

Лекція 6а. Напівпровідникові лазери

Світло випромінюючі діоди (СВД) та напівпровідникові лазерні діоди (ЛД). Напівпровідникові ЛД з подвійною гетероструктурою. Напівпровідникові (н/п) ЛД з квантовими ямами. Лазерні діоди першого та другого спектрального діапазонів. Реферат.

Світловипромінюючі діоди. Найпростіший світло випромінюючий діод складається із розташованих у одному кристалі напівпровідника двох областей з різним типом провідності, між ними знаходиться область $p-n$ переходу (рис. 1). На рис. 2 показано енергетичні зони світло випромінюючого $p-n$ переходу.

Відповідальність за процес випромінювання світла у напівпровіднику несе рекомбінація носіїв заряду. Для того щоб мати можливість випромінювати квант світла, електрон повинен перейти з більш високо енергетичного стану у більш низьке. Надлишок енергії (рівний різниці енергій на високому та низькому рівнях) при такому переході і випромінюється у вигляді кванту світла (фотону). У напівпровідниках випромінювальні переходи представляють собою переходи між зоною провідності та валентною зоною або домішковими рівнями у забороненій зоні. Довжина хвилі рекомбінаційного випромінювання λ , мкм визначається співвідношенням $\lambda_{\text{випр}} = hc / E_g = 1.24 / E_g$, де E_g - ширина забороненої зони напівпровідника у електрон-вольтах.

Випромінювальні квантові переходи можуть відбуватися спонтанно та вимушено. При спонтанних переходах випромінювання фотонів не залежить від зовнішніх дій на систему. Акти спонтанного випромінювання відбуваються незалежно один від одного у різні моменти часу. Тому спонтанне випромінювання некогерентно. Вимушені переходи відбуваються під дією зовнішнього поля певної частоти, що відповідає частоті збуджує мого випромінювання. Особливість вимушеного або стимульованого випромінювання полягає у тому, що фотони, які випромінюються, мають ту ж саму частоту, поляризацію та фазу, що і фотони стимулюючого випромінювання; співпадають і напрями їх розповсюдження. Отже, на відмінність від спонтанного, вимушене випромінювання когерентно.

У звичайних умовах напівпровідник, який знаходиться у тепловій рівновазі, не має великої кількості дірок у валентній зоні та

електронів у зоні провідності. Як наслідок цього, маємо і число рекомбінацій. Для отримання значного світлового випромінювання від напівпровідника необхідно яким то чином вивести його з стану теплової рівноваги, щоби створити більше електронів та дірок. Цей процес звичайно називають накачуванням матеріалу.

В інтегральній оптиці використовують ефективний і дуже простий спосіб електричного накачування, що оснований на властивостях $p-n$ переходу. У відсутності напруги зміщення в зоні провідності n області існує багато електронів, а дірки переважно локалізовані у валентній зоні p - області (**рис. 2а**). У такому стані доля електронів та дірок, що спроможні подолати потенціальний бар'єр та потрапити у область переходу (де і рекомбінувати), нехтовно мала. Якщо тепер до такого переходу прикласти пряме зміщення (тобто плюс до p - області), то бар'єр знизиться і вже значно більша кількість електронів та дірок проникне (інjektується) у область переходу. Інжекція неосновних носіїв утворює у $p-n$ переході інверсію заселення енергетичних рівнів – коли кількість електронів на верхньому рівні є значно більшою ніж на нижньому.

У загальному випадку, виключаючи спеціальні умови, спонтанне випромінювання, яке викликане спонтанною рекомбінацією – процес більш імовірний, ніж стимульоване. Таким чином, звичайний напівпровідниковий випромінювальний перехід генерує спонтанне випромінювання. Спектр його характеризується емісійним максимумом поблизу довжини хвилі, що відповідає краю поглинання, тобто енергії забороненої зони. Максимум характеризується на півшириною, яка звичайно не перевищує декількох десятків нанометрів. Така на півширина спектру говорить про те, що відповідаючи забруднюючим домішкам та дефектам стани всередині забороненої зони породжують випромінювальні піки на інших довжинах хвиль – відмінних від тієї, що точно відповідає E_g . Тобто такий спонтанний випромінювач багатомодовий і у інтегральній оптиці від представлений світловипромінювальними діодами (СВД).

Повернемося до **рис. 1**. В область n - типу кристалу напівпровідника інjektуються носії струму – електрони, а у область p - типу – дірки. Носії струму поступають до діоду по зовнішньому колу від джерела живлення. У зоні електронно-діркового переходу відбувається рекомбінація інjektованих носіїв. Рекомбінація може

бути випромінювальною, і тоді у так званій області приладу виникають фотони ($h\nu$ на рис. 1) та безвипромінювальною, що призводить до деякого нагрівання решітки кристалу напівпровідника. Фотони, що утворилися у активній частині кристалу, переважно виходять назовні з кристалу і останній виявляється генератором світла.

Інтенсивність випромінювання, що генерується, модулюється зміною току інжекції. Максимальна частота модуляції складає для

СВД декілька сотень мегагерц. Необхідно відзначити, що далеко не всі акти випромінювальної рекомбінації відбуваються в СВД з емісією фотонів, що мають однакову енергію. Результатом цього є розширення області частот випромінювання, що генерується СВД.

Основні особливості СВД як джерела світла наступні:

не спрямований кутовий розподіл випромінювання (по закону Ламберта);

значний час (2....20 нс) відгуку при модуляції випромінювання СВД зміною струму інжекції. Цей час залежить від величини часу життя носіїв у напівпровідниках з яких виготовлено світло випромінюючий діод, особливостей механізму рекомбінації носіїв та інших факторів;

відсутністю будь-якого „порогу” значення струму інжекції, що обумовлює випромінювальну рекомбінацію носіїв; співвідношення між струмом управління та оптичним сигналом, що отримується на виході носить майже лінійний характер у порівняно широкому діапазоні струму інжекції;

ширина спектру випромінювання, що генерується СВД, відносно велика і може досягати 40...140 нм.

Діаметр випромінювальної площадки СВД, через яку виходять назовні фотони, що генеруються, є значною (200....300мкм), але може бути зменшений створенням у приладі „вікон”, що полегшує при необхідності ввід світла, що випромінюється діодом, у світловод, який має діаметр серцевини, наприклад, 50 мкм.

У типових конструкціях та СВД, що розроблені спеціально для світловодних систем передачі даних (рис. 3). генероване випромінювання виходить назовні і розповсюджується перпендикулярно площині електронно-діркового переходу, що розташований між шарами напівпровідників з провідністю різного типу. У підкладці приладу витравлено заглиблення, в одному випадку (рис. 3а) яке використовується для того, щоби максимально

зменшити відстань між активною зоною СВД та вхідним торцем світловоду, а у іншому (рис. 3б) – для розміщення між активною зоною приладу та вхідним торцем світловоду сферичної мікролінзи. У світловодних системах зв'язку застосовують також СВД, які сконструйовані таким чином, щоби випромінювання, що генерується, виходило з приладу назовні не перпендикулярно поверхні електронно-діркового переходу, а паралельно їй, тобто через бокову грань кристалу напівпровідника. Це призводить до зменшення розмірів перерізу пучка світла, що генерується СВД.

Нагадаємо, що довжина хвилі, що генерується СВД, залежить від забороненої зони напівпровідника, який використано у приладі, визначається співвідношенням $\lambda_{\text{випр}} = hc / E_g = 1.24 / E_g$. Довжина хвилі світла, що генерується СВД з арсеніду галію, біля 0.9 мкм. При введенні у арсенід галію легуючої домішки алюмінію довжина хвилі випромінювання, що генерується СВД, може бути зменшена і складати, наприклад, 0.78 мкм. Для виготовлення СВД з генерацією більш короткохвильового випромінювання (видиме світло) потрібно переходити до таких напівпровідникових матеріалів, як арсенідфосфід галію або фосфід галію. Навпаки, СВД, що випромінюють світло з більшою довжиною хвилі, наприклад, рівною 1.3 мкм, повинні базуватися на таких матеріалах, які містять не тільки миш'як та галій, але і індій а також фосфор.

Числова апертура СВД з великою по розміру випромінюючою площадкою може досягати 0.9, а для СВД з витравленим у них заглибленням, що забезпечує більшу ефективність вводу випромінювання у волоконний світловод, виявляється значно меншою (0.3...0.2). Таке зменшення значення числової апертури випромінювача сприяє бажаному співвідношенню числової апертури СВД та волоконних світловодів.

Лазерні діоди. Принцип побудови інжекційного лазера практично такий самий як і розглянутого спонтанного випромінювача. Це той же самий випромінювальний $p-n$ перехід. Але для отримання у ньому лазерного ефекту необхідно створити такі умови, коли буде переважати вимушене випромінювання. Це досягається розміщенням $p-n$ переходу у резонатор. В звичайних напівпровідникових лазерах використовують резонатор Фабрі-Перо, дзеркалами якого є поверхні сколу монокристалу. Оскільки на практиці показник заломлення матеріалів, що використовуються є

великим (2-4), то це забезпечує хороше відбивання світлових хвиль від границь кристалу.

Основний структурний елемент напівпровідникових інжекційних лазерів - гетероперехід (контакт двох різних по хімічному складу напівпровідників з різними енергіями заборонених зон та електронної спорідненості). Це і визначає різницю у їх електрооптичних властивостях. Чим досконаліше такий контакт, тим стабільніше його робота та вище тривалість його експлуатації.

Проблема створення лазерних гетеро структур у першу чергу і складається у виборі матеріалів та технології, що якомога повно задовольняють вимогам ідеального гетеро переходу. Основна ідея при цьому у використанні принципу ізоперіодичного заміщення у твердих розчинах. Склад таких розчинів позначається символами $A_x B_{1-x} C$ або $A_x B_{1-x} C_y D$ де A, B, C, D - елементи відповідних груп у таблиці Менделєєва, а індекси x, y визначають мольну долю елемента у твердому розчині. Тверді розчини дають можливість плавного управління шириною забороненої зони напівпровідників шляхом зміни їх компонентного складу. Це відкриває широкі можливості створення гетеропереходів та приладів на їх основі. Для отримання гетеро переходів із властивостями ідеального контакту необхідно виконати ряд умов сумісності матеріалів по механічним, кристалохімічним та технічним властивостям. Вирішальний критерій при виборі матеріалів контактної пари – відповідність періодів їх кристалічних решіток та температурних коефіцієнтів лінійного розширення. Іншими словами вони повинні утворювати так звану ізоморфну та ізоперіодичну пару. Принцип ізоперіодичного заміщення означає, що в певному діапазоні зміни складу твердого розчину для сполук, що використовуються, зберігається ізоморфність та ізоперіодичність матеріалу. в той же час як його енергетичний спектр та електрооптичні характеристики змінюються.

З лазерів на гетеро структурах найкращі характеристики у так званих лазерів смугастого типу (**рис. 4**). Область рекомбінації носіїв заряду та світлового випромінювання зосереджена у середньому активному шарі, який поміщено між двома широкозонними емітерами. При подачі прямого зміщення у такий структурі має місце двостороння інжекція носіїв заряду у активний шар. Умови виникнення генерації відповідають дуже високій концентрації нерівноважних носіїв, що на двадцять порядків (як у випадку арсеніду галію) перевищують її рівноважне значення. Звідси

впливає необхідність обмеження розмірів активного шару, який роблять дуже тонким – звичайно менше 0.5 мкм. Оптичне обмеження у площині активного шару забезпечується стрибками показника заломлення на границі гетеро переходів.

В інжекційних лазерах застосовують тільки прямо зонні напівпровідники з великою імовірністю випромінювального між зонного переходу з участю тих станів, які у першу чергу заповнюються під дією накачування. Для великої квантової ефективності необхідна кристалографічна досконалість матеріалу та відсутність у ньому хімічних домішок з глибокими рівнями у забороненій зоні.

Висока якість гетеро переходів у системі $AlGaAs$ визначило домінуючу положення лазерів з подвійною гетеро структурою на $AlGaAs/GaAs$ як джерел випромінювання для задач інтегральної оптики та волоконно-оптичних систем зв'язку. Але спектральний діапазон таких лазерів є обмеженим у інфрачервоній області довжиною хвилі 0.9 мкм.

Для створення гетеро лазерів, які працюють у більш довгохвильовій області спектру (цей діапазон є найбільш перспективним для волоконно-оптичного зв'язку та інтегральної оптики), виявилось потрібним використання чотирьохкомпонентних ізоперіодичних систем. Основою для таких приладів є багатошарові структури твердих розчинів $InGaAsP$.

Довжина хвилі випромінювання такої чотирикомпонентної системи при кімнатній температурі змінюється від 0.95 (InP) до 1.67 мкм ($Ga_{0.47}In_{0.53}As$) при збереженні постійним періоду решітки, що дорівнює періоду решітки фосфіду індію, що служить підкладкою при отриманні потрібних та четверних матеріалів по складу. Різні комбінації четверних та потрібних матеріалів A^3B^5 дають можливість отримати лазерні структури, що працюють при кімнатній температурі у діапазоні довжин хвиль від 0.66 до 4 мкм.

У зображеній на **рис. 5** структурі лазерного діоду (ЛД) активна область з арсеніду галію з дірковим типом провідності розміщена між двома горизонтально розташованими шарами $AlGaAs$, що мають різний тип провідності (нижній шар – провідність n -типу, а верхній – p -типу). Показник заломлення $AlGaAs$ для ближньої інфрачервоної області спектру дещо нижче показника заломлення арсеніду галію. В результаті активна область цієї конструкції набуває по відношенню до деякої частини генеруемого в ній випромінювання властивості

хвилеводу із ступінчастим профілем зміни показника заломлення. Торцями такого світловоду є напівпрозорі дзеркала – грані, що утворюються при сколу кристалу по площинам спайності. Щоби забезпечити потрібну високу концентрацію носіїв у активній області приладу, ділянки об'єму в структурі лазера, які розташовані по обом сторонам активної області, що має вигляд вузького каналу, роблять „напівізолюючими”. для чого значно збільшують їх електричний опір за допомогою бомбардування протонами.

Обмежена з торців напівпрозорими дзеркалами активна область стає у напівпровідниковому ЛД областю резонатору, в який при току інжекції, що перевищує деяке порогове значення i_n (рис. 6), генерується стимульоване випромінювання. При струмі інжекції, що менше порогового, напівпровідниковий лазер працює як СВД. Розміри активної області у ЛД настільки малі, що вихідна оптична потужність лазерного діоду, який виявився по суті звичайним світло випромінюючим діодом, в умовах дуже слабкого струму інжекції, яка не забезпечує виникнення стимульованого випромінювання, отримується меншою, ніж для СВД, і, як правило, не перевищує 5 мкВт/мА. Типове значення i (для ЛД, що застосовуються у світловодних системах зв'язку) при якому у приладі виникає лазерний ефект знаходиться в інтервалі 50...150 мА. Після досягнення струмом інжекції порогового значення вихідна оптична потужність лазерного діоду швидко зростає при збереженні хорошої лінійної залежності між вихідною оптичною потужністю та силою струму інжекції у порівняно широкій області значень струму інжекції.

Лазерні діоди можна характеризувати наступними властивостями:

відносно спрямованим кутовим розподілом випромінювання (кут при вершині конусу пучка світла, що виходить з активної області ЛД, може складати 10.....30°), який визначається модовою структурою пучка світла на виході з резонатору у діоді;

відносно малим часом відгуку при модуляції (0.01....1нс), який обумовлений сильною взаємодією світла та носіїв у процесі стимульованої рекомбінації;

не лінійністю співвідношення між робочим струмом та випромінюванням на виході. якщо сила робочого струму не досягає свого порогового значення, яке необхідне для виникнення стимульованого випромінювання;

вузьким спектром випромінювання (0.2...2нм) для багатомодового лазеру та менше 0.01 нм для одномодового).

ЛД може бути багатоходовим та одномодовим в залежності від своєї конструкції, що визначає форму та розміри області резонатору в діоді. При відносно великих розмірах області резонатору ЛД може генерувати 10....20 поздовжніх мод (для лазеру з піковою довжиною хвилі біля 0.8 мкм) або 5-6 мод (для лазеру з піковою довжиною хвилі 1.3 мкм), як показано на **рис. 7**. При довжині хвилі 0.85 мкм, що відповідає частоті ТГц, та ширині кожної додаткової лінії, наприклад 0.2 нм (що відповідає частоті 80 ГГц) загальна ширина спектру випромінювання лазеру буде складати менше 3-4 нм. Одномодові ЛД з малими розмірами резонатору генерують одну основну монохроматичну лінію (**рис. 8**), ширина якої може складати менше 0.1 нм.

Для забезпечення стабільності роботи лазеру їм необхідно керувати, а також забезпечувати захист від впливу занадто високих сигналів, різних пошкоджень у мережі живлення та паразитних електричних коливань.

Для вирішення цих задач часто використовують фото діод, який розміщують біля задньої грані лазеру і який детектує частину випромінювання ЛД. Фото діод виконує функцію зворотного зв'язку, і генерований їм фотострум подається у схему управління, яка підтримує постійність потужності випромінювання ЛД від впливу занадто високого сигналу, і схему захисту ЛД від впливів, що обумовлені, наприклад, пошкодженнями мережі живлення, паразитними електричними ефектами та ін.

Для підтримки постійності потужності випромінювання ЛД, наприклад, у випадку деградації лазеру при зміні температури оточуючого середовища необхідно, щоби блок регулювання змінював струм інжекції лазеру і пропорційно інтенсивності дестабілізуючого фактору, при цьому

$$\Delta i = \delta P / G_i,$$

де Δi - зміна струму інжекції, δP - зміна потужності випромінювання, G_i - підсилення яке потрібно для компенсації.

Лазери з періодичними структурами зворотного зв'язку. Для утворення позитивного зворотного зв'язку у лазерах з періодичною модуляцією оптичних характеристик необхідно, щоби хвиля, яка

розсіюється на неоднорідностях, змінювала напрямок розповсюдження на зворотній. Виникають дві зв'язані хвилі однакової частоти, що розповсюджуються у протилежних напрямках. Цей ефект реалізується якщо якийсь оптичний параметр середовища є промодульованим у напрямку розповсюдження хвилі поперіодичному закону з періодом λ , що задовольняє умові Бреґга

$$\Lambda = m\lambda_0 2n_{ef}$$

де m - порядок брегівського відбивання.

Такий Бреґівський резонатор на відміну від резонатору Фабрі-Перо характеризується тільки одним резонансом у смузі підсилення. Це й обумовлює його високу селективність. У додаток до цього у бреґівському резонаторі достатньо просто реалізується виведення випромінювання у площині, яка перпендикулярна напрямку його розповсюдження у хвилеводі. У ряду випадків це може привести до суттєвого спрощення конструкції випромінювача. До випромінювачів з періодичною модуляцією оптичних характеристик відносяться лазери з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ-лазери) та з розподіленими бреґівськими відбивачами (РБВ-лазери). У РЗЗ-лазерів модуляція середовища реалізується безпосередньо у активній області або у близько розташованому від неї шару (**рис. 9а**) У РБВ-лазерів модульовані ділянки розміщуються поза активної області (**рис. 9б**). Лазерні структури з періодичною модуляцією оптичних характеристик різняться порядком дифракції, що дорівнює цілому числу на півхвиль лазерного випромінювання, які вкладаються на періоді неоднорідності. Розподілені відбивачі мають вигляд діелектричних хвилеводів з гофрованою поверхнею. Періодичною неоднорідністю служить зміна товщини хвилеводу. Оскільки константа розповсюдження залежить від товщини хвилеводу, то зміна останньої є еквівалентною зміні його показника заломлення.

Зв'язок активної (генераторної) та пасивної (хвиле водної) компонент, що утворюють резонатор лазера, реалізується через перехідну область, параметром якої є коефіцієнт зв'язку C_0 . Випромінювання виводиться через зовнішній хвилевод. Необхідна умова високої диференціальної квантової ефективності у РБВ – лазерах – малі втрати у РБВ- областях і одночасно високоефективний зв'язок між зовнішнім та внутрішнім хвилеводами.

Для області 0.8...0.9 мкм застосовуються лазерні діоди та світловипромінюючі діоди на основі арсеніду та фосфіду галію. Для областей довжин хвиль біля 1.3 та 1.55 мкм, що відповідають

положенням мінімумів на кривій залежності втрат кварцу від довжини хвилі випромінювання, також були розроблені прилади, що генерують світло на цих довжинах хвиль. Інтервал довжин хвиль, що відповідає нульовій дисперсії, складає 1.26 1.31 мкм в залежності від типу та концентрації легуючої домішки. І до того ж цей інтервал співпадає з областю низьких страт у світловодах. Тому джерела, що випромінюють на довжинах хвиль порядку 1.3 мкм, дозволяють краще використати характеристики світловодів. Як приклад системи, що генерує світло на довжині хвилі 1.3 мкм можна навести систему *GaInAsP/InP*, що випромінюють в інтервалі від 1.1 до 1.6 мкм. Лазери на структурах *GaIn-AsP/InP* випромінюють на довжинах хвиль біля 1.55 мкм. Конструкція лазера, що складається з двох оптично зв'язаних резонаторів (C^3 лазер) показано на **рис. 10**. Її можна виготовляти шляхом сколювання плоских гетеро перехідних приладів вздовж площини їх спайності і за рахунок перестроювання цих двох частин при використанні такого лазера робоча частота може досягати 2 Гбіт/с. Було продемонстровано спроможність такого лазера передавати інформацію із швидкістю 420 Мбіт/с при роботі на довжині хвилі 1.55 мкм з хроматичною дисперсією $2.08 \cdot 10^{-3}$ пс/км. Конструкція такого лазера як видно з рисунку включає два стандартних резонатора Фабрі-Перо з двома окремими смугастими електродами Ці два лазери розташовані один від одного на відстані 5 мкм і мають приблизно однакові розміри (звичайно біля 125 мкм) та сильний оптичний зв'язок. Розроблені напівпровідникові ЛД з квантовими ямами. Також розробляються лазери і для більш довгохвильового діапазону.

Література:

1. Волноводная оптоэлектроника. Под ред. Т.Тамира.- М.: Мир, 1991.-575с.
4. Световодные датчики / Б.А.Красюк. О.Г.Семенов, А.Г.Шереметьев и др.- М.:Машиностроение, 1990.-256с.
6. Г.С.Свечников Интегральная оптика.- Киев: Наукова думка.- 1988.-166с.
8. Гауэр Дж. Оптические системы связи.-М.:Радио и связь, 1989.- 504.
10. Чео Волоконная оптика: Приборы и системы М.: Энергоатомиздат, 1988.-280с.