

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**СУЧАСНІ ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ**  
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП - 81

Є. В. Радько

Науковий керівник

Ю. М. Шабельник

канд. фіз.-мат. наук, доцент

Завідувач кафедри ЕЗПФ

І. Ю. Проценко

д-р. фіз.-мат. наук, професор

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«25» травня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

**Радька Єгора Віталійовича**

1. Тема роботи Сучасні оптоелектронні системи передачі інформації  
затверджена наказом по університету від «04» травня 2022 р. , № 0316-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 08 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Оптоелектроніка сьогодні розвивається за двома напрямками: електронно-оптичним та оптичним. В рамках електронно-оптичного напрямку використовують принцип фотоелектричного перетворення при внутрішньому фото ефекті та фотолюмінесценцію.

Однією з головних проблем оптоелектроніки є проблема суттєвого зменшення паразитних зв'язків між елементами однієї мікросхеми та між мікросхемами. Використовуючи оптоелектронний принцип можна створити безвакуумні аналоги електронних пристроїв і систем: аналогові та дискретні перетворювачі електричних сигналів, наприклад, генератори, елементи пам'яті, логічні схеми, підсилювачі, ключові елементи, лінії затримки тощо; перетворювачі оптичних сигналів, наприклад, плоскі екрани, підсилювачі світла та зображення; пристрої відтворення інформації (цифрові табло, індикаторні екрани, картинна логіка тощо).

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз та порівняння фізично-конструктивних особливостей оптоелектронних та голографічних систем для запису і зберігання інформації, а також їх застосування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
  1. Фізичні принципи передачі інформації по оптоволокну.
  2. Оптоелектронні системи для запису і зберігання інформації.
  3. Використання голограм для відображення інформації.
  4. Висновки.
  
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
  - Слайди № 1-2 – Загальна інформація
  - Слайди № 3-5 – Фізичні принципи передачі інформації по оптоволокну.
  - Слайди № 6-7 – Оптоелектронні системи для запису і зберігання інформації.
  - Слайди № 8-9 – Використання голограм для відображення інформації.
  - Слайд № 10 – Висновки
  
6. Дата видачі завдання 26.05.2022 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 30.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Методи отримання та властивості нанотрубок.	до 04.06.2022 р.	<i>вик.</i>
3.	Порівняння властивостей вуглецевих та нітрид-борних нанотрубок	до 06.06.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 08.06.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	10.06.2022 р., 10 <sup>05</sup> (дистанційно)	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	16.06.2022 р., 17.06. 2022 р., 10 <sup>05</sup> (дистанційно)	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Є. В. Радько

Керівник роботи

Ю. М. Шабельник

## РЕФЕРАТ

Об'єктом кваліфікаційної роботи є фізичні та конструктивні особливості оптоелектронних систем передачі інформації, а також голографічних систем для запису та зберігання інформації.

Метою роботи є аналіз та вивчення фізично-конструктивних особливостей оптоелектронних систем передачі інформації, оптоволокна та оптоелектронних пристроїв запису і зберігання інформації, їх переваг та недоліків.

Основним принципом оптоелектроніки є використання в як матеріального носія інформації (поряд з електроном) електрично нейтрального фотона. Однак, на відміну від звичайної електроніки й оптики, в оптоелектроніці можлива зміна носія інформації в процесі обробки сигналу.

Робота присвячена проведенню критичного аналізу даних стосовно фізичних принципів функціонування, а також конструктивних особливостей оптоелектронних систем передачі інформації, в тому числі голографічних систем, які використовуються для запису і зберігання інформації.

Робота викладена на 29 сторінках і складається з 3-х розділів, містить 8 рисунків та список використаних джерел із 20 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ФОТОЕФЕКТ, ОПТОЕЛЕКТРОНІКА, СВІТЛОДІОД, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, ГОЛОГРАФІЯ.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ПО ОПТОВОЛОКНУ</b> .....	7
1.1. Фізичні принципи внутрішнього фотоефект.....	7
1.2. Принцип дії фотодіода.....	8
1.3. Властивості оптичних волокон.....	10
<b>РОЗДІЛ 2. ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАПИСУ І ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ</b> .....	13
2.1. Оптична пам'ять і системи візуального відображення інформації.....	13
2.2. Сучасні оптоелектронні пристрої.....	17
<b>РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОГРАМ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ</b> .....	20
3.1. Оптоелектронні запам'ятовуючі пристрої.....	20
3.2. Приклади застосування голограм.....	23
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	27
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	28

## ВСТУП

Оптоелектроніка – це наукова дисципліна, що вивчає фізичні принципи керування оптичними й електронними процесами в різних матеріальних середовищах із метою передачі, приймання, обробки, зберігання й відображення інформації.

Для оптоелектроніки характерний синтез ідей багатьох природничо-наукових дисциплін (фізики твердого тіла, напівпровідникової і квантової електроніки, оптики та ін.). Проте вона являє собою цілісну науку, що має власний напрям досліджень і використовує для розв'язання зазначених завдань ряд фундаментальних фізичних явищ.

Основний напрям сучасної оптоелектроніки – керування інформаційними процесами в мікро- і наноструктурах, тобто прагнення до інтеграції джерел, приймачів і елементів керування випромінюванням в єдиному кристалі або гібридній структурі.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз та вивчення фізично-конструктивних особливостей оптоелектронних систем передачі інформації, оптоволокна та оптоелектронних пристроїв запису і зберігання інформації, їх переваг та недоліків.

## РОЗДІЛ 1

### ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ПО ОПТОВОЛОКНУ

#### 1.1. Фізичні принципи внутрішнього фотоефект

Внутрішній фотоефект проявляється у двох формах: ефект фотопровідності (зміна опору фотодетектора під дією світла) і фотогальванічний ефект (виникнення фотоерс у структурах із внутрішніми потенціальними бар'єрами).

Внутрішній фотоефект – це зміна електричного опору напівпровідника за рахунок генерації додаткових вільних носіїв заряду під дією падаючого на нього випромінювання. Фотодетектори, дія яких базується на цьому явищі, називають фоторезисторами. Структура фоторезистора дуже проста: це може бути монокристалічна пластинка або плівка напівпровідника 2 на діелектрику 1, оснащена металевими контактами 3 (рисунок 1.1, а).

Фоторезистор під'єднується до джерела живлення послідовно з опором навантаження, падіння напруги на якому і реєструється як корисний сигнал (рисунок 1.1, б) [1].

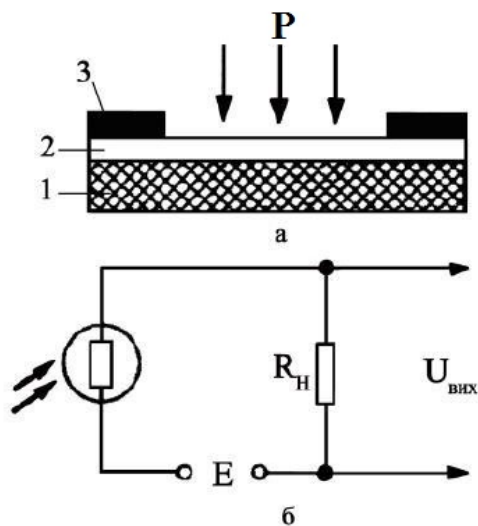


Рисунок 1.1 – Будова (а) та схема ввімкнення (б) фоторезистора:

1 – діелектрик; 2 – монокристалічна плівка напівпровідника;

3 – металеві контакти. Адаптовано із роботи [1]

Фоторезистивний ефект пояснюється збільшенням в напівпровіднику за рахунок енергії випромінювання числа вільних електронів (а відповідно і вакансій – дірок) внаслідок подолання ними енергетичного бар'єра, що відокремлює енергетичні зони валентних і вільних електронів. Зміна електричного опору напівпровідника пов'язано з інтенсивністю світлового потоку лінійною залежністю. Однак слід враховувати, що і сама опір напівпровідника і його зміна під дією випромінювання в сильній мірі залежать від температури. Крім того, внутрішній фотоефект має селективний по довжині хвилі і частоті випромінювання характер [2].

## 1.2. Принцип дії фотодіода

Фотогальванічний (вентильний або фотогенераторний) ефект полягає у виникненні фотоерс при генерації нерівноважних носіїв заряду світлом в області  $p-n$ -переходу або випрямляючого контакту метал–напівпровідник. Фотодетектор на основі структури з одним  $p-n$ -переходом називається фотодіодом.

У стані рівноваги рівень Фермі має одне і те ж значення (положення) по всій структурі. В області просторового заряду  $p-n$ -переходу є внутрішнє електричне поле. Розглянемо фізичні процеси, що відбуваються у фотодіоді при опроміненні його світлом (рисунок 1.2) [1].

При освітленні структури світлом з енергією кванта  $\hbar\omega \geq \Delta E$  в області внутрішнього поля і поза нею виникають пари вільних носіїв заряду. Пари, що виникають в області  $d$ , відразу ж розділяються полем, а носії, що з'явилися на відстанях порядку дифузійної довжини по обидва боки від  $p-n$ -переходу, розділяються після їх дифузійного переміщення в область поля.

При цьому неосновні носії проходять через  $p-n$ -перехід, а основні залишаються в тій же області структури, де вони були створені світлом. Таким чином, освітлення структури призводить до накопичення електронів в  $n$ -області, а дірок – в  $p$ -області. Утворена різниця потенціалів  $U_{ph}$  (фотоерс) зміщує  $p-n$ -перехід у прямому напрямку і знижує висоту потенціального бар'єра для



електронів і дірок (рисунок 1.2, б). У результаті балансу двох зазначених процесів у напівпровіднику встановлюється стаціонарний стан, а величина фотоерс  $U_{ph}$  відповідає потужності падаючого світлового потоку.

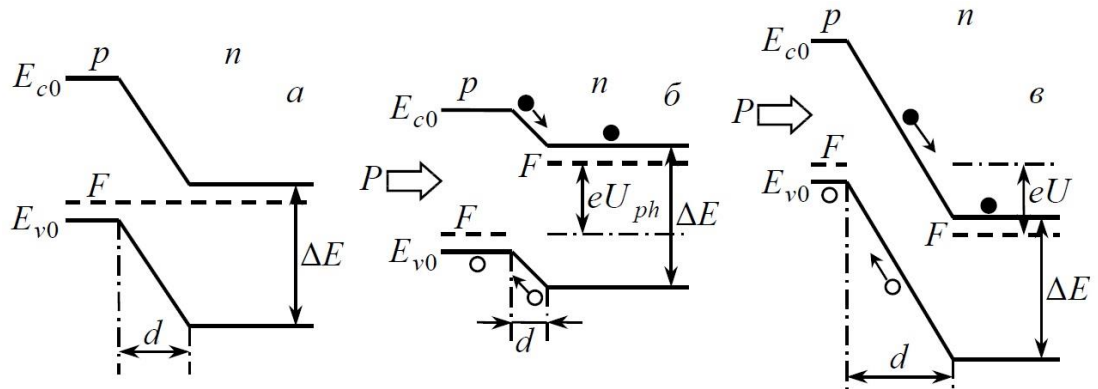


Рисунок 1.2 – Зонні діаграми фотодіода в стані рівноваги (а), фотогальванічному (б) і фотодіодному (в) режимах. Адаптовано із роботи [1]

Інерційність фотодіода залежить від часу дифузії носіїв від місця народження до  $p-n$ -переходу, часу поділу їх у переході і від  $RC$ -постійної структури. При швидкості дрейфу носіїв у полі  $v = 10^4$  м/с і товщині шару просторового заряду 1 мкм час прольоту носіїв через  $p-n$ -перехід дорівнює  $t_p = 0,1$  нс, у той час як характерний час дифузії  $td$  складає майже 100 нс. Послідовний опір  $R$  фотодіода складається з опору об'єму напівпровідника і омичних контактів. Значення  $C$  визначається бар'єрною ємністю переходу. При цьому постійна часу еквівалентного  $RC$ -кола зазвичай не перевищує 1 нс. Таким чином, основним чинником, що обмежує швидкодію фотодіода, є час дифузії.

У дрейфових структурах швидкодія може бути підвищена приблизно на порядок за рахунок збільшення швидкості руху носіїв у протяжному полі. Швидкодія фотодіода залежить і від способу його ввімкнення. Якщо у фотогальванічному режимі гранична частота становить 1 – 2 МГц, то у фотодіодному вона зростає до 200 МГц [3].

### 1.3. Властивості оптичних волокон

**Оптичні втрати.** Матеріалами для оптичних волокон служать різні речовини. У даний час найчастіше використовується висоякісне кварцове скло ( $\text{SiO}_2$ ), леговане оксидами бору (B), титану (Ti), германію (Ge), фосфору (P). Оптичні втрати у волокні складаються із *зовнішніх* (апертурні та френелівські втрати) і *внутрішніх* (втрати на межі серцевини та оболонки, втрати на поглинання і розсіювання у волокні). *Апертурні втрати* пов'язані з розбіжністю ширини діаграми спрямованості джерела випромінювання й апертурного кута волокна [4].

*Френелівські втрати* (Рис. 1.3а) зумовлені відбиванням випромінювання від вхідного торця волокна. Для зменшення цих втрат використовуються фокусуєчі елементи (мікролінзи і т.ін.), а також *імерсування*.

*Втрати на межі серцевини з оболонкою* спричиняються проникненням частини енергії хвилеводних мод в оболонку, де випромінювання поглинається. Мікродофекти поверхні, а також вигин волокна призводять до порушення повного внутрішнього відбивання і перетворення частини мод серцевини в моди оболонки або в просторові моди.

*Поглинання в серцевині волокна* пов'язане з присутністю у кварці неконтрольованих домішок заліза (Fe), міді (Cu), хрому (Cr), нікелю (Ni), кобальту (Co), ванадію (V), магнію (Mg), а також слідів води у вигляді гідроксидних груп OH-. У результаті поліпшення процесу очищення кварцу втрати, пов'язані з наявністю металів і води, зведені до мінімуму [5].

Постійною причиною втрат залишається поглинання в самому кварці, яке різко зростає зі збільшенням довжини хвилі випромінювання. При  $\lambda \geq 2$  мкм кварцове волокно практично непрозоре. За природою скло є аморфною структурою. Тому в ньому є сторонні домішки, мікропорожнини та інші неоднорідності розмірами порядку  $\lambda$ . Ці неоднорідності призводять до локальних змін показника заломлення, на яких світло зазнає розсіювання, що називається *розсіюванням Мі*.

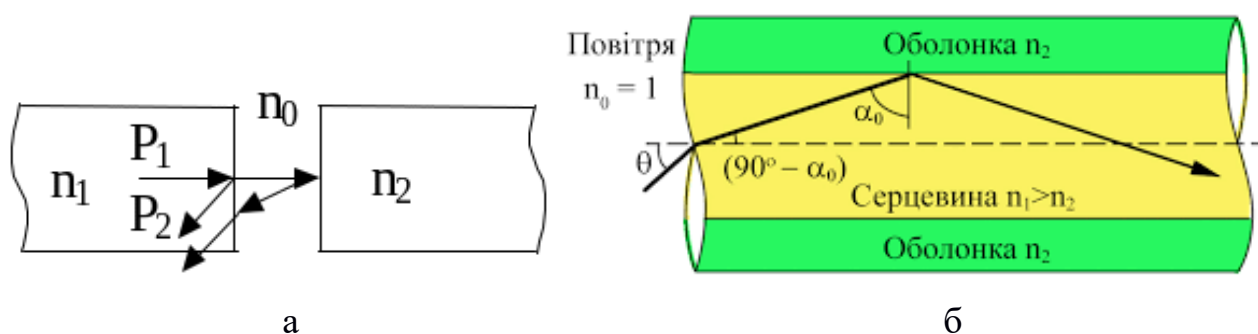


Рисунок 1.3 – Френелівські втрати (а) Втрати на межі серцевини з оболонкою (б). Адаптовано із роботи [9]

Однак і в тих волокнах, де ці неоднорідності усунені, залишається розсіювання, зумовлене замороженими флуктуаціями густини, а отже, і показника заломлення самого кварцового скла. Ці постійно наявні флуктуації зумовлюють *власне*, або *релеєвське розсіювання*. Релеєвське розсіювання різко (пропорційно  $1/\lambda^4$ ) зростає зі зменшенням  $\lambda$ , тому воно є основною причиною втрат у кварцових волокнах на довжинах хвиль коротше 1,5 – 1,6 мкм. Мінімум втрат припадає на область 1,2 – 1,7 мкм. До теперішнього часу отримані волокна з коефіцієнтом згасання 0,16 дБ/км на довжині хвилі 1,57 мкм [6].

**Дисперсійні властивості волокна.** Якщо на вхід волокна подати короткий світловий імпульс, то на його виході замість одного імпульсу буде спостерігатися ціла серія імпульсів або один імпульс, але розширений щодо вхідного. Ці явища зумовлені дисперсійними властивостями волокна. Існують чотири основні види дисперсії: міжмодова, матеріальна, хвилеводна і поляризаційна. Міжмодова дисперсія. Як відомо, різні моди поширюються під різними кутами до осі волокна. Тому мовою променевої оптики розширення імпульсу можна пояснити неоднаковістю шляхів проходження різними модами, при заданій довжині волокна  $l$ .

Хвилеводна дисперсія. Цей вид дисперсії зумовлений тим, що частина енергії хвилеводної моди поширюється в оболонці. Частина випромінювання, що проникає в оболонку, залежить від  $\lambda$ . Це приводить до залежності постійної поширення і швидкості поширення світла в даній моді від  $\lambda$ . Оскільки світловий

імпульс завжди має кінцеву ширину спектра, він зазнає розширення навіть у тому випадку, коли переноситься однією модою. Цей механізм розширення і називають хвилеводною дисперсією. Хвилеводну й матеріальну дисперсії разом називають *хроматичною дисперсією*. Хвилеводна дисперсія набагато менша за матеріальну, яка, у свою чергу, значно менша за міжмодову.

**Ефект Саньяка: волоконно-оптичний гіроскоп.** Як відомо, дія механічного гіроскопа базується на утриманні осі обертання тіла в певному напрямку. Такий гіроскоп містить масивні частини, що обертаються. Принцип дії волоконно оптичного гіроскопа ґрунтується на ефекті Саньяка і дозволяє вимірювати кутову швидкість об'єктів за допомогою системи статичного типу.

Виникнення ефекту Саньяка пояснюється на (рисунку 1.4) Випромінювання від джерела 1 за допомогою розщеплювача променя 2 спрямовується по круговому шляху у двох протилежних напрямках. Якщо об'єкт, на якому розташована ця система, перебуває в спокої, то шляхи, які проходять обидві хвилі до складання в розщеплювачі, будуть однаковими. У цьому випадку фазовий зсув між зустрічними хвилями дорівнює нулю. Якщо ж об'єкт обертається відносно осі  $O$  в інерційному просторі, то між світловими хвилями, що рухаються назустріч одна одній, виникає фазовий зсув. Це явище і називається ефектом Саньяка [4].

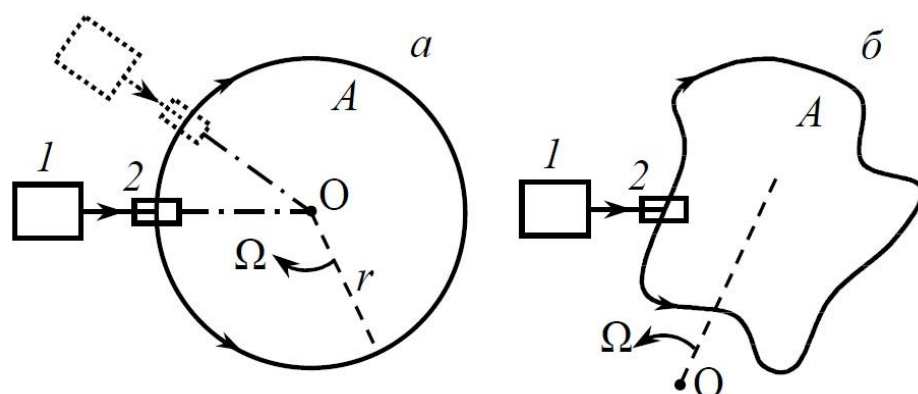


Рисунок 1.4 – Виникнення ефекту Саньяка в оптичному волокні з круговим контуром (а) і контуром довільної форми (б). Адаптовано із роботи [4]

Аналіз ефекту на основі більш детального підходу в рамках загальної теорії відносності приводить до висновку, що величина зсуву фаз між двома хвилями в інтерферометрі Саньяка не залежить від форми шляху і положення центру обертання тіла, а також від показника заломлення середовища, в якому поширюється випромінювання. Отже, вимірюючи зсув фаз між двома зустрічними хвилями в інтерферометрі Саньяка, можна визначити кутову швидкість обертання об'єкта, на якому розташований інтерферометр. Якщо одержувані значення  $\Omega$  проінтегрувати за часом, то отримаємо кут повороту об'єкта протягом заданного проміжку часу [6].

## РОЗДІЛ 2

# ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАПISУ І ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

### 2.1. Оптична пам'ять і системи візуального відображення інформації

#### Оптична пам'ять

Ідеальне запам'ятовуюче середовище для оптичної пам'яті повинно володіти такими основними властивостями:

1. Можливістю запису, зчитування і стирання інформації;
2. Високою просторовою роздільністю;
3. Високою чутливістю до запису;
4. Відсутністю спотворень інформації при зчитуванні;
5. Великим часом зберігання;
6. Великим відношенням сигнал/шум;
7. Лінійною характеристикою запису.

Жодне з відомих до теперішнього часу середовищ не забезпечує повною мірою виконання всіх перерахованих умов. Будь-яке з них лише так чи інакше наближається до ідеального середовища за деякими із своїх характеристик. За характером процесів, що протікають під час запису інформації, можна виділити середовища для *постійної* (архівної) *пам'яті* і середовища для *оперативної пам'яті*. В станньому випадку запам'ятовуюче середовище повинно володіти *реверсивністю*, тобто забезпечувати можливість повторного запису інформації після стираючого впливу [7].

Цифровий запис інформації можна здійснювати шляхом пропалювання або проплавлення за допомогою сфокусованого лазерного променя отворів у тонких (~ 50 нм) плівках із платини (Pt), вісмуту (Bi), родія (Rh) та інших речовин, нанесених на прозору основу. Інший варіант – створення мікрозаглиблень у полівінілхлоридній пластині, поверхня якої вкрита шаром телуру (Te) товщиною 20 – 40 мкм (телур легкоплавкий і добре поглинає ІЧ-випромінювання). У

металевому шарі можна формувати не заглиблення, а мікробугорки. Як основа в цьому випадку використовується діелектрик, що добре випаровується, який вкривається тугоплавким металом – титаном (Ti) або платиною (Pt). У результаті випаровування підшару діелектрика під дією лазерного променя у відповідному місці утворюється опуклість, оскільки сама плівка не проплавляється [8].

Плівка із записаною на неї інформацією вкривається досить товстим прозорим захисним шаром, тоді забруднення й мікродфекти його поверхні виявляються не у фокусі лазерного променя і при зчитуванні інформації не спотворюють корисний сигнал. За цим принципом побудовані широко застосовувані в даний час *оптичні компакт-диски* (CD-ROM та ін.) для комп'ютерів.

**Принцип голографічного запису інформації.** Щільність запису інформації в оптичних запам'ятовуючих пристроях обмежується межею, згідно з якою діаметр сфокусованого пучка не може бути меншим, ніж довжина хвилі випромінювання. При записі двійкової інформації кожен біт займає на матеріальному носії майданчик величиною порядку  $\lambda^2$ . При  $\lambda \approx 1$  мкм гранично досяжна щільність запису становить приблизно  $10^8$  біт/см<sup>2</sup>. При записі інформації голографічним способом кожна елементарна ділянка носія містить "відбиток" усього інформаційного масиву. Тому щільність запису значно вища і досягає  $10^{11} - 10^{12}$  біт/см<sup>2</sup>.

*Голографічна пам'ять* ґрунтується на реєстрації інтерференційної картини, що утворюється в результаті взаємодії світлової хвилі, відбитої від об'єкта або такої, що пройшла через нього (*об'єктної хвилі*), і хвилі, що приходить безпосередньо від джерела світла (*опорної хвилі*). Взаємодіючі хвилі повинні бути когерентними. Якщо зафіксовану на матеріальному носії інтерференційну картину (*голограму*) освітити тим же опорним джерелом, що і під час запису, то в результаті взаємодії опорної хвилі з голограмою утвориться хвиля, яка відновлює зображення об'єкта в тій частині простору, де під час запису знаходився об'єкт. На відміну від звичайного фотознімка, у голограмі міститься

інформація не тільки про розподіл амплітуди, але і про розподіл фази об'єктної хвилі. Фазові співвідношення між опорною і об'єктною хвилями визначають рисунок інтерференційної картини, а амплітуда хвиль визначає її контраст. Тому за допомогою голограми відновлюється повна копія об'єктної хвилі, а сама голограма має надзвичайно високу інформаційну ємність [9].

При записі голограми світло від кожної точки об'єкта падає на всю поверхню голограми. Тому кожна її ділянка містить інформацію про весь об'єкт і може бути використана для відновлення повного зображення об'єкта. Чим більша ця ділянка, тим із кращим співвідношенням сигнал/шум буде відновлюватися зображення об'єкта. Тому для голографічного запису характерна висока надійність і перешкодозахищеність – на її якість суттєво не впливають різні дефекти голограми (подряпини, забруднення і т. ін.). Відношення потужності світлової хвилі у відновленому зображенні до потужності відновлювальної хвилі називається *дифракційною ефективністю*.

Схема установки для голографічного запису інформації виглядає наступним чином (рисунок 2.1) [10].

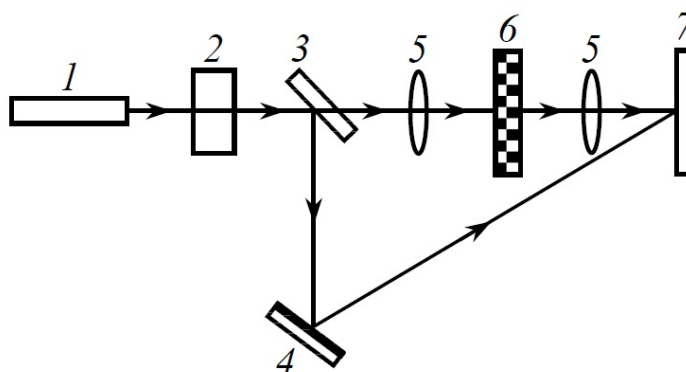


Рисунок 2.1 – Схема голографічного запису інформації: 1 – лазер; 2 – дефлектор; 3 – напівпрозора пластинка; 4 – дзеркало; 5 – об'єктив; 6 – об'єкт; 7 – запам'ятовуюче середовище Адаптовано із роботи [10]

За допомогою напівпрозорої пластинки 3 випромінювання розділяється на дві когерентні хвилі, одна з яких спрямовується на об'єкт, а інша використовується як опорна. За допомогою відхиляючих систем (дефлекторів або



дзеркал) і об'єктна, і опорна хвилі можуть бути спрямовані під різними кутами в різні ділянки реєструючого середовища. Якщо під час запису щоразу змінювати кут падіння опорної хвилі, то одна і та ж ділянка середовища буде містити кілька незалежних голограм. При відновленні зображення напрямок відновлювальної хвилі має відповідати напрямку опорної в режимі запису голограми. Зазначимо, що збільшення кількості накладених голограм в одному носії приводить до зменшення дифракційної ефективності запису.

Голограма може бути як *двовимірною* (коли товщина реєструючого середовища набагато менша за період інтерференційної картини), так і *тривимірною (об'ємною)*. При відновленні зображення тривимірна голограма поводить ся як об'ємна дифракційна ґратка. У цьому випадку на 125 інтерференційних шарах відбувається бреггівська дифракція відновлювальної хвилі, і інтенсивність випромінювання, що виходить із середовища, буде відмінною від нуля при виконанні умови Бреґга:

$$2d \sin \theta B = \lambda \quad (2.1)$$

де  $d$  – відстань між сусідніми шарами в голограмі;  $\theta B$  – кут між падаючим світлом і площиною шарів. З формули (2.1) видно, що тривимірна голограма володіє спектральною селективністю. Це дуже важлива властивість, оскільки вона дозволяє використовувати для відновлення голограми випромінювання із суцільним спектром, наприклад сонячне. Вибирає довжину хвилі в цьому випадку сама голограма відповідно до рівності (2.1). Крім того, ця властивість дозволяє записувати в одному й тому ж середовищі безліч голограм за допомогою опорних випромінювань з різною довжиною хвилі. Виділення потрібної інформації здійснюється шляхом опромінення голограми світлом певної довжини хвилі [11].

Якщо голограма записується в шарі фотоемульсії, то відновлювальна хвиля змінюється голограмою як за інтенсивністю, так і за фазою (під час запису змінюється прозорість, товщина і показник заломлення емульсії). Якщо ж голограма записується в прозорому матеріалі (який володіє, наприклад,

фотохромними або магнітооптичними властивостями), то змінюється тільки фаза відновлювальної хвилі. У зв'язку з цим розрізняють *фазові* й *амплітудні* голограми. Голографічний запис може використовуватися як у пристроях постійної, так і реверсивної пам'яті [12].

## 2.2. Сучасні оптоелектронні пристрої

Оптоелектронний прилад (ОЕП) – це прилад, що випромінює або перетворює електромагнітне випромінювання. Він може бути чутливим до електромагнітного випромінювання в інфрачервоній, видимій і (або) ультрафіолетовій областях спектра. У оптопарах і в деяких елементах інтегральної оптики зазначені явища можуть використовуватися для внутрішніх взаємодій їх елементів. Всі відомі оптоелектронні прилади в даний період можна умовно класифікувати на наступні групи [13]:

- 1) лазери - квантові підсилювачі і генератори ненапівпровідникові (газові, твердотільні на діелектриках і рідинні);
- 2) напівпровідникові випромінювачі;
- 3) приймачі випромінювання;
- 4) оптрони;
- 5) оптопари;
- 6) елементи інтегральної оптики.

Напівпровідникові випромінювачі - це оптоелектронні напівпровідникові прилади, що перетворюють електричну енергію в енергію електромагнітних хвиль в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій області спектра.

Багато з випромінювачів у видимій області спектра і інфрачервоні випромінюючі світлодіоди (ІК-світлодіоди) можуть випромінювати тільки некогерентні електромагнітні хвилі.

До випромінювачів видимій області спектра відносять світловипромінюючі діоди (СВД) і електролюмінесцентні осередки - прилади відображення інформації (порошкові і плівкові випромінювачі).

СВД малої випромінюваної потужності забезпечують генерацію світлових імпульсів малої тривалості, а великої потужності - можуть бути джерелом потужного світла і навіть елементами вуличного світлофора або використовуватися замість галогенних ламп автомобіля.

Випромінювачі у видимій області спектра виготовляють у вигляді простого індикатора (світлодіодного) або у вигляді знакового індикатора, шкали або екрану.

Інфрачервоний випромінює світодіод – це напівпровідниковий випромінювач, який представляє собою діод, який здатний випромінювати енергію в інфрачервоній області спектра. ІК-світлодіоди призначені для пристроїв зв'язку, використовуються в оптронах як датчики, а також у багатьох приладах і пристроях [14].

## РОЗДІЛ 3

### ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОГРАМ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

#### 3.1. Оптоелектронні запам'ятовуючі пристрої

Розробка оптичних систем передачі інформації та запам'ятовуючих пристроїв на основі оптоволокон зумовлена тим, що ці пристрої мають призначення, які працюють за дещо іншими фізичними принципами (наприклад, магнітна і напівпровідникова пам'ять). Розвиток електроніки, вимоги до обробки великих об'ємів інформації не можуть повністю задовольнити існуючі оптоелектричні пристрої. Тому потрібно розвивати нові напрями і використовувати нові пристрої, такі як пристрої оптичної пам'яті, що базуються на двох методах запису і вибірки інформації: послідовному та паралельному. У пристроях, що відносяться до першого типу, використовують направленість світлового променя, а у пристроях другого типу – голограмах – когерентність лазерного випромінювання [15]. У запам'ятовуючих пристроях послідовного типу запис інформації здійснюється за допомогою випалювання лазерним променем отворів в металевій плівці, яка розміщується на прозорій основі. У цьому випадку направлення лазерного активного променя здійснюється механічно (відносно зміни взаємного положення променя та запам'ятовуючого середовища) або може бути змінена за допомогою дефлектора, який, своєю чергою, відхиляє світловий промінь за підготовленою програмою. При записі інформації методом випалювання отвори у металевій плівці відповідають логічній одиниці, а відсутність цих отворів – логічним нулем. У якості запам'ятовуючого середовища використовують часто поліефірні плівки, що металізовані вісмутом або радієм, а також фотоплівки і пластинки, фоторезисти тощо. Але потрібно відмітити ту особливість, що органічні матеріали мають схильність до старіння. Найкращі стабілізаційні властивості при довготривалому зберіганні інформації характерні для оптичних запам'ятовуючих пристроїв. Матеріалами для цього є

плівки хрому на склі, у яких швидкість запису становить  $3 \times 10^4$  біт/с, а ємність пам'яті –  $10^{18}$  біт [15].

В основі голографічного принципу запису інформації, що зображений на рисунок 3.1 є фіксація за допомогою fotocутливого шару інтерференційної картинки, яка завжди створюється двома когерентними хвилями: відбитою від об'єкта запису або ж хвилею, яка пройшла крізь нього, а також допоміжною або опорною. Картинка, яка фіксується на фотопластинці містить у собі повну інформацію про відбиту від об'єкта хвилю, що враховує інтенсивність, фази коливань. Цю картинку називають голограмою. При освітленні голограми опорним променем відбувається її відновлення і ми бачимо зображення об'єкта. До переваг та особливостей голографії можна віднести можливість запису великого числа голограм на одній невеликій пластині у випадку використання різнонаправлених опорних пучків. Об'єкт запису – двомірна матриця двоїчних знаків [15].

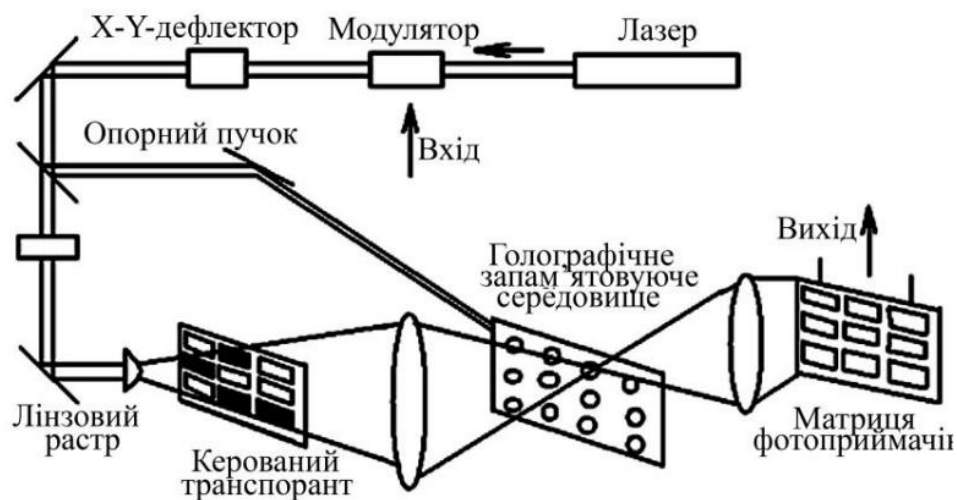


Рисунок 3.1 – Голографічний запам'ятовуючий пристрій. Використання голографічного принципу в пристроях пам'яті зумовлює ряд їх особливостей.

Адаптовано із роботи [15]

Характерними особливостями голографії є висока щільність запису інформації, що властива усім оптичним системам і зумовлена достатньо малою довжиною хвилі світла  $\lambda$ .

– По-друге, це можливість зчитування інформації у вигляді масивів. Це дозволяє значно підвищити продуктивність оптичної системи і зменшити число інтегральних мікросхем, що займають достатньо багато місця. Швидкодія оптоелектронного пристрою може бути на декілька порядків вища, ніж дефлектора, який здійснює сканування лазерного променя. У цьому випадку у голографічних системах швидкодія запам'ятовуючого пристрою щезбільшується.

– По-третє, голограми характеризуються високою захищеністю від перешкод, інформація з кожної частини транспаранта записується у вигляді інтерференційної картини на всій поверхні фотопластинки. Голограма також не чутлива до мікродфектів, якими можуть бути порошинки, проколи тощо, що особливо присутнє в порозрядних системах запису інформації.

– Інформація записується в аналоговій формі. Це відрізняє голографічні запам'ятовуючі пристрої від усіх інших видів запам'ятовуючих пристроїв.

– Можна реалізувати в в одному оптоелектронному приладі і зберігання, і обробки інформації.

– Можливість запису інформації в об'ємі фотореєструючого матеріалу.

– Зменшені вимоги до точності механічного юстування окремих елементів. Це пов'язано з тим, що голограма в закодованій формі несе інформацію про положення об'єкту.

Зазвичай характеристики голографічних запам'ятовуючих пристроїв суттєво залежать від властивостей фотореєструючих матеріалів. Стандартні фотопластинки, які використовуються в голографічних запам'ятовуючих пристроях, забезпечують поєднання високої роздільної здатності ( $3 \times 10^3$  ліній/мм) та фоточутливості, що становить  $10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>. Ефективність зчитування, становить приблизно 5 %. У фотоемульсій на базі біхромату желатину вдається досягнути ефективності зчитування до 30% в тонких і до 90% в товстих плівках. У пристроях оптичної пам'яті необхідні висока направленість і когерентність світлового променя. Цим вимогам з урахуванням ціни та габаритів найкраще задовольняє гелій-неоновий лазер. Для підвищення щільності запису слід

використовувати більш короткохвильові лазери: аргонові ( $\lambda = 0,49$  мкм), гелій – кадмієві ( $\lambda = 0,32$  мкм), ксенонові ( $\lambda = 0,36$  мкм) і криптонові ( $\lambda = 0,35$  мкм) [15].

### 3.2. Приклади застосування голограм

Одним з прикладів застосування голограм є голографічна інтерферометрія. Від класичної інтерферометрії, при якій об'єкти досліджень повинні мати поверхні оптичної якості, голографічна інтерферометрія відрізняється відсутністю цієї вимоги. У цьому випадку поверхні, які досліджуються можуть відбивати світло також і дифузійно. Ще однією перевагою голографічної інтерферометрії перед усім відомою класичною є відтворення форми зареєстрованої хвильової поверхні у ті моменти часу, коли предмет вже може і не існувати, так званої голографічної пам'яті. Хоча аналіз голографічних інтерференцій є досить складним. За допомогою голографічної інтерферометрії можна досліджувати динамічні процеси, процеси деформації, об'єкти, що рухаються тощо [16].

Голографічна обробка інформації відбувається у декілька етапів. Голографічний запис та зчитування – одним з найперспективніших напрямків пам'яті, що характеризується високою ємністю. У голографічній системі інформація просторово розподілена, де кожному біту інформації відповідає своя окрема інтерференційна картина. Таким чином, під час запису достатньо великої кількості інформації одночасно або послідовно формується складна інтерференційна картина. У випадку відтворення інформації її можна розділити окремі картини інтерференції при умові, що їх положення відрізняються хоча б на один період решітки.

За допомогою голографічного запису також можна отримати різні оптичні елементи. Такі як голографічні дифракційні решітки, зонні пластини, голографічні оптичні елементи для корекції оптичних аберацій тощо. Уже є відомості, що виготовлені голографічні диски ємністю до 200 ГБ.

Ще однією галуззю застосування голографії є художня голографія та кінематограф. Можна також проводити синтез голограм за допомогою обчислювальної техніки [17].

У приладі, що виготовляє компанія InPhase, який використовується для запису та відтворення інформації на основі об'ємної голографії, який зображений на рисунку 3.2 використовується класична схема з двома неколінеарними світловими променями. Науковцями зазначеної компанії було створено перший в світі дисковод, який містить вбудовану систему радіоідентифікації (RFID). У дисководі використовують диски об'ємом 300 Гб з однократним записом, що призначені для професійного архівування [17]. Довжина хвилі лазера при цьому дорівнює 407 нм, а обсяг сторінки – 1,4 Мб, ймовірність помилки при роботі не перевищує значення 10-12. А середній час роботи становить приблизно 100000 годин. Термін зберігання інформації становить до трьох років, а архівного зберігання – більше 50 років.

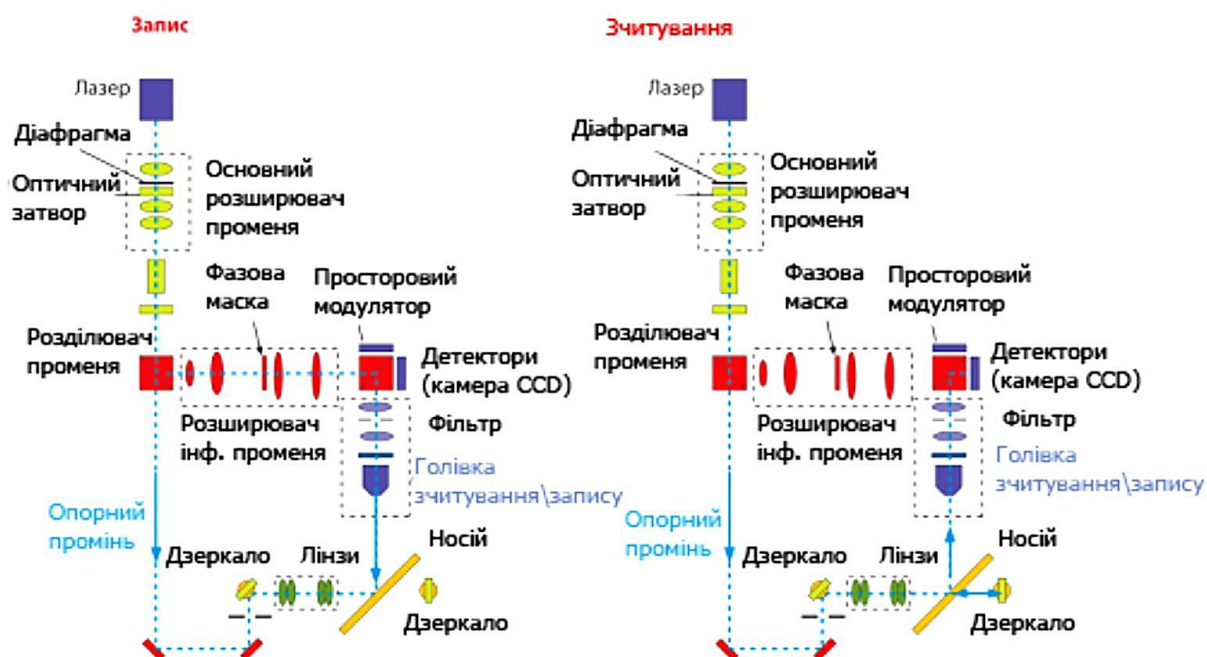


Рисунок 3.2 – Схема приладу запису інформації на основі об'ємної голографії компанії InPhase. Адаптовано із роботи [17]



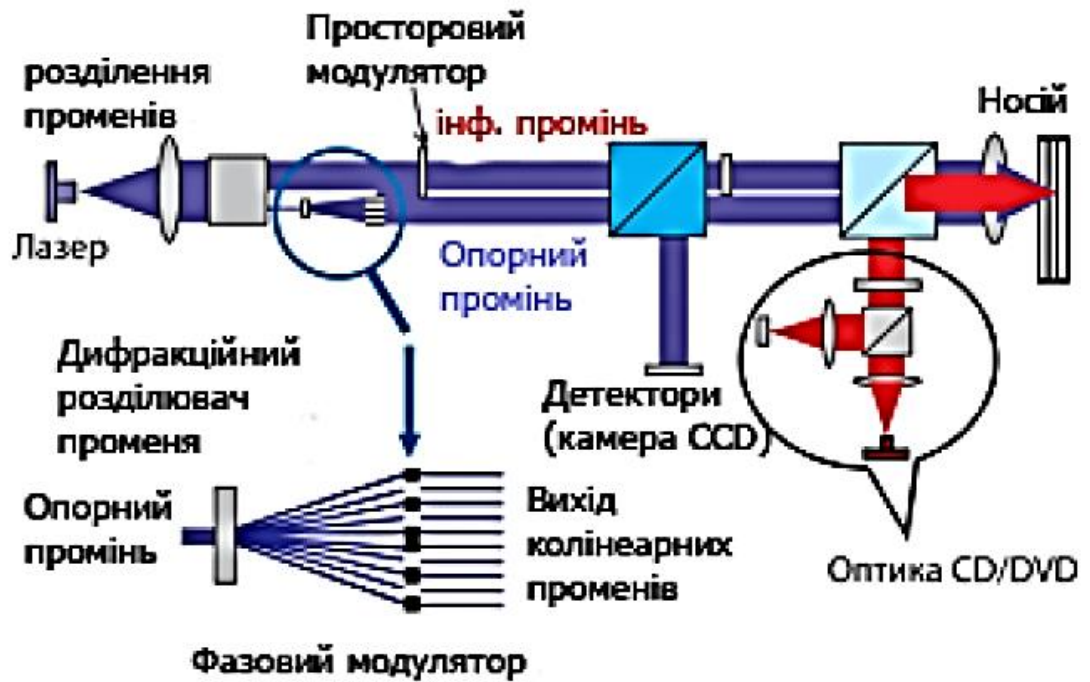


Рисунок 3.3 – Схема приладу запису інформації на основі об'ємної голографії компанії Optware. Адаптовано із роботи [18]

Інша компанія – Optware, використовує колінеарні промені, що дозволяють значно спростити конструкцію системи читання/запису інформації та підвищити надійність приладу (рисунок 3.3) [18].

Колінеарна система, що застосовується в приладі, може використовувати диски з адресними мітками, які нанесені на поверхню гальванічного покриття. Подібна технологія до цієї технології використовується в CD і DVD дисках. Використовуються два типи лазерів: зелено-блакитний лазер зчитує і записує дані, а лазер, який генерує сигнал в червоній області спектру використовується для прецизійного позиціонування. Завдяки цьому дисководи Optware можуть працювати з дисками вище зазначених обох типів [19].

Ще однією додатковою важливою особливістю голографічної пам'яті є те, що записана у такий спосіб інформація може бути прочитана лише з такими самими параметрами, які були при записі інформації. Також слід відмітити, що експериментальні розробки нових голографічних систем ведуться тільки у напрямі збільшення об'єму інформації, що можна записати та швидкістю її

запису. Цього може виявитися недостатньо для зберігання інформації. Для збільшення конфіденційності можна, як варіант, використовувати властивості голографічної 3D пам'яті. Ця технологія дає можливість розділяти частини інформації або закривати доступ до інформації з допомогою приховування параметрів запису вищевказаної інформації. У зв'язку з цим до приладів запису та зчитування цифрової інформації приділяють ряд вимог [20], серед яких точність механічної системи та стабільність світлового потоку і лазера. Також важливими параметрами при запису інформації на зовнішній носій є кут перетину опорного та інформаційного променів оптичного лазера, частота світла. Тільки з цими вихідними параметрами можна буде зчитати інформацію з носія в майбутньому.

## ВИСНОВКИ

1. Був проведений аналіз та порівняння фізичних принципів функціонування та конструктивних особливостей сучасних оптоелектронних систем передачі, запису і зберігання інформації інформації.

2. Оптичні втрати у волокні складаються із зовнішніх (апертурні та френелівські втрати) і внутрішніх (втрати на межі серцевини та оболонки, втрати на поглинання і розсіювання у волокні).

3. Стандартні фотопластини, які використовуються в голографічних запам'ятовуючих пристроях, забезпечують високу роздільну здатність ( $3 \times 10^3$  ліній/мм) та фоточутливості  $10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>. Ефективність зчитування, становить приблизно 5 %.

4. Для підвищення щільності запису для оптоволоконних систем (голограм) використовуються короткохвильові лазери, до яких відносяться аргоніві з довжиною хвилі  $\lambda = 0,49$  мкм, гелій-кадмієві –  $\lambda = 0,32$  мкм, ксенонові –  $\lambda = 0,36$  мкм та криптонові –  $\lambda = 0,35$  мкм.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фотоелектроніка та оптоелектронні прилади: навчальний посібник / І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький національний університет, 2019. 136 с.
2. Fakun K. Wang. 2D Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> materials for optoelectronics / Fakun K. Wang, Sijie J. Yang, Tianyou Y. Zhai // *iScience*. – 2021. – V. 24. – ID 103291.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 225 с.
4. Засоби відображення інформації. Електронні дисплеї: навчальний посібник, під ред. З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 162 с.
5. Two-dimensional MOF and COF nanosheets for next-generation optoelectronic applications / Xiaohui Ren, Gengcheng Liao, Zhongjun Li [et al.] // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2021. – V. 435. – ID 213781.
6. Методичні вказівки до лекційних занять з дисципліни «Оптоелектронні прилади» для студентів спеціальності 153 «Мікро– та наносистемна техніка». Частина 1 / Уклад.: К.О. Мінакова, Р.В. Зайцев, Ю.І. Веретеннікова, Г.С. Хрипунов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 71 с.
7. Функціонально активні та інтелектуальні матеріали: підручник / Т.В. Панченко [та ін.]; Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. – Дніпро: Акцент ПП, 2017. – 128 с.
8. Properties and perspectives of ultrawide bandgap Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in optoelectronic applications / Loh Kean Ping Dilla, Duryha Berhanuddin, Abhay Kumar Mondal [et al.] // *Chinese Journal of Physics*. – 2021. – V. 73. – Pp. 195–212.
9. Л.В.Однодворець Основи оптоелектроніки. Конспект лекцій. - Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 44 с.
10. A review on optoelectronic device applications of 2D transition metal carbides and nitrides / Xiwei Zhang, Jiahua Shao, Chenxi Yan [et al.] // *Materials & Design*. – 2021. – V. 200. – ID 109452.

11. First-principles investigation on the thickness-dependent optoelectronic properties of two-dimensional perovskite  $\text{BA}_2\text{SnI}_4$  / Meiping Liu, YongTang, Xiangli Zhong [et al.] // *Physica B: Condensed Matter*. – 2021. – V. 616. – ID 413070.
12. Digital Holography, a metrological tool for quantitative analysis: Trends and future applications / Melania Paturzo, Vito Pagliarulo, Vittorio Bianco, et al. // *Opt. Laser. Eng.* – 2018. – V. 104. – P. 32–47.
13. Поняття про голографію. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/Зpavlov\\_osnovy\\_mikroelektroniky/86.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/Зpavlov_osnovy_mikroelektroniky/86.htm) (Дата доступу: 20.05.2022 р.).
14. Никоненко О. В. Особливості голографічної системи захисту інформації / О. В. Никоненко // *Комп'ютерні технології*. – 2018. – №2. – С. 127–130.
15. Deng Zi-Lan. Metasurface optical holography / Zi-Lan Deng, Guixin Li // *Mater. Today Phys.* – 2017. – V. 3. – P. 16–32.
16. Никоненко О.В. Особливості голографічної системи захисту інформації / О. В. Никоненко // *Комп'ютерні технології*. – 2018. – №2. – С. 127–130.
17. Satoshi Kawata. Surface-Plasmon Holography / Satoshi Kawata, Miyu Ozaki // *iScience*. – 2020. – V. 23. – ID 101879.
18. Takehiro Tamaoka. Magnetism of antiphase boundaries in ordered alloys studied using electron holography / Takehiro Tamaoka, Ryotaro Aso, Yasukazu Murakami // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – V. 539. – ID 168406.
19. Off-axis electron holography of Néel-type skyrmions in multilayers of heavy metals and ferromagnets / T. Denneulin, J. Caron, M. Hoffmann [et al.] // *Ultramicroscopy*. – 2021. – V. 220. – ID 113155.
20. Image plane interference co-phasing technology for synthetic digital holography / Feng Yang, Lei Zhu, Yang Li [et al.] // *Optik*. – 2020. – V. 209. – ID 164568.