**Модулятори оптичних сигналів**

**Вступ**

Однією з найважливіших задач волоконної оптики в зв'язку є модулювання оптичних сигналів, яка потребує використання різніх фізичніх ефектів.

Нижче будуть розглянуто використання акустооптичних і електрооптичних ефектів.

**1. Акустооптичнi модулятори**

Акустооптичнi модулятори широко використовуються у волоконній оптиці завдяки трьом основним властивостям: можливості переключення луча по двох напрямках; модуляції інтенсивності оптичного променя; можливості зсуву оптичної частоти.

Принцип дії акустооптичного модулятора заснований на залежності показника заломлення ряду оптично прозорих матеріалів від зовнішнього тиску.

Такими матеріалами є (диоксид телуру), (ниобат літію) і (молибдат свинцю). У модуляторах тиск створюється акустичними хвилями (рис. 1), якi генеруються п'єзоелектричним перетворювачем і утворюючими ряд горизонтально орієнтованих ліній з однаковим показником заломлення, так звана дифракційна решітка Брегга.

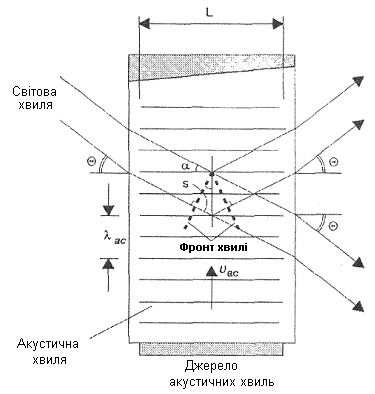


Рисунок 1 – Дифракційна решітка Брегга

Дана решітка забезпечує часткове відбиття вхідного променя і переміщається з акустичною швидкістю .



При цьому вхідний і вихідний промені мають той самий кут нахилу до поверхні, однак новий напрямок луча має місце тільки при визначених кутах (кутах Брегга). Коли крок решітки дорівнює оптичній довжині хвилі в матеріалі, досягається інтерференція всіх часткових хвиль, у цьому випадку



, (1)



де і – швидкість поширення і довжина акустичної хвилі;



– частота генератора акустичної хвилі; – кут Брегга в кристалі;



т – порядок переломленого променя; – довжина оптичної хвилі в повітрі; n – показник заломлення кристала, рівний 5.18 для і 5.26 для . Швидкість поширення хвилі для даних кристалів, відповідно, дорівнює 3630 м/с і 4260 м/с.



За межами кристалу найбільший інтерес представляє кут Брегга першого порядку, що може бути обчислений з вищенаведених рівнянь за допомогою закону Снеллiуса, застосованого до межи між кристалом і повітрям

(2)



Звідси видно, що в даному виразу вiдсутнiй показник заломлення, тому при фіксованій швидкості акустичної хвилі кут Брегга виявляється залежним тільки від частоти генератора акустичної хвилі й оптичної довжини хвилі. Типові кути Брегга становлять значення близько 1°, тому для поділу променів необхідно використовувати горизонтальну структуру модулятора.

Для модуляції інтенсивності відхиленого оптичного променя потужність генератора акустичних коливань повинна модулюватися по амплітуді, а переключення досягається шляхом вмикання і вимикання сигналу генератора.

При цьому інтенсивність дифрагованого луча пропорційна акустичної потужності, показнику якості матеріалу (М2), геометричним розмірам (L/Н), і обернено пропорційна квадрату довжини хвилі, тобто



(3)



З останнього виразу видно, що акустооптичний модулятор має нелінійну функцію перетворення (рис. 2), яка представляється зазвичай у вигляді

, (4)



де – частота модуляції, – тривалість фронту наростання акустичної хвилі.

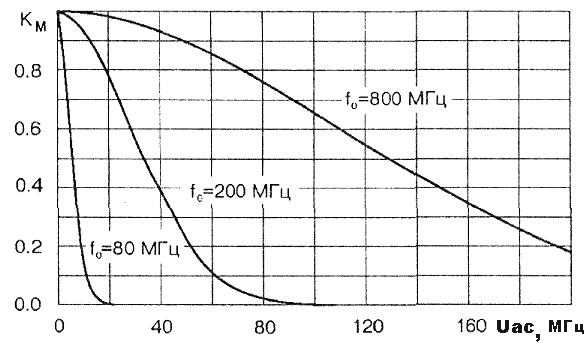


Рисунок 2 – Нелінійна функція перетворення акустооптичного модулятора

Як видно з даної залежності, для здійснення аналогової модуляції потрібен зсув робочої точки в лінійну область, забезпечуючи тим самим необхідне значення контрастності і глибини модуляції лазерного випромінювання, що визначаються відомими виразу

, (5)



, (6)



де і – максимальна і мінімальна обмірювана інтенсивність випромінювання лазера для променя першого порядку.



У результаті акустооптичної взаємодії частота лазерного випромінювання зміщається на величину, рівну акустичній частоті , що зв'язано з переміщенням дифракційних ґрат і може бути використане для гетеродинного детектування, при якому відбувається точний вимір фазових параметрів. При цьому, якщо промінь спрямований проти напрямку акустичного поширення, вихідна частота вище вхідний, у противному випадку навпаки. Очевидно, що в міру збільшення частоти глибина модуляції зменшується, погіршуючи параметри системи, що використовує акустооптичний модулятор.



**2. Електрооптичнi модулятори**

В даний час найбільш розповсюдженим оптичним модулятором є чарунка Поккельса, принцип дії якої заснований на двопромінєзаломленні у кристаллах.

У залежності від того, як (паралельно чи перпендикулярно) щодо розповсюджуваної в кристалі світлової хвилі прикладено електричне поле, чарунки Поккельса поділяються на чарунки подовжнього чи поперечного типу.

Тут слід зазначити, що для забезпечення введення в чарунку оптичного випромінювання в чарунках подовжнього типу необхідно використовувати прозорі чи кільцеві модулюючi електроди. Популярним матеріалом для таких чарунок є KDP (хімічна формула КН2Р04), тому що в цьому матеріалі напруженість електричного поля визначає відмінність у показниках заломлення по і напрямках вiсiв кристала, а сам кристал виконує роль керованої напругою пластини уповільнення. Тому, змінюючи рівень прикладені до осередку напруги, можна керувати інтенсивністю вихідного світлового променя. Для цього досить реалізувати схему, приведену на рис. 3, що функціонує в такий спосіб.

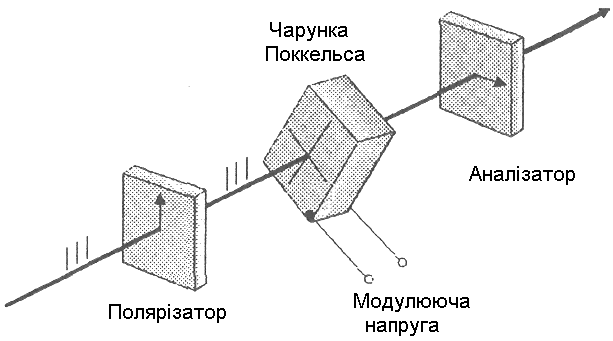


Рисунок 3 – Схема керування інтенсивністю вихідного світлового променя

У вихідному стані, коли до чарунки не прикладена напруга, вона прозора для світлового променя, і він блокується аналізатором, тому що останній розташований під кутом 900 до поляризованого вхідного випромінювання.

При збільшенні напруги здійснюється перетворення лінійного стану поляризації вхідного променя в один з наступних станів: круговий, еліптичний чи лінійний. При досягненні максимальної напруги чарунка здійснює напівхвильове уповільнення, обертаючи вхідну поляризацію на 900. У цьому випадку аналізатор стає цілком прозорим для вихідного променя, і вхідне випромінювання надходить на вихід пристрою. Таким чином, напруга, прикладена до чарунки Поккельса, визначає рівень потужності оптичного сигналу на виході пристрою, а його зміна приводить до модуляції світлової хвилі.

Чарунки Поккельса дозволяють здійснювати модуляцію світлової хвилі, що поширюється, у смузі частот від 0 Гц до 1 ГГЦ і вище, при цьому глибина модуляції може досягати значень більш 99.9%. Негативна сторона звичайних чарунок Поккельса полягає у використанні високої модулюючої напруги. Тому основні зусилля розроблювачів були сконцентровані на усунення цього недоліку застосуванням сучасних мікроелектронних технологій введення одномодових оптичних хвилеводів у електрооптичний матеріал, такий, як, наприклад, нiобат літію (LiNbO3). У цьому випадку дифузійний одномодовий оптичний хвилевід виконується розділеним на дві гілки, убудовані в чарунку Поккельса, утворюючи тим самим диференціальну структуру (рис. 4).

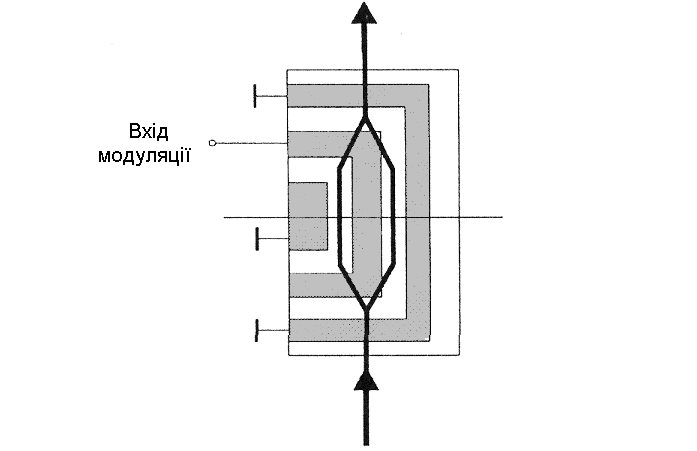


Рисунок 4 – Дифузійний одномодовий оптичний хвилевід

Тому прикладене до чарунки електричне поле збільшує швидкість поширення світлової хвилі в одній гілці і зменшує в другій гілці хвилеводу. Звичайно, якщо довжина взаємодії складає 1 см, досить прикласти близько 8 В, щоб досягти повного придушення, що має місце при різниці фаз гілок, рівної 180°. Іноді один із двох хвилеводів виконують на довжини хвилі довше іншого для того, щоб створити двосторонню модуляцію, що відповідає повному включенню при + 4В, половині включення при 0 В та повне вимикання при – 4В. Тут максимальне значення напруги модуляції залежить від електрооптичного коефіцієнта ниобата літію і конфігурації електродів, а вихідна потужність визначається шляхом геометричного додавання двох електричних полів, що беруть участь, і для пристрою без втрат визначається виразом



, (7)



де – потужність оптичного випромінювання на вході модулятора;



і – відповідно, що керує напруга і напруга повного придушення, В.



З даного вираження випливає, що лінійна модуляція може бути досягнута тільки в лінійній області функції .



Приведена конструкція має ряд особливостей, що дозволяють забезпечити:

– ефективне узгодження модулятора з джерелом напруги, що модулює, на високих частотах завдяки компланарної лінії передачі;

– незалежність електричного імпедансу від довжини взаємодії, що дозволяє варіювати максимальним рівнем керуючої напруги;

– широку смугу частот модуляції, тому що електрична й оптична хвилі поширюються в одному напрямку.

В ідеалі, коли швидкості обох хвиль однакові, хвилевід може бути нескінченно довгим, а керуюча напруга може бути зменшена до нуля.

Для того щоб проаналізувати частотну залежність коефіцієнта модуляції оптичного сигналу постійної потужності, прикладемо електричний імпульс (імпульс нульової тривалості) до смугової лінії передач із нескінченною смугою частот. Якщо розглядати модулятор, для якого при нульовій напрузі на електричному вході на оптичному виході сигнал буде відсутній, глибина модуляції імпульсу буде визначатися оптичним імпульсом кінцевої тривалості , рівної різниці часу надходження на вихід швидкої оптичної і повільний електричної хвиль, тобто.



, (8)



де і – показники заломлення для електричної й оптичної хвиль, відповідно; – довжина ділянки взаємодії електричного полючи з оптичною хвилею; с= 3 х 1010 см/с – швидкість світла.



Для модулятора з нiобата літію LiNb03, , a тоді пс/см.



Використовуючи перетворення Фур'є прямокутного імпульсу в частотну область, можна визначити залежність коефіцієнта перетворення модулятора від частоти як

, (9)



що відповідає функції . Для модулятора довжиною 2 см перший нуль має місце при 7.7 ГГц, однак на практиці нулі менш виражені через втрати у смуговій лінії передачі.



У першому наближенні оптична хвиля як всередині, так і зовні оптичного хвилеводу описується гауссовським променем, тому для того, щоб досягти гарної ефективності оптичного з'єднання, діаметри модових плям джерела і хвилеводу і хвилеводу з приймачем повинні бути узгоджені. На практиці волокно приєднується до модулятора за допомогою пігтейла чи використовуючи лінзу, у зв'язку з цим типові внесені втрати модулятора звичайно складають не більш 3–5 дБ, включаючи втрати введення й ослаблення.

У табл. 1 приведені характеристики одного з кращих високошвидкісних електрооптичних амплітудних модуляторів (рис. 5)

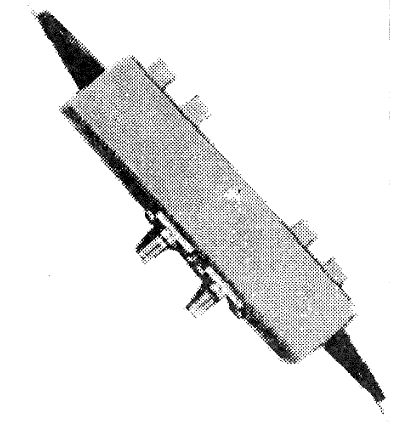


Рисунок 5 – Високошвидкісний електрооптичний амплітудний модулятор, вироблений компанією Laser 2000

Дані модулятори були розроблені для волоконнооптичних систем передач і SONET, SDH, а також для хвильового групостворення чи видалення в WDM системах.

Таблиця 1 – Характеристики електрооптичного амплітудного модулятора

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Основні параметри | 2.5 Гбіт/с амплітудний модулятор | 10 Гбіт/с амплітудний модулятор |
| Оптичні | | |
| Довжина хвилі, нм | 1300/1550 | 1550 |
| Оптична смуга частот, нм | ±25 | +25 |
| Внесені втрати, дБ | <5 | <5 |
| Відношення загасання, дБ | > 20 | > 20 |
| Електричні | | |
| Смуга частот, ГГЦ | 0–2.5 | 0–8 |
| Пікова напруга (при 1Гц), В | <4 | <4 |
| Напруга зсуву, В | ±10 | ±10 |
| Механічні | | |
| Підтримуюче поляризацію з'єднання оптичного входу | Super PC | Super PC |
| З'єднання оптичного виходу | Одномодове  Super PC | Одномодове  Super PC |
| Електричне з'єднання | 50 Ом butterfly pin |  |
| Доступність із з'єднувачем | Так | Так |
| Температурний діапазон, °С | 0–70 | 0–70 |

Використання LiNb03, крім іншого, забезпечує електричні зсуви двулучезаломлення, що лежить в основі роботи фазових модуляторів.

Як відомо, фазові модулятори звичайно використовуються в когерентних системах передач, і зокрема, з фазовою маніпуляцією сигналу (PSK і DPSK). Тому в цій області інтерес представляють тільки інтегральні модулятори, що найбільш пристосовані до сполучення з одномодовим волокном. У таких модуляторах показник заломлення змінюється в напрямку прикладеного електричного поля, що використовується потім для створення змінюваної затримки оптичної хвилі. Найбільш ефективним шляхом реалізації останньої також є застосування ниобата літію, що характеризується значним електрооптичним ефектом, однак у цьому випадку одномодовий хвилевід створюється дифузією або імплантацією іонів титана. Тому можливі два способи реалізації пристрою, обумовлених напрямком розрізування кристала.

Звичайно кристал розрізається таким чином, щоб при впливі на нього електричним полем мав місце найбільший електрооптичний ефект, що у нiобата літію досягається при ідентичному напрямку електричних полів світлової хвилі й електричного модулюючого сигналу (рис. 6).

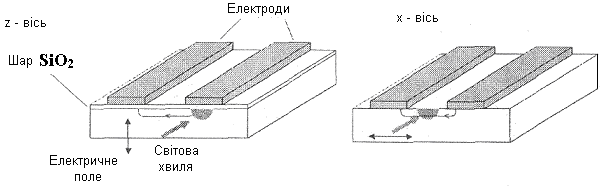


Рисунок 6 – Напрямок розрізування кристала

У пристроях з z-зрізом це забезпечується при взаємодії вертикальних складових модулюючого електричного поля й електричного поля оптичної хвилі, так називаної ТМ – хвилі. Для того щоб не створювати значні оптичні втрати в хвилеводі через близько розташовані металеві електроди, між ними й оптичним хвилеводом вводиться ізоляційний шар з Si02.

У пристрої з х-зрізом використовується горизонтальний компонент електричного поля, тому в цьому випадку електричне поле світлової хвилі повинне бути розташоване горизонтально, що відповідає Т-хвилі. Модулятори з х-зрізом не вимагають використання ізоляційного шару, у зв'язку з чим у них необхідне керуюча напруга менше, ніж у модулятора х, що використовують z-зріз.

Таблиця 2 – Характеристики фазових модуляторів компанії Laser 2000

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Фазові модулятори | 300-х-8 | 300-х-106 | 300-х-106 | 300-х-106 |
| Робоча довжина хвилі, нм | 800 | 1060 | 1320 | 1550 |
| Смуга частот  (3 дБ) [х в коді], Гц | 3, 5, 10, 20 | 3, 5, 10, 20 | 3, 5, 10, 20 | 3, 5, 10, 20 |
| Модулююча напруга,  1 ГГц  (3, 5, 10 ГГц),  В модель 20 ГГц, В | 5.0  6.4 | 6.0  8.0 | 7.0  9.6 | 9.0  11.6 |
| Оптична потужність, мВт | 5 | 10 | 50 | 75 |
| Електричні зворотні втрати, дБ | <-10 | <-10 | <-10 | <-10 |
| Внесені втрати при між – волоконному з'єднанні, дБ | <4.5 | <4.5 | <4.5 | <4.5 |
| Оптичне зворотнє відбиття, дБ | <-50 | <-50 | <-50 | <-50 |
| Вхідні /вихідні пігтейли | PANDA | PANDA | PANDA | PANDA |
| Розмір пристрою, мм | 77 х 35 х 13 | 77 х 35 х 13 | 77 х 35 х 13 | 77 х 35 х 13 |

У табл. 2 дані характеристики фазових модуляторів компанії Laser 2000, що були розроблені для використання в тестовому устаткуванні, когерентних комунікаційних системах, а також для SONET, SDH і хвильового групостворення чи видалення.