

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра  
**ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ І  
ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ**

Магістрант гр.ЕПм-92

М.Д. Жижневський

Науковий керівник,  
д-р фіз.-мат. наук, професор

Одноворець Л.В.

Завідувач кафедри ЕЗПФ,  
д-р фіз.-мат. наук, професор

Проценко І.Ю.

Суми 2020

## РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей, принципів функціонування та галузей застосування інтегрально-оптичних пристроїв обробки відеосигналів.

Розглянуті питання стосовно конструкції, технології виготовлення та принципів функціонування елементів та компонентів інтегральної оптики як галузі сучасної оптоелектроніки, яка займається дослідженням процесів розповсюдження оптичних хвиль в планарних тонкоплівкових діелектричних хвилеводах, проблемами вводу (виводу) та керуванням випромінюванням з метою створення нових інтегрально-оптичних схем. Показано, що селективні властивості інтегрально-оптичних систем, які проявляються в модовому характері розповсюдження випромінювання, дозволяють побудувати низку принципово нових оптичних пристроїв. Установлено, що в реальних хвилеводах розповсюджується суцільний спектр випромінювання, а співвідношення інтенсивностей хвиль визначається коефіцієнтом пропускання середовища хвилеводу, довжиною хвилеводу, розсіянням середовища хвилеводу, станом границі між хвилеводом та межуючими середовищами.

Робота викладена на 27 сторінках, у тому числі включає 14 рисунків, використано 12 літературних джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ХВИЛЕВОД, ОПТИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ІНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧНІ СХЕМИ, СПЕКТР ВИПРОМІНЮВАННЯ, СИСТЕМИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
<b>Розділ 1. Активні елементи інтегральної оптики.....</b>	<b>5</b>
1.1 Електрооптичні пристрої.....	5
1.2 Модулятори-перемикачі на основі ефекту тунельного перекачування світла .....	8
1.3 Модулятори-перемикачі інтерференційного типу.....	10
1.4 Електрооптичні модулятори на основі ефекту Брега.....	11
1.5 Електроабсорбційні модулятори.....	12
<b>Розділ 2. Принципи функціонування, конструкція та робочі параметри модуляторів .....</b>	<b>13</b>
2.1 Акустооптичні модулятори.....	13
2.2 Магнітно-оптичні модулятори та генерація світла в системах інтегральної оптики .....	16
<b>Розділ 3. Інтегральна оптика в приладах і пристроях.....</b>	<b>18</b>
3.1 Датчики фізичних величин та пристрої на основі решітчастих елементів введення-виведення.....	18
3.2 Кутовимірювальні датчики.....	19
3.3 Хвилевідні фільтри на основі явищ аномального відбивання пропускання.....	21
3.4 Методи побудови оптичних інтегральних схем (ОІС) для інформаційної техніки.....	23
3.4.1 Типи та основні класи ОІС для обробки інформації.....	23
3.4.2 Інтегрально-оптичні корелятори.....	24
Висновки.....	26
Список використаних джерел.....	27

## ВСТУП

Одна з характерних рис сучасного науково-технічного прогресу – зростання потреби в обробці, передачі і збереженні відеоінформації. Широка смуга і двовимірність електромагнітних коливань оптичного діапазону, доступність візуального сприйняття, електрична нейтральність фотонів щонайкраще відповідають обробці і передачі великих масивів інформації, у тому числі представлених у зображеннях та відео. Приклади таких систем – оптоелектронні інтегральні схеми, електронно-оптичні, електроабсорбційні та магнітооптичні системи електроніки [1-3]. Їх відмінна риса – висока щільність інформації в каналі та гранично високі швидкості її передачі. Інтегральна оптика повинна надавати можливість сполучення її схем з мікроелектронікою – основною елементною базою обчислювальної і вимірювальної техніки, аналітичного приладобудування, автоматики, систем збору і передачі даних. Для перетворення електричних сигналів в оптичні та навпаки в оптичних системах зв'язку служать джерела випромінювання і фотоприймачі, що утворюють разом з мікрохвильоводом елементну базу. Їхні комбінації і дають можливість одержувати інтегрально-оптичні схеми різної функціональної складності і призначення.

Інтегральна оптика має у своєму розпорядженні різні елементи введення і виведення оптичної інформації в інтегрально-оптичні схеми, що на кілька порядків компактніше об'ємних систем. У таких інтегрально-оптичних схемах обробка інформації відбувається цілком на оптичному рівні. Це не виключає використання електроніки для керування процесом обробки інформації, що обумовлює використання в інтегральній оптиці широкого класу електрооптичних матеріалів. Електрооптика вводить в інтегральну оптику нелінійні ефекти, на яких реалізують хвильовідні модулятори, перемикачі, інтерферометри, фільтри та ін.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей, принципів функціонування та галузей застосування інтегрально-оптичних пристроїв обробки відеосигналів.

## РОЗДІЛ 1

### АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОПТИКИ

#### 1.1. Електрооптичні пристрої

До активних елементів інтегральної оптики відносять модулятори, дефлектори та перемикачі. Електрооптичні пристрої реалізуються на широкому класі матеріалів, які включають як напівпровідникові матеріали (наприклад, *GaAs*), так і активні діелектрики – ніобати літію, танталу, калію тощо. До модуляторів-перемикачів, в основі принципу дії яких лежить електрооптичний ефект Покельса [4], належать модулятори на основі ефекту тунельного перекачування світла (модулятори-перемикачі на зв'язаних хвилеводах, модулятори-перемикачі інтерференційного типу).

Суть ефекта Покельса [4] полягає в зміні в оптичних матеріалах показника заломлення пропорційно прикладеній напруженості електричного поля.

Величина лінійного електрооптичного ефекту, що визначається зміною показника заломлення  $\Delta n$ , пов'язана з напруженістю поля виразом:

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

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

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

Таким чином, відбувається фазова модуляція хвилі. На відміну від об'ємних оптичних пристроїв, де для аналізу подібного типу модуляції широко застосовуються додаткові пристрої, в інтегральній оптиці перетворення фазової модуляції в амплітудну здійснюється за допомогою різних інтерференційних схем. До основних характеристик модуляторів належать такі: глибина модуляції (коефіцієнт модуляції)  $M$  та ширина смуги модулюючих частот  $\Delta f$ , яка у свою чергу визначає об'єм інформації, що обробляється.

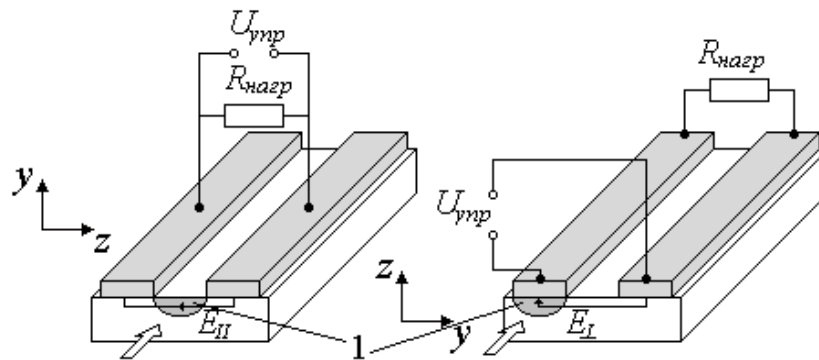


Рис.1.1. Схема хвиеводного модулятора. Адаптовано із роботи [11]

Узагальненим показником якості модулятора є величина питомої потужності  $\Delta P / \Delta f$  [5]. За профілем просторового розподілу показника заломлення в поперечному перерізі планарні хвиеводи діляться на дві групи: із ступінчастим профілем показника заломлення і з градієнтним профілем (альфа-профіль). У другій групі хвиеводів показник заломлення плавно змінюється від центру хвиеводу до його межі за певним законом. Найбільш часто використовуються хвиеводи з параболічним профілем показника заломлення. В деяких випадках використовуються хвиеводи з багат шаровим тонкоплівковим покриттям. Такі хвиеводи являють собою проміжну групу між хвиеводами із ступінчастим профілем і хвиеводами з альфа-профілем.

Для модової селекції використовуються хвиеводи з анізотропним показником заломлення. Такі хвиеводи виготовляються з оптично анізотропних матеріалів, показник заломлення яких залежить від орієнтації світлового променя щодо оптичної осі середовища. Для виготовлення пристроїв керування оптичними сигналами в інтегральній оптиці використовуються матеріали з керованим показником заломлення. В основі модуляції показника заломлення під дією зовнішнього керуючого сигналу найбільш часто використовуються електрооптичний, акустооптичний, термооптичний та магнітооптичний ефекти.

Матеріал оптичного хвиеводу може викликати підсилення сигналу. Хвиеводи з підсилюючим середовищем використовуються в хвиеводних і

волоконних лазерах та підсилювачах. Плазмонний хвилевід являє собою протяжну смужку металу з поперечним розміром і товщиною багато меншими довжини хвилі випромінювання. Особливістю плазмонних хвилеводів є те, що оптичний сигнал поширюється не всередині такого хвилеводу, а по його поверхні у вигляді поверхневої електромагнітної хвилі. Це властивість плазмонних хвилеводів пов'язано з порушенням в металі плазмонів - резонансних коливань плазми вільних електронів. Застосування плазмонних хвилеводів в пристроях інтегральної оптики дозволяє значно зменшити габарити цих пристроїв.

Принципова схема дії хвилеводного модулятора наведена на рис. 1.1. Величини електрооптичних коефіцієнтів, які визначають величину зміни коефіцієнта заломлення, залежать від кристалографічної орієнтації матеріалу, що використовується для створення активного елемента. У випадку анізотропних кристалів оптимальними орієнтаціями для хвилевідної структури є  $y$ - і  $z$ -зрізи. Для визначення зв'язку з координатами  $x, y, z$  кристалографічні напрямки, вісь  $z$  повинна бути спрямована вздовж оптичної осі кристала, тобто відповідна вісь перпендикулярна великій площині кристала.

Для отримання максимальних електрооптичних коефіцієнтів керуюче електричне поле повинно бути спрямовано вздовж осі  $z$ . Це у свою чергу накладає обмеження на конструкцію електродів модулятора. У випадку використання  $y$ -зрізу електроди розташовані симетрично по обидва боки хвилеводу. Як наслідок - керуючою складовою електричного поля є його паралельна складова  $E_{\parallel}$ . В активних елементах на  $z$ -зрізі для зберігання напрямку модулюючого поля вздовж осі  $z$  один з електродів наноситься зверху на хвилевідний шар 1 і робочою складовою є вертикальна складова електричного поля  $E_{\perp}$ . Акцентуємо увагу на тому, що матеріалом керуючого електрода є метал [4, 5]. Як наслідок, хвилевідна мода, яка розповсюджується по хвилеводу з металевою границею, є затухаючою. Для уникнення цього, між електродом та хвилеводом нанесений тонкий ізолюючий шар з низьким показником заломлення. Це загальноприйнятий технологічний прийом і далі,

коли ми будемо говорити про те, що на поверхню хвилеводу нанесений шар, який є провідником, то будемо мати на увазі, що він відокремлений від хвилеводу ізолятором. В основному як буферний шар використовують окисні плівки алюмінію ( $n \approx 1.6$ ) або кремнію ( $n \approx 1.5$ ) товщиною близько 20 мкм.

У схемі типу біжучої хвилі світло і модулююча хвиля надвисокої частоти (близько ГГц) розповсюджуються в одному напрямку. Якщо фазові швидкості керуючого електричного поля й оптичного випромінювання рівні, величина ємності електродів і час розповсюдження світла через модулятор не впливають на смугу частот. Модулятори-перемикачі типу біжучої хвилі характеризуються також більш високою ефективністю порівняно зі структурами із зосередженими параметрами. Для модуляторів з паралельними пластинами відношення факторів якості складає [4]:

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

## 1.2 Модулятори-перемикачі на основі ефекту тунельного перекачування світла

Основу електрооптичних модуляторів-перемикачів на базі зв'язаних хвилеводів складають два (або більше) близько розташованих паралельних керованих хвилеводи. На рис. 1.2, представлений модулятор-перемикач Х-типу. При збудженні одного з них у процесі розповсюдження випромінювання відбувається перерозподіл енергії між хвилеводами, який залежить від прикладеної до керуючих електродів напруги. Суть явища перерозподілу енергії полягає в наступному. Якщо хвилеводи розташовані на невеликій відстані  $h_c$ , то хвости хвилевідних мод, які виходять за межі хвилеводів, перекриваються. Виникає розподілений зв'язок між полями хвилеводів. Такий розподілений зв'язок має низку унікальних властивостей. Зв'язок такого типу має неперервний характер [6, 11].

Комплексні амплітуди електричного поля змінюється у хвилеводах за закономірністю:



$$\begin{cases} U_1 = A_0 e^{j\beta z} \cos \sigma z \\ U_2 = -jA_0 e^{j\beta z} \sin \sigma z \end{cases} \quad (1.4)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт зв'язку. Спочатку енергія з хвилеводу 1 перекачується в хвилевід 2, а потім починається обернений процес.

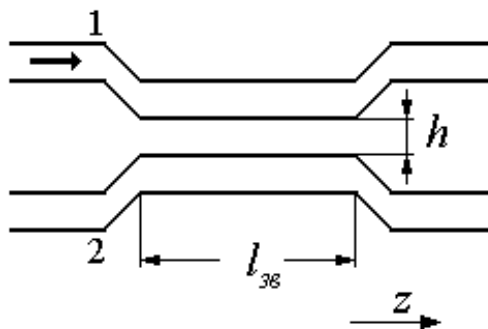


Рис.1.2. Схема для пояснення принципу дії модулятора-перемикача X-типу

Таким чином, у системі з двох хвилеводів виникає щось подібне до коливного процесу. Повне перекачування енергії між хвилеводами відбувається на так званій довжині зв'язку  $l_{zv} = \frac{\pi}{2\sigma}$ . Якщо на довжині  $l_{zv}$  відбувається повна перекачування енергії, то такий стан системи називається схрещеним. Якщо, перекачування енергії не відбувається і світло виходить з того ж самого хвилеводу, в який поступало, то такий стан системи називають паралельним. Відзначимо, що як впливає з (1.4) фази випромінювання в хвилеводах зсунуті на  $\pi/2$ . Додамо, що 100-відсоткова ефективність перекачування відбувається лише у випадку, коли константи розповсюдження мод в обох хвилеводах абсолютно узгоджені. Відповідно товщини та коефіцієнти заломлення хвилеводів повинні ретельно контролюватися.

Головний недолік таких елементів – неможливість реалізації 100 % ефективності. Наприклад, неможливе виготовлення хвилеводів з довжиною, яка точно дорівнює  $l_{zv}$ . Проте схему можна зробити двосмуговою і одночасно змінювати асиметрично параметри у двох хвилеводах. Окрім цього, напругу можна подавати на таку схему на різні лінії з різною поляристю. Тоді в одному хвилеводі показник заломлення буде збільшуватися, а в другому – зменшуватися.

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

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

### 1.3 Модулятори-перемикачі інтерференційного типу

Основу інтегрально-оптичних модуляторів-перемикачів інтерференційного типу складають планарні інтерферометри Маха-Цандера, які формуються на основі двох паралельно розташованих хвилеводів, які на вході та на виході зв'язані *Y-розгалужувачами* (рис. 1.3). Вхідний сигнал за допомогою першого розгалужувача поділяється на дві частини. Обидві частини сигналу, кожна з яких проходить через своє плече інтерферометра, сумуються на виході другим *Y-розгалужувачем* з урахуванням фазових змін, що відбуваються в процесі розповсюдження. На хвилеводи в плечах інтерферометра наносяться керуючі електроди. Електричне поле через ланцюг керування індукує фазовий зсув такої величини, при якому хвилі приходять у загальну точку або в фазі, або в протифазі. Таким чином, на виході *Y-розгалужувача* або маємо, або не маємо сигналу [7, 8].

Глибина модуляції на виході інтерферометра визначається співвідношенням інтенсивностей у плечах інтерферометра. 100-відсоткова модуляція досягається лише у випадках, коли ці інтенсивності абсолютно однакові.

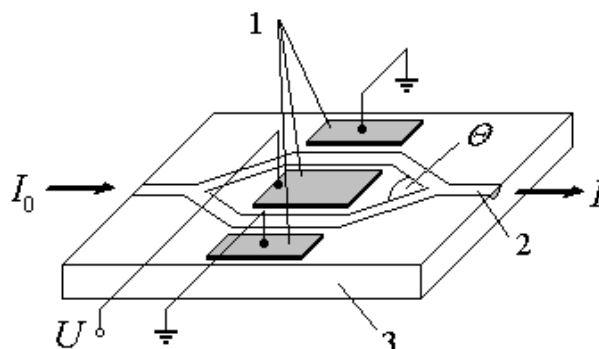


Рис. 1.3. Схема модулятора перемикача інтерференційного типу:

1 – керуючі електроди; 2 – хвилевід; 3 – підкладка

Існують активні засоби корекції інтенсивності в плечах, але вони вимагають додаткових джерел живлення ( $>30$  в) та значно ускладнюють схему модулятора. Проте сучасна техніка фотолітографії дозволяє виконувати  $Y$ -розгалужувачі з високою точністю (саме від неї залежить співвідношення інтенсивностей) та досягати практично 100-відсоткової модуляції [7].

Для сучасних модуляторів на основі  $z$ -зрізів  $LiNbO_3$ , досягаються такі характеристики: керуюча напруга  $\sim 3.5$  в; смуга частот  $\sim 17$  ГГц; ефективність  $\sim 7$  мкВ/МГц.

#### 1.4 Електрооптичні модулятори на основі ефекту Брега

Типовий модулятор на основі ефекту Брега [8, 9] (рис. 1.4), складається з пари електродів, «переплетених» між собою подібно до двох гребінок. При поданні напруги на електроди коефіцієнт заломлення хвилеводу під ними змінюється. Як наслідок в хвилеводі формується «товста» фазова решітка з періодом  $T$ , який дорівнює подвійній відстані між штирками.

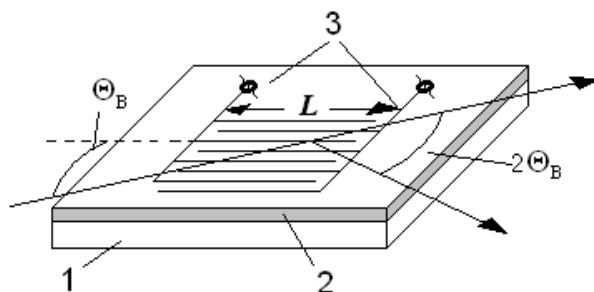


Рис. 1.4. Брегівський модулятор: 1 – підкладка; 2 – хвилевід; 3 – додатній та негативний електроди. Адаптовано із роботи [9]

При цьому виконується умова, яка характеризує решітку як товсту:

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

де  $L$  – довжина штирків модулятора.

Світло, яке розповсюджується в хвилеводі дифрагує на такій ґратці. При цьому, в наслідок того, що решітка товста результат дифракції залежить від кута, під яким вона освітлюється  $\Theta_B$ . Ефективною є дифракція лише при умові,

коли кут дифракції вдвічі більше ніж  $\Theta_B$ . Можна показати, що кут освітлення решітки задається співвідношенням:

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

При зміні кута освітлення решітки відбувається зменшення інтенсивності дифрагованої хвилі. Діапазон зміни кутів освітлення (кути  $\Theta_B$  невеликі і  $\sin \Theta_B \approx \Theta_B$ ), при яких інтенсивність падає до 50% від максимальної складає величину

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

Інтенсивність дифрагованої хвилі залежить від напруги  $U$ , що подається на модулятор:

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

де  $b$  – коефіцієнт, який характеризує ефективність модулятора та залежить від коефіцієнту заломлення середовища хвилеводу і інших параметрів структури.

### 1.5 Електроабсорбційні модулятори

В електроабсорбційних модуляторах застосовують ефект Франца-Келдиша [9, 10]. При поданні сильного електричного поля границя смуги поглинання в напівпровідниках зсувається в бік довгих довжин хвиль. Так на рис. 1.5 надано ілюстрацію такого явища для сполуки  $GaAs$  при поданні напруги  $1.3 \times 10^5$  В/см.

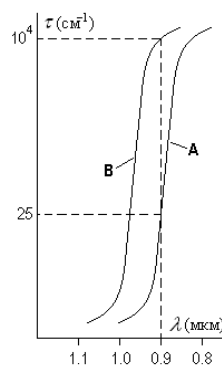


Рис.1.5. Крива А відповідає випадку коли напруга відсутня, В – до структури прикладена напруга

## Розділ 2.

# ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ, КОНСТРУКЦІЯ ТА РОБОЧИ ПАРАМЕРИ МОДУЛЯТОРІВ

### 2.1 Акустооптичні модулятори

Акустоелектроніка – галузь електроніки, присвячена розробці та виготовленню електронних систем, функціонування яких базується на акустоелектронній взаємодії, що служать для перетворення та оброблення сигналів. Це можуть бути тимчасові (затримка сигналів, вимірювання їх тривалості), частотні й фазові (перетворення частоти та спектра, фазовий зсув), амплітудні (підсилення й модуляція), складні (кодування та інтегрування) перетворення. Усі вони використовуювані в радіолокації, далекому зв'язку, автоматичному управлінні, обчислювальній техніці й ряді інших галузей електроніки [8].

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили в результаті дії ультразвукових хвиль називають *акустоелектричним ефектом*. Акустоелектричний ефект зумовлений впливом або об'ємних ультразвукових хвиль у товщі звукопроводу, або поверхневих акустичних хвиль – пружних хвиль, що поширюються по вільній поверхні твердого тіла чи вздовж межі твердого тіла з іншим середовищем і загасають із віддаленням від них [8]. Останнім часом мають попит акустоелектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, смугові фільтри, резонатори, давачі. Основними параметрами перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях є: внесене загасання, вхідний та вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот, що пропускаються. Усі ці параметри залежать головним чином від пристрою ЗШП. Звичайний ЗШП не є односпрямованим [8].

У приладі (рис. 2.1) тільки 50% енергії, випромінюваної вхідним ЗШП, йде до вихідного ЗШП. Інша енергія, що йде в інших напрямках, губиться. Інакше кажучи, розглянутий найпростіший акустоелектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних

акустоелектронних компонентів є зменшення внесеного загасання шляхом раціонального конструювання ЗШП. Необхідно також, щоб перетворення електричних сигналів в акустичні і навпаки відбувалося в даній смузі частот. Це особливо важливо для смугових фільтрів і широкосмугових ліній затримки.

Робота перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через вторинні явища, до яких належить, наприклад, відображення хвиль від границь звукопроводу і від границь електродів. Це відображення є основною причиною перекручувань вихідного сигналу і погіршення параметрів приладу. Шкідливим варто також вважати пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і передачу сигналу об'ємною акустичною хвилею. При зниженні загасання і зменшенні відображення за рахунок особливих конструкцій ЗШП досягається односпрямована передача.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях звичайно вносять загасання 0,5 - 1,5 дБ. Затримка може бути фіксованою чи регульованою. На торці звукопроводу звичайно наносять звуковбирні покриття, щоб зменшити відображення хвиль. Динамічний діапазон ліній затримки 80 - 120 дБ. Для гарної роботи лінії затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) близький до нуля, одержують або застосовуючи спеціальний матеріал для звукопроводу (наприклад, кремній з домішкою фосфору), або роблячи звукопровод із двох частин, що мають ТКЗ різного знака, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки складає десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі роблять у вигляді спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно кілька ліній затримки.

Один з ефективних методів керування хвилею у хвилевідних пристроях – використання з метою модуляції хвилі результатів взаємодії звукових коливань з елементами інтегрально-оптичної структури. Акустична хвиля є процесом переносу механічних деформацій – об'ємних і зсувових. При розповсюдженні звукових хвиль у середовищі завдяки фотопружному ефекту виникає регулярна зміна показника заломлення середовища, яке визначається характеристиками акустичної хвилі. Такою характеристиками є: інтенсивність хвилі, період

звукових коливань та ін. Взаємодія світла з такою наведеною структурою аналогічна дифракції світла на дифракційних решітках. Фотопружний ефект є лінійним ефектом – величина зміни показника заломлення пропорційна деформації  $\delta S$ :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} P n^3 \delta S, \quad (2.1)$$

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

Акустооптичні активні елементи можуть бути побудовані з використанням як об'ємних, так і *поверхневих (ПАХ) акустичних хвиль* [12]. Енергія, яка переноситься ПАХ, зосереджена у приповерхневому шарі товщиною приблизно рівною довжині хвилі. Таким чином, якщо така хвиля розповсюджується в зоні оптичного хвилеводу, то враховуючи товщину оптичного хвилеводу, яка теж такого самого порядку, можна стверджувати, що перекриття звукової та оптичної хвиль практично повне. Як наслідок відбувається достатньо ефективна модуляція випромінювання, яке розповсюджується у хвилеводі. Додамо, що практична реалізація ПАХ-модуляції відносно проста. Саме тому такий тип модуляції знайшов широке застосування в інтегральній оптиці.

Збудження ПАХ здійснюється за допомогою так званих *зустрічно-штиркових перетворювачів*, які формуються з електродів аналогічних до електродів електрооптичного Бреґівського модулятора [8, 10].

На попередньо нанесеному діелектричному шарі з добрими п'єзоелектричними властивостями створюються металеві електроди, які виконані у формі вкладених одна в одну гребінок. До їх кінців прикладається керуюча напруга.

Такий відносно простий перетворювач забезпечує ефективне перетворення модуляції електричного сигналу в модуляцію оптичного сигналу в смузі шириною близько сотні мегагерц. Найбільш ефективно перетворюються акустичні хвилі з довжиною, яка дорівнює подвійній величині відстані між сусідніми електродами  $s$ .

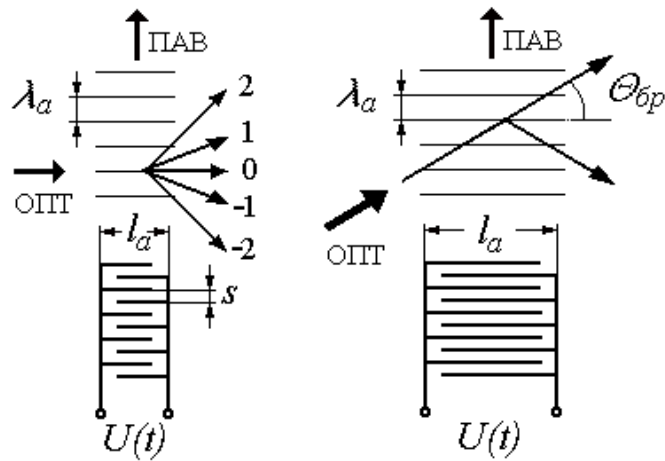


Рис. 2.1. Схеми дифракції хвилі на ПАХ-модуляторах: *a* – дифракція подібна до дифракції на тонкій решітці; *b* – дифракція подібна до дифракції на товстій решітці

Селективність модулятора за кутом Брега дає додаткові можливості при створенні інтегрально-оптичних пристроїв, наприклад селекторів (фільтрів) певної частоти електричного сигналу або спектроаналізаторів, якщо використовувати оптичні пучки з широким кутовим спектром (пучки, які сходяться або розходяться).

## 2.2. Магнітно-оптичні модулятори та генерація світла в системах інтегральної оптики

В основі роботи інтегрально-оптичних активних елементів з магнітним керуванням лежить перетворення хвилевідних мод внаслідок намагнічування хвилевідної плівки. У багатьох матеріалах, що використовують в інтегральній оптиці, в тензорі діелектричної проникності не дорівнюють нулю недіагональні компоненти. Тому системи рівнянь (для кожної компоненти), подібних до розглянутих нами матеріальних рівнянь для електричного та магнітних полів, не є незалежними. При цьому для повного (ефективного) перекачування енергії з одної моди в іншу потрібно узгодження констант розповсюдження ТЕ- і ТМ-мод. Зміну різниці між цими константами (з метою отримати  $\Delta\beta = 0$ ) можна, наприклад, здійснити, змінюючи орієнтацію магнітного моменту хвилевідної



плівки.

Магнітооптичними називають такі модулятори, які в своїй роботі використовують магнітооптичні ефекти в твердих тілах. Магнітооптичні модулятори призначені для зміни в часі одного або декількох параметрів оптичного сигналу: амплітуди, фази, частоти або поляризації. Магнітооптичні модулятори класифікують за видом використовуваних магнітооптичних ефектів. Розрізняють модулятори, застосовувані ефекти Коттона-Мутона і Фарадея. Можлива також класифікація за типом магнітооптичних матеріалів.

Найголовніша вимога до джерел когерентного світла в інтегрально-оптичному пристрої (крім того, що треба задовольнити принципові технічні вимоги до когерентності, потужності довжини хвилі, тощо) – легка інтеграція джерела випромінювання в інтегральну схему. Перший шлях – це утворення нероз’ємного з’єднання стандартного випромінювача з інтегральною схемою. Другий - утворення лазера в самій схемі. Найбільше для цих цілей підходять інжекційні напівпровідникові лазери з розподіленим оберненим зв’язком та розподіленими брегівськими відбивачами. Більш ретельно про проблему джерела у хвилевідній оптиці будемо говорити при вивченні світловодних систем [7, 8].

### **Розділ 3.**

## **ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОПТИКИ**

За аналогією з пристроями мікроелектроніки системи інтегральної оптики дуже часто називають оптичними інтегральними схемами (ОІС). З попереднього розгляду випливає, що такі пристрої повинні мати унікальні властивості та характеристики. Засоби інтегральної оптики дозволяють досягнути мінімальних розмірів оптичних схем і реалізувати (принаймні в одновимірному варіанті) більшість алгоритмів традиційної оптики. Технологічні можливості інтегральної оптики (у більшості випадків технологія ОІС - відпрацьована технологія електронної промисловості) дозволяють отримувати великі партії ОІС із порівняно невеликими затратами. Фізичні особливості розповсюдження оптичного сигналу, притаманні тільки інтегральній оптиці дозволяють побудувати низку принципово нових оптичних пристроїв. До таких особливостей належать, насамперед, селективні властивості інтегрально-оптичних систем, які проявляються в модовому характері розповсюдження випромінювання.

### **3.1 Датчики фізичних величин та пристрої на основі решітчастих елементів введення-виведення**

В реальних хвилеводах розповсюджується суцільний спектр випромінювання. Співвідношення інтенсивностей цих хвиль визначається такими характеристиками хвилеводів: коефіцієнтом пропускання середовища хвилеводу; довжиною хвилеводу; розсіянням середовища хвилеводу, станом границі між хвилеводом та середовищами, які межують між собою. Відповідно, якщо вводити світло в таку систему, наприклад за допомогою решітчастого елемента введення-виведення, то в ОІС буде вводитися не лише хвиля, що узгоджена з модами хвилеводу, а й хвилі, які розповсюджуються в близьких напрямках. В реальних ОІС існує область кутів, у яких плоска хвиля може бути введена у хвилевід. Ця область кутів має назву області введення.

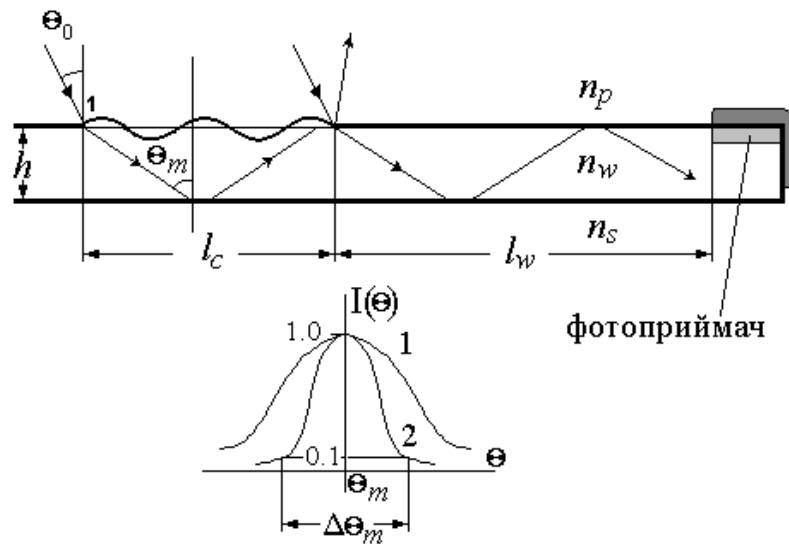


Рис. 3.1. Схема кутовимірного датчика з решітчастим елементом введення: 1 – хвилевід, 2 – підкладка, 3 – фокусуєчий решітчастий елемент введення-виведення, 4 – захисний кожух, 5 – матриця планарних приймачів [11]

Ширина цієї області  $\Delta\theta_m$ , визначається кутами, в межах яких інтенсивність випромінювання, яке вводиться у хвилевід, спадає до рівня 0.1 від максимальної інтенсивності [10, 12]. Природно, що для різних мод ця величина різна. Зауважимо, що  $\Delta\theta_m$  визначається як характеристиками хвилеводу (його довжиною, втратами), так і характеристиками елемента введення-виведення, такими як довжина зв'язку, яка у свою чергу визначається глибиною модуляції решітки. На рис.3.1 наведені залежності інтенсивності, в межах яких можуть розповсюджуватися коливання в зоні хвилеводу з решіткою (крива 1) та в зоні безпосередньо хвилеводу (крива 2). Кінцева  $\Delta\theta_m$  визначається більш вузькою кривою. У нашому випадку кривою 2, тобто характеристиками безпосередньо хвилеводу. Додамо, що така ситуація виникає практично завжди за винятком спеціальних випадків, які ми не будемо розглядати.

### 3.2 Кутовимірювальні датчики [11]

Як характерний приклад пристроїв, в яких використані кутові селективні властивості ОІС, розглянемо роботу датчика кутів. Як елемент введення-

виведення в ОІС використаний фокусуєчий решітчастий елемент введення-виведення. Такий елемент виконаний за допомогою голографічної технології і являє собою низку концентричних кіл, центр яких знаходиться на приймальній площинці центрального фотоприймача матриці планарних фотоприймачів. Завдяки такій конструкції елемента введення-виведення, випромінювання, що вводиться в ОІС, фокусується в площині матриці фотоприймачів. При цьому характеристики, які впливають на процес введення хвилі в ОІС, залишаються такими самими, як і у звичайної решітки з таким самим періодом, глибиною модуляції та довжиною зв'язку. Ширина області введення у такого датчика дорівнює від 10 кутових секунд до половини градуса в залежності від параметрів хвилеводу. ОІС призначена для вимірювання кутів, під якими розповсюджуються паралельні пучки випромінювання з певної довжиною хвилі. Саме на цю довжину хвилі розраховується датчик (характеристики хвилеводу та елемента введення-виведення). ОІС спроможна проводити вимірювання кутів у двох площинах. В одній площині зміна напрямку пучка призводить до зміни сигналу на будь-якому приймачі та зумовлена ступенем узгодженості напрямку опромінюючого пучка з напрямками хвилевідних мод. У другій площині зміни кута опромінення призводять до дрейфу світлової плями вздовж матриці приймачів, що також дозволяє проводити вимірювання цього кута.

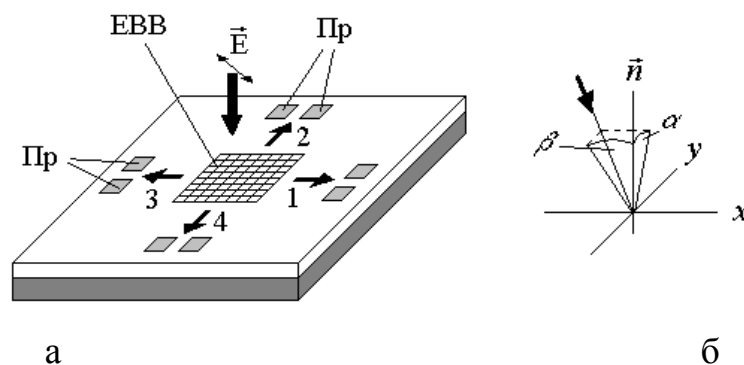


Рис. 3.2. Кутовимірний датчик з двовимірним елементом введення-виведення: *а* – схема датчика, *б* – орієнтація пучка світла відносно нормалі до поверхні датчика

Другий тип кутомірного датчика наведений на рис. 3.2. Елемент введення-виведення (ЕВВ) ОІС виконаний у вигляді двовимірної решітки. Період такої решітки розрахований так, щоб для робочої довжини хвилі введення у хвилевід відбувалося під кутом, близьким до  $0^0$ , тобто максимальна інтенсивність введеної хвилі спостерігається при куті опромінення  $\Theta_{\max}$ . Зауважимо, що параметри елемента введення-виведення і хвилеводу розраховувалися для поляризації пучка, в якого напрямок коливання електричного вектора складав  $45^0$  зі штрихами решітки, або для циркулярно-поляризованого пучка. Таке обмеження зумовлене тим, що умови введення та розповсюдження хвиль у хвилеводі різні для ТЕ0- і ТМ-мод. Тоді при нормальному падінні пучка на решітку світло вводиться в чотири протилежно спрямовані хвилевідні канали. Відповідно, інтенсивність випромінювання в усіх чотирьох каналах рівна. Як наслідок - сигнал на усіх чотирьох приймачах за модулем однаковий. Напрямок падіння пучка характеризується двома кутами  $\alpha$  і  $\beta$  відносно нормалі  $\vec{n}$  до поверхні датчика. Будемо вважати, що кут  $\alpha = 0$  та пучок нахилений лише в площині  $\vec{n}, x$ .

Робота датчика практично незалежна в площинах  $\vec{n}, x$  і  $\vec{n}, y$  в широкому діапазоні кутів. При фіксованому куті  $\beta$  кут  $\alpha$  може змінюватися в широких межах, які істотно перевищують величину  $\Delta\beta$ . Так, зміна кутів  $\alpha$  може досягати градусів. Все сказане стосується також вимірів кутів у площині  $\vec{n}, y$ .

### **3.3 Хвилевідні фільтри на основі явищ аномального відбивання пропускання [11, 12]**

Розглянемо рис.3.3, на якому зображений хвилевід з одною границею промодульованою дифракційною решіткою. Нехай період решітки такий, що за границею середовищ покривний шар-хвилевід може існувати лише один дифракційний порядок. Відповідно в покривному шарі може існувати лише один (нульовий) порядок.

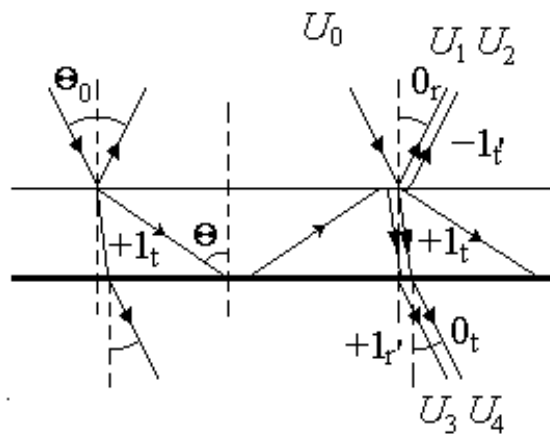


Рис.3.3. Хід променів у хвилеводі з одною границею, що промодульована дифракційною решіткою

Після взаємодії початкової хвилі  $U_0$  з решіткою маємо такі процеси:

1. Дифракція  $0_t$  порядку на пропускання (поле  $U_3$ ).
2. Дифракція  $+1_t$  порядку у хвилевід.
3. Дифракція  $0_r$  порядку на відбивання (поле  $U_1$ ).
4. Відбивання хвилевідної хвилі від нижньої границі.
5. Дифракція хвилевідної хвилі у  $+1_r$  порядок на відбивання. Цей порядок розповсюджується в тому самому напрямку, що й  $0_t$  порядок і формує поле  $U_4$ .
6. Дифракція хвилевідної хвилі у  $-1_r$  порядок у покривне середовище. Цей порядок розповсюджується в тому ж напрямку, що і  $0_r$  порядок і формує поле  $U_2$ .

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

Таким чином, в результаті інтерференційного сумування поле в підкладці має нульову амплітуду, а в покривному шарі навпаки підсилюється. Таке явище отримало назву аномального відбивання-пропускання. Якщо, змінювати довжину хвилі, то таке явище настає при іншому куті освітлення структури.

Напівширина області, в якій спостерігається явище аномального відбивання, пропускання залежить від глибини модуляції решітки. Чим менше глибина модуляції, тим вужче крива. Якщо структуру освітлювати поліхроматичним випромінюванням, то напівширина спектральної лінії, яку можна виділити за допомогою такого фільтра може бути дуже вузькою і за порядком збігатися з подібною характеристикою для інтерференційних фільтрів, тобто не перевищувати  $20 \text{ \AA}$ . Подібне явище спостерігається і для неідеального хвилеводу та решітки, яка формує більше ніж один дифракційний порядок, але загашення і підсилення відбуваються не в повному обсязі.

### **3.4 Методи побудови оптичних інтегральних схем (ОІС) для інформаційної техніки**

#### **3.4.1 Типи та основні класи ОІС для обробки інформації**

Класифікацію ОІС можна провести за різними ознаками: за конструкторсько-технологічним і фізичним принципам побудови, за призначенням типу матеріалів, що використовуються. Найбільш суттєва різниця між ОІС пов'язана з можливістю та (або) необхідністю їх стиковки з волоконно-оптичними системами. В залежності від типу з'єднання можна виділити три основних типи ОІС: міросхеми, які вимагають стиковки з волоконним світловодом як на вході, так і на виході; мікросхеми, які вимагають стиковки з волоконним світловодом лише на виході; мікросхеми, які не вимагають стиковки з волоконним світловодом. Електронні схеми другого третього класу стикуються на вході з випромінювачем або з іншою ОІС, а ОІС третього типу стикується на виході з фотоприймачем або іншою мікросхемою.

З точки зору функціонального призначення можна виділити три основні класи ОІС для обробки інформації: аналогові - для обробки сигналів; цифрові та логічні - для обчислювальної техніки; комутуючі.

### 3.4.2 Інтегрально-оптичні корелятори

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

1. ІОК умовно можна поділити на два типи: Корелятори з просторовим інтегруванням.
2. Корелятори з часовим інтегруванням.

Схема корелятора з просторовим інтегруванням наведена на рис.3.4. За допомогою двох ПАХ модуляторів, які формують акустичні хвилі, що розповсюджуються назустріч друг другу утворюється дві бігучі решітки, тим самим забезпечується зсув двох модулюючих функцій у часі. Інтегрування здійснюється за допомогою об'єктива 7. В площині фотоприймача формується певний сигнал, який є згортокою сигналів: еталонного  $S_1(t)$  та сигналу порівняння  $S_2(t)$ .

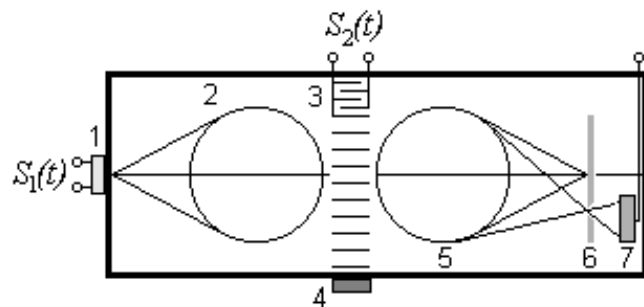


Рис. 3.4. Схема інтегрально-оптичного корелятора: 1 – напівпровідниковий лазер – генератор еталонного сигналу  $S_1(t)$ , 2,5 – планарні об'єктиви, 3,4 – ПАХ-модулятор – модулятор сигналу порівняння  $S_2(t)$ , 6 – частотний фільтр, 7 – приймач

Еталонний сигнал  $S_1(t)$  задається за допомогою модуляції струму накачування джерела випромінювання. Сигнал порівняння  $S_2(t)$  сигнал, що модулює певний високочастотний сигнал (сигнал проміжної частоти). Тоді частота бігучої решітки залишається сталою. Отже дифракційний порядок



завжди має один напрямок. Глибина модуляції решітки визначається модулюючим сигналом  $S_2(t)$ , якій пересувається вздовж модулятора із швидкістю розповсюдження акустичної хвилі.

Розглянемо конструкцію інтегрально-оптичного корелятора цифрових сигналів. Еталонний сигнал, сигнал порівняння,  $U_{етал}$  подається на електрооптичний просторовий модулятор. При роздільному збудженні окремих сегментів модулятора можна формувати еталонні функції різного виду в широкому діапазоні з високою роздільною здатністю. Іншими словами, при подачі напруги до секцій модулятора за рахунок електрооптичної зміни показника заломлення хвилевідного шару формується стаціонарна (нерухома) дифракційна решітка, яка дає можливість модулювати однорідний пучок паралельно за декількома інформаційними каналами (їх кількість дорівнює кількості секцій модулятора). ПАХ-модулятор формує біжучу поверхневу акустичну хвилю  $U_{инф}$ , яка у свою чергу формує динамічну решітку. Вхідні сигнали перетворюються в імпульси ПАХ, довжина яких узгоджена з довжиною елементів модулятора. Одиниця кодується високочастотною ПАХ, нуль – низькочастотною.

Операція множення виконується за рахунок подвійної дифракції на рухомій та нерухомій решітках. Інтегрування сигналу здійснюється об'єктивом 8. Геометрія пристрою створена таким чином, що світловий пучок, який відповідає розрядам (1-1, 0-0), попадає на один приймач, а якщо він відповідає незбіжним розрядам (1-0, 0-1), – на інший приймач.

Інтегрально-оптичний корелятор призначений для обробки 32-розрядних кодів при швидкодії 32 МБіт/с. Виконання кореляції з такою швидкістю еквівалентне швидкості виконання такої операції у звичайному комп'ютері зі швидкістю  $\sim 10^9$  операцій за секунду.

## ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи розглянуті питання стосовно конструкції, технології виготовлення та принципів функціонування елементів та компонентів інтегральної оптики як галузі сучасної оптоелектроніки, яка займається дослідженням процесів розповсюдження оптичних хвиль в планарних тонкоплівкових діелектричних хвилеводах, проблемами вводу (виводу) випромінювання у такі хвилеводи, а також питаннями генерації і детектування світлових пучків та керування ними з метою створення нових інтегрально-оптичних схем.

2. Показано, що в основі роботи електрооптичних модуляторів-перемикачів лежить електрооптичний ефект Покельса, суть якого полягає в тому, що в деяких оптичних матеріалів показник заломлення змінюється пропорційно прикладеній напруженості електричного поля.

3. На основі літературних даних встановлено, що фізичні особливості розповсюдження оптичного сигналу, притаманні тільки інтегральної оптиці дозволяють побудувати низку принципово нових оптичних пристроїв. До таких особливостей належать селективні властивості інтегрально-оптичних систем, які проявляються в модовому характері розповсюдження випромінювання.

4. Показано, що реальних хвилеводах розповсюджується суцільний спектр випромінювання, а співвідношення інтенсивностей цих хвиль визначається коефіцієнтом пропускання середовища хвилеводу; довжиною хвилеводу; розсіянням середовища хвилеводу, станом границі між хвилеводом та середовищами, що межують.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
2. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
3. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. – Львів: Новий світ-2000, 2003. – 128 с.
4. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства/ А. Н. Игнатов – Москва: Логос, 2006. – 272 с.
5. Давиденко О.П., Григоренко І.В., Мигущенко Г.П., Давиденко О.П. Електроніка у вимірювальній техніці. – Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХП»», 2015. – 428 с.
6. Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
7. Turner, L.W. Electronics Engineer's Reference Book. – London: Butterworth Heinemann, 2013. – 115 p.
8. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л. В. Одноворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
9. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
10. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
11. Одноворець Л.В., Пазуха І.М. Методичні вказівки до практичних робіт та самостійної роботи з курсу «Матеріали і компоненти функціональної електроніки». – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 56 с.
12. Туркин А. С. Полупроводниковые светодиоды / А. С. Туркин – Москва: Мир, 2010. – 124 с.