to Zero), код ПН (код з поверненням до нуля, RZ – Return to Zero) та код Манчестер-ІІ.



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Ілюстрація кодів БПН (а), ПН (б) та Манчестер-ІІ (в)

Код БПН – це найпростіший двохрівневий код, який повністю відповідає режиму роботи логічних схем (рис.11, а). Кожний біт передається в межах такту та рівень сигналу при цьому не змінюється. Логічному нулю відповідає нижній рівень сигналу, логічній одиниці – верхній рівень. Інформаційні переходи здійснюються на межі бітів. Відсутність перепадів свідчить про те, що значення попереднього та наступного бітів рівні. Переваги такого методу кодування: простота реалізації (сигнал не потребує декодування та є однополярним) та висока швидкість передачі при заданій ширині смуги пропускання. До недоліків такого методу кодування слід віднести те, що в спектрі не міститься тактова частота, тобто для декодування такого сигналу необхідні тактові імпульси, а також даний код містить постійну складову, яка обумовлена наявністю довгої послідовності з нулів чи одиниць, що унеможлиблює виконання гальванічної розв'язки за допомогою трансформатора.

В трьохрівневому коді з поверненням до нуля інформація про величину біту передається в першій половині імпульсу, а далі здійснюється перехід до нуля. Тобто інформаційний перехід здійснюється на початку біту, а повернення до нульового рівня – всередині біту. При цьому логічному нулю відповідає додатний імпульс, а логічній одиниці – від'ємний імпульс. Особливістю даного коду є те, що всередині біту завжди є перехід сигналу в нуль, тому кожний біт є “позначеним” і приймач легко може виділити синхроімпульс. До переваг такого методу кодування можна віднести: самосинхронізацію та відсутність постійної складової. Недоліком є необхідність використання біполярного сигналу.

В коді Манчестер-II кожний такт ділиться на дві частини. Інформація кодується перепадами потенціалу всередині кожного такту. При цьому напрямок перепаду визначає величину двійкової змінної: логічна одиниця – перехід донизу, логічний нуль – перехід догори. Зміна сигналу всередині такту, дозволяє легко виділити синхросигнал, тому для такого коду властива

самосинхронізація. Переваги такого методу кодування: самосинхронізація, відсутність постійної складової при передачі довгої послідовності з нулів чи одиниць, що дає змогу простим чином виконувати гальванічну розв'язку сигналів (наприклад, за допомогою імпульсних трансформаторів), а також можливість використання уніполярних сигналів. До недоліків такого методу кодування слід віднести складність реалізації.

Для одноканального зв'язку достатнім та оптимальним є код БПН, а для багатоканального – код Манчестер-II чи код з поверненням до нуля.

4.3. Технологія спектрального ущільнення. При створенні оптоволоконних магістральних ліній зв'язку на велику кількість каналів використовують принцип мультиплексування з розділенням по довжині хвилі (WDM-технологія або технологія спектрального ущільнення). Дана технологія полягає в тому, що у волоконний світловод вводиться одночасно випромінювання від декількох джерел, що працюють на різних довжинах хвиль, на виході за допомогою оптичних фільтрів відбувається розділення сигналів. Це дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність оптичних кабелів та організувати двохсторонній багатоканальний зв'язок по одному волокну.

Для об'єднання та розділення оптичних несучих використовуються відповідно мультиплексори та демультиплексори, принцип дії яких ґрунтується на відомих явищах фізичної оптики – дисперсії, дифракції та інтерференції. Розглянемо принцип дії найпростішого призматичного пристрою, за допомогою якого можна як об'єднати, так і розділити оптичні несучі, схема якого наведена на рис.12, а. Основним елементом такого пристрою є оптична призма, в якій за рахунок дисперсії відбувається просторове розділення (чи об'єднання для зворотного напрямку) оптичних несучих. Дисперсія – це залежність показника заломлення від довжини хвилі оптичного випромінювання. Для прикладу на слайді показано два оптичних канали з довжинами хвиль несучих λ_1 та λ_2 . Торець волоконного світловода (ВС), по якому передається оптичне

випромінювання двох каналів, розташовується у фокальній площині лінзи L_1 . Тому розбіжний пучок світла з торця ВС перетворюється лінзою в паралельний пучок та падає на призму. Так як випромінювання різної довжини хвилі відхиляється призмою на різні кути, то з призми виходять паралельні пучки різного напрямку (штрихові лінії). За допомогою другої фокусуючої лінзи L_2 ці пучки збираються в різних точках її фокальної площини і далі потрапляють в волоконні світловоди ВС1 та ВС2. На кінцях світловодів ВС1 та ВС2 розташовуються фотоприймачі при роботі приладу у режимі розділення сигналів та оптичні передавачі при роботі у режимі об'єднання несучих.

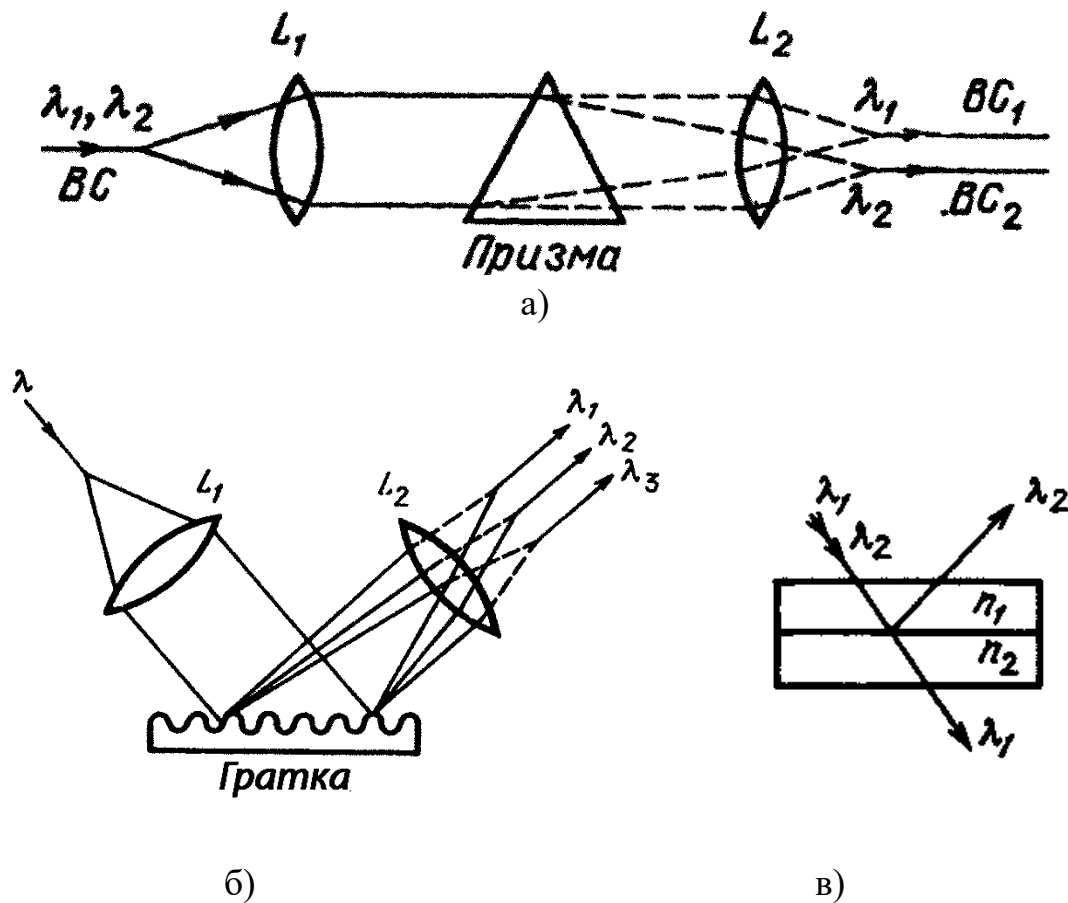


Рисунок 12 – Схема мультиплексування за допомогою оптичної призми (а), дифракційної ґратки (б) та оптичного фільтру (в)

Призматичні мультиплексори/демультиплексори оптичних несучих мають ряд недоліків, серед яких найбільш вагомими є великі габарити, значні втрати та висока вартість. Тому для створення систем передачі зі спектральним ущільненням найчастіше використовують пристрої, що працюють на ефектах дифракції та інтерференції, наприклад, дифракційні ґратки, оптичні фільтри (інтерференційні або дихроїчні), інтерферометри Маха-Цендера, Фабрі-Перо тощо. Дифракційна ґратка – оптичний елемент з періодичною структурою, здатний впливати на поширення світлових хвиль так, що енергія хвилі, яка пройшла через ґратку, зосереджується в певних напрямках. Напрямки поширення цих променів залежать від періоду ґратки та довжини світлових хвиль, тобто дифракційна ґратка працює як дисперсійний елемент. Найпростіша дифракційна ґратка – тонка скляна пластинка, на поверхні якої нанесено прямолінійні паралельні рівновіддалені штрихи, ширина та відстань між якими сумісні з довжиною хвилі світла. Отже, дифракційні ґратки просторово диспергують падаючий промінь на складові різної довжини хвилі, тобто різні оптичні хвилі відхиляються на різні кути, таким чином здійснюється рознесення та об'єднання несучих, як це показано на рис.12, б.

Принцип дії оптичних фільтрів інтерференційного типу полягає у відбиванні однієї частини та пропусканні іншої частини випромінювання завдяки явищу багатопроменевої інтерференції в тонких діелектричних плівках. Для отримання необхідного ефекту на поверхню прозорої пластини наносять декілька шарів (від 10 до 200 шт), в яких значення показника заломлення чергується більший-менший-більший-менший і т.д. Наприклад, плівки з вищим показником заломлення – оксид титану, сульфід цинку, а плівки з нижчим показником – оксид кремнію, фторид магнію тощо. Схема найпростішого світлофільтра наведена на рис.12, в, звідки видно, що при проходженні крізь такий світлофільтр одна хвиля відіб'ється назад, а інша пройде наскрізь.

Контрольні запитання

1. Порівняйте системи оптичного зв'язку з відкритим та закритим каналом.
2. Наведіть класифікацію ВОСПІ в залежності від їх протяжності.
3. Якою є структурна схема волоконно-оптичної системи передачі інформації? Опишіть процес перетворення та передачі сигналів за цією схемою.
4. Як працює лінійний ретранслятор в ВОСПІ? Яке його призначення?
5. Які бувають види модуляторів в оптичних системах передачі інформації? Порівняйте ці види між собою.
6. Порівняйте код з поверненням та без повернення до нуля. Який з цих кодів використовується в ОІС?
7. В чому особливість коду Манчестер II?
8. Опишіть схему та фізичний принцип мультиплексування оптичних сигналів за допомогою оптичної призми.
9. Опишіть схему та фізичний принцип мультиплексування оптичних сигналів за допомогою дифракційної ґратки.
10. Опишіть схему та фізичний принцип мультиплексування оптичних сигналів за допомогою оптичного фільтру.

РОЗДІЛ 5.

Фізика світлопередачі інформації по оптоволоконному кабелю

5.1. Типи оптичних волокон та їх параметри. Основним елементом оптичного кабелю волоконно-оптичної системи передачі інформації є оптичне волокно, що представляє собою тонке скляне волокно циліндричної форми, по якому здійснюється передача електромагнітного випромінювання мікронного діапазону довжин хвиль, що відповідає частотам $10^{14} - 10^{15}$ Гц. Волокно складається із серцевини й оболонки з різними показниками заломлення n_1 і n_2 . На рис.13 проілюстровано різні випадки проходження світлового променя на межі поділу двох середовищ.

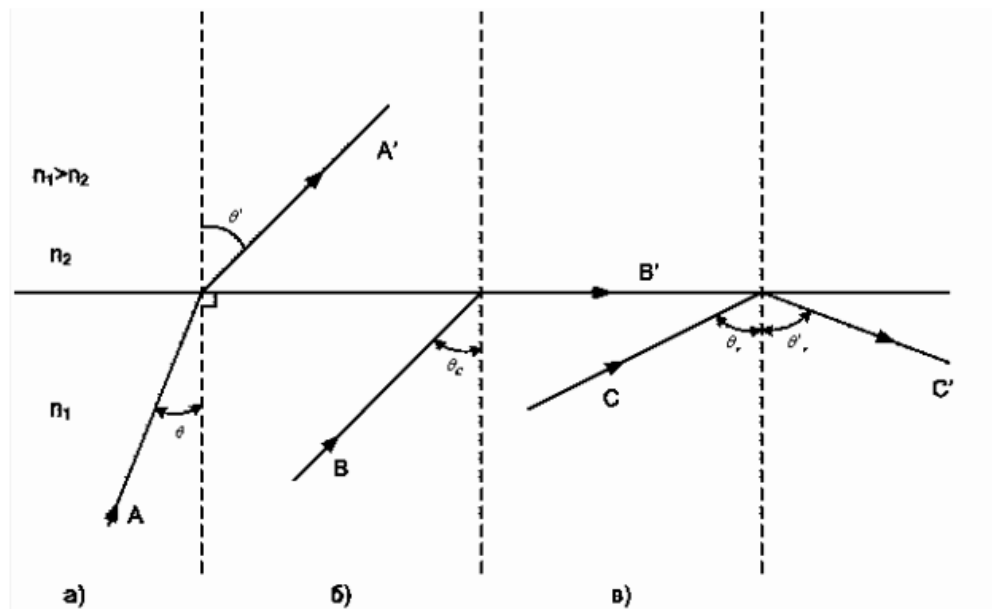


Рисунок 13 – Проходження світлового променя крізь межу поділу двох середовищ в залежності від кута падіння: а) заломлення променя, б) ковзання променя вздовж межі поділу, в) повне внутрішнє відбивання

Якщо виконуються умови $0 < \Theta < \Theta_c$ та $0 < \Theta' < \frac{\pi}{2}$, то справедливе таке співвідношення:

$$n_1 \sin \Theta = n_2 \sin \Theta' \quad (40)$$

де $\Theta, \Theta', \Theta_c$ – кут падіння, кут заломлення та критичний кут відповідно.

За критичного кута падіння, тобто коли $\Theta = \Theta_c$, $\Theta' = \frac{\pi}{2}$, справедливе таке співвідношення:

$$n_1 \sin \Theta = n_2 \quad (41)$$

Якщо кут падіння $\Theta > \Theta_c$, має місце явище повного внутрішнього відбиття. В оптичному волокні світло поширюється вздовж осі саме завдяки ефекту повного внутрішнього відбивання.

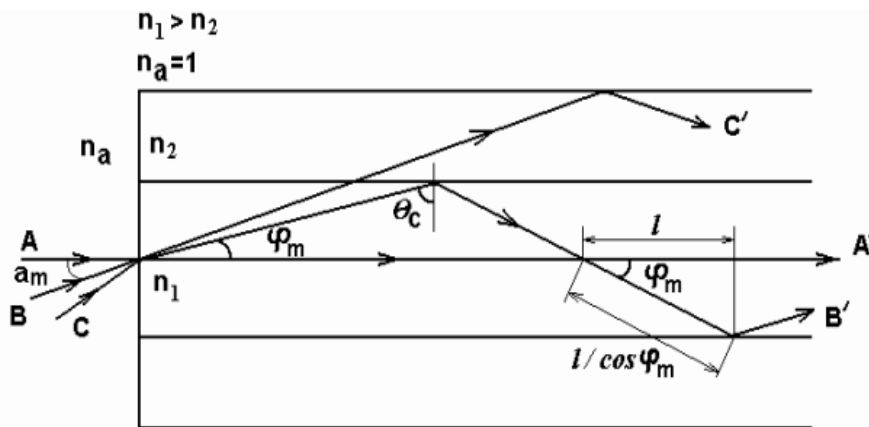


Рисунок 14 – Поширення світлових променів вздовж оптоволокна в залежності від кута падіння

На рис.14 наведено переріз циліндричного скляного оптоволокна, що складається з внутрішньої серцевини з показником заломлення n_1 і навколишньої оболонки з показником заломлення n_2 , причому виконується умова $n_1 > n_2$. Торець волокна зрізаний під прямим кутом до його оптичної осі. На рис.14 зображено промінь, що входить у оптоволокно з торця з навколишнього середовища (повітря) з показником заломлення $n=1$ під різними

кутами. Цей промінь буде поширюватися вздовж волокна шляхом багаторазового відбиття від межі поділу серцевина – оболонка і не буде послаблятися за умови, що кут падіння променя на цю межу Θ буде більший критичного кута Θ_c . Для виконання цієї умови необхідно, щоб кут нахилу променя до оптичної осі оптоволокна $\varphi = \frac{\pi}{2} - \Theta$ був менший, аніж $\varphi_m = \frac{\pi}{2} - \Theta_c$, а кут падіння променя на торець волокна був меншим визначеної величини α_m . Для визначення величини кута α_m користуються законом Снелля та тригонометричними перетвореннями. Вираз для оптимального кута падіння світла на світловод в залежності від показників заломлення серцевини та оболонки має вигляд:

$$\sin \alpha_m = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (42)$$

Якщо ввести наступні позначення:

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad \text{і} \quad n = \frac{n_1 + n_2}{2},$$

то можна одержати такий вигляд рівності (42)

$$NA = \sin \alpha_m = (2n\Delta n)^{1/2} \quad (43)$$

Звідси видно, що чим більший кут α_m , тим більша частина падаючого світла на торець оптоволокна може бути введена в нього і буде поширюватися за рахунок повного внутрішнього відбивання. За аналогією з терміном, який використовується в оптиці для визначення здатності мікрооб'єктивів збирати світло, величину $\sin \alpha_m$, називають числовою апертурою (NA) волокна. Таким чином, апертура визначає максимальний кут між віссю світловода та напрямком оптичного променя, за якого світло, що вводиться в світловод, поширюється по серцевині світловода завдяки явищу багатократного відбивання від поверхні серцевина-оболонка. Основні типи сучасних світловодів мають кут α_m в межах 11,5 – 17 градусів.

Як видно з рис.14, промінь CC' входить у волокно під кутом більшим критичного і тому не відбивається, а потрапляє в оболонку. Усі промені, що падають на торець волокна під кутом, меншим α_m , будуть поширюватися в серцевині волокна. Промені, які розповсюджуються в серцевині, будуть проходити різні відстані в залежності від їхнього кута падіння, причому ці відстані будуть змінюватися від l для осевого променя до $l/\cos\phi_m$ для найпохилішого (критичний промінь BB'), де l – відстань по осі волокна.

Було встановлено, що тільки частина світла, що випромінюється джерелом світла, поміщеним на оптичній осі волокна поблизу його торця, може бути введена у волокно і буде в ньому поширюватися. При цьому ця частина світла пропорційна числовій апертурі, піднесений до квадрату:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = (NA)^2 = 2n\Delta n \quad (44)$$

де Φ – потужність випромінювання джерела світла, Φ_0 – потужність випромінювання, введена у волокно.

Аналізуючи вираз (44) видно, що для того, щоб ввести в оптоволокно якнайбільше світла, необхідно забезпечити великі значення величин n і Δn . Очевидно, це може бути зроблено, якщо використовувати для виготовлення оптоволокна скло з великим показником заломлення і не покривати його оболонкою. У цьому випадку повне внутрішнє відбивання буде відбуватися на поверхні скло-повітря. Джгути з непокритих оболонкою скляних волокон використовуються в деяких системах передачі оптичної інформації на короткі відстані. Однак при використанні таких джгутів виникають дві проблеми. Перша проблема полягає в тому, що при повному внутрішньому відбиванні частина світла проникає крізь поверхню відбиття, оскільки в джгуті з волокон без оболонок умови на поверхні змінюються через наявність структурних дефектів, контакт оптоволокон один з одним і навколишнім середовищем. В результаті значна частка потужності виводиться з оптоволокна.

Друга проблема пов'язана з тим, що будь-який короткий світловий імпульс, введений у волокно, складається з ряду променів, що поширюються вздовж осі волокна і по траєкторіях, нахилених до неї. Осьовий промінь буде проходити крізь оптоволокно за менший час, аніж похилий промінь, тому на виході вони виявляться розділеними в часі на інтервал ΔT . В результаті світловий імпульс, що містить промені під усіма можливими кутами, виявиться розмитим у часі в процесі свого поширення по оптоволокну на величину, обумовлену виразом:

$$\frac{\Delta T}{l} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\Delta n}{c} \quad (45)$$

Це розширення світлового імпульсу при його поширенні по оптоволокну відоме як міжмодова (багатопротична) часова дисперсія волокна. Для скляного волокна без оболонки величина цієї дисперсії становить 2,5 нс/км згідно формули (45). Покриття серцевини волокна скляною оболонкою приводить до зменшення часової дисперсії та якщо покриття має високу якість і товщину, достатню для утримання загасаючої хвилі, то воно істотно зменшує втрати. Часова дисперсія волокна зі східчастим показником заломлення становитиме приблизно 35 нс/км.

Для передачі сигналів застосовуються два види волокна: одномодове і багатомодове (рис.15). Багатомодове волокно за профілем показника заломлення поділяється на східчасте (рис.15, а) та градієнтне волокно (рис.15, б). Східчасте волокно характеризується стрибкоподібною зміною показника заломлення на межі серцевини та оболонки. В градієнтних оптоволокнух показник заломлення монотонно зменшується від центра до периферії. В одномодовому волокні діаметр світловодної жили становить 8-10 мкм, тобто є одного порядку з довжиною світлової хвилі. При такій геометрії у волокні може поширюватися тільки один промінь (одна мода). В багатомодовому оптоволокну розмір світловодної жили становить 50-60 мкм, що дає змогу

поширюватися великій кількості променів (багато мод). Обидва типи волокон характеризуються двома найважливішими параметрами: загасання і дисперсія.

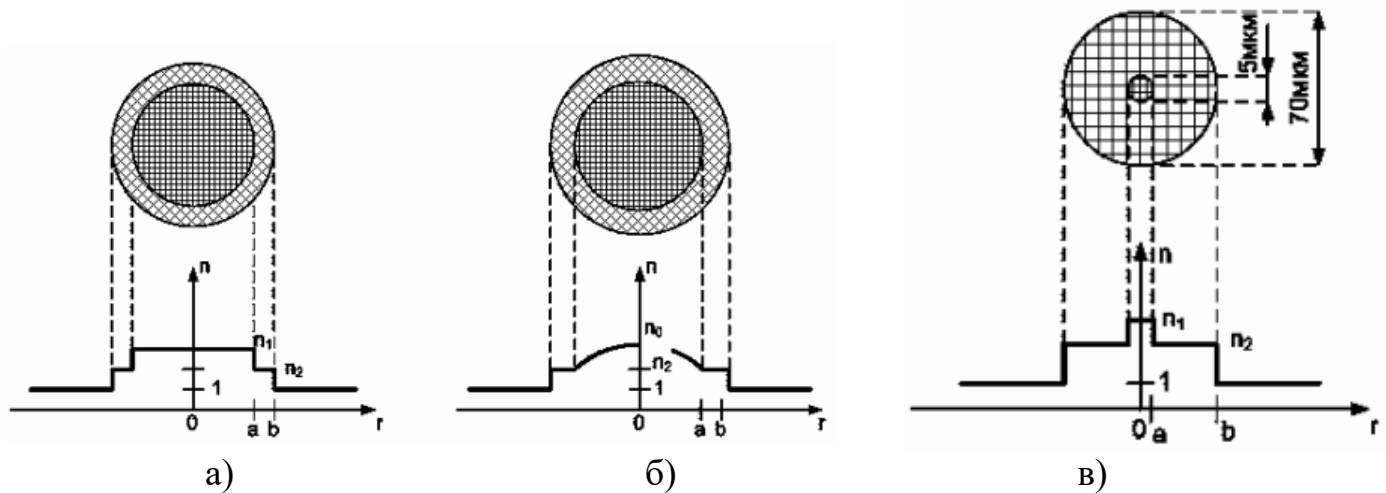


Рисунок 15 – Профіль розподілу показника заломлення та поперечний переріз різних типів оптичних волокон: а) багатомодове східчасте оптоволокно, б) багатомодове градієнтне оптоволокно, в) одномодове оптоволокно

Загасання сигналу визначається втратами на поглинання і на розсіювання випромінювання в оптичному волокні. Для кількісної оцінки втрат пропускання використовується питоме загасання оптичного сигналу, що вимірюється в дБ/км:

$$B = \frac{1}{L} \cdot 10 \lg \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}} \right) \quad (46)$$

де $P_{\text{вх}}$ та $P_{\text{вих}}$ – потужності випромінювання на вході та виході світловода довжиною L .

Розрізняють два види фундаментальних втрат в оптоволокні – власне поглинання та релєєвське розсіювання. Власне поглинання матеріалу світловода в УФ області пов'язано з електронними переходами між дозволеними енергетичними рівнями атомів, а в ІЧ області – з багатофотонним та коливальним збудженням молекул. Експериментально встановлено, що для кварцу в діапазоні 0,6 – 1 мкм УФ-поглинання вже не має місця і втрати

становлять менше 1дБ/км. При цьому ІЧ-поглинання ще не почалось, оскільки воно більш активно появляється в діапазоні 8 – 12 мкм. Саме цими міркуваннями обумовлено вибір діапазону довжину хвиль для поширення світлового сигналу в оптоволокну.

Релеєвське розсіювання має місце на нерегулярностях різного роду – структурних дефектах та інородних вкрапленнях в серцевині. Такі інородці включення значно впливають на можливість проходження світла по ідеальній траєкторії, що призводить до відхилення від неї і як наслідок збільшення кута падіння на межу поділу серцевина-оболонка і виходу частини світлового променя в оболонку. Даному виду розсіювання властива сильна залежність від довжини хвилі – чим більша довжина хвилі, тим менші втрати на розсіювання. Таким чином, релеєвські втрати стають нехтовно малими в дальній ІЧ-області.

Крім фундаментальних втрат на загасання розрізняють інші види втрат, вплив яких може бути зменшено шляхом відповідних технологічних рішень. До таких втрат відносять домішкове поглинання, технологічні розкиди параметрів світловодів та втрати, пов'язані з дефектами експлуатації. Центрами домішкового розсіювання в кварці є іони металів (мідь, хром, магній, нікель, залізо) та гідроксильні групи ОН. За сучасних методів очищення кварцу роль домішків іонів металів стає несуттєвою і є актуальною лише в багатокомпонентному склу. Значне поглинання має місце за рахунок ОН груп, однак спектр цього поглинання має вид декількох максимумів у вигляді вузьких смуг, в проміжках між якими загасання є нехтовно малим. Цим і обумовлено поява вікон прозорості на спектрі поглинання для кварцу. Технологічні розкиди критичних параметрів оптоволокну (еліптичність серцевини, статистична флуктуація її діаметру та закону розподілу показника заломлення по довжині світловода) призводять до розсіювання та перекачування частини енергії світлового сигналу у витікаючі моди. Втрати, обумовлені дефектами експлуатації, пов'язані з мікровигинами оптоволокну, що виникають на місці

з'єднання оптоволокон з захисними оболонками під час виготовлення оптичного кабелю. Ці втрати бувають достатньо великі і можуть перевищувати 100 дБ/км.

Спектральна залежність загасання волокна наведено на рис.16. Наведений графік має декілька ділянок, де загасання оптичного сигналу мінімальне, ці ділянки називаються вікнами прозорості волокна. Перше вікно прозорості розташоване поблизу довжини хвилі 0,85 мкм і використовується лише для передачі сигналів на короткі відстані через відносно велике загасання порівняно з іншими вікнами. Друге вікно прозорості знаходиться поблизу довжини хвилі 1,3 мкм і активно використовується в телекомунікаціях через малі втрати на загасання.

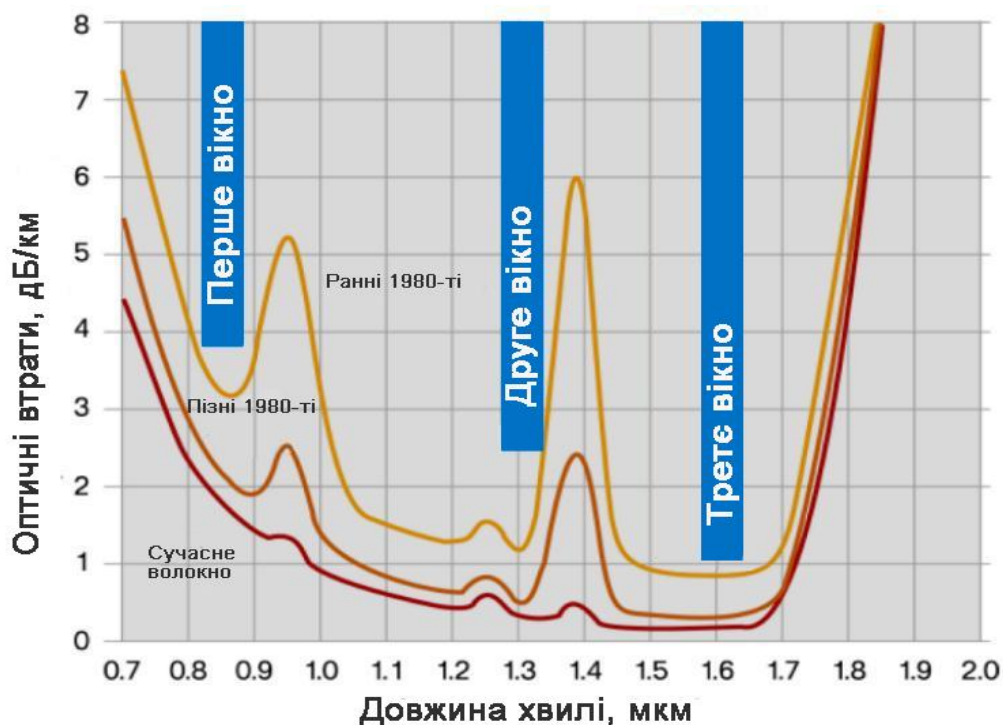


Рисунок 16 – Спектральна залежність загасання оптоволокон

Третє вікно прозорості знаходиться поблизу довжини хвилі 1,55 мкм і забезпечує мінімальне загасання сигналу, однак воно має додаткову перевагу, що на цю довжину хвилі припадає робочий діапазон волоконно-оптичних

ербієвих підсилювачів. Останнім часом були розроблені ще 2 вікна прозорості – четверте до довжини 1,62 мкм і п'яте вікно – від 1,28 до 1,65 мкм для оптичного волокна.

Інший важливий параметр оптичного волокна – величина дисперсії. Дисперсія – це розсіювання в часі спектральних і модових показників оптичного сигналу. Існують два основних вида дисперсії: модова або міжмодова та матеріальна (рис.17).

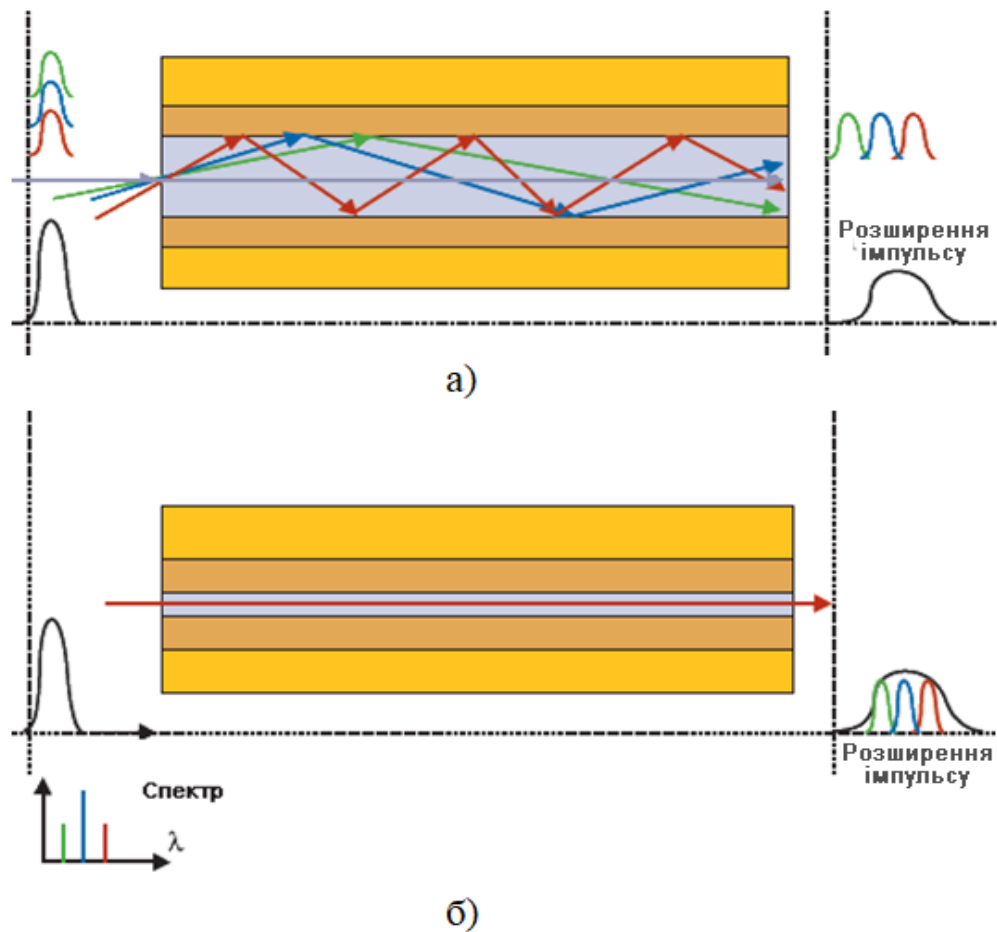


Рисунок 17 – Розширення імпульсу внаслідок міжмодової дисперсії (а) та матеріальної дисперсії (б)

Міжмодова дисперсія притаманна багатомодовому волокну й обумовлена наявністю великої кількості мод, час поширення яких різний (рис.17, а). Для зменшення прояву цього виду дисперсії використовують градієнтне

оптоволокну. Як видно з профілю розподілу показника заломлення в такому волокні (рис.15, б), осьові промені проходять крізь волокно найкоротшим шляхом, але вони переборюють ділянку з найбільшим значенням показника заломлення, і отже, поширюються з найменшою швидкістю. Похилі промені, навпаки, проходять по більш довгих траєкторіях, однак велика частина їхнього шляху знаходиться в середовищі з більш низьким показником заломлення, в результаті чого вони поширюються швидше. Оптимальний профіль градієнтного розподілу показника заломлення близький до параболічного, який забезпечує величину міжмодової дисперсії менше 1 нс/км.

Матеріальна дисперсія обумовлена залежністю показника заломлення від довжини хвилі, тобто промені з різними довжинами хвиль поширюються з різною швидкістю навіть в межах однієї моди, як це показано на рис.17, б.

Дисперсія проявляється в завалі частотної характеристики світловода та в розширенні імпульсу сигналу. Зокрема розширення імпульсу може призвести до накладання двох сусідніх імпульсів, в результаті чого інформація буде прийнята з помилкою. Вплив дисперсії визначається протяжністю оптоволоконної лінії, тому використовують параметри, приведені до одиниці довжини світловода: смуга пропускання f_0 , МГц*км (визначається по спаду частотної характеристики на 3 дБ), постійна дисперсії τ_0 , нс/км (визначається по часу наростання імпульсу в e -разів), розширення імпульсу σ_0 , нс/км (визначається по розширенню одиничного δ -імпульсу на рівні половини його амплітуди). Отже, дисперсія накладає обмеження на дальність передачі та на верхню частоту переданих сигналів.

Загасання і дисперсія в різних типів оптичних волокон різні. Якщо при поширенні світла по багатомодовому волокну як правило переважає міжмодова дисперсія, то одномодовому волокну притаманні тільки матеріальна дисперсії. На довжині хвилі 1.3 мкм матеріальна і модова дисперсії в одномодовому волокні компенсують одна одну, що забезпечує найвищу

пропускну здатність. Одномодові волокна мають кращі характеристики щодо загасання і смуги пропускання, тому що в них поширюється тільки один промінь. Проте одномодові джерела випромінювання в кілька разів дорожчі багатомодових джерел. Крім того, через малі розміри світловодної жили в одномодове волокно важче ввести випромінювання та складно зрощувати оптоволокна між собою з малими втратами. Багатомодові волокна більш зручні при монтажі, тому що в них розмір світловодної жили в кілька разів більший, ніж в одномодових волокнах. Багатомодовий кабель простіше стикувати оптичними роз'ємами з малими втратами (до 0.3 дБ на стику). На багатомодове волокно розраховані доступні і дешеві випромінювачі випромінювачі на довжині хвилі 0.85 мкм. Однак загасання на цій довжині хвилі знаходиться в межах 3-4 дБ/км і не може бути істотно поліпшено. Смуга пропускання багатомодових волокон досягає 800 МГц·км, що прийнятно для локальних мереж зв'язку, але не достатньо для магістральних ліній.

Оптичні волокна за матеріалом, з якого вони виготовлені, можна розділити на такі типи: кварцові, кварц-полімерні, багатокомпонентні та полімерні. Кварцові оптичні волокна виготовляються з високочистого кварцового скла (серцевина і світловідбиваюча оболонка) і використовуються для систем ВОСПІ локального, регіонального та магістрального типу. Отримують такі волокна методом газофазного осадження, який ґрунтується на високотемпературній реакції ($1200-1600^{\circ}\text{C}$) синтезу чистого діоксиду кремнію з газової суміші хлориду кремнію та кисню. Суміш пропускають через нагріту кварцеву трубу, а на її внутрішній поверхні осідає шар чистого кварцу, після чого до складу суміші додають домішки бору чи германію і далі осідає легований шар кварцу зі збільшеним показником заломлення. Після нанесення шарів необхідної товщини трубку нагрівають до вищої температури і обтискають до її сплюснення – таким чином формується вихідна заготовка. Розтягуючи розігріту заготовку і змінюючи швидкість витяжки, отримують

волокно необхідних геометричних розмірів. Переваги даного методу синтезу – дозволяє отримати найвищу прозорість оптоволокна, близьку до теоретично можливої та реалізувати практично будь-який закон розподілу показника заломлення. До недоліків слід віднести – двохстадійність процесу, а також труднощі, пов’язані з виготовленням кварцових труб заданої якості.

Кварц-полімерні оптичні волокна виготовляються з кварцовою серцевиною та полімерною світловідбивальною оболонкою, як правило, кремнійорганічного типу. Ці волокна характеризуються простотою виготовлення, одно стадійності циклу витяжки, підвищеним значенням діаметру серцевини та числової апертури, а також стійкістю до впливу радіації (через відсутність домішків легування у серцевині). До недоліків слід віднести – невисоку прозорість, значну дисперсію, оскільки вони не можуть бути виготовлені ні одномодовими, ні градієнтними, обмежений температурний робочий діапазон, недовговічність. Ці недоліки носять принциповий характер, тому кварц-полімерні волокна мають обмежене застосування в простих ВОСПІ локального типу.

Багатокомпонентні оптичні волокна виконані зі скла із домішками різних оксидів металів. Такі волокна представляють собою сплави двооксиду кремнію з оксидами натрію, кальцію, магнію, алюмінію та літію. Зміна складу дає змогу змінювати показник заломлення в широких межах. Такі світловоди виготовляються методом подвійного тигля. Навіски зі скла, які призначені для створення серцевини та оболонки, неперервно поступають у внутрішній та зовнішній тиглі зверху, а знизу з тонкого сопла витягується волокно. Такий процес характеризується низькою температурою, високою продуктивністю, можливістю виготовляти градієнтні волокна. Однак через недовго чистоту вихідних компонентів такі волокна недостатньо прозорі, тому призначені для використання в системах локального типу.

Полімерні оптичні волокна виготовляються з полімерних матеріалів, які мають високу прозорість і використовуються для деяких систем внутрішньо об'єктового зв'язку, підсвічування, декоративного оформлення, в медицині тощо. Виготовляють подібним методом, що й багатокомпонентні, при цьому полімери серцевини та оболонки поступають до сопла під тиском з плунжерних циліндрів, тому такий метод ще називається плунжерним. Полімерні оптоволокна найбільш дешеві та прості у виготовленні, можуть мати практично будь-які діаметри серцевини та числової апертури. До недоліків слід віднести значні втрати на пропускання, невисокі робочі температури та недовговічність.

Останнім часом з'явилися спеціальні типи кварцового волокна:

1) волокно для компенсації дисперсії (DCF – Dispersion Compensating Fiber) використовується в спеціальних модулях для компенсації дисперсії;

2) волокно, леговане ербієм (EDF – Erbium-Dopped Fiber), використовується в оптичних підсилювачах типу EDFA – Erbium -Dopped Fiber Amplifier;

3) волокно, леговане неодимом (NDF – Neodim-Dopped Fiber), використовується в оптичних підсилювачах типу NDFA – Neodim-Dopped Fiber Amplifier;

4) волокно, що зберігає стан поляризації (PMF – Polarization Maintaining Fiber), використовується в оптоволоконних сенсорах.

5.2. Структура волоконно-оптичного кабелю. Оптичним кабелем називається кабельний виріб, який містить кілька оптичних волокон, які мають спільну оболонку, поверх якої в залежності від умов експлуатації наноситься захисний шар. Оптичні кабелі повинні забезпечувати стабільність характеристик оптичного волокна при експлуатації та зберіганні, захист волокна від механічних, кліматичних та інших видів зовнішніх дій, зручність використання, монтажу та ремонту.

У звичайних електричних кабелях мідні провідники є силовими елементами і здатні зберігати працездатність при відносному видовженню до 10 %. В оптичному кабелі допустиме відносне збільшення довжини оптичних волокон складає біля 0,5%, тому вони можуть бути зруйновані вже при незначному видовженню кабелю.

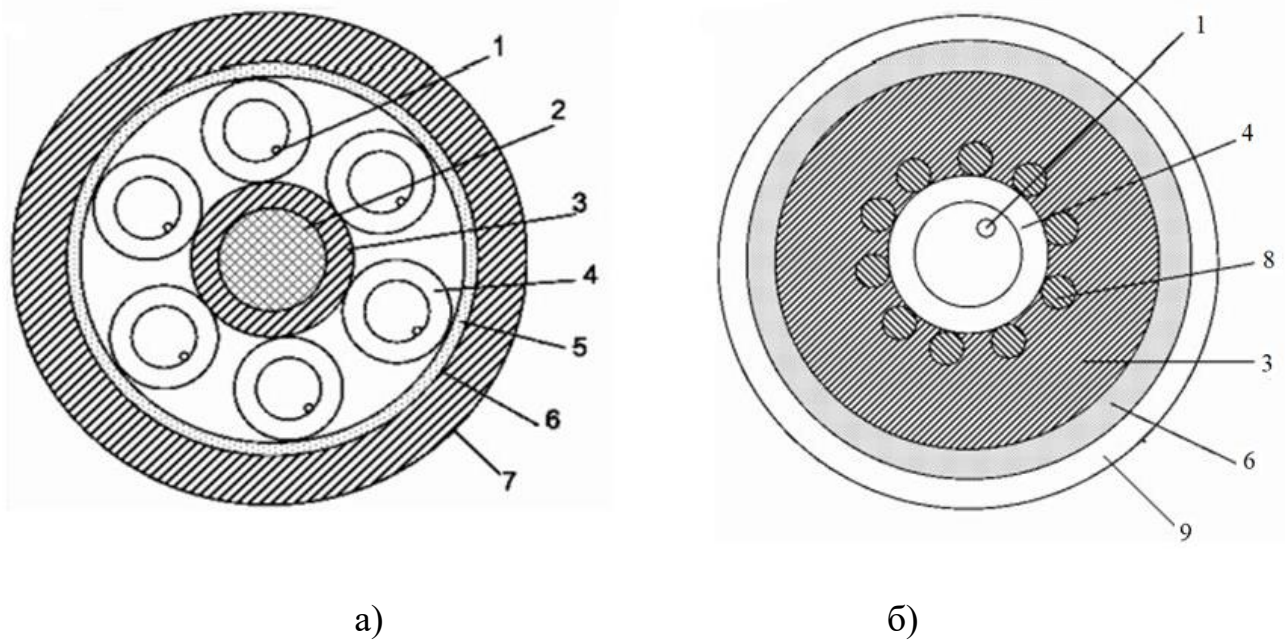


Рисунок 18 – Різновиди оптоволоконного кабелю: центральне (а) та концентричне (б) розташування армуючих елементів (1 – оптичне волокно, 2 – серцевина з армуючим елементом (стальний трос), 3 – поліуретанова оболонка, 4 – двохшарова трубчаста захисна оболонка (фторопласт та поліефір), 5 – скріплювальний елемент (обмотка полімерними стрічками), 6 – армуючі елементи з синтетичних ниток типу кевлар, 7 – поліуретанова захисна оболонка, 8 – армуючі елементи (скловолокно), 9 – полівінілхлоридна захисна оболонка)

В процесі конструювання оптичних кабелів необхідно враховувати взаємне розташування зміцнювальних елементів і оптичних волокон. Існують два основних варіанти такого взаємного розташування. В першому з них зміцнювальний елемент розташовується в центрі кабелю (рис.18, а), а

волокна – концентрично відносно центрального елемента. В другому різновиді – оптичні волокна розташовуються в центрі, а навколо них – силові елементи (рис.18, б). При центральному розташуванні армуючих елементів гнучкість кабелю в більшій мірі залежить від якості оптичного волокна, його стійкості до навантажень по згину, але конструкція ефективніше протидіє розтяжним навантаженням. При концентричному розташуванні армуючих елементів жорсткість конструкції збільшується, але зростає стійкість кабелю до стискання, зсуву та тертя.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що оптичні кабелі можуть містити такі елементи: оптичне волокно як направлену систему передачі електромагнітної енергії, серцевину, заповнену демпфіруючими елементами, скріплювальні елементи, захисну оболонку та армуючі елементи.

Серцевина оптичного кабелю відіграє важливу роль в конструкції. Вона може бути силовим елементом чи оптичним модулем. Як силовий елемент серцевина може виготовлятися з поліетилену, полівінілхлориду, поліуретану, поліпропілену, мідних та сталевих проволоч або труб. Заповнювач використовується для ущільнення конструкції оптичного кабелю і слугує для рівномірного розподілу зовнішніх механічних навантажень на окремі елементи оптичного кабелю. Заповнювач виготовляють із джгутів з бавовняних ниток або склонитки, поролону, пористої гуми, поліуретану. Скріплювальні елементи слугують для утримання окремих елементів кабелю в пучку перед нанесенням на них захисної оболонки. В якості таких матеріалів можуть слугувати різні нитки (бавовняні, полімерні, склонитки), стрічки (поліамідні, поліетилентерафталітні, фторопластові, паперові). Для контролю цілісності оболонки можна використовувати полімерні металізовані плівки, які накладають металізованою поверхнею зовні (плівки типу майлар). Захисна оболонка забезпечує захист оптичного кабелю від дії зовнішніх факторів і виготовляється одно- або двошаровою з полівінілхлориду, поліуретану або

фторопласту. Між першою і другою оболонкою або всередині можуть бути розташовані зміцнювальні елементи з синтетичних ниток або сталевих проволоч, а також металеві оболонки з алюмінію або сталі.

Контрольні запитання

1. В чому полягає явище повного внутрішнього відбивання? Напишіть умови для його виникнення.
2. Що таке числова апертура? Який її фізичний зміст?
3. Намалюйте профіль розподілу показника заломлення та поперечний переріз різних типів оптичних волокон.
4. Назвіть два найважливіших параметри оптоволоконна, які визначають точність та надійність передачі сигналів на великі відстані.
5. Назвіть фізичні причини загасання сигналу в оптоволоконні.
6. Що собою являють вікна прозорості на спектрі поглинання для кварцу? Поясніть причину їх утворення.
7. Чим визначається робоча довжина хвилі оптоволоконна?
8. Назвіть види дисперсії оптичних сигналів в оптоволоконні. Порівняйте її величину в одномодовому та багатомодовому оптоволоконні.
9. Які матеріали використовуються для виготовлення оптоволоконна?
10. Якою є структура оптоволоконного кабелю?

РОЗДІЛ 6.

Архітектура волоконно-оптичних мереж

6.1. Комутаційні елементи ВОСПІ. До комутаційних елементів ВОСПІ відносять пасивні допоміжні компоненти оптоволоконних мереж, які розташовуються на місцях з'єднань оптоволокон і допомагають оптоволокну виконувати функції поширення та розподілення оптичного сигналу. Розглянемо основні види комутаційних елементів ВОСПІ – оптичні з'єднувачі, оптичні розгалужувачі та оптичні комутатори.

Оптичні з'єднувачі – це пасивні елементи, які використовуються для з'єднання оптичного кабелю (з'єднувачі типу кабель-кабель) та кінця кабелю з передавальним чи приймальним модулем (з'єднувачі блочного типу). Оптичні з'єднувачі поділяються на роз'ємні (коннектори) та нероз'ємні (зростки). Коннектори призначені для здійснення багаторазових з'єднань/розз'єднань (500 – 1000 циклів) і поділяються на механічні та гелеві. Зростки забезпечують одноразове з'єднання волокон і поділяються на механічні та сплавні. Основний параметр оптичного з'єднувача – втрати на пропускання. Задовільний рівень втрат становить 1 дБ. При з'єднанні оптоволоконна потрібно забезпечити ідеальну перпендикулярність його торця.

Принцип механічного роз'ємного з'єднання оптоволокон полягає у з'єднанні торців волокон впритул, здійснюючи прямий фізичний контакт (рис.19, а). При цьому місце з'єднання не повинно містити повітряного прошарку в зоні контакту, що може створити великі втрати при передачі інформації. Роз'ємний з'єднувач являє собою два роз'єми та розетку. Оптичні волокна розташовуються в керамічні наконечники роз'ємів, які центруються в розетці за допомогою плаваючого центратора – розрізної втулки так, щоб осі волокон співпадали. Наконечники роз'ємів притискаються один до одного в

центраторі за допомогою пружин. Такі з'єднувачі забезпечують рівень втрат 0,1 – 0,6 дБ.

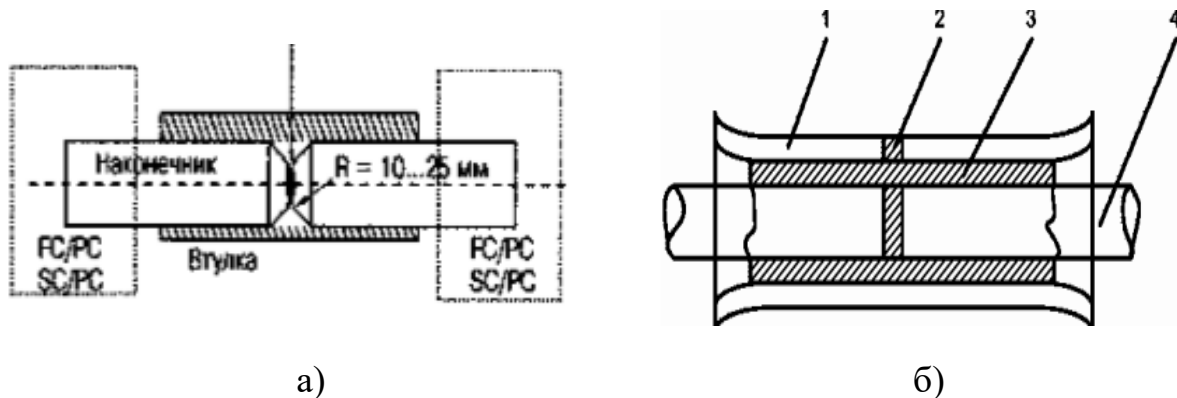


Рисунок 19 – Принцип механічного роз'ємного (а) та нероз'ємного (б) з'єднання оптоволокон: 1 – скляна трубка, 2 – отвір, 3 – компаунд, 4 – оптоволокно

Принцип гелевих роз'ємних з'єднувачів (сплайсів) полягає в тому, що в місце контакту оптичних волокон додають оптичну імерсійну рідину (гель), показник заломлення якого є близьким до показника заломлення серцевини оптоволокон. Сплайси являють собою трубку, заповнену гелем, та затискачів для фіксації оптоволокон. Внутрішній діаметр сплайсу має дорівнювати зовнішньому діаметру оптоволокон. З'єднувані оптичні волокна вводять в сплайс з протилежних боків до механічного торкання торцями, після чого здійснюється фіксація волокон по краях сплайсу. За рівнем втрат такі з'єднувачі займають проміжне місце між коннекторами та сплавними з'єднувачами. Для постійного з'єднання використовуються рідко.

Один з найпоширеніших способів постійного з'єднання волокон полягає у використанні прецизійних трубок, які виготовлені точно за зовнішнім діаметром оптичного волокна (рис.19, б). Ці трубки надають оптичному волокну потрібне положення і фіксують його. З'єднувач складається з полої скляної трубки з отвором для заливання клею компаунда, який одночасно слугує і для узгодження показників заломлення волокон, які з'єднуються.

Конічна частина кінця трубки полегшує введення оптичного волокна. Середнє загасання становить 0,3 дБ.

Найбільш висока якість з'єднання волокон досягається при застосуванні зварювання – найменші втрати (порядку 0,02 дБ) за найбільшої механічної міцності. Для забезпечення таких малих втрат зміщення серцевин оптоволокон один відносно одного не повинно перевищувати десятої долі довжини хвилі, що поширюється волокном. Зварювання виконується за допомогою електричної дуги або лазера шляхом нагрівання кінців оптичних волокон, що зрощуються.

Процес зрощування оптичних волокон складається з наступних операцій:

- а) юстування співвісності розташування торців оптичних волокон, що знаходяться на відстані декількох міліметрів один від одного;
- б) попереднє оплавлення торців оптичних волокон електричною дугою;
- в) щільне притиснення торців оптичних волокон, які знаходяться в безупинному дуговому розряді;
- г) остаточний етап зрощування.

Роз'ємні з'єднувачі використовуються для монтажу як правило локальних мереж, а нероз'ємні – для здійснення монтажу регіональних та магістральних мереж.

Оптичні розгалужувачі – це пасивні неселективні елементи, які розподіляють потужність у певному співвідношенні між декількома оптоволоконними чи об'єднують оптичні потоки в один. Відповідно вони поділяються на спліттери та комбайнери. Головна відмінність від мультиплексорів/демультиплексорів полягає в їх неселективності. За технологією виготовлення оптичні розгалужувачі поділяються на планарні (PLC splitter, Planar Lightwave Circuit splitter) та сплавні (FBT splitter, Fused Biconic Taper splitter), а за топологією – на деревовидні та зіркоподібні.

Планарні оптичні розгалужувачі виготовляються методом хімічного осадження оптичного матеріалу (наприклад, плівки діоксиду кремнію) на

напівпровідниковій підкладці (наприклад, кремнієвій). Необхідна конфігурація утворених оптичних хвильоводів забезпечується методом фотолітографії. Оптичні спліттери на практиці використовуються для рівномірного розподілу оптичного сигналу. Переваги планарних розгалужувачів – компактність, можливість виготовлення по груповій інтегральній технології, відносно широкий спектральний діапазон (1,2 – 1,6 мкм). До недоліків таких спліттерів слід віднести більші втрати на зворотне відбивання, аніж у розгалужувачів сплавного типу.

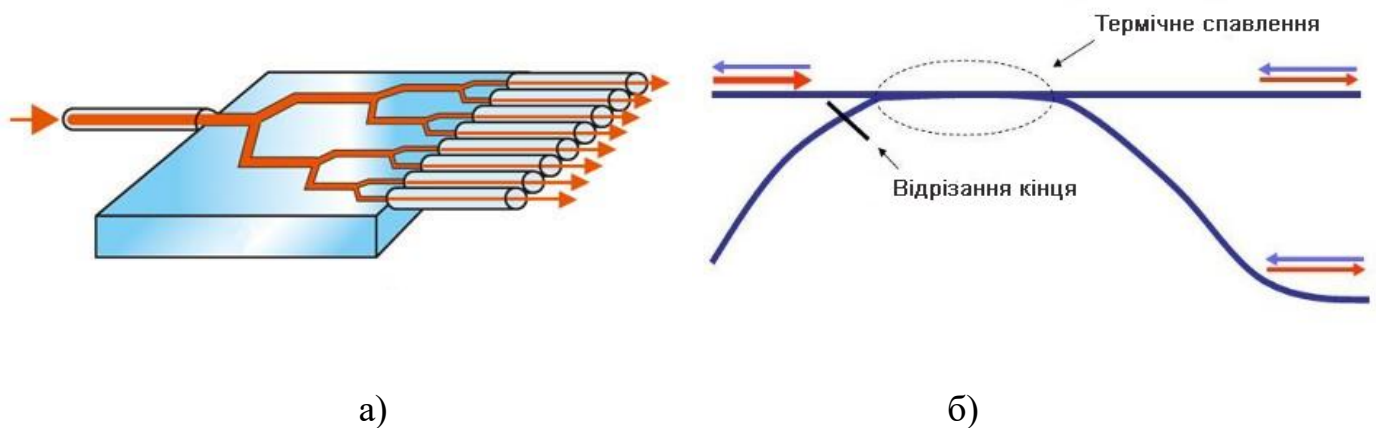


Рисунок 20 – Принцип розділення оптичного сигналу в планарному розгалужувачі (а) та сплавному розгалужувачі (б)

Сплавні оптичні розгалужувачі виготовляються методом сплавлення оптичних волокон. Технологія синтезу таких спліттерів полягає в наступному: зняття захисної оболонки оптоволокон, приведення в контакт їх бокової поверхні, нагрівання, витягування волокон. В результаті в місці з'єднання утворюється 2 конуса, тому розгалужувачі ще називають біконічними. При сплавленні двох волокон утворюється Х-подібний оптичний розгалужувач 2*2, з якого можна зробити Y-подібний розгалужувач 1*2, видаливши один із світловодів. Переваги сплавних оптичних розгалужувачів – менші втрати на

зворотне відбивання та можливість нерівномірного розподілу оптичного сигналу на виході, що залежить в першу чергу від довжини області взаємодії.

Деревовидний розгалужувач – це пристрій, що приймає сигнал на один вхід та розподіляє його на декілька виходів. Зіркоподібний розгалужувач – це багато портовий пристрій, який має принаймні 2 входи, сигнали з яких розподіляє на 2 чи більше виходів. Втрати при розподілі потужності випромінювання в деревовидній топології збільшуються пропорційно кількості абонентів, а в зіркоподібній – пропорційно логарифму від кількості абонентів. Так, в системі з 20 абонентів втрати для першої топології становлять 130 дБ, для другої – 28 дБ. Тому в системах з великою кількістю абонентів застосовують зіркоподібну топологію оптичних розгалужувачів.

Оптичні комутатори (перемикачі) – це пасивні елементи, які перенаправляють оптичну потужність з одного або декількох входів на один або декілька виходів, тому вони мають розмірність $m \times n$, де m – це кількість входів, а n – кількість виходів. Якщо вхід один, то оптичний комутатор називається оптичним перемикачем. В найпростіших оптичних комутаторах, виготовлених по інтегральній технології, використовуються електрооптичні, магнітооптичні чи акустооптичні ефекти. Переваги таких комутаторів – відносно велика швидкодія та низьке енергоспоживання, однак комутувати вони можуть лише до 10 каналів. Для комутації сотень та тисяч каналів використовують голографічні дифракційні ґратки в оптичних реверсивних середовищах. Наприклад, в пластинах з оксиду вісмуту та кремнію можна записувати та витирати голографічні дифракційні ґратки в реальному часі. Зміна просторової частоти дифракційної ґратки дає змогу отримувати різноманітні відхилення променя світла. При цьому відхилення променя реалізується у двох взаємоперпендикулярних напрямках, здійснюючи тим самим комутацію $m^2 \times n^2$ каналів.

6.2. Архітектура мереж ВОСПІ. Розробка мереж ВОСПІ складається з розрахунку системи та проектування її структури (топології). Розрахунок такої оптичної мережі є відносно простим і полягає у розрахунку так званого оптичного бюджету лінії, що включає в себе всі можливі втрати в ВОЛЗ: в кабелі, на роз'ємах, в розгалужувачах, комутаторах тощо. Виходячи від сумарних втрат обирають оптичний передавач, потужність випромінювання якого має бути вищою. При цьому очікувану потужність випромінювання на вході приймача розраховують шляхом віднімання потужності передавача та сумарних оптичних втрат лінії.

Проектування топології мереж ВОСПІ – це першочергове завдання при розробці таких систем. Саме від архітектури мережі залежатиме, як будуть взаємодіяти між собою всі вузли системи: кінцеві користувачі, локальні концентратори та центральний вузол. На вибір архітектури ВОСПІ впливають наступні фактори: очікувана кількість абонентів, розташування центрального вузла, ступінь надійності системи в цілому тощо. У найпростішому випадку, коли до центрального вузла під'єднується віддалений об'єкт чи район, то таке з'єднання називається “точка-точка”. Однак для під'єднання значної кількості абонентів використовують розгалужену структуру топології мережі ВОСПІ при цьому для її реалізації використовують оптичні розгалужувачі чи оптичні комутатори. Розрізняють ряд базових топологій, на основі яких будуються більш складні топології так званого змішаного типу шляхом комбінації базових видів.

Топологія “шина” передбачає з'єднання декількох терміналів паралельно через магістральне волокно, яке називається шиною або шиною даних, вздовж якої розташовані оптичні розгалужувачі, за допомогою яких забезпечується відведення частки потужності до конкретного терміналу (рис.21, а). Тобто оптичний сигнал по мірі поширення по шині буде відгалужуватись до сусідніх терміналів. Таким чином, оптичний сигнал від першого терміналу до останнього

в цій мережі поширюватиметься по ланцюгу шина-розгалужувач-шина-розгалужувач і т.д. Ще одна особливість такого виду топології полягає у тому, що кожний термінал може передавати і приймати інформацію в системі, однак лише один термінал здатний передавати сигнал одночасно, а інші чекають своєї черги.

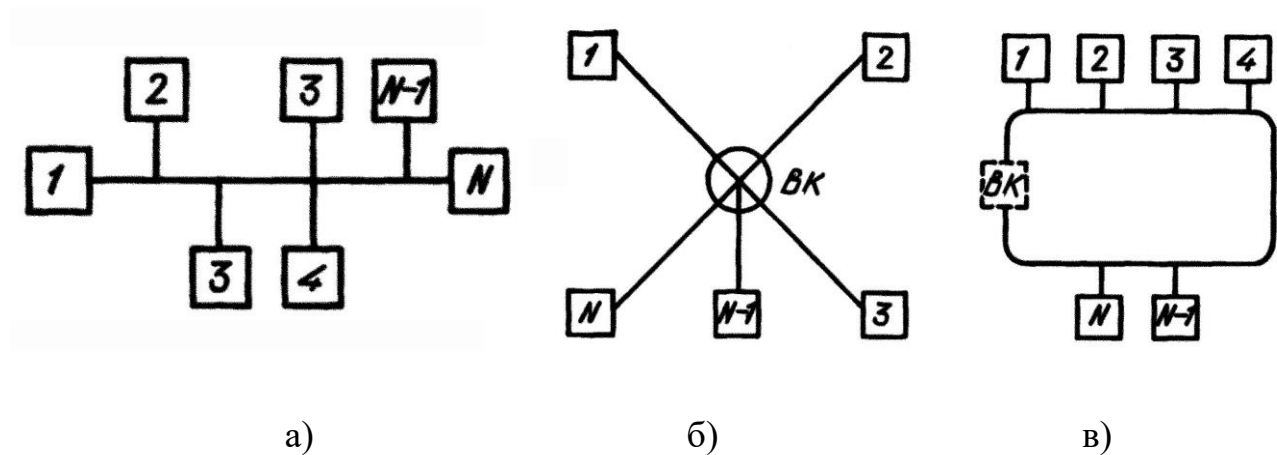


Рисунок 21 – Різновиди базових топологій мереж ВОСПІ: топологія “шина” (а), топологія “зірка” (б), топологія “кільце” (в)

Багатотермінальна мережа потребує відгалужувача з великим коефіцієнтом розгалуження так, щоб сигнали, які надходять на приймальні пристрої, які розташовані на великій відстані від передавального, мали достатню потужність, щоб забезпечити задану якість передачі. При цьому приймальний пристрій має бути здатним обробляти сигнали, що змінюються в широкому діапазоні рівнів оптичної потужності – для ефективного прийому сильних сигналів від терміналів, що розташовуються поруч, та слабких сигналів з віддалених терміналів системи. Іншими словами, потрібний приймальний пристрій з великим динамічним діапазоном. Локальне пошкодження у такій мережі не призводить до припинення всього зв'язку. Розрив волокна шини розділяє систему на дві частини з інформаційним потоком, що зберігається по обидві сторони від місця пошкодження. Пошкодження одного з оптичних

відгалужувачів також розділяє мережу на дві працюючі ділянки і перериває зв'язок із терміналом, підключеним до мережі через цей відгалужувач. Пошкодження в терміналі вимикає цей термінал, залишаючи іншу частину системи працювати в штатному режимі. Нові термінали можна додати до подібної мережі простим розрізанням волокна шини і встановленням у місце розриву оптичного відгалужувача. Однак така топологія має суттєвий недолік – результуючі втрати у мережі лінійно збільшуються при зростанні кількості терміналів. Зокрема втрати стають неприпустимо великими при з'єднанні порівняно невеликої кількості терміналів – більше 5.

При великій кількості терміналів альтернативою послідовній мережі є зіркоподібна (рис.21,б), в якій результуючі втрати при зростанні кількості терміналів збільшуються за логарифмічним законом, що є більш плавним, ніж лінійний. Тобто втрати зростають повільніше при зростанні кількості терміналів в системі. В такій топології термінали з'єднані між собою через оптичний розгалужувач зіркоподібного типу (локальний хаб), який виконує функцію перерозподілу потоку трафіку від центрального вузла до кінцевих користувачів. Особливість такої системи з'єднання полягає в тому, що потужність сигналу між терміналами розподіляється рівномірно, що забезпечує однакову якість зв'язку між ними. Крім того, приймачі випромінювання можуть мати вузький динамічний діапазон чутливості. Однак при цьому зростає кількість використаного оптоволокна, оскільки від центрального відгалужувача до кожного з терміналів має прокладатися окремий кабель. Якщо термінали розташовані на великій відстані один від одного на довгій трасі, тоді для організації зіркоподібної мережі потрібно набагато більше волокна, ніж для топології шинного типу, яка є найбільш економною з точки зору витрат оптичного волокна. Додавання нового терміналу не збільшує кількість оптичних розгалужувачів, що є безумовно перевагою такої структури, однак оптичний розгалужувач потрібно буде замінити на інший з більшою кількістю полюсів. У

зіркоподібній мережі пошкодження кабелю гілки, що з'єднує термінал з відгалужувачем, перериває зв'язок із цим терміналом, проте вихід із ладу самого зіркоподібного відгалужувача перериває потік даних до всіх терміналів.

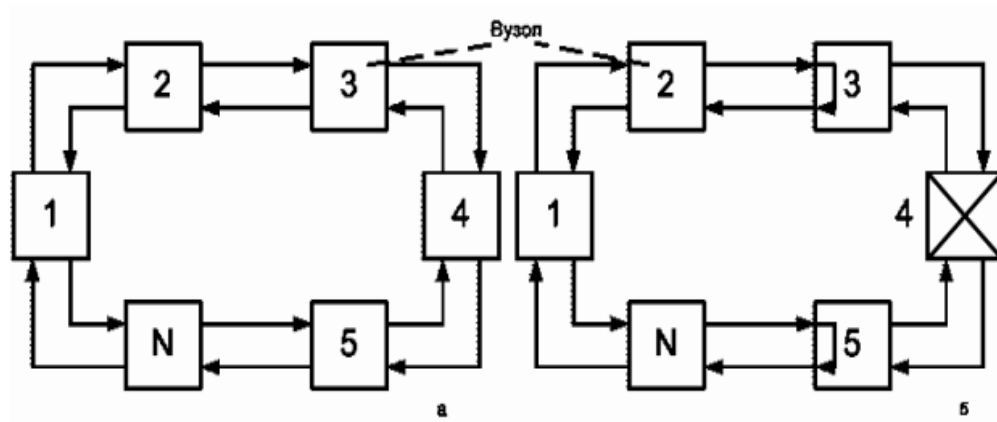


Рисунок 22 – Структурна схема двонаправленого кільця: а – вихідна конфігурація, б – реконфігурована мережа при пошкодженні вузла 4

В кільцевій мережі (рис.21, в) термінали послідовно ввімкнені за допомогою оптичних розгалужувачів в замкнене кільце, з якого термінал отримує призначені для нього сигнали та вводить свій сигнал. В кільце такої системи може бути ввімкнений оптичний комутатор, в такому разі система називається активним кільцем, система без оптичного комутатора – пасивне кільце. Саме до комутатора може під'єднуватися декілька кільцевих мереж і створювати тим самим розгалужену коміркоподібну структуру. Функцією вузла є регенерація сигналу. Як тільки приймальний пристрій виявляє передане повідомлення, воно перетворюється до електричного еквіваленту, дані відновлюються (регенеруються), перетворюються в оптичний сигнал і передаються на наступну станцію. У кільцевій мережі потужність з будь-якого оптичного передавального пристрою потрапляє тільки на один приймальний пристрій. На відміну від шинної і зіркоподібної мереж в такій топології немає розподілу оптичної потужності між окремими терміналами. З цієї причини топологія “кільце” може зв'язати більшу кількість терміналів, ніж будь-яка з

описаних вище конфігурацій мереж, тобто кільце не обмежене втратами в пристроях розподілу. При цьому активні вузли кільцевої мережі значно складніші, ніж пасивні вузли шинної і зіркоподібних мереж. Якщо будь-який вузол у кільці виходить із ладу, то це викликає перерив зв'язку всієї мережі. Система також перестане працювати при пошкодженні будь-якого із сегментів волокна у кільці.

Модифікація однонаправленого кільця у двонаправлене (подвійне кільце) може вирішити цю проблему (рис.22). У другому кільці інформація передається в зустрічному напрямку. У звичайному режимі функціонує тільки основне кільце. Проте коли вузол або волокно виходить з ладу, мережа модифікується так, що інформація передається по кільцю, з якого виключений один або кілька сегментів. На рис. 22 показано шлях сигналу в ситуації, коли сталося пошкодження вузла 4 і мережа реконфігурувалася. Однак, зрозуміло, що в такій мережі більші витрати на оптичний кабель.

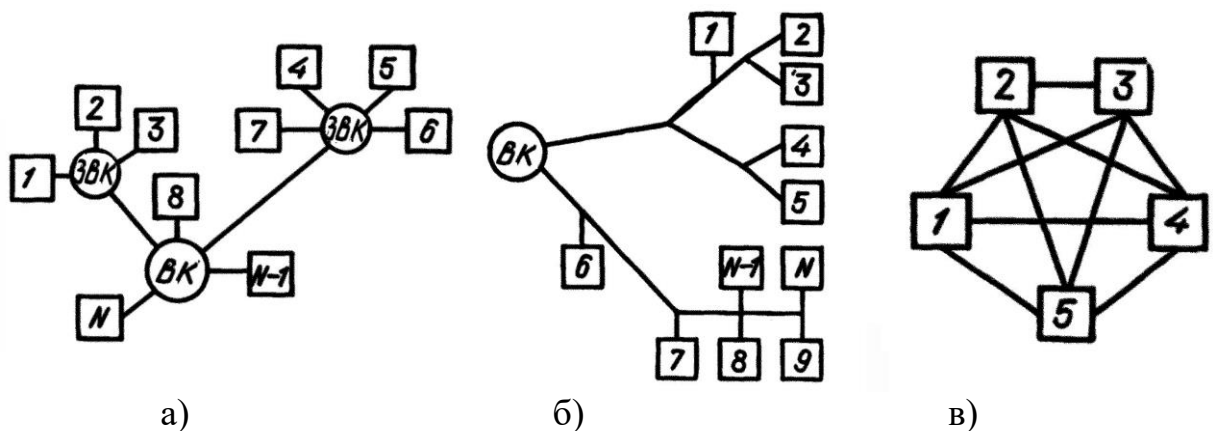


Рисунок 23 – Різновиди базових топологій мереж ВОСПІ: топологія “сота” (а), топологія “дерево” (б), топологія “кожна з кожною” (в)

Реальні мережі ВОСПІ будуються на основі комбінацій з базових топологій, що забезпечує системі гнучкість при розробці багатотермінальних систем (рис.23). Як видно з наведеного рис.23, а топологія “дерево” є комбінацією топологій “шина” та “зірка”. Розгалуження сигналу здійснюється

за допомогою деревовидного та зіркоподібного оптичного розгалужувача. При цьому по топології “зірка” з’єднуються близько розміщені термінали, а по топології “шина” – більш віддалені термінали. Топологія “сота” є комбінацією декількох топологій “зірка” (рис.23,б). В такій топології здійснюється децентралізована комутація, тобто кінцеві термінали з’єднуються з центральним вузлом комутації не безпосередньо, а через допоміжні вузли комутації, що дає значну економію в кількості використаного оптоволокна. Найбільший ступінь надійності функціонування мережі ВОСПІ у випадку виходу з ладу якоїсь її частини забезпечує топологія “кожна з кожною” (повнозв’язна мережа). В такому варіанті топології кожний вузол пов’язаний з кожним. Зрозуміло, що вартість та складність такої системи є найвищою.

Контрольні запитання

1. Які види комутаційних елементів ВОСПІ Ви знаєте?
2. Порівняйте між собою оптичні коннектори та оптичні зростки з точки зору якості монтажу оптоволоконних мереж. Які з цих оптичних з’єднувачів використовують для локальних, регіональних та магістральних мереж?
3. В чому полягає відмінність оптичних розгалужувачів від мультиплексорів/демультиплексорів?
4. Опишіть технологію виготовлення планарних та сплавних оптичних розгалужувачів.
5. Порівняйте деревовидну та зіркоподібну топологію оптичних розгалужувачів. Вкажіть області використання кожної з них.
6. З яких етапів складається розробка мереж ВОСПІ? Що таке оптичний бюджет лінії?
7. Які фактори впливають на вибір архітектури мереж ВОСПІ?

8. Опишіть особливості топології мереж “шина”.
9. Опишіть особливості топології мереж “зірка”.
10. Опишіть особливості топології мереж “кільце”.
11. Яким є принцип роботи топології мережі “двонаправлене кільце”?
12. Порівняйте топологію “сота”, “дерево” та “кожна з кожною”. З яких простих топологій вони складаються?
13. Яка з топологій мереж ВОСПІ забезпечує мінімальне споживання оптоволокна під час монтажу?
14. Яка з топологій мереж ВОСПІ забезпечує максимальну надійність функціонування системи?
15. Яка з топологій мереж ВОСПІ забезпечує максимальну допустиму кількість терміналів?

РОЗДІЛ 7.

Оптоелектронні обчислювальні системи

7.1. Переваги оптичного способу обробки інформації. Оптична обробка інформації давно привертає увагу дослідників у всьому світі. Дійсно, не дивлячись на всі досягнення в галузі системотехніки, архітектури та елементної бази НВІС, сучасні обчислювальні системи характеризуються значними труднощами у збільшенні їх продуктивності. Підвищення продуктивності ЕОМ та мереж на їх основі є можливим лише при використанні паралельних алгоритмів обробки інформації. Для цього на сьогоднішній день використовуються лише електронні підходи. Відомо, що тактова частота сучасних процесорів майже не змінюється, натомість з'явилась багатоядерна технологія виготовлення процесорів – 2, 4, 8 та 16 ядерні процесори. Тобто виробники пішли по шляху розпаралелювання обчислень. Однак для 16-ядерного процесора виробники зіштовхнулись з обмеженнями, які накладаються традиційною архітектурою, а саме: до цих пір основою комунікації окремих блоків чипу становила шина. Поки елементів було не багато, вона цілком справлялась з передачею даних. Однак при зростанні кількості ядер, така архітектура вичерпала себе. За такої архітектури при зростанні кількості ядер нівелюються всі переваги паралельної обробки інформації.

Інженери запропонували новий підхід в проектуванні процесора – побудова мережі з комутацією пакетів – Network on Chip (NoC), яка функціонує подібно мережі Інтернет. В архітектурі NoC кожне ядро чи блок процесора з'єднане з маршрутизатором, через який відбувається обмін даними між різними блоками одночасно. Однак розробки такої архітектури ще тривають і поки що не набули масового поширення.

Ефективна реалізація паралельних алгоритмів у обробці інформації можлива також завдяки використанню оптичних підходів, які покладені в основу роботи оптичного комп'ютера. Оптичний комп'ютер – це система обробки інформації за допомогою квантів світла (фотонів), що дозволяє досягнути більшої продуктивності обчислень. Взагалі до переваг оптичних технологій в галузі обчислювальних систем слід віднести наступні:

1. Можливість реалізації паралельних алгоритмів у обробці інформації, тобто передача зображення (відео-інформації) за один світловий промінь, що значно збільшує продуктивність обчислень.
2. Обробка інформації здійснюється по мірі проходження її по оптичному обчислювальному середовищі, така побудова архітектури оптичної обчислювальної системи дає змогу значно підвищити швидкодію.
3. Оптична система не дозволяє перехоплювати інформацію, яка в ній поширюється, оскільки відсутній витік інформації у навколишній простір, що забезпечує високий ступінь конфіденційності під час обробки інформації.
4. Можливість використання прозорих матеріалів, що дає змогу обробляти інформацію в них з мінімальними витратами енергії.

Серед обчислювальних систем останніх років зросла частка таких, що обробляють двовимірну чи тривимірну інформацію, зокрема зорові образи. Однак за існуючих способів обробки таку інформацію розкладають в часові ряди, що потребує значного часу. Оптичний комп'ютер може вести паралельну обробку такої інформації, оскільки прилади оптики отримують образ цілком і не потребують його перетворення в часовий ряд для наступної цифрової обробки.

7.2. Види оптичних обчислювальних систем. Всі оптичні обчислювальні системи можна умовно розбити на три групи.

1. *Системи цифрової обробки часових залежностей.* В таких системах напівпровідникові логічні елементи та металеві між'єднання заміняють на

оптичні логічні елементи і оптичні волокна відповідно. Однак з точки зору архітектури та логіки обробки інформації такі схеми не відрізняються від звичайних ІС з тією лише відмінністю, що всі операції здійснюються в оптичній формі. Тобто є вииграш в швидкодії обробки інформації, оскільки всі операції та поширення сигналів здійснюється зі швидкістю світла, однак при аналізі двовимірної чи тривимірної інформації не має значного виграшу, бо не забезпечується паралельність її обробки.

2. Системи паралельної аналогової обробки. В таких системах інформація про об'єкт надходить в систему у вигляді образу шляхом опромінення його лазерним світлом, а далі обробляється за допомогою відомих аналогових пристроїв оптики – лінзи, яка дає Фур'є-образ вхідного зображення, з яким потім просто можна виконувати різноманітні математичні операції, оптичні модулятори, що здійснюють геометричну обробку образу (зсув, поворот, масштабування), оптичні розгалужувачі та комутатори, що здатні перерозподіляти оптичні сигнали селективно чи неселективно, оптичні підсилювачі та оптична пам'ять. Переваги таких систем – можливість оперування образами та висока швидкодія, відносна простота реалізації. Недоліки – нелінійність та наявність значного впливу завад.

3. Системи паралельної цифрової обробки. Відмінність такого класу систем від попереднього полягає в тому, що вище перелічені елементи для обробки образів збираються у окремі блоки, що містять двовимірні логічні елементи типу АБО, І, НІ. Вхідний образ після кожного етапу обробки порівнюють з базовими образами згідно програми. Проміжні результати в очікуванні наступного етапу обробки зберігають в оптичній бістабільній пам'яті. Такі системи поєднують високу швидкість паралельної обробки оптичних сигналів з високою точністю бітової обробки інформації. Недоліком є більша складність в реалізації.

Якщо розглянути сучасні ком'ютери та мережі на їх основі, то можна бачити, що багато їх елементів вже є оптичними, тобто працюють з оптичними сигналами. Отже, що є оптичного в сучасних ПК? Пристрої введення інформації – оптичний сканер, оптична миша. Обмін інформації здійснюється через ІЧ порт чи волокно. Пристрої виведення інформації – лазерний пристрій, дисплей, голографічний дисплей. Пам'ять – оптичні диски, магнітооптичні диски, голографічні диски. Однак не вистачає основного компонента для створення повністю оптичного комп'ютера – оптичного процесора. Розробки оптичних процесорів ведуться у всьому світі, розроблено перші прототипи і навіть один такий процесор випущено для масового продажу. Оптичні процесори використовують для задач моделювання та прогнозування у військовій галузі, робототехніці, обробки відеоінформації в реальному часі, наприклад, у дослідженнях природних ресурсів Землі з космосу тощо.

Оптичні процесори класифікують за декількома ознаками. За типом поширюваних сигналів – аналогові та цифрові, за типом використовуваних компонентів – повністю оптичні чи гібридні.

7.3. Аналоговий оптичний процесор. В основі роботи аналогових оптичних процесорів лежить той факт, що хвильовий фронт потоку випромінювання, проходячи через лінійну оптичну систему, підлягає інтегральному перетворенню в координатному просторі. В загальному випадку діє відомий інтеграл суперпозиції:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x_1, y_1) h(x_2, y_2, x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (47)$$

де $g_1(x_1, y_1)$ та $g_2(x_2, y_2)$ – вхідний та вихідний оптичний сигнал або що те саме функції розподілу поля в площині вхідної та вихідної апертури, $h(x_2, y_2, x_1, y_1)$ – передавальна функція системи, яка у випадку лінійної системи називається ще імпульсним відгуком системи і фізично представляє собою вихідне зображення,

що формується точковим вхідним джерелом. Фізичний зміст цього інтегралу полягає в тому, що поле в будь-якій точці на виході формується як результат суперпозиції елементарних сферичних хвиль, що поширюються від кожної точки поверхні вхідного вікна системи.

При осьовій симетрії лінійної системи (сферична лінза, набір круглих діафрагм тощо), а також її інваріантності в просторі має місце двовимірне перетворення Фур'є вхідної функції:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x_1, y_1) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx_1 dy_1 \quad (48)$$

де f_x, f_y – просторові частоти. Іншими словами, зображення на виході такої системи являє собою двовимірний Фур'є-образ функції її пропускання.

Якщо випромінювання є когерентним, то вхідна та вихідна функції у виразі (48) описуються комплексними функціями, які ще називаються комплексними амплітудами когерентного світлового поля, в яких дійсна частина несе інформацію, закладену в амплітуду світлової хвилі, а дійсна функція уявної частини – описує інформацію, закладену у фазі хвилі. У випадку обробки некогерентних потоків вхідний сигнал описується не комплексною, а дійсною функцією, що характеризує розподіл інтенсивності світлової хвилі. Тобто система з некогерентним потоком випромінювання передає лише амплітудну інформацію, фазова інформація втрачається.

Комбінуючи оптичні елементи з різними імпульсними відгуками, можна отримати інші види інтегрального перетворення, зокрема множення комплексних функцій, яке у вихідній площині еквівалентно згортці двох функцій.

Оскільки в оптичному аналоговому процесорі обчислення здійснюються над хвилями вони називаються ще хвильовими процесорами. Його основними блоками є: вхідний та вихідний пристрій, обчислювач та допоміжні пристрої.

Вхідний пристрій оптичного процесора може бути різним в залежності від того, в якій формі приходять сигнали на вхід – оптичний чи електричний. Якщо обробці підлягає оптичний образ, то вхідний пристрій складається з об'єктива (для масштабування зображення та координатної прив'язки) та оптично керованого транспаранта (для підсилення, перетворення некогерентної хвилі в когерентну). При цьому лазер, який керує транспарантом, є допоміжним пристроєм. Якщо ж на вході діють електричні сигнали, то вони попередньо перетворюються в оптичну картину одним з двох способів: за допомогою електрично-керованого транспаранта або шляхом безпосередньої поелементної модуляції багатоеlementного випромінювача (матриця лазерів чи світлодіодів).

Обчислювач представляє собою комбінацію оптичних елементів – лінз, пластин, фотографічних та голографічних фільтрів, а також керованих транспарантів, що реалізують структури зі змінним імпульсним відгуком. У вихідному пристрої об'єктив фокусує перетворену хвилю на матрицю фотоприймачів, забезпечуючи тим самим електричну форму вихідних сигналів.

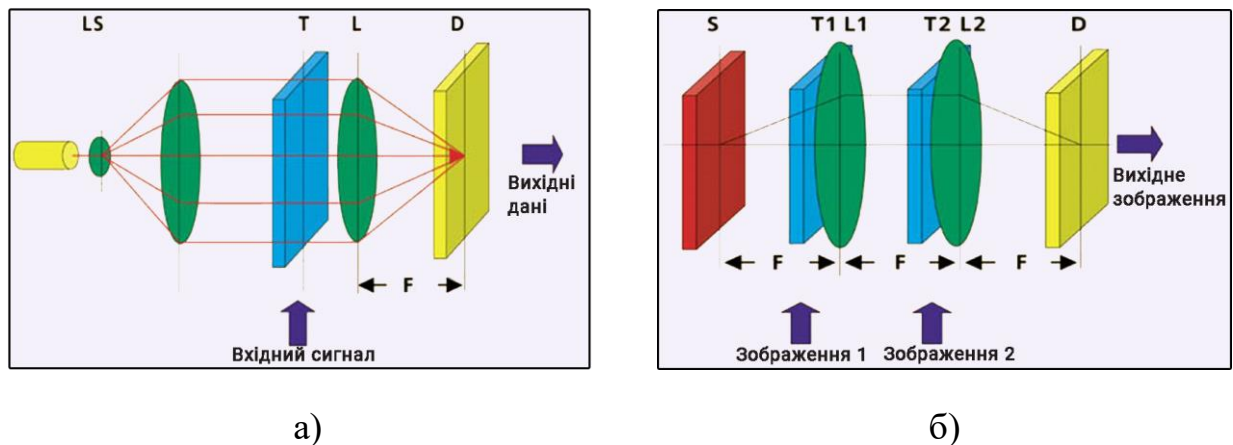


Рисунок 24 – Схема оптичного процесора, що здійснює формування Фур'є-спектру двовимірного сигналу (а) та операцію згортки двох зображень (б)

В найпростішому випадку обчислювач такої системи складається з однієї лінзи, яка власне здійснює двовимірне перетворення Фур'є, при цьому всі інші

елементи – це вхідні та вихідні пристрої та система освітлення (рис.24, а). Для електронного ПК тривалість виконання Фур'є-перетворення збільшується з ростом кількості точок дискретизації пропорційно $n \log(n)$. В оптичному комп'ютері ця процедура виконується за один машинний такт. На рис.24,б показана схема процесора, що виконує операцію згортки двох зображень, що подаються на транспаранти.

Аналогові оптичні процесори є перспективними в системах обробки зображень та просторової фільтрації, розпізнавання образів та кореляційної обробки сигналів.

До основних переваг аналогових оптичних процесорів відносять паралельність введення інформації та практично миттєву її обробку. Ці переваги є панівними, коли на вхід системи потрапляють масиви інформації, особливо двохвимірні, а їх обробка має вестись в реальному часі. Разом з тим такі пристрої мають ряд недоліків, зокрема вони придатні для виконання лише обмеженої кількості операцій та характеризуються низькою точністю, що обумовлено шумами різної природи (наприклад, аббераціями оптичних елементів), а також висока потенційна швидкість власне обчислювача обмежується можливостями пристроїв введення-виведення. Ці недоліки мають принциповий характер, тому обумовлюють обмежене поширення аналогових оптичних процесорів.

7.4. Цифровий оптичний процесор. В цифрових оптичних обчислювальних системах отримала розвиток ідея картинної логіки, тому такі пристрої ще називають піктографічними обчислювальними пристроями. Цифрові оптичні процесори в загальному випадку являють собою набір керованих транспарантів, що об'єднані в єдину оптичну систему. На основі таких наборів можуть виконуватись стандартні логічні операції (І, АБО, НІ, АБО-НІ, І-НІ тощо).

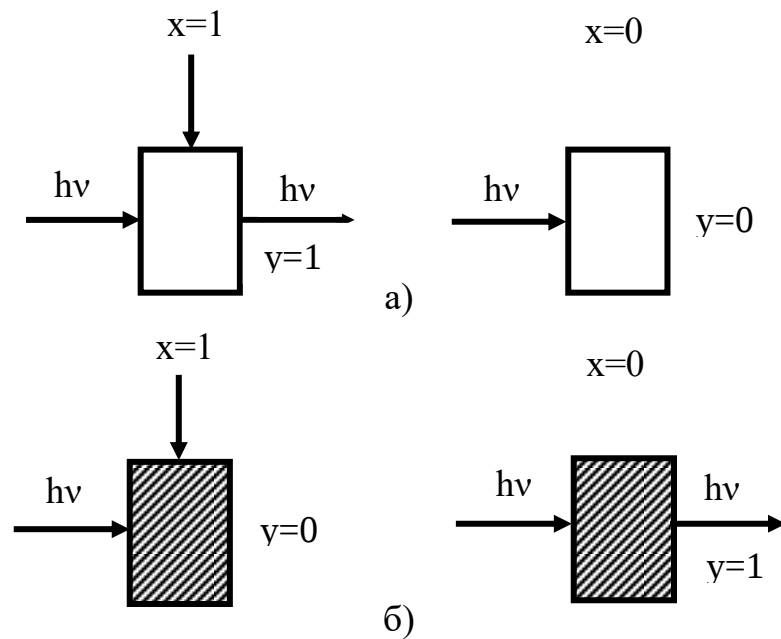


Рисунок 25 – Різновиди найпростіших оптичних логічних елементів:

T-елемент (а) та $\bar{T}$ -елемент (б)

Найпростішими оптичними елементами, на яких будується логіка, є T-елемент та $\bar{T}$ -елемент (рис.25). T-елементом позначається оптичний елемент, який пропускає світло ($y=1$) за наявності сигналу керування на вході ($x=1$). Відповідно в такому елементі на виході сигнал відсутній (світло не пропускається), якщо сигнал керування відсутній. Графічно такий елемент позначається незаштрихованим прямокутником. В $\bar{T}$ -елементі світло проходить ($y=1$) за відсутності сигналу керування ($x=0$). Графічно такий елемент позначається заштрихованим прямокутником. За допомогою цих найпростіших елементів можна реалізувати будь-яку логічну функцію, як це показано на рис.26.

Якщо оптичний сигнал проходить послідовно через керовані T-елементи, то реалізується операція логічного множення I (рис.26, а). Дійсно, світло на виході такої логіки буде, якщо сигнал керування є і на першому вході, і на другому вході.

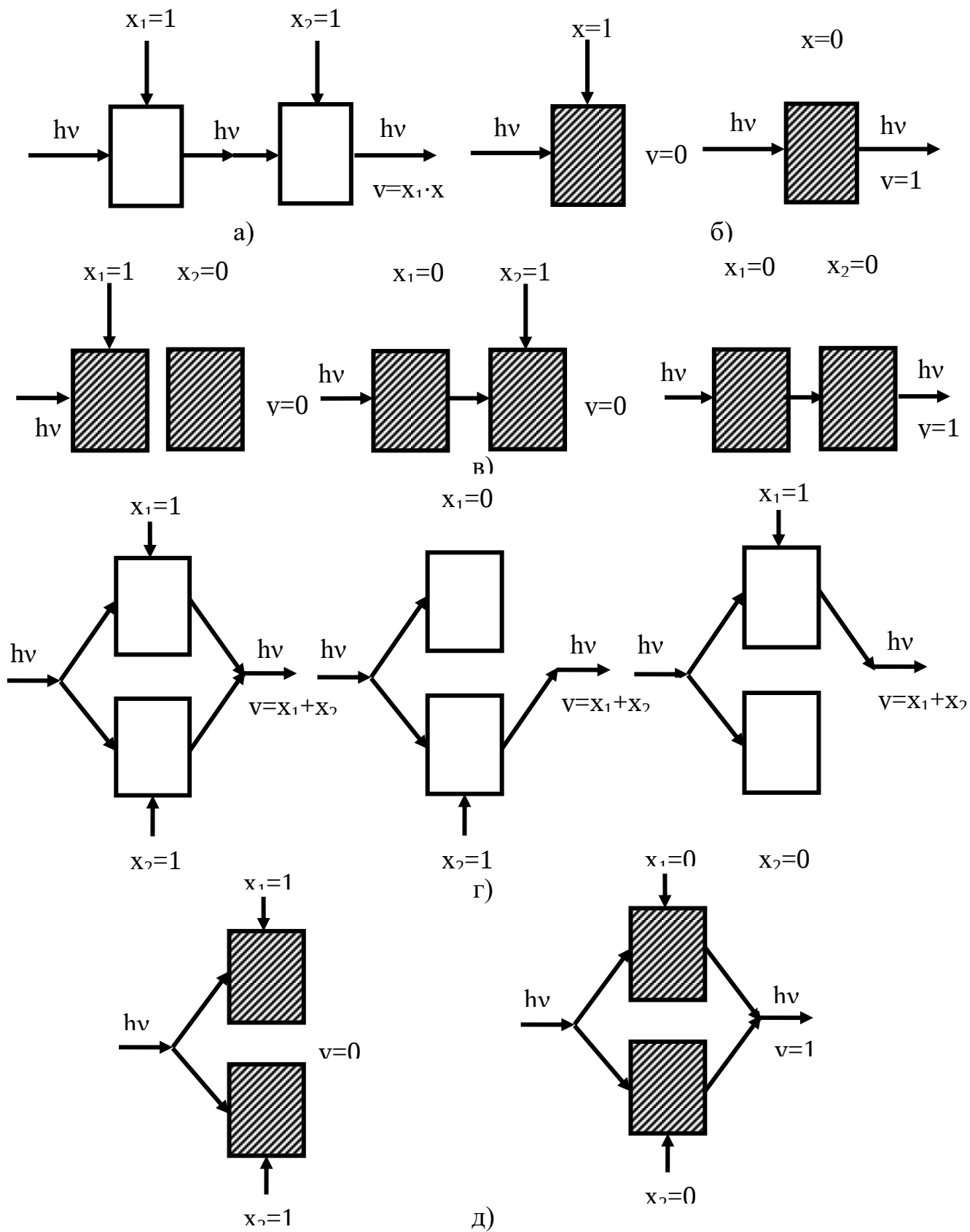


Рисунок 26 – Реалізація логічних функцій на оптичних елементах:

а) І, б) ІІ, в) АБО-ІІ, г) АБО, д) І-ІІ

Для виконання операції логічного додавання (функція АБО) Т-елементи з'єднують паралельно (рис.26, в). Тобто світло на виході буде, якщо сигнали керування поступатимуть або на перший, або на другий Т-елемент, або на обидва. Операція інверсії (НІ) виконується за допомогою одного $\bar{T}$ -елемента (рис.26, б).

Якщо два $\bar{T}$ елемента ввімкнені паралельно, то реалізується операція І-НІ, що називається штрих Шеффера (рис.26, д). Світло на виході буде за умови відсутності сигналів керування на обох входах, і навпаки буде відсутнє за присутності сигналів керування на обох входах.

Якщо два Т-елемента ввімкнені послідовно, то реалізується операція АБО-НІ (стрілка Пірса) (рис.26, г). Світло на виході відсутнє, якщо є сигнал керування на одному чи на другому вході. Фізично в якості логічних Т- та $\bar{T}$ елементів можуть використовуватись комірки матричних транспарантів, в яких керування здійснюється електричними чи оптичними сигналами. Важливою перевагою транспарантів є можливість здійснювати обробку інформації по багатьом каналам одночасно, тобто паралельно.

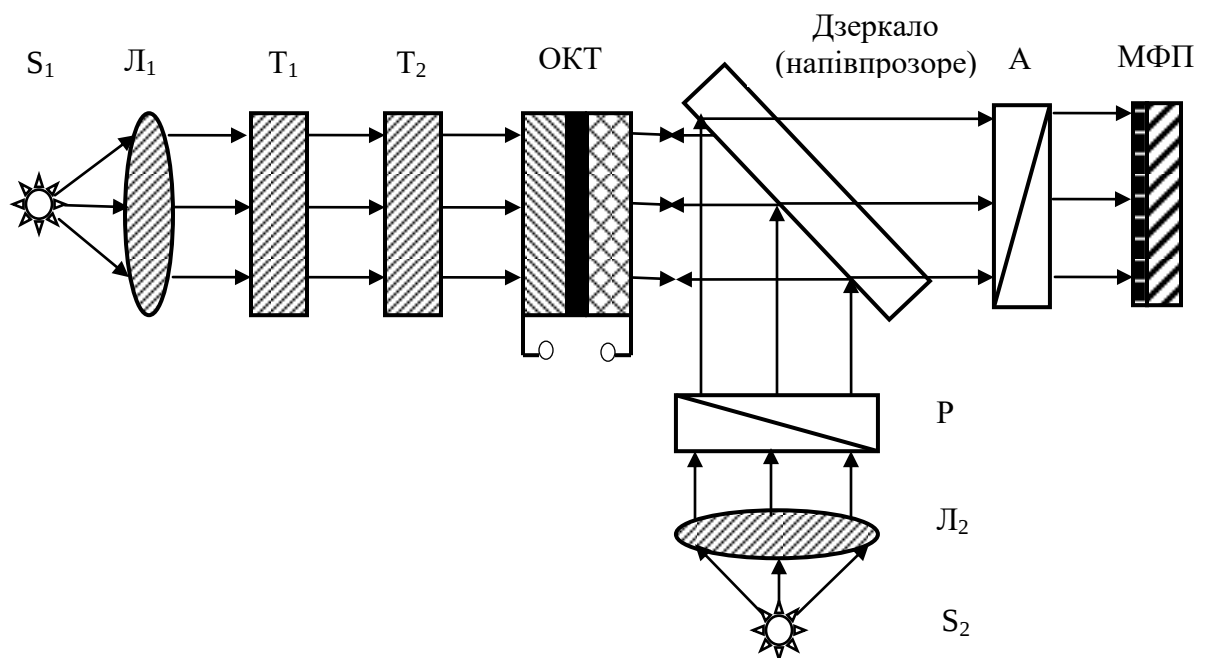


Рисунок 27 – Схема цифрового оптичного процесора на основі трьох матриць

Один із варіантів оптоелектронного цифрового процесора наведено на рис.27. Структурна схема найпростішого оптоелектронного процесора складається з наступних компонентів: транспаранта для відтворення вхідного зображення (масиву вхідної інформації), другого транспаранту для відтворення другого зображення, третього транспаранту для інтегрування зображень, матриці фотоприймачів для запису результату обчислення, а також системи оптичних елементів для геометричного керування оптичними променями (лінзи, аналізатори, поляризатори тощо). Принцип дії такого процесора полягає в наступному. Світло від дифузного джерела, проходячи через лінзу Л1, складається з паралельних променів, що подаються на перший транспарант T_1 . Даний транспарант являє собою матрицю логічних оптичних елементів, розглянутих вище, працює на просвіт і формує вхідний масив даних. Звідси світло подається, якщо цього вимагає логіка обчислення, на другий транспарант T_2 , в якому формується друге зображення і який також працює на просвіт. І нарешті результат обчислення двох масивів даних з двох транспарантів фіксується в оптично керованому транспаранті (ОКТ), який працює на відбивання. Даний транспарант крім того, що має мати пам'ять, повинен бути здатним перетворювати позитивне зображення в негативне і навпаки при зміні напруги. За оптично керованим транспарантом розташовується схема зчитування інформації і передача її на матрицю фотоприймачів. Зчитування інформації здійснюється променем I_0 за допомогою схрещених поляризатора та аналізатора оптичного випромінювання.

Якщо записати на ОКТ задане першим транспарантом T_1 зображення, а далі не знімаючи напруги, записати туди ж друге зображення з цього самого першого транспаранта T_1 , то при зчитуванні світлими виявляться ті місця ОКТ, на які потрапляє вхідний сигнал при проектуванні першого або другого, чи першого і другого зображення. Таким чином, виконується операція додавання двох зображень, тобто операція АБО.

Для реалізації операції множення двох зображень необхідно на шляху вхідного сигналу за першим транспарантом розмістити другий транспарант T_2 . Якщо зображення з двох транспарантів записати на ОКТ одночасно, то світло на ОКТ потрапить лише в ті місця, напроти яких розташовані прозорі елементи і першого, і другого транспаранту, що і потрібно для реалізації функції І. Операція віднімання зображень реалізується, якщо після запису одного зображення при певній напрузі записати друге зображення при тій самій напрузі протилежного знаку, використовуючи один і той самий транспарант. При цьому відбувається взаємне витирання зображень в тих місцях ОКТ, на які потрапило світло при проектуванні і першого, і другого зображення.

Змінюючи послідовність запису зображень та режим живлення ОКТ, можна виконувати будь-які перетворення над зображеннями.

Для найпростішого оптоелектронного процесора на трьох матрицях розмірністю 128×128 елементів при паралельному порядковому введенні-виведенні інформації продуктивність може досягати величини 10^{10} операцій/с, а при паралельному покадровому введенні-виведенні інформації через матриці розмірністю 1000×1000 елементів, продуктивність досягає значно більшої величини – 10^{14} операцій/с. Крім того, безумовними перевагами цифрових обчислювачів є їх висока точність обчислень, висока надійність та завадостійкість.

7.6. Гібридні оптичні процесори. Вище були розглянуті повністю оптичні процесори, в яких і обчислення, і поширення сигналів між окремими блоками здійснюється в оптичній формі. В гібридних оптичних процесорах певна частина операцій виконується в електричній формі. Наприклад, введення-виведення інформації здійснюється в електричній формі, а обчислення в оптичній (процесор EnLight 256) або з'єднання між окремими блоками в процесорі реалізовано за допомогою оптичних з'єднувачів (нанооптичний трансмітер IBM).

В електронно-оптичному чипі IBM вдалося реалізувати оптичні з'єднання між блоками процесора, використовуючи стандартну 90-нм технологію. Дослідний зразок містить 50 трансмітерів, що працюють паралельно, кожен з них передає чи приймає дані зі швидкістю 25 Гбіт/с, загальна пропускна здатність 1,25 Терабіт/с. Такі пристрої будуть потрібні при створенні так званих суперкомп'ютерів, де ставляться високі вимоги до пропускної здатності каналів зв'язку між обчислювальними вузлами. На рис.28 показана концепція використання оптичних ліній зв'язку в системах класу Network-on-chip (NOC), які стають все більш актуальними з ростом кількості процесорних ядер та переміщення все більшої кількості пристроїв на один кристал з процесором. Як видно з рис.28, в такому чипі реалізовано 3D архітектуру, де на нижньому ярусі знаходяться окремі ядра процесорів, на проміжному – пам'ять, а на верхньому реалізовано оптичний зв'язок між блоками на основі використання фотонних кристалів.

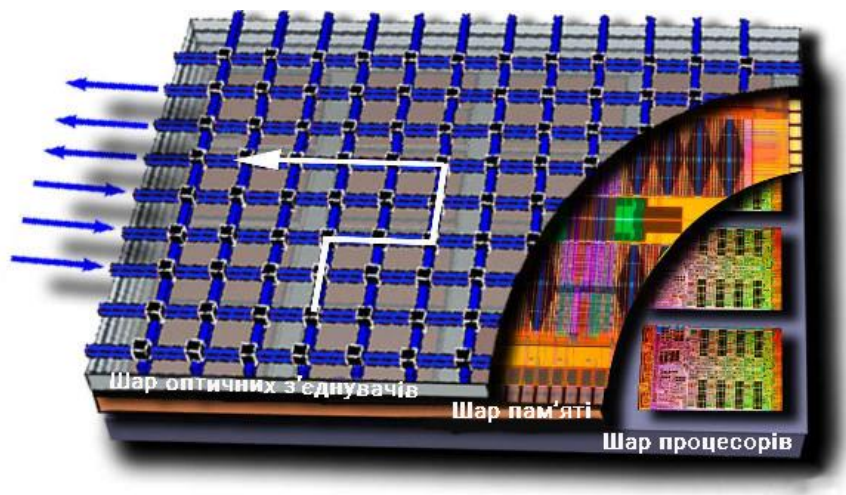


Рисунок 28 – Концепція використання оптичних ліній зв'язку в системах класу Network-on-chip (NOC) від IBM Corporation

Розглянемо структуру та принцип дії першого і поки що єдиного комерційного оптичного процесору гібридного типу, який є у продажу – EnLight256 (Lenslet). Даний процесор є цифровим оптичним процесором

гібридного типу. В даному пристрої має місце заміна електронного ядра на оптичне, а всі інші компоненти є електричними. Даний пристрій містить оптоелектронні перетворювачі, бо вхідна та вихідна інформація подається в електронному виді. Ядро складається з 256 вертикально випромінюючих лазерів (VCSEL – Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers). Тобто лазерів, що випромінюють світло у напрямку, перпендикулярному поверхні кристали на відміну від звичайних лазерів, які випромінюють у площині, паралельній поверхні. Крім VCSEL оптичне ядро такого процесора містить просторовий модулятор світла, набір лінз та приймачів світла.

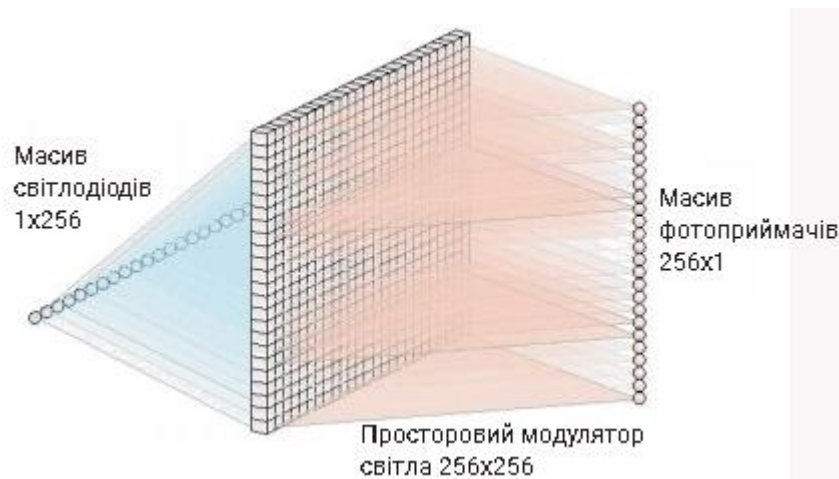


Рисунок 29 – Принцип виконання множення вектора на матрицю в оптичній матриці VMM – ядра гібридного оптичного процесора EnLight256

Ядром гібридного оптичного процесора EnLight256 є оптична матриця VMM (Vector-Matrix Multiplication), в якій здійснюється множення вектора на матрицю. Спершу ядро процесора конвертує електричні сигнали в оптичні. Далі здійснюються необхідні обчислювальні операції під час проходження світла крізь програмовану внутрішню оптику. Світло на виході реєструється фотоприймачами. Оптична матриця складається з трьох основних елементів: 256 вертикально випромінюючих лазерів, що з точки зору логіки представляють собою вектор, і які фізично здійснюють перетворення електричного сигналу в

оптичний; просторового модулятора (Spatial Light Modulator, SLM), що складається з 256×256 піксельних модуляторів, розташованих на одному чипі, що з точки зору логіки представляють собою матрицю, а фізично виконують обчислювальні операції над сигналами; стовбець з 256 фотоприймачів, що здійснює перетворення оптичних сигналів в електричні. Кожний елемент вхідного вектора проектується на стовбець матриці. Кожний ряд матриці проектується на один приймач у стовбці приймачів. Отже, виведення стовбця приймачів є вектор-результатом роботи матриці. Програмування такого оптичного процесора зводиться до зміни значень, які зберігаються в SLM.

Продуктивність процесора є надзвичайно високою і становить 8 триліонів операцій за секунду, бо за один такт тривалістю 8 нс він здійснює операцію множення рядка з 256 елементів на матрицю 256×256 . Можна навести дві сфери використання даного процесора – військова галузь (наприклад, розрахунок кута відхилення ракети під час польоту в реальному часі, для систем безпеки в аеропорту) та мультимедійна галузь (наприклад, обробка відео (компресія відео потоку в реальному часі з якістю HDTV)).

Контрольні запитання

1. Яким чином реалізується процедура паралельної обробки інформації в сучасних обчислювальних системах?
2. Назвіть переваги оптичного способу обробки інформації для створення обчислювальних систем.
3. Які види оптичних обчислювальних систем Ви знаєте? Наведіть їх порівняльну характеристику.
4. Назвіть принцип дії аналогового оптичного процесору. Чому його називають хвильовим процесором?

5. Опишіть схему оптичного процесора, що здійснює формування Фур'є-спектру двовимірного сигналу.
6. Опишіть схему оптичного процесора, що здійснює операцію згортки двох зображень.
7. Перелічіть переваги та недоліки аналогового оптичного процесору.
8. Назвіть принцип дії цифрового оптичного процесору. Чому його називають піктографічним процесором?
9. Назвіть два найпростіших оптичних елемента, на яких базується робота оптичних логічних схем. Що ці елементи являють собою на фізичному рівні?
10. Зобразіть графічно реалізацію стандартних логічних функцій (І, НІ, АБО, І-НІ, АБО-НІ) на оптичних елементах?
11. Опишіть схему та принцип дії цифрового оптичного процесора на основі трьох матриць керованих транспарантів.
12. Яким чином потрібно проводити запис інформації в матриці керованих транспарантів, щоб процесор виконував стандартні логічні функції (І, НІ, АБО, І-НІ, АБО-НІ)?
13. Перелічіть переваги та недоліки цифрового оптичного процесору.
14. Що собою являють гібридні оптичні процесори? Назвіть їх особливості порівняно з оптичними та електронними процесорами.
15. Наведіть структуру та принцип дії оптичного процесору гібридного типу EnLight256. Що таке просторовий модулятор?

РОЗДІЛ 8.

Оптоелектронні системи розпізнавання образів

8.1. Основні поняття та класифікація систем розпізнавання образів.

Однією з найцікавіших властивостей мозку людини є його здатність відповідати на нескінченну множину станів зовнішнього середовища скінченою кількістю реакцій. Завдяки цій властивості інформація про зовнішній світ зберігається в згорнутому стані, що дає можливість збільшити її обсяг для запам'ятовування. Наприклад, одне і теж слово, вимовлене різними особами, має для людини один і той же зміст. Властивість людини відносити низку подібних явищ до одного і того ж поняття називається розпізнаванням. Поняття, яке формується людиною про деяку множину подібних між собою об'єктів зовнішнього світу, називається образом. Розпізнавання полягає в перетворенні вхідної інформації, в якості якої розглядаються деякі параметри, ознаки об'єктів, в вихідну, що являє собою висновок про те, до якого образу відноситься об'єкт, що підлягає розпізнаванню.

Методи розпізнавання образів та технічні системи, що реалізують ці методи, широко використовуються на практиці:

- 1) розпізнавання літер (використовується для переведення інформації на паперовому носії в електронну форму);
- 2) розпізнавання мови (використовується для голосового керування комп'ютером, в тому числі для введення текстів в ПК);
- 3) технічна діагностика деталей на виробництві (для автоматизації контролю якості деталей);
- 4) медична діагностика (автоматична класифікація живих клітин, наприклад, кров'яних тілець, спостережуваних під мікроскопом);
- 5) дактилоскопія (для встановлення особи по відбитках пальців, по папілярному візерунку);

- 6) охоронні системи (для ідентифікації особи з метою допуску/недопуску до об'єкту, що охороняється);
- 7) робототехніка (для роботи машинного зору);
- 8) автоматизовані системи керування автомобілем (для розпізнавання ситуації на дорозі та контроль за управлінням).

Одне з найбільш вдалих формулювань ключової парадигми теорії розпізнавання – будь-який об'єкт у природі є унікальним, всі об'єкти є типізованими. Кожний об'єкт характеризується певними властивостями. Наявність чи відсутність властивостей, а також якісні та кількісні характеристики цих властивостей розглядаються як ознаки об'єкта. Унікальність будь-якого об'єкта означає те, що в природі не існує двох об'єктів, для яких співпадають абсолютно всі ознаки, і це дозволяє, принаймні теоретично, відрізнити один об'єкт від іншого. Але деякі ознаки різних об'єктів можуть співпадати, і це дає підстави говорити про те, що ці об'єкти належать до одного типу, або класу. Об'єкт – це будь-яка сутність, явище або процес. Клас – це сукупність об'єктів, які мають спільні ознаки. Інформативні ознаки дають можливість відрізнити представників одного класу від представників іншого.

Коли з'являється об'єкт, що підлягає розпізнаванню, технічні засоби спостереження здійснюють вимірювання і визначають його ознаки. Ознаковий опис надходить на вхід алгоритма розпізнавання, який порівнює його з еталонами і приймає рішення про його класифікацію. Таким чином, узагальнена схема системи розпізнавання має вигляд, зображений на рис.30.

Розглянемо класифікацію систем розпізнавання (СР) образів. Всі СР поділяються на прості та складні. Прості системи характеризуються єдиною фізичною природою ознак. Наприклад, тільки маса – для систем розпізнавання жетонів в турнікетах метро. Для простих систем розпізнавання не завжди потрібен комп'ютер. Достатньо їх реалізувати у вигляді механічних або електромеханічних пристроїв. Складні СР характеризуються фізичною

неоднорідністю ознак. Наприклад, системи медичної діагностики стану водія, в яких як ознаки можуть використовуватися дані аналізу крові і кардіограма, температура і динаміки кров'яного тиску. Складні СР поділяються на системи без навчання, системи, що навчаються, та системи, що самонавчаються.

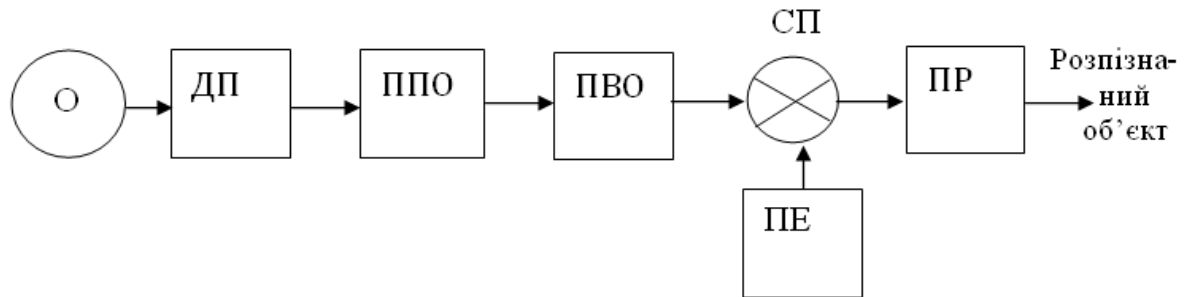


Рисунок 30 – Узагальнена структурна схема системи розпізнавання образів: О – об'єкт; ДП – детектор параметрів об'єкта; ППО – пристрій попередньої обробки параметрів об'єкта; ПВО – пристрій виділення ознак; СП – схема порівняння; ПЕ – пам'ять еталонів; ПР – схема прийняття рішень на розпізнавання

Системи без навчання. Для побудови таких систем необхідно мати у своєму розпорядженні повну початкову апріорну інформацію, якої достатньо для того, щоб визначити апріорний алфавіт класів, побудувати апріорний словник ознак і на основі безпосередньої обробки початкових даних провести опис кожного класу на мові цих ознак.

Системи, що навчаються. У цих системах первинної апріорної інформації достатньо для того, щоб визначити апріорний алфавіт класів і побудувати апріорний словник ознак, але недостатньо для опису класів на мові ознак. Початкова інформація дозволяє виділити конкретні об'єкти, що належать різним класам. Ці об'єкти є навчальними об'єктами. Системи розпізнавання, на своїй стадії формування, працюють з «вчителем», який багато разів пред'являє системі навчальні об'єкти всіх виділених класів і вказує, до яких класів вони належать. Потім «вчитель» починає «екзаменуєвати» систему розпізнавання,

коректуючи її відповіді до тих пір, поки кількість помилок в середньому не досягне бажаного рівня.

Системи, що самонавчаються. У цих системах первинної апріорної інформації досить лише для визначення словника ознак, але недостатньо для проведення класифікації об'єктів. На стадії формування системи їй пред'являють початкову сукупність об'єктів, заданих значеннями своїх ознак, проте через обмежений об'єм первинної інформації система при цьому не одержує вказівок про те, до якого класу об'єкти початкової сукупності належать. Ці вказівки замінюються набором правил, відповідно до яких на стадії самонавчання система розпізнавання сама виробляє класифікацію, яка може відрізнитися від природної.

Відповідно до характеру інформації про ознаки розпізнавання СР підрозділяються на детерміновані; ймовірнісні; логічні; структурні (лінгвістичні); комбіновані, нейромережеві системи.

В детермінованих системах для побудови алгоритмів розпізнавання використовуються «геометричні» інструменти близькості, засновані на вимірюванні відстаней між розпізнаваним об'єктом і еталонами класів. У загальному випадку застосування детермінованих методів розпізнавання передбачає наявність координат еталонів класів в ознаковому просторі. Для розпізнавання в просторі ознак, характерним є те, що кожний об'єкт зображається окремою крапкою в деякому просторі. Координатними осями цього простору виступають ознаки, за якими здійснюється розпізнавання. Таким чином, в якості координат об'єктів виступають значення відповідних ознак. Розпізнавання здійснюється на основі аналізу міри близькості між об'єктами.

В ймовірнісних системах для побудови алгоритмів розпізнавання використовуються ймовірнісні методи розпізнавання, засновані на теорії статистичних рішень. В загальному випадку застосування ймовірнісних методів

розпізнавання передбачає наявність ймовірнісних залежностей між ознаками розпізнаваних об'єктів і класами, до яких ці об'єкти відносяться.

В логічних системах для побудови алгоритмів розпізнавання використовуються логічні методи розпізнавання, засновані на дискретному аналізі. У загальному випадку використання логічних методів розпізнавання передбачає наявність логічних зв'язків, виражених через систему булевих рівнянь, в якій змінні – логічні ознаки об'єктів, що розпізнаються, а невідомі величини – класи, до яких ці об'єкти відносяться.

В структурних (лінгвістичних) системах для побудови алгоритмів розпізнавання використовуються спеціальні граматики, що складаються з пропозицій, кожна з яких описує об'єкти, що належать конкретному класу. Застосування структурних методів розпізнавання вимагає наявності множини пропозицій, що описують всю множину об'єктів, які належать всім класам алфавіту системи розпізнавання. При цьому множина пропозицій повинна бути підрозділена на підмножини по кількості класів системи. Елементами підмножини є пропозиції, що описують об'єкти, що належать даній підмножині (класу).

В комбінованих системах для побудови алгоритмів розпізнавання використовується спеціально розроблений метод обчислення оцінок. Їх застосування вимагає наявність таблиць, де містяться об'єкти, що належать відповідним класам, а також значення ознак, якими характеризуються ці об'єкти. Ознаки можуть бути детермінованими, логічними, ймовірнісними і структурними.

Нейромережіві системи засновані на використанні моделей і методів обчислювальних структур, подібних в деякому розумінні біологічним нейронним мережам. Перевагою цих систем є високі адаптивні і апроксимаційні можливості. У кожному завданні розпізнавання початкові дані є результатом деяких спостережень або безпосередніх вимірювань. Їх називають первинними

ознаками, а сукупність всіх первинних ознак – вхідним сигналом. Результатом одиничного акту розпізнавання є розв’язок, а результатом розв’язку задачі розпізнавання – правило або алгоритм ухвалення рішення, яке визначає відображення множини сигналів на множину рішень.

8.2. Оптичні системи розпізнавання тексту. Всі системи розпізнавання тексту можна умовно поділити на он-лайн та офф-лайн. Он-лайн розпізнавання символів здійснюється під час написання, в той час як офф-лайн метод розпізнавання символів працює зі статичною формою подання тексту.

Перший метод використовується в системах для розпізнавання рукописного тексту «на льоту», наприклад, в пристроях, що ззовні схожі на звичайну авторучку, якими комплектуються персональні помічники чи планшети. Для цього використовуються спеціально розроблені програми, наприклад, PenPoint OS, що включена в операційну систему Windows та Android. Алгоритми таких пристроїв використовують той факт, що порядок, швидкість і напрямки окремих ділянок ліній введення відомі. На фізичному рівні працюють сенсори дотику, інтегровані на екрані таких пристроїв.

В основі другого методу лежить оптичне розпізнавання символів (англ. optical character recognition, OCR), що використовується для розпізнавання друкованого, руко-друкованого та рукописного тексту. Для цього використовуються оптичні сканери та спеціально розроблені програми, наприклад, ABBYY Fine Reader. Основні етапи перетворення документа в електронний вигляд OCR-системами:

1. Сканування зображення.
2. Аналіз структури документа.
3. Розпізнавання.
4. Перевірка результатів.
5. Реконструкція документа.
6. Виведення (експорт) зображення.

Апаратна частина системи OCR. Оптичні системи розпізнавання літер працюють разом зі сканерами. Сканер – пристрій, призначений для створення зображень певних об'єктів шляхом обробки променів, які відбиваються від поверхні об'єкта або проходять крізь об'єкт. При введенні друкованого тексту сканер формує його графічне зображення. Для того, щоб створити текстовий документ, з яким може працювати текстовий редактор, необхідно класифікувати на цьому зображенні окремі літери, тобто здійснити розпізнавання символів.

Найбільш поширеними моделями сканерів є планшетні сканери, в яких сканований об'єкт розміщують на склі планшета сканованою поверхнею вниз (рис.31). Під склом розташовується рухома лампа, її переміщення забезпечує кроковий електродвигун. Світло, відбите від об'єкта, через систему дзеркал потрапляє на лінійку фотоприймачів – ПЗЗ-лінійку. ПЗЗ пристрій є меншого розміру, аніж ширина документа, який сканується, тому потрібно використовувати лінзу для фокусування зображення на поверхні ПЗЗ.

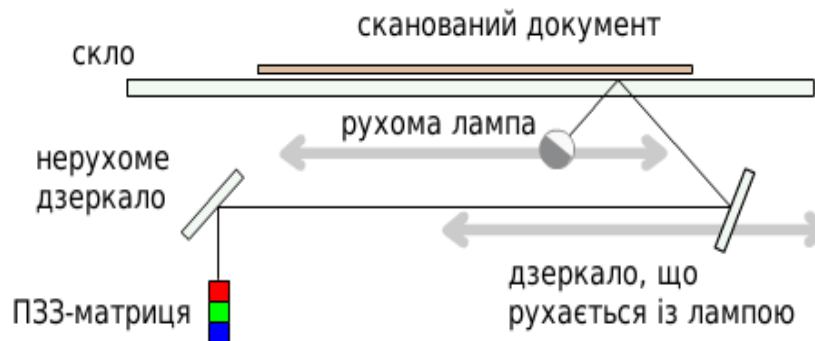
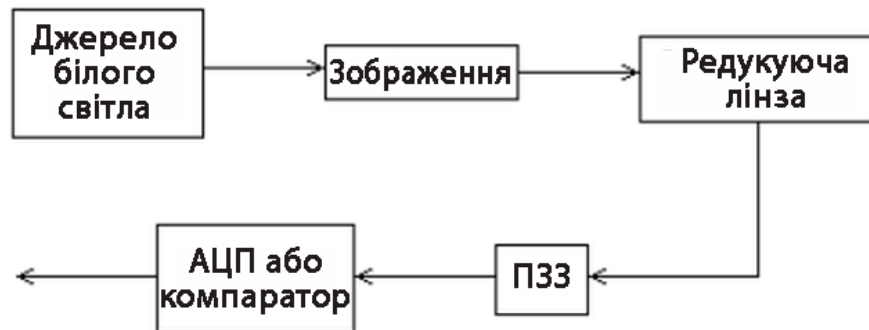


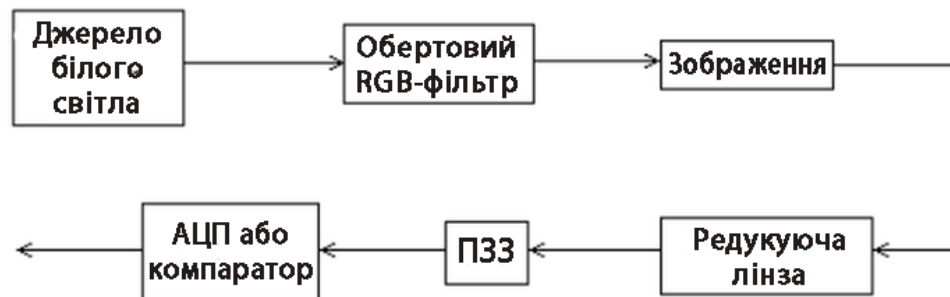
Рисунок 31 – Структурна схема планшетного сканера

Світлі області оригіналу відбивають більше світла, аніж темні. Відбите світло направляється оптичною системою на фотоприймач, який перетворює інтенсивність падаючого світла у відповідне значення напруги. Значення вихідних напруг лінійки фотоприймачів через комутатор подають на АЦП. За кожен крок двигуна сканується одна смужка об'єкта (рядок), що потім поєднується програмним забезпеченням драйвера сканера (TWAIN-модуль) у

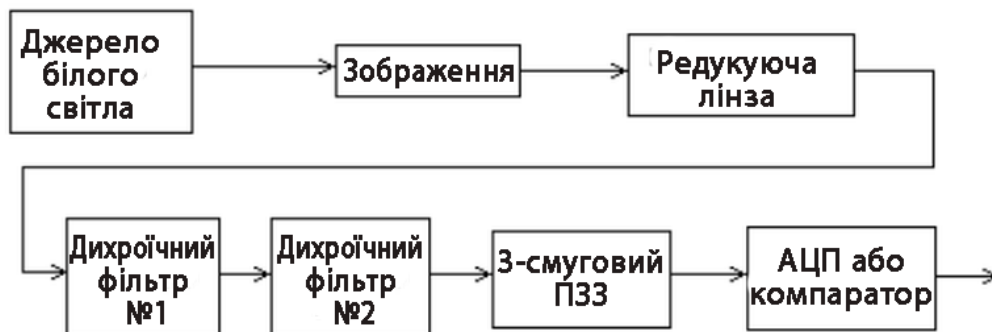
загальне зображення. Лампа, ПЗЗ та оптична система знаходяться на одній каретці та за допомогою крокового двигуна переміщуються вздовж оригіналу. Блок-схема роботи чорно-білого сканера подана на рис.32,а.



а)



б)



в)

Рисунок 32 – Блок-схема роботи різних видів сканерів: чорно-білого (а), кольорового з обертовим RGB-фільтром (б) та кольорового з дихроїчними фільтрами (в)

Кольорові сканери працюють на принципі сумування кольорів, за якого кольорове зображення отримується шляхом змішування трьох кольорів – синього, червоного та зеленого. Існує 2 основні способи технічної реалізації змішування кольорів:

1. При скануванні кольоровий оригінал освітлюється послідовно червоним, синім та зеленим, тобто сканування здійснюється для кожного кольору окремо, а потім обробляється на комп'ютері (рис.32, б). Такий сканер називається трьохпрохідним, оскільки падаюче біле світло за один прохід проходить через один із трьох світлофільтрів, що становлять один обертовий RGB-світлофільтр. Операція сканування для кожного кольору не відрізняється від операції сканування білим світлом при чорнобілому скануванні. Найбільш істотний недолік такого сканера – це зростання часу сканування втричі.

2. В процесі сканування кольоровий оригінал освітлюється білим світлом, а відбите світло потрапляє на ПЗЗ лінійку через систему спеціальних світлофільтрів, що розкладають його на три компоненти – червоний, синій, зелений (рис.32, в). Кожний з цих сигналів реєструється своїм набором фотоелементів. Тобто в такій системі на виході міститься три лінійки ПЗЗ з однаковою кількістю фоточутливих елементів, кожна з яких сприймає лише одну із трьох складових білого світла. Шляхом послідовного зчитування тонового розподілу по основним кольорам отримують інформацію, необхідну для відтворення кольорів зображення. Такий сканер називається однопрохідним сканером.

На якість зображення, що отримується в результаті сканування, значною мірою впливає джерело світла, що використовується в конструкції сканера. В старих моделях – це звичайна флуоресцентна лампа, в більш сучасних моделях – це лампа з холодним катодом, що має кращі параметри і значно більший термін служби. На сьогодні використовуються сканери з CIS-датчиком (контактні датчики зображення, CIS – Contact Image Sensor), в яких джерелом

світла є світлодіоди, які разом із чутливими елементами (фототранзисторами) розташовані безпосередньо на лінійці, що рухається вздовж сканованої поверхні. Відбите від оригінала світло через призму направляється на світлові датчики. В CIS-сканерах лінійка світлочутливих елементів має ширину робочого поля сканування і розташовується максимально близько до сканованої поверхні.

Програмна частина системи OCR. Всі OCR-системи поділяються на 2 типи. Перші починають аналізувати зверху-донизу, тобто спочатку виділяють у документі блоки, абзаци, слова, а тоді символи і розпізнають їх. Інші системи проводять аналіз знизу-догори, тобто спочатку ділять документ на безліч окремих символів, розпізнають їх, складають в слова та абзаци а потім аналізують результат. Програма FineReader працює по принципу багаторівневого аналізу документу (MDA – multilevel document analysis), тобто вихідний документ зчитується зверху-донизу, а електронна копія відтворюється знизу-догори. При цьому на всіх рівнях діє механізм зворотного зв'язку. Це дозволяє виявити помилку на нижньому рівні та виправити її на верхньому рівні, тобто має місце подвійна перевірка якості розпізнавання.

Розпочинається розпізнавання документа з аналізу його структури. Оригінал документу, що підлягає форматуванню, як правило, складається не лише з тексту, а з табличної, графічної інформації, а також містить елементи форматування. При цьому виділяють декілька ієрархічно організованих логічних рівнів (рівні аналізу документа):

1. Сторінка
2. Таблиця, блок тексту, ілюстрація
3. Комірка таблиці
4. Абзац
5. Рядок
6. Слово

7. Літера (символ).

Принципи роботи OCR-системи:

1. Принцип цілісності, згідно якого об'єкт розглядається як ціле, що складається зі зв'язаних частин.
2. Принцип цілеспрямованості – розпізнавання має представляти собою процес висування гіпотези та цілеспрямованої її перевірки.
3. Принцип адаптивності полягає у здатності системи до самонавчання. Отримана при розпізнаванні інформація впорядковується, зберігається та використовується надалі при розв'язанні аналогічних задач.

Процедура оптичного розпізнавання символів розпочинається з бінарізації зображення документа, тобто створення його чорно-білої копії. Після сканування зображення або є кольоровим, або у відтінках сірого. Для подальшої обробки OCR-система перетворює вхідне зображення в монохромне, що складається лише з білих та чорних крапок. Однак досить часто текст на сторінці накладено на якесь фонове зображення і в результаті простої бінарізації навколо текстової інформації знаходиться безліч крапок від фону, що може значно ускладнити процес розпізнавання символів і навіть рядків. Для підвищення якості розпізнавання в таких випадках дані системи використовують процедури інтелектуальної фільтрації фонових текстур та адаптивної бінарізації. Перша дозволяє впевнено відділяти рядки від фону, а друга – гнучко обирати для даної ділянки параметри бінарізації.

Наступний етап оптичного розпізнавання символів – сегментація сторінки, тобто розбиття її на окремі рядки, слова, літери.

Одним із способів сегментації сторінки є процедура лінійного поділу. Нехай вихідне зображення можна представити як матрицю яскравості крапок зображення розмірністю $m \times n$, що відповідає розміру сторінки. Максимальне значення яскравості відповідає чорному кольору, а мінімальне – білому. Задача виділення рядків зводиться до знаходження верхніх та нижніх меж рядків

тексту. Алгоритм сегментації рядків ґрунтується на тому, що середня яскравість в зображеннях міжрядкових проміжків значно нижча, аніж середня яскравість в зображеннях текстових рядків. Робота алгоритму сегментації рядків полягає в послідовному перегляді масиву середніх значень яскравості та виявленні пар індексів піксельних рядків, що відповідають верхній та нижній межі зображення рядку. Таким чином, після роботи алгоритму на вихідному зображенні відмічається положення всіх рядків тексту.

Входом для алгоритму сегментації слів слугує зображення одного текстового рядка, отриманого на попередньому етапі сегментації рядків. Для покращення якості роботи алгоритму спочатку вхідне зображення проходить крізь два допоміжні фільтри: пороговий фільтр підвищення контрастності (допомагає знизити рівень шуму, тобто прибрати значну кількість зайвих крапок) та розмазуючий фільтр, який для кожної яскравої крапки замальовуються сусідні крапки, в результаті такого перетворення близькі крапки об'єднуються в неперервну область і отримується картинка, що складається з декількох суцільних плям з досить чіткими межами. Далі виконується процедура сегментації слів у рядку. Алгоритм сегментації слів ґрунтується на тому, що середня яскравість в міжслов'яних інтервалах значно нижча, аніж середня яскравість в зображеннях слів. В цілому даний алгоритм схожий на алгоритм сегментації рядків, лише перегляд здійснюється по піксельним стовпцям зображення рядка. Робота алгоритму полягає в послідовному перегляді множини середніх значень яскравості стовпчиків та виявлення множини пар індексів піксельних рядків, що відповідають лівій та правій межі зображення слова.

Алгоритм сегментації символів є складнішим, аніж попередніх два алгоритма, оскільки в більшості зображень слів символи розташовані близько один до одного та міжсимвольні інтервали виражені не так чітко, як у випадку міжрядкових чи міжслов'яних інтервалів. Входом для даного алгоритму є

зображення слова, яке отримано на попередньому етапі шляхом застосування алгоритму сегментації слів. Даний алгоритм ґрунтується на тому, що середня яскравість в міжсимвольних інтервалах у крайньому разі нижча середньої яскравості в зображеннях символів. Такий алгоритм складається з двох частин: спочатку знаходять всі індекси стовпчиків, що відповідають локальним мінімумам середньої яскравості стовпчиків, а далі виявляють та видаляють з цього переліку оманливі межі символів. Перша частина даного алгоритму виконується наступним чином. Пошук локальних мінімумів середньої яскравості стовпчиків відбувається на суміжних інтервалах, розмір якого обирається на основі висоти літер, а саме: відомо, що для більшості шрифтів відношення ширини символа до його висоти не перевищує величину 0,3, тому розмір інтервалу обирається рівний $0,3 \cdot m$, де m – це висота символа. Припустимо на першому інтервалі було знайдено локальний мінімум, тоді пошук системи зсувається на один піксель від нього і знову триває пошук наступного локального мінімуму для вказаної ширини інтервала. Так триває до кінця слова. В результаті цієї процедури виявляється значна кількість так званих оманливих меж, які потрібно видалити, що й відбувається в другій частині алгоритму сегментації символів. Видалення оманливих меж здійснюється в два етапи. На першому етапі локальний мінімум яскравості в стовпчику є кандидатом у міжсимвольний інтервал, якщо середні значення яскравості в стовпчиках, розташованих на 2 пікселі зліва та на 2 пікселі справа є більшими. При цьому частина оманливих меж видаляється. На наступному етапі здійснюється виявлення зв'язків між стовпчиками пікселів. На цьому кроці алгоритму сегментації аналізується зв'язаність зображень символів та прибираються оманливі межі, котрі поділяють символ на частини. Таке може трапитись з широкими слабкозв'язаними символами П, Н, Ц. Причому символ може бути зв'язаним в верхній частині (П), в середній частині (Н) або у нижній частині (Ц) піксельних стовпчиків. Для аналізу зв'язності зображення ділять на

три рівні по висоті, кожний рівень аналізується окремо. В результаті видаляються зі списку кандидатів на міжсимвольний інтервал індекси стовпчиків, котрі мають зв'язок з сусідами зліва та справа.

В результаті сегментації сторінки були виділені окремі рядки, слова та символи. Наступний етап розпізнавання символів – класифікація сегментованих блоків, яка здійснюється за допомогою класифікаторів – елементів програми, котрі після аналізу конкретного блоку видають ряд гіпотез відносно того, що собою являє даний блок. При цьому кожній гіпотезі приписується певна вага, що по суті відповідає числовому виразу впевненості. Наприклад, класифікатор може видати для якогось об'єкта 2 гіпотези: абзац тексту (ймовірність 0,65) та таблиця (ймовірність 0,35). Спочатку перевіряється гіпотеза з більшою ймовірністю. При цьому гіпотез може бути не лише 2, а й 20 і навіть 100. Різновиди класифікаторів: растрові, ознакові, ознакові диференціальні, контурні, структурні, структурні диференціальні, кожний з яких характеризується своїм набором параметрів та застосовується в певній ситуації.

Самий простий і поширений вид класифікатора – растровий. Принцип дії оснований на прямому порівнянні зображення символа з еталоном. Ступінь несхожості при цьому вираховується як кількість пікселів, котрі не співпали. Для забезпечення задовільної точності розпізнавання необхідна попередня обробка зображення – нормалізація розміру, нахилу та товщини штриха. Точність такого класифікатора в ідеальних умовах досить висока: в 99,29% випадків справедливою для об'єкта виявляється одна з перших трьох гіпотез, в 97,57% – перша гіпотеза. Однак растровий класифікатор не ефективно працює з неякісним або рукописним шрифтом.

В такому випадку використовують ознаковий класифікатор. На відміну від растрового класифікатора, який аналізує елемент цілком, ознаковий розбиває його на ряд характеристик, тобто зображенню ставиться у відповідність n -мірний вектор характеристик (ознак) об'єкта. Наприклад, кут

нахлу ніжки літери А чи відстань між елементами літери Ш тощо. Власне класифікація полягає в порівнянні цього вектора з набором еталонних векторів тієї ж розмірності. Недоліком роботи такого класифікатора є те, що в результаті виділення ознак символу необернено втрачається частина інформації про сам символ. Однак їх точність по першим трьом гіпотезам становить 99,81%, що вище, ніж у растрових класифікаторів.

Одним із підвидів ознакового класифікатора є контурний класифікатор, який для виділення ознак використовує контури на зображенні символу. Використовується для розпізнавання тексту, набраного декоративним шрифтом. Працює дещо повільніше, ніж ознаковий класифікатор.

Ознаково-диференціальний класифікатор призначений для розпізнавання схожих елементів, наприклад, “m” та “rn”. Аналізує лише ті області зображення, де може знаходитися інформація, що дозволяє віддати перевагу одному з варіантів. Так, у випадку зазначеному вище ключом до відповіді є наявність та ширина розриву у місці дотику літер. Перевага такого класифікатора – висока точність, недолік – висока трудомісткість у побудові алгоритму та низька швидкодія.

Структурний класифікатор використовується у тому випадку, якщо рівень впевненості декількох гіпотез перевищує заданий. Тобто такий класифікатор своїх гіпотез не висуває, а перевіряє рівноймовірні гіпотези, сформульовані іншими вилами класифікаторів. Перевага такого класифікатора – висока точність, недолік – висока трудомісткість у побудові алгоритму та низька швидкодія.

На наступному етапі здійснюється перевірка розпізнавання за допомогою словників. В програмі FineReader для вирішення проблеми з перевіркою передбачено особливий тип моделі “несловникове слово”. Крім того, були створені морфологічно структуровані словники, які здатні моделювати

різноманітні словоформи, за рахунок чого охоплюють більш, ніж 98 % реального словниковго об'єму мови.

Після закінчення збирання слів, рядків, сторінок, OCR-система виводить на екран отриманий електронний документ.

На даний час розпізнавання тексту за допомогою OCR-систем здійснюється доволі точно – розпізнавання символів у друкованому тексті з точністю майже 100%, у рукодрукованому тексті з точністю 80–90 %, у рукописному тексті з точністю 60–70 %.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняттю “розпізнавання образів”. В яких галузях на сьогодні використовуються системи розпізнавання образів? Наведіть приклади.
2. Сформулюйте та поясніть ключову парадигму теорії розпізнавання образів.
3. Зобразіть загальну схему системи розпізнавання образів. Опишіть функціонування її окремих блоків.
4. Наведіть класифікацію систем розпізнавання образів. Що собою являє первинна апріорна інформація для систем без навчання, систем, що навчаються, та систем, що самонавчаються?
5. Які Ви знаєте оптичні системи розпізнавання тексту? Наведіть приклади.
6. Перелічіть основні етапи перетворення документа в електронний вигляд системами оптичного розпізнавання символів.
7. Яким чином здійснюється сканування документа в планшетному сканері?

8. Зобразіть та опишіть блок-схему роботи різних видів сканерів – чорно-білого, кольорового з обертовим RGB-фільтром та кольорового з дихроїчними фільтрами.
9. Яка особливість сканерів з CIS-датчиком порівняно зі сканером на основі ПЗЗ-лінійки?
10. В чому полягає принцип багаторівневого аналізу документу, що використовується в програмі FineReader?
11. Що таке бінарізація зображення документа?
12. Опишіть алгоритм сегментації рядків. Що таке процедура лінійного поділу?
13. Опишіть алгоритм сегментації слів. З якої метою використовують пороговий та розмазуючий фільтри?
14. Опишіть алгоритм сегментації символів. Що таке оманливі межі символів і яким чином їх видаляють при розпізнаванні символів?
15. В чому полягає принцип роботи класифікатора в системах розпізнавання образів? Які види класифікаторів Ви знаєте?

РОЗДІЛ 9.

Голографічні системи запису та відображення інформації

9.1. Фізичні основи голографії. Голографічний принцип запису інформації ґрунтується на формуванні в світлочутливому шарі інтерференційної картини від двох когерентних хвиль – відбитої від об'єкта та допоміжної, еталонної хвилі. Зафіксована в шарі (плівці) інтерференційна картина називається голограмою. При освітленні голограми допоміжною хвилею відтворюється зображення об'єкта. Власне термін голографія походить від двох грецьких слів “х(г)олос” – повний та “графо” – пишу та дослівно означає “повний запис”, тобто голографія дає змогу здійснити повний запис зображення об'єкта.

При фотографуванні зображення тривимірного предмета проектується на площину і на фотопластинці відбувається реєстрація тільки квадрата напруженості електричного поля світлової хвилі, тобто її інтенсивності. Але одержане таким способом зображення практично не містить інформації про те, на яких відстанях знаходяться окремі точки предмета. Про об'ємність предметів на фотографії можна робити висновок на основі законів перспективи: предмети близькі мають більші розміри, а далекі – менші. Також зменшується з відстанню їх чіткість та яскравість. Крім того, на фотографії зображення предметів подається лише з однієї точки зору, немає змоги поглянути на предмет зі сторони. Ця обмеженість інформації про предмет обумовлена тим, що для створення зображення використовується тільки один параметр – інтенсивність. Підвищити ж інформативність зображення можна, якщо використати й інші параметри світлової хвилі. В голографії використовується не тільки інтенсивність хвилі, але також фазові співвідношення.

Ідеї, які лежать в основі голографії, були запропоновані в 1947 р. англійським фізиком угорського походження Д. Габором. Однак йому не

вдалось одержати якісного зображення внаслідок цілого ряду технічних труднощів, головна з яких полягала у відсутності потужних когерентних джерел світла на той час. І тільки після появи лазерів у 1962 році американські дослідники Е. Лейт і Ю. Упатнієкс одержали перші якісні голограми тривимірних об'єктів в тонких шарах, а в той же рік радянський вчений Денисюк Ю.Н. реалізував запис голограми в трьохвимірному середовищі (в товстих шарах). В 1969 році було одержано райдужну голограму і розпочався масовий випуск недорогих захисних голограм (С. Бентон, США).

Голографія ґрунтується на явищах інтерференції і дифракції. Для спостереження інтерференційної картини необхідно мати дві когерентні хвилі. Голографія теж здійснюється за допомогою двох когерентних хвиль. Одна хвиля йде від предмета і несе про нього інформацію (амплітуда, фаза) – це предметна хвиля. Друга хвиля є допоміжною або еталонною і призначена вона для створення інтерференційної картини. Предметна і допоміжна хвилі утворюються з однієї хвилі шляхом розділення на дві частини. Джерелом когерентного випромінювання служить лазер.

Створення голограми базується на явищі інтерференції, а відтворення – на явищі дифракції. Результат інтерференції двох плоских когерентних хвиль в різних місцях екрану залежить від різниці фаз хвиль, що приходять в дану точку. Якщо хвилі приходять в одній фазі, то результуюча хвиля має більшу інтенсивність, ніж кожна з хвиль окремо. Якщо ж хвилі знаходяться в протифазі, вони гасять одна одну. Математично цей процес можна описати наступним чином. Комплексна амплітуда електромагнітної хвилі несе інформацію про амплітуду та фазу оптичного сигналу по двом просторовим координатам. Тому для опису двох когерентних хвиль слід скористатись виразом для комплексної амплітуди:

$$E_1^*(x, y) = E_{01}(x, y) \cdot \exp(i\varphi_1(x, y)) \quad (49)$$

$$E_2^*(x, y) = E_{02}(x, y) \cdot \exp(i\varphi_2(x, y)) \quad (50)$$

Звідси результуюча інтенсивність випромінювання в даній точці екрану матиме наступний вигляд:

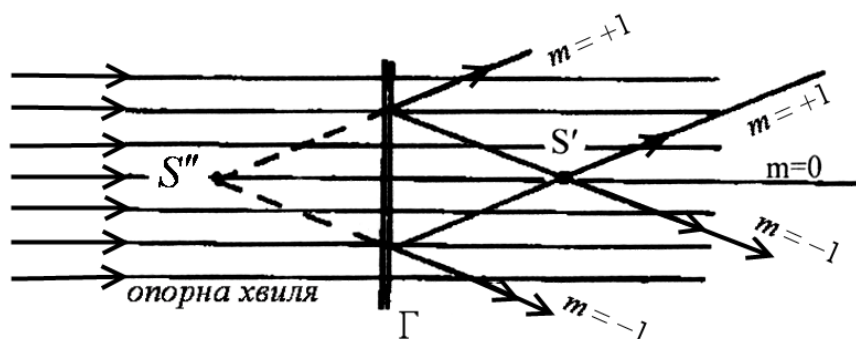
$$I = |E_1^*(x, y)|^2 + |E_2^*(x, y)|^2 + 2E_{01}(x, y)E_{02}(x, y)\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (51)$$

Тобто інтенсивність випромінювання інтерференційної картини дорівнює сумі інтенсивностей окремих хвиль та інтерференційної складової, що містить інформацію про різницю фаз. Якщо різниця фаз двох світлових хвиль з часом не змінюється, то такі хвилі називаються когерентними. Для когерентних хвиль у точках, де $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ результуюча інтенсивність при накладанні двох хвиль більша за суму інтенсивностей окремих хвиль; в той час як для випадку $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$ результуюча інтенсивність є меншою від суми інтенсивностей окремих хвиль. Таким чином, при накладанні двох когерентних світлових хвиль відбувається перерозподіл світлового потоку в просторі, який призводить до виникнення максимумів і мінімумів інтенсивності світла, які чергуються. Це явище називається інтерференцією, а чергування максимумів і мінімумів інтенсивності – інтерференційною картиною. При накладанні двох плоских когерентних хвиль інтерференційна картина являє собою чергування світлих і темних смуг.

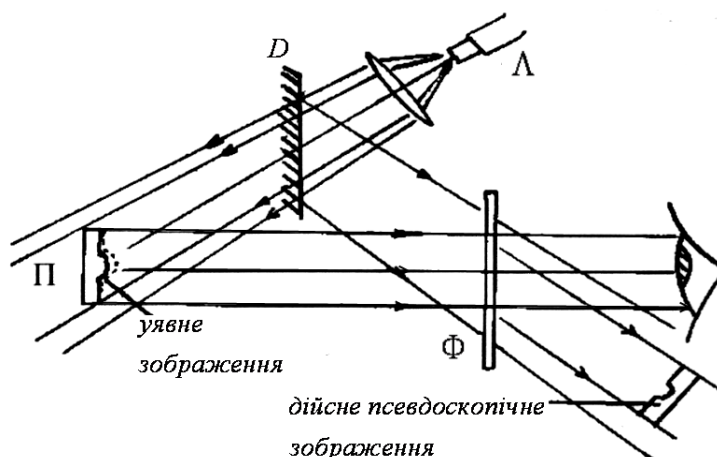
Якщо у місцях екрана з максимальною інтенсивністю випромінювання зробити невеликі отвори, то отримаємо дифракційну ґратку, за допомогою якої можна відновити хвильовий фронт, що викликав появу даної інтерференційної картини. При нормальному падінні плоскої хвилі на дифракційну ґратку має місце явище дифракції, тобто огинання вторинними хвилями, сформованими на щілинах, місця тіні за екраном. В результаті частина хвилі проходить крізь ґратку прямо, а частина дифрагує згідно рівняння ґратки, відновлюючи плоский фронт падаючої хвилі.

$$d \sin \theta = \pm m \lambda$$

де d – постійна ґратки, θ – кут дифракції, λ – довжина хвилі, $m=0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок дифракції. Отже, кут на який відхилитимуться вторинні хвилі після проходження крізь ґратку співпадатиме з кутом падіння хвилі на екран.



а)



б)

Рисунок 33 – Схема дифракції променів від точкового джерела (а) та від об'ємного предмета (б)

Якщо розглянути замість об'єкта точкове джерело світла, як це показано на рис.33, а, то відбудеться дифракція променів з центральним ($m=0$) і бічними ($m=+1, m=-1$) максимумами. Перетин дифрагованих променів, які відповідають $m=+1$ та $m=-1$, дасть зображення джерела S . Причому, таких зображень буде два

– дійсне S' та уявне S'' . Уявне зображення S'' співпадає з предметом і є подібним до нього (промені розходяться). Дійсне зображення S' – псевдоскопічне, оскільки промені в точці S' збігаються. Свою назву таке зображення отримало завдяки тому, що світлові промені насправді перетинаються і можуть подіяти, наприклад, на фотоплівку, викликавши в ній хімічні перетворення, або на фотоелемент. При цьому уявне зображення формується на перетині уявного продовження світлових променів. Прикладом уявного зображення є відображення предметів у дзеркалі. У плоскому дзеркалі спостерігач бачить себе наче на віддалі в два рази більшій, від своєї відстані до дзеркала. Насправді промені світла не проникають за поверхню дзеркала, а відбиваються від неї, і утворене зображення є ілюзією, що виникає, коли мозок людини продовжує сприйняти оком промені.

Якщо замість джерела S взяти об'ємний предмет і освітити його, то хвильова поверхня, яка поширюватиметься від нього – предметна хвиля – буде мати складну форму (багато точкових джерел) (рис.33, б). Інтерферуючи з допоміжною хвилею, вона створить у просторі складну систему максимумів і мінімумів, які можуть бути зафіксовані на фотопластинці Φ і міститимуть інформацію про предмет. Промінь від лазера L розширюється за допомогою лінз і через напівпрозоре дзеркало D освітлює предмет P . Від предмета поширюється предметна хвиля, яка несе про нього інформацію, маючи в різних напрямках різну амплітуду і фазу. Ця предметна хвиля складається з допоміжною хвилею, що відбивається від дзеркала, і в просторі виникає їх інтерференція. Інтерференційна картина фіксується на фотопластинці Φ і являє собою складну систему максимумів і мінімумів. Тобто, проявлена фотопластинка є своєрідною дифракційною ґраткою і називається голограмою. Голограма містить у собі запис хвильового поля предмета, яке можна відновити. Для цього треба поставити голограму на місце фотопластинки і освітити її допоміжним промінем. Тоді в результаті дифракції виникають дійсне і уявне

зображення. Дійсне зображення псевдоскопічне, а уявне співпадає з положенням предмета і відповідає йому, тобто воно є об'ємним.

Особливості голографічних зображень:

1. За допомогою голограми відновлюється об'ємність предмета, що досягається завдяки інтерференційній картині, що фіксує не лише амплітудні співвідношення розсіяного світла, а й фазові співвідношення.
2. Кожна частина голограми зберігає інформацію про ціле зображення об'єкта, що пов'язано з тим, що на кожен ділянку фотопластинки при запису падає світло, що розсіяне всіма точками об'єкта, а отже на будь-якій ділянці голограми зберігається в закодованій формі все зображення.
3. Можливість запису кількох зображень на одній голограмі, що досягається послідовним записом на одній пластинці різних зображень за допомогою допоміжного променя, направленою під різними кутами.

9.2. Види голограм та області їх використання. Існує декілька критеріїв для класифікації голограм. За способом реалізації розрізняють фізичні голограми, цифрові голограми та мультиплексні голограми. Фізичні голограми повністю створюються на фізичному рівні, тобто створення інтерференційної картини здійснюється фізичним шляхом. Цифрові голограми, які часто називають ще синтезованими, щоб підкреслити їх штучність, створюються за допомогою комп'ютерних технологій, а саме: створення інтерференційної картини здійснюється шляхом математичного моделювання, а запис інформації далі може здійснюватись на фізичний носій. На відміну від фізичних голограм такі голограми характеризуються більшою яскравістю та простотою реалізації різноманітних кінетичних ефектів. Мультиплексні або багаторакурсні голограми за способом реалізації займають проміжне місце між фізичними та цифровими голограмами. Суть даного методу створення голограм полягає в тому, що об'єкт фотографується звичайним способом з різних кутів зору, після чого знімки (ракурси) записуються на суміжні ділянки фотопластини. При

спостереженні такої голограми спостерігачу видається, що він розглядає об'єкт з різних боків, в результаті чого і виникає ілюзія об'ємності. Замість фотографій можуть бути використані кадри динамічної зйомки чи ракурси трьохвимірної комп'ютерної графіки.

За взаємним розташуванням об'єкта, еталонного джерела та голограми розрізняють голограми на просвіт та голограми відбивання. В голограмах на просвіт предметна та допоміжна хвилі потрапляють на фотопластинку з одного боку, а зчитування ведеться при просвітленні голограми тим самим допоміжним променем (лазерним), як це показано на рис.34. Такий спосіб запису голограми називається схема Лейта-Упатнієкса. Слід відмітити, що на сьогодні вже створено голограми на просвіт, які можна відновити в білому світлі – райдужні голограми.

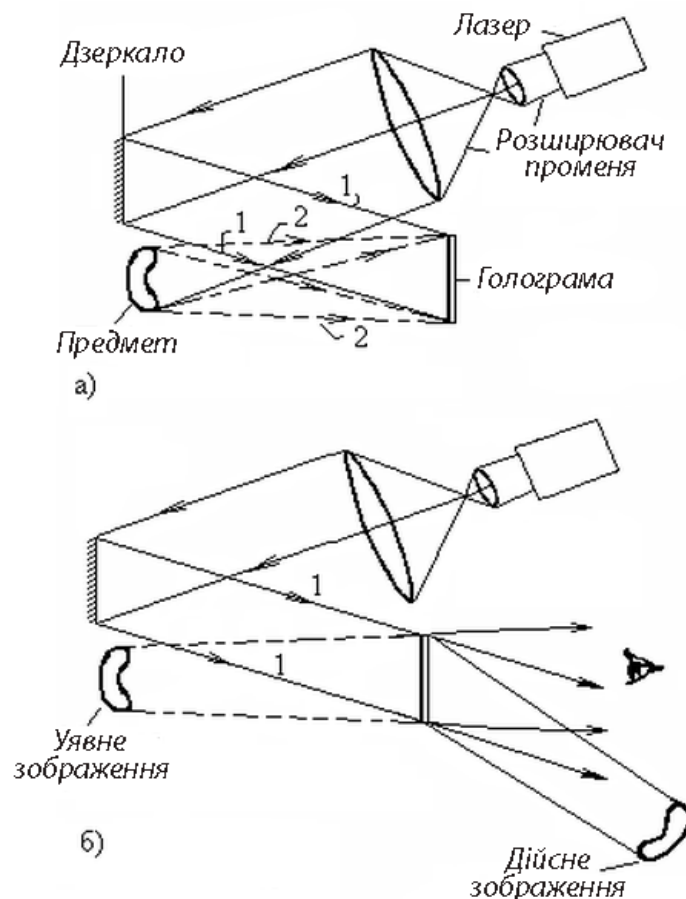


Рисунок 34 – Схема Лейта-Упатнієкса: запис (а) та зчитування (б) голограми

В голограмах на відбивання дві хвилі падають на фотопластинку з різних боків (рис.35). Промінь від лазера за допомогою скляного клина розділяється на два когерентні промені, один з яких освітлює предмет (предметна хвиля), а інший є допоміжною хвилею. При цьому предметна хвиля падає зі сторони емульсійного шару, а допоміжна хвиля – зі сторони скляної підкладки. Таким чином, ці дві хвилі з різних боків потрапляють на фотопластинку, утворюючи в ній "стоячі хвилі" – систему максимумів і мінімумів (вузлів і опуклостей). Такий спосіб запису голограми називається схема Денисюка. Конструктивно така схема є простішою, аніж перша, тому її часто використовують в аматорських схемах запису голограм.

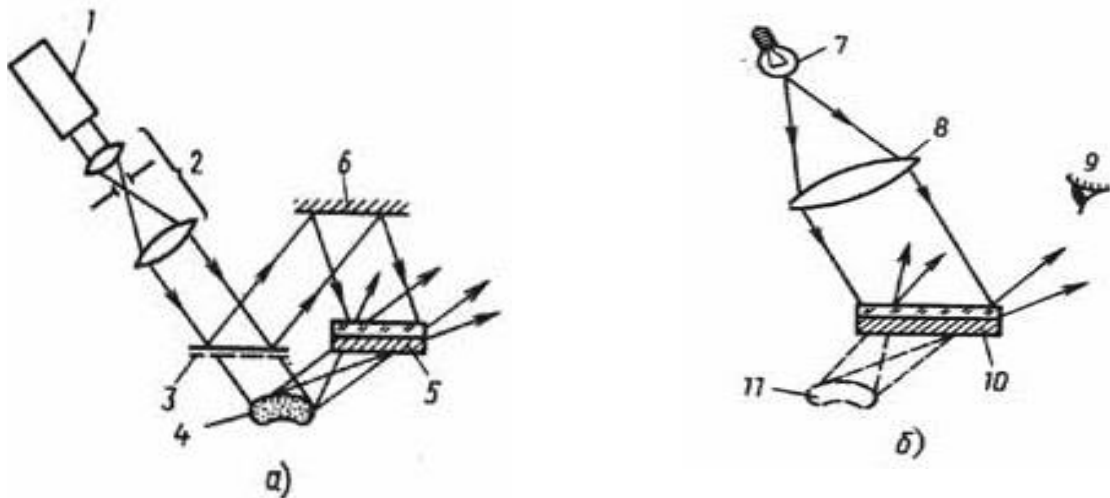


Рисунок 35 – Схема Денисюка: запис (а) та зчитування (б) голограми

За розміром реєструючого середовища розрізняють тонкі (плоскі або двовимірні) та товсті (об'ємні або тривимірні) голограми, а також за способом реєстрації світлих та темних ділянок інтерференційної картини – амплітудну та фазову голографію. Якісним критерієм розмежування тонких та товстих голограм є співвідношення товщини фоточутливого шару та відстані між інтерференційними кільцями. Так, якщо товщина шару є набагато меншою, аніж відстань між інтерференційними смугами, то така голограма називається

тонкою, у протилежному випадку – товстою. Кількісним критерієм розмежування двох видів голограм є критерій Клейна:

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n\Lambda^2} \quad (53)$$

де λ – довжина хвилі; d – товщина шару; n – коефіцієнт заломлення шару; Λ – відстань між інтерференційними площинами. Об'ємними (товстими) голограмами вважаються такі, у яких $Q > 10$. І навпаки, голограма вважається тонкою у випадку, коли $Q < 1$.

Тривимірна голограма, крім амплітудних та фазових характеристик, містить також інформацію про спектральний склад записаного випромінювання за рахунок дифракційного ефекту Брегга. В результаті інтерференції хвиль, що поширюються в товстошаровій емульсії, утворюються площини, які засвічені світлом більшої інтенсивності. Після проявлення голограми на засвічених площинах утворюються шари почорніння. В результаті цього утворюються так звані брегівські площини. Інтерференційна картина в цьому випадку являє собою систему площин із вузлів і опуклостей ("стоячі хвилі"), які знаходяться на відстані $\lambda/2$ у товщі емульсії. Отже, проявлена фотопластинка – голограма – являє собою тривимірну дифракційну ґратку з напівпрозорими шарами металевого срібла. Якщо потім таку голограму освітити допоміжною хвилею, то відбиті від шарів срібла когерентні світлові хвилі взаємно підсилюються і дають зображення об'єкта. Відновлення хвильового фронту здійснюється на тій же довжині хвилі, при якій робився запис на фотопластинку. Ця обставина дає можливість для відтворення зображення використовувати джерела із суцільним спектром довжин хвиль. Голограма сама "вибирає" із спектра саме ту довжину хвилі, при якій відбувався запис зображення. Тобто, голограма діє як інтерференційний фільтр, що дає можливість створити кольорову голографію.

Кольоровий зір пов'язаний з існуванням у сітківці ока трьох типів приймачів світла, які реагують на червоне, зелене і синє світло. Зображення

предмета на сітківці ока являє собою ніби три суміщених зображення, які розглядаються в червоному, зеленому і синьому світлі при певних інтенсивностях. Такий принцип суміщення зображень застосовується у кольоровій фотографії, кольоровому телебаченні. Аналогічні міркування лежать в основі кольорової голографії. Для здійснення кольорового зображення за методом Денисюка голограма одержується при освітленні об'єкта світлом, яке має у своєму спектрі три лінії – червону, зелену і синю. Тоді в товстому шарі емульсії утворюються три системи напівпрозорих шарів із металічного срібла, кожна з яких дасть зображення відповідного кольору, якщо освітити таку голограму білим світлом. Суміщення цих трьох зображень – червоного, зеленого, синього – дає кольорове зображення предмета.

За амплітудної голографії інтерференційна картина реєструється зміною потемніння фотопластинки в залежності від амплітуди результуючої світлової хвилі, а за фазової – зміною показника заломлення пластинки. Ефективність зчитування фазової голограми (відношення енергії відтвореного предметного променя до енергії допоміжного променя, яким здійснюється зчитування) є вищою, аніж амплітудної. В деяких реєструючих середовищах спостерігається одночасна зміна і інтенсивності пропускання, і показника заломлення, що призводить до формування амплітудно-фазових голограм.

За призначенням голограми поділяються на образотворчі голограми (відбивні тривимірні) та захисні голограми (райдужні голограми – тонка голограма на просвіт, яка може бути зчитана білим світлом). Образотворча голографія застосовується для реєстрації і відтворення унікальних речей – історичних реліквій, творів мистецтва, голограмних портретів. Захисні голограми використовуються як в цілях реклами продукції, так і захисту її від підробки, а також на банкнотах, кредитних картках тощо. Райдужні голограми за об'ємністю поділяються на 3D-голограми та 3D-2D-голограми. Так, 3D-голограми відтворюють об'ємне зображення реального об'єкта. Для їх запису є

необхідним реальний об'єкт або його модель в масштабі 1:1. Такі голограми повністю передають мальовничість і тривимірність об'єктів. Найпростіший приклад трьохвимірної голограми – зображення голуба на карточці VISA. При повороті голограми в вертикальному напрямку видно зміну кольору та відсутність паралаксу, а при повороті в горизонтальному напрямку видно, що на ній записано об'ємне зображення голуба. 3D-голограми широко використовуються в комплексних задачах захисту і створення іміджу торгових марок, оскільки їх стійкість до оптичного копіювання не дуже висока.

2D/3D-голограми містять декілька площин зображення, які візуально розташовані одна за іншою, і кожна з яких містить інформацію – зображення чи літерний напис. При повороті голограми в горизонтальному напрямку видно зміщення однієї площини відносно іншої, що і створює ефект тривимірності, а при повороті у вертикальному напрямку має місце зміна кольору. Крім того, даний тип голограм захищається від оптичного копіювання шляхом впровадження в структуру голограми спеціальних графічних елементів і оптичних ефектів:

1. Кінетичні ефекти (при вертикальному й горизонтальному паралаксі спостерігається або оберт сонячних променів навколо центра голограми, або пульсація фону й протифазна пульсація гільйошного малюнку, що охоплює центральну частину голограми, тощо);

2. муарові ефекти (при накладенні двох систем контрастних смуг чи сіток виникає візерунок, утворений їхніми згущеннями в місцях, де смуги однієї системи попадають у проміжки між смугами іншої системи; виникнення таких візерунків називають «муаровим» ефектом);

3. мікротексти (впроваджені в голограму тексти з розміром шрифту менше 0,1 мм; такий текст помітний тільки за допомогою лупи або мікроскопа);

4. гільйошні сітки (складне переплетення тонких хвилястих ліній; такий малюнок може бути фоновим або накладатися на будь-яку частину голограми);

5. лазерна деметалізація (видалення металізованого шару із заданих ділянок голограми, в результаті чого така голограма містить прозорі ділянки або написи).

Голограми цього типу часто використовуються для захисту товарів, документів і бланків суворої звітності.

9.3. Матеріали та технологія виробництва захисних голограм. За матеріалом фоточутливого шару голограми бувають необернені та реверсивні. До перших відносяться фотоемульсійні шари, фоторезисти та фотополімери. Вони придатні для синтезу голографічних запам'ятовуючих пристроїв однократного запису.

Основним фотоматеріалом для запису голограм є спеціальні фотопластинки на основі традиційного броміду срібла. Галогеносрібляста емульсія містить кристалики броміду срібла. Це з'єднання є нестійким і під дією світла розпадається з виділенням срібла у вигляді часточок, які є настільки дрібними, що видаються чорними. Тому ділянки, на які не потрапило світло, залишаються прозорими, а засвічені ділянки стають чорними. В результаті отримано негатив, з якого можна приготувати позитивний відбиток на другій пластині. За рахунок спеціальних присадок прояву вдалося досягти роздільної здатності понад 5000 ліній на міліметр. Однак максимальна теоретична ефективність зчитування становить всього 6%. Покращити ефективність зчитування до 30% для тонких та 90 % для товстих голограм можна шляхом використання ще одного фотоемульсійного матеріалу біхромованого желатину. Слід відмітити, що фотоемульсійні матеріали на основі броміду срібла є амплітудного типу, а на основі біхромованого желатину – фазового типу.

Останнім часом для створення голограм застосовуються фоторезисти, на яких зображення після запису та обробки проявляється у вигляді поверхневого рельєфу. В результаті отримують фазову голограму з просторово-модульованою товщиною. Недолік таких голограм – тривала хімічна обробка для їх одержання.

Крім того, органічні матеріали сильно підлягають старінню. Максимальна теоретична ефективність зчитування становить 30%. Роздільна здатність – 3000 лін/мм.

Інтенсивно розробляються реєструючі середовища на базі голографічних фотополімерних матеріалів, що представляють собою багатокомпонентну суміш органічних речовин, нанесену у вигляді аморфної плівки товщиною 10-150 мкм на скляну або плівкову підкладку. Оскільки фотополімери не володіють зернистою будовою, то роздільна здатність такого матеріалу достатня для надщільного запису інформації (більше 5000 лін/мм). Записані голограми є фазовими, що дозволяє отримувати високу дифракційну ефективність (100%).

До реверсивних оптичних середовищ відносяться матеріали, придатні для багаторазового перезапису – електрооптичні кристали, фотохромні матеріали, халькогенідні склоподібні напівпровідники тощо.

За методом виготовлення голограми поділяються на два види: у вигляді фольги для гарячого тиснення та липкої голографічної наклейки. Відмінність між ними полягає у способі нанесення на предмет, що підлягає захисту, та товщині самих елементів. Нанесення фольги для гарячого тиснення на предмети здійснюється на термопресах, а липкі голографічні наклейки можуть наноситись як у ручному, так і в автоматичному режимах. Товщина фольги для гарячого тиснення не перевищує 10 мкм, а липкої голографічної наклейки, як правило, є більшою за 30 мкм.

Виготовлення голограм складається з декількох етапів – виготовлення матриці голограми (фотоформа або друкована матриця), тиражування самих голограм, нанесення клейового шару. Найбільш поширеним методом виготовлення голограм є метод тиснення. Цей метод полягає в тому, що мікрорельєф голограми під дією температури та тиску копіюється з твердої матриці-оригіналу на гнучкий термопластичний матеріал. Зазвичай оригінальна голограма представляє собою скляну пластину з фоточутливим матеріалом з

проявленням мікрорельєфом. З цієї пластини гальванічним методом знімають металеву репліку – копію, яка далі закріплюється на головці мультиплікатора і здійснює тиснення полімерної пластини. В момент тиснення через металеву репліку подають імпульс струму так, щоб під час тиснення полімерна пластина локально підплавлялась і приймала форму репліки. На заключній стадії на виробі наносять клейовий шар. Якщо виготовляється фольга для гарячого тиснення, то використовується термоклей, який кріпиться на стрічку з голограмами. Якщо виготовляються наклейки, то використовується клей постійної клейкості, захищений силіконізованим папером.

Крім образотворчих та захисних голограм, на сьогодні розроблено дослідні зразки голографічних екранів та голографічних телевізорів. Потреба в розробці таких екранів обумовлена тим, що сучасні комерційні 3D-телевізори, принцип дії яких ґрунтується на стереоскопічному ефекті, мають декілька суттєвих недоліків – малі кути огляду та необхідність в 3D-окулярах. Ці недоліки планується усунути завдяки голографічним екранам. Хоча масового вжитку вони поки що не набули, однак мають гарні потенційні можливості у майбутньому замінити традиційні систем відображення інформації.

Контрольні запитання

1. Назвіть ключові відмінності фотографії та голографії.
2. На основі яких фізичних явищ ґрунтується запис та зчитування голограм?
3. Зобразіть схему дифракції променів від об'ємного предмета. Чим відрізняється уявне та дійсне зображення предмета?
4. Порівняйте фізичні, цифрові та мультиплексні голограми.
5. Наведіть схеми запису та зчитування голограми в способі Лейта-Упатнієкса.

6. Наведіть схеми запису та зчитування голограми в способі Денисюка.
7. Яким є якісний критерій розмежування тонких та товстих голограм?
Що таке критерій Клейна?
8. Що таке райдужна голограма? Назвіть різновиди райдужної голограми.
9. Назвіть спеціальні графічні елементи і оптичні ефекти для захисту голограм від оптичного копіювання.
10. З яких матеріалів виготовляють голограми? Порівняйте їх за роздільною здатністю та максимальною теоретичною ефективністю зчитування.

РОЗДІЛ 10.

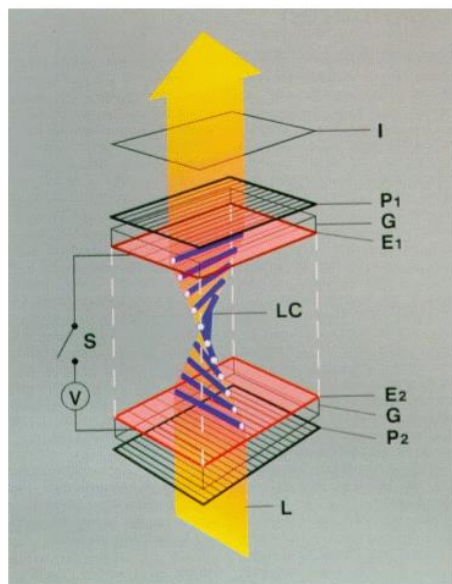
Системи безпосереднього відображення інформації

Системи безпосереднього відображення інформації поділяються на два великих класи – на основі електронно-променевих трубок та плоскопанельних моніторів, які в свою чергу поділяються на світловипромінювальні та світломодулюючі. До світло випромінювальних моніторів відносяться плазмові панелі (Plasma Display Panel, PDP), монітори на основі світлодіодів – неорганічних (LED- Light-Emitting Diode) та органічних (OLED – Organic Light-Emitting Diode) та монітори на польовій емісії. До світломодулюючих моніторів відносяться рідкокристалічні (Liquid Crystal Display-LCD) та електрохромні, електрофореzні монітори, а також герікони. Розглянемо 3 класи найбільш поширених моніторів, які використовуються в оптоелектронних системах – PDP-, OLED- та LCD-монітори.

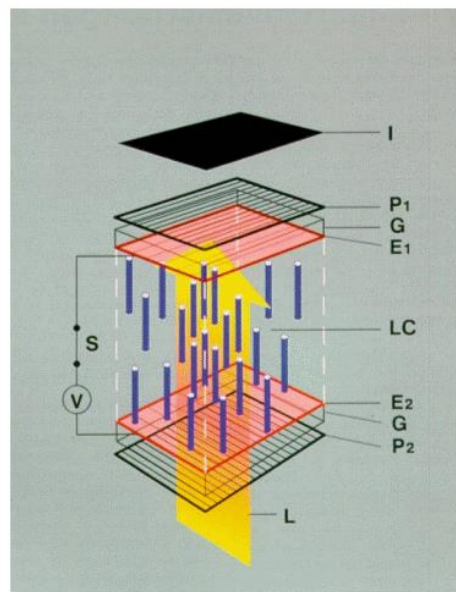
10.1. В LCD моніторах керування світлом лампи підсвічування, що проходить крізь шар рідких кристалів (РК), здійснюється за рахунок повороту ними площини поляризації світла лампи. РК представляють собою речовини, яка знаходиться в рідкому стані, але при цьому характеризуються деякими властивостями кристалічних тіл, а саме: це рідини, що володіють анізотропією електричних та оптичних властивостей. Така особливість рідких кристалів пов'язана з видовженою формою та певною впорядкованістю в орієнтації молекул. При цьому орієнтація характеризується одиничним вектором, який називається директор. Саме за орієнтацією молекул розрізняють 3 різновиди РК: нематичні, смектичні та холестерині. Нематичні РК мають дальній орієнтаційний порядок, однак в них відсутній позиційний порядок, тобто така речовина представляє собою сукупність молекул, довгі осі яких паралельні певному напрямку, а їхні центри розташовані хаотично, тобто вони не утворюють окремих шарів. Смектичні РК характеризуються наявністю як

орієнтаційного, так і позиційного порядку: в смектичних РК молекули крім того, що орієнтовані вздовж певного напрямку, ще й організовуються в окремі площини. При цьому напрямок орієнтації молекул в межах площини не змінюється. Холестеричні РК також характеризуються наявністю як орієнтаційного, так і позиційного порядку, однак при цьому напрямок орієнтації молекул в межах площини змінюється по спіралі при переході від площини до площини.

В LCD моніторах використовуються лише нематичні РК. Основними властивостями РК є оптична анізотропія, яка обумовлена видовженою формою молекул РК та їх паралельним розташуванням, що робить їх ефективними поляризаторами, а також електрична анізотропія та наявність текучості, що дають змогу керувати орієнтацією молекул, тим самим змінюючи їх оптичні властивості (ефект Фредерікса). Таким чином, рідкі кристали являють собою електрично керовані поляризатори (рис.36).



а)



б)

Рисунок 36 – Ілюстрація ефекту Фредерікса в рідкокристалічних дисплеях:

а) без прикладення напруги, б) при прикладенні напруги

Принцип дії LCD матриці ґрунтується на явищі електричного переходу Фредерікса в рідких кристалах, який полягає в переорієнтації молекул РК при прикладенні електричного поля вздовж напрямку поля (у матеріалах із додатною діелектричною анізотропією) або поперек (у матеріалі з від'ємною діелектричною анізотропією). Кут повороту при цьому залежить від напруги. В результаті прикладення напруги змінюється оптична активність комірки, тобто її здатність пропускати поляризоване світло. На рис.36 наведено приклад використання ефекту Фредерікса в рідкокристалічних дисплеях. За відсутності прикладеної напруги рідкокристалічні молекули, закручені по спіралі, пропускають світло, змінюючи при цьому площину його поляризації (рис.36, а). При прикладанні електричної напруги молекули РК переорієнтуються вздовж поля, в результаті чого світло не проходить крізь них. Характерною особливістю рідких кристалів є те, що молекули переорієнтуються в досить малих електричних полях – достатньо напруги в кілька мілівольт.

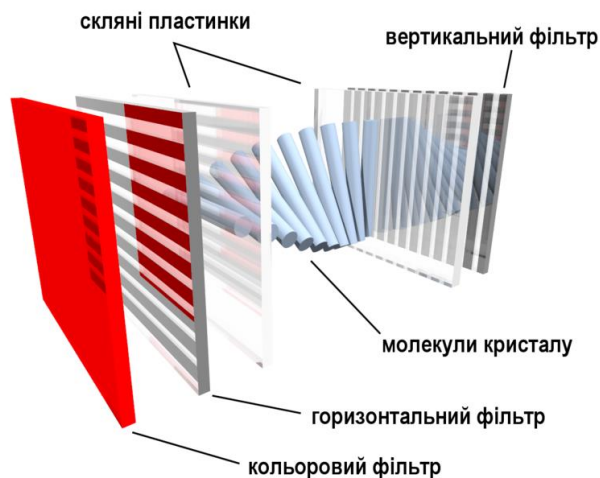


Рисунок 37 – Будова субпікселю LCD дисплею

LCD-дисплей складається з довільної кількості кольорових або монохромних точок (пікселів) і джерела світла (підсвітки). Кожна з кольорових точок рідкокристалічного дисплея складається з трьох комірок (субпікселів),

попереду яких встановлюються світлові фільтри (червоний, синій і зелений). Тобто колір певної точки і її яскравість визначається інтенсивностями світіння комірок, з яких вона складається. Кожний піксель складається з кольорового фільтра; горизонтального поляризатора; оточеного двома шарами скла рідкокристалічного шару; вертикального фільтра (рис.37).

Кристали-поляроїди здатні пропускати тільки ту складову світла, вектор магнітної індукції якої лежить у площині, паралельній оптичній площині поляроїда. Для решти світлового потоку поляроїд є непрозорим. У такий спосіб поляроїд ніби просіює світло. Якщо розмістити два схрещених поляризатора один навпроти одного, то світло через таку систему не пройде. Змінюючи за ефектом Фредерікса при прикладенні напруги до кожного пікселя орієнтацію молекул РК, можна змінювати частину світла, яка пройде крізь систему схрещених поляризаторів.

Рідкокристалічні дисплеї розрізняються за типом матриці – TN-матриця (англ. Twisted Nematic – скручений нематик) та IPS-матриця (англ. In-Plane Switching – перемикання у площині).

TN-матриця свою назву отримала завдяки специфічній структурі РК шару – молекули РК, осі яких перпендикулярні площині екрану, у вихідному стані закручені по спіралі. Для цього використовують скляну пластину з великою кількістю мікроскопічних паралельних заглиблень-борозен. Ширина борозен задаватиме найменший розмір елемента, що формує зображення. Молекули нижнього шару рідкого кристалу, потрапляючи у борозни, вимушені притримуватися заданої орієнтації, а всі наступні шари будуть вишиковуватись за ними внаслідок міжмолекулярної взаємодії. Якщо тепер зверху розмістити ще одну скляну пластину з аналогічним набором борозен так, щоб вони були перпендикулярні борознам нижньої пластини, то повздовжні вісі молекул самого верхнього шару будуть розташовані під прямим кутом по відношенню до осей молекул з нижнього шару. Між цими двома крайніми положеннями

формується своєрідна молекулярна спіраль з проміжних орієнтацій. По мірі проходження світла вздовж спіралі площина його поляризації обертається, слідуючи за орієнтацією поздовжньої осі молекул спіралі. Такий же ефект може бути досягнутий на основі полімерної плівки з мікроборознами, нанесеній на скляну підкладку.

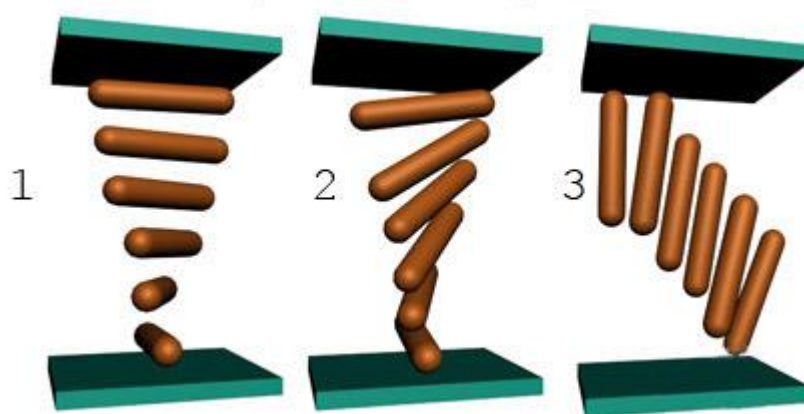


Рисунок 38 – Принцип дії субпікселя в LCD моніторі з TN-матрицею:

- 1 – вихідний стан (РК закручені по спіралі), світло проходить на 100 %;
- 2 – подача напруги (РК починають повертатися), світло проходить <100%;
- 3 – подача напруги (РК всі повернені), світло не проходить

Принцип дії TN-матриці проілюстровано на рис.38. Якщо до субпікселів не прикладається напруга, поляризаційне світло крізь рідкі кристали, повертається в просторі між пластинами на 90° . І оскільки напрямки поляризації нижнього та верхнього фільтрів якраз становлять 90° , то все світло проходить крізь такий субпіксель. Таким чином, в TN-матриці у вихідному стані формуються випромінюючі пікселі. При прикладенні напруги руйнується гвинтова структура РК, бо внаслідок ефекту Фредерікса молекули намагатимуться вишикуватися вздовж напрямку поля, тобто перпендикулярно напрямку поляризації верхнього фільтру. В результаті цього частина поляризованого світла не досягне субпікселя і на екрані буде світла точка меншої інтенсивності. Якщо ж до субпікселя прикладена критична напруга, за

якої всі РК вишикувались вздовж електричного поля, то світло не пройде крізь поляризатор і на екрані утвориться чорна точка.

До переваг TN-матриць відноситься низький час відгуку та невисока собівартість. До недоліків TN-матриць можна віднести наступні характеристики:

1. невисока кольоропередача, що обумовлена складністю вишикувати всі молекули РК перпендикулярно поляризаційному фільтру, тому практично неможливо досягнути відтворення ідеального (глибокого) чорного кольору;

2. найменші кути огляду через неузгодженість повороту кристалів, в результаті чого має місце розсіювання світлового потоку і тому зображення під різними кутами виглядає неоднаково;

3. пікселі, які вийшли з ладу, досить помітні на екрані, оскільки за несправності електроду чи транзистора керування, все світло проходить крізь них і на екрані з'являється біла точка. Відомо, що біла точка на екрані є більш помітною для людського ока, ніж чорна точка.

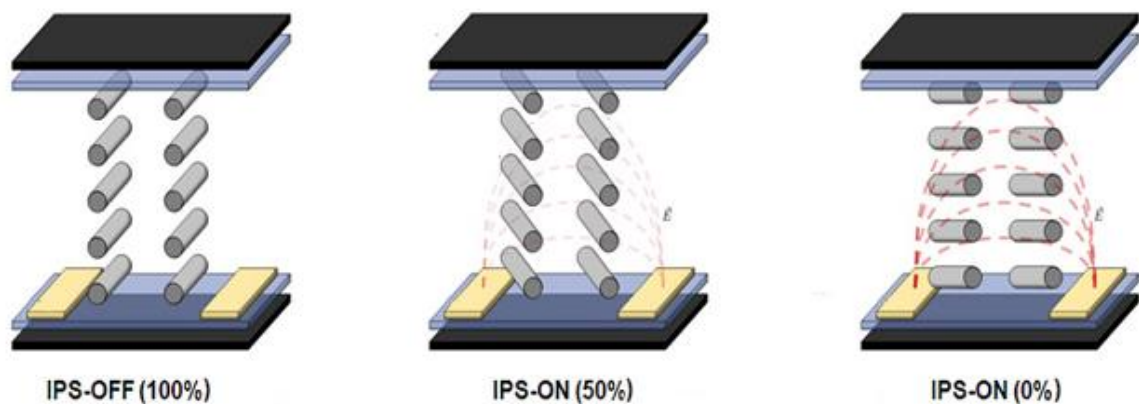


Рисунок 39 – Принцип дії субпікселя в LCD моніторі з IPS -матрицею

Для усунення вказаних недоліків була розроблена IPS технологія виготовлення LCD дисплеїв. Головна відмінність IPS-матриць від TN-матриць полягає у тому, що у вихідному стані всі кристали розташовані в одній площині, паралельно площині матриці (рис.39). Це досягається завдяки наявним у

верхній та нижній орієнтуючій полімерній плівці паралельних борозен. В результаті наявності схрещених поляризаторів світло крізь таку структуру не пройде, тому відображення чорного кольору є близьким до ідеалу. При прикладенні напруги внаслідок ефекту Фредерікса здійснюється поворот всіх молекул РК одночасно, для цього на нижній стороні наносять по два додаткових електроди на кожну комірку. В залежності від величини прикладеної напруги кристали можуть повернутись на кут до 90° .

Переваги IPS технології – збільшені кути огляду до 178° , висока контрастність та кольоропередача. Крім того, при виході з ладу транзистора керування несправний піксель на панелі IPS буде не білого, а чорного кольору, що є менш помітним. До недоліків IPS технології відноситься низький час відгуку, що обумовлено необхідністю керувати всім масивом молекул РК, та нижча яскравість.

Сучасні РК дисплеї містять пасивну або активну схему керування пікселями. В пасивній матриці зображення формується рядок за рядком шляхом послідовного підведення керуючої напруги на окремі комірки, що робить їх прозорими. Через досить велику електричну ємність комірок напруга на них не може змінюватися досить швидко, тому оновлення картини відбувається повільно. В пасивних матрицях для адресації використовуються смужки напівпрозорих електродів, розташованих на обох поверхнях скляних підкладок і орієнтованих перпендикулярно. На їх перетині міститься піксель. Щоб змінити його стан, необхідно задіяти дві адресні лінії – вертикальну та горизонтальну. Значно збільшити швидкодію можна використовуючи активну матрицю, що представляє собою сукупність тонкоплівкових транзисторів для керування кожним пікселем. На скляну підкладку наноситься шар аморфного кремнію, на якому формуються транзистори, які виконують роль посередника між системою адресації та РК-комірками. В активних матрицях виключається вплив процесу

вибірки (адресації) на сусідні комірки, кожен піксель ізольований. Завдяки цьому час затримки при перемиканні РК комірок вдалося значно скоротити.

10.2. OLED-дисплеї. OLED дисплеї (англ. organic light-emitting diode, органічні світлодіоди) складаються з органічних світлодіодів, що являють собою напівпровідникові діоди, виготовлені з органічних з'єднань, що ефективно випромінюють світло при проходженні крізь них струму. Схематичне зображення будови та роботи органічного світлодіода наведено на рис.40.

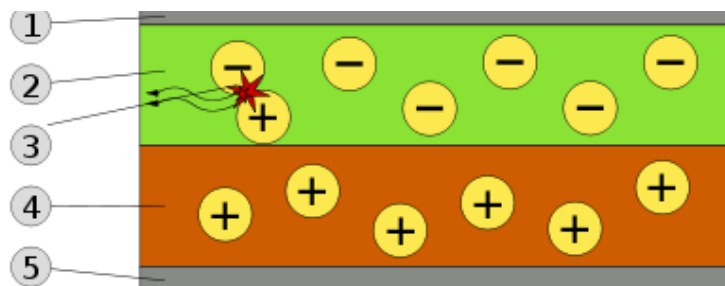


Рисунок 40 – Схема двошарового органічного світлодіода:

1 – катод, 2 – емісійний шар, 3 – рекомбінація електрона й дірки з утворенням кванта світла, 4 – провідний шар, 5 – анод

Для створення органічних світлодіодів використовуються тонкоплівкові багат шарові структури, що складаються з шарів декількох полімерів. В найпростішому двошаровому OLED один полімерний шар виконує роль люмінесцентного (або емісійного) шару, а інший полімер – провідний шар. Крім двох полімерних шарів OLED містить два електроди – анод та катод, за допомогою яких подається напруга на структуру, що дає можливість спостерігати елетролюмінесценцію. При подачі на анод додатної напруги потік електронів протікає через прилад від катода до аноду. Таким чином, катод віддає електрони в емісійний шар, а анод забирає електрони з провідного шару або, що те саме, анод віддає в провідний шар дірки. Під дією електростатичних сил електрони та дірки рухаються на зустріч один одному і при зіткненні

рекомбінують з утворенням фотону. Випромінювання світла в органічному світлодіоді відбувається в тонкому люмінесцентному шарі органічного напівпровідника, оскільки в органічних напівпровідниках дірки мають більшу рухливість, аніж електрони. За зворотної полярності дірки рухаються на анод, а електрони на катод і їх рекомбінація не відбувається, тому діод за такої полярності не випромінює світло.

Для виготовлення катоду використовуються метали з малою роботою виходу (Ca, Mg, Al), що сприяє ефективній інжекції електронів. Для виготовлення аноду використовується напівпрозорий електрод з InSnO (ITO), який прозорий для видимого світла і має високу роботу виходу, що сприяє ефективній інжекції дірок в полімерний шар. Отже, принцип дії OLED можна сформулювати наступним чином – пропускання електричних імпульсів крізь органічні з'єднання призводить до яскравого світіння останніх, причому використання різних люмінофорів дозволяє отримати світіння заданого кольору.

Кожний піксель кольорового OLED дисплею формується з трьох складових – органічних комірок, що відповідають за синій, зелений та червоний колір. Існує три основних способи реалізації кольорових OLED дисплеїв (рис.41). Перший з них полягає у тому, що підбираються різні матеріали субпікселів, які випромінюють синій, зелений та червоний колір (рис.41, а). Така технологія дозволяє створювати екрани мінімальної товщини, оскільки не містить світлофільтрів, і з тієї ж причини кольори на екрані максимально чіткі та глибокі. Однак вони характеризуються суттєвим недоліком – термін служби матеріалів, що випромінюють синій колір, є меншим, аніж матеріали, що випромінюють два інших кольори. Це призводить до зменшення часу роботи всього дисплею.

Інший спосіб полягає у застосуванні органічних світлодіодів білого кольору та відповідних світлофільтрів (рис.41, б). Така технологія отримала

назву WOLED+CF (англ. White OLED with Color Filters – білі світлодіоди з кольоровими світлофільтрами). Такий спосіб найбільш простий у виготовленні та найдешевший, крім того кольорова гама таких дисплеїв з часом не змінюється. Недоліком технології WOLED+CF є велика товщина та більш темні кольори.

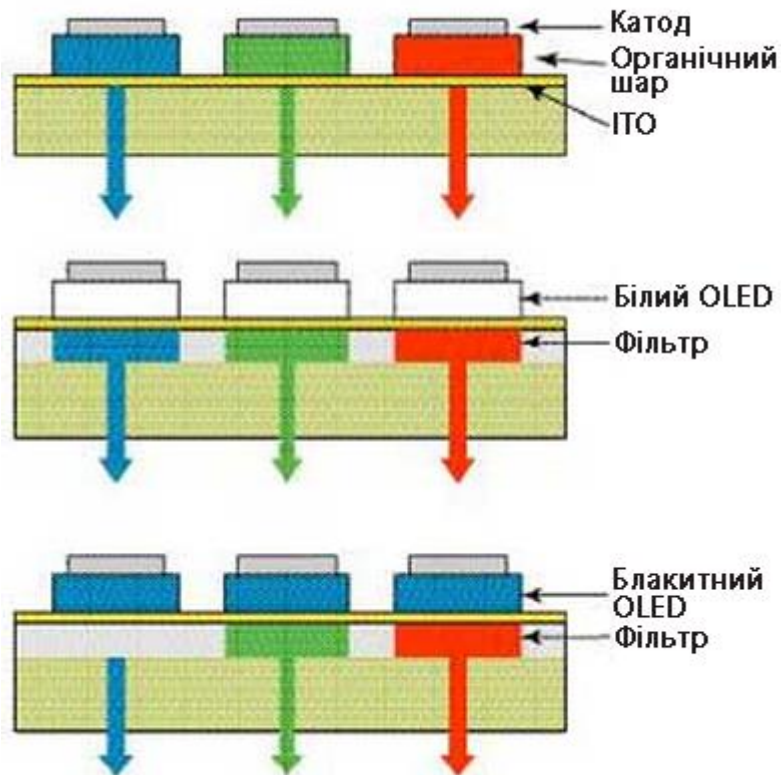


Рисунок 41 – Способи реалізації кольорових OLED дисплеїв:

- а) RGB люмінофори, б) білі світлодіоди+RGB світлофільтри (WOLED+CF),
в) сині світлодіоди+RG світлофільтри

Третій спосіб реалізації кольорових OLED дисплеїв є подібним до другого способу з тією відмінністю, що замість білих світлодіодів використовують сині, а далі 2 світлофільтри, що перетворюють короткохвильове випромінювання в довгохвильове (червоне та зелене). Перевагою такого способу є менша вартість OLED дисплеїв, однак має місце малий термін служби синього полімеру.

Технологія OLED-дисплеїв має ряд різновидностей. Класифікують такі дисплеї за трьома ознаками – за способом нанесення органічного матеріалу (PLED та SMOLED), за типом матриці (OLED з пасивною матрицею та OLED з активною матрицею (AMOLED)), і нарешті за споживчими якостями (TOLED – прозорі дисплеї та FOLED – гнучкі дисплеї).

Розрізняють дві технології нанесення органічних шарів – у вигляді мікромолекул (англ. Small Molecular OLED – SMOLED) та у вигляді полімерної плівки (Polymer OLED – PLED). В першому випадку органіка конденсується на підкладці зі спеціального пару у вигляді люмінесцентного шару товщиною всього в одну чи декілька молекул, що покращує характеристики такої матриці. У другому випадку – шар наноситься рідинним способом, наприклад, струйним методом, який є дешевшим, аніж метод SMOLED.

По аналогії з LCD-технологією для OLED-технології з точки зору адресації пікселів також розрізняють пасивну та активну матрицю. Пасивна матриця представляє собою масив анодів, розташованих рядками, та катодів, розташованих стовпчиками. Щоб прикласти напругу до певного світлодіоду, необхідно обрати номер катоду та номер аноду, на перетині яких знаходиться цільовий піксель, і подати напругу. Така матриця, як правило, використовується в монохромних панелях. OLED дисплеї з активною матрицею (AMOLED) для керування кожним пікселем використовують тонкоплівковий транзистор (ТПТ), завдяки чому комірки оновлюються досить швидко. При цьому створюється масив ТПТ у вигляді матриці з аморфного чи полікристалічного кремнію, яка наноситься на підкладку під органічний шар дисплею.

В класичному органічному дисплеї прозорим є лише анод. Якщо прозорим виготовити також анод, можна отримати повністю прозорий екран (англ. Transparent OLED – TOLED). Подібні екрани вже виготовлені компаніями Samsung (Південна Корея) и LG (Південна Корея). Слід відмітити, що їх прозорість не впливає на сприйняття зображення на екрані, тому що органічні

світлодіоди характеризуються підвищеною яскравістю. В класичному органічному дисплеї в якості підкладки використовується скло, замінивши його на гнучкий матеріал, можна отримати гнучкі дисплеї (англ. flexible OLED – FOLED), які можна згинати однократно чи багаторазово. Прототипи таких дисплеїв також вже виготовлені, наприклад, компанією Sony (Японія).

Перевагами OLED моніторів є невеликі габарити та маса, низьке енергоспоживання, можливість створювати гнучкі екрани, відсутність необхідності в підсвічуванні, великі кути огляду, повна відсутність інерційності, висока контрастність. До недоліків OLED дисплеїв відносять малий термін служби люмінофорів деяких кольорів (близько 2-3 років) та дорожня технологія по створенню матриць великої площі.

10.3. Плазмовий дисплей (англ. PDP – plasma display panel). Принцип дії PDP-дисплею ґрунтується на явищі свічення люмінофору під впливом ультрафіолетових променів, що виникають при електричному розряді в іонізованому газі, тобто у плазмі. Будова плазмової панелі наведена на рис.42.

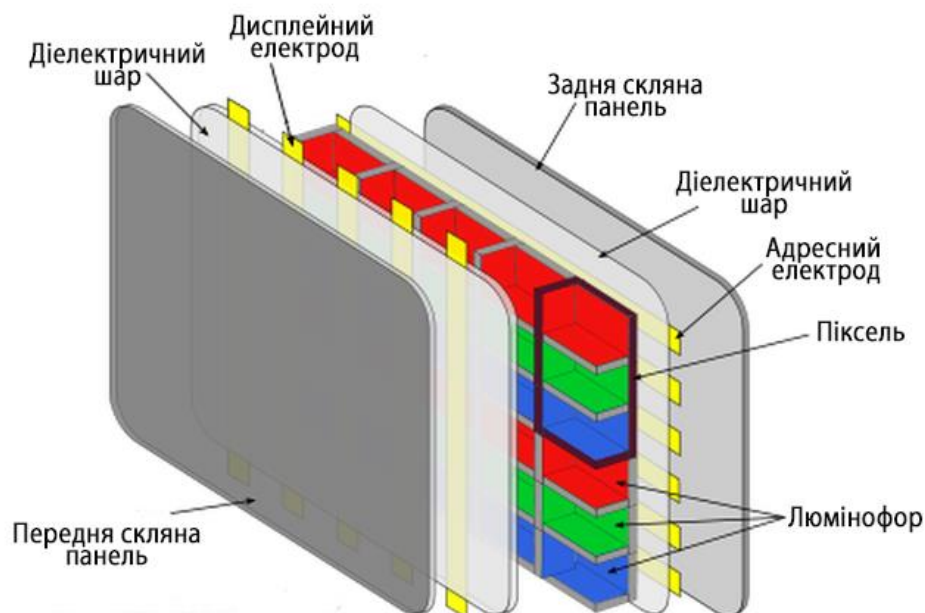


Рисунок 42 – Будова PDP монітора

Конструктивно такий дисплей складається з великої кількості мікрокомірок (мікрокамер), заповнених інертним газом (аргоном, неоном або їх сумішшю) (рис.43).

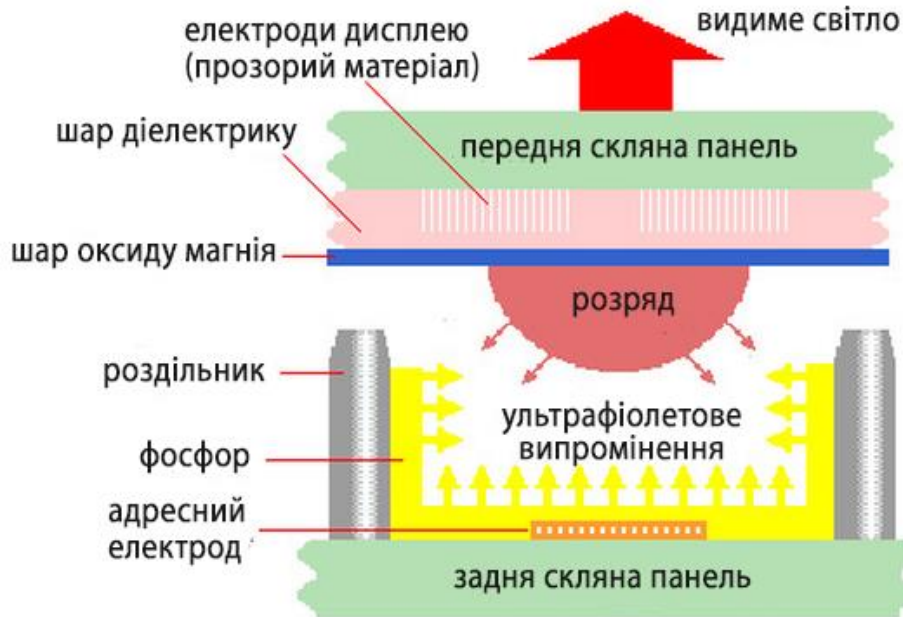


Рисунок 43 – Принцип дії субпікселя в PDP моніторі

Кожна з таких комірок представляє собою субпіксель. Внутрішня стінка комірки вкрита люмінофором. Люмінофор – це матеріал, який здатний випромінювати світло при впливі на нього іншого джерела енергії, тобто при збудженні. Коли ультрафіолетовий фотон потрапляє в атом люмінофору, один з його електронів переходить на більш високий рівень енергії, тобто має місце збудження люмінофору. Коли електрон повертається до початкового рівня, частина енергії втрачається і випромінюється у вигляді видимого світлового фотона. Кожен субпіксель вкривається люмінофором, що світиться своїм кольором. Люмінофори являють собою складні сполуки, активовані певними іонами. Для одержання зеленого кольору використовують іони Mn^{2+} , червоного кольору – Eu^{3+} , синього кольору – Eu^{2+} .

Мікрокомірки розташовані між двома скляними пластинами, на яких розташовані прозорі дисплейні електроди (скануючі електроди) та електроди адресації (електроди керування) (рис.42). Дисплейні електроди розташовані перед комітками і проходять уздовж внутрішньої сторони фронтальної скляної пластини. Ці електроди є прозорими, виготовлені з ІТО та вкриті захисним шаром з оксиду магнію. Адресні електроди розташовані поза комітками і проходять уздовж тильної скляної пластини. Розташовані дві системи електродів перпендикулярно один одному. 97% ультрафіолетової складової випромінювання, шкідливого для очей, поглинається зовнішнім склом.

Принцип дії плазмових панелей полягає в наступному. Адресація окремих пікселів здійснюється завдяки внутрішній електроніці плазмової панелі. Так, для іонізації газу в певному субпікселі процесор заряджає електроди безпосередньо на перетині з цією мікрокамерою. Під дією напруги в прилягаючій до електрода газовій області виникає електричний розряд. Плазма газового розряду випромінює світло в ультрафіолетовому діапазоні, що викликає світіння часток люмінофора, у діапазоні видимому людиною. Фактично, кожен піксель на екрані працює як звичайна флуоресцентна лампа. Змінюючи імпульси, що проходять через кожну комітку, система управління може збільшувати або зменшувати інтенсивність випромінювання кожного субпікселя, щоб створити сотні комбінацій червоного, зеленого і синього. Таким чином, система може відтворювати колір практично по всьому видимому спектру.

Основна перевага плазмової технології полягає в тому, що можна зробити широкий екран, використовуючи надтонкі матеріали. Оскільки кожен піксель запалюється індивідуально, то зображення виглядає ультра-яскравим з великими кутами огляду. Найбільшим недоліком цієї технології є вартість та значне енергоспоживання (величина напруг для запалювання газового розряду становить сотні вольт). Крім того, оскільки розмір комітки в таких дисплеях

досить значний порівняно з іншими видами дисплеїв, то мінімальний розмір екрану на сьогодні становить 32 дюйма. Тому сферами використання таких дисплеїв є відео-системи великого формату.

Контрольні запитання

1. Назвіть види моніторів, які відносяться до світловипромінювальних та світломодулюючих приладів?
2. Що представляють собою рідкі кристали? Які бувають різновиди рідких кристалів? Порівняйте їх між собою.
3. В чому полягає ефект Фредерікса? Яким чином він використовується при створенні рідкокристалічних панелей?
4. Чим відрізняються рідкокристалічні матеріали з додатною та від'ємною діелектричною анізотропією?
5. Якою є будова субпікселю LCD дисплею? Яким чином забезпечується кольорове світіння в субпікселю LCD дисплею?
6. Який вид рідких кристалів використовується при створенні TN-матриці? Яким чином в цій матриці досягається гвинтова структура рідких кристалів?
7. Опишіть принцип дії субпікселя в LCD моніторі з TN-матрицею.
8. Опишіть принцип дії субпікселя в LCD моніторі з IPS-матрицею.
9. Порівняйте два типи рідкокристалічних матриць – TN- та IPS-матрицю.
10. Які способи керування пікселями в плоскопанельних дисплеях Ви знаєте?
11. Опишіть схему та принцип дії двошарового органічного світлодіода. Які матеріали використовуються для виготовлення таких світлодіодів?
12. Назвіть способи реалізації кольорових OLED дисплеїв. Порівняйте їх між собою.

13. Що собою являє AMOLED матриця?
14. Які технології нанесення органічних шарів при створення OLED дисплеїв Ви знаєте?
15. В чому полягає принцип дії плазмових панелей?
16. Опишіть структуру та принцип дії субпікселя в PDP моніторі.
17. Які іони використовуються для активації зеленого, синього та червоного люмінофору в плазмових панелях?
18. Яким чином здійснюється захист зору людини від шкідливого впливу УФ випромінювання в плазмових панелях?
19. Який із розглянутих видів плоскопанельних моніторів дає змогу виготовити гнучкі чи прозорі екрани?
20. Яка технологія створення пристроїв відображення інформації дає змогу виготовляти широкоформатні монітори?

РОЗДІЛ 11.

Проекційні системи відображення інформації

11.1. Структура проекційного апарату. Проектор – це оптичний прилад, призначений для створення дійсного зображення плоского предмета невеликого розміру на великому екрані. В свій час поява проекційних апаратів зумовила виникнення кінематографу, який відноситься до проекційного мистецтва. Проекціювання в оптоелектроніці – це процес утворення зображення на віддаленому від оптичного приладу екрані методом геометричної проекції (діаскоп, мультимедійний проектор) або синтезом зображення (лазерний проектор).

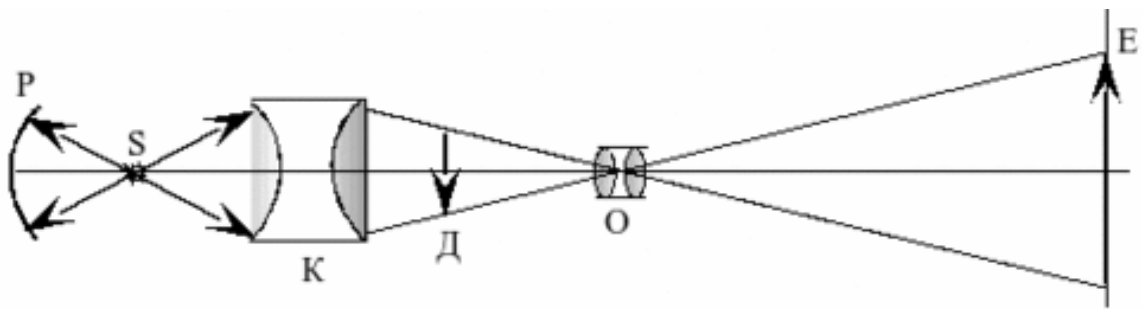


Рисунок 44 – Схема проекційного пристрою

Основою сучасного мультимедійного проектора є джерело світла і система формування зображення. Проекційний апарат складається з таких основних частин (рис.44): проекційна лампа (S), рефлектор (P), конденсор (K), теплофільтр, вентилятор, матриця формування зображення (D), проекційний об'єктив (O), вбудований інтерфейс (органи управління). Крім цього, мультимедійний проектор може містити гучномовець, блок для перетворення електричних сигналів у відеосигнали, блок для перетворення електричних сигналів в сигнали звукової частоти, підсилювач відеосигналів, підсилювач аудіосигналів.

Проекційна лампа, створює світловий потік, який випромінюється у всіх напрямках. В останній час значного поширення набули кварцово-галогенні лампи.

Рефлектор – це увігнуте дзеркало, що використовується для зміни напрямку і інтенсивності світлового потоку. Дзеркальний відбивач звичайно встановлюється за джерелом світла. Відбите від його поверхні проміння потрапляє в кадрове вікно апарату.

Конденсор – оптична система, яка фокусує (збирає) випромінювання проекційної лампи. Це дозволяє значну частину світлового потоку джерела зібрати і направити в кадрове вікно на предмет, забезпечивши при цьому рівномірність освітлення матриці. В проекційних апаратах конденсори складаються із двох-трьох лінз різного діаметру і кривизни поверхні.

Теплофільтр призначений для виключення інфрачервоних (теплових) променів із світлового потоку, який проходить через оптичну систему. Отже, теплофільтр запобігає надмірному нагріванню оригіналу, зображення якого проектується на екран. Теплофільтр виготовляється зі спеціального скла, яке затримує інфрачервоне випромінювання. Оскільки теплофільтр має голубувате забарвлення, це в деякій мірі поліпшує спектральний склад світла проекційної лампи, наближаючи його до білого.

Проекційний об'єктив – складна оптична система, що складається із декількох лінз, які підібрані певним чином і містяться в одній оправі. Він призначений формувати на екрані збільшене, чітке, дійсне і неспотворене зображення об'єкта.

Вентилятор призначений для охолодження проекційної лампи, яка під час роботи нагрівається.

До органів управління проекційними апаратами належать такі елементи: кнопка увімкнення і вимкнення; пульт дистанційного управління; таймер.

Однак найголовнішою складовою проектора є матриця формування зображення. При виробництві мультимедійних проекторів використовується в основному 3 технології виготовлення матриці формування зображення – рідкокристалічна технологія на просвіт (англ. LCD, Liquid Crystal Display), технологія цифрової обробки світла (англ. DLP, Digital Light Processing), рідкокристалічна технологія на відбивання (англ. LCoS, Liquid Crystal on Silicon).

11.2. LCD-проектори. В мультимедійному проекторі, який виконаний за технологією LCD, функції формування зображення виконує LCD-матриця просвітлювального типу. За принципом дії такі проектори нагадують звичайні діaproектори з тією різницею, що зображення, яке проектується на екран, формується при проходженні світлового потоку, що створюється лампою, не через слайд, а через рідкокристалічну панель.

Рідкокристалічна LCD-панель являє собою прямокутний масив з двох скляних пластин, на які нанесені орієнтаційні полімерні плівки і розміщені електроди з напівпрозорого оксиду індію. На поверхню полімерної плівки нанесені борозни. Між пластинами розташовані рідкі кристали, молекули яких орієнтуються в необхідному напрямку за рахунок борозен на плівці. На скляних пластинах знаходяться також поляризаційні фільтри, які відсікають світло будь-якої поляризації крім заданої. Молекули рідких кристалів мають властивість змінювати поляризацію світла, яке через них проходить, лише тоді, коли падаючий промінь світла проходить паралельно до головної осі. Як правило в LCD проекторах використовуються TN-матриці з активним керуванням за допомогою тонкоплівкових транзисторів, структуру та принцип дії яких ми розглянули в розділі 10.

Сучасні LCD-проектори виконуються на базі трьох рідкокристалічних матриць, які мають розміри від 0,7 до 1,9 дюйма по діагоналі. Кожна з панелей (матриць) призначена для забезпечення передачі одного з трьох кольорів –

червоного, зеленого і синього. Структурна схема такого проектора наведена на рис.45.

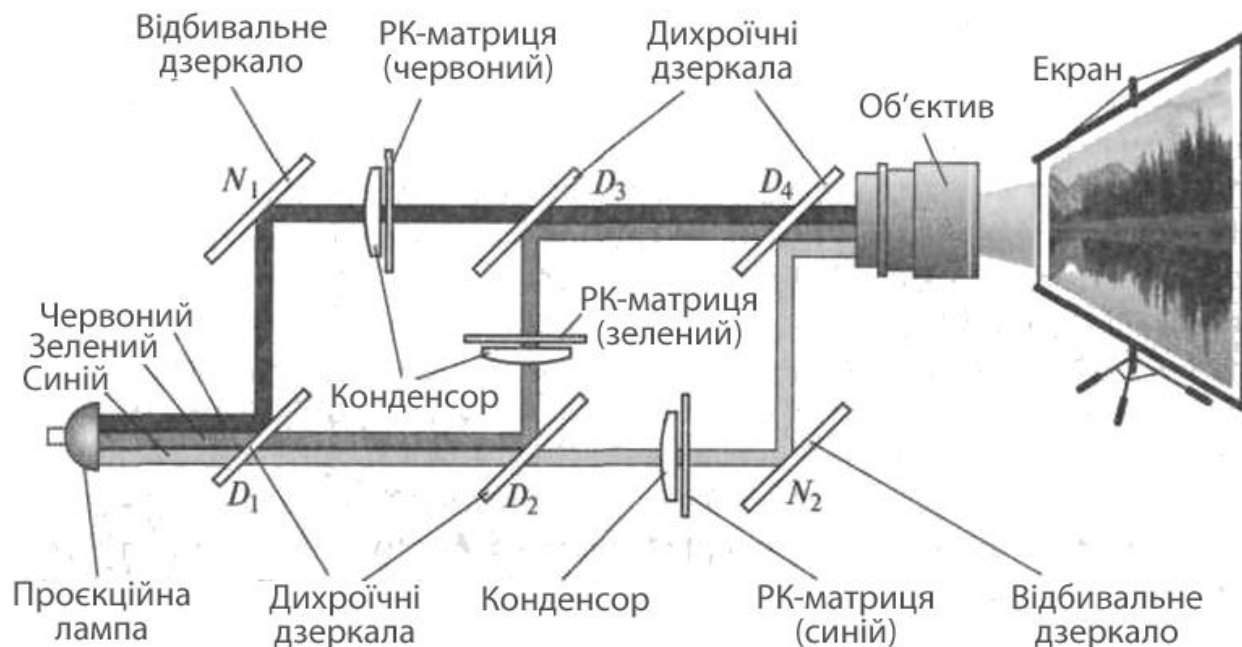


Рисунок 45 – Структурна схема LCD-проектора

Принцип роботи LCD-проектора полягає у наступному. Відеосигнал з комп'ютера або іншого джерела відеоінформації надходить до LCD-матриць, в яких за допомогою електричного поля у рідкокристалічному шарі формується оптичне зображення. Одночасно з цим лампа випромінює світло, що надходить на конденсор, який перетворює його у рівномірний світловий потік. Рухаючись повз напівпроникні дзеркала-фільтри (дихроїчні дзеркала) світловий потік за їх допомогою ділиться на три кольорові складові (червону, зелену і синю) і направляється до відповідних LCD-матриць – червоної, зеленої, синьої. Дихроїчне дзеркало пропускає лише одну довжину хвилі випромінювання, а інші відбиває на основі явища багатопроменевої інтерференції. Таке дзеркало являє собою скляну підкладку з нанесеними діелектричними плівками з різним показником заломлення та товщини (наприклад, TiO_2 , SiO_2). Призначені

дихроїчні дзеркала в проекторах для розкладання білого кольору на три кольори – червоний, синій, зелений, кожний з яких просвічує відповідну LCD-матрицю. Матриці формують відповідні кольорові зображення, які надходять до кольоровозмішувального призматичного блока (в даному випадку це два дихроїчних дзеркала D_3 та D_4 та одне відбивальне дзеркало N_2), в якому формується одне повнокольорове зображення, яке потім через об'єktiv проектується на екран.

Переваги LCD-технології створення проекторів полягають у наступному: точна передача кольорів; забезпечення чіткого та яскравого зображення. Недоліки LCD-технологій є такими:

1. ефект “москітної сітки”, тобто зображення на екрані спостерігається як через сітку (оскільки керуючі елементи розташовується навколо кожного пікселю, створюючи окантовку при просвітленні LCD-матриці, що виглядає на екрані як сітка);
2. недостатньо виражені чорний колір і контрастність (недолік будь-якої TN-матриці);
3. обов'язкове активне охолодження;
4. швидке старіння матриць.

11.3. DLP-проектори. В DLP-технології формування зображення відбувається за допомогою цифрового мікродзеркального пристрою DMD (англ. Digital Micromirror Device) (рис.46). DMD-кристал (матриця) являє собою кремнієву пластину, на поверхні якої розміщено більше мільйона керованих поворотних алюмінієвих мікродзеркал, кількість яких відповідає роздільній здатності проектора. Одне мікродзеркало відповідає одному пікселю. Дзеркала закріплюються на підкладці за допомогою механічних пружинних підвісів. Це дозволяє їм повертатися в межах ± 10 градусів у найсучасніших моделях ± 12 градусів. Отже, кожне дзеркало може займати два положення в залежності від керуючої напруги.

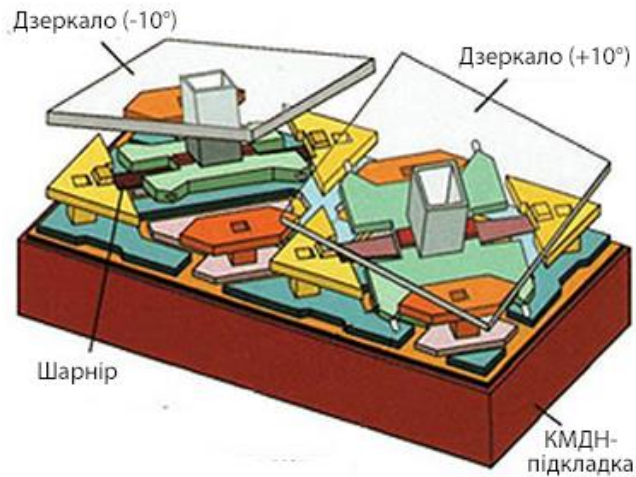


Рисунок 46 – Будова цифрового мікродзеркального DMD-пристрою

В одному положенні дзеркало направляє світло в оптичну систему проектора, при цьому вмикається піксель, який відповідає даному дзеркалу (рис.47). У другому положенні дзеркало направляє світло на світлопоглинач, при цьому піксель, який відповідає даному дзеркалу, вимикається. Час перемикання станів дзеркал не перевищує 2 мкс.

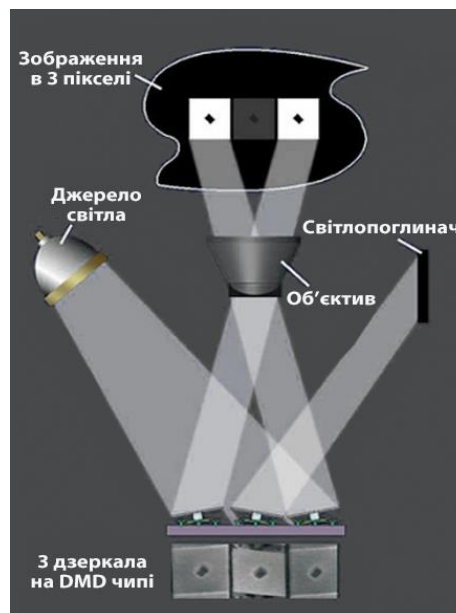


Рисунок 47 – Ілюстрація принципу дії DMD чіпу

Якщо у задану точку екрана в даний момент необхідно проектувати будь-який колір, крім чорного, то мікродзеркало залишається нерухомим і відбиває

світло в об'єктив проектора, а потім на екран. Якщо піксель повинен бути чорним, то мікродзеркало «вимикається» (відхиляється на кут $+10$ градусів у вертикальній площині) і відбиває промінь не в об'єктив, а в «пастку», що гасить промінь. Управління мікродзеркалами здійснюється електричними імпульсами за допомогою контролера.

Оптична схема кольорового DLP-проектора наведена на рис.48. Світло від лампи надходить через фокусуючі лінзи на обертаюче кольорове колесо (світлофільтр), яке складається з червоного, зеленого і синього фільтрів. Зображення на екрані з'являється послідовно в первинних кольорах, а людське око усереднює зображення по кольору. При цьому частота зміна кольору становить 180 Гц, що виявилось недостатнім для виключення зорових артефактів таких, як ефект райдуги. Цей ефект проявляється в тому, що глядач інколи замість однотонно забарвленого зображення бачить спалахи основних кольорів, що чергуються так, ніби веселку.

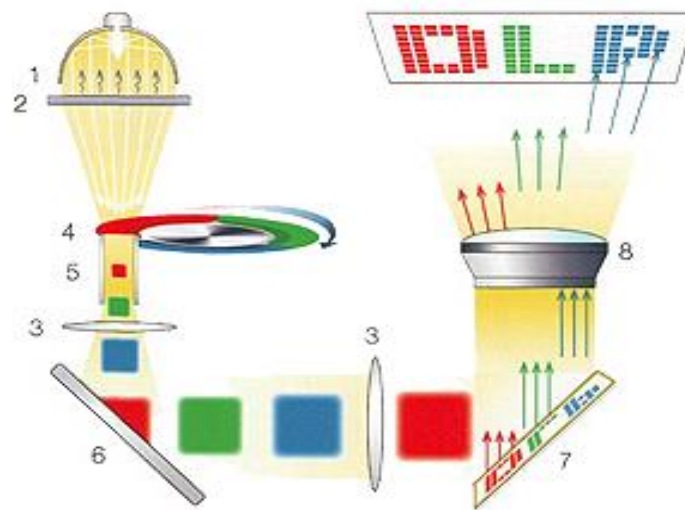


Рисунок 48 – Оптична схема кольорового DLP-проектора

Як правило, такі спалахи стають помітними в процесі переведення зору на фрагменти зображення, розташовані на великій відстані один від одного. В сучасних DLP-проекторах з одним DMD-чіпом частота обертання фільтра

збільшена, а також почали виготовляти з 6 кольоровими секторами, що значно зменшило прояв ефекту райдуги, однак повністю його не усунуло. Переваги даного типу проектора:

1. можливість створити глибокий рівень чорного кольору, а звідси і високу контрастність зображення (це пов'язано з тим, що за допомогою рухомих мікродзеркал вдається більш ефективно забезпечити відсутність світла в чорних пікселях, аніж в LCD-проекторах, де чорний колір потрібно забезпечити, вишикувавши всі РК вздовж електричного поля);

2. відсутність ефекту “москітної сітки”, тобто сітчастого зображення, оскільки керуючі елементи розташовуються під мікродзеркалами, від яких світло відбивається;

3. більша довговічність матриці;

4. компактність, тобто можливість виготовляти міні- та піко-проектори, котрі є портативними приладами, що вміщуються у долоні.

До недоліків DLP-проекторів відносять ефект “райдуги”, який проте може бути усунений в трьохчиповому приладі, однак це ускладнює конструкцію та збільшує вартість такого проектора.

11.4. LCoS-проектори. Рідкокристалічна технологія на відбивання, що використовується в LCoS-проекторах, передбачає модуляцію не прохідного світлового променя, а відбитого. LCoS-матриця представляє собою багат шарову структуру, що розташована на підкладці монокристалічного кремнію (рис.49).

Іншими словами, використовується РК матриця на просвіт, однак нанесена на дзеркало. В даній технології роль відбивальної поверхні відіграють нижні піксельні електроди. Відбивальні властивості матриці визначаються станом РК, що змінюється під впливом змінного електричного поля, яке виникає між відбивальними піксельними електродами та спільним для всіх пікселів прозорим електродом.

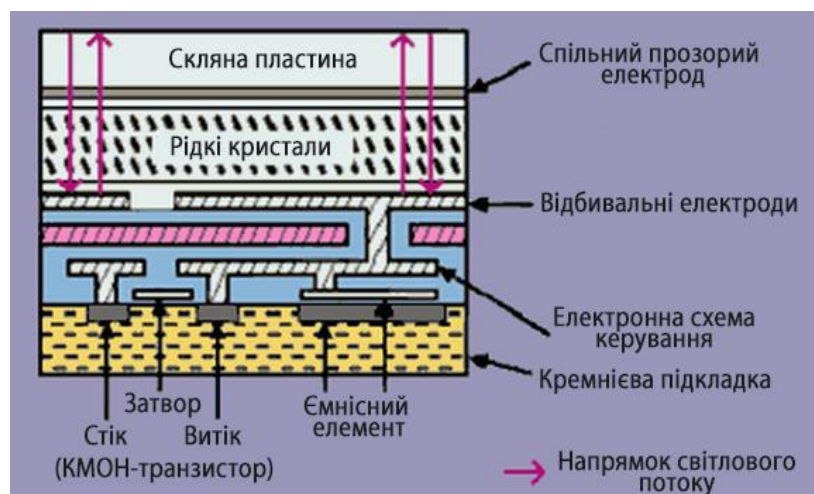
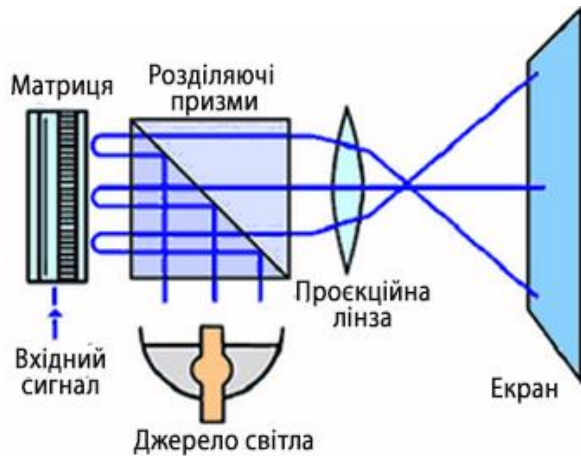


Рисунок 49 – Структура LCoS-матриці

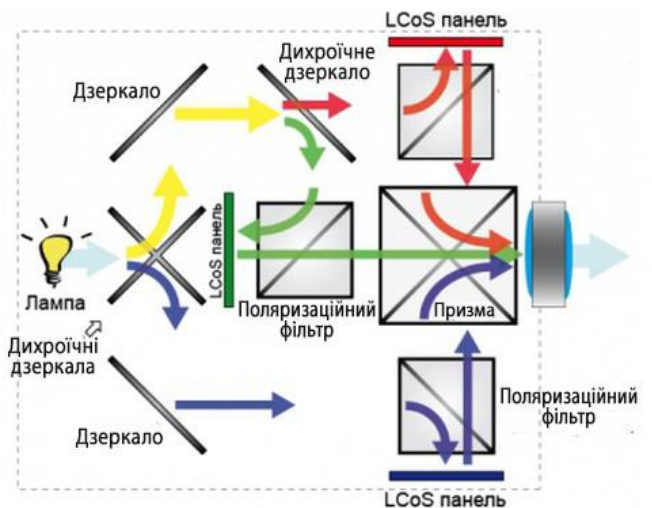
Під впливом електричних сигналів РК або закривають відбиваючу поверхню, або відкривають її, дозволяючи світлу від зовнішнього джерела відбитися від дзеркальної поверхні підкладки. Всі компоненти схеми керування пікселями виконані по комплементарній технології та розташовуються за світломодулюючим шаром рідких кристалів у підкладці, що дозволяє значно збільшити щільність розташування пікселів та забезпечити високу ефективність використання площі кристалу (до 93%).

Одним із головних компонентів схеми LCoS-проектора є дзеркальний поляризатор, який одночасно виконує функції дзеркала, поляризатора та аналізатора (рис.50, а). Так, світлова хвиля, що падає на нього під кутом 45° , розділяється на дві складові – одна з поляризацією, паралельною поверхні дзеркала, а інша – з поперечною поляризацією. Перша складова вільно проходить крізь дзеркало, а інша (корисна) повністю відбивається в напрямку LCoS-матриці.

Для формування кольорового зображення в даній матриці, як і в РК матриці на просвіт, використовуються дихроїчні дзеркала та звичайні дзеркала, а також три відбивальні матриці, дзеркальні поляризатори та кольорозмішувальний призматичний блок (рис.50, б).



а)



б)

Рисунок 50 – Структурна схема монохроматичного (а) та кольорового (б) LCoS-проектора

Як видно з наведеної структурної схеми, світло лампи ділиться дихроїчними дзеркалами на 2 складові – жовте та синє випромінювання. Синє випромінювання потрапляє на звичайне дзеркало, відбивається від нього повністю і перенаправляється ним на поляризаційний фільтр, після якого пройшовши крізь РК матрицю відбивального типу підлягає модуляції. Далі промодульоване синє світло потрапляє на кольорозмішувальний призматичний блок. Жовте світло потрапляє на дзеркало і перенаправляється ним на дихроїчне дзеркало, яке пропускає червону складову, а зелену відбиває. Червона складова через поляризаційний фільтр потрапляє на LCoS-матрицю, модулюється там і відбившись потрапляє на кольорозмішувальний призматичний блок. Зелений колір випромінювання проходить через свій поляризаційний фільтр, далі потрапляє на LCoS-матрицю, модулюється там і відбившись потрапляє на той самий кольорозмішувальний призматичний блок, в якому в кінцевому підсумку змішуються зображення від трьох монохромних матриць, щоб одержати кольорове зображення.

Дана технологія усуває два недоліки попередніх технологій – ефект “москітної сітки”, характерний для LCD-технології (через розташування елементів керування в таких матрицях за світловідбивальним шаром), та ефект “веселки”, що характерно для DLP-технології (через відсутність рухомих частин у конструкції). Крім того, даний тип матриці є більш стійким до потужного випромінювання лампи, оскільки матриця розміщується на охолоджуваній підкладці. Забезпечується вища контрастність зображення та більший час спрацювання, ніж в LCD-матрицях. Однак їх суттєвим недоліком, що заважає їм набуті масового поширення, є на порядок вища вартість, ніж у двох вище розглянутих аналогах.

11.5. Лазерний проектор. Лазерний проектор – це пристрій, що проектує змінні лазерні промені на екран. Лазерний проектор називають інколи наступником електронно-променевої трубки (ЕПВ) тому, що матриця лазерів формує три променя RGB, які потім змішуються і зображення створюється складною системою фокусування та розгортки за допомогою дзеркал. По аналогії з ЕПВ лазерний промінь оббігає проекційний екран зверху донизу до 50 раз за секунду, а око людини сприймає отриману картинку як єдине ціле.

До складу лазерного проектора входять наступні елементи (рис.51). Основою такого проектора є лазерна матриця. При цьому використовується одна матриця для монохроматичного проектора або три матриці – для повнокольорового проектора.

Спочатку для цього використовувались газові лазери, а потім твердотільні напівпровідникові лазери з діодною накачкою. Наступною складовою частиною лазерного проектору є оптичний сканер. Даний сканер може бути гальванометричним, що керується електричним шляхом, осциляторним, який працює на основі механічного резонансу дзеркальної підставки, і мікролінзовим з керуванням на основі п’єзоелектричних актюаторів. Найбільш поширеним видом оптичного сканеру, який використовується в проекторах на сьогодні, є

гальванометричний сканер, що складається з рухомих дзеркал, які закріплені на кінці поворотного валу. Цей вал при обертанні відбиває оптичний промінь, створюючи тим самим необхідну лазерну проекцію на екрані. Головна характеристика такого пристрою – швидкість його роботи. Чим швидше він працюватиме, тим швидшим та чіткішим буде зображення на екрані. Для фільтрації по кольору використовуються дихроїчні дзеркала.

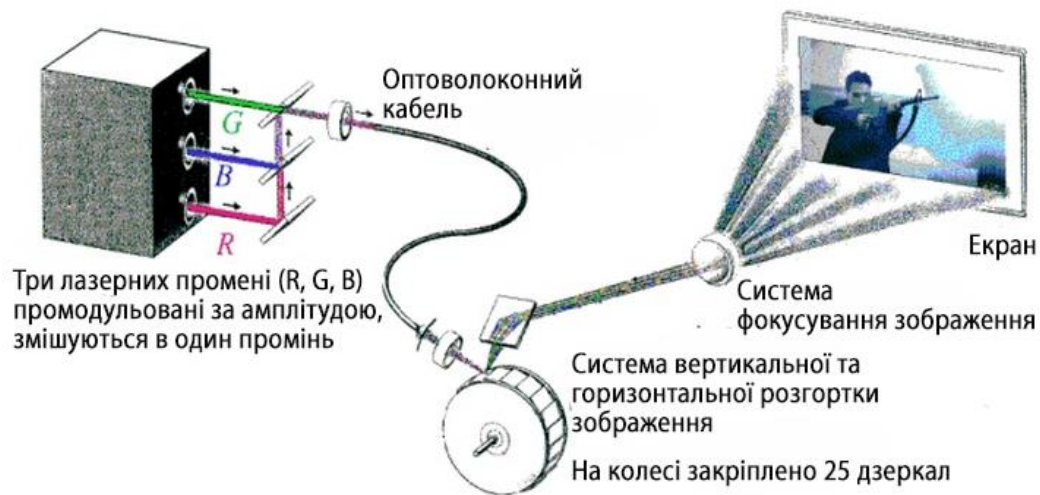


Рисунок 51 – Структурна схема лазерного проектора

До переваг лазерних проекторів відносять те, що реалістичне зображення формується на практично будь-якій, в тому числі і нерівній поверхні великої площі (розмір екранів може бути до декількох десятків метрів), яке характеризується до того ж високою контрастністю та яскравістю. Серійне виробництво таких проекторів розпочалося в 2000 році, однак залишаються певні проблеми з кольоропередачею, крім того вони досить громіздкі та споживають багато енергії. Тому такі проектори використовуються лише для формування професіональних зображень – голограм, 3D-малюнків, логотипів тощо.

11.6. Способи побудови відеостіни. Вище були розглянуті різні види систем безпосереднього та проекційного відображення інформації. Далі мова

підє про відеостіни, що являють собою комбінацію з таких систем. Відео-стіна – це система відеопристроїв (моніторів та проєкційних відеокубів), які об'єднані між собою та формують єдиний екран, що дозволяє відтворювати в багатовіконному режимі великі об'єми інформації з різних джерел. Створювати монолітні монітори площею в декілька десятків квадратних метрів на сьогоднішній день або технічно неможливо, або досить дорого. Крім того, транспортування такої величезної панелі становить велику проблему. Тому відеостіна є ідеальним варіантом створення екрану надвеликого розміру. Відеостіна – це не моноблок, а модульна конструкція, яка дозволяє в одному каркасі встановити в стик необхідну кількість моніторів чи відеокубів і отримати екран як завгодно великого розміру.

Отже, для побудови відеостіни можна скористатись моніторами або відео кубами. Вибір приладів відображення обумовлюється режимом роботи (цілодобово/погодинно), видом інформації, що відображається (статична, динамічна), шириною рамки корпусу монітору/відеокубу (що визначає величину зазору між модулями при їх стикуванні – шов відеостіни).

На сьогоднішній день однією з найбільш ефективних технологій побудови відеостін являється використання рідкокристалічних дисплеїв. Невелика товщина таких дисплеїв дозволяє встановити відеостіну практично в будь-якому місці, а мінімальні відстані між екранами (3-5 мм) забезпечує природне та чітке зображення при стикуванні декількох панелей в відеостіну. Крім того, до переваг використання таких дисплеїв слід віднести: відсутність мерехтіння, яке втомлює очі, низьке енергоспоживання та робота в режимі 24/7.

З метою подальшого зменшення відстані між екранами у відеостіні можна використовувати плазмові панелі, в такому випадку відео стіна буде практично безшовною. Однак в таких системах є ряд суттєвих недоліків, в першу чергу ефект вигорання, а це означає, що така відеостіна неадаптована для демонстрації статичної інформації, крім того вони не придатні для роботи в

режимі 24/7. Тому плазмові панелі рідше використовуються для побудови відеостін, аніж LCD дисплеї.

Більш поширеним є ще один вид модулів для відеостіни – відеокуб, що представляє собою систему зворотної проєкції. Будова відеокубу – система дзеркал, проєктор, просвітний підсилювальний екран та електронні модулі керування (рис.52).

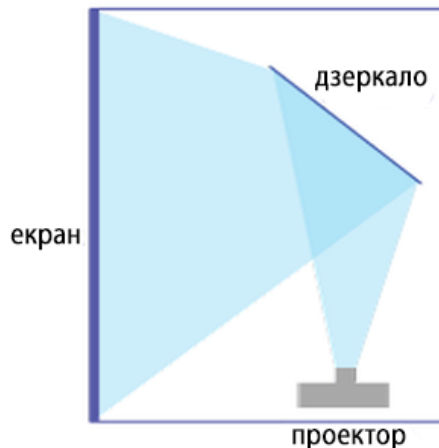


Рисунок 52 – Оптична схема відеокуба

В відеокубі проєктор розташований по іншу сторону екрану по відношенню до глядача, тому система і називається системою зворотної проєкції. Головна особливість відео кубів полягає в тому, що вони мають мінімальну окантовку екрана, тому при збиранні віде стін зазори становлять не більше 1-2 мм і практично не помітні на великому екрані. Відеокуби будуються в основному по DLP-технології, тобто застосовуються мікродзеркальні проєктори. До переваг таких відостін відносять високу якість зображення, можливість неперервного відображення статичної інформації, ресурс роботи такого проєктора становить більше 11 років. Однак відеостіни на основі відеокубів не набули такого значного поширення як відеостіни на основі LCD моніторів. Причинами цього є наступні недоліки використання відеокубів:

1. Ефект зміни кольорів, що властиво відеокубам на основі проєкційних ламп. Проєкційні лампи старіють з різною швидкістю, в результаті чого з часом зображення на поліекрані набуває вигляду клаптикової ковдри – одні куби дають більш синій колір, інші – більш червоний тон тощо. Цього недоліку практично немає в кубах на основі світлодіодів, однак їх яскравість на даний момент ще недостатня для використання на великих екранах.

2. Необхідність забезпечення охолодження, особливо верхніх кубів поліекрану, оскільки нагріте повітря від нижніх кубів підіймається до верхніх модулів. Як правило, виробники пропонують спеціальні вентиляційні короба, однак це додатково ускладнює конструкцію.

3. Досить висока вартість.

Керування відеостіною здійснюється за допомогою контролера. Основні завдання контролера відеостіни – одержання цифрового чи аналогового відеосигналу від одного чи декількох джерел, обробка його та трансляція на кожний монітор окремо через вихідні порти. Для отримання якісного сумарного зображення контролер відеосигналу формує робочу область, що відповідає сумарній роздільній здатності всіх модулів, а потім на отриманий інформаційний простір транслюється відеосигнал. Наступне завдання контролера – стикування зображень окремих модулів відеостіни. Для цього для кожного монітору необхідно виокремити частину зображення із всього інформаційного простору та транслювати його на даний монітор. При цьому контролер має врахувати товщину міжмодульних зазорів та виключити втрату інформації на швах відеостіни.

Використання відеостін значно полегшує процес оперативного прийняття технологічних та керівних рішень за рахунок можливості розміщення одразу всієї необхідної інформації та демонстрації будь-якого контенту для великої аудиторії. Можна виділити дві великі галузі застосування відеостін:

1. Для цілодобового масштабного відображення інформації в диспетчерських та ситуаційних центрах, а також в різноманітних центрах керування. Наприклад, для потреб міністерства оборони, в енергетиці, на транспорті, промисловості, в службах безпеки, в фінансовій сфері (на біржах). Відеостіна забезпечує виведення великої кількості графічної та відеоінформації високої якості, дозволяє спостерігати інформацію від великої кількості джерел та перемикається між ними, виділяючи необхідний в даний момент фрагмент. Все це необхідно для повноцінного сприйняття та аналізу ситуації, що важливо для оперативного прийняття правильних рішень керівником чи групою відповідальних спеціалістів.

2. Для відображення мультимедійної інформації – для трансляції спортивних змагань, в якості презентаційних екранів в конференц-залах, сфері розваг та рекламному бізнесі (англ. Digital Signage, цифрова вивіска, відеореклама на моніторах).

Контрольні запитання

1. В чому полягає процес проєкціювання в оптоелектроніці? Наведіть схему проєкційного пристрою.

2. Які технології виготовлення матриці формування зображення використовуються у виробництві мультимедійних проєкторів?

3. Наведіть структурну схему та опишіть принцип дії LCD-проєктора на основі трьох рідкокристалічних матриць.

4. Що таке ефект “москітної сітки” в LCD-проєкторі?

5. Чим обумовлена в LCD-проєкторі неможливість одержати на зображенні, що проєктується, глибокий чорний колір?

6. Опишіть будову та принцип дії цифрового мікродзеркального DMD-пристрою. За рахунок чого в DLP-проєкторі вдається одержати глибокий чорний колір на зображенні, що проєктується?

7. Яким чином реалізується кольорове проєкціювання в DLP-проекторі?
8. В чому полягає ефекту “москітної сітки” в DLP-проекторі? Які існують способи подолання цього ефекту?
9. Що собою являє LCoS-матриця? Яким чином в ній здійснюється модуляція світлового променя?
10. Що таке дзеркальний поляризатор? Які функції цей поляризатор виконує в LCoS-проекторі?
11. Яка схема використовується в LCoS-проекторі для формування кольорового зображення?
12. Опишіть переваги та недоліки LCoS-проекторів порівняно з LCD- та DLP-проекторами.
13. Якою є будова та принцип дії лазерних проекторів? Назвіть принципову відмінність таких проекторів від LCoS- , LCD- та DLP-проекторів.
14. Які види оптичних сканерів використовуються для побудови лазерних проекторів?
15. За якою технологією може бути виготовлений портативний проектор, що вміщуються на долоні?
16. Що собою являє відеостіна? Які області застосування відеостіни Ви знаєте? Назвіть приклади.
17. Назвіть найбільш ефективну технологію побудови відеостіни. Чому для створення відео стіни не використовуються плазмові панелі та панелі на основі органічних світлодіодів?
18. Що таке відеокуб? Опишіть його будову та принцип дії.
19. Порівняйте два підходи у побудові відеостіни – за допомогою моніторів та відеокубів.
20. Чим обумовлений вибір способу побудови відеостіни?

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басюк Т.М., Жежнич П.І. Методи та засоби мультимедійних систем – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 426 с.
2. Засоби відображення інформації. Електронні дисплеї: навчальний посібник, під ред.. З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 162 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 225 с.
4. Чемес Є.О., Ямпольський Ю.С. Цифровий запис та відтворення інформації – Одес. нац. політехн. ун-т. – О.: Наука і техніка, 2008. – 402 с.
5. Хорунжий В.А. Функціональна мікроелектроніка. Опти- та акустоелектроніка – Харків: Основа, 1995. – 136 с.
6. А. Л. Дмитриев. Оптические системы передачи информации / Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.
7. Башкиров А.И. Оптические системы обработки информации: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 99с.
8. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Кн.1 – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 378 с.
9. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Кн.2 – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 436 с.
10. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. / О. В. Борисов; за ред. Ю. І. Якименка. – К.: Освіта України, 2011. – 462 с.

11. Д.Дж. Стерлинг. Техническое руководство по волоконной оптике. – М.: Лори, 1998. – 280 с.
12. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику: – М.: Мир, 1970. – 364 с.
13. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.
14. Гроднев И.И. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
15. Фриман Р. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Техносфера, 2003. – 416 с.
16. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства. Элементы оптических систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 133 с.
17. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
18. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. – М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
19. Гребнев А. К. Оптоэлектронные элементы и устройства /А.К. Гребнев, В.Н. Гридин, В.П. Дмитриев. – М.: Радио и связь, 1998. – 336 с.
20. Кравченко А.Ф. Физические основы функциональной электроники – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 444 с.
21. Гавриленко В. В. Теорія розпізнавання образів. – К.: Національний транспортний університет, 2015. – 75с.
22. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку: Навч. посіб. / В.Б. Каток. – К., 1999. – 483 с.
23. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. / Г.М. Розорінов, Д.О. Соловійов. – 2-е вид., перероб. і допов. – К.: Кафедра, 2012. – 344 с.
24. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем. – К.: Слово, 2004. – 352 с.

25. Добровська Л. М. Теорія та практика нейронних мереж. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 394 с.
26. Функціонально активні та інтелектуальні матеріали: підручник / Т.В. Панченко [та ін.]; Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. – Дніпро: Акцент ПП, 2017. – 128 с.
27. Оптоелектронні напівпровідникові транспаранти для швидкодійних спеціалізованих обчислювачів: монографія / Г.Л. Лисенко, І.В. Мялківська, Вінницький національн. техн. університет. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 139 с.