

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

О. К. Кучеренко

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології»
спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і
технології»*

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2021

Рецензенти;

Пархоменко Наталія Михайлівна, заступник начальника науково-виробничого відділу оптико-фізичних вимірювань ДП«Укрметртестстандарт».

Овчар Микола Іванович, начальник науково-технологічного комплексу казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал».

Відповідальний редактор:

Сокурєнко В'ячеслав Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри КІОНС «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10

від 13.12. 2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Кучеренко Олег Константинович, канд. техн. наук, доцент.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем[Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології»/ О. К. Кучеренко. «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.

У підручнику увага приділена елементній базі волоконно-оптичних датчиків (ВОД) для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем. А саме викладено питання геометричної та хвильової оптики світловодів і визначення їх основних характеристик. Проаналізовано принципи побудови, методи розрахунку і застосування інтегральних оптичних систем і пристроїв на їх основі, що використовуються у ВОД. Значна частина підручника присвячена принципу дії, особливостям розрахунку, методам компенсації дрейфу і елементній базі ВОД фізичних величин. Наведені приклади розрахунку і побудови ВОД різного призначення. До кожного розділу наведені контрольні запитання

© О. К. Кучеренко, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ	
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СВІТЛОВІД, ЯК ЕЛЕМЕНТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ.....	8
1.1. Геометрична оптика світловодів	8
1.2. Загасання і втрати в оптичних волокнах.....	11
1.3. Дисперсія і параметри швидкодії світловодів.....	16
1.4. Технологія спектрального ущільнення каналів.....	23
Контрольні запитання.....	26
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОПТИКИ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ.....	27
2.1. Принцип дії елементів інтегральної оптики.....	27
2.2. Класифікація інтегрально-оптичних елементів.....	31
2.3. Інтегрально-оптичні елементи зв'язку.....	37
2.4. Елементи зв'язку між хвильоводами.....	45
2.5. Пасивні інтегрально-оптичні елементи.....	49
2.6. Приклади елементів інтегральної оптики для волоконно-оптичних датчиків.....	55
Контрольні запитання.....	63
РОЗДІЛ 3. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ.....	64
3.1. Класифікація волоконно-оптичних датчиків.....	64
3.2. Компенсація шумів та дрейфу нуля волоконно-оптичних датчиків.....	68
3.3. Волоконно-оптичні датчики для виміру механічних величин.....	73
3.4. Волоконно-оптичні датчики для виміру електричних величин.....	82
3.5. Волоконно-оптичні датчики з волокном в якості чутливого елемента.....	88
3.6. Волоконно-оптичні датчики іонізуючих випромінювань	102
3.7. Волоконно-оптичні датчики в охоронних системах.....	105
Контрольні запитання.....	112
Список літератури.....	113

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- ВОГ – волоконно-оптичний гіроскоп
- ВОД – волоконно-оптичний датчик
- ВОІ – волоконно-оптичний інтерферометр
- ІОС – інтегральна оптична схема
- ЛФД – лавинний фотодіод
- МК – мікроконтролер
- ПВВ – повне внутрішнє відбиття
- ППЗ – профіль показника заломлення
- ППХ – пружньо-поверхнева хвиля
- РБВ – розподілене Брегівське відбиття
- РЗЗ – розподілений зворотній зв'язок
- РРМ – рівновісний розподіл мод
- ФІД – фазовий інтерференційний датчик

ВСТУП

Насамперед слід визначитися, до якого напрямку в техніці відноситься розробка волоконно-оптичних датчиків (ВОД). З назви слідує, що це один з напрямків сучасної оптики. До цього часу з'явилося багато напрямлень в сучасній оптиці і, відповідно, багато назв: електрооптика, магнітооптика, акустооптика, волоконна оптика, інтегральна оптика, мікрооптика, нелінійна оптика, голографія, іконіка і т.і. Така різноманітність термінів призвела до необхідності введення нової назви, яка б об'єднувала нові сучасні напрями оптики. Термін «Фотоніка» став такою об'єднуючою назвою. На сьогоднішній день існує декілька визначень терміна «фотоніка». Наведемо деякі з них:

а) в 2004 році американське видавництво *Laurin Publishing Co Inc.* публікує словник по фотоніці, в якому визначає фотоніку наступним чином: «...Фотоніка охоплює галузь науки і техніки, що пов'язана з використанням світлового випромінювання (або потоку фотонів) в оптичних елементах, пристроях і системах, в яких генеруються, підсилюються, модулюються, розповсюджуються і детектуються оптичні сигнали, а також відбувається їх запис або відображення...» [1]. В цьому визначенні важливим пунктом є той факт, що фотон є головним діючим інформаційним носієм;

б) у 2006 році міністерство торгівлі і промисловості Об'єднаного Королівства публікує стратегічну програму з розвитку фотоніки, в якій дається таке визначення фотоніки: «...Фотоніка – технологія, яка включає випромінювання світла, його передачу, відхилення, посилення і детектування за допомогою оптичних компонент і пристроїв, лазерів та інших джерел, оптичного волокна, електро-оптичних метрологічних пристроїв та інших складних нанофотонних систем...» [1].

Сучасна фотоніка орієнтована на вирішення наступних завдань:

- а) мініатюризацію оптичних елементів, пристроїв і систем;
- б) інтеграцію оптичних елементів, пристроїв і систем на єдиній базі (підкладці, чіпі);
- в) надшвидкодіючих оптичних систем (в повністю оптичних пристроях управління сигналом може здійснюватися за час 10 фс);
- г) надшвидкісну передачу великих масивів інформації (більше 1 Тбіт/с);
- д) низький рівень енергії керуючих сигналів (в сучасних оптичних перемикачах енергія керуючого сигналу може становити 1–5 фДж);
- е) поліфункціональність оптичних матеріалів.

В стратегічних програмах Євросоюзу і Об'єднаного Королівства з розвитку фотоніки в ХХІ столітті з численних додатків виділено декілька пріоритетних напрямків, де вже є значні напрацювання і в найближчій перспективі проглядається можливість отримання результатів, важливих для комерційних пропозицій. Якщо розглядати розробку і впровадження ВОД для автоматизованих інформаційних і інтелектуальних систем то такими напрямками є:

- а) інформаційні та телекомунікаційні технології;
- б) безпека і оборона;
- в) енергетика, освітлення і дисплеї;
- г) індустріальна фотоніка.

Сьогодні понад 100 університетів світу ведуть підготовку бакалаврів і магістрів за напрямом «Фотоніка». Спектр назв спеціальностей широкий, але, так чи інакше, вони включають в себе ключове слово фотоніка: "Photonics", "Photonic Networks", "Photonics Engineers", "Engineering in Photonics", "Optics and Photonics", "Optical and Photonic Engineering", "Photonics and Optoelectronic Devices" і т.і. Так, наприклад, 5 провідних університетів Європи (Ghent University – Belgium; University of Brussels – Belgium;

St.Andrews University – Scotland; Heriot-Watt University – Scotland; Royal Institute of Technology – Sweden) створили спільну програму "Erasmus Mundus Master of Science Program in Photonics" для підготовки висококваліфікованих фахівців у всіх аспектах фотоніки.

РОЗДІЛ 1

СВІТЛОВИД, ЯК ЕЛЕМЕНТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

1.1. Геометрична оптика світловодів

Світловод являє собою два діелектричні середовища – осердя і оболонку. Електромагнітні коливання поширюються по осердю завдяки явищу повного внутрішнього відбиття (ПВВ).

Умови проходження променя через межу розподілу двох середовищ описуються законом Снеліуса. На рис. 1.1 показане проходження променя через межу розподілу двох середовищ.

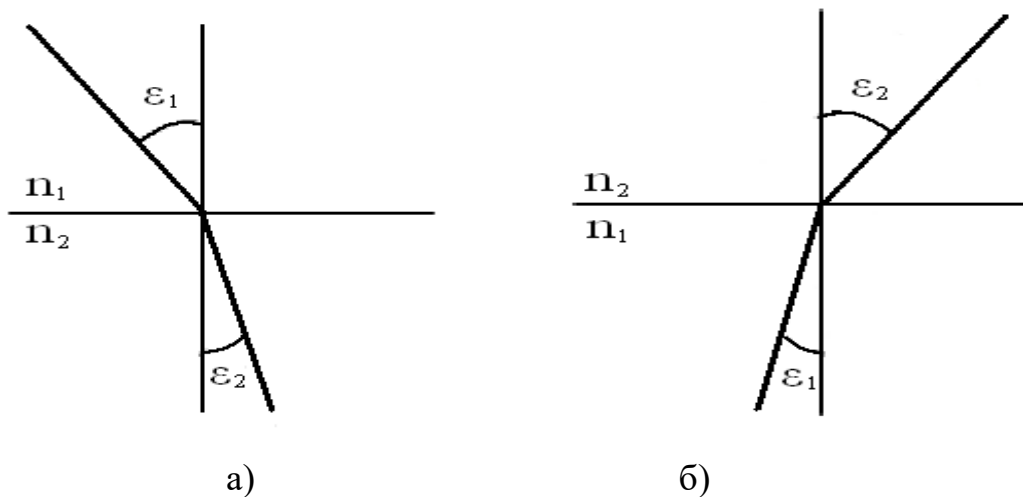


Рис. 1.1. Проходження променя через межу розділу двох середовищ:

а – з менш щільного в більш щільне ($n_2 > n_1$); б – з більш щільного в менш щільне
($n_2 < n_1$)

Відповідно до закону Снеліуса виконується умова:

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_2 ,$$

де n_1 і n_2 – показники заломлення осердя й оболонки світловода відповідно;

ε_1 і ε_2 – кути падіння й заломлення променя відповідно.

Якщо $n_1 > n_2$, то при $\varepsilon_2 = 90^\circ$ настає явище ПВВ. Тоді $\sin \varepsilon_2 = 1$, а $\sin \varepsilon_k = \frac{n_2}{n_1}$ – критичний кут ПВВ. Явище ПВВ спостерігається за умови,

якщо $\varepsilon > \varepsilon_k$.

На підставі явища ПВВ можна розрахувати числову апертуру (NA) світловода. Метод розрахунку пояснює рис. 1.2.

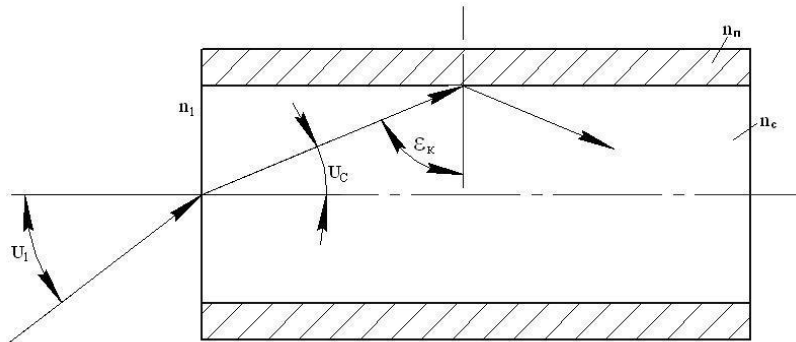


Рис. 1.2. До розрахунку числової апертури світловода

Числова апертура в загальному випадку визначається відповідно до співвідношення:

$$NA = n_1 \sin U_1.$$

З урахуванням рис. 1.2 запишемо:

$$\begin{aligned} n_1 \sin U_1 &= n_c \sin U_c = n_c \sin(90 - \varepsilon_k) = n_c \cos \varepsilon_k = \\ &= n_c \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon_k} = n_c \sqrt{1 - \left(\frac{n_n}{n_c}\right)^2} = \sqrt{n_c^2 - n_n^2}. \end{aligned}$$

Остаточно:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_n^2}. \quad (1.1)$$

Співвідношення (1.1) є наближенням і дозволяє визначити числову апертуру світловода тільки з урахуванням меридіональних променів (таких, що перетинають вісь світловода).

Важливою характеристикою світловода є нормована частота V , що визначає тип світловода, виходячі з наступних співвідношень:

- а) $V < 2,4$ – світловод одномодовий;
- б) $V > 2,4$ – світловод багатомодовий;
- в) $V = 2,4$ – нестійка межа.

Нормована частота визначається з співвідношення:

$$V = \frac{\pi \cdot d_c}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_n^2},$$

де d_c – діаметр осердя світловода; λ – довжина хвилі; n_c і n_n – показники заломлення осердя й покриття світловода відповідно.

У загальному випадку показник заломлення осердя світловода є функцією радіуса. Ця функція має назву профіля показника заломлення (ППЗ).

Залежно від конструкції світловода профіль показника заломлення може змінюватися, як показано на рис. 1.3.

Залежність ППЗ від радіуса для градієнтних світловодів може мати вигляд [3]:

$$n = n_c \left[1 - \left(\frac{n_c^2 - n_{kp}^2}{n_c^2} \right) \left(\frac{r}{d_c} \right)^\alpha \right]^{1/2},$$

де α – параметр, що визначає градієнт показника заломлення; n_c – показник заломлення в центрі світловода; n_{kp} – показник заломлення на краю світловода; d_c – діаметр осердя світловода.

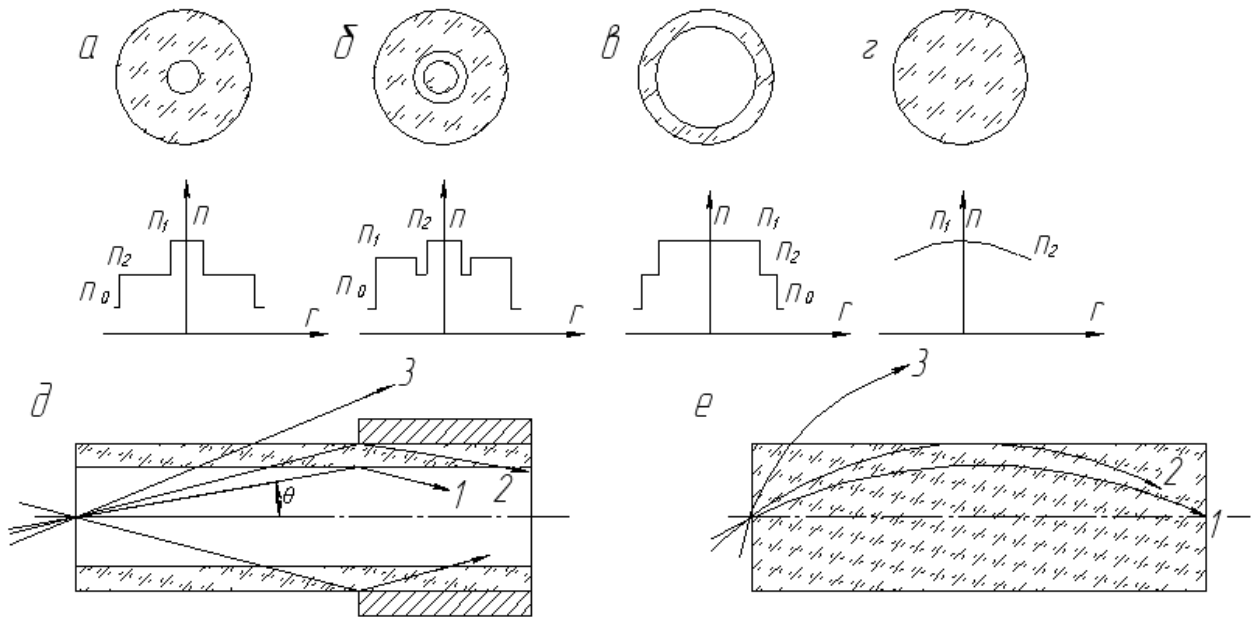


Рис. 1.3. Структура типових волоконних світловодів і

картини розповсюдження променів у них:

- а – одномодовий світловод ($d_c = 6 - 10$ мкм); б – W-образний профіль показника заломлення; в – багатомодовий світловод зі східчастим профілем показника заломлення ($d_c = 50 - 100$ мкм); г – градієнтний світловод; д, е – хід променів у східчастому і градієнтному світловодах

Одне з уточнень, яке характеризує поширення випромінювання у світловоді з урахуванням електромагнітної теорії, полягає в тому, що в оболонці також поширюються електромагнітна хвиля. Ця хвиля має назву загасаючою. Її амплітуда експоненційно зменшується залежно від зміни радіуса світловода й розповсюджується за межами осердя на невеликій відстані від нього. Це явище досліджувалося науковцями Гоосом і Хенкеном.

1.2. Загасання і втрати в оптичних волокнах

Загасання є найважливішим параметром оптичних світловодів. Загасання обумовлене власними втратами у волоконному світловоді (α_c) й додатковими кабельними (α_d) втратами, обумовленими скруткою, а також

деформацією й вигинами оптичних волокон при накладенні покриттів і захисних оболонок у процесі виготовлення.

Загальні втрати у світловоді визначаються співвідношенням:

$$\alpha_z = \alpha_c + \alpha_d.$$

Власні втрати волоконного світловода складаються із втрат поглинання (α_n) і втрат розсіювання (α_p):

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p.$$

Втрати, що виникають при розповсюдженні сигналу по волоконному світловоду, пояснюються тим, що частина потужності, що надходить на вхід світловода, розсіюється внаслідок зміни напрямку розповсюдження променів на нерегулярностях (α_p). Інша частина потужності поглинається як самими молекулами кварцу (α_n), так і сторонніми домішками ($\alpha_{дом}$), виділяючись у вигляді джоулевого тепла.

Домішками можуть бути іони металів (нікель, залізо, кобальт і ін.) і гідроксильні групи (ОН), що приводять до появи резонансних сплесків загасання.

Остаточні сумарні втрати визначаються з виразу:

$$\alpha_z = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_d + \alpha_{дом}.$$

Загасання за рахунок поглинання пов'язане із втратами на діелектричну поляризацію залежить від властивостей матеріалів і визначається відповідно до співвідношення:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi \cdot n_c \cdot \text{tg} \delta}{\lambda}, \quad \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]$$

де $\text{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат для світловода (довідкова величина).

Втрати розсіювання обумовлені неоднорідностями матеріала волоконного світловода, відстані між якими менше довжини хвилі, і тепловою флуктуацією показника заломлення.

Величина втрат на розсіювання, називана релесівськими, визначається наступним співвідношенням:

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4}, \quad \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]$$

де K_p – коефіцієнт розсіювання (довідкова величина).

Втрати на релесівське розсіювання визначають нижню межу втрат, властивих волоконним світловодам. Ця межа різна для різних довжин хвиль і зі збільшенням довжини хвилі зменшується.

При поширенні електромагнітної хвилі із $\lambda > 2\text{мкм}$ починають інтенсивно зростати втрати на поглинання. Це обумовлено іншим механізмом втрат кварцових світловодів в інфрачервоній області спектра. Ці втрати пропорційні показовій функції й зменшуються з збільшенням частоти за законом:

$$\alpha_{i.ч.} = C \cdot e^{-\frac{k}{\lambda}}, \quad \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]$$

де C і k – сталі коефіцієнти (для кварцу $k = (0,7 - 0,9) \cdot 10^{-6}$ м; $C = 0,9$).

У світловоді (кварцовому) існує три вікна прозорості:

- а) перше вікно прозорості на довжині хвилі $\lambda = 0,85$ мкм;
- б) друге вікно прозорості на довжині хвилі $\lambda = 1,3$ мкм;
- в) третє вікно прозорості на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм.

Найменше загасання є в третьому вікні прозорості.

У цілому втрати у світловоді визначаються співвідношенням [3]:

$$B = 10 \lg \frac{P_2}{P_1},$$

де P_1 і P_2 – потужність випромінювання на вході й виході світловода.

Зменшення втрат здійснюють переважно технологічним шляхом, найчастіше це зменшення шкідливих домішок.

Наприклад, якщо $P_2 = 20$ Вт; $P_1 = 1000$ Вт, тоді $B = -16,989$ дБ ≈ 17 дБ.

Залежності між затуханням у децибелах і потужністю, що залишилась наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Залежності між затуханням у децибелах і потужністю, що залишилась

Затухання, дБ	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0	20,0
Потужність, що зал. %	97,7	89,1	79,4	50,1	31,6	10,0	1,0

При визначенні втрат у світловодах їх часто визначають по відношенню до $P_1 = 1$ мВт, тоді втрати визначаються в мілідецибелах і розраховуються за формулою:

$$B = 10 \lg \frac{P_2}{1\text{мВт}} \text{ дБм.}$$

В цьому випадку використовується від'ємна величина втрат. Наприклад втрати у $B = -10$ дБм означають що на виході отримана потужність на 10 дБ менше ніж 1 мВт, тобто вона дорівнює 100 мкВт. Аналогічно втратам $B = -3$ дБм відповідає потужності на виході 500 мкВт.

Втрати при з'єднанні світловодів нормуються. Для роз'ємних з'єднань вони становлять:

- а) $B \leq 0,36$ дБ у спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 1,1-1,35$ мкм;
- б) $B \leq 0,22$ дБ у спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 1,5-1,85$ мкм.

Для нероз'ємних з'єднань втрати становлять $B \leq 0,1$ дБ.

При з'єднанні світловодів виникає ряд похибок, одна з яких невідповідність діаметрів світловодів. Залежність втрат від співвідношення D_1/D_2 , а також вплив інших факторів на величину втрат показаний на рис. 1.4 [3]. Для аналітичного визначення втрат при з'єднанні світловодів від деяких факторів можна скористатися наступними співвідношеннями.

Для багатомодового світловода втрати на децентрування дорівнюють:

$$B_1 = -10 \lg \left[\frac{2}{\pi} \left(\arccos \frac{\delta}{d_c} \right) - \frac{\delta}{d_c} \left[1 - \left(\frac{\delta}{d_c} \right)^2 \right]^{1/2} \right], \text{ дБ}$$

де δ – величина поперечного децентрування; d_c – діаметр осердя багатомодового світловода.

Величину $\arccos \delta/d_c$ необхідно визначати в радіанах.

Для одномодового світловода втрати на децентрування визначаються співвідношенням:

$$B_1 = -10 \lg [e^{-\delta^2/d_{\text{эф}}^2}], \text{ дБ}$$

де $d_{\text{эф}}$ – ефективний діаметр світловода.

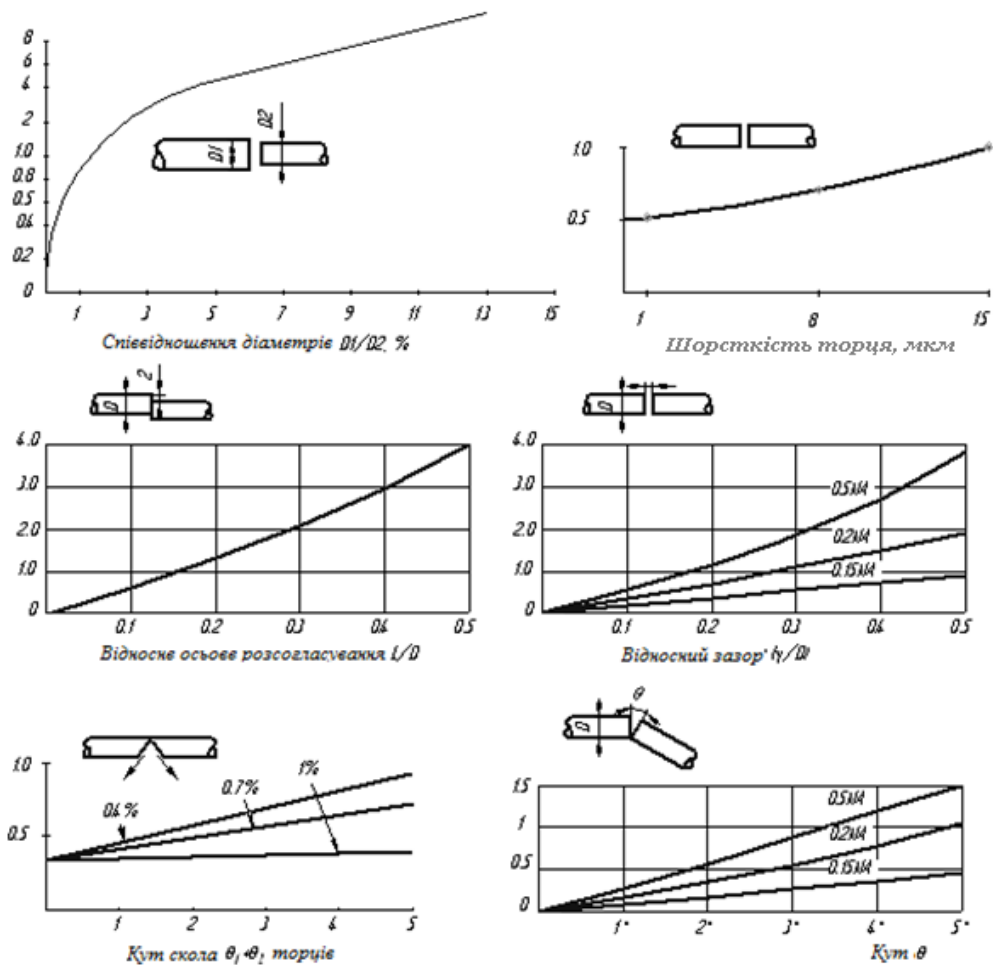


Рис. 1.4. Втрати в світловодах

Залежність втрат від осьової неузгодженості для одномодового світловода визначається співвідношенням:

$$B_3 = -10 \lg \left[1 - z \frac{\text{tg} NA}{2d_{\text{ef}}} \right], \text{ дБ}$$

де z – відстань між торцями світловодів у мкм; NA – числова апертура світловода; d_{ef} – ефективний діаметр світловода.

Для багатомодового світловода втрати внаслідок кутової неузгодженості визначаються співвідношенням:

$$B_2 = -10 \lg \left[1 - \frac{n \cdot \theta}{\pi \cdot n_c \cdot (2\Delta)^{1/2}} \right] \text{ при } \theta \leq 1^\circ, \text{ дБ}$$

де n – показник заломлення середовища, у якому перебуває світловод; Δ – відносна зміна профіля показника заломлення; θ – кут між вісями світловодів у радіанах.

Для одномодового світловода втрати внаслідок кутової неузгодженості визначаються співвідношенням:

$$B_2 = -10 \lg \left[e^{-\left(\frac{\pi n n_{\text{ef}} \theta}{\lambda} \right)^2} \right], \text{ дБ}$$

де λ – довжина хвилі випромінювання, розповсюдженого у світловоді; θ – кут, під яким розташовані торці світловодів.

1.3. Дисперсія і параметри швидкодії світловодів

Одним з важливих явищ процесу поширення сигналів по світловоду є дисперсія – розсіювання в часі спектральних або модових складових сигналу. У результаті дисперсії сигнал на вхід прийомного пристрою приходить тим більше спотвореним, чим більша довжина світловоду.

Дисперсія може виникати при великій кількості розповсюджуваних по волокну мод (модова дисперсія), що залежить від типу ППЗ у волокні. Дисперсія виникає через некогерентність джерел випромінювання й наявності певного спектра (а не однієї довжини хвилі) у переданому сигналі (хроматична дисперсія). У реальних градієнтних і одномодових волокнах істотною може виявитися "профільна" дисперсія, що виникає через флуктуацію ППЗ, яка викликана різними причинами.

В багатомодових волокнах найбільший внесок у розширення імпульсів вносить модова дисперсія. Різні моди мають різну швидкість поширення. У геометричній інтерпретації відповідним модам променів відповідають різні кути розповсюдження в світловоді. А це призводить до того, що різні моди проходять різний шлях у осерді волокна й, отже, вони надходять на вихід світловода з різною затримкою.

Варто роздільно розглянути процес виникнення модової дисперсії в східчастих й градієнтних волокнах. У волокнах з східчастим ППЗ величина модової дисперсії визначається з виразів:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta \cdot n_c}{c} l \text{ при } l \leq l_c;$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta \cdot n_c}{c} \sqrt{l \cdot l_c} \text{ при } l \geq l_c,$$

де Δ – відносна зміна профіля показника заломлення; n_c – показник заломлення осердя; c – швидкість поширення електромагнітних коливань ($c = 3 \cdot 10^5$ км/с); l – довжина оптичного волокна; l_c – довжина зв'язку мод (3–7 км для східчастого багатомодового волокна).

Довжина зв'язку мод – це довжина оптичного волокна, після проходження якої, у результаті взаємного перетворення мод на неоднорідностях (обмін енергії між модами і їх висвічування), співвідношення між потужностями різних мод стає практично сталим. При цьому досягається режим рівновісного розподілу мод (PPM). Залежність модової дисперсії від довжини лінії зв'язку представлена на рис. 1.5.

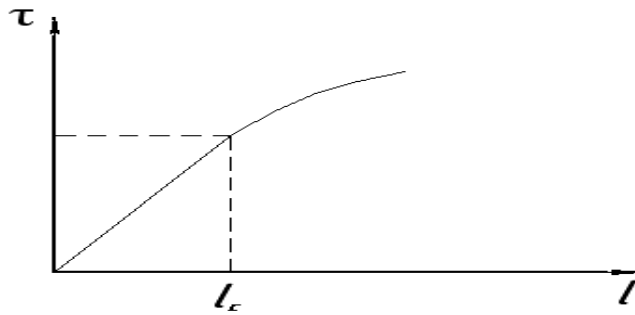


Рис. 1.5. Залежність модової дисперсії від довжини лінії зв'язку

У градієнтних волокнах різні промені також проходять різний шлях, їхня швидкість також різна. Білявісьові промені поширюються по короткій траєкторії, але в середовищі з порівняно високим показником заломлення, тобто з малою швидкістю. Периферійні промені – по довгій траєкторії, але в середовищі з низьким показником заломлення, тобто з великою швидкістю.

У цілому затримка мод в градієнтних волокнах виявляється приблизно однаковою, а розширення імпульсів у порівнянні зі східчастими волокнами знижується більш ніж в 10 разів.

Величина модової дисперсії в градієнтних волокнах визначається наступними співвідношеннями:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_0}{2c} l \quad \text{при } l \leq l_c;$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_0}{2c} \sqrt{l \cdot l_c} \quad \text{при } l \geq l_c,$$

де Δ – відносна зміна профіля показника заломлення; n_0 – показник заломлення в центрі осердя; c – швидкість розповсюдження електромагнітних коливань; l – довжина оптичного волокна; l_c – довжина зв'язку мод (10–13 км для градієнтного волокна).

Хроматична дисперсія викликана наявністю спектра частот у джерелах випромінювання, характером діаграми спрямованості і їх некогерентністю.

Хроматичну дисперсію розділяють по таких типах:

- а) матеріальна дисперсія;

- б) хвильова дисперсія;
- в) профільна дисперсія.

Матеріальна дисперсія пояснюється тим, що коефіцієнт заломлення є функцією від довжини хвилі, а будь-яке джерело випромінювання генерує не на одній довжині хвилі, а в певному спектральному діапазоні. У результаті, різні спектральні складові переданого оптичного сигналу мають різну швидкість розповсюдження, що приводить до їхньої різної затримки на виході волокна.

Через вузьку смугу випромінюваних довжин хвиль в лазерних джерелах випромінювання даний вид дисперсії виявляється незначним. У некогерентних джерелах – випромінюючих світлодіодах смуга випромінювання істотно ширше, і ця дисперсія є досить значною.

Основний параметр, що характеризує матеріальну дисперсію – відношення ширини спектрального діапазона до довжини хвилі $\Delta\lambda/\lambda$. Це відношення для лазерів становить 0,001, а для випромінюючих світлодіодів – 0,1, тобто на два порядки більше. Величину розширення імпульсів через матеріальну дисперсію можна знайти з виразу :

$$\tau_{mat} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \cdot l ,$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра джерела випромінювання; λ – довжина переданої хвилі; c – швидкість світла; l – довжина лінії зв'язку.

Для інженерних розрахунків у першому наближенні можна використовувати спрощену формулу, що не враховує форму профіля показника заломлення (для ідеального східчастого профілю показника заломлення):

$$\tau_{mat} = \Delta\lambda \cdot l \cdot M(\lambda),$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання джерела (1–3 нм для лазера; 20–40 нм для світловипромінюючих діодів); l – довжина лінії зв'язку; $M(\lambda)$ – питома матеріальна дисперсія.

Питома матеріальна дисперсія визначається в пікосекундах на кілометр довжини світловода й на нанометр ширини спектра. Значення питомої матеріальної дисперсії є табличним й представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Значення питомої матеріальної дисперсії

Довжина хвилі λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,33	1,6	1,8
$M(\lambda)$, пс/(км·нм)	400	123	40	10	-3	-3	-18	-20	-23

Зі збільшенням довжини хвилі значення матеріальної дисперсії зменшується, а потім проходить через нуль і здобуває мінусове значення.

Хвильова дисперсія обумовлена процесами усередині моди. Вона характеризується залежністю коефіцієнта поширення моди від довжини хвилі.

Будучи складовою частиною хроматичної дисперсії (так само як і матеріальна дисперсія), хвильова дисперсія залежить від ширини переданого спектра частот. Величина розширення імпульсів через хвильову дисперсію визначається співвідношенням:

$$\tau_{\text{ХВ}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2n_1\Delta \cdot l}{c},$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра джерела випромінювання; λ – довжина переданої хвилі; Δ – відносна зміна профіля показника заломлення; l – довжина лінії зв'язку; c – швидкість світла.

Для інженерних розрахунків можна використовувати спрощену формулу:

$$\tau_{\text{ХВ}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot B(\lambda),$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра джерела випромінювання; l – довжина лінії зв'язку; $B(\lambda)$ – питома хвильова дисперсія.

Питома хвильова дисперсія так само, як і питома матеріальна дисперсія, визначається в пікосекундах на кілометр довжини світловода й на нанометр ширини спектра. Значення питомої хвильової дисперсії є табличним й представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Значення питомої хвильової дисперсії

Довжина хвилі λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,33	1,6	1,8
$V(\lambda)$, пс/(км·нм)	3	3	6	7	8	8	12	14	16

Як видно з табл. 1.2 і 1.3 поблизу довжини хвилі $\lambda \approx 1,33$ мкм відбувається взаємна компенсація матеріальної й хвильової дисперсії. Через це хвиля 1,3 мкм набуває широкого застосування при передачі сигналу по одномодовим волокнам, однак по загасанню переважає хвиля 1,33 мкм. Тому для досягнення мінімуму дисперсії доводиться варіювати профілем показника заломлення й діаметром осердя. При складному тришаровому профілю показника заломлення можна й на довжині хвилі 1,33 мкм одержати мінімум дисперсійних перекручувань.

Причинами виникнення профільної дисперсії є поперечні й поздовжні малі відхилення (флуктуації) геометричних розмірів і форм волокна. Профільна дисперсія може проявлятися як у багатомодових так і в одномодових світловодах.

Величина розширення імпульсів через профільну дисперсію визначається з співвідношення:

$$\tau_{np} = \frac{n_1^2}{cn} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\Delta} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} - \frac{m_1}{n_1} \right) \cdot \left[2(\Gamma - b) + v \frac{\partial^2(bf)}{\partial f^2} \right] \cdot l,$$

де n_1 – ефективний показник заломлення; c – швидкість світла; Δ – відносна зміна профіля показника заломлення; λ – довжина переданої хвилі; m_1 – груповий показник заломлення осердя; Γ – коефіцієнт локалізації по

потужності; b – нормована стала поширення; f – критична частота; l – довжина лінії зв'язку.

Для інженерних розрахунків можна використовувати спрощену формулу:

$$\tau_{np} = \Delta\lambda \cdot l \cdot P(\lambda),$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра джерела випромінювання; l – довжина лінії зв'язку; $P(\lambda)$ – питома профільна дисперсія.

Питома профільна дисперсія визначається в пікосекундах на кілометр довжини світловода й на нанометр ширини спектра. Значення питомої профільної дисперсії є табличним й вони представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Значення питомої профільної дисперсії

Довжина хвилі λ , мкм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3	1,33	1,6	1,8
$P(\lambda)$, пс/(км·нм)	0	1,3	2	2,3	4	3	3,3	6,3	7,3

Результуюче значення розширення імпульсів за рахунок модової, матеріальної, хвильової і профільної дисперсій визначається співвідношенням:

$$\tau = \sqrt{\tau_{mod}^2 + [\tau_{mat} + \tau_{хв} + \tau_{np}]^2}.$$

Ширина смуги пропускання оптичного волокна визначається співвідношенням:

$$\Delta F = \frac{k}{\tau}, \text{ МГц}$$

де k – коефіцієнт, що враховує форму оптичного імпульса (від 0,44 при гаусовській формі імпульсу до 0,6 при прямокутних імпульсах); τ – часове розширення імпульса.

Порівнюючи дисперсійні характеристики різних світловодів, можна відзначити, що кращими із цього погляду є одномодові світловоди де є лише хроматична дисперсія, величина якої не перевищує декількох пікосекунд у певному діапазоні довжин хвиль ($\lambda = 1,2-1,6$ мкм).

Із багатомодових світловодів кращі дані по дисперсії в градієнтних світловодів із плавним параболічним законом зміни ППЗ, у яких відбувається вирівнювання часу поширення різних мод і визначальною є матеріальна дисперсія. По абсолютній величині дисперсія зменшується з збільшенням довжини хвилі й коливається в межах 1–2 нс/км.

Найбільш сильно дисперсія проявляється в східчастих багатомодових світловодах, що приводить до неможливості їхнього використання у цифрових високошвидкісних ВОД.

Ширина смуги пропускання оптичного волокна при відомій нормованій смузі пропускання на один кілометр (ΔF_1) для коротких світловодів менших ніж довжина сталого режиму ($l \leq l_c$) дорівнює:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{l_x}.$$

Для довгих світловодів ширина смуги пропускання дорівнює:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_c l_x}}.$$

1.4. Технологія спектрального ущільнення каналів

Спектральне ущільнення каналів передавання, або ущільнення по довжинах хвиль (англ. *Wavelength Division Multiplexing*, WDM) — технологія, яка дозволяє одночасне передавання декількох незалежних інформаційних сигналів по одному єдиному оптичному каналу передавання (оптичному волокну), використовуючи оптичні несучі з різними довжинами хвиль.

Технологія WDM дозволяє істотно збільшити пропускну здатність оптичного каналу передавання за рахунок використання всієї його смуги пропускання.

Характерною особливістю і суттєвою перевагою WDM технології є можливість реалізації в одному каналі передавання багатьох оптично прозорих каналів, в кожному з яких можна вести передавання сигналів з будь-яким форматом. Таким чином, по одному каналу передавання можна одночасно передавати синхронні, асинхронні і аналогові сигнали, і немає потреби в єдиній структурі сигналів, як це є, наприклад, в системах із часовим ущільненням каналів передавання.

В системах передавання даних з ущільненням каналів по довжинах хвиль просторово розділені оптичні несучі різних довжин хвиль, які модулюються незалежними інформаційними сигналами, з допомогою спеціальних оптичних мультиплексорів об'єднуються в один оптичний пучок, який далі вводиться в канал передавання. На приймальній стороні використовується оптичний демультиплексор, який розділяє прийнятий оптичний пучок на спектральні складові, або оптичні канали.

В якості пристроїв об'єднання і розділення спектральних каналів (оптичних мультиплексорів і демультиплексорів) використовуються волоконно-оптичні розгалужувачі. Звичайно можуть використовуватись як селективні так і неселективні розгалужувачі, тому розрізняють два види спектрального ущільнення: спектрально-селективне і широкосмугове. Спектрально-селективне ущільнення характеризується малими втратами в порівнянні з широкосмуговим, оскільки вся потужність оптичного сигналу переноситься на своїй довжині хвилі по своєму шляху. В реальних системах із спектрально-селективним ущільненням каналів оптичні каналні втрати визначаються в основному втратами, які відбуваються на з'єднаннях волокон та в оптичних мультиплексорах і демультиплексорах.

При широкосмуговому ущільненні потужності оптичних сигналів з різними довжинами хвиль просто об'єднуються. Оскільки в даному випадку

використовується неселективний демультіплексор, то вся передана по волокну оптична потужність порівну розділяється між всіма каналами. Після демультіплексування в кожному оптичному каналі міститься деяка частина потужностей всіх оптичних сигналів. Тому, щоб виділити відповідний сигнал, на виході демультіплексора використовуються оптичні каналні фільтри. Отже, у системах із широкосмуговим ущільненням каналів передавання величина оптичних каналних втрат буде залежати і від кількості каналів.

В сучасних системах передавання даних використовується переважно спектрально-селективне ущільнення, яке характеризується найменшими оптичними втратами. Широкосмугове ущільнення також використовується в деяких ВОД з малою кількістю каналів.

Сучасні WDM системи на основі стандартного частотного плану (ITU-T Rec. G.692) можна розділити на три групи:

а) грубі WDM (Coarse WDM—CWDM) — системи з частотним розділенням каналів з частотою не менше 200 ГГц, що дозволяють мультіплексувати не більше 18 каналів;

б) точні WDM (Dense WDM—DWDM) — системи з рознесенням каналів з частотою не менше 100 ГГц, що дозволяють мультіплексувати не більше 32 каналів;

в) високоточні WDM (High Dense WDM—HDWDM) — системи з рознесенням каналів з частотою 50 ГГц і менше, що дозволяють мультіплексувати не менше 64 каналів.

Переваги DWDM очевидні. Ця технологія дозволяє отримати найбільш масштабний і рентабельний спосіб розширення смуги пропускання волоконно-оптичних каналів в сотні разів. Пропускнуну здатність оптичних ліній на основі систем DWDM можна нарощувати, поступово додаючи у міру розвитку мережі у вже існуюче обладнання нові оптичні канали.

Контрольні запитання

1. В чому полягає поняття повного внутрішнього відбиття?
2. Як визначити критичний кут світловода?
3. Які основні геометричні характеристики світловодів?
4. Що таке нормована частота та як вона визначається?
5. Як за допомогою нормованої частоти визначити тип світловода?
6. Як визначити числову апертуру світловода?
7. Чим обумовлене затухання у світловодах?
8. Як визначити втрати на діелектричну поляризацію у світловоді?
9. Як визначити втрати на розсіювання у світловоді?
10. Які особливості затухання у світловодах, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектра?
11. Як визначаються загальні втрати у світловоді?
12. Які втрати можуть відбуватися при з'єднанні світловодів?
13. Які види дисперсії існують у світловодах?
14. Яка природа модової дисперсії і від чого вона залежить?
15. Як визначити матеріальну дисперсію у світловоді?
16. Як визначити хвильову дисперсію у світловоді?
17. Як визначити профільну дисперсію у світловоді?
18. В чому полягає технологія спектрального ущільнення каналів і які її переваги?
19. На які групи поділяються сучасні системи WDM?

РОЗДІЛ 2

ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОПТИКИ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

2.1. Принцип дії елементів інтегральної оптики

Інтегральна оптика розглядає різноманітні явища пов'язані з поширенням світла, його перетворенням і генеруванням в хвильоводних структурах на основі тонких (тобто порівнянних з довжиною хвилі λ) діелектричних і напівпровідникових шарів. Зараз діапазон λ , який становить найбільший інтерес для інтегральної оптики – від 0,1 до 10 мкм. Інтегральна оптика передбачає створення інтегральних оптичних систем, подібно інтегральним мікросхемам, на єдиній підкладці [4].

Такі інтегральні оптичні системи мають цілу низку переваг перед звичайними «об'ємними» оптичними системами. По перше, вони можуть бути зроблені дуже компактними, мати малі габарити і вагу. По друге, вони не боятимуться вібрацій. Вони повинні добре поєднуватися з електронними та акустoeлектронними планарними пристроями. Для створення інтегральних (планарних) оптичних пристроїв підходить планарна технологія мікроелектроніки, досить добре розроблена до теперішнього часу.

Розглянемо тепер коротко деякі основні фізичні принципи, на яких базується інтегральна оптика. Хвильоводне поширення світла в тонких шарах відбувається шляхом ПВВ (рис. 2.1). Оптичний хвильовід, наприклад, може представляти тонку діелектричну плівку з коефіцієнтом заломлення n_0 ,

нанесену на підкладку з коефіцієнтом заломлення $n_1 \leq n_0$. Світловий промінь, падаючи на межу розділу плівка-підкладка під кутом більшим критичного отримує ПВВ.

Точно так він буде відбиватися і від межі плівка-повітря. Загасання, яке отримує світло при такому поширенні по плівковому хвильоводу, може бути дуже малим – менше 0,1 дБ/см.

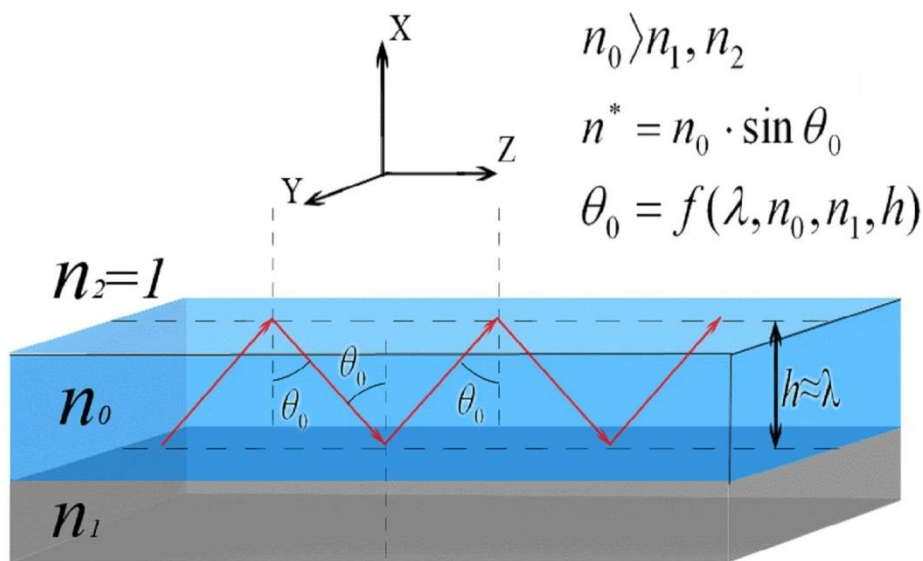


Рис. 2.1. Тонкоплівковий хвильовод

Введення випромінювання в хвильовод може здійснюватися, наприклад, за допомогою розташованою над ним з зазором δ призми з матеріалу з коефіцієнтом заломлення n_3 (рис. 2.2). У місці контакту плівки з призмою відбувається порушення ПВВ, що поширюється з призми у плівку. Із закону Снеллиуса легко знайти кут θ_3 :

$$\sin \theta_3 = \frac{n_0}{n_3} \sin \theta_0.$$

Зазвичай застосовують призми з $n_3 > n_0$, так як $\sin \theta_0$ може бути близький до одиниці. Зв'язок між світловими полями в призмі і плівці здійснюється за рахунок проникнення в плівку експоненціально спадаючих полів, що мають

місце при ПВВ (часто це явище називають тунелюванням, а таке введення – тунельним).

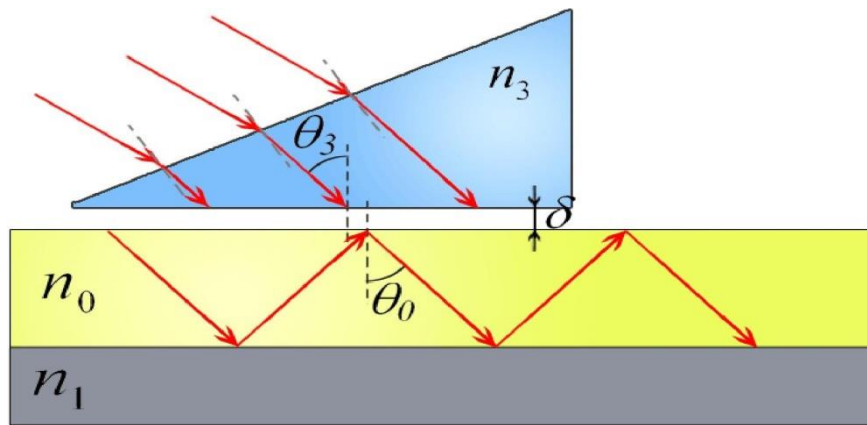


Рис. 2.2. Призменне введення випромінювання в оптичний хвильовод

У площині плівки хвильові світлові пучки можуть перетворюватися різними пасивними і модулюючими елементами. Наприклад, якщо в підкладці спочатку зробити сферичне поглиблення, а потім нанести плівку, то хвильоводний світловий пучок, проходячи над поглибленням, отримує квадратичний по перетину фазовий зсув і фокусується на деякій відстані f (рис. 2.3). Такий елемент є планарною геодезичною лінзою, тому що роль лінзи виконує поглиблення.

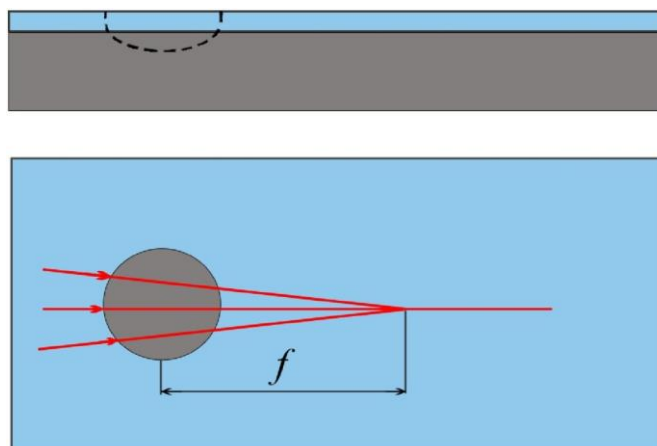


Рис. 2.3. Геодезична планарна лінза

Легко реалізуються в планарних пристроях також електрооптичні і акустооптичні модулятори і дефлектори. Схема такого наведена на рис. 2.4. Тут торцевий перетворювач 1 збуджує в підкладці пружні поверхневі хвилі (ППХ), які змінюють показник заломлення хвильового шару по періодичному закону і таким чином створюють фазову дифракційну ґратку. Хвильоводний світловий пучок 2, падаючи під кутом Брегга θ_B на цю ґратку, дифрагує. Дифрагований промінь 3 виявляється в результаті промодульованим сигналом, що подається на вхід перетворювача 1. Модуляція може бути амплітудною або частотною. Крім того, кут відхилення $2\theta_B$ пучка 3 залежить від частоти ППХ.

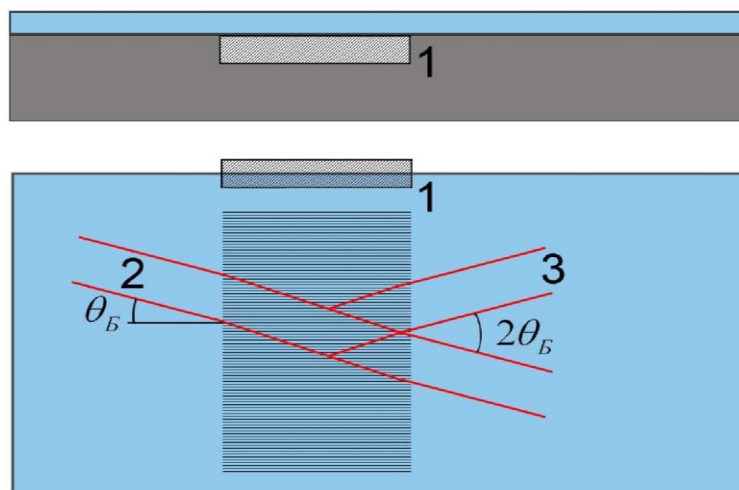


Рис. 2.4. Акустооптичний модулятор

Якщо в якості підкладки використовується напівпровідник, наприклад, кремній, то тут реалізуються інтегральні фотоприймачі (рис. 2.5). В n-кремнії створюється р-область для детектування світла. Поверхня кремнію окислена, так що на ній утворюється плівка SiO_2 товщиною ~ 1 мкм. Зверху наноситься хвильовод (зі скла або Si_3N_4) так, щоб світло, поширюючись по ньому, потрапляло на р-n перехід. Далі наносяться електроди для знімання фотоструму з р-n переходу. Буферний шар SiO_2 запобігає поглинанню світла, що поширюється по хвильоводу, в кремнії.

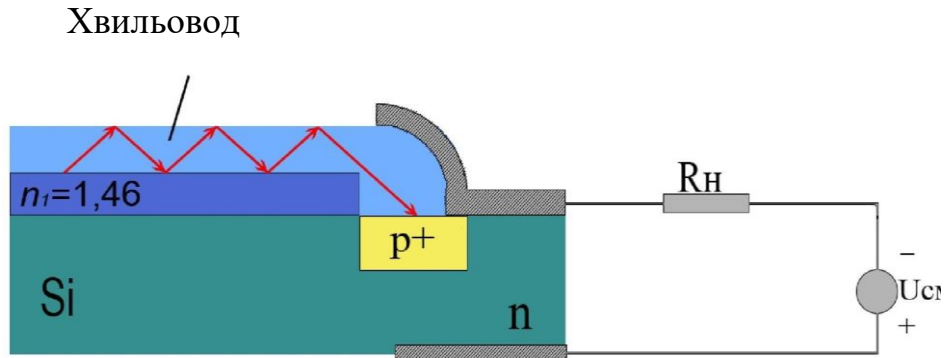


Рис. 2.5. Інтегрально-оптичний фотоприймач

2.2. Класифікація інтегрально-оптичних елементів

Розглянемо плівкову хвильоводну структуру (рис. 2.6), що складається з плівки, підкладки та покривного матеріалу з показниками заломлення n_0 , n_1 , n_2 . Зазвичай справедлива нерівність $n_0 > n_1 > n_2$, і тому існують два критичних кута. Перший на межі плівка – покривний шар (θ_2) і другий на межі плівка – підкладка (θ_1).

Залежно від кута падіння з плівки на її межі, можна виділити три випадки:

а) при $\theta < \theta_1, \theta_2$ повне внутрішнє відбиття відсутнє, і світло частково проходить через плівку в підкладку і в покривне середовище (рис. 2.6, а), заломлюючись відповідно до закону Снелліуса. В цьому випадку хвильоводне поширення світла відсутнє, а відповідний розподіл поля називається випромінювальною модою;

б) якщо кут $\theta > \theta_2$, то хвиля, що розповсюджується, заломлюється на межі плівка – підкладка, але отримує повне внутрішнє відбиття на межі плівка-покривний шар, заломлюючись знову в підкладку. В цьому випадку хвильоводне поширення світла також відсутнє, а відповідний розподіл поля називається випромінювальною модою підкладки (рис. 2.6, б);

в) нарешті, при $\theta > \theta_1, \theta_2$ на обох кордонах плівки світло буде мати повне внутрішнє відбиття і, при деяких дискретних кутах, як ми побачимо далі, буде поширюватися в плівці хвильоводним чином по зигзагоподібному шляху. Цей випадок (рис. 2.6, в) відповідає хвильоводній моді.

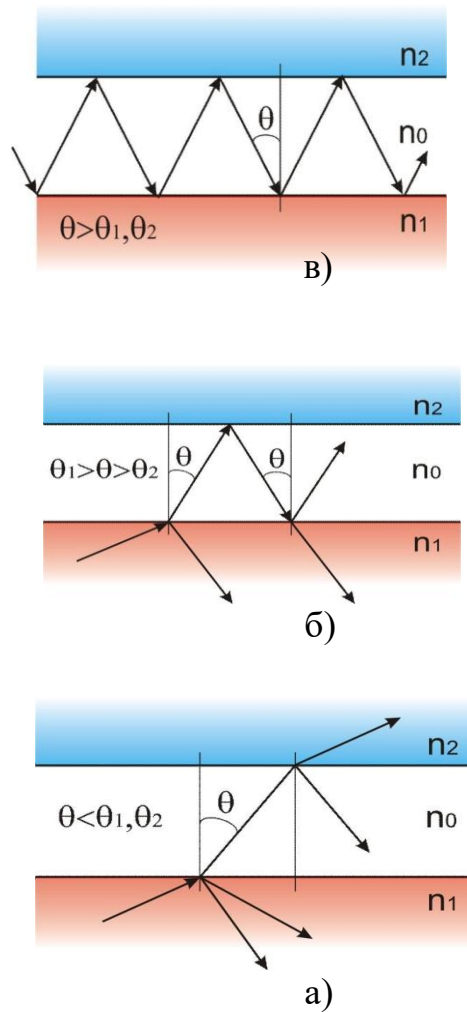


Рис. 2.6. Моді плівкового хвильоводу

Зараз в інтегральній оптиці використовується велика різноманітність оптичних хвильоводів з різними властивостями. Більшість з них можна класифікувати за двома параметрами: геометрією хвильоводу і профілем показника заломлення в поперечному перерізі.

За профілем просторового розподілу показника заломлення в поперечному перерізі планарні хвильоводи і волокна діляться на дві групи:

- а) з ступінчастим профілем показника заломлення;
- б) з альфа-профілем (градієнтний профіль).

У другій групі хвильоводів показник заломлення плавно змінюється від центру хвильоводу до його краю за певним законом. Найбільш часто використовуються хвильоводи з параболічним профілем зміни показника заломлення.

У деяких випадках використовуються хвильоводи з багат шаровим тонкоплівковим покриттям. Такі хвильоводи являють собою проміжну групу між хвильоводами із ступінчастим профілем і хвильоводами з альфа-профілем.

Матеріал оптичного хвильоводу може володіти підсиленням. Хвильоводи з підсилюючим середовищем використовуються в хвильоводних і волоконних лазерах і підсилювачах.

Хвильоводи описаних вище груп також називають регулярними хвильоводами, оскільки вони мають регулярну (незмінну) геометрію в подовжньому напрямку. У той же час, широке застосування в інтегральній оптиці знаходять нерегулярні хвильоводи. Такі хвильоводи, як правило, мають періодичну модуляцію показника заломлення в подовжньому напрямку.

До цієї групи хвильоводів відносяться гофровані та бреггівські хвильоводи. У гофрованих хвильоводах є періодична модуляція показника заломлення в подовжньому напрямку на краю хвильоводу. У бреггівських хвильоводах все середовище хвильоводу в подовжньому напрямку має періодичну модуляцію показника заломлення. Хвильоводи даної групи використовуються в якості хвильоводних фільтрів і оптичних перемикачів, в хвильоводних лазерах для створення позитивного зворотнього зв'язку, а також у ВОД.

Планарними ми будемо називати хвильоводи, що обмежені лише в одному напрямку (рис. 2.7). У даному випадку хвильовий шар з показником заломлення n_0 обмежений у напрямку X та має товщину h . Підкладку з показником заломлення n_1 вважаємо необмеженою у напрямку $-X$, а покривний шар з показником заломлення n_2 необмеженим у напрямку $+X$. Частіше за все покривним шаром виступає повітря і $n_2 = 1$. Планарні хвильоводи ми будемо розділяти на плівкові та градієнтні.

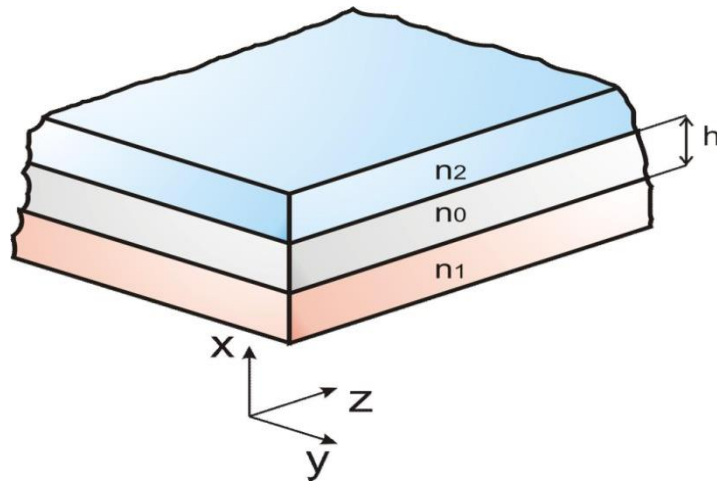


Рис. 2.7. Планарний хвильовод

На рис. 2.8. показаний плівковий хвильовод з розповсюдженою по ньому у напрямку Z світловою хвилею у наближенні геометричної оптики та його профіль показника заломлення.

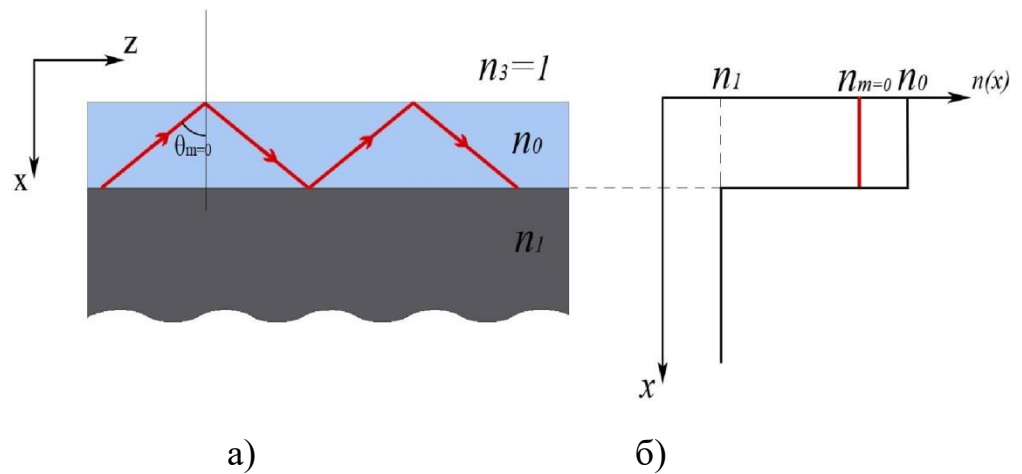


Рис. 2.8. Плівковий хвильовод:

а – розповсюдження хвилі; б – профіль показника заломлення

У градієнтних хвильоводах n_0 змінюється плавно у межах хвильового шару вздовж осі X , тобто $n_0 = n_0(x)$. Такі хвильоводи можна створити, наприклад, дифузією іонів металу до підкладки (наприклад, Ti до $LiNbO_3$). При цьому створюється приповерхневий шар зі збільшеним показником заломлення, у якому світло може розповсюджуватись шляхом ПВВ від межі хвильового шару з покриттям, і шляхом рефракції у хвильовому шарі, що є оптично неоднорідним середовищем.

На рис. 2.9 зображено градієнтний хвильовод з розповсюдженою по ньому у напрямку Z світловою хвилею у наближенні геометричної оптики та його профіль показника заломлення.

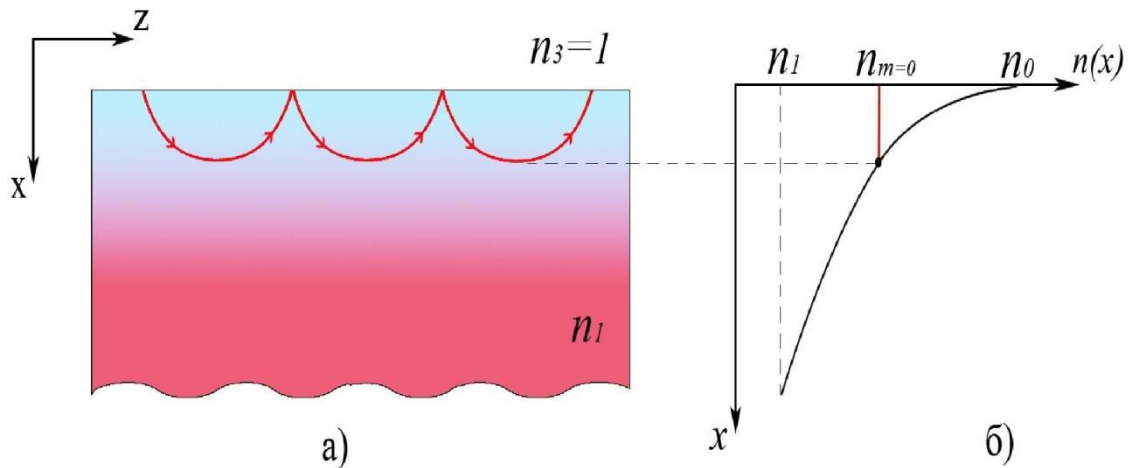


Рис. 2.9. Градієнтний хвильовод:

а – розповсюдження хвилі; б – профіль показника заломлення

Окрім планарних хвильоводів в інтегральній оптиці застосовуються смугасті (каналні) хвильоводи, які обмежені не тільки у напрямку X , але і в напрямку Y , поперечні розміри хвильового шару зів'язані з довжиною світлової хвилі.

Розглянуті раніше планарні хвильоводи не обмежують поширення світла в площині хвильоводу. Якщо ввести таке обмеження (наприклад, по осі Y у вибраній системі координат), то отримаємо полосковий (або тривимірний) хвильовод (рис. 2.10). Саме така конфігурація в багатьох

випадках найбільш повно відповідає основній концепції інтегральної оптики – створенню складних оптичних схем на єдиній підкладці.

У більшості випадків (наприклад, в таких пристроях, як хвильові оптичні модулятори, лазери, ВОД) полоскова геометрія дозволяє значно знизити керуючі потужності і напруги.

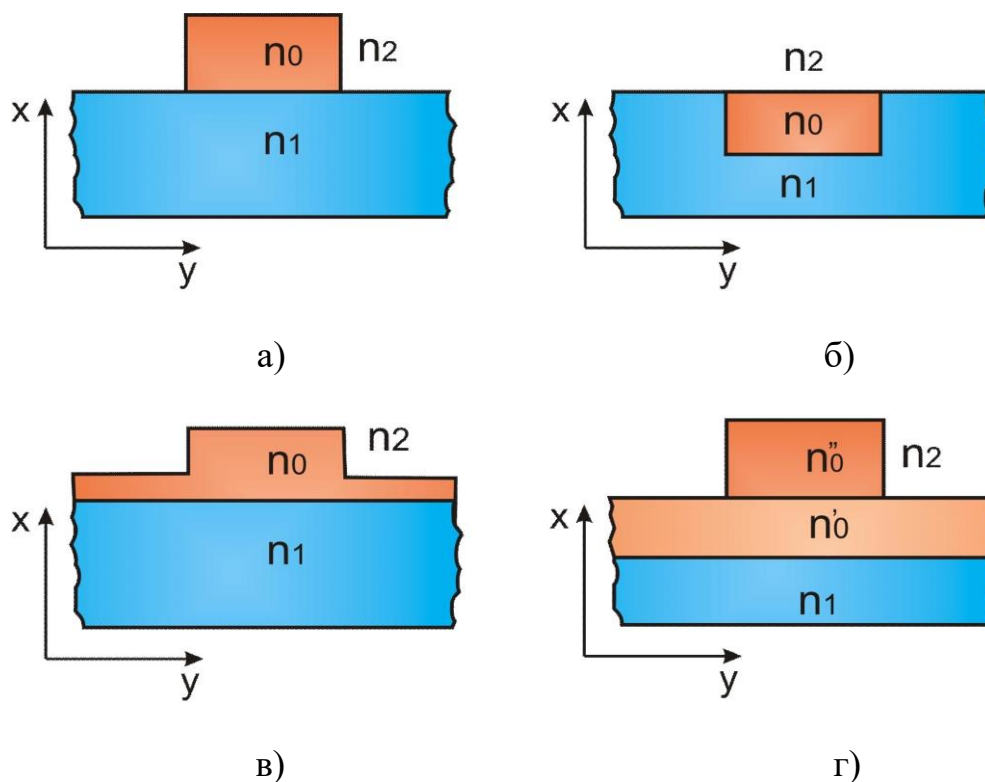


Рис. 2.10. Різні типи полоскових хвильоводів:

а – піднесений; б – утоплений; в – ступінчатий; г – составний

Такі хвильоводи, так як і планарні, можуть бути плівковими і градієнтними. Плівкові хвильоводи – це ті, у яких n_0 не залежить від X і Y . У градієнтних хвильоводах $n_0 = n(x, y)$, або $n_0 = n(x)$. Обидві ці структури використовують зовнішній смужковий, або планарний хвильовод. З обох сторін смужки забезпечують поширення в ній однієї хвильоводної моди.

Геометрична оптика інтегральних оптичних елементів характеризується також законами Снеліуса, Френеля і явищем ПВВ, як і для світловодів.

2.3. Інтегрально-оптичні елементи зв'язку

Розглянемо пристрої, що перетворюють енергію «об'ємного» світлового пучка в хвильоводну моду (або моди), а також елементи зв'язку між оптичними хвильоводами різних типів.

Найбільш просто реалізується введення випромінювання в хвильовод через торець (рис. 2.11, а, б).

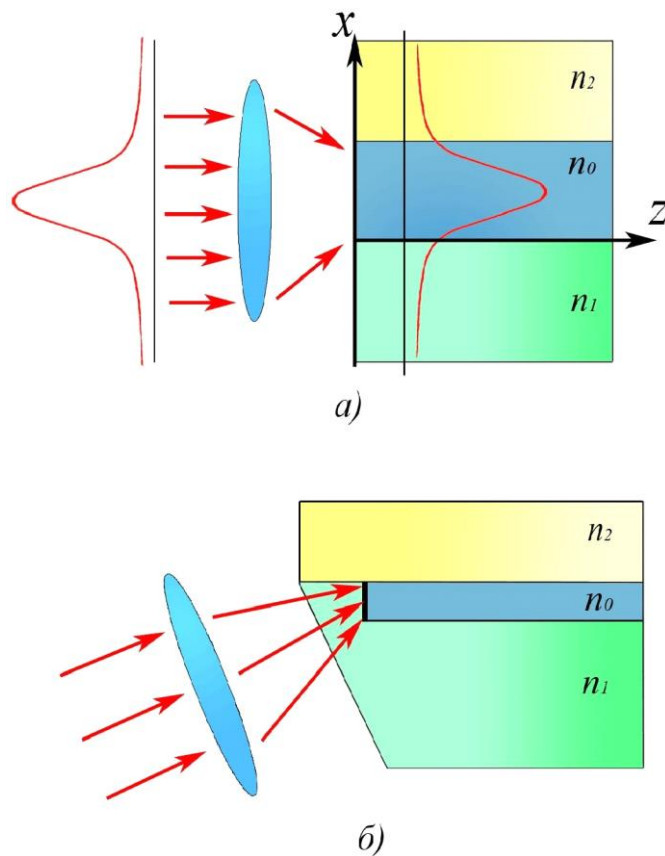


Рис. 2.11. Торцеве введення випромінювання в хвильовод

Перетворення енергії пучка в необхідну моду хвильоводу досягається шляхом узгодження поля пучка, що падає зліва на торець, з полем цієї моди. Зокрема, основна TE_0 мода має розподіл амплітуди, дуже близький до гауссової. Таку форму має розподіл амплітуди в лазерних пучках. Необхідне узгодження полів можна здійснити за допомогою зниження ширини

лазерного пучка, що вводиться за допомогою мікрооб'єктива, фокусуючи його на торець хвильоводу.

Якщо між профілем розподілу падаючого пучка і формою розподілу поля хвильоводної моди існує будь яка невідповідність, то оптична енергія витрачається на збудження небажаних мод вищих порядків і випромінювальних мод. В принципі можливо майже повне узгодження профілів полів, наприклад, шляхом відповідного підбору геометрії лінз. Тому торцеве введення можна здійснити з ефективністю 100 %. Інша перевага – зручність введення в полоскові хвильоводи.

Недоліки торцевого введення такі:

- а) якщо торець не зовсім гладкий і плоский, то з'являються втрати;
- б) оскільки товщина хвильоводу порядку 1–5 мкм, лінзи і лазерний пучок вимагають ретельного центрування і мікроманіпулювання;
- в) для планарних хвильоводів, з метою отримання пучків потрібної ширини, потрібні циліндричні або астигматичні лінзові системи;
- г) щільність потужності на торці дуже велика, і він з часом обгорає, тому що знаходиться на повітрі.

Тонкоплівковий хвильовод з краєм, що звужується являє собою тонку плівку на підкладці, яка на кінці звужується (рис. 2.12). Тому зигзагоподібна хвиля, падаючи на край, що звужується, продовжує поширюватися зигзагоподібно, але кут падіння на кордон розділу плівка – підкладка зменшується. В результаті в певній точці кут стає менше критичного, і світлова енергія починає потрапляти в підкладку.

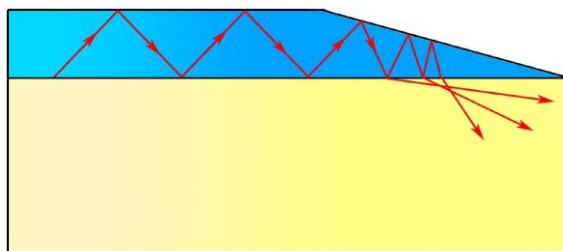


Рис. 2.12. Тонкоплівковий хвильовод з краєм, що звужується

Сформований таким елементом зв'язку пучок складається з багатьох променів, з розходженням від 1 до 20 градусів. Ефективність введення може досягати 70 %, але велика розбіжність пучка знижує переваги цього елемента зв'язку. Застосовується він, наприклад, в інтегральних фотоприймачах.

Найбільшого поширення зараз отримали призматичні елементи зв'язку, що дозволяють досить просто реалізувати в планарних хвильоводах різні хвильові моди з високою ефективністю. Розглянемо призму з показником заломлення $n_3 > n_0$, розташовану на відстані δ над планарним хвильоводом (рис. 2.13). Вхідний в призму промінь зазнає повне внутрішнє відбиття від її основи.

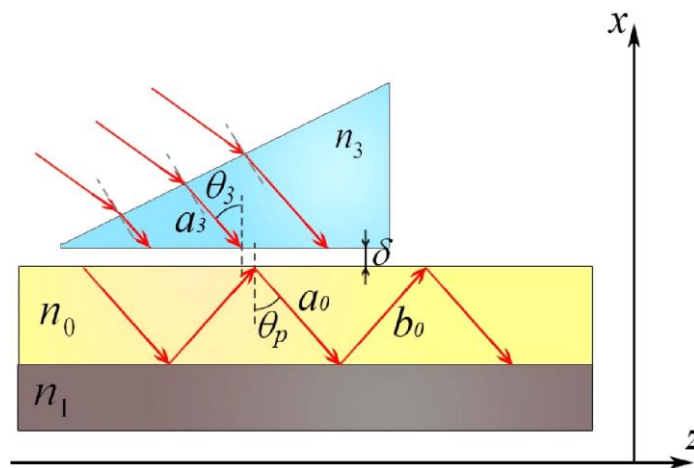


Рис. 2.13. Призмений елемент зв'язку

Завдяки повному відбиттю поле в призмі є стоячою хвилею, а нижче підстави призми поле спадає за експоненціальним законом і називається «зникаючим» полем. «Зникаюче» поле проникає в плівку і збуджує в ній світлову хвилю. Цей процес називається оптичним тунелюванням (хвиля проходить через потенційний бар'єр). Щоб порушити ту чи іншу хвильоводну моду, необхідно виконати умови синхронізму, щоб горизонтальна складова хвильового вектора хвилі в призмі $kn_3 \sin \theta_3$ дорівнювала постійної поширення p -ї хвильоводної моди k_z :

$$\begin{aligned} k_z &= kn_m = kn_3 \sin \theta_3 \\ n_m &= n_0 \sin \theta_p = n_3 \sin \theta_z \end{aligned} \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1), як видно, ілюструє закон Сінелліуса для зигзагоподібної хвилі в плівці і хвилі в призмі. Звідси випливає, що змінюючи кут θ_3 в призмі, можна порушувати в хвильоводі різні хвильові моди. У разі синхронізму, поля на двох сторонах повітряного зазору знаходяться в фазі в кожній точці вздовж z . Як уже зазначалося, зв'язок між полями обумовлений проникненням експоненціального «хвоста» хвилі з призми в хвильовод, і проникненням «хвоста» поля хвильоводної моди, також експоненціально в призму.

Нехай a_3 і b_3 амплітуди полів вхідної та відбитої хвилі в призмі, а a_0 і b_0 амплітуди полів хвиль в хвильоводі. Завдяки описаному вище зв'язку енергія безперервно переходить з призми в плівку вздовж області зв'язку, від $z = \text{const}$.

Очевидно, що збільшення амплітуди хвилі в плівці a_0 при проходженні відстані dz , має бути пропорційно a_3 . З іншого боку хвиля b_0 (або що теж, a_0) буде так само переходити в призму, тому можна записати:

$$\frac{da_0}{dz} = Ta_3 - Sa_0, \quad (2.2)$$

де T і S – постійні зв'язки, що залежать від типу хвильоводу, коефіцієнтів заломлення n_3 і n^* і від зазору.

При $z = 0$ $a_0 = 0$, і a_0 збільшується лінійно, якщо $Ta_3 = \text{const}$. При великих z a_0 може збільшитися настільки, що Sa_0 наближається до значення, яке майже компенсує член Ta_3 , при цьому $\frac{da_0}{dz} = 0$, і a_0 досягає насичення. Отже, довжина області зв'язку повинна мати оптимум.

Припустимо тепер, що a_3 розподілена рівномірно між $x = 0$ і $x = l$, а

$T = const.$ У цьому випадку енергія, що переходить з призми в плівку в області $0 < x < l$ повертається в призму при $x \geq l$. Тому необхідно створити так званий «обрив зв'язку», поєднуючи правий край пучка в призмі з правим краєм призми. Для розрахунку ефективності зв'язку спочатку розглянемо вивідний призмий пристрій зв'язку, зображений на рис. 2.14.

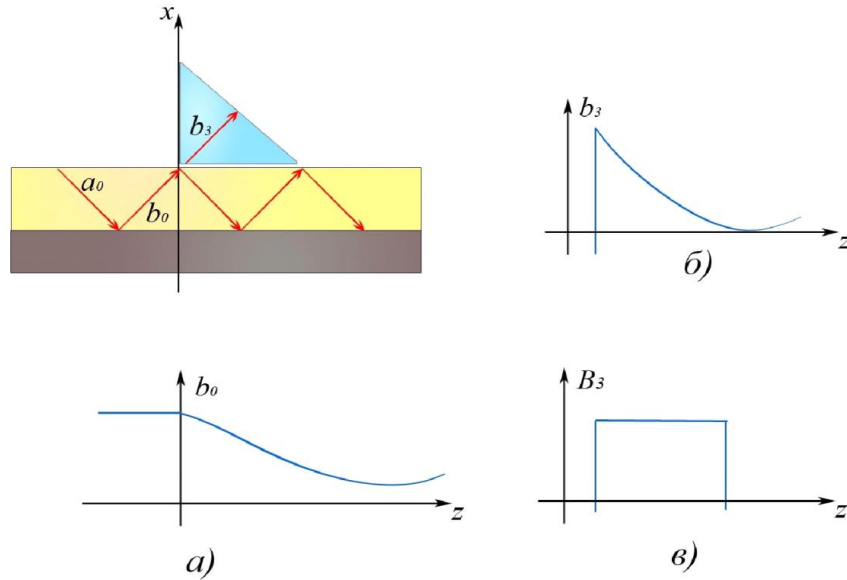


Рис. 2.14. Вивідний призмий пристрій зв'язку

Тепер в хвильоводі поширюються хвилі a_0 і b_0 , в призмі – b_3 , при цьому отримаємо $a_3 = 0$. Заміняючи в (2.2) a_0 на b_0 і вважаючи $a_3 = 0$, отримаємо:

$$\begin{aligned} b_0 &= b_0(0) \exp(-Sz) & z > 0 \\ b_0(z) &= b_0(0) & z < 0 \end{aligned} \cdot$$

Потік потужності в плівці, пропорційний $b_0(x)b^*(x)$, повинен зменшуватися як $\exp(-2Sz)$, а ця потужність повинна з'явитися в призмі в вигляді хвилі b_3 (див. також рис. 2.14, б)

$$\begin{aligned} b_3 &= b_3(0) \exp(-Sz) & z > 0 \\ b_3(z) &= 0 & z < 0 \end{aligned} \cdot \quad (2.3)$$

З (2.3) випливає, що практично вся енергія може з плівки перейти в призму, і що амплітуда по перетину вихідного пучка змінюється за експоненціальним законом. Принцип оберненості в

лінійній оптиці дозволяє вважати, що якщо направити промінь на призму в напрямку протилежному b_3 , і якщо розподіл амплітуди в ньому буде точно таким же, як $b_3(z)$, то вся світлова енергія повинна вводитися в хвильовод. Якщо ж вводиться лазерний промінь, що матиме рівномірний по поперечному перерізу розподіл (рис. 2.14, в), то частина, $B_3(z)$, що відповідає $b_3(z)$, буде сприйматися плівкою, а решта частини буде відбиватися основою призми.

Недолік розглянутого призмного елемента зв'язку – необхідність забезпечення рівномірного зазору $\delta = \frac{\lambda}{8} - \frac{\lambda}{4}$.

Іноді обрив зв'язку здійснюється при використанні призми з циліндричною або сферичною підставкою (рис. 2.15).

При цьому промінь вводиться в області з необхідною величиною зазору, для забезпечення оптимальної величини Sl , а відбиті промені b_0 потрапляють в область з великим n і не тунелюють в призму. Призми з циліндричним підставкою дуже зручні.

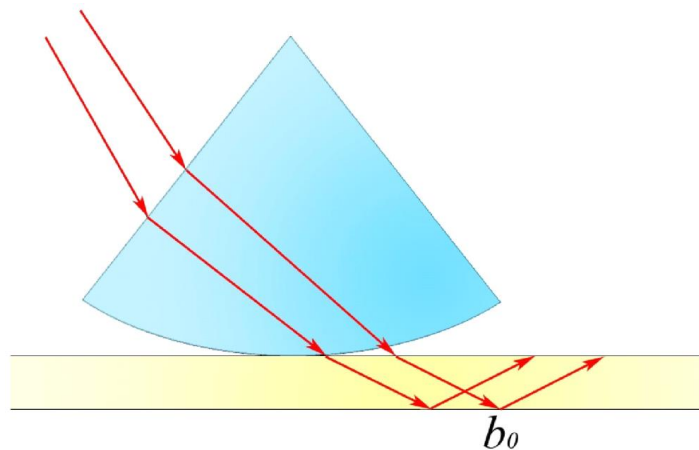


Рис.2.15. Обрив зв'язку за допомогою призми зі сферичним основою

Гратковий елемент зв'язку працює аналогічно призмному, тільки призма і зазор тут замінені ґраткою (рис. 2.16), яка, наприклад, може накладатися безпосередньо на хвильовод. Для опису роботи ґраткового

елемента зв'язку можна скористатися такими ж простими міркуваннями, як і для призмного.

В цьому випадку хвильоводна мода через періодичний характер ґратки повинна супроводжуватися появою просторових гармонік в області ґратки. Як відомо, постійні поширення цих гармонік уздовж z такі:

$$\beta_i = \beta_{op} + \frac{2\pi v}{d}; \text{де } v = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

де β_{op} — майже дорівнює постійної поширення хвильоводної моди, якщо ґратка впливає тільки як мале збурення хвильоводу; v — номер просторової гармоніки.

Щоб існував синхронізм з випромінювальною модою або з випромінювальною модою підкладки, повинно виконуватися співвідношення:

$$k_{zi} = k_n \sin \theta_2 = \beta_v = \beta_{op} + v \left(\frac{2\pi}{d} \right), \text{де } i = 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

де k_{zi} — проекція хвильового вектора в першому або другому середовищі на вісь z .

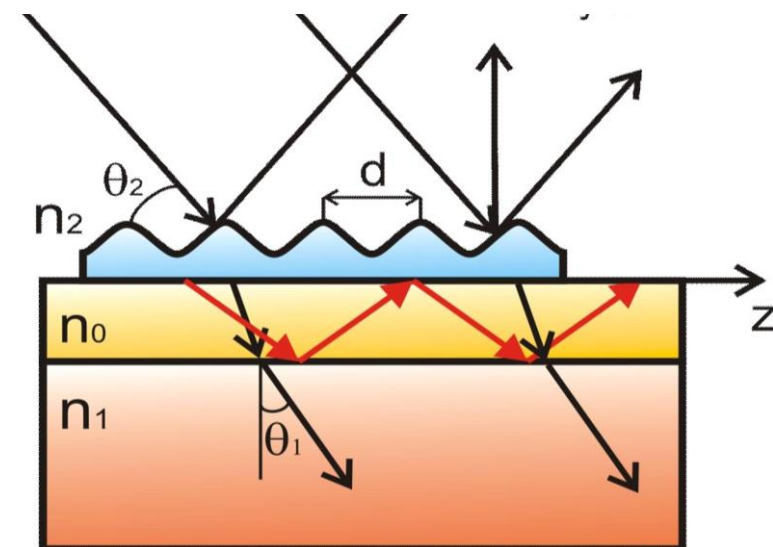


Рис. 2.16. Ґратковий елемент зв'язку

Співвідношення (2.4) зручно аналізувати на векторних діаграмах, якщо ввести в розгляд вектор ґратки $\bar{k}d_0 = \bar{z}_0 v \left(\frac{2\pi}{d} \right)$; і вектор $\bar{\beta}_{zv} = \bar{z}_0 \beta_v$ (рис. 2.17). Тут зображено перетин поверхонь хвильових векторів k_1 і k_2 (в підкладці і покривному середовищі). Проекції цих векторів на вісь z рівні $k_i \sin\theta_i$, тому задовольняючи співвідношенню (2.4), можна знайти всі величини, що нас цікавлять. Зауважимо, що при виведенні випромінювання через ґратку (і при введенні також) може існувати кілька дифракційних пучків, що випромінюються в підкладку і покривне середовище. Можна реалізувати і однопучковий режим зв'язку через підкладку.

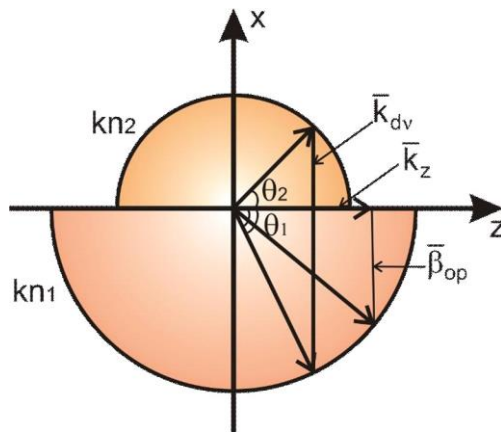


Рис . 2.17. Діаграма хвильових векторів

Методика розрахунку ефективності ґратки введення така ж, як і для призмового зв'язку. Ефективність введення залежить від багатьох чинників. Від профілю ґратки, який може бути прямокутним, синусоїдальним, трикутним і т.і. Від висоти і періоду гофра і інших чинників, і може досягати значень 80 % (теоретично). Крім гофрування поверхні, ґратковий елемент зв'язку може бути отриманий також за допомогою періодичної модуляції показника заломлення хвильоводної структури (рис. 2.18).

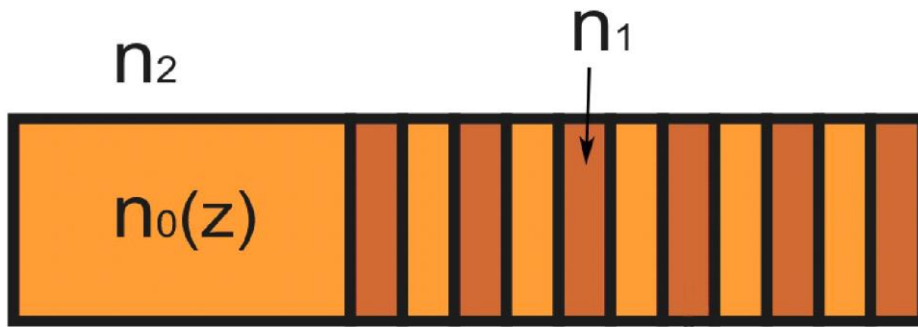


Рис. 2.18. Гратковий елемент, реалізований за допомогою періодичної модуляції показника заломлення

2.4. Елементи зв'язку між хвильоводами

Іноді необхідно передати світлову хвилю з одного хвильоводу (планарного або полоскового) в інший хвильовод. Особливо велику увагу при розробці ВОД приділяють стикуванню планарних і полоскових хвильоводів з волоконними світловодами. Тут ми розглянемо основні види та принципи побудови таких пристроїв.

Якщо хвильоводи знаходяться на одній підкладці, то пристрої зв'язку можуть виконуватися способом, зображеному на рис 2.19, а, б. У першому випадку хвильоводи з показником заломлення n'_0 і n''_0 розділені плівкою з показником заломлення $n'_2 < n'_0, n''_0$. Зв'язок між хвильоводами здійснюється за рахунок «зникаючих полів». В області, де два хвильоводи перекриваються, поля пов'язані один з одним рівняннями пов'язаних хвиль:

$$\begin{aligned} \frac{dE'_y}{dz} &= -i\delta\beta E'_y - i\chi E''_y \\ \frac{dE''_y}{dz} &= i\delta\beta E''_y - i\chi E'_y \end{aligned}$$

де $\delta\beta = \beta' - \beta''$ розугодження за постійними поширення; χ – коефіцієнт зв'язку.

При $\delta\beta = 0$ рішення мають простий вигляд для граничних умов

$$E_y''(z) = \cos \chi z$$

$$E_y'(z) = -i \sin \chi z$$

Таким чином, на відстані $l = \frac{\pi}{2\chi}$ відбувається повна передача енергії з одного хвильоводу в інший. На жаль, умову синхронізму на практиці реалізувати важко.

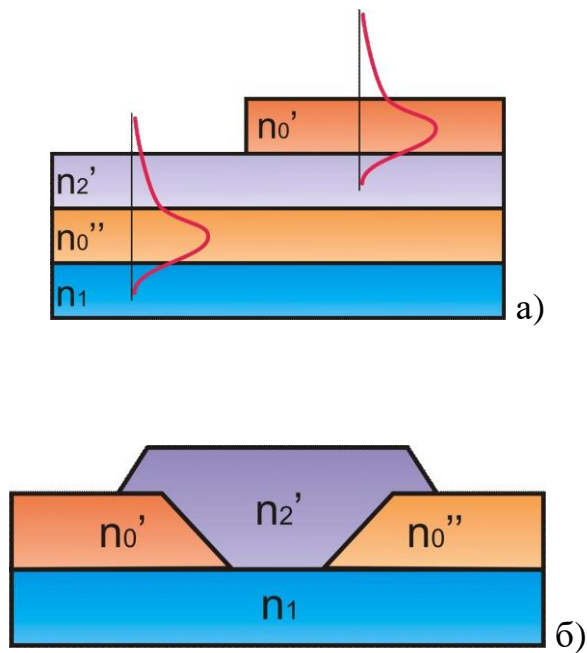


Рис. 2.19. Зв'язуючий пристрій між хвильоводами, розташованими на одній підкладці:
а – хвильоводи розділені плівкою; б – передача енергії через край хвильоводів, що звужується

Більш практичний спосіб ілюструється на рис 2.19, б. Тут відбувається передача енергії через край, що звужується в проміжний хвильовод з показником заломлення матеріалу $n_2' > n_1$, потім енергія переходить через край, що звужується, в хвильовод 2 з n_0' . Ефективність такого зв'язку може бути близька до 100 %.

Якщо хвильоводи знаходяться на різних підкладках, вони можуть бути пов'язані через проміжний шар з $n_2' < n_0', n_0''$. (рис. 2.20, а). Якщо хвильоводи мають різні сталі поширення, то зручно скористатися відповідною ґраткою (рис. 2.20, б). Ефективність такого зв'язку $\sim 65\%$.

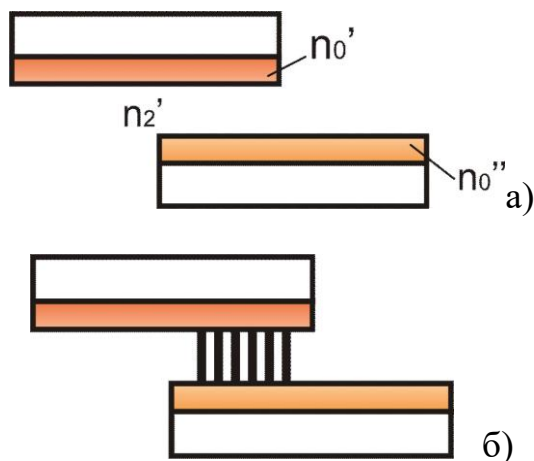


Рис. 2.20. З'єднуючий пристрій між хвильоводами, розташованими на різних підкладках:
а – зв'язок через проміжний шар; б – зв'язок через ґратку

Для зв'язку між планарним і полосковим хвильоводами найбільш простий рупорний перехід. При цьому, при переході від $a_1 = 50$ мкм до $a_2 = 3$ мкм, на довжині 2 мм може бути досягнута ефективність 90%. Конструкція рупорного переходу показана на рис. 2.21.

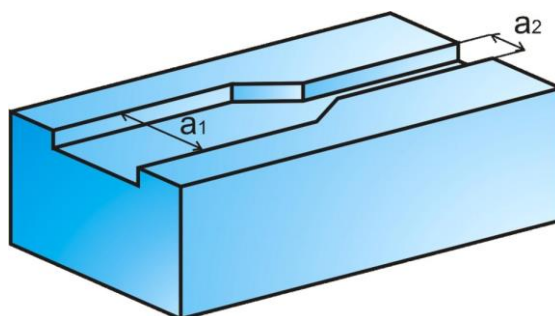


Рис. 2.21. Рупорний перехід від планарного хвильоводу до полоскового

«Призмений кінцевий» елемент зв'язку показаний на рис. 2.22. Зв'язок між планарним скошеним хвильоводом і смужковим здійснюється за

допомогою затухаючого поля, яке проникає в зазор між двома хвильоводами. Одна з труднощів полягає в необхідності мати точний і чітко обмежений зазор між хвильоводами для отримання високої ефективності зв'язку і одномодового режиму роботи.

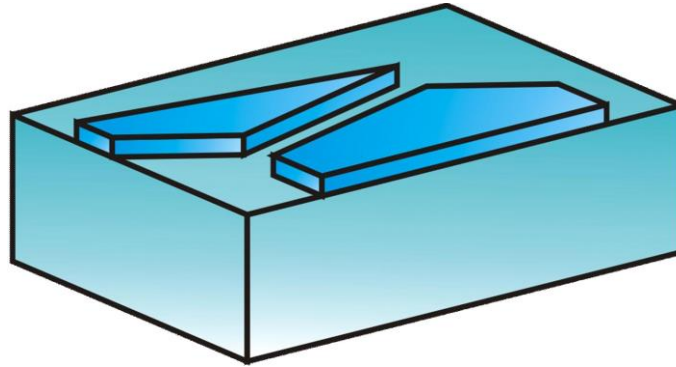


Рис. 2.22. «Призмий кінцевий» елемент зв'язку

Зв'язані полоскові хвильоводи застосовуються в спрямованому відгалужувачі, електрооптичних модуляторах і т. і. В них реалізується зв'язок за рахунок «зникаючих полів» (рис. 2.23, вид на підкладку зверху). Схема на рис. 2.23, а дуже критична до допусків. Аналіз таких пристроїв на основі теорії пов'язаних хвиль показує, що ефективність зв'язку може бути 100 %.

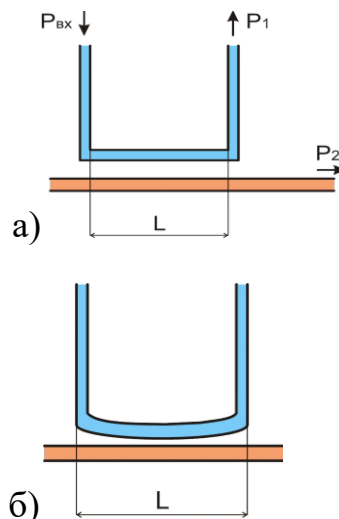


Рис. 2.23. Різні елементи зв'язку між полосковими хвильоводами

Елементи зв'язку між хвильоводами і волокнами мають дуже велике практичне значення для ВОД. Одна з схем зв'язку показана на рис. 2.24. При переході з хвильоводу в волокно досягнута ефективність зв'язку 50 %, в зворотньому напрямку гірше.

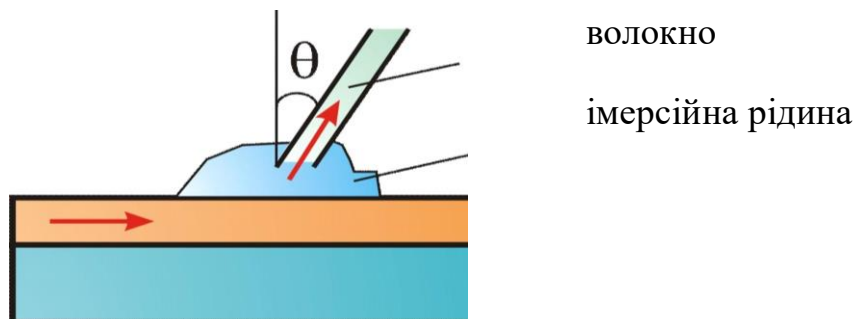


Рис. 2.24. Елемент зв'язку між волокнами і хвильоводами

2.5. Пасивні інтегрально-оптичні елементи

Пасивні елементи інтегральної оптики призначені для перетворення просторової структури світлових пучків, перетворення хвильоводних мод, для зміни напрямку поширення світла в хвильоводах. Розглянемо найбільш важливі з них.

В даний час розроблено декілька типів планарних лінз: геодезичні лінзи, лінзи Люнеберга, лінзи зі зміною ефективного показника заломлення хвильоводу і торцеві відбиваючі лінзи (останні аналогічні дзеркалам). Розглянемо спочатку геодезичні лінзи.

Геодезична лінза представляє собою поглиблення в підкладці у вигляді сферичного сегмента, на який нанесений оптичний хвильовод (рис. 2.25).

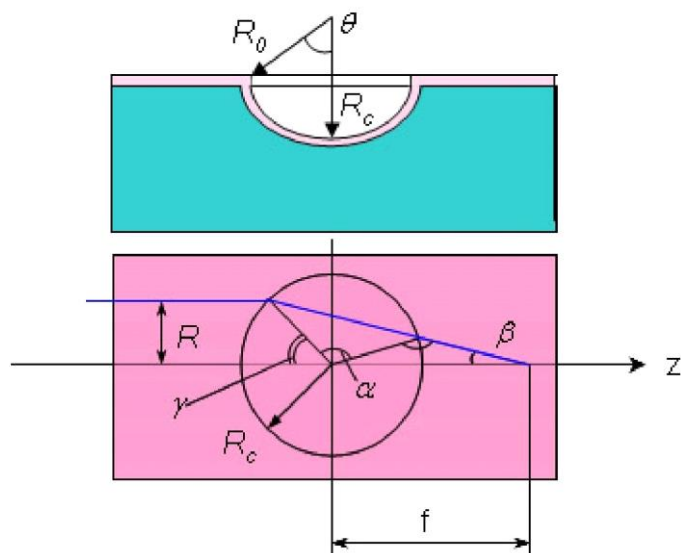


Рис. 2.25. Геодезична лінза, вид зверху і збоку

Довжина оптичного шляху променя в центрі поглиблення більше, ніж на краях, а так як постійна поширення у всіх точках однакова, то за поглибленням фазові фронти викривляються, і промені відхиляються до осі z . При попаданні на лінзу вузького світлового променя, паралельного оптичній осі z , на відстані R від неї, промінь перетне оптичну вісь на відстані f від центру лінзи.

Співвідношення між радіусом поглиблення і фокусною відстанню f можна отримати з рішення трикутника:

$$f = R_c \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \beta} = R_c \left[\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} - \cos \alpha \right]. \quad (2.5)$$

В співвідношення (2.5) входять кути α і β , які можна виразити через кут $\gamma = \arcsin \frac{R}{R_0}$ і кут θ , скориставшись принципом Ферма, отримаємо:

$$\beta = 2(\gamma - \arctg(\cos \theta \cdot \operatorname{tg} \gamma)).$$

$$\alpha = \gamma + 2\arctg(\cos \theta \cdot \operatorname{tg} \gamma).$$

У параксіальному наближенні, при $\frac{R}{R_0} \ll 1$, з (2.5) можна отримати:

$$f_0 = \frac{R_c}{2(1 - \cos \theta)},$$

де f_0 – так званий параксіальний фокус.

Зауважимо, що зі збільшенням апертури світлового пучка (тобто зі збільшенням R), фокусна відстань f збільшується (рис. 2.26).

Це говорить про те, що у цій лінзи існують досить сильні подовжні аберації. Щоб зменшити їх вплив, зазвичай використовують лише 20–30 % апертури лінзи (тобто $\frac{R}{R_c} = 0,2-0,3$).

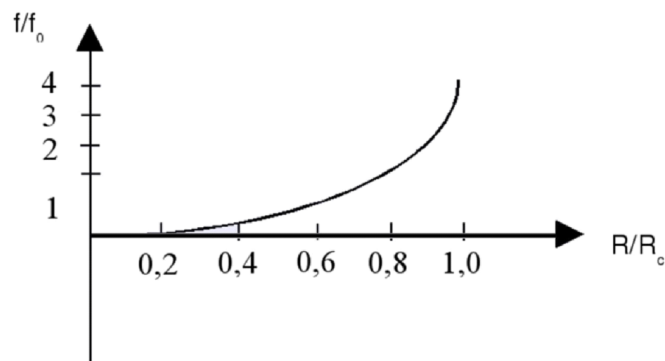


Рис. 2.26. Збільшення фокусної відстані лінзи зі збільшенням апертури світлового пучка

Зауважимо, що геодезична лінза може бути виконана як на основі дифузійних, так і плівкових хвильоводів. При цьому можуть бути отримані фокусні відстані від 10 мм до десятків сантиметрів. Недоліком лінзи є втрати, які виникають при переході світлових хвиль з планарного хвильоводу в сферичне поглиблення і при поширенні по сферичній поверхні, яка є «зігнутих» хвильоводом. Для зменшення втрат гострі кромки зазвичай скругляють. Для зменшення аберацій поглиблення можна виконувати асферичної форми, проте технологія виготовлення в цьому випадку значно ускладнюється.

Крім поздовжніх аберацій геодезична лінза має і поперечні аберації, при цьому розмір фокальної плями перевищує дифракційну межу. Наприклад, для лінзи з параметрами $R_C = 4$ мм, $f_0 = 162$ мм при апертурі $a = 2$ мм розмір фокальної плями склав ~ 40 мкм. Розрахункове значення було близько 30 мкм. Зі зменшенням апертури аберації також зменшуються.

Лінзу зі зміною ефективного показника заломлення хвильоводу показано на рис. 2.27. В області лінзи хвильовод потовщений і $\frac{h}{\lambda}$ більше, тому і n_m буде там більше. Таким чином ця лінза представляє собою повний аналог звичайної об'ємної лінзи.

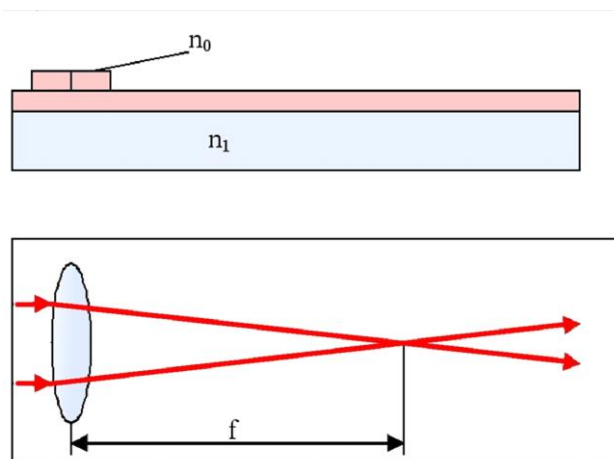


Рис. 2.27. Лінза зі зміною ефективного показника заломлення хвильоводу

У лінзах Люнеберга показник заломлення змінюється за певним законом. У планарному варіанті цього можна досягти, змінюючи товщину хвильоводу (рис. 2.28). Для такої лінзи профіль розраховується на комп'ютері і повинен мати складний вид. Фокусні відстані такої лінзи можуть бути дуже малими. На жаль, їх не можна застосовувати для дифузійних хвильоводів, тому що у них n_m змінюється дуже незначно при нанесенні на хвильовод плівки з $n_4 > n_0$ (поле на кордоні дуже мале і плівка впливає слабо на n_m). Складність полягає і в доборі матеріалу з $n_4 > n_0$.

У деяких хвильоводах, наприклад, в дифузійних, а також зі сколеними торцями, можна відбивати світло від торця хвильоводу (рис. 2.29). Надавши торцю циліндричну форму з потрібним радіусом кривизни можна реалізувати позитивні і негативні лінзи. Торці повинні бути оптично полірованими і мати гострий край. Поцерблений край призводить до розсіювання в інші моди. Може бути використано повне внутрішнє відбиття, а також на торець можна напилити відбиваюче металеве покриття

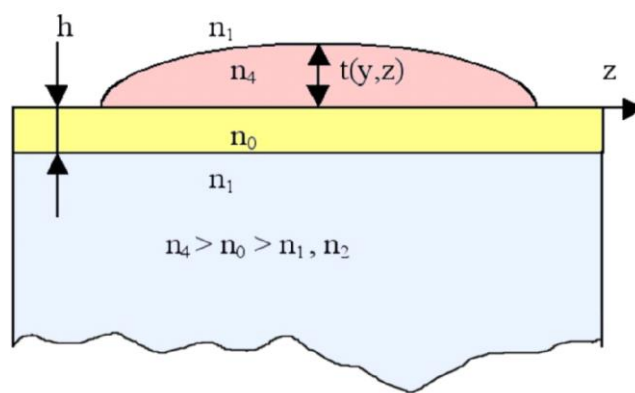


Рис. 2.28. Планарна лінза Люнеберга

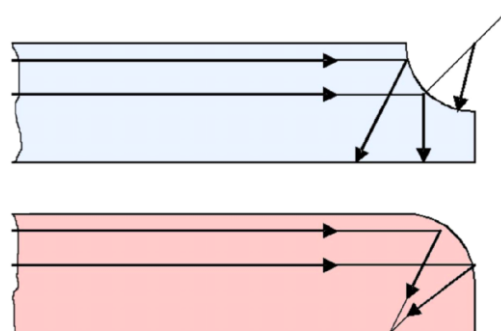


Рис. 2.29. Торцеві відбивачі

Спосіб реалізації призм заснований на зміні товщини хвильоводу, або застосуванні двошарової хвильоводної структури, де β_{op} майже дорівнює

постійній поширенню хвильоводної моди, якщо ґратка впливає тільки як мале збурення хвильоводу. Перший спосіб зображений на рис 2.30. Другий спосіб може бути реалізований як нанесенням призми зверху, так і навпаки, коли на підкладку наноситься спочатку «призма», а потім хвильовод.

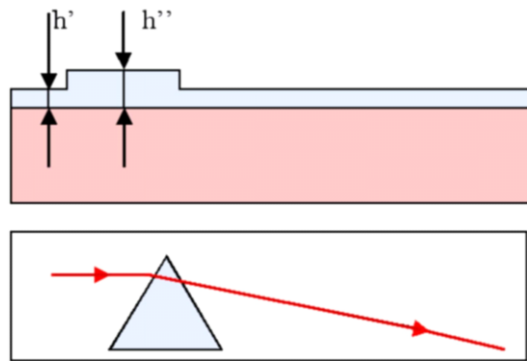


Рис. 2.30. Планарна призма

Один з варіантів показаний на рис 2.31. Призми внаслідок дисперсії хвильоводу, можуть розділяти моди, розщеплювати їх на окремі пучки. Якщо світло немонахроматичне, то буде відбуватися його розкладання в спектр.

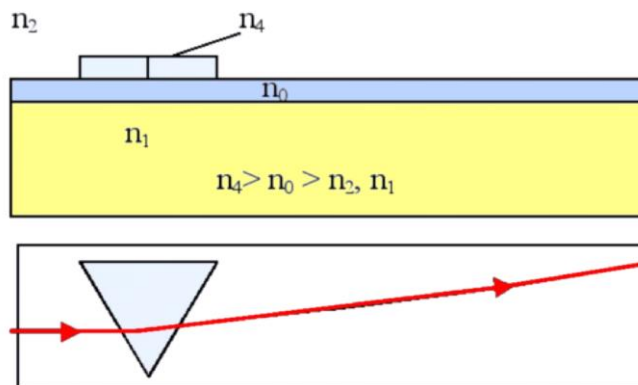


Рис. 2.31. Варіант планарної призми

2.6. Приклади елементів інтегральної оптики для волоконно-оптичних датчиків

На рис. 2.32 показаний S-образний вигин хвильоводу із двома секціями.

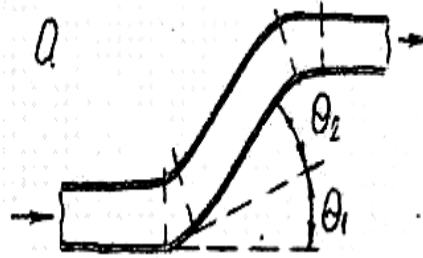


Рис. 2.32. S – образний вигин хвильоводу

Одним з найважливіших параметрів у хвильоводах є втрати. Втрати будуть незначними, якщо радіус вигину R визначається з нерівності:

$$R \geq 24\pi^2 l^3 \lambda^{-2},$$

де l – відстань уздовж підкладки, при якій амплітуда хвилі падає в (е) разів.

Зв'язок хвильоводів здійснюється завдяки перекриттю електромагнітних полів у зоні вигину й визначається співвідношенням:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2^* - n_1^*),$$

де n_1^* , n_2^* – значення показників заломлення хвильоводу в зоні вигину.

Розгалуження й перетинання полоскових хвильоводів використовуються для розподілу світлової потужності, фільтрації й перетворення мод (рис. 2.33).

У розгалуження можуть бути симетричними й несиметричними. При великих кутах θ_1 і θ_2 , і при нерівності цих кутів оптична потужність ділиться несиметрично. При малих кутах $\theta < 0,2^\circ$ і при різних значеннях ширини

полоскових хвильоводів завжди будуть кути θ_1 й θ_2 , при яких потужності будуть рівні.

Розгалужувач Т типу дозволяє розділити потужності в співвідношеннях: 0,75:1; 1:1; 1:0,75.

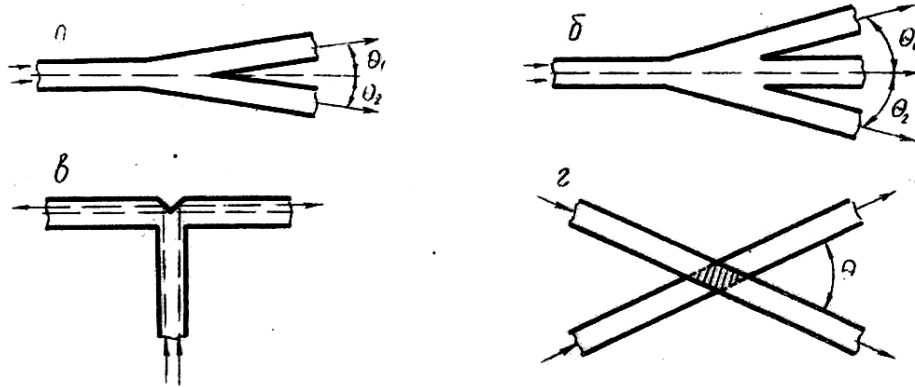


Рис. 2.33. Хвильоводні розгалуження й перетинання: а – Y розгалудження; б – Ψ розгалуження; в – T розгалуження; г – X перетинання

X перетинання може бути використане як перемикаючий канал з використанням ефекта Покельса і явища ПВВ. Для цього над зоною перетинання необхідно розмістити управляючий електрод.

Пов'язані хвильоводи показані на рис. 2.34.

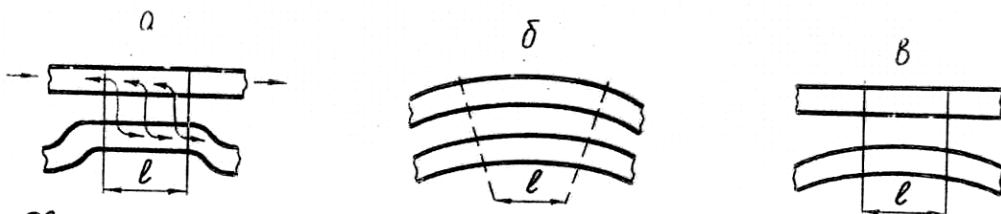


Рис. 2.34. Пов'язані полоскові хвильоводи: а, б – з постійним зазором, в – з змінним зазором в зоні зв'язку

Дифракційні ґратки застосовуються для двох цілей:

- а) для вводу випромінювання у хвильовод;
- б) для утворення резонатора на поверхні хвильоводу.

На рис. 2.35 показані дифракційні ґратки.

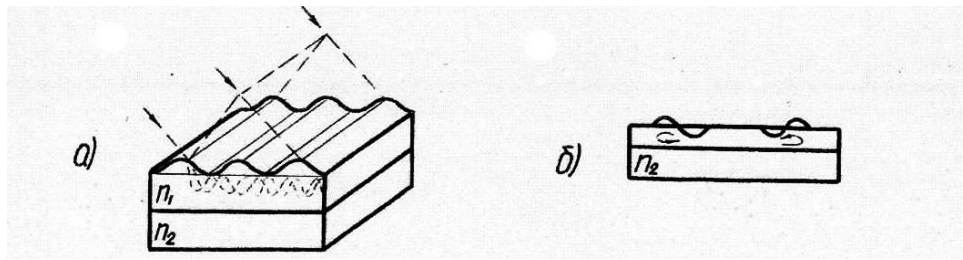


Рис. 2.35. Дифракційні ґратки:

а – елемент вводу випромінення в хвильовод ; б – резонатор

Застосовуються два типи резонаторів на базі дифракційних ґраток, які показані на рис. 2.36. Це такі резонатори:

- а) з розподіленим Бреґівським відбиттям (РБВ);
- б) з розподіленим зворотнім зв'язком (РЗЗ).

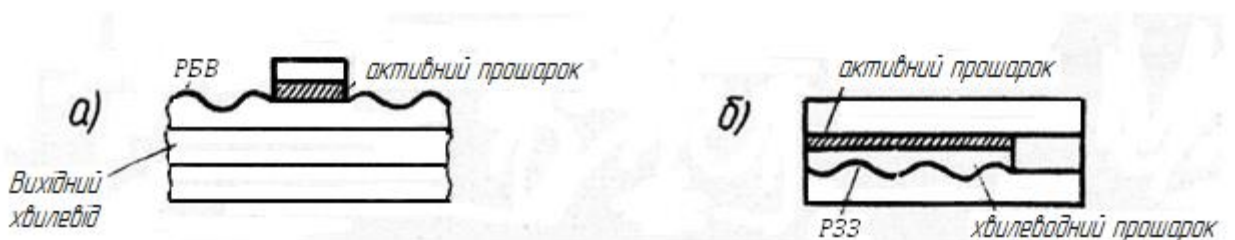


Рис. 2.36. Резонатори на базі дифракційних ґраток:

а – з РБВ; б – з РЗЗ

Дифракційні хвильоводні лінзи можуть розташовуватися в паралельних пучках і в пучках, що сходяться.

У паралельних пучках використовують лінзи такого типу:

- а) френелівська дифракційна лінза;
- б) бреґівська дифракційна лінза.

У пучках що сходяться використовуються лінзи такого типу:

- а) прямі з змінним кроком;
- б) скривлені з змінним кроком.

На рис. 2.37 показані дифракційні хвильоводні лінзи наведених вище типів.

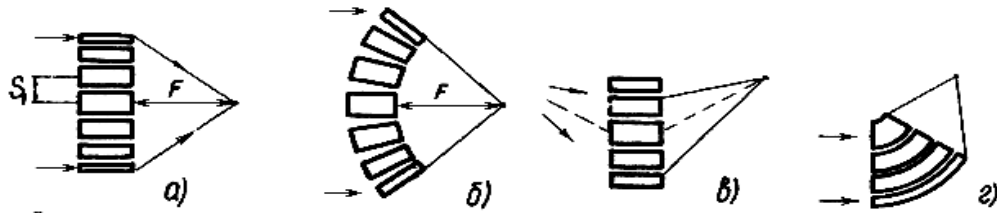


Рис. 2.37. Дифракційні хвильоводні лінзи:

а – френелівські; б – брегівські; в – з змінним прошарком прями; г – з змінним прошарком скривлені

Найбільш широкий клас ІОС це модулятори. Необхідність їхньої розробки пов'язана з тим, що при безпосередній модуляції випромінювання живлячим струмом гранична частота модуляції становить декілька ГГц. Модулятори дозволяють збільшити частоту модуляції більш ніж на порядок.

Основні типи модуляторів такі:

- а) амплітудні (електрооптичні, магнітооптичні, акустооптичні, термооптичні, електропоглинаючі);
- б) фазові (електрооптичні, магнітооптичні, акустооптичні);
- в) поляризаційні (електрооптичні, магнітооптичні, акустооптичні).

Для виготовлення модуляторів використовують такі матеріали:

- а) напівпровідники In, GaAs;
- б) напівпровідникові гетероструктури AlGaAs/Ga;
- в) сегнетоелектрики LiNb₃, LiTa O₃.

Частота модуляції модуляторів з зосередженими параметрами 18 ГГц. У модуляторах бігучої хвилі – 100 ГГц. Особливість модуляторів є можливість керування ними низькими напругами.

Схема фазового модулятора з керуванням бігучою хвилею показана на рис. 2.38.

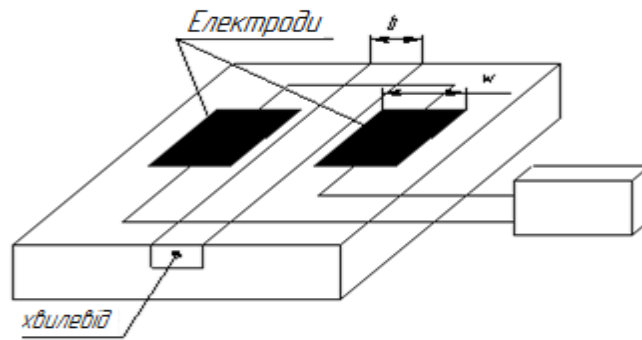


Рис. 2.38. Модулятор на базі бігучої хвилі

Зміна показника заломлення під дією керуючої напруги дорівнює:

$$\Delta n = \frac{n^3 \cdot r \cdot E}{2},$$

де r – електрооптичний коефіцієнт; E – напруженість електричного поля.

В амплітудних модуляторах модуляція може бути отримана за рахунок:

- а) зміни фази випромінювання при його проходженні через поляризатор;
- б) відводу енергії із хвильовода або її поглинання;
- в) зміни фази у двох потоках випромінювання, сформованих по інтерферометричній схемі.

Приклад схеми амплітудного модулятора, заснованого на останньому принципі з використанням інтерферометра Маха-Цендера показаний на рис. 2.39. Керуюча напруга для модулятора 2–8 В, керуюча потужність 13–50 мВт.

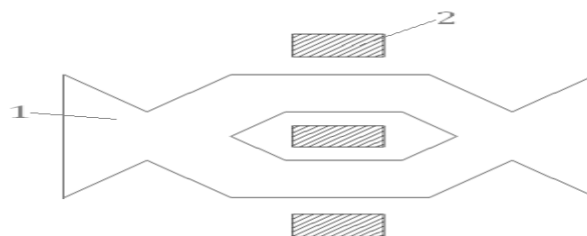


Рис. 2.39. Схема амплітудного модулятора з використанням інтерферометра Маха-Цендера: 1 – хвильоводи ; 2 – керуючі електроди

У модуляторах дифракційного типу застосовують акустооптичні або електрооптичні ефекти, під впливом яких у хвильоводі створюються періодичні ґратки з змінним показником заломлення. Найкращим матеріалом для створення такого модулятора є LiNbO_3 .

Схема модулятора показана на рис. 2.40.

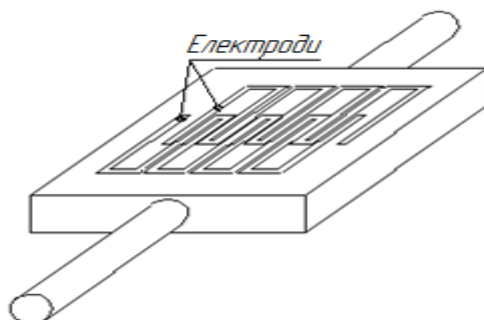


Рис. 2.40. Схема модулятора дифракційного типу

У поляризаційних модуляторах під дією електричного поля обертається площина поляризації. Схема модулятора наведена на рис. 2.41.

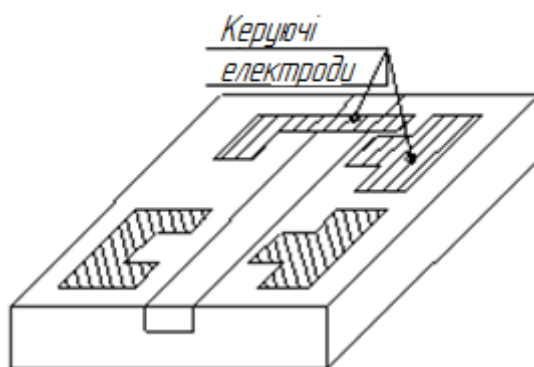


Рис. 2.41. Схема поляризаційного модулятора

Для ВОД джерела випромінювання повинні володіти рядом особливостей:

- а) технологічність;
- б) здатність узгодження з іншими елементами інтегральної схеми;
- в) одномодовий режим роботи;

г) висока швидкодія.

У більшості випадків застосовують три типи інтегральних джерел випромінювання:

- а) полоскові з резонатором Фабрі-Перо;
- б) динамічні одномодові лазерні діоди:
 - з розподіленим Брегівським відбиттям (РБВ);
 - з розподіленим зворотнім зв'язком (РЗЗ).

Схема цих джерел випромінювання показана на рис. 2.42.

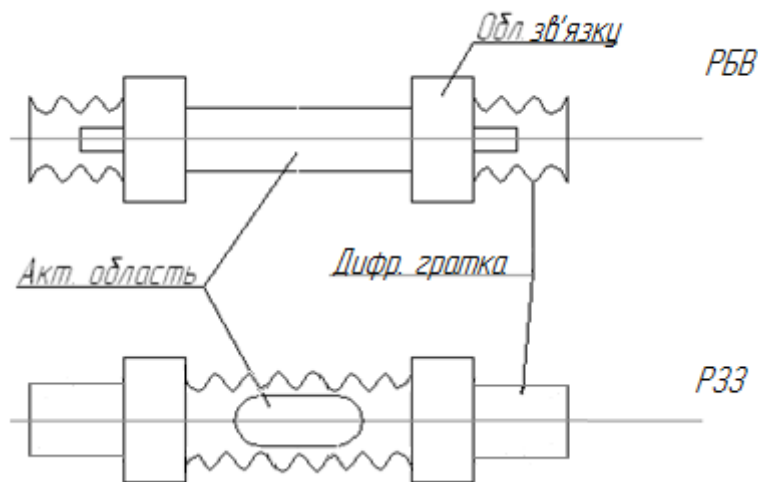


Рис. 2.42. Динамічні одномодові лазерні діоди

в) полоскові лазерні діоди з непрямолінійним резонатором, у тому числі з напівхвильовим і чвертьхвильовим резонаторами.

На рис. 2.43 показана схема напівхвильового резонатора.

Переваги випромінювачів з непрямолінійним резонатором:

- а) поліпшена характеристика «вихідна потужність – струм накачки»;
- б) більша стабільність випромінювання, чим у лазерів із прямолінійним резонатором.

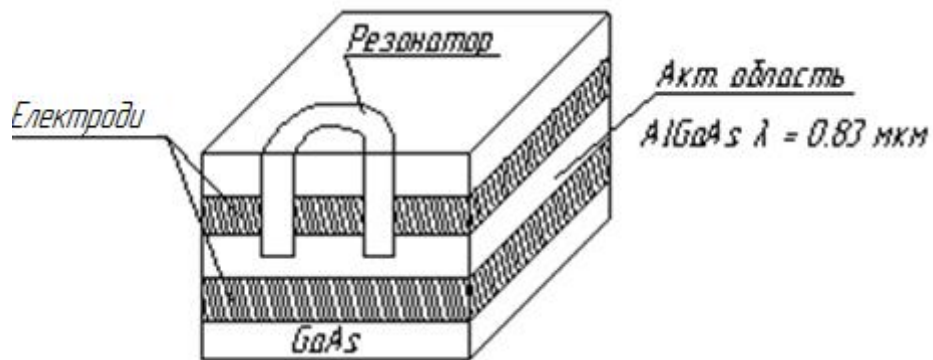


Рис. 2.43. Полосковий лазер з напівхвильовим резонатором

Основні типи інтегральних фотоприймачів:

- а) лавинні фотодіоди (ЛФД);
- б) р-і-п фотодіоди.

Стала часу цих фотоприймачів 10–100 пс. Смуга пропускання $10^{10} - 10^{11}$ Гц.

Особливістю фотоприймачів ІОС з обмеженням їхньої апертури хвильоводом є те, що вони утворюють єдину інтегральну структуру з іншими елементами з використанням вертикальної топології.

Типова схема інтегрального фотоприймача показана на рис. 2.44.

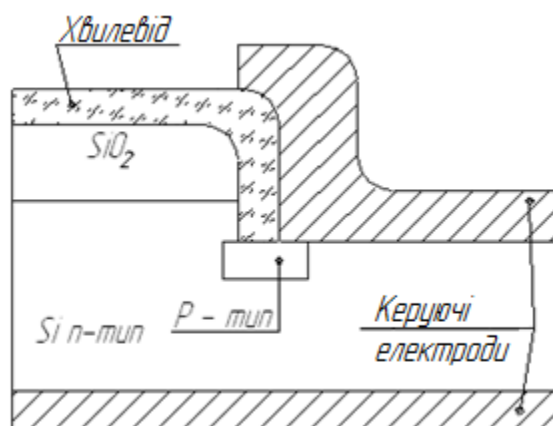


Рис. 2.44. Схема інтегрального фотоприймача

Контрольні запитання

1. Як працює оптичний хвильовод?
2. Які варіанти розповсюдження випромінювання у хвильоводі?
3. Які властивості мод планарних хвильоводів?
4. Як класифікуються оптичні хвильоводи?
5. В чому різниця між планарними і полосковими хвильоводами?
6. Які існують типи полоскових хвильоводів?
7. Які переваги і недоліки торцевого введення випромінювання в хвильовод?
8. Як працює тонкоплівкової хвильовод з краєм, що звужується?
9. Як працює призмовий елемент зв'язку між хвильоводами?
10. Як працює ґратковий елемент зв'язку між хвильоводами?
11. Які елементи зв'язку між планарними хвильоводами?
12. Які елементи зв'язку між полосковим і планарним хвильоводами?
13. Які елементи зв'язку між полосковими хвильоводами?
14. Які елементи зв'язку між хвильоводами і волокнами?
15. Які планарні лінзи існують?
16. Як визначити фокусну відстань геодезичної лінзи?
17. Як працюють лінзи зі зміною ефективного показника заломлення хвильоводу?
18. Як працює лінза Люнеберга?
19. Які принципи побудови торцевих відбивачів?
20. Які способи реалізації планарних призм?
21. Які типи інтегральних розгалужувачів?
22. Які типи пов'язаних полоскових хвильоводів?
23. Які типи резонаторів використовують в інтегральних лазерах?
24. Як працюють інтегральні хвильоводні лінзи?
25. Які типи інтегральних модуляторів?

РОЗДІЛ 3

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Волоконно-оптичні датчики(ВОД) діляться на два типи [5–7]:

- а) датчики, у яких волокно використовується, як лінія передачі сигнала;
- б) датчики, у яких волокно є чутливим елементом.

3.1. Класифікація волоконно-оптичних датчиків

Датчики з використанням волокна, як лінії передачі сигнала можуть будуватися по схемах з використанням оптичного перетворювача, або з оптичним зондом.

Схеми ВОД побудовані з використанням оптичного перетворювача і оптичного зонда показані на рис. 3.1.

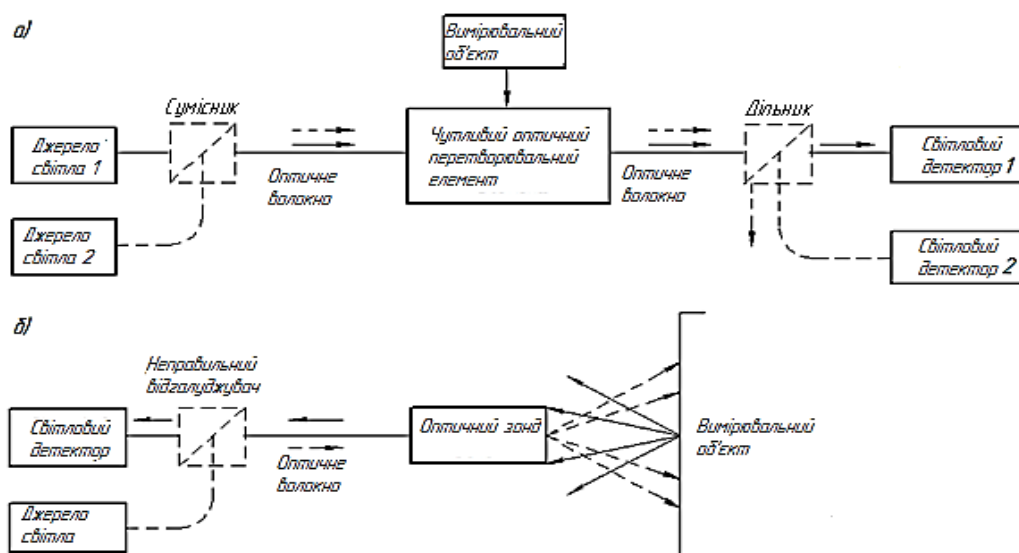


Рис. 3.1. Схема ВОД з використанням волокна як лінії передачі сигнала:

а – з оптичним перетворювачем; б – з оптичним зондом

ВОД використовують багатомодові і одномодові світловоди в поєднанні з інтегрально-оптичними елементами. Як джерело випромінювання застосовують світлодіоди й напівпровідникові лазери, а приймачем є р-і-п фотодіоди і ЛФД.

Принцип дії ВОД заснований на вимірюванні параметрів, що входять у формулу напруженості електромагнітного поля і має такий вигляд:

$$E = A \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3.1)$$

де A – амплітуда сигналу; ω – частота сигналу; φ – початкова фаза сигналу.

Відповідно до (3.1) ефекти, що використовуються у ВОД, розглянуті нижче.

Один з варіантів схеми може бути заснований на поглинанні світла. Наприклад, ВОД температури використовує залежність граничної довжини хвилі поглинання випромінювання від температури для певних типів напівпровідників (рис. 3.2). В схемі використовуються два світлодіоди. Світлодіод 2 є опорним, а спектральна полоса випромінювання світлодіода 1 знаходиться в діапазоні довжин хвиль, де межа пропускання чутливої частини датчика зсувається залежно від температури. В результаті сигнал на виході датчика буде промодульований по амплітуді.

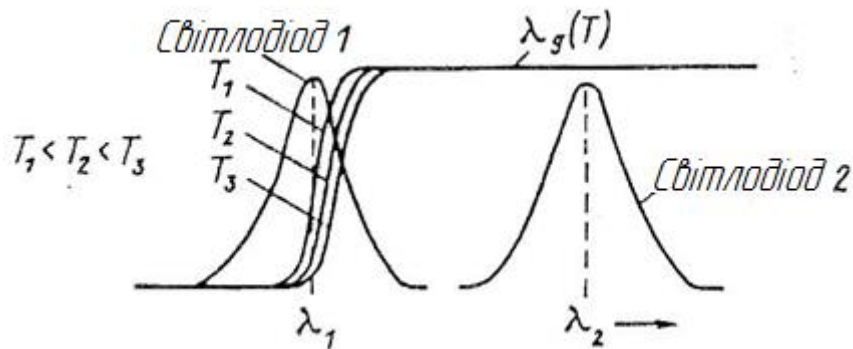


Рис. 3.2. Залежність граничної довжини поглинання світла від температури для певних типів напівпровідників

Ефекти пов'язані з відбиттям світла, що впливає на амплітуду, наприклад, датчики тиску або вібрацій(рис. 3.3).

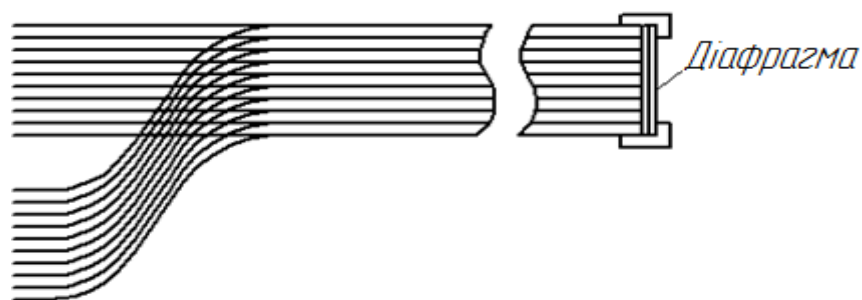


Рис. 3.3. ВОД тиску або вібрації

При прикладанні тиску до діафрагми перерозподіляється потік, що попадає на світлоприймальний джгут. Чутливість датчика залежить від взаємної орієнтації освітлювального й світлоприймального джгутів.

ВОД пов'язані з модуляцією поляризованого світла використовують ефекти: Фарадея, Покельса, фотопружності.

ВОД пов'язані зі зміною частоти використовують ефекти: Доплера (датчики швидкості, витратоміри), релєївського розсіювання.

ВОД пов'язані зі зміною фази будуються по інтерферометричній схемі.

Датчики з використанням волокна, як чутливого елемента бувають таких різновидів.

Датчик інтерферометричного типу побудований на основі інтерферометра Маха-Цендера (рис. 3.4) призначений для виміру таких параметрів: температура, тиск, деформація, напруженість магнітного поля, звуковий тиск.

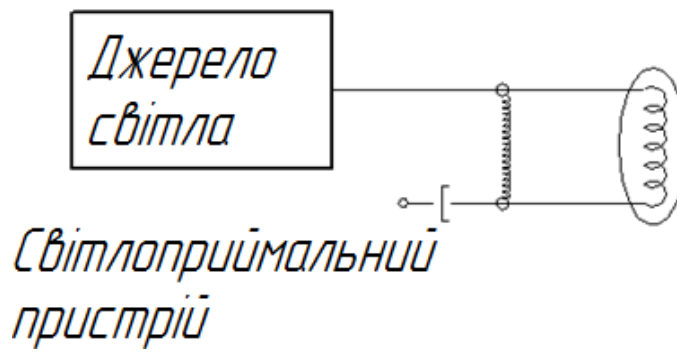


Рис. 3.4. Схема датчика інтерферометричного типу

Датчик заснований на використанні поляризаційного світла з використанням ефекта Фарадея (рис. 3.5) призначений для виміру таких параметрів: електричний струм, напруженість магнітного поля.

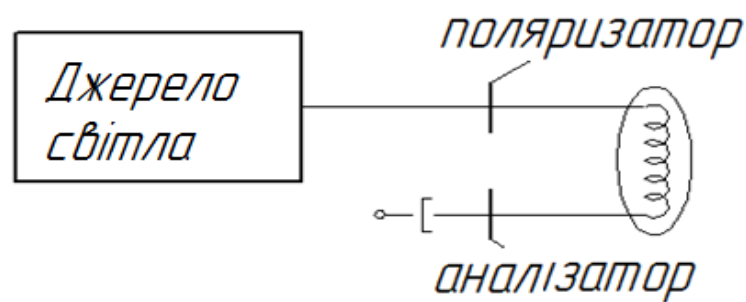


Рис. 3.5. Схема датчика, заснованого на використанні поляризованого світла

Датчик заснований на вимірюванні втрат у світловоді (рис. 3.6), призначений для виміру звукового тиску.

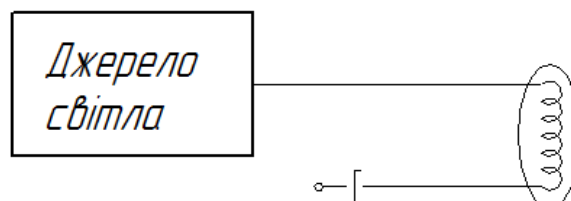


Рис. 3.6. Схема датчика, заснованого на вимірі втрат у світловоді

Датчики, що використовують ефект розсіювання світла (рис. 3.7), призначені для виміру таких параметрів, як розподіл температури і деформації.

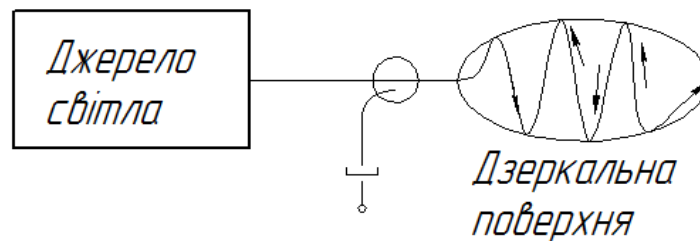


Рис. 3.7. Схема датчика, заснованого на використанні ефекту розсіювання світла

3.2. Компенсація шумів та дрейфу нуля волоконно-оптичних датчиків

Основними вимогами до ВОД є:

- а) підвищення відношення сигнал/шум;
- б) зменшення дрейфу нуля датчика.

Джерелами шумів ВОД є:

- а) власний шум джерела світла;
- б) флуктуації вихідної потужності джерела світла;
- в) зміна довжини хвилі джерела світла;
- г) флуктуація втрат з'єднань джерело світла – оптичне волокно;
- д) флуктуації внесених втрат оптичного з'єднувача й елемента оптичної

схеми.

Відношення сигнал/ шум у ВОД визначається співвідношенням:

$$S/N = \frac{m \cdot k_{nc} \cdot S_0 \cdot P_0}{\sqrt{\left(2q \cdot k_{yc}^{2+x} S_0 \cdot P_0 + 4k \frac{T}{R}\right) \Delta f + N_{ex}}}, \quad (3.2)$$

де m – глибина модуляції; k_{nc} – коефіцієнт підсилення світлового детектора; S_0 – чутливість приймача; $2q \cdot k_{yc}^{2+x} S_0 \cdot P_0$ – шуми світлового детектора; x – коефіцієнт шуму світлового детектора; $4k \frac{T}{R}$ – теплові шуми; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; R – опір навантаження світлового детектора; Δf – частотна смуга в детекторній системі; N_{ex} – інші надлишкові шуми.

На підставі формули (3.2) можна визначити основні шляхи підвищення відношення сигнал/шум у ВОД:

- а) підвищити глибину модуляції;
- б) підвищити потужність джерела випромінювання, знизити втрати в з'єднувачах;
- в) оптимізація світлового детектора;
- г) зниження рівня надлишкових шумів.

Для зменшення шумів у ВОД застосовують два методи.

Перший метод полягає у зменшенні амплітудних шумів випромінювача при використанні зворотнього зв'язку і пояснюється на рис. 3.8.

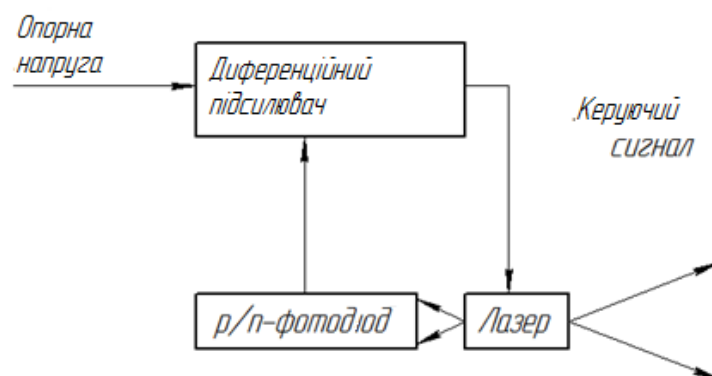


Рис. 3.8. Схема використання лазера, що зменшує амплітудні шуми випромінювача

Другий метод полягає у зменшенні фазових шумів випромінювача при використанні інтерферометра Фабрі-Перо (рис. 3.9).

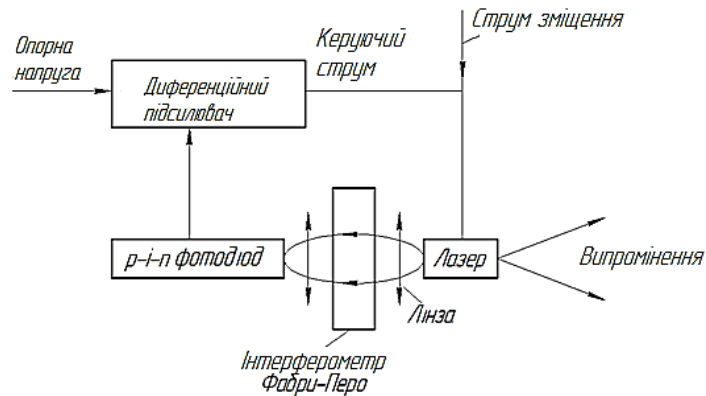


Рис. 3.9. Схема використання лазера, що зменшує фазові шуми випромінювача

На шумові характеристики ВОД впливають фактори, представлені на рис. 3.10 [6].

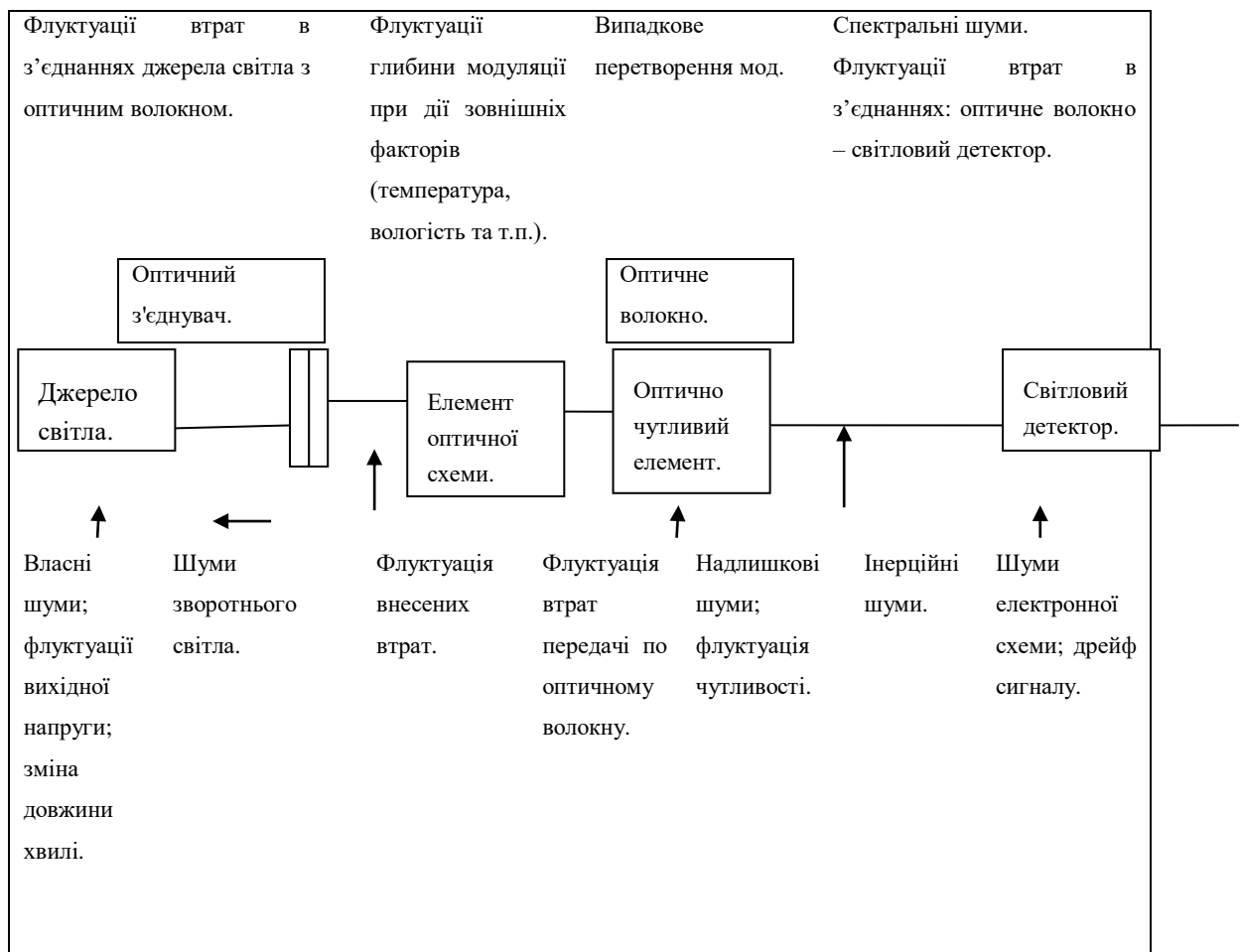


Рис. 3.10. Фактори, що впливають на шумові характеристики ВОД

Схема стабілізації частоти заснована на тому, що при застосуванні резонатора Фабрі-Перо частотні шуми перетворюються в амплітудні. А потім по лінії зворотнього зв'язка регулюють струм інжекції лазера. Внаслідок коливання інтенсивності випромінювання, втрат в оптичних з'єднувачах, втрат при узгодженні елементів ВОД, втрат передачі по оптичному волокну виникає дрейф вихідного сигналу й зростає похибка вимірювання.

Недоліком ВОД є дрейф нуля. Засоби для компенсації дрейфа нуля розглянуті нижче [5].

Схема, що дозволяє перетворити змінний струм в сталий, приведена на рис. 3.11, а. Відповідно до цієї схеми змінна складова вихідного сигналу датчика відокремлюється від сталої. Потужність світла, сприймана детектором, визначається співвідношенням:

$$P = P_0(1 + m),$$

де P_0 – середнє значення потужності лазерного випромінювача.

Відокремивши змінну складову (P_0m), можна вимірювати глибину модуляції m , при цьому підвищиться точність виміру.

Схема, що використовує метод зворотнього зв'язка при аналізі вихідного сигналу, приведена на рис. 3.11, б. При цьому способі стала складова вихідного сигналу порівнюється з попередньо встановленою опорною напругою, і різницевий сигнал застосовують для зворотнього зв'язка в процесі регулювання струму збудження випромінювача. При наявності дрейфа в цьому способі стабілізують значення P_0 . Метод застосовується коли інформаційним є сигнал змінного струму.

Схема, що використовує спосіб двох вихідних світлових променів, приведена на рис. 3.12. Ця схема використовується тільки для ВОД, що працюють з поляризованим світлом.

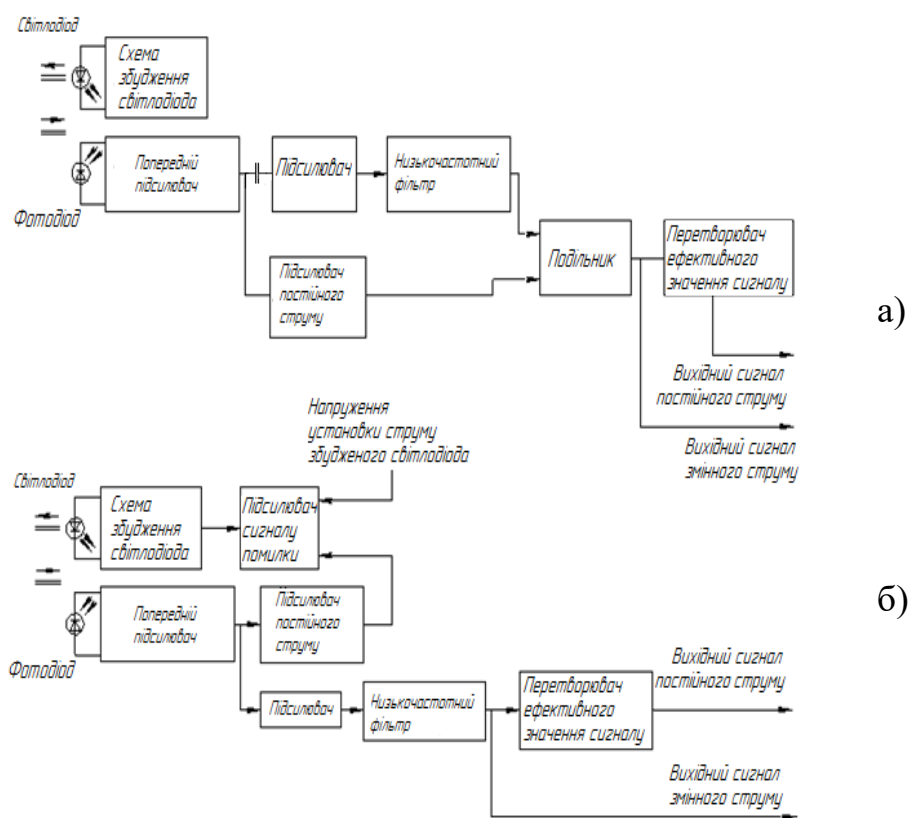


Рис. 3.11. Способи компенсації дрейфа нуля ВОД:

а – схема, що дозволяє перетворити змінний струм в сталий; б – схема, що використовує метод зворотнього зв'язка

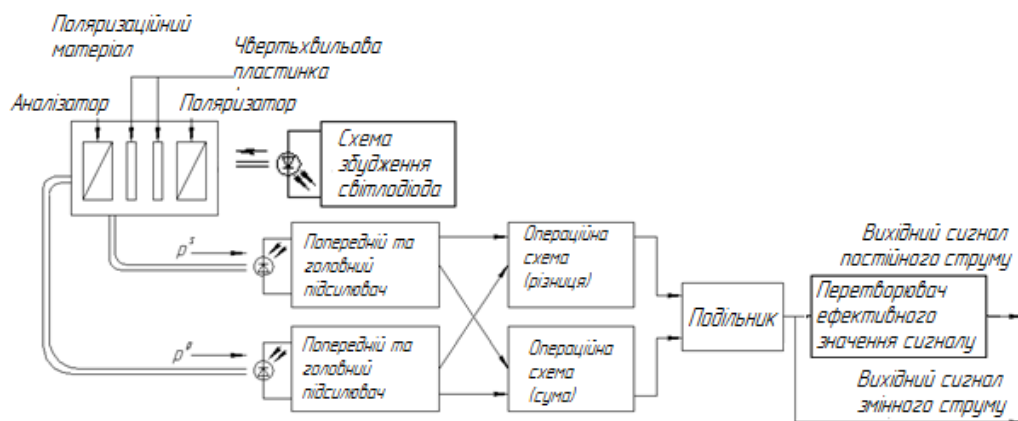


Рис. 3.12. Компенсація дрейфа датчика методом двох вихідних світлових променів

Потужність вихідного сигналу датчика, що сприймає світлові промені поляризовані у двох взаємно-перпендикулярних площинах, визначається співвідношеннями:

$$P_p = P_0(1 + m); \quad P_s = P_0(1 - m).$$

У блоці обробки обчислюється наступне співвідношення:

$$\frac{P_p - P_s}{P_p + P_s}$$

Вихідна напруга сигналу після обробки стає пропорційною m і не залежить від P_0 .

Схема, що використовує метод двох довжин хвиль, приведена на рис. 3.13. У світлочутливу частину датчика по черзі або одночасно подаються світлові сигнали з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 . Інтенсивність сигналу на довжині хвилі λ_1 модулюється при вимірі, а на довжині хвилі λ_2 не модулюється. На виході утворюється співвідношення електричних напруг першого й другого сигналу.

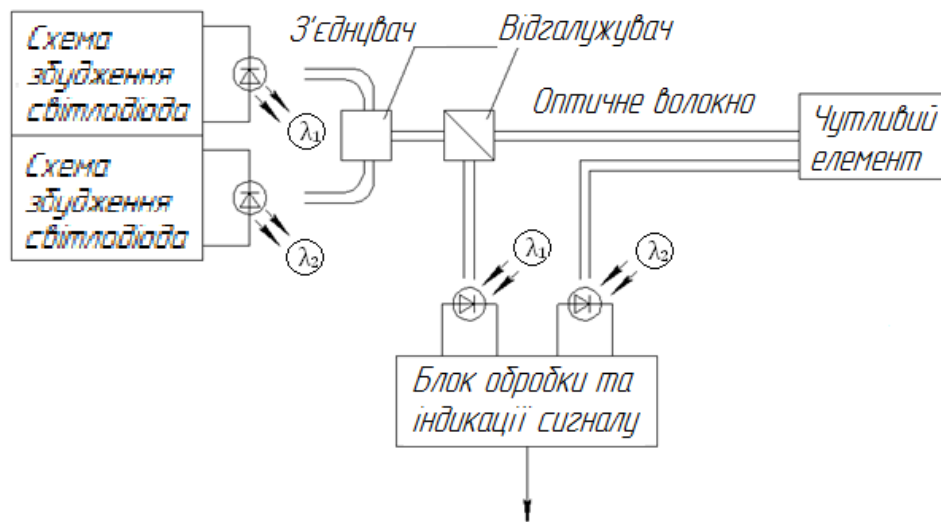


Рис. 3.13. Компенсація дрейфа датчика методом двох довжин хвиль

3.3. Волоконно-оптичні датчики для виміру механічних величин

ВОД тиску заснований на способі вимірювання шляхом сканування поверхні мембрани світловими сигналами та прийому відбитих сигналів фотоприймачем. На рис. 3.14 зображено конструкцію ВОД тиску, а на рис. 3.15 функціональну схему датчика.

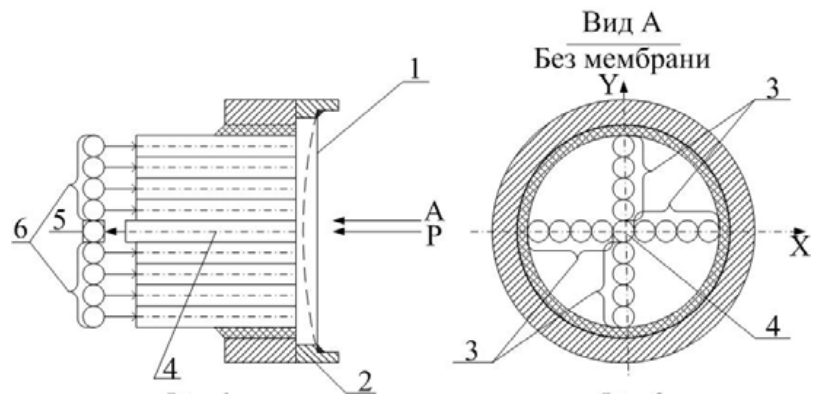


Рис. 3.14. Конструкція волоконно-оптичного датчика тиску

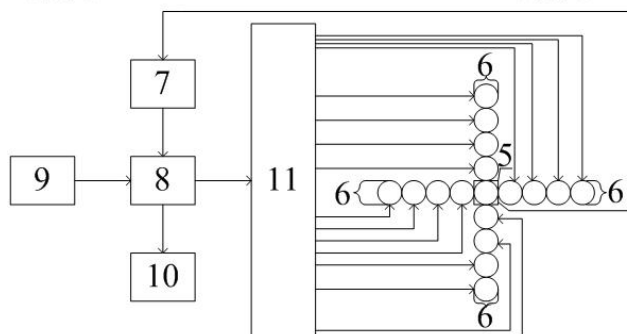


Рис. 3.15. Функціональна схема датчика тиску

ВОД тиску для випадку, коли кількість передаючих світловодів $n=16$, працює наступним чином. Мікроконтролер 8 виконує по чергу включення світлодіодів 6 шляхом подачі цифрових сигналів драйверу світлодіодів 11. Драйвер перетворює отриманий сигнал у номер світлодіода, який необхідно підключити, і подає на нього струм фіксованої величини. Світлодіод в свою чергу перетворює цей струм у світловий потік.

Передаючі світловоди 3 по чергово, відповідно з програмою, засвічують поверхню мембрани 1, яка закріплена в корпусі 2 та сприймає тиск P . Засвічування, наприклад, виконується спочатку по горизонтальній, а потім по вертикальній осям симетрії мембрани (від крайніх світловодів 3 до

центрального приймаючого світловода 4).

Мембрана під дією тиску P , температури, а також вібрацій змінює свою форму. Відбиті від поверхні мембрани світлові сигнали потрапляють в зону приймаючого світловода 4, а по ньому на фотоприймач 5, який перетворює інтенсивність світлового потоку в напругу.

Отримані значення напруги в аналого-цифровому перетворювачі 7 перетворюються в цифровий код. Після того як мікроконтролер отримав 16 значень напруги, він виконує розрахунок поточного значення тиску з використанням алгоритму цифрової обробки сигналів, а також його коригування по показанням цифрового датчика температури 9.

Отримане значення тиску $P_{кор}$ передається на цифровий індикатор 10.

За рахунок сканування поверхні мембрани світловими сигналами та обробки в мікроконтролері перетворених відбитих сигналів зменшуються похибки від впливу температури, вібрацій та інших факторів.

При випробуванні мембрани на її вхід подаються еталонні значення тиску, а в мікроконтролері знайдені за перетвореними відбитими оптичними сигналами прогини мембрани порівнюються з еталонними, що зберігаються у пам'яті мікроконтролера. За результатами порівняння видається інформація про працездатність мембрани.

ВОД можуть бути використані для вимірювання зазору між елементами конструкції або вимірювання вібрацій. Прикладом використання такого датчику може бути система для визначення повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах, яка б об'єднувала запропонований волоконно-оптичний сенсор та апаратну реалізацію частотно-фазового методу для обробки його вихідних сигналів, які несуть інформацію щодо величини зазору.

Схема ВОД для контролю повітряних зазорів наведена на рис. 3.16.

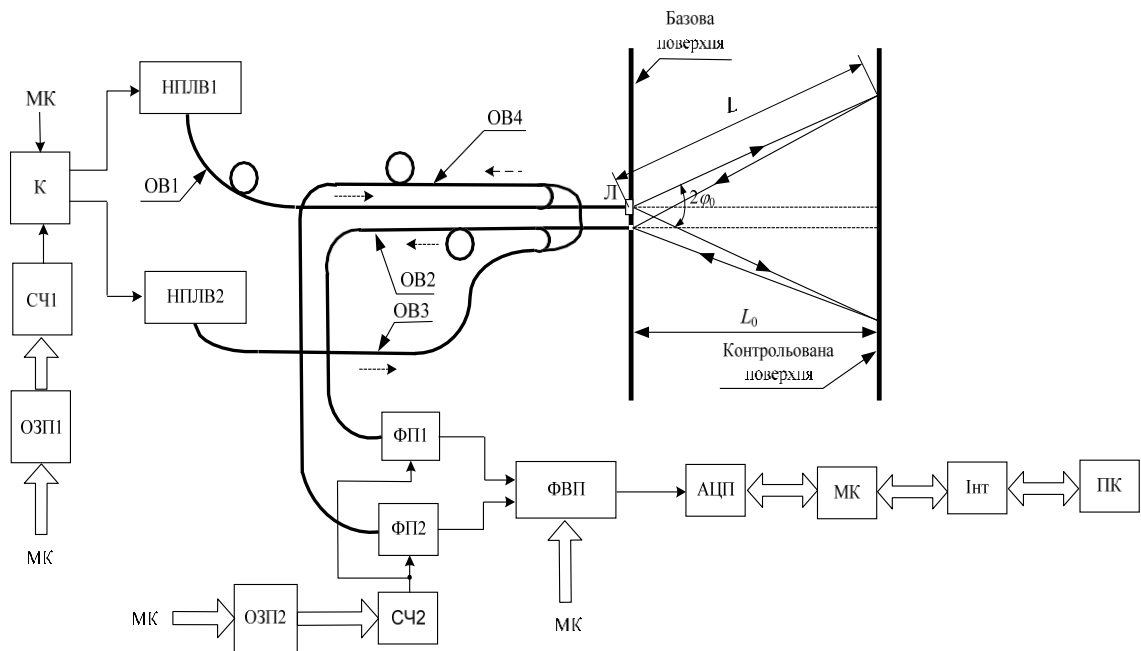


Рис. 3.16. Схема волоконно-оптичного датчика зазору

На схемі прийняті позначення: НПЛВ1, НПЛВ2 – напівпровідникові лазерні випромінювачі; К – комутатор; СЧ1, СЧ2 – синтезатори частоти; ОЗП1, ОЗП2 – оперативні запам'ятовуючі пристрої; ОВ1– ОВ4 – оптичні волокна; Л – мікролінза; ФП1, ФП2 – фотоприймачі; ФВП – фазовимірювальний перетворювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач напруги; МК – мікроконтролер; Інт – інтерфейс; ПК – персональний комп'ютер; L_0 – контрольований повітряний зазор.

В структурній схемі частотно-фазової системи, що розглядається, як і в фазовій системі, для оцінки фазового зсуву світлових потоків реалізовано алгоритм почергового порівняння досліджуваного та опорного світлових потоків, що дає змогу зменшити вплив на результат вимірювання короткочасної нестабільності параметрів фазовимірювального перетворювача ФВП. ВОД працює в два такти.

В першому такті модульований по частоті за допомогою СЧ1 світловий потік, який випромінюється НПЛВ1, через закріплене на статорі волокно ОВ1 з мікролінзою Л в його торці направляється на поверхню ротора. Відбитий від контрольованої поверхні світловий потік через волокно ОВ2, яке теж закріплено на статорі, подається на фотоприймач ФП1. Одночасно світловий потік з другого виходу ОВ1 направляється на вхід волокна ОВ4 і, пройшовши його, попадає на вхід фотоприймача ФП2. При цьому вихідні сигнали ФП1 та ФП2, які працюють в гетеродинному режимі за допомогою ОЗП2 та СЧ2 мають певні фазові зсуви. Ці зсуви після перетворення за допомогою АЦП в цифрову форму запам'ятовується в пам'яті МК. МК передає інформацію до компютера, який за розробленою програмою обчислює величину зазору L_0 .

Схема датчиків тиску, побудованих на основі явищ ПВВ й дифракції, показана на рис. 3.17.

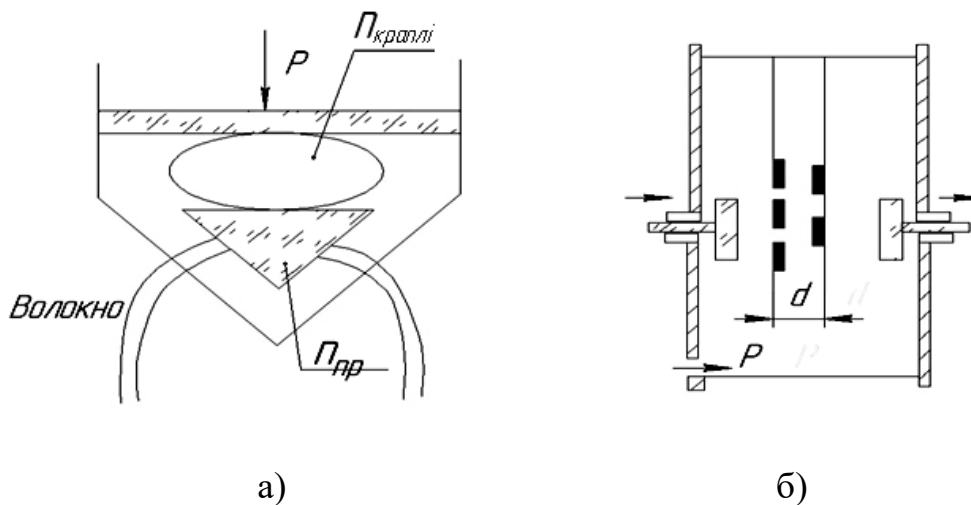


Рис. 3.17. Схема датчиків тиску:

а – на основі явища ПВВ; б – на основі явища дифракції

На датчику зображеному на рис. 3.17, а на призму нанесена крапля рідини, що не змочує поверхню призми. При дії тиску крапля розтікається і перерозподіляється світловий потік на світлоприймальному світловоді завдяки явищу ПВВ. На датчику зображеному на рис. 3.17, б при дії тиску

вигінаються бічні стінки, що призводить до зміни взаємного положення ґраток і, як наслідок, змінюється світловий потік на вході приймального світловода.

Схеми датчиків тиску й прискорення на основі ефекту фотопружності наведені на рис. 3.18. Під дією тиску фотопружний елемент (рис. 3.18, а) повертає площину поляризації випромінювання, а це призводить до зміни потужності потоку випромінювання, що пройшов через аналізатор. Для зменшення вплива дрейфа нуля датчика використовується спосіб двох вихідних світлових променів.

В датчику вимірювання прискорення (рис. 3.18, б) використовується другий закон Ньютона, згідно якого сила діюча на фотопружний елемент пропорційна величині прискорення і масі навантаження встановленого на фотопружньому елементі.

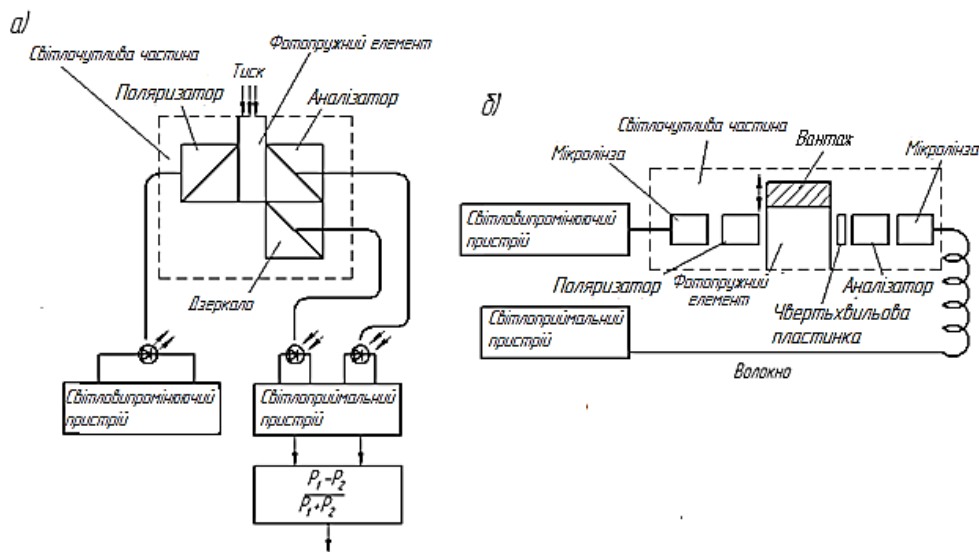


Рис. 3.18. Схема датчиків тиску й прискорення, побудованих на основі ефекту фотопружності

Значення сталих фотопружності для деяких некристалічних матеріалів, застосовуваних у цих датчиках, наведені в табл. 3.1.

Значення сталих фотопружності

Матеріал	$C, \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$	$\lambda, \text{ мкм}$
Плавлений кварц	0,37	0,63
Скло	0,65	0,82
Плексиглаз	1,1	0,55
Епоксидна смола	5,2	
DAR	3,8	

Схема датчика прискорення з використанням тунельного ефекта показана на рис. 3.19.

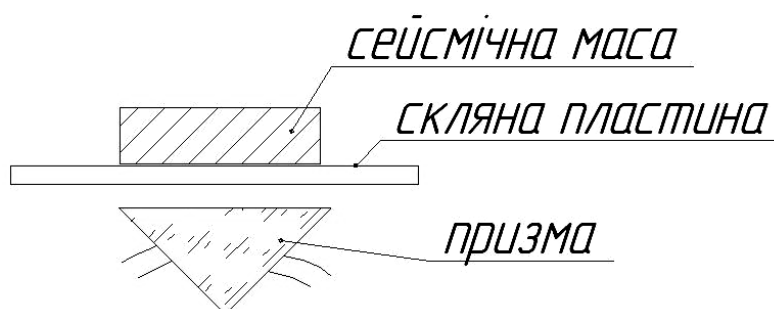


Рис.3.19. Схема датчика прискорення з використанням тунельного ефекта

Принцип дії датчика заснований на тому, що під дією прискорення сейсмічна маса прогинає скляну пластинку. Відстань між скляною пластинкою і призмою ПВВ сорозмірна з довжиною хвилі випромінювання. При зміні зазора частина випромінювання виходить за межі призми [7].

Світлова потужність, що вимірюється за допомогою фотоприймального пристрою для датчика, схема якого наведена на рис. 3.18 визначається співвідношенням:

$$P = P_0 \left(1 + \sin \frac{\pi T}{T_\pi} \right),$$

де T – вимірюваний тиск; T_π – напівхвильовий тиск.

Напівхвильовий тиск визначається співвідношенням:

$$T_{\pi} = \frac{\lambda}{cL},$$

де λ – довжина хвилі випромінювання; L – довжина матеріала уздовж осі датчика; c – стала фотопружності.

Математична модель, що характеризує вихідний сигнал (струм фотоприймача) описується співвідношенням:

$$I_{\phi n} = P_{\text{випр}}(I_{\text{випр}}) f_{\phi n} F_{\text{вим}}(F_{\text{вх}}) S_{\phi n} \cdot \tau,$$

де $P_{\text{випр}}(I_{\text{випр}})$ – потужність (сила світла) оптичного випромінювання; $f_{\phi n}$ – функція перетворення датчика; $F_{\text{вим}}$ – величина, що вимірюється за допомогою ВОД; $F_{\text{вх}}$ – зовнішній вплив; $S_{\phi n}$ – інтегральна струмова чутливість фотоприймача; τ – коефіцієнт пропускання.

Для наведених схем датчиків прискорення їхні математичні моделі будуть відрізнятися тільки функцією перетворення датчика.

Для схеми датчика, показаного на рис. 3.18, математична модель буде мати такий вигляд:

$$I_{\phi n} = P_{\text{випр}}(I_{\text{випр}}) \left(1 + \sin \left(\frac{\pi \cdot m \cdot a \cdot C \cdot L}{S \lambda} \right) \right) S_p \cdot \tau_{no} \cdot \tau_{ногл} \cdot \tau_{\phi p},$$

де $P_{\text{випр}}(I_{\text{випр}})$ – потужність випромінювача; m – сейсмічна маса; a – вимірюване прискорення; C – стала фотопружності матеріала; L – довжина фотопружного матеріала уздовж оптичної осі; S – площа датчика під сейсмічною масою; S_p – реальна струмова чутливість фотоприймача; τ_{no} , $\tau_{ногл}$ і $\tau_{\phi p}$ – коефіцієнти втрат поляризаційні, втрат на поглинання й втрат на відбиття Френеля відповідно.

Конкретизована математична модель ВОД на основі тунельного ефекта (рис. 3.19) має такий вигляд:

$$I_{\phi n} = \left(0,5 \cdot (R_{\perp} + R_{\parallel}) P_{ex} + (P_{випр} (I_{випр}) - P_m) \frac{S_{ex}}{S_{np}} \right) S_p \cdot \tau_{ногл} \cdot \tau_{фр},$$

де R_{\perp}, R_{\parallel} – коефіцієнти відбиття на призмі ПВВ для хвиль, поляризованих у взаємно перпендикулярних площинах; P_{ex} – потужність випромінювання, що надходить на вхідний торець приймаючого світловода при відсутності прогину скляної пластинки; $P_{випр}(I_{випр})$ – потужність (сила світла) оптичного випромінювання, що вводиться у призму ПВВ; P_m – потужність випромінювання, що виходить за межі призми ПВВ в результаті порушення явища ПВВ; S_{ex} – площа вхідного торця фотоприйомного світловода; S_{np} – площа катетної грані призми; S_p – реальна струмова чутливість фотоприймача.

Зв'язок товщини зазора між скляною пластинкою й призмою ПВВ з вимірюваним прискоренням визначається співвідношенням:

$$d = d_0 - \frac{r_m^4}{h_m^3 E_m} \cdot \frac{3(1-\sigma_m^2)}{16} \cdot \frac{ma}{S_m},$$

де r_m, h_m, E_m, σ_m – відповідно радіус, товщина, модуль Юнга й коефіцієнт Пуассона скляної пластинки; d_0 – початкове значення зазору; m – сейсмічна маса; S_m – площа скляної пластинки; a – вимірюване прискорення.

Реальна струмова чутливість фотоприймача датчика визначається наступним співвідношенням:

$$S_p = S_i \cdot \xi,$$

де S_i – інтегральна струмова чутливість фотоприймача; ξ – коефіцієнт використання світлового потоку.

Величину коефіцієнта використання світлового потоку можна знайти з співвідношення:

$$\xi = \frac{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda},$$

де $\phi(\lambda)$ – спектральна характеристика світлового потоку випромінювання, що падає на фотоприймач; $S(\lambda)$ – спектральна чутливість фотоприймача, визначена по еталону.

Коефіцієнт пропускання системи може бути розрахований з використанням матриць Мюллера. Рівняння, що застосовується при цьому, таке :

$$[V_0] = [M_{\phi n}] \cdot [M_A] \cdot [M_{\phi ПЕ}] \cdot [M_{П}] \cdot [V_e],$$

де V_0 і V_e – вектори Стокса вихідного й падаючого випромінювання; $M_{\phi n}$ – матриця Мюллера фазової пластинки; M_A – матриця Мюллера аналізатора; $M_{\phi ПЕ}$ – матриця Мюллера фотопружнього елемента; $M_{П}$ – матриця Мюллера поляризатора.

Вектори Стокса містять такий перелік параметрів:

$$[V_0] = \begin{bmatrix} I_0 \\ M_0 \\ C_0 \\ S_0 \end{bmatrix}; \quad [V_e] = \begin{bmatrix} I_e \\ M_e \\ C_e \\ S_e \end{bmatrix},$$

де I_0 і I_e – інтенсивності вихідного й падаючого пучків променів; M , C і S – параметри, що визначають ступінь і вид поляризації вихідного й падаючого пучків випромінювання.

3.4. Волоконно-оптичні датчики для виміру електричних величин

Схема датчика магнітного поля на основі ефекта Фарадея показана на рис. 3.20. Принцип дії датчика заснований на обертанні площини поляризації

елементом Фарадея під дією магнітного поля. Кут повороту площини поляризації визначається з наступного співвідношення:

$$\varphi_F = V \cdot H \cdot L, \quad (3.3)$$

де V – стала Верде; H – напруженість магнітного поля; L – довжина елемента Фарадея.

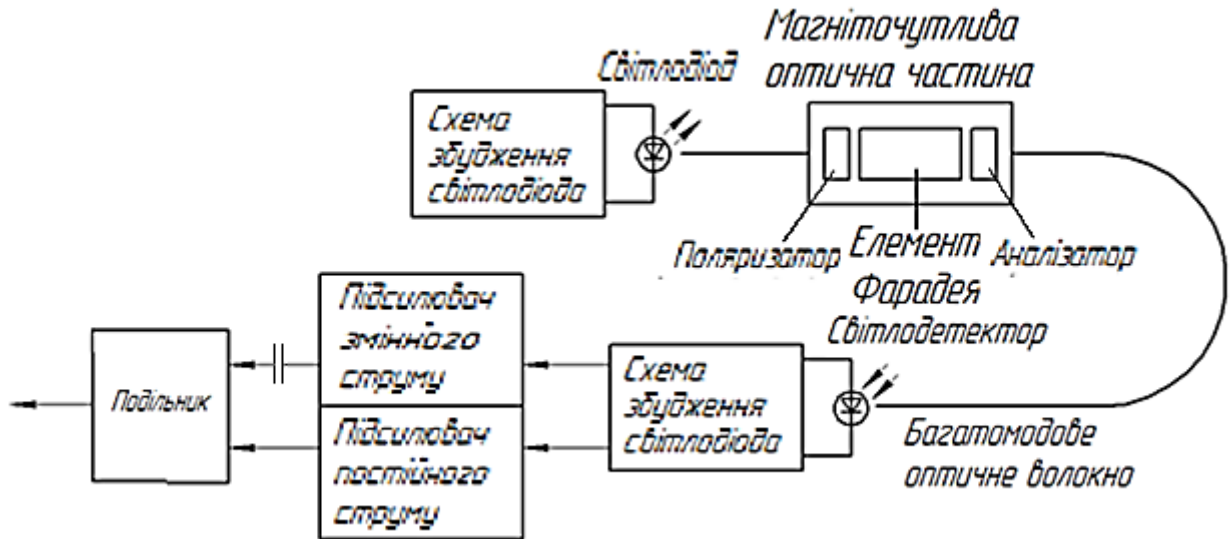


Рис. 3.20. Схема датчика магнітного поля

Матеріали, які використовують для елемента Фарадея це діелектрики і ферромагнетики. У діелектриках має місце ефект оптичної активності під впливом ефекта фотопружності. Кут поворота площини поляризації визначається співвідношенням:

$$\varphi = \varphi_F + \theta \cdot L,$$

де θ – стала фотоактивності матеріала.

Для ферромагнетиків кут поворота площини поляризації визначається співвідношенням:

$$\varphi = \frac{\psi}{4\pi M} H \cdot L,$$

де M – магнітний потік, що відповідає стану насичення; ψ – кут поворота площини поляризації при напруженості магнітного поля $H \leq 4\pi \cdot M$.

Один з варіантів оптичної частини датчика магнітного поля показано на рис. 3.21. Датчик містить волокно для підвода світлового потоку, елемент Фарадея, аналізатор і поляризатор виготовлені в одному блоці.

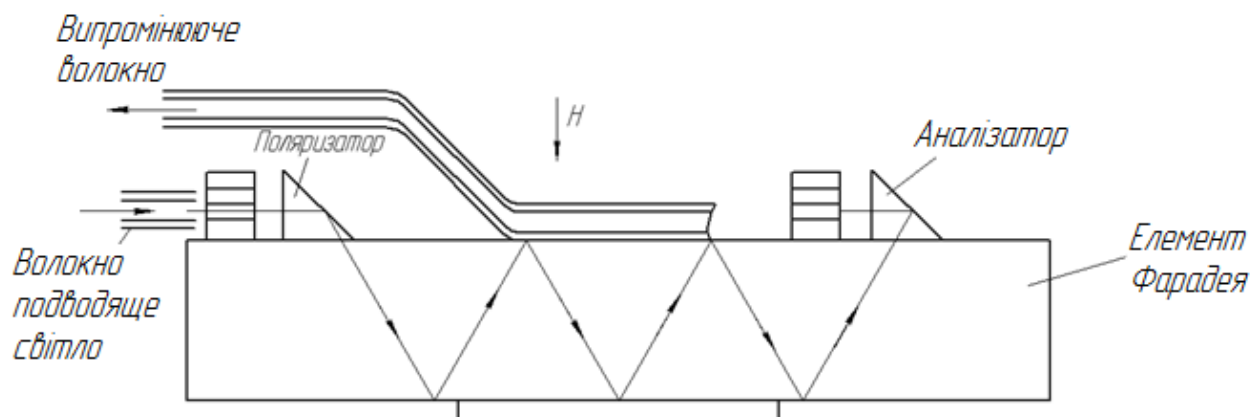


Рис. 3.21. Оптична частина датчика магнітного поля

В датчику обертання Фарадея відбувається разом з багаторазовим відбиттям світлового променя, що входить в свинцеве скло. При цьому промінь, відбиваючись від верхньої і нижньої поверхні скла, не змінює поляризацію. Для більш повного відбиття на ці поверхні напилюється багат шарова плівка з властивостями чвертьхвильової пластини. Одна з переваг такого датчика – подовження дійсного оптичного шляху, а отже, і збільшення глибини модуляції інтенсивності магнітним полем. При використанні для передачі і прийому світла багатомодового оптичного волокна, або джгута з оптичних волокон, а в якості джерела світла світлодіода на основі AlGaAs мінімальна вимірювана напруженість магнітного поля 400 А/м, діапазон вимірювань 0–40 000 А/м (0–500 Е), лінійність $\pm 1\%$. Нерівномірність частотної характеристики ± 3 дБ в смузі частот від 3 до 750 Гц.

Схема оптичної частини магнітного датчика з об'єднанням оптичних елементів показана на рис. 3.22. В оптичній частині датчику в якості матеріалу для елемента Фарадея використовується свинцеве скло. На склі безпосередньо виготовляється поляризатор і аналізатор багат шарового типу (діелектричні плівки SiO₂/TiO₂). Завдяки конструктивному об'єднанню цих елементів підвищується надійність датчика і знижується його собівартість.

Як джерело світла використовується світлодіод ($\lambda = 0,85$ мкм), в якості світлового детектора використовується рпн-фотодіод. Оптичне волокно багатомодовое з кварцового скла з діаметром осердя 100 мкм. Датчик з довжиною оптичного шляху 20 мм дозволяє вимірювати напруженість магнітного поля 80–4000 А/м (10–500 Е) з нелінійністю не гірше $\pm 0,25$ % і при відношенні сигнал-шум не менше 40 дБ ($B = 1$ кГц). Температурна похибка $\pm 0,5$ % в діапазоні від -25 до 86 °С.

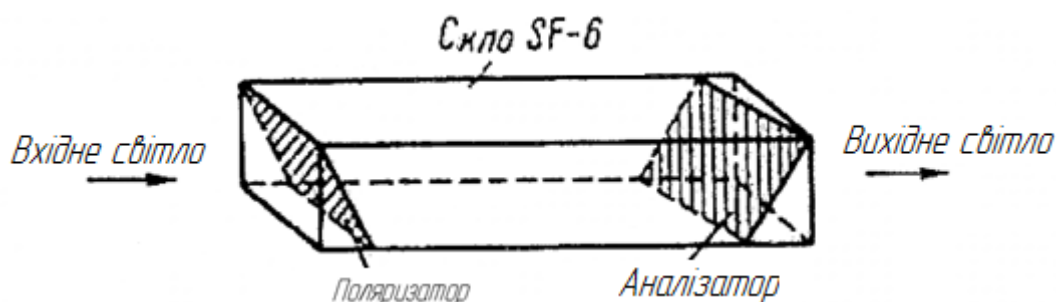


Рис. 3.22. Оптична частина магнітного датчика з об'єднаними оптичними елементами

Схема датчика для виміру напруженості електричного поля на основі ефекта Покельса показана на рис. 3.23. Як матеріал у таких датчиках застосовують ніобат літію.

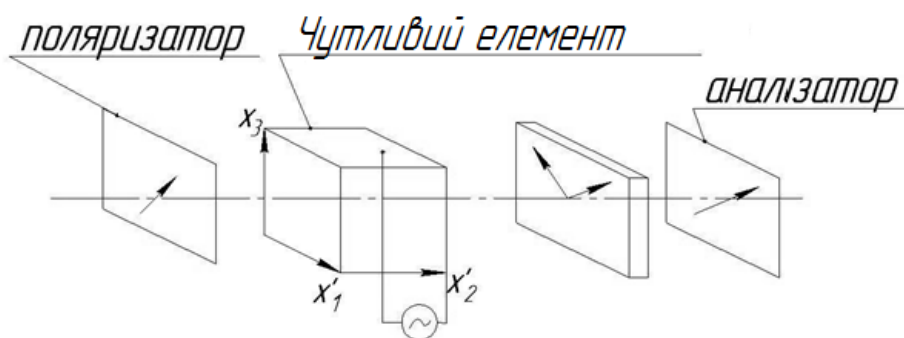


Рис. 3.23. Схема датчика для виміру напруженості електричного поля на основі ефекта Покельса

На рис. 3.23 x'_1 , x'_2 це головні оптичні осі кристала, а x_3 – вісь, у напрямку якої діє прикладене електричне поле.

Світлова потужність на виході датчика визначається співвідношенням:

$$P = P_0 \left(1 + \sin \pi \frac{U_{ex}}{U_\pi} \right),$$

де P_0 – середня потужність джерела випромінювання при відсутності електричного поля; U_{ex} – прикладена електрична напруга; U_π – напівхвильова напруга, при якій фаза сигналу зсувається на π .

Величина напівхвильової напруги визначається відповідно до формули:

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3\gamma_{41}},$$

де γ_{41} – електрооптичний коефіцієнт; n_0 – показник заломлення чутливого елемента при відсутності прикладеної напруги.

Залежність зсуву фази сигналу від прикладеного електричного поля має такий вигляд:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} EL = \pi \frac{U_{ex}}{U_\pi},$$

де E – напруженість електричного поля.

На рис. 3.24 зображено датчик електричного струму, в якому магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом повертає внаслідок ефекту Фарадея площину поляризації випромінювання у волокні, навитому на провідник. Якщо на провідник намотано N витків оптичного волокна, то кут повороту площини поляризації визначається співвідношенням (3.3), де напруженість магнітного поля пропорційна величині струму.

Особливістю цього датчика є те, що він реагує лише на магнітне поле, створюване струмом, залишаючись нечутливим до зовнішнього магнітного поля. Для усунення залежності вихідного сигналу від потужності лазера на виході знаходиться поляризаційна призма Волластона, яка пропускає випромінювання, поляризоване під кутом $\pm 45^\circ$ до площини поляризації вхідного випромінювання. З призми виходять два пучки з ортогональними поляризаціями, які потрапляють на фотодіоди 1 і 2.

Сигнали з фотодіодів потрапляють на входи диференційного підсилювача, напруга з виходу якого пропорційна величині струму.

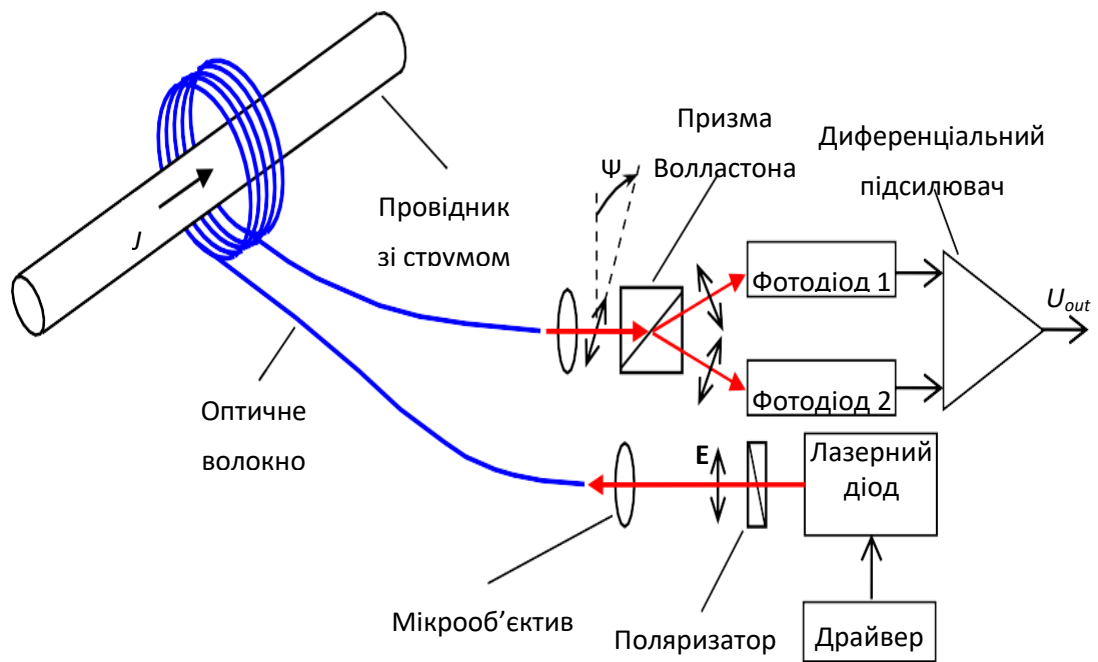


Рис. 3.24. Волоконно-оптичний датчик для вимірювання сили струму

Датчик для виміру сили струму, з використанням п'єзоелемента показаний на рис. 3.25.

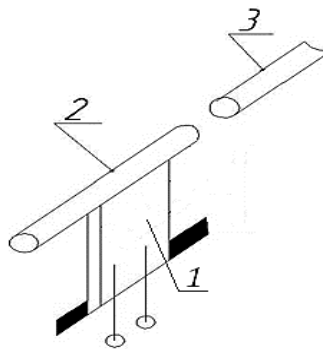


Рис. 3.25. Схема датчика для виміру сили струму з використанням п'єзоелемента: 1 — п'єзоелемент; 2 — світловод, що підводить випромінювання; 3 — світловод, що сприймає випромінювання

Датчик містить пластину п'єзоелемента 1, який прогинається під дією зовнішньої напруги або внаслідок проходження струму. При цьому величина

відхилення пропорційна амплітуді діючих факторів. На пьезоелементі закріплений світловод 2, який підводить випромінювання. Поток, що сприймається світловодом 3, змінюється в залежності від величини прогину світловода 2. Надалі оптичний сигнал перетворюється в електричний.

3.5. Волоконно-оптичні датчики з волокном в якості чутливого елемента

Більшість схем таких датчиків показані на рис. 3.26. ВОД з волокном в якості чутливого елемента в основному реагують на зміну фази оптичного сигналу. Ці зміни виникають при зовнішніх впливах на світловод, обумовлених механічними деформаціями, тиском, температурою, магнітним або електричним полем.

Зміна фази електромагнітного випромінювання, що поширюється у світловоді, може бути визначена з співвідношення:

$$\Delta\varphi = \beta \cdot \Delta l + \Delta\beta \cdot l,$$

де l і Δl – довжина й зміна довжини світловода; β і $\Delta\beta$ – стала поширення і її зміна у світловоді.

Зміна $\Delta\beta$ визначається з наступного співвідношення:

$$\Delta\beta = \Delta n \frac{d\beta}{dn} + \Delta r \frac{d\beta}{dr},$$

де Δn – відхилення показника заломлення; Δr – зміна радіуса осердя світловода.

ВОД фазової модуляції в основному будуються на основі схеми інтерферометра Маха-Цендера. Принцип дії заснований на зміні оптичної довжини ходу в одному з каналів. При цьому потужність, що реєструється фотодетектором пропорційна зміні фази в одному з каналів відповідно до співвідношення:

$$P \approx (1 + \cos \Delta \varphi),$$

де $\Delta \varphi$ – зміна фази в одному з каналів.

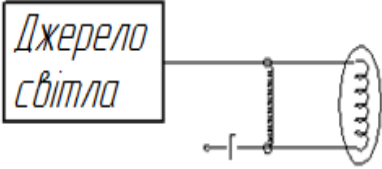
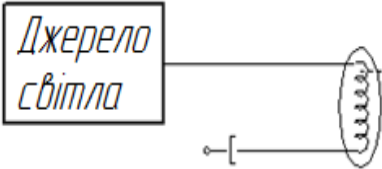
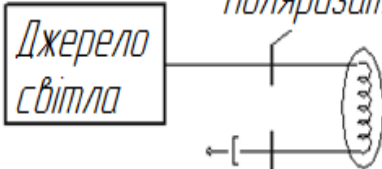
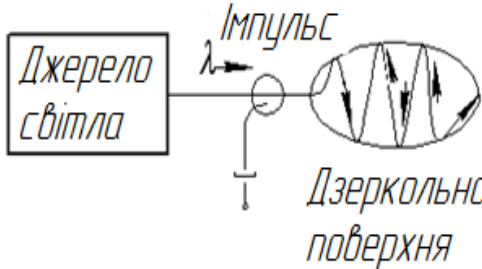
 <p>Джерело світла</p> <p>Світлоприймальний пристрій</p>	<p>Температура</p> <p>Тиск</p> <p>Деформація</p> <p>Напруга магнітного поля</p> <p>Звуковий тиск</p>
 <p>Джерело світла</p> <p>поляризатор</p>	<p>Електричний струм</p> <p>Напруга магнітного поля (ефект Фарадея)</p>
 <p>Джерело світла</p> <p>аналізатор</p>	<p>Звуковий тиск (мікровигин)</p> <p>Концентрація газу</p> <p>Радіоактивне випромінювання</p>
 <p>Джерело світла</p> <p>Імпульс</p> <p>Дзеркольна поверхня</p>	<p>Розподіл температури</p> <p>Деформації аномалій</p>

Рис. 3.26. Структурні схеми ВОД з волокном в якості чутливого елемента:

а – схема використання; б – параметр, який вимірюється

ВОД з волокном в якості чутливого елемента використовують різні види волоконо-оптичних інтерферометрів (ВОІ). Схеми деяких ВОІ показані на рис. 3.27.

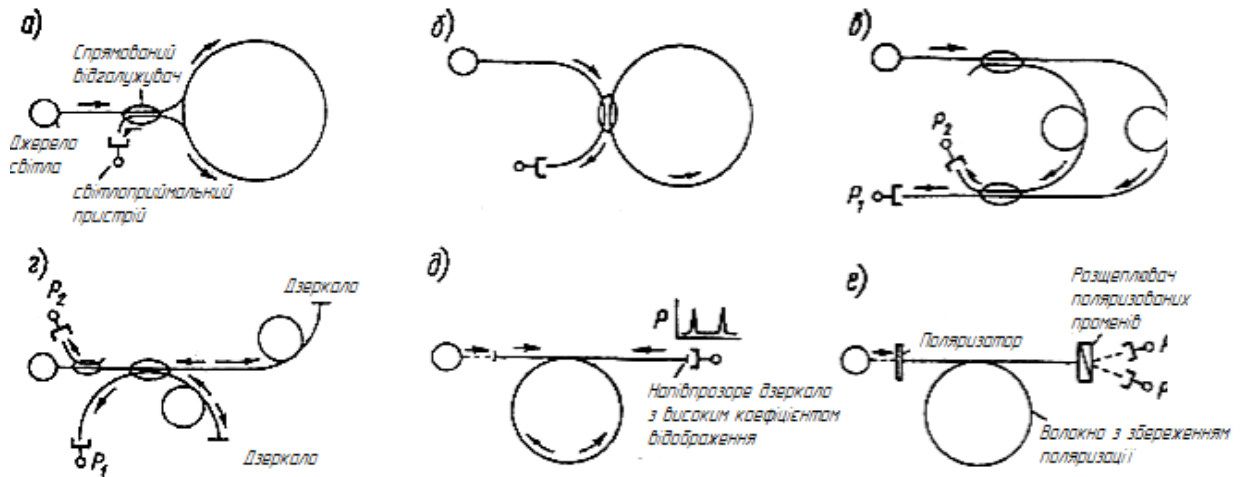


Рис. 3.27. Схеми волоконно-оптичних інтерферометрів:

- а – кільцевий; б – кільцевий Фабрі; в – Маха-Цендера; г – Майкельсона; д – Фабрі-Перо;
- е – з поляризованими модами

Зміну фази в каналі можна визначити користуючись співвідношенням:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta l_{opt}}{\lambda},$$

де Δl_{opt} – зміна оптичної довжини ходу променя в одному з каналів.

На цьому принципі заснована схема роботи датчика звукового тиску, що показана на рис. 3.28 [7].

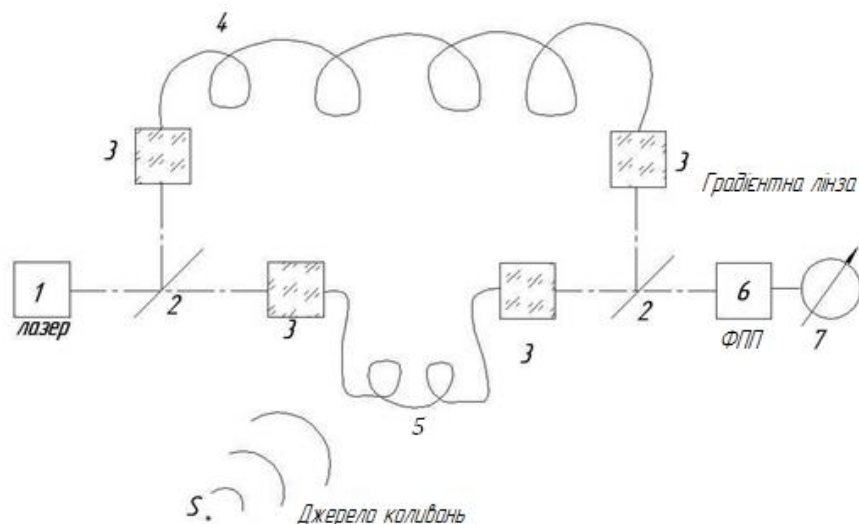


Рис. 3.28. Структурна схема датчика звукового тиску:

- 1 – лазер; 2 – дільник; 3 – селфок; 4 – опорний світловод; 5 – сигнальний світловод;
- 6 – фотоприймальний пристрій; 7 – індикатор; S – джерело звукових коливань

Зміна сигналу на виході приймача визначається пропорційно співвідношенню:

$$\Delta I \approx P \cdot \tau \cdot S_{\Phi\Pi} \cdot \Delta\varphi,$$

де P – потужність випромінювача; τ – коефіцієнт пропускання системи; $S_{\Phi\Pi}$ – чутливість фотоприймача; $\Delta\varphi$ – зміна фази.

Зміна фази $\Delta\varphi$ в сигнальному світловоді обумовлена зовнішнім звуковим тиском. Зміна фотоструму визначається співвідношенням:

$$\Delta I = \pm 2\pi \left(\frac{L}{\lambda}\right) P_{ex} \cdot \tau \cdot S_{\Phi\Pi} \cdot \left(\frac{dn}{dp} + \frac{ndL}{Ldp}\right) \Delta p,$$

де L – довжина сигнального світловода; Δp – зміна звукового тиску.

Звуковий тиск міняє показник заломлення. Для світловода зміна показника заломлення визначається співвідношенням:

$$dn = -n^3 \left((P_{11} + P_{12}) \sigma_T + P_{12} \cdot \sigma_l \right) \cdot (2E)^{-1},$$

де σ_T, σ_l – поперечна й поздовжня напруги у світловоді при впливі зовнішнього тиску; P_{11}, P_{12} – коефіцієнти фотопружності; E – модуль Юнга.

Звуковий тиск міняє також довжину світловода й відносна зміна довжини світловода визначається співвідношенням:

$$\frac{dL}{L} = (2\sigma_T + \sigma_l) (9k_m)^{-1} + \left(\sigma_l - \frac{1}{3(2\sigma_T + \sigma_l)} \right) \cdot (2\mu)^{-1},$$

де k_m, μ – об'ємний і відносний модулі пружності матеріалу світловода.

Вимір фазового зсува випромінювання у світловоді може бути використаний для побудови ВОД прискорень – акселерометрів. Як первинний перетворювач, застосовують один або два світловода з'єднаних з інерціальною масою.

Відносну зміну довжини світловода під впливом зовнішнього прискорення визначають з співвідношення:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{m \cdot a}{E \cdot S},$$

де m – інерціальна маса; E – модуль пружності; S – площа поперечного перерізу сигнального світловода.

Якщо зневажати зміною показника заломлення при подовжньому впливі механічних зусиль, то зміна фази в результаті подовження визначиться співвідношенням:

$$\frac{\Delta \varphi}{l} = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \left(\frac{\Delta l}{l} \right) = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot \frac{m \cdot a}{E \cdot S} \Rightarrow \frac{\Delta \varphi}{a} = \frac{8l \cdot m \cdot n}{\lambda \cdot E \cdot d_{ce}^2},$$

де d_{ce} – діаметр осердя світловода.

Акселерометр на базі інтерферометра Маха-Цендера показаний на рис. 3.29.

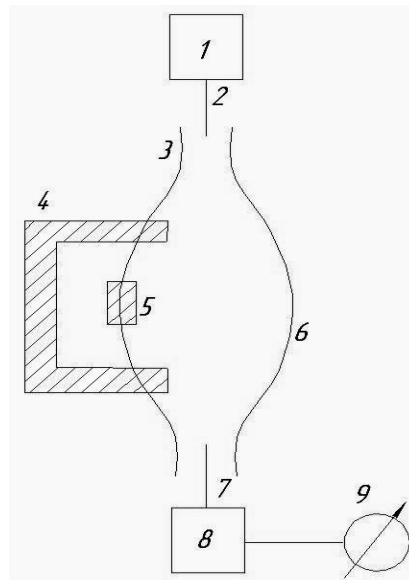


Рис. 3.29. Акселерометр на базі інтерферометра Маха-Цендера:

- 1 – джерело випромінювання; 2 – збуджуючий світловод; 3 – сигнальний світловод;
4 – рамка для кріплення сигнального світловода; 5 – інерціальна маса; 6 – опорний світловод; 7 – світловод фотоприймача; 8 – мікропроцесор; 9 – індикатор

Фазові інтерферометричні датчики можуть застосовуватися для виміру струму або напруги. При цьому використовується вплив температури терморезистора на зміну фази сигналу. Схема ВОД для виміру струму показана на рис. 3.30.

Під впливом струму змінюється температура терморезистора 5, а це, в свою чергу, приводить до зміни фізичних властивостей світловода 3.

Вплив температури на зміну фази на одиницю довжини світловода визначається співвідношенням:

$$\frac{d\varphi}{l \cdot dT} = k_0 \left(\frac{1}{k_0} \cdot \frac{d(k_0 n)}{dr} \cdot \frac{dr}{dT} + \frac{dn}{dT} + \frac{n}{l} \cdot \frac{dl}{dT} \right) \Delta T,$$

де k_0 – хвильове число; r – радіус осердя світловода.

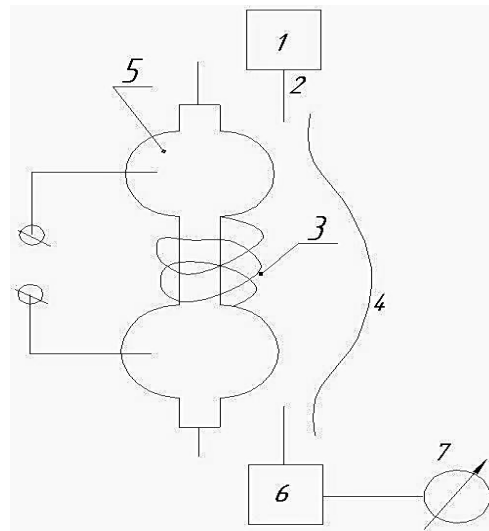


Рис. 3.30. Структурна схема ВОД для виміру струму:

- 1 – джерело; 2 – напрямлений розгалуджувач; 3 – сигнальний світловод;
4 – опорний світловод; 5 – термоопір; 6 – фотоприймальний пристрій; 7 – індикатор

ВОД на базі міжмодової інтерференції застосовуються у витратомірах, що використовуються для виміру витрат рідини або газу. Схема такого датчика показана на рис. 3.31.

Зміна витрат рідини або газу впливає на швидкість поширення їх усередині труби. Зміна швидкості приводить до деформації світловода, а це у свою чергу впливає на сталу поширення різних мод у світловоді й міняє картину міжмодової інтерференції, що реєструється приймачем 4.

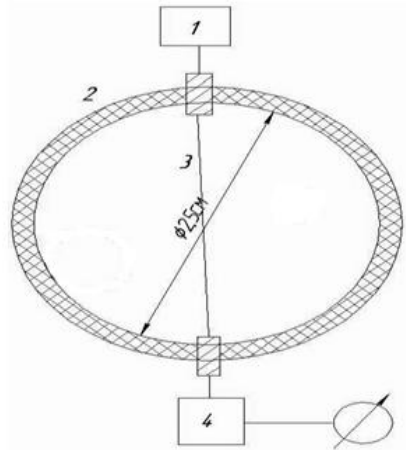


Рис. 3.31. ВОД для виміру витрат рідини або газу:

1 – джерело випромінювання; 2 – труба, по якій протікає рідина або газ; 3 – багатомодовий світловод; 4 – фотоприймальний пристрій

В якості датчика кутової швидкості, а також для визначення кута повороту об'єкта використовується волоконний гіроскоп заснований на ефекті Саньяка. Він володіє рядом переваг у порівнянні із звичайним механічним гіроскопом, а саме:

- а) простота конструкції;
- б) короткий час запуску;
- в) висока чутливість і лінійність;
- г) низька споживана потужність;
- д) відсутність рухомих деталей;
- е) побудова трьохосьового блока чутливих елементів можлива завдяки відсутності перехресних зв'язків.

Схема волоконного гіроскопа базується на застосуванні кільцевого інтерферометра й показана на рис. 3.32.

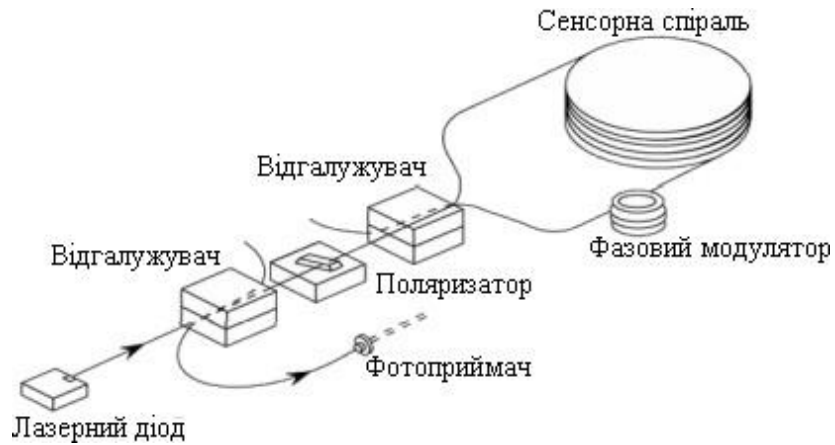


Рис. 3.32. Схема волоконного гіроскопа

Час поширення променя в сенсорній спіралі інтерферометра визначається співвідношеннями:

а) поширення за годинниковою стрілкою:

$$t_r = (2\pi \cdot r + r \cdot \Omega \cdot t_r) c^{-1} ;$$

б) поширення проти годинникової стрілки:

$$t_l = (2\pi \cdot r - r \cdot \Omega \cdot t_l) c^{-1} ,$$

де r – радіус кільця інтерферометра; Ω – вимірювана кутова швидкість; c – швидкість поширення електромагнітних коливань.

Різниця часу поширення світла з урахуванням $c \gg \Omega$, визначається співвідношенням:

$$\Delta t = \frac{4S}{c^2} \Omega N ,$$

де $S = \pi \cdot r^2$ – площа витка сенсорної спіралі світловода; N – кількість витків у спіралі світловода.

З урахуванням цього різниця довжини оптичних шляхів буде визначатися наступним співвідношенням:

$$\Delta L = \frac{4SN}{c} \Omega .$$

Виникає також різниця фаз при поширенні випромінювання, що описується наступним співвідношенням:

$$\Delta\varphi = \frac{4SNk}{c} \Omega ,$$

де k – хвильове число.

Для підвищення чутливості ВОГ при швидкостях обертання, які близькі до нуля використовується фазовий модулятор, який виготовлений у вигляді п'єзокерамічного циліндрика. На нього намотується частина волокна. Фазова модуляція забезпечує перенесення робочої точки на круту, майже лінійну ділянку характеристики. Процес відбувається за рахунок внесення фазового зсуву між двома хвилями, що поширюються по контуру в протилежних напрямках.

Точні ВОГ реалізуються при роботі з світловим гетеродинаванням. Схема такого гіроскопа приведена на рис. 3.33. Чутливість ВОГ становить 0,0005 град/ч.

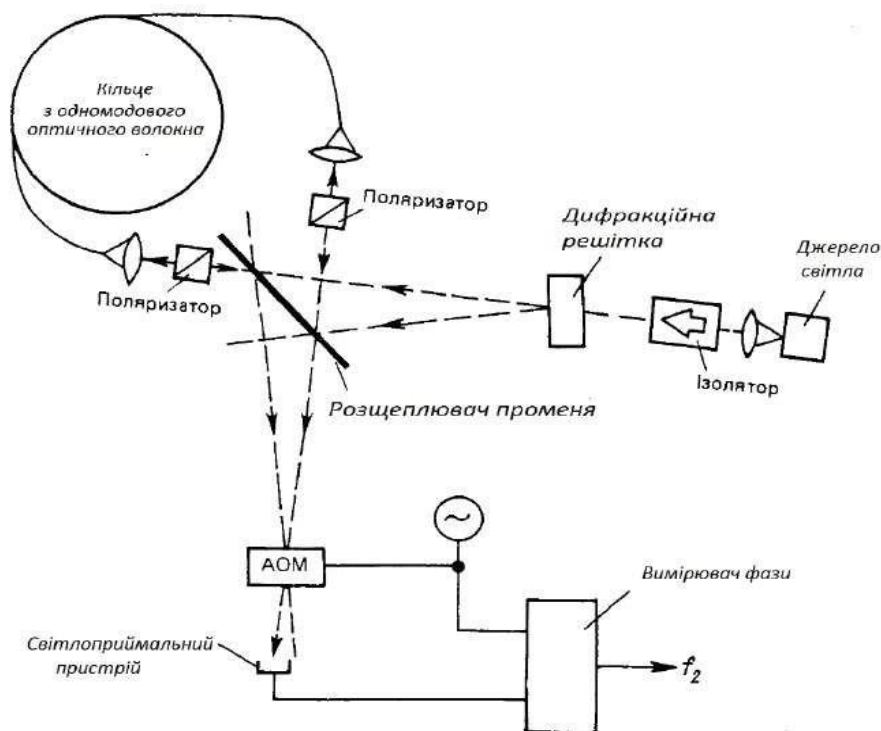


Рис. 3.33. Точний ВОГ з світловим гетеродинаванням

Для контролю положення об'єкта в тривимірному просторі потрібні три гіроскопа. Схема такої системи приведена на рис. 3.34. В схемі використовуються одне джерело випромінювання і один фотоприймач. Розділення каналів відбувається частотним способом, при якому кожний канал працює на своїй частоті модуляції. Спочатку використовувалася схема з одним джерелом випромінювання, потужності якого вистачало для паралельного підключення трьох гіроскопів.

Перехід до схеми об'єднання з використанням одного загального приймача і джерела дав можливість реалізовувати поділ каналів двома способами. Частота ділиться методом роботи кожного ВОГ на своїй частоті модуляції. Використання єдиної схеми обробки стало можливим за рахунок часового поділу. Реалізація відбувається на оптичних перемикачах, які направляють світло в потрібний гіроскоп, або на електричних перемикачах фазової модуляції. Функціонування конкретного гіроскопа в певний момент часу відбувається за рахунок реалізації фазової модуляції.

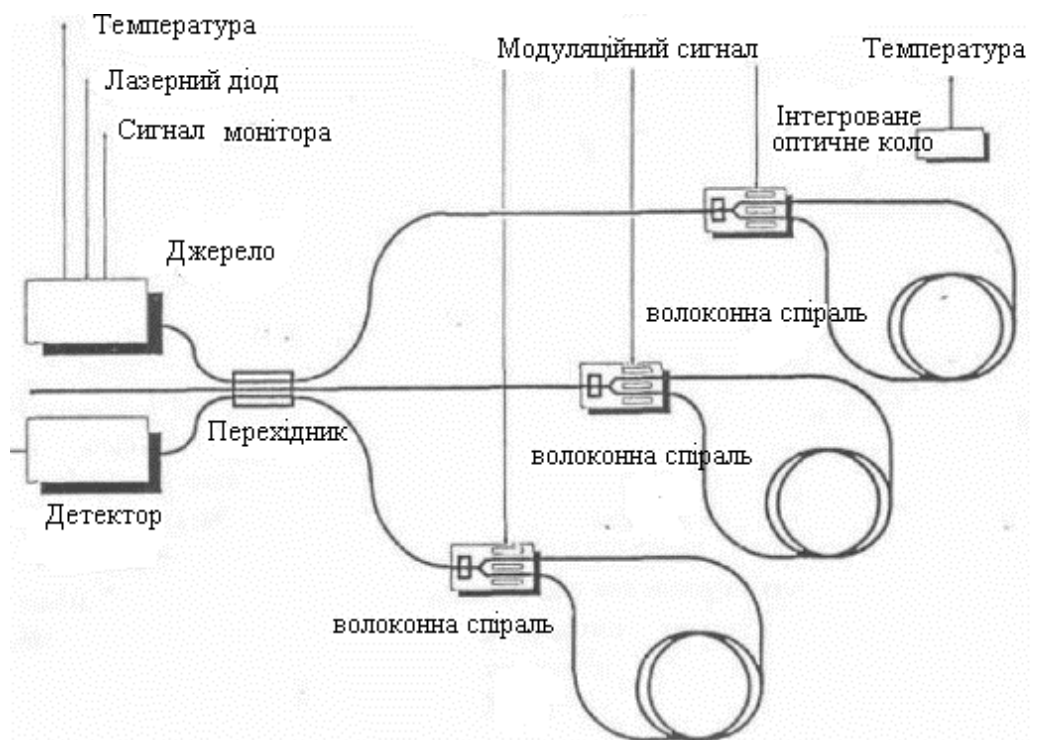


Рис. 3.34. Трьохосовий ВОГ з часовим розділом модулюючого сигналу

Розглянемо принцип дії торцевого волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо. В звичайному виконанні інтерферометр — плоскопаралельна пластинка (зазвичай повітряна), утворена двома старанно відшліфованими та відполірованими плоскими скляними поверхнями. Інтерферометр застосовують для розділення тонкої структури спектральних ліній. При одночасному опроміненні інтерферометра хвилями з близькими, але не однаковими довжинами хвиль, інтерференційні смуги розщеплюються.

Блок-схема волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо зображена на рис. 3.35. Інтерферометр призначений для виміру відстані між елементами конструкції, або вібрацій.

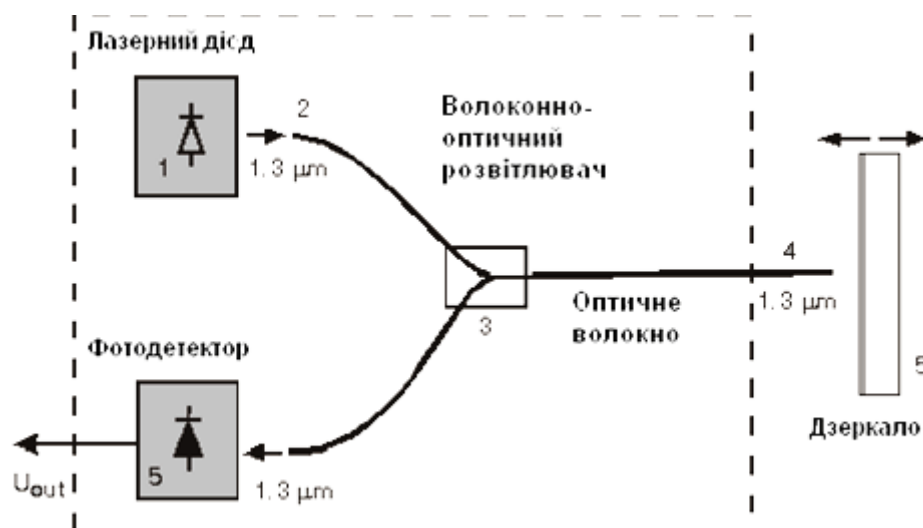


Рис. 3.35. Блок-схема торцевого волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо

Випромінювання лазерного діода 1 вводиться у волоконний світловод 2 і через розвітлювач 3 передається на волокно 4. При цьому частина випромінювання відбивається від торця волоконного світловода 4, а інша його частина висвічується в повітря, відбивається від дзеркала 5 і повертається назад у волоконний світловод 4. Промінь, відбитий від торця волоконного світловода, інтерферує із променем, відбитим від дзеркала, і на

фотоприймачі 5 реєструється інтенсивність випромінювання, що змінюється періодично в залежності від відстані x_0 між торцем світловода і дзеркалом:

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \varphi_0 \right) \right].$$

При цьому зсув дзеркала на половину довжини хвилі світла змінює різницю фаз інтерферуючих променів на 2π , що відповідає одному періодові варіації інтенсивності випромінювання на фотоприймачі.

З іншої сторони ніяке реальне джерело оптичного випромінювання не є ідеально монохроматичним, а отже воно має обмежену довжину когерентності. У випромінюванні лазерного діода звичайно присутні кілька мод, а сумарна ширина спектральної лінії дорівнює приблизно 3–5 нм.

Із шириною спектра випромінювання і довжиною когерентності зв'язана видність (контрастність) інтерференційної картини. При збільшенні різниці ходу інтерферуючих променів видність інтерференційної картини зменшується. При досягненні різниці ходу, рівній довжині когерентності, видність перетворюється в нуль.

На рис. 3.36 показана залежність інтенсивності інтерференції двох інтерферуючих від їхньої різниці ходу.

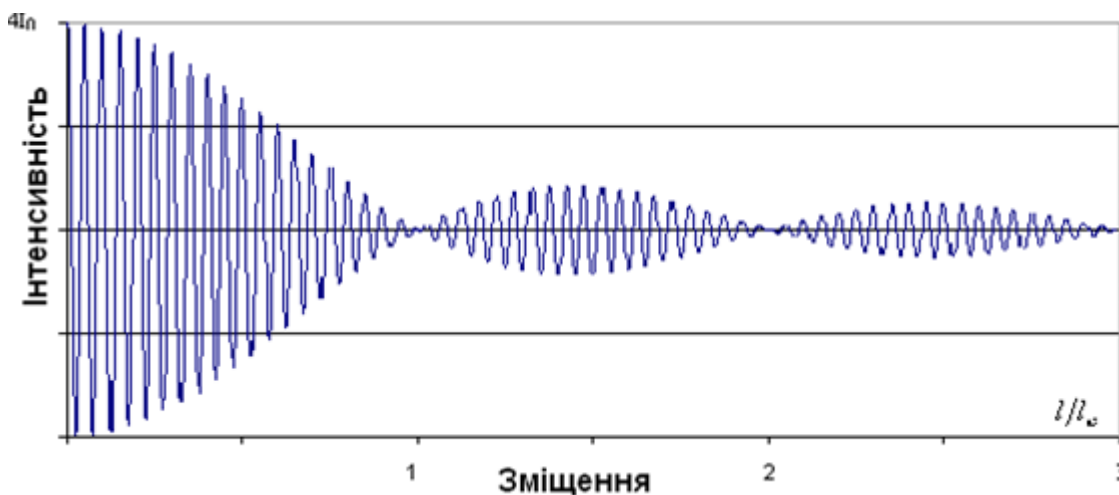


Рис. 3.36. Залежність інтенсивності інтерференції двох інтерферуючих від їхньої різниці ходу

У загальному випадку відсоток випромінювання, відбитого від дзеркала і повернутого у волокно, залежить від відстані між відбивачами. Це зв'язано з тим, що світло, що виходить з волокна, розходить під деяким кутом і лише частина його, будучи відбитою від дзеркала, попадає назад у волокно і бере участь в інтерференції. Типова залежність оптичної потужності, що реєструється фотоприймачем, від відстані між відбивачами інтерферометра приведена на рис. 3.37

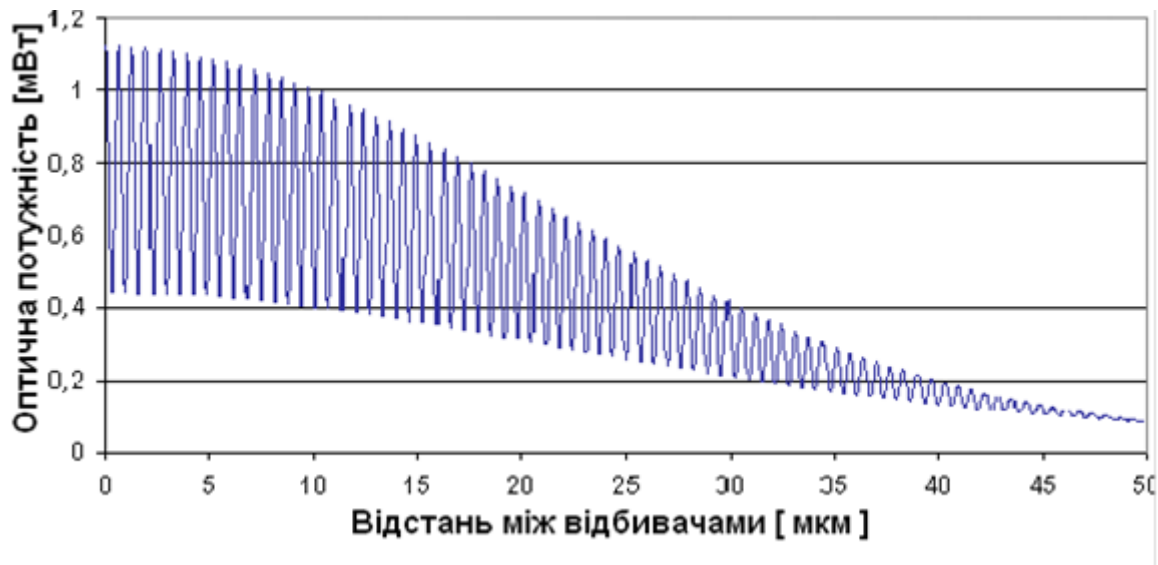


Рис. 3.37. Залежність оптичної потужності, що реєструється фотоприймачем, від відстані між відбивачами інтерферометра

Для забезпечення безпечного функціонування споруд, мостів, тунелів, дамб необхідно здійснювати постійний контроль їх технічного стану, тобто вимірювати напруги, навантаження, вібрації, зміну температури і т. і.

Структурна схема ВОД для вирішення цих завдань представлена на рис. 3.38 Основу датчика складають два волоконних інтерферометра Майкельсона. Волоконно-оптичний інтерферометр Майкельсона являє собою два оптичних волокна, з'єднані волоконно-оптичним перехідником з коефіцієнтом розгалуження 50:50. Вхід першого інтерферометра з'єднаний з джерелом оптичного випромінювання. Оптичний сигнал ділиться в розгалужувачі і надходить на два відрізки волокна. Ці волокна є плечима інтерферометра.

Одне плече інтерферометра далі розділяється на два волокна. Ці волокна (вимірювальні волокна) жорстко пов'язані з контрольованим об'єктом і витримують всі його деформації. Друге плече являє собою опорне волокно, яке розташоване вільно і не піддається деформації. Для посилення відбиття на торці волокон нанесено покриття, що відбиває. Відбиті від торців оптичні сигнали надходять на розгалужувач, де інтерферують. Інтерференційний сигнал на виході інтерферометра залежить від різниці оптичних довжин плечей інтерферометра.

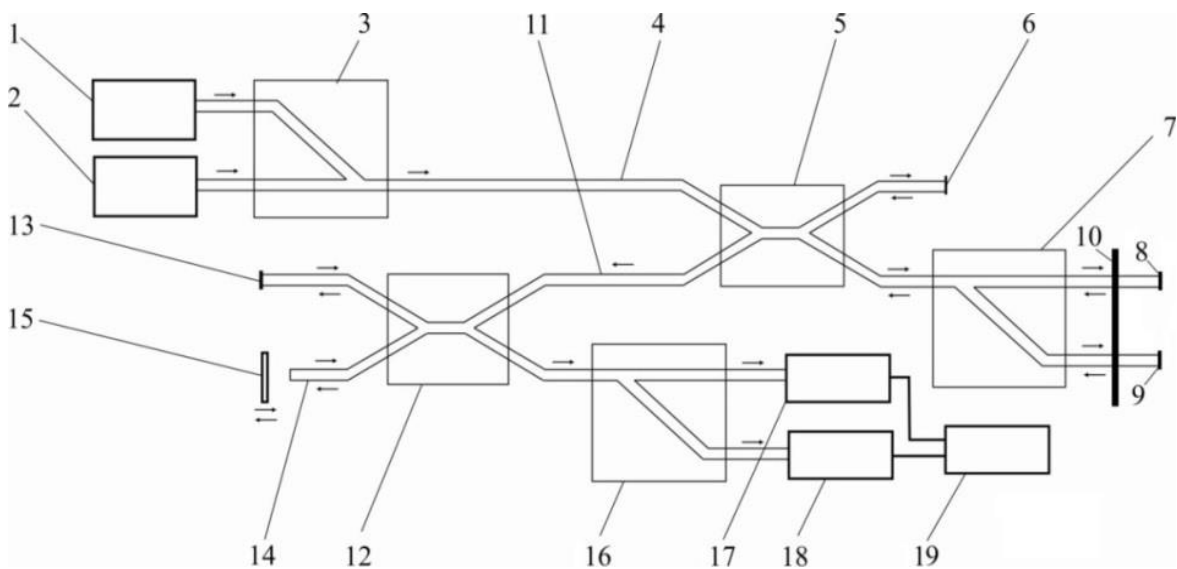


Рис. 3.38. Структурна схема волоконно-оптичного векторного датчика вигинів

На рис. 3.38 показані: 1, 2 – джерела випромінювання з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 ; 3 – Y-подібний волоконно-оптичний розгалужувач; 4, 11 – вхідні оптичні волокна; 5, 12 – X-подібний волоконно-оптичний розгалужувач; 6 – опорне оптичне волокно; 7, 16 – Y-подібний волоконно-оптичний розгалужувач з поділом по довжинах хвиль; 8, 9 – вимірювальне оптичне волокно; 10 – з'єднувальний стержень; 13, 14 – еталонне оптичне волокно; 15 – регульована лінія затримки; 17, 18 – фотодетектори; 19 – блок обробки сигналів.

Деформація об'єкта і пов'язаного з ним вимірювального волокна призводить до зміни різниці плечей інтерферометра і, відповідно, до зміщення інтерференційної картини. Однак це зміщення є відносним, і для

відстеження деформації волокна необхідно проводити вимірювання безперервно, що не завжди є можливим і зручним. Для вимірювання абсолютної деформації використовується другий інтерферометр, на вхід якого надходить сумарний сигнал з виходу першого інтерферометра.

Різницю оптичних довжин плечей другого інтерферометра можна регулювати за допомогою лінії затримки. Огинаюча інтерференційної картини на виході другого інтерферометра являє собою три піки когерентності. Центральний пік утворюється при рівновазі двох плечей другого інтерферометра Майкельсона, тобто при відсутності різниці оптичного шляху. Бічні піки виникають при різниці оптичних довжин плечей другого інтерферометра, що відповідає оптичній різниці ходу в першому інтерферометрі. Таким чином, різниця між становищем центрального і одним з бічних піків відповідає різниці плечей першого інтерферометра.

Оскільки різниця плечей першого інтерферометра залежить від деформації контрольованого об'єкта, різниця положень бічного і центрального піків дозволяє однозначно визначити величину деформації.

Для визначення напрямку деформації використовується друге вимірювальне волокно, на яке подається оптичний сигнал на іншій довжині хвилі. Одні кінці обох вимірювальних волокон закріплені нерухомо, інші в поворотному пристрої. Деформація контрольованого об'єкта передається на вимірювальні волокна за допомогою жорсткого стержня через поворотний пристрій.

3.6. Волоконно-оптичні датчики іонізуючих випромінювань

Принцип дії датчика полягає в реєстрації світлового сигналу, що індукується в сцинтиляційному матеріалі іонізуючим випромінюванням і передається до фотоприймача по волоконному світловоду. Цим оптоволоконний датчик відрізняється від існуючих приладів, у яких сцинтилятор сполучений з фотоприймачем. Переваги оптоволоконного датчика складаються в можливості розміщення прийомної апаратури поза зоною дії радіації й електромагнітних наведень. Мініатюрні розміри датчика

роблять його дуже зручним для проведення вимірів з високою просторовою роздільною здатністю, причому у важкодоступних місцях, а також дозволяють створювати многоканальні системи.

За допомогою цього датчика можна досліджувати залежність корисного сигналу від гама поля і визначити величину сигналу стосовно радіолюмінесценції оптичного волокна (фону).

ВОД іонізуючих випромінювань можна розділити на 3 основні групи.

1. Датчики сумарної дози випромінювання, що використовують ефект наведеного поглинання у волоконному світловоді (рис. 3.39).

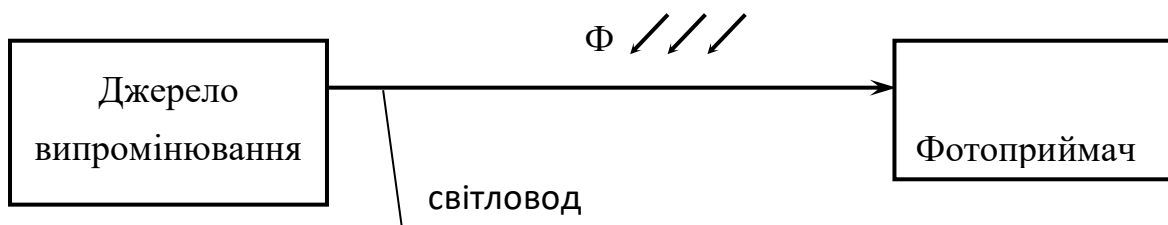


Рис. 3.39. Структурна схема датчика сумарної дози випромінювання

2. Датчик, що використовує ефект наведеного поглинання в поєднанні з рефлектометриєю показаний на рис. 3.40.

Вимір сумарної дози іонізуючого випромінювання в цьому датчику заснований на ефекті наведеного поглинання, а саме збільшенні оптичних втрат у волоконному світловоді при опроміненні. Перевагою таких ВОД є широкий діапазон енергій, що реєструються. Довжина волоконного світловода становить сотні метрів.

Нестабільності джерела і приймача випромінювання компенсуються шляхом застосування диференційної схеми ВОД. Просторовий розділ уздовж волокна забезпечується рефлектометриєю, тобто виміром параметрів назад розсіяного світла.

3. Структурна схема сцинтиляційного детектора показана на рис. 3.41.

Даний детектор призначений для реєстрації сцинтиляцій ядерного випромінювання. У його склад входить синтетичний алмаз 1 (рис. 3.41). Для алмазу повинні виконуватись вимоги: концентрація домішок азоту менше ніж 150 частин на мільйон; концентрація домішок нікелю, міді, марганцю, алюмінію або їхніх сумішей (або солей) не може перевищувати 1000 частин на мільйон; концентрація домішок заліза і кобальта повинна бути меншою 10 частин на мільйон. Детектор також містить фотоелектричний помножувач 3 і волоконний джгут 2, що передає світловий спалах в алмазі до фотоприймача.

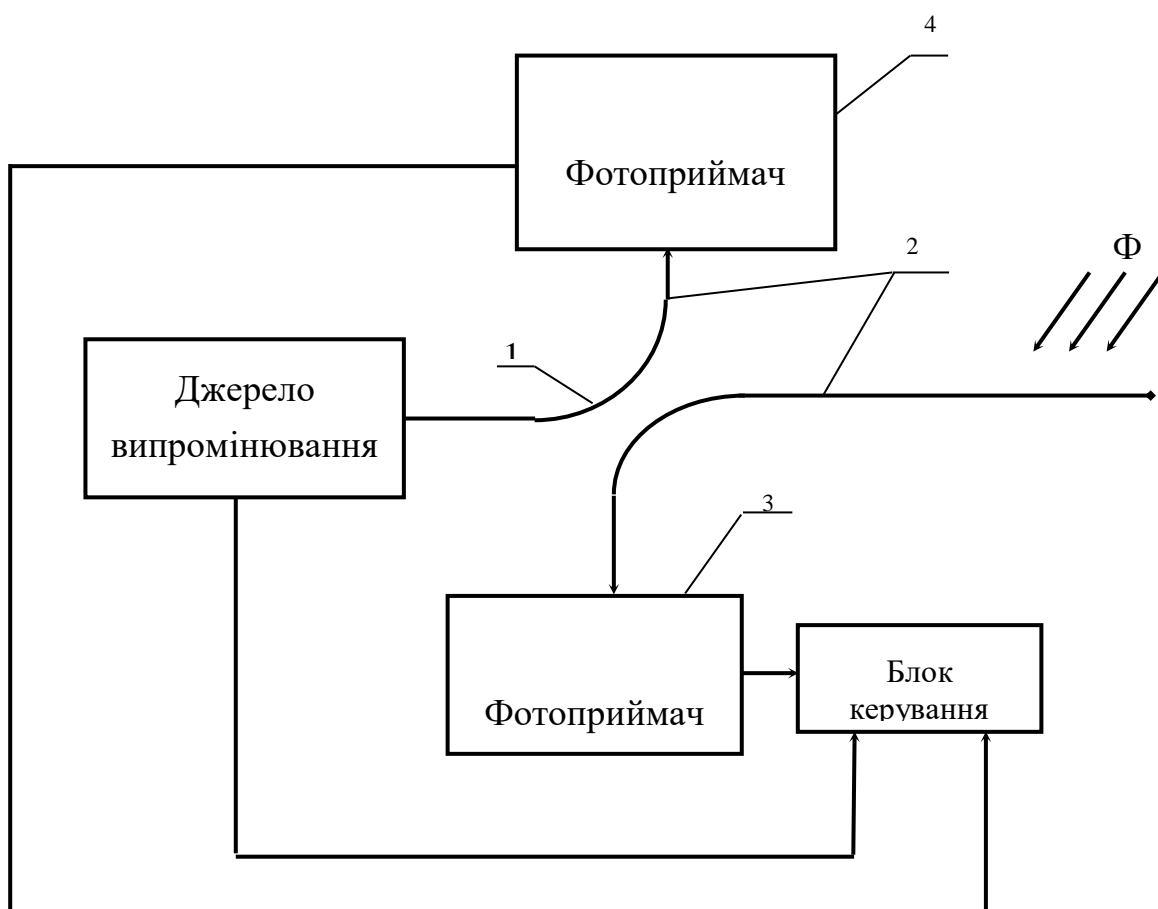


Рис. 3.40. Структурна схема датчиків, що використовують ефект наведеного поглинання в поєднанні з рефлектометрією:

1 – спрямований відгалужувач; 2 – світловоди; 3 – фотоприймач, що реєструє іонізуюче випромінювання; 4 – фотоприймач опорного сигналу

У волоконний джгут 2 повинні входити сотні оптоволоконних світловодів для передачі найбільшого числа спалахів, що виникли в алмазі. Необхідно відзначити, що як елемент 1 може використовуватися також блок склесних кристалів алмаза, або нанесений на нього шар поглинаючої речовини. У якості такої речовини може бути застосований поліетилен. Це дозволяє реалізувати деяку вибірковість у реєстрації тих або інших радіаційних часток.

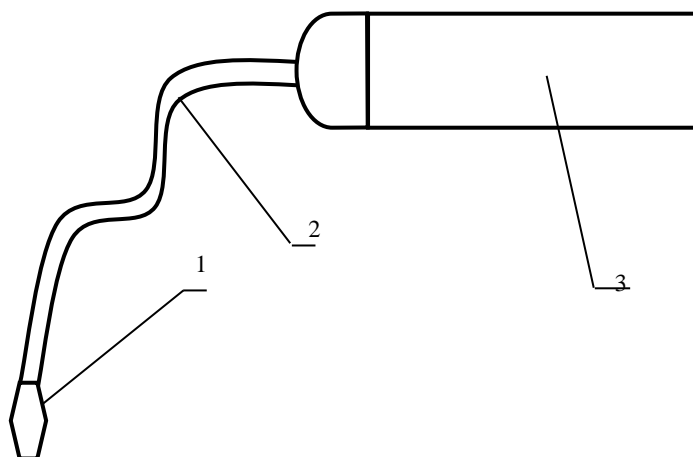


Рис. 3.41. Структурна схема сцинтиляційного детектора:
1 – синтетичний алмаз; 2 – світловод; 3 – фотодетектор

3.7. Волоконно-оптичні датчики в охоронних системах

Все більш широке застосування такі датчики знаходять в сучасних системах безпеки, зокрема з метою створення сигнальних рубежів для охорони периметральних огорож. Привабливість волоконно-оптичних технологій визначається декількома факторами. Ці сенсори несприйнятливі до електромагнітних випромінювань і електробезпечні. Крім того, в якості сенсорів в більшості випадків можна використовувати промислові комунікаційні кабелі, які випускаються в широкому асортименті, а їх вартість

нижче вартості спеціально розроблених кабельних датчиків. Зовнішні впливи, такі як механічний тиск, деформації або вібрації, змінюють параметри оптичного волокна і, як наслідок, характеристики випромінювання, що проходить через волокно У волоконно-оптичних охоронних системах використовуються кілька методів реєстрації сигналів вторгнення.

Метод реєстрації міжмодової інтерференції використовує напівпровідниковий лазер. Напівпровідниковий лазер зазвичай генерує кілька десятків близьких по частоті мод (спектральних ліній) з певним розподілом енергії по спектру випромінювання. Якщо багатомодовий оптоволоконний кабель піддається механічним впливам, то на його виході спектр випромінювання зазнає змін, що дозволяє виявляти деформації або вібрації кабелю.

Інтерференційний метод використовує принцип двопрменевої інтерферометрії. Промінь лазера розщеплюється на два і направляється в два ідентичних одномодових оптичних волокна. На приймальному кінці обидва променя утворюють інтерференційну картину. Механічні дії на чутливий кабель призводять до змін інтерференційної картини, які і реєструються фотоприймачем. Метод реєстрації спекл-структури побудований на тому принципі, що на виході багатомодового оптоволоконна спостерігається так звана «спекл-структура», що являє собою нерегулярну систему світлих і темних плям. При деформаціях або вібраціях волокна спекл-структура змінюється. Для детектування деформацій кабелю тут застосовують просторово-чутливі фотоприймачі.

Всі існуючі волоконно-оптичні охоронні системи можна розділити на підгрупи за способом їх застосування:

- а) системи для захисту металевих огорож;
- б) системи для захисту важких огорож і стін;
- в) підземні системи з волоконно-оптичними кабелями.

При захисті огорож сенсорний кабель, як правило, встановлюється безпосередньо на огорожі. Сенсор перетворює вібрації огорожі в електричні сигнали, які надходять на процесор (аналізатор). Процесор, відповідно до заданого алгоритму, виділяє сигнал вторгнення на фоні навколишніх шумів і генерує сигнал тривоги.

Існують дві основні технології детектування з використанням волоконно-оптичних датчиків.

Перша технологія, що отримала назву M/V, дозволяє виявляти рух і вібрації кабелю (Movement & Vibration – M/V). Сенсорний кабель підключається до початкового і кінцевого модулів (рис. 3.42) Аналізатор пов'язаний з початковим модулем через пасивний оптичний кабель.

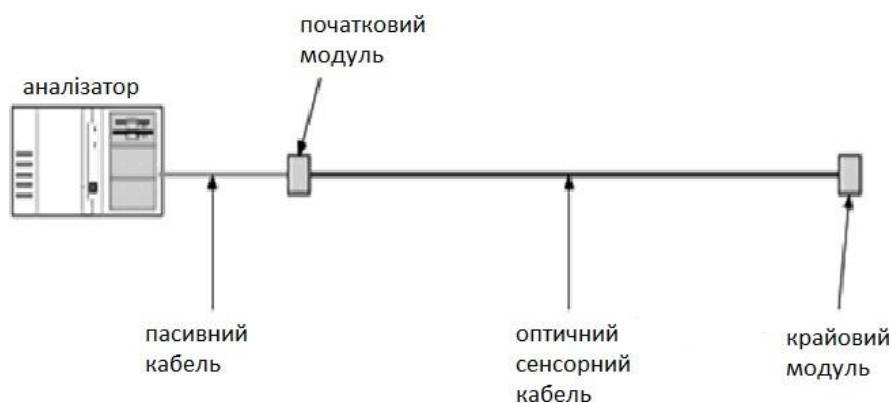


Рис. 3.42. Структурна схема багатозонної охоронної системи з використанням міжмодової інтерференції

Випромінювання від напівпровідникового лазера подається в чутливе волокно, і аналізатор реєструє відбитий від кінцевого модуля сигнал. При переміщеннях або вібрації волокна змінюється розподіл енергії між окремими модами. У таких системах охорони використовуються багатомодові оптичні волокна з діаметром осердя 62,5 мкм. Джерелом світла слугує напівпровідниковий лазер потужністю 1–2 мВт, що працює на довжині хвилі 1,31 мкм. Технологія M/V дозволяє реєструвати вібрації в діапазоні частот від декількох герц до 300–600 Гц. Системи на базі

багатомодових волокон використовуються головним чином на еластичних (деформованих) огорожах.

Може бути використана технологія багатозонної волоконно-оптичної системи охорони периметрів M/V, в якій один процесор обслуговує до 8 окремих зон охорони. Всі зонні сенсорні кабелі підключаються до процесора через багатожильний комунікаційний оптичний кабель. Довжина сенсорного кабелю в зонах охорони не обмежується жорстко. Обмежена тільки загальна протяжність сенсора і відповідного комунікаційного кабелю в даній зоні, яка не повинна перевищувати 40 км або 10 км (в залежності від системи). Ці системи привабливі для організації охорони серії віддалених об'єктів невеликої довжини, коли на периметрах не потрібно підключати електроживлення і встановлювати електронне обладнання. Комунікаційний оптичний кабель в цих випадках може бути приховано і прокладено під землею. Для передачі сигналів від сенсорів можна також використовувати прокладені раніше стандартні зв'язкові оптичні кабелі.

Друга технологія побудована на принципі виявлення мікронапруг в оптичному волокні і отримала скорочену назву MSL (від MicroStrain Locator - Локатор мікрореформацій). На рис. 3.43 показана структурна схема системи MSL.

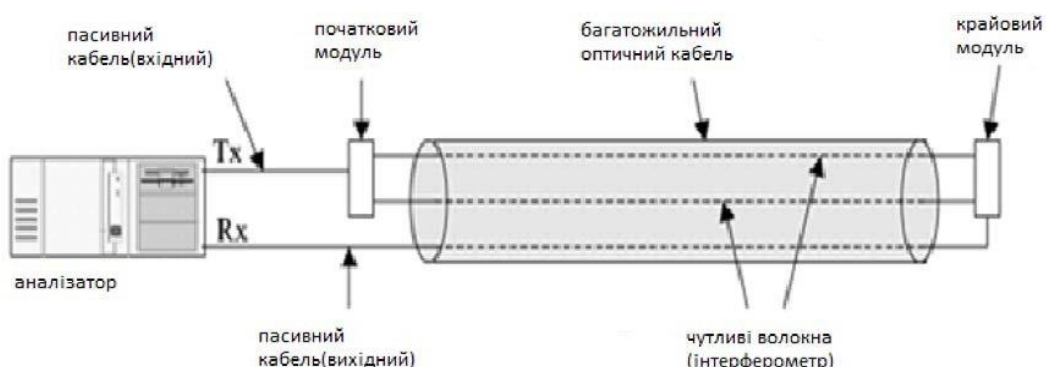


Рис. 3.43. Структурна схема технології MSL для виявлення мікрореформацій волоконно-оптичного кабелю

До складу протяжного датчика входять три окремих волокна багатожильного оптичного кабелю. Два верхніх волокна виконують функцію чутливих елементів: в них подається випромінювання від напівпровідникового лазера, що працює в безперервному режимі. Третє волокно слугує для передачі сигналів на аналізатор системи. Джерело випромінювання розташоване в блоці аналізатора, від нього випромінювання лазера по вхідному пасивного кабелю подається на початковий модуль. У цьому модулі випромінювання розщеплюється на два пучки, які подаються на два волокна.

Випромінювання через обидва волокна передається на крайовий модуль, в якому відбувається інтерференція. Якщо обидва плеча цього інтерферометра знаходяться в незбудженому стані, то інтерференційна картинка на крайовому модулі залишається незмінною. При цьому сигнал, що передається з кінцевого модуля на аналізатор, не має змінної складової. При деформаціях або вібраціях кабелю оптична різниця ходу в чутливих волокнах (в плечах інтерферометра) змінюється, і крайовий модуль реєструє змінну складову сигналу, передаючи її на аналізатор. В системі MSL використовуються серійні одномодові оптичні волокна.

У фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) оптичне волокно є чутливим елементом, що призводить до значного зниження витрат. Відрізок оптичного волокна між двома ґратками Брегга – це інтерферометр Фабрі-Перо. Під впливом деформації та акустичних коливань змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх Бреггівських ґраток. Інтерферометричні датчики мають найбільшу чутливість до змін довжини сегмента волокна під впливом зовнішніх факторів. Принцип дії розподілених вимірювальних комплексів з оптичними волокнами на основі ФІД така. Кожна ґратка Брегга БГ1 та БГ2 датчика (рис. 3.44) відбиває імпульс, що надходить від імпульсного лазера на довжині хвилі Брегга. Затримка часу між відбитими

імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла у волокні, укладеному між ґратками. Компенсуючий інтерферометр приймає відбиті імпульси і роздвоює кожен з них.

Зміна в часі деформації чутливого елемента датчика внаслідок зовнішніх впливів спричиняє зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останні перетворюються фотоприймачем у зміну величини струму. Додатковий фазовий зсув між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей інтерферуючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

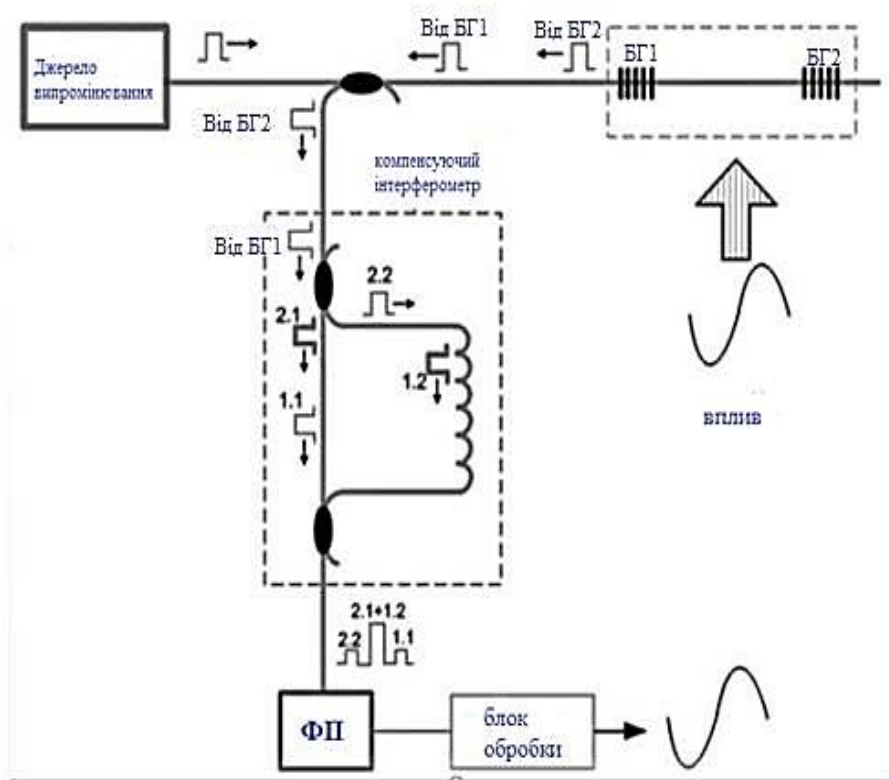


Рис. 3.44. Схема волоконно-оптичної системи вібро-акустичного моніторингу на основі бреггівських ґраток

Схема розподіленого датчика з оптичним волокном і системою Бреґгівських ґраток на одну довжину хвилі, зображена на рис. 3.45.

В якості джерела випромінювання використовується одночастотний одномодовий напівпровідниковий лазер, що працює в імпульсному режимі.

Імпульси до кожної ґратки Брегга надходять із різною затримкою в часі. Мультиплексування часового поділу використовується для відділення сигналів від кожної секції. Синхронне виявлення використовується для демодуляції сигналу, і в цю схему вводиться фазовий модулятор. Оптична лінія затримки утворює ряд зміщених у часі імпульсів, кожен з яких відповідає певній частини волокна. Вирішальну роль у реальному використанні таких волоконно-оптичних систем безпеки відіграє матеріал покриття волоконного світловода, який забезпечує збільшення чутливості волокна на 30 дБ порівняно з волокном без покриття.

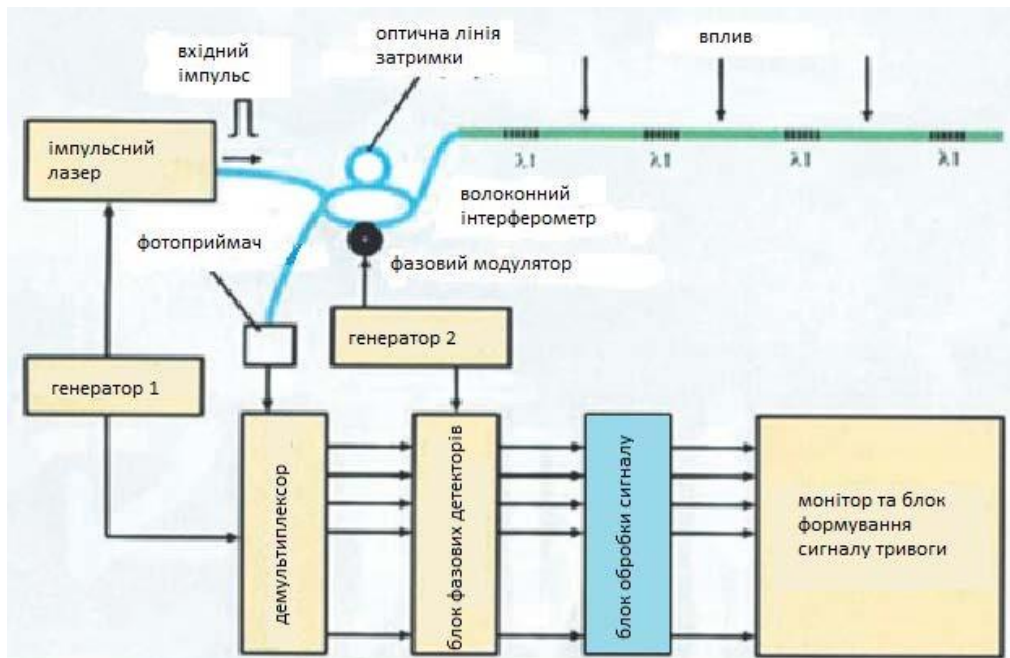


Рис. 3.45. Схема волоконно-оптичного розподіленого датчика

Контрольні запитання

1. Яка класифікація волоконно-оптичних датчиків?
2. Який принцип дії датчиків з використанням волокна, як лінії передачі сигналу?

3. Який принцип дії датчика з використанням волокна, як чутливого елемента?

4. Які основні вимоги до ВОД?

5. Які засоби компенсації дрейфа нуля ВОД?

6. Навести приклад датчика тиску.

7. Навести приклад датчика зазору.

8. Навести приклад датчика вібрацій.

9. Навести приклад датчика прискорень.

10. Навести приклад датчика напруженості магнітного поля.

11. Навести приклад датчика електричного поля.

12. Навести приклад датчика електричного струму.

13. Як працюють датчики з використанням ПВВ і дифракції?

14. Навести приклади структурних схем датчиків з волокном в якості чутливого елемента.

15. Навести приклади схем волоконно-оптичних інтерферометрів.

16. Як працює датчик звукового тиску?

17. Як працює волоконно-оптичний акселерометер?

18. Які переваги волоконно-оптичного гіроскопа?

20. В чому полягає принцип Саньяка?

21. Навести приклад використання інтерферометра Фабрі-Перо у ВОД.

22. Як працює ВОД вигину?

23. Який принцип дії датчиків іонізуючих випромінювань?

24. Які методи використання ВОД в охоронних системах?

25. В чому полягає технологія M/V?

26. В чому полягає технологія MSL?

Список літератури

1. Towards a Bright Future for Europe. Strategic research agenda in photonics. – USA, 2006. – 115 с.
2. The Photonics Dictionary. Laurin Publishing Co Inc. – USA, 2004. – 211 с.
3. Кучеренко О. К. Волоконна і інтегральна оптика. [Електронний ресурс]. / О. К. Кучеренко // – Режим доступу: <https://oep.kpi.ua/contact.html> – Київ: 2017. – 216 с.
4. Никаноров Н. В. Волноводная фотоника: учебное пособие. / Н. В. Никаноров, С. М. Шандоров. – СПб. : ГУ ИТМО, 2008. – 142 с.
5. Волоконно-оптические датчики. / Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х. и др. – Л. : Атомиздат, 1991. – 275 с.
6. Удд Є. Волоконно-оптические датчики. –М. : Техносфера, 2008. – 315 с.
7. Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики. / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 194 с.