

## Тема 12. Поляризатори та деполаризатори

### Лекція 12.

ВО- та ІО- поляризаційні пристрої.

Поляризатори та деполаризатори. Волоконні поляризатори з поглинаючою плівкою металу і на основі двопротенезаломляючих ВС. Інтегрально-оптичні поляризатори.

Реферат.

Особливість поляризованої електромагнітної хвилі полягає в наявності переважного напрямку коливань електричного поля  $\mathbf{E}$  (і, відповідно, вектору напруженості магнітного поля  $\mathbf{H}$ ). Поляризація світла може виникати безпосередньо у випромінювачі, при розповсюдженні світлової хвилі в деяких анізотропних середовищах, при заломленні або відбиванні світла на границі розділу двох середовищ, а також при дії на середовище, в якому розповсюджується світло, ряду зовнішніх факторів. У останньому випадку зовнішня фізичне збурення змінює анізотропію оптичних властивостей матеріалу світловоду.

Стан поляризації світла, що розповсюджується по оптичному світловоду, визначається експериментально шляхом виявлення характеру поведінки вектору  $\mathbf{E}$ .

Якщо коливання вектору  $\mathbf{E}$  відбуваються в одній площині, то хвиля називається *плоско-поляризованою*. При суперпозиції хвиль, які випромінюються двома або більшим числом випромінювачів, якщо напруженість електричного поля хаотично змінюється з часом по амплітуді та напрямку (у площині, яка перпендикулярна пучку), то результуюча хвиля називається неполяризованою або „природною”.

Часто зустрічається випадок, коли в двох хвилях, які розповсюджуються вздовж осі  $z$  і поляризовані в площинах  $xz$  та  $yz$ , напруженості електричного поля змінюються гармонічно з однаковою круговою частотою  $\omega$ . При цьому вектор  $\mathbf{E}$  в результуючій хвилі обертається, і його кінець з круговою частотою  $\omega$  описує еліпси в площині, яка перпендикулярна осі волоконного світловода. Така поляризація називається *еліптичною*. Поляризація світла називається повною, якщо у світловому потоці всі хвилі, що розглядаються, які генеруються різними випромінювачами, поляризовані однаково.

Нехай символи  $\varphi_x$  та  $\varphi_y$  позначають початкові фази хвиль, що поляризовані у площинах  $xz$  та  $yz$ . Тоді розподіл середніх

квадратичних значень  $E$  у площині, яка перпендикулярна осі  $z$ , визначить положення та орієнтацію на півосей еліпсу, а напрямок обертання вектору  $E$  буде відповідати знаку різниці  $(\varphi_x - \varphi_y)$ . При зміні фаз  $\varphi_x$  або  $\varphi_y$  таким чином, що  $|\varphi_x - \varphi_y|$  дорівнює  $\pi/2$  та  $E_x = E_y$ , еліптична поляризація стає круговою або циркулярною, а при  $\varphi_x = \varphi_y$  результуюча хвиля буде плоскополяризованою.

Якщо у світловоді одночасно виникають хвилі, які поляризовані у двох взаємно перпендикулярних площинах, то отримується *часткова поляризація*. Можна виділити поляризовану компоненту у частково-поляризованому світлі, вводячи деякий зсув фаз в одну із складових вектора  $E$  по двом взаємно перпендикулярним напрямкам  $x$  та  $y$ . Ви користуючи цей прийом, можна також визначити ступінь поляризації, тобто відношення потоку енергії поляризованої компоненти до загального значення потоку енергії пучка світла, який розповсюджується по оптичному хвилеводу, а також встановити характер поляризації.

для отримання повністю або частково поляризованого світла у видимій та ультрафіолетовій області користуються поляризаційними призмами. Для розділення проміну світла на два плоскополяризованих у взаємно перпендикулярних площинах проміні, що розходяться під деяким кутом один до одного, застосовують призми Воластона. Призма Воластона складається з двох склеєних між собою прямокутних призм, які виготовлені з кристалів, що мають подвійне променезаломлення (ісландський шпат, природній кварц). Призми зроблені таким чином, щоби завдяки їх кристалографічному орієнтуванню промінь світла, який падає на бокову грань одного кристалу, розділявся б на два плоских поляризованих проміні - звичайний і незвичайний, що розповсюджуються у такому кристалі з різними швидкостями. Коли вони попадають у другу призму під іншим кутом до направлення оптичної осі другого кристалу, вони заломлюються у поверхні розділу двох склеєних кристалів під різними кутами, при цьому звичайний промінь стає незвичайним і навпаки). Після виходу з другого кристалу назовні, кожний з двох променів знову заломлюється, майже симетрично відхиляючись один від іншого у різні сторони від напрямку проміну, що входить у першу призму. У світловодній техніці для поляризації інфрачервоного світла

використовують ту обставину, що це явище може виникати при відбиванні світла.

Для перетворення лінійно поляризованого світла у еліптично-поляризований звичайно використовують так звані чвертьхвильові пластинки. Чвертьхвильова пластинка вирізається з оптично анізотропного кристалу або виготовляється із слюди яка розщеплена по площині спайності.

Свою назву чвертьхвильова пластинка отримала внаслідок того, що при проходженні через таку пластинку світлового проміну коливання вектору  $\mathbf{E}$ , які направлені вздовж двох певних взаємно перпендикулярних напрямків у площині пластинки, набувають різницю ходу, що дорівнює чверті довжини хвилі ( $\lambda/4$ ) або  $(m + 1/4)\lambda$  - де  $m$  - ціле число. Два взаємно перпендикулярних напрямки у площині пластинки, о яких йшла мова вище, називаються головними напрямками.

При проходженні через таку пластинку лінійно поляризоване світло, напрямок коливань в якому складає кут  $45^\circ$  з головними напрямками пластинки, стає поляризованим по колу.

Важливими компонентами також є оптичні компенсатори та аналізатори.

Найпростішим оптичним компенсатором може служити згадана вище чвертьхвильова пластинка. Пластинку поміщують на шляху променя, що досліджується, і повертають до тих пір, доки її оптичні осі не співпадуть з осями коливань. При цьому фіксованому положенні пластинка виконує основну роль компенсатору – перетворює випромінювання з круговою поляризацією у світло, що поляризовано лінійно, доповнюючи різницю фаз до нуля або до  $\pi$ . До інших поляризаційних компенсаторів, що використовують для визначення ступеня поляризації частково поляризованого світла відносяться, наприклад, пристрої з поміщеною на шляху проміну плоскопаралельною пластинкою. При повороті цієї пластинки навкруг осі, яка паралельна її площині, змінюється інтенсивність відбивання променів різної поляризації. Компенсатори такого типу застосовують для вимірювання обертання площини поляризації (компенсатор Солей ля та ін.).

Типовим прикладом оптичного аналізатору – пристрою для аналізу характеру поляризації світла – є обертаємо пластинки турмаліну.

**Волоконно-оптичні поляризатори.** Відомі два типи таких пристроїв. У одному з них ділянка оболонки волокна полірується до самої серцевини і до цієї поверхні прикріплюється кристал з подвійним променезаломленням або на неї наноситься металева плівка. В результаті збільшуються втрати для поляризованих мод одного з напрямків. Це поляризатор полірованого типу. У іншому поляризаторі (катушкового типу) використовується збільшення втрат для хвиль певної поляризації при вигині волокна з великим коефіцієнтом подвійного променезаломлення.

*Волоконно-оптичний поляризатор полірованого типу.* Частина оболонки, майже до самої серцевини, видаляється поліровкою. Далі на оброблену поверхню напиляється метал, наприклад, алюміній або срібло. Серед мод, електричні складові яких перпендикулярні або паралельні металевій поверхні, на моди з перпендикулярною складовою приходиться значна доля втрат поглинання. Якщо метал напилюється на відполіровану поверхню, то збільшується доля втрат і для мод з паралельними складовими. Для зниження цих втрат між відполірованою поверхнею волокна та металом формується, як показано на **рис. 1**, буферний шар ( $\text{CaF}_2$ ), що має більш низький коефіцієнт заломлення, ніж оболонка. Шляхом оптимізації коефіцієнта заломлення та товщини буферного шару реалізовані поляризатори з коефіцієнтом затухання 45 дБ та внесеними втратами на рівні 1 дБ.

*Волоконно-оптичний поляризатор катушкового типу.* На **рис. 2 та 3** показані волоконно-оптичний поляризатор катушкового типу та спектр втрат від вигину волокна у ньому для хвиль, які поляризовані вздовж осей  $x$  та  $y$ . У волокні з подвійним променезаломленням характеристики втрат від вигину для хвиль з різною поляризацією різні, що можна пояснити наступним чином.

Коефіцієнт заломлення світлової хвилі, яка поляризована вздовж осі  $x$ , завдяки ефекту фото пружності, що обумовлений механічним напруженням, відрізняється від коефіцієнта заломлення хвилі, яка поляризована вздовж осі  $y$ . Але ця різниця є характерною тільки для області серцевини та оболонки поблизу її, а в області, що віддалена від серцевини, коефіцієнти заломлення для хвиль різної поляризації стають майже однаковими. Отже відносна різниця коефіцієнтів заломлення  $\Delta$  для хвилі з поляризацією вздовж осі  $x$  більше ніж для хвилі з поляризацією вздовж осі  $y$ , і при однаковому радіусу вигину

втрати на вигині для хвилі, яка поляризована вздовж осі  $y$ , будуть вище. У поляризаторі котушкового типу, який показано на **рис. 2**, для світла з довжиною хвилі 1.3 мкм отримується коефіцієнт затухання 45 дБ, а втрати які вносяться приблизно 0.25 дБ. У такий простий спосіб як вигин волокна з подвійним променезаломленням, отримуються звичайні характеристики об'ємного поляризатору.

**Волоконно-оптичні регулятори поляризації.** У звичайному одномодовому оптичному волокні при вигині або крученні виникає взаємодія мод з ортогональною поляризацією, причому ступінь її залежить від температури та механічних збурень. В результаті цієї взаємодії змінюється поляризація. Крім цього, поляризація світла до виходу його з волокна змінюється випадковим чином також і у часі. Коливання поляризації призводять до погіршення характеристик при використанні звичайного оптичного волокна при з'єднанні волокна із світлопроводними схемами, волоконно-оптичних датчиках, які чутливі до орієнтації площини поляризації.

Волоконно-оптичний регулятор поляризації дозволяє запобігти подібним коливанням поляризації. Один з регуляторів поляризації з вигнутим волокном показано на **рис. 4**. Котушки 1 та 2 проектується таким чином, щоби створювати затримку  $\pi/2$  та  $\pi$ , відповідно, тобто щоби вони працювали як чверть- та напівхвильові елементи. Основні осі подвійного заломлення у котушці з оптичного волокна – вісь  $x$ , що паралельна площині котушки, та вісь  $y$ , що перпендикулярна їй, причому вісь  $x$  є віссю швидкості. Таким чином, обертаючи окремо котушку 1 та котушку 2 навкруг осі  $z$ , можна хвилю з довільною поляризацією перетворити у хвилю з лінійною поляризацією у заданому місці. Відрізок волокна між котушками при цьому скручується. Але в одномодовому волокні з серцевиною круглого перерізу скручування майже не впливає на кут поляризації. У зв'язку з цим і можливе таке перетворювання.

Тепер розглянемо деякі принципи проектування регулятору поляризації з вигином волокна, що має подвійне променезаломлення. Нехай, як це показано на **рис. 5**, діаметр оболонки оптичного волокна дорівнює  $2b$ , а радіус його вигину  $R$ . Тоді складові механічного напруження всередині волокна виражаються наступним чином:

$$\sigma_X = \frac{E}{2R^2}(X^2 - b^2); \sigma_Y = 0; \sigma_Z = \frac{E}{R}X \quad (1)$$

Використавши залежність деформації від механічного напруження (див. рис. 6),

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial r} = \frac{1}{E}[-\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha\Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\sigma$  - напруження,  $\varepsilon$  - деформація,  $u$  - зміщення,  $\nu$  - відношення Пуасона,  $E$  - модуль Юнга,  $\alpha$  - коефіцієнт термічного розширення (для кварцового скла  $E = 7750 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\alpha = 5.4 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ); а також залежність коефіцієнта заломлення від деформації,

$$\delta n = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}\varepsilon_2 + p_{12}\varepsilon_z) \quad (3)$$

де  $\delta n$  - зміна коефіцієнта заломлення, що вноситься ефектом фотопружності,  $p_{ij}$  - коефіцієнти Поккельса,  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  - відносна деформація у поперечному перерізі, а  $\varepsilon_z$  - вздовж осі волокна.

Знайдемо різницю між постійними передачі мод з ортогональною поляризацією і з складовими електричного поля у напрямку осей  $X$  та  $Y$ :

$$\Delta\beta_{BEND} = k(n_X - n_Y) = -k\frac{n^3}{4}(p_{12} - p_{11})(1 + \nu)\frac{b^2}{R^2} \quad (4)$$

(З урахуванням того, що всередині серцевини  $|X| \ll b$ , була використана підстановка  $\sigma_X \approx Eb^2/(2R^2)$ ).

Якщо число витків волокна у котушці позначити  $N$ , то затримку можна виразити як

$$\delta = |\Delta\beta_{BEND}| 2\pi R N = \frac{(2\pi)^2}{\lambda} a \frac{b^2}{R} N \quad (5)$$

де  $a = (n^3 / 4)(p_{12} - p_{11})(1 + \nu)$ .

Для отримання затримки рівною  $\pi$  або  $\pi/2$  (тобто  $\lambda/2$  або  $\lambda/4$ ), необхідно, щоби

$$\frac{b^2}{R} N = \frac{1}{2\pi a} \frac{\lambda}{m} \quad (6)$$

Тут значення  $m$  береться рівним 2 та 4 для отримання відповідно напів- та чвертьхвильового елемента. Тоді при  $\lambda = 0.83 \text{ мкм}$ ,  $2b = 125 \text{ мкм}$  та  $R = 3.2 \text{ см}$  число витків для  $\lambda/4$  елемента  $N = 2$ , а для  $\lambda/2$  елемента  $N = 4$ .

**Поляризатори-решітки.** Для поляризації випромінювання в ІЧ області спектру застосовують поляризатори решітки, що представляють собою структуру з періодичних металевих та діелектричних смужок. Підкладку звичайно виконують у вигляді плоско паралельної пластини з поліетилену, лавсану, германію та інших матеріалів які є прозорими у заданій області спектру. Такі поляризатори пропускають випромінювання з складовою електричного вектору, яка є перпендикулярною штрихам решітки. Випромінювання із складовою електричного вектору, яка є паралельною штрихам решітки, повністю відбивається. Оптимальні характеристики мають решітки-поляризатори для довжин хвиль, що більші двох періодів, і при малому показнику заломлення підкладок. Решітки також можуть безпосередньо розміщуватися на торці волокна, або на інтегрально-оптичній схемі.

**Волоконно-оптичний деполяризатор.** Вище волоконно-оптичний регулятор поляризації розглядався як елемент, який запобігає коливання поляризації в звичайному одномодовому оптичному волокні і діючий на основі когерентності. Нижче буде описано деполяризатор, який дозволяє зменшити шуми поляризаційної характеристики, не спираючись на когерентність.

Деполяризатор, який показаний на **рис. 7** складається з двох відрізків оптичного волокна з подвійним променезаломленням та

співвідношенням довжин  $L_1 : L_2 = 1 : 2$ , площини поляризації яких взаємно повернуті під кутом  $45^\circ$  при з'єднанні вздовж основної осі. Зона похибок джерела світла позначена  $l_c$ . Тепер, якщо вважати, що перехрестний зв'язок між модами відсутній, то при

$$c\tau_p L_1 > l_c \quad (7)$$

когерентністю ортогонально поляризованих мод можна нехтувати ( $\tau_p$  - дисперсія моди, поляризованій хвилі у волокні з подвійним променезаломленням, с/м).

Як показано на рисунку, лінійно поляризоване світло вводиться у перший відрізок волокна вздовж основної осі. Для більш повної деполаризації світла, що входить з будь-яким кутом поляризації, до цього відрізка волокна приєднується з поворотом відносно осі на  $45^\circ$  (співвідношення відрізків вказано на рисунку).

На практиці в оптичних волокнах з подвійним променезаломленням моди все ж таки інтерферують. Тому повна деполаризація світла в них неможлива і залишається рівень поляризації приблизно  $10^{-2}$ .

**Інтегрально-оптичні поляризатори.** Пристрій, що використовує електрооптичний коефіцієнт для перетворення  $TE$ -хвиль у  $TM$  показано на **рис. 8**. Для цього пристрою основним є недіагональний елемент електрооптичного тензору  $r_{51}$ , який дозволяє перетворювати  $TE(TM)$ -хвилі у  $TM(TE)$ . Періодична електродна структура необхідна із-за різниці в ефективних показниках заломлення для мод різної поляризації та двопроменезаломлення ніобату літію. Як впливає з структури електрооптичного тензору для  $LiNbO_3$ , спрямоване вздовж осі  $x$  поле може призводити до зв'язку поляризованих по осям  $x$  та  $y$  компонент оптичного поля через компонент  $r_{51}$ . Процес перетворення описується рівняннями зв'язаних мод ( $\eta = \sin^2 kL$ ). для досягнення 100% модуляції необхідно, щоби  $kL = \pi/2$ , або  $p = 1/2$  (величина  $p$  залежить від конкретного типу модулятора, звичайно порядку одиниці), що є обов'язковою умовою для будь-якого типу модулятора (в лекції 13 будуть розглянуті інші схеми можливих поляризаційних модуляторів).



*Обертач площини поляризації.* Для ряду практичних застосувань потрібен пристрій, що спроможний перетворювати дану поляризацію  $(\theta_i, \phi_i)$  вхідного сигналу в певну поляризацію сигналу на виході. Пристрій для перетворення поляризації грає важливу роль, оскільки звичайне одномодове волокно не зберігає поляризації, в той же час як, наприклад, когерентні системи зв'язку потребують сигналів з відомою поляризацією. У багатьох випадках достатньо, щоби вихідний сигнал представляв собою  $TE$ - або  $TM$ -моду. При цьому на вхід пристрою із стандартного (не двопротинезаломлюючого) одномодового волокна може поступати довільний, у загальному випадку еліптично поляризований сигнал. Для забезпечення довільного перетворення поляризації потрібний більш складний пристрій, ніж звичайний  $TE \Leftrightarrow TM$  перетворювач. Найпростіший варіант обертача площини поляризації, що показаний на **рис. 9**, складається із синхронізованого  $TE \Leftrightarrow TM$  перетворювача, що розташований між двома фазозсуваючими ділянками, які дозволяють змінювати відносний зсув фази між  $TE$ - та  $TM$ -модами. Слід перерахувати декілька основних режимів роботи цього пристрою. Режим лінійного обертання площини поляризації реалізується, коли перша фазозсуваюча ділянка дає  $\phi'_i = -\pi/2$ , а друга – нульовий фазовий зсув на виході. Обертання кута поляризації при цьому пропорційно напрузі на електродах модового перетворювача. При довільній поляризації на вході і необхідності отримання  $TE$ - або  $TM$ -поляризації на виході величина  $\phi_0$  не має значення і другий фазозсуваюча ділянка не потрібна. У випадку коли на вхід подається випромінювання  $TE$ - або  $TM$ -поляризації, модовий перетворювач з єдиною фазозсуваючою ділянкою може забезпечити отримання довільної поляризації на виході.

Розглянутий вище електрооптичний пристрій обертання поляризації може бути використаний з метою зворотного зв'язку. Ця можливість обумовлена тим, що фазовий зсув та напруга на модовомперетоврювачі можуть бути оптимізовані незалежно один від одного. Припустимо, що потрібно перетворити вхідний сигнал у  $TE$ -моду. Його поляризація може бути визначена за допомогою поляризаційного розщеплювача, що буде описаний нижче, По мірі зміни поляризації на вході значення  $V_1$  підстроюється з метою зменшення сигналу похибки. Далі знайдене значення  $V_1$  фіксується і

$V_2$  змінюється для подальшого зменшення сигналу похибки. Після цього немає потреби в подальшому підстроюванні  $V_1$  поки поляризація вхідного сигналу не зміниться.

Щоби уникнути залежності параметрів пристрою від довжини хвилі, краще використовувати розповсюдження у напрямку осі  $z$ . коли двопроменезаломлення незначне. У цьому випадку електрооптичний коефіцієнт для модового перетворення зменшується приблизно на порядок а принцип дії залишається тим самим.

### *Поляризаційно-селективні пристрої.*

Самим простим прикладом лінійного поляризатору є хвилевод з металічною плівкою на поверхні. у якого за рахунок індукційних струмів в металі втрати для  $TM$  моди складають до 10 дБ/см, а для  $TE$ - моди зростають незначно. Цей ефект може бути підсилений за рахунок поміщення тонкого діелектричного шару між хвилеводом та поглинаючим електродом з метою резонансного підсилення зв'язку  $TM$ - моди з металевою плівкою та збільшення її втрат. При цьому різниця коефіцієнтів втрат для  $TM$  та  $TE$ - мод може досягати 35 дБ/см.

Лінійний поляризаційний розщеплювач є більш універсальним пристроєм, який може просторово розділяти  $TM$  та  $TE$ - компоненти спрямованої моди. Як приклад розглянемо поляризаційно-селективний спрямований розщеплювач, який зображено на **рис. 10**. Поляризаційно-селективний зв'язок можна отримати, якщо зробити щоб електрооптичний зсув фази  $\Delta\beta$  та  $k$  мали сильну залежність від поляризації. Різниця в показниках заломлення підкладки та хвилеводу  $\Delta n$ . звичайно неоднакова для  $TM$  та  $TE$ - мод хвилеводів  $Ti:LiNbO_3$ . Отже, ефективна ширина хвилеводів і величина  $k$  також залежать від поляризації. Ця різниця може бути збільшена або зменшена вибором параметрів дифузії при виготовленні хвилеводу. Таким чином, відповідний вибір параметрів дифузії та довжини взаємодії  $L$  дозволяє отримати  $k_{TE}L = \pi$  та  $k_{TM} = \pi/2$ . Як правило із-за обмежень величини  $|k_{TE} - k_{TM}|$  пристрій повинен мати відносно велику довжину (біля 1 см). В цьому випадку при вводиті випромінювання у хвилевод 1 в ньому збережеться  $TE$  - мода, а мода  $TM$  перейде у хвилевод 2.

Рекомендована література: 1, 10,12, D2

1. Волноводная оптоэлектроника. Под ред. Т.Тамира.- М.: Мир, 1991.-575с.
10. П.К.Чео Волоконная оптика: Приборы и системы М.: Энергоатомиздат, 1988.-280с.
12. Т.Окоси, и др. Волоконно-оптические датчики Энергоатомиздат, 1990.-256с.
- D2. В.А.Москалев и др. Прикладная физическая оптика «Политехника», 1995.-528с.