

# ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ ТА ДЖЕРЕЛА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

*У даній статті було розглянуто поняття оптичного випромінювання в напівпровідникових матеріалах та структурах на їх основі а також основні джерела випромінювання на прикладі DH та QW лазерів*

**Ключові слова:** Оптичне випромінювання, напівпровідник, лазери

## Abstract

*This article considers the concept of optical radiation in semiconductor materials and structures based on them, as well as the main sources of radiation on the example of DH and QW lasers*

**Keywords:** Optical radiation, semiconductors, lasers

## Вступ

Дослідження оптичних процесів у напівпровідникових матеріалах набуло широкого застосування у сучасній електронній техніці. Перший із цих принципів зумовлений зміною електрофізичних властивостей напівпровідників в результаті поглинається ним квантів світла. При цьому змінюється провідність напівпровідників або виникає ЕРС, що приводить зміни струму в колі, в якому ввімкнений фото чутливий елемент. Другий принцип оснований на генерації випромінювання в провіднику, зумовленого прикладеною до нього напругою і струмом, що протікає через світловипромінювальний елемент. Основні відомості про ці принципи та процеси які відбуваються всередині напівпровідників під дією світла, та деякі джерела оптичного випромінювання, зокрема лазери, буде описано в даній статті.

### Основні радіаційні процеси у напівпровідниках

Для початку аналізу властивостей напівпровідникових структур під дією опромінення варто розглянути основні процеси які відбуваються в напівпровідникових структурах і згадати основні фізичні явища.

Основні радіаційні процеси, що відбуваються в напівпровідникових матеріалах, показані на рисунку 1. Також на цьому рисунку продемонстровано реакцію діода зміщеного рп-переходу для кожного процесу. Поглинання створює пари електрон-дірка і є основним процесом, який використовується в напівпровідникових фотодіодах, де перехід зазвичай має зворотне зміщення.

При опроміненні напівпровідника ми маємо справу з явищем електролюмінесценції. Саме електролюмінесценція (або випромінювання електронно-діркової рекомбінації після електричної інжекції) виникає, коли рп-перехід зміщений вперед. Це випромінювання еквівалентне спонтанному випромінюванню і призводить до оптичного випромінювання в світлодіоді. Це рекомбінаційне випромінювання може також генерувати вимушене випромінювання, і, якщо посилення, отримане в переході, може подолати оптичні втрати (включаючи поглинання), генерація буде відбуватися в лазерному діоді. [1]

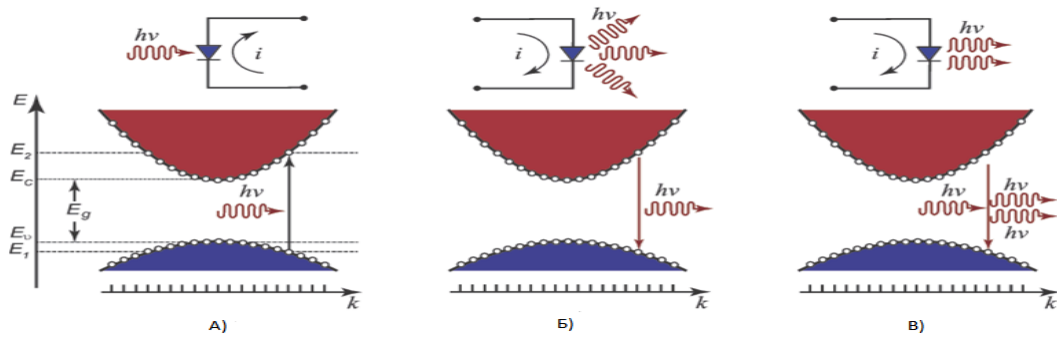


Рисунок 1 . Основні радіаційні процеси, що відбуваються всередині напівпровідникового рп-переходу. Генерація електронно-діркової пари шляхом поглинання (А) керує роботою фотодіода. Процеси електронно-діркової рекомбінації викликають спонтанне випромінювання (Б) у світлодіоді та вимушене випромінювання (В) у лазерному діоді.

Саме по собі збільшення електропровідності у напівпровідниках під дією оптичного випромінювання називається фотопровідністю. При безпосередньому освітленні напівпровідника в ньому проходить генерації електронно-діркових структур за рахунок дрейфу електронів з валентної зони в зону провідності. При цьому процесі питома електропровідність напівпровідника зростає на величину

$$\Delta\delta = e(\mu_n\Delta n_i + \mu_p\Delta p_i)$$

Звідки  $e$  – заряд електрона;  $\mu_n$  - рухливість електронів,  $\mu_p$  - рухливість дірок,  $\Delta n_i$  - концентрація генеруючих електронів  $\Delta p_i$  - концентрація генеруючих дірок.

Щоб відбувся процес переходу електрона з валентної зони у зону провідності енергія кванта світла має задовольняти умову

$$h\nu_{кр} \geq \Delta W$$

Звідси  $h$  – стала Планка,  $\Delta W$  - ширина забороненої зони напівпровідника,  $\nu_{кр}$  - критична частота електромагнітного випромінювання.

Критичній частоті  $\nu_{кр}$  відповідає гранична частота хвилі, тому цю величину можна описати даним рівнянням

$$\lambda_{кр} = \frac{c}{\nu_{кр}}$$

Звідки  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла.

Якщо довжина хвилі, більша за гранична, фотопровідність починає зменшуватися. Поглинання енергії світла в напівпровіднику приводить до появи вільних носіїв заряду, наслідком цього ефекту є зміна питомої електропровідності напівпровідника і як наслідок його внутрішній опір. Зміна опору напівпровідника під дією оптичного випромінювання має назву фоторезистивний ефект.

#### Крива світлового струму

Електрична інжекція в рп-перехід лазерного діода забезпечує інверсію концентрації носіїв заряду, необхідну для отримання генерації. Як і інші лазерні системи, коли ця концентрація стає достатньо великою, щоб посилення перевищувало втрати, стимульоване випромінювання домінує, і система досягає стаціонарного стану, коли вихідне світло збільшується лінійно зі швидкістю інжекції. [2]

Для напівпровідникового лазерного діода з робочою довжиною хвилі  $\lambda_0$  (в мкм) це можна виразити простим рівнянням, яке дає усталену вихідну потужність ( $P_0$  у Вт) як функцію струму,

прикладеного до діода. Рівняння для визначення стаціонарної вихідної потужності як функції струму, прикладеної до лазерного діода подано нижче

$$P_0 = R_d(i - i_t), \text{ де } R_d = \eta_d \frac{1.24}{\lambda_0} = \eta_e \eta_i \frac{1.24}{\lambda_0}$$

Цей зв'язок спостерігається у вигляді кривої світлового струму (LI) який показаний на рисунку 2. Значення струму, при якому лінія перетинає вісь  $x$  і створює нульове випромінювання, є пороговим струмом для генерації ( $i_t$ ). Нахил цієї кривої вище порогового значення відомий як диференціальна чутливість ( $R_d$ ) і зазвичай виражається в одиницях Вт/А або мВт/мА. Ця диференціальна чутливість визначається зовнішньою диференціальною квантовою ефективністю ( $\eta_d$ ), яка по суті описує, наскільки ефективна лазерна система у перетворенні інжектованих електронів у вихідні фотони.

Ефективність складається з внутрішньої квантової ефективності ( $\eta_i$ ), що є відношенням генерованих фотонів (всередині переходу) до інжектованих електронів та ефективності вилучення ( $\eta_e$ ), яка пов'язана із зовнішніми втратами. Рівняння подане вище можна помістити в контекст із узагальненим обговоренням підсилення лазера від критичних компонентів лазера, де коефіцієнт посилення був заданий як добуток різниці населених пунктів ( $\Delta N$ ) та перерізу переходу ( $\sigma$ ).  $\Delta N$  по суті  $i$  поділено на об'єм переходу ( $V$ ), тоді як  $\eta_i$  грає роль  $\sigma$ .  $\eta_e$  враховує втрати, пов'язані з резонатором Також  $i/V$  можна виразити як густину струму  $J$  поділено на товщину активної області ( $l$ ).

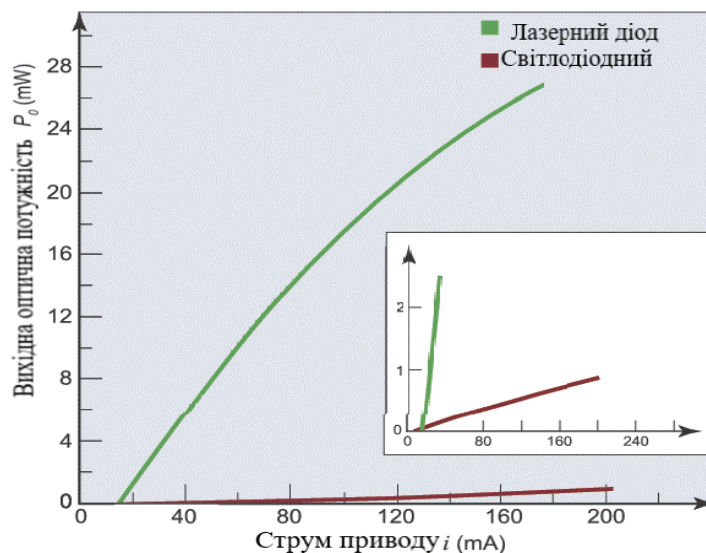


Рисунок 2. Репрезентативні криві LI для світлодіода та лазерного діода, що працюють на довжині хвилі 1,6 мкм, що складається з InGaAsP / InP кількох структур QW. Вставка демонструє розгорнутий вигляд.

Рівняння для визначення стаціонарної вихідної потужності також можна використовувати для опису вихідної потужності світлодіода, встановивши  $i_t = 0$  оскільки не існує порога для спонтанного випромінювання),  $R_d$  і  $\eta_d$  замінюються на чутливість ( $R$ ) і зовнішній ККД ( $\eta_{ex}$ ). На малюнку 2 показана крива LI для світлодіода та лазерного діода. Незважаючи на однакову архітектуру, нахил кривої лазерного діода значно вищий, що вказує на більше значення  $d$ .

#### Джерела оптичного випромінювання

Напівпровідникові оптичні випромінювачі можна розділити на дві групи:

- Випромінювачі, основані на принципі спонтанної інжекційної електролюмінесценції
- Оптичні генератори когерентного випромінювання (лазери)

Напівпровідниковий лазер – це випромінювальний напівпровідниковий прилад (генератор випромінювання), який перетворює електричну енергію або енергію некогерентного випромінювання. Процес виникнення вимушеного випромінювання проілюстровано на рисунку 3. [3]

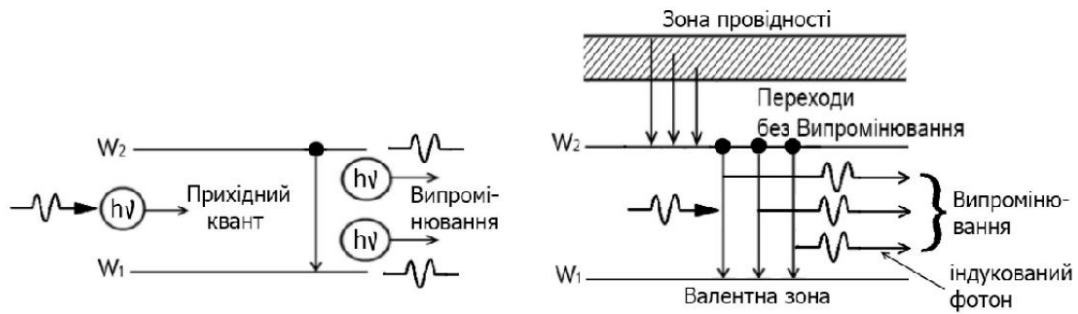


Рисунок 3. Виникнення вимушеного випромінювання: для одного та для групи атомів

Під час вимушеної рекомбінації формується когерентне випромінювання, що є принциповою відмінністю напівпровідникових лазерів від світлодіодів. Створивши умови для вимушеної рекомбінації, можна керувати випромінюванням збуджених атомів напівпровідника за допомогою електромагнітних хвиль і таким чином підсилювати та генерувати когерентне випромінювання. Для роботи лазера необхідне переважання вимушеної випромінювальної рекомбінації над поглинанням квантів світла. Переважання випромінювання над поглинанням залежить від співвідношення в кристалі напівпровідника збуджених та не збуджених атомів. Такий стан напівпровідника називають станом з інверсною населеністю.

Метою створення лазерно-діодних структур є мінімізація порогового струму ін'єкції, що досягається за рахунок зменшення розмірів активної області. У напрямку шарів це досягається за допомогою DH або QW структур. [4]

Засоби для бічного утримання (в площині з'єднання), а також метод створення резонаторної порожнини специфічні для конфігурації випромінювання.

Гранично випромінюючі лазери виробляють промінь в площині області з'єднання. Існує два методи використовуються для визначення бічного утримання посилення.

Перший метод, відомий як направляюче-підсилення, використовує методи виготовлення, щоб обмежити бічний ступінь посилення, наприклад, вузький електричний контакт, який мінімізує область, де тече струм.

Другий метод використовує направляючий-показчик, де зміна індексу заломлення в бічному напрямку створює оптичне обмеження у вигляді хвилеводу. Лазерна порожнина в крайовому випромінюючому лазері може бути виготовлена одним з двох способів.

Перший спосіб полягає в розщепленні кристала напівпровідника нормалі до площини з'єднання. Великий показник заломлення напівпровідника дозволяє цим поверхням функціонувати як дзеркала з достатньою відбивною здатністю (~ 30%) для створення еталону. Таким чином, довжина активної області p-n перетину стає довжиною резонатора.

Другий тип використовує методи виготовлення для отримання розподіленого зворотного зв'язку (DFB) в кристалі або для створення розподілених структур відбивача Брага (DBR) на кінцях кристала.

Поверхнево-випромінюючі лазери виробляють промінь в напрямку, перпендикулярному до області з'єднання. Широко використовувана структура відома як вертикальна порожнина поверхні, що випромінює лазер (VCSEL). Тут дзеркала у вигляді DBR покривають активний шар, що призводить до вертикальної порожнини, що породжує промінь, який поширюється нормально на площину з'єднання. Оскільки довжина підсилення середовища визначається товщиною активної області, залучаються набагато менші підвищення в порівнянні з крайовими випромінюючими лазерами. В результаті дзеркальні відбиття повинні бути дуже високими. Бічне закріплення області посилення здійснюється за допомогою діелектричних матеріалів, які звужують площу поперечного перерізу потоку струму. Нижчий оптичний приріст для VCSEL, як правило, призводить до менших вихідних потужностей у

порівнянні з граничними випромінюючими лазерами. Порівняння структури та оптичного випромінювання крайових та поверхневих лазерних діодів продемонстровано на рисунку 4.

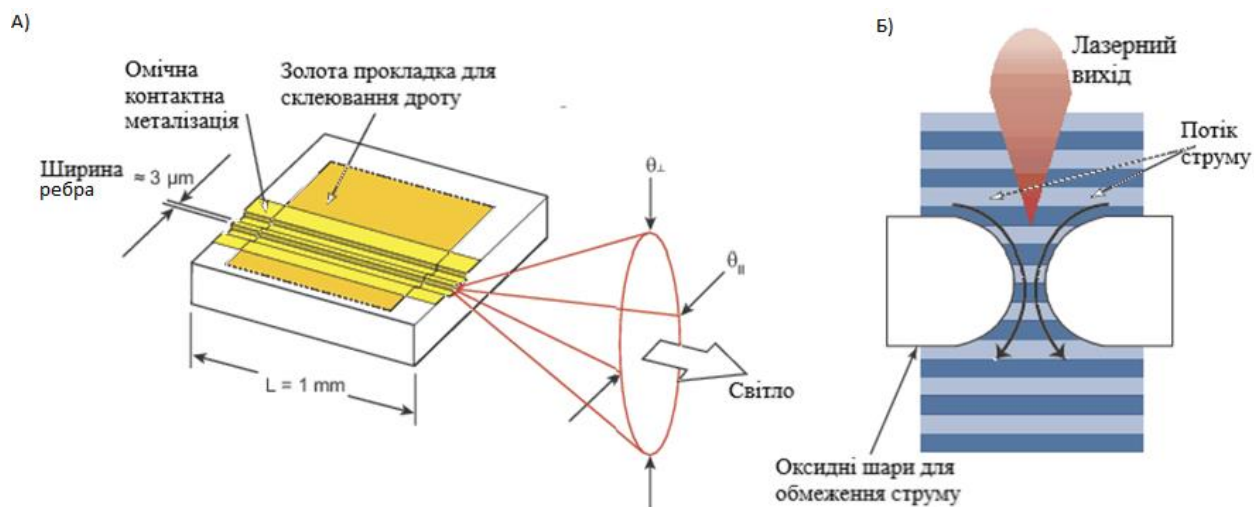


Рисунок 4. Структури та оптичне випромінювання крайових (А) та поверхневих (Б) лазерних діодів

### Висновок

У даній статті було розглянуто поняття оптичного випромінювання в напівпровідникових матеріалах, та основні формули для пояснення цих процесів. Також було розглянуто деякі джерела оптичного випромінювання, зокрема лазерні структури ДН та QW, розглянуті їх структури та принципи роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Electronic Polymer Composite / P.Huisheng, S. Xuemei, W. Wei, F. Xin. // Polymer Materials for Energy and Electronic Applications. – 2017. – С. 107–149.
2. R.L.Donofrio. DISPLAYS / R.L.Donofrio. // Encyclopedia of Modern Optics. – 2005. – С. 366–376.
3. Щупляк Н.М. Основи електроніки і мікроелектроніки / Щупляк Н.М.. – Україна, 2014. – 443 с.
4. LASER DIODE TUTORIAL [Електронний ресурс] // Thor Labs. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9\\_PF.cfm?ObjectGroup\\_ID=1832](https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=1832).

**Ільчук Дмитро Русланович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Demabels@gmail.com

**Осадчук Олександр Володимирович** — докт. техн. наук, проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, osadchuk.av69@gmail.com

**Ilchuk Dmytro Ruslanovych** - Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Demabels@gmail.com

**Osadchuk Olexander Volodimirovich** - Dr. tech. Sciences, Prof., Head Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, osadchuk.av69@gmail.com