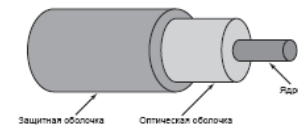
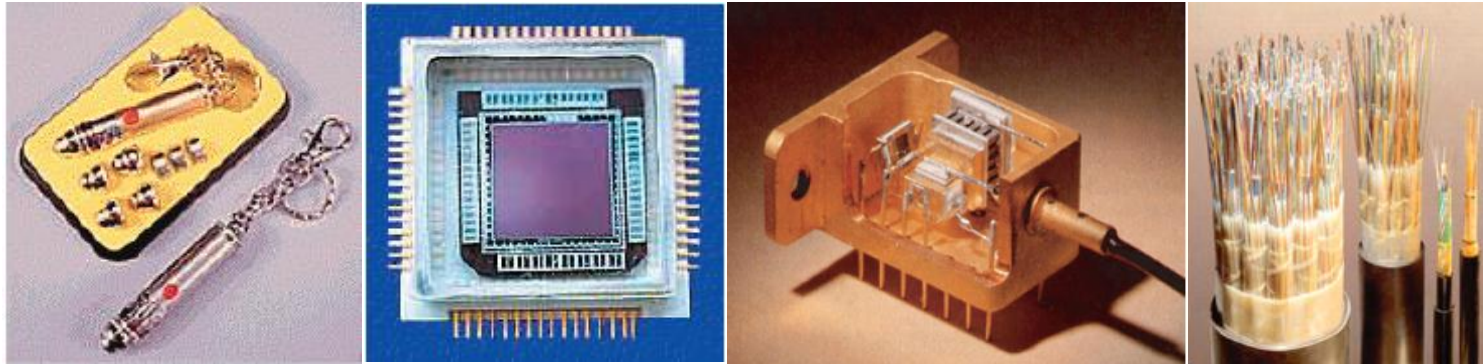


**Іванова В.В.**

# Лекції з оптоелектроніки

## *Тема 1. Вступ. Предмет та визначення оптоелектроніки*

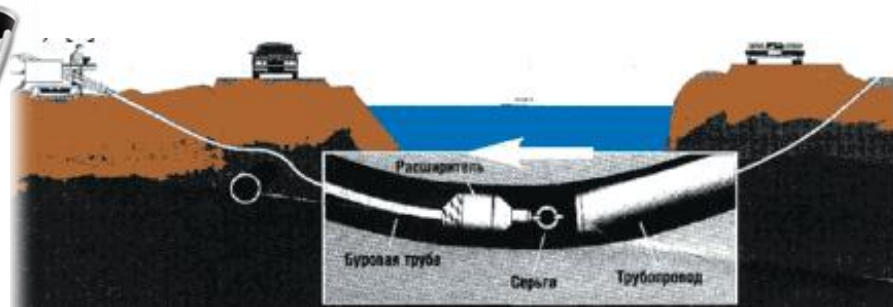
- Мета та задачі курсу. Основна література
- Основні терміни. Історичний огляд розвитку оптоелектроніки
- Визначення «оптоелектроніки», її основні напрямки. Класифікація оптоелектронних пристроїв. Їх призначення та використання



## Нобелівські премії з фізики за останні 15 років

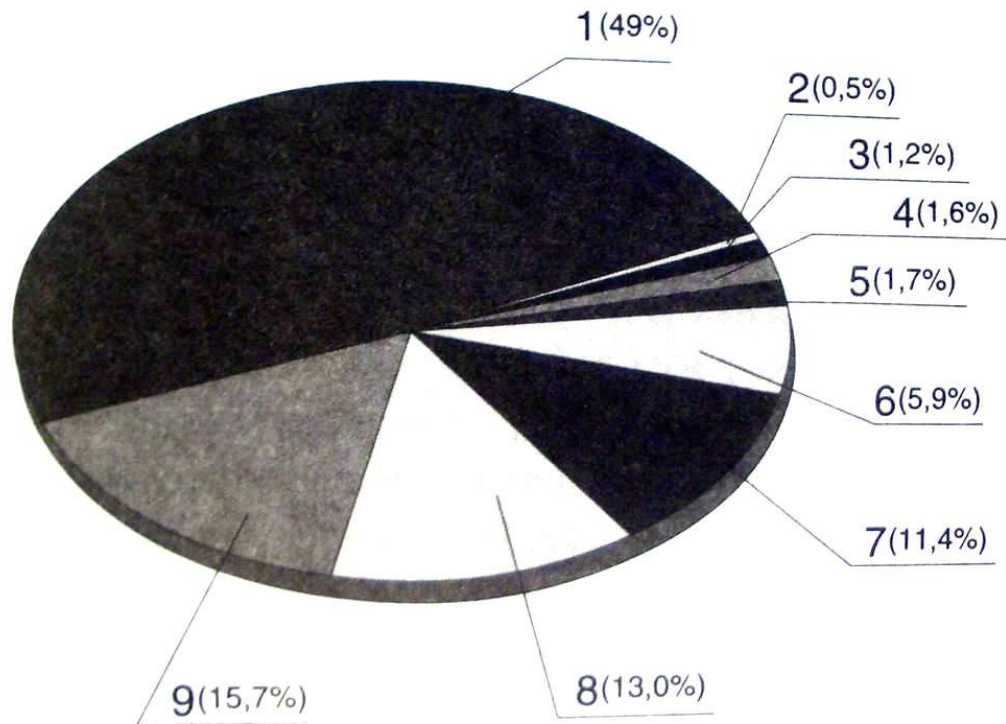
Рік	Лауреати	Дослідження
2000	<u>Ж.І. Алфьоров</u> , <u>Герберт Кремер</u> , <u>Джек Кілбі</u>	«За розробки в напівпровідниковій техніці», «За дослідження в області інтегральних схем».
2002	<u>Раймонд Девіс молодший</u> , <u>Масатосі Косіба</u>	«За створення нейтринної астрономії».
2005	<u>Рой Глаубер</u> , <u>Джон Голл</u> , <u>Теодор Генш</u>	«За внесок в квантову теорію оптичної когерентності; за внесок у розвиток лазерної високоточної спектроскопії і техніки прецизійного розрахунку світлового зрушення в оптичних стандартах частоти»
2009	<u>Чарлз Куен Као</u> , <u>Віллард Бойл</u> ,	«За революційні відкриття стосовно передачі світла <u>оптоволоконними лініями</u> для оптичного зв'язку», «За винахід напівпровідникової схеми для отримання зображень — <u>ПЗЗ-сенсора</u> »
2010	<u>Гейм</u> , <u>Новоселов</u>	«За експерименти з двовимірним матеріалом <u>графеном</u> ».
2012	<u>Серж Арош</u> , <u>Девід Вайнленд</u>	«За основоположні експериментальні методи, які уможливають вимірювання та маніпулювання окремими квантовими системами» <sup>1</sup>
2014	<u>Акасакі Ісаму</u> , <u>Аmano Хіроші</u> , <u>Накамура Шюджі</u>	«За винахід ефективних блакитних <u>світлодіодів</u> , що привели до появи яскравих та енергозберігаючих білих джерел світла» <sup>1</sup>

**Метою** курсу є вивчення фізичних основ одночасного використання оптичних та електронних методів прийому, обробки, передачі, зберігання та відображення інформації, елементної бази оптоелектроніки, а також принципів побудови та функціонування оптикоелектронних систем.





## Розподіл оптоелектронної продукції на сучасному ринку (за вартісною часткою)



**Програма США  
«Defence Science and  
Technology Strategy»  
передбачає вирішення  
таких ключових проблем:**

- розробка неохолоджуваних FPA матриць, гнучких ІЧ-матриць
- розробка монолітних індикаторних табло та екранів великого формату, а також стереоскопічних систем
- розробка монолітних оптоелектронних приймально-передавальних систем для ВОЛЗ, т.н. солітонних систем з швидкістю >100 Гбит/с.

1 — індикаторні компоненти; 2 — пасивні оптичні компоненти; 3 — оптичні з'єднувачі;  
4 — сонячні батареї; 5 — ВОЛЗ; 6 — гібридні прилади; 7 — ФП; 8 — оптичні волокна;  
9 — інші компоненти

## Рекомендована література

### Основна література

- Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника – М.: Высшая школа, 2001.- 573 с.
- Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников
- Пеерель В.И., Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников
- Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 книгах/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
- Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника – М.: Техносфера, 2006.- 592 с.
- Находкін М.Г., Сизов Ф.Ф. Елементи функціональної електроніки – К.: ВПФ УкрІНТЕІ, 2002.-324 с.

### Додаткова література

- Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах: В 2 томах/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1981.**
- Суэмацу Я., Катаока С. и др. Основы оптоэлектроники/ Пер. с яп. – М.: Мир.,1988.- 288 с.
- Козанне А., Флере Ж., Метр Г., Руссо М. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации / Пер. с франц. – М.: Мир, 1984.- 504 с.
- Справочник по приемникам оптического излучения / Под ред. Л.З. Криксунова, Л.С. Кременчугского.- К.: Техніка, 1985. – 216 с.
- Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. – М.: Наука, 1970. – 296 с.
- Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений/ Под ред. Б. Кейзана. Пер. с англ.. – М.: Мир, 1980. Т.3.
- Фотоника./ Под ред. М. Балкански, П. Лалемана. Пер. с англ. и франц. – М.: Мир, 1978.
- Техника оптической связи: Фотоприемники. Пер. с англ. / Под ред. У.Тсанга — М.: Мир.,1988.- 526 с.

## *Після вивчення дисципліни студент має ЗНАТИ:*

- *Фізичні основи взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, оптичні і фотоелектричні явища в твердих тілах, зокрема, напівпровідниках, принципи роботи, особливості і основні характеристики та області застосування приладів і методів оптоелектроніки.*
- *Оптичні характеристики речовини.*
- *Фотоелектричні явища в кристалах.*
- *Закони збереження та правила відбору при електрон-фотонній взаємодії в напівпровідникових системах.*
- *Види напівпровідників, закони формування їх твердих розчинів.*
- *Теорія р-п переходу, гетероструктури, електронне та оптичне обмеження.*
- *Квантоворозмірні структури в оптоелектроніці.*
- *Основні матеріали оптоелектроніки.*
- *Види та принципи роботи джерел випромінювання: світлодіодів, напівпровідникових лазерів.*
- *Фізичні ефекти, які застосовуються для реєстрації оптичного і теплового випромінювання.*
- *Принципи побудови приймачів випромінювання з зовнішнім і внутрішнім фотоефектом.*
- *Методи і види модуляції світла.*
- *Принципи побудови і функціонування випромінювальних і світлоклапанних дисплеїв.*

## *А також УМІТИ:*

*Застосовувати набуті знання у розрахунку і застосуванні оптоелектронних приладів і систем, а саме:*

- *Розраховувати оптичні характеристики речовини.*
- *Розраховувати склад напівпровідникових твердих розчинів; будувати зонні діаграми одинарних та подвійних гетеропереходів.*
- *Виконувати розрахунок концентрацій носіїв у власних і домішкових напівпровідниках.*
- *Здійснювати математичне моделювання процесів генерації, рекомбінації, дифузії та дрейфу носіїв заряду в напівпровідниках, розрахунок часів життя, коефіцієнтів дифузії, дифузійних довжин та розподілу концентрацій нерівноважних носіїв з метою визначення основних параметрів джерел і приймачів випромінювання.*
- *Виконувати розрахунок квантового виходу, робочих параметрів, ККД, модової структури, спектральних характеристик напівпровідникових лазерів. Виконувати розрахунки основних параметрів і характеристик фотодетекторів.*
- *Набуті знання і навички дозволять студентам в повній мірі використовувати в своїй подальшій роботі всі сучасні досягнення оптичної електроніки для проведення фізичного експерименту, обробки, зберігання і аналізу інформації.*

## Історичний огляд

- 1864 р. – Джеймс Клерк Максвелл сформулював рівняння електродинаміки, які визначили електромагнітну природу світла.
- 1873 р., 1888 р. – У. Сміт відкрив внутрішній та О. Г. Столетов – зовнішній фотоефекти.
- 1900 р. – Планк пропонує гіпотезу про дискретність енергетичних станів осцилятора (основу квантової теорії).
- 1905 р. – А. Ейнштейн, розвиваючи ідею Планка, пропонує гіпотезу про квантову природу світла, існування фотонів з енергією  $E=h\nu$  та імпульсом  $p=h\nu/c$ .
- 1916 р. - А. Ейнштейн сформулював умови вимушеного випромінювання.
- 1940 р. – В. О. Фабрикант сформулював принцип посилення випромінювання при проходженні його через речовину.
- 1947 р. – Д. Габор відкрив голографію.
- 1954 р. - О. М. Прохоров и М. Г. Басов, Ч. Таунс створили зразок мазеру.
- 1956 р. – відкриття інжекційної люмінесценції.
- 1960-1972 рр.. – створення газових, твердотільних та н/п лазерів.
- 1970 г. – створення різних типів світловипромінюючих діодів (СВД).



## Історичний огляд *А за довго до цього...*

*Мікени*



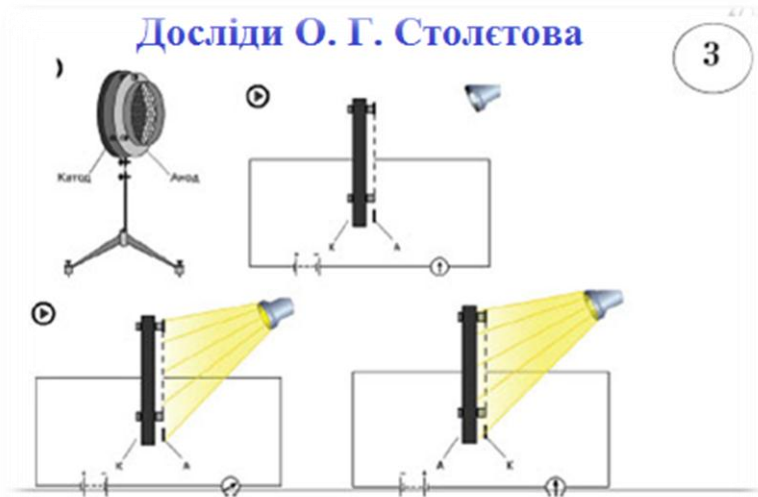
XIII—XII вв. до н. е.



Клітемнестра вбиває Агамемнона

Посмертна маска, відома як «маска Агамемнона».  
Знахідка з Мікенської гробниці №5, зроблена Генріхом Шліманом у  
1876 році. Національний археологічний музей в Афінах.

## Історичний огляд



Яким законам  
підпорядковується  
фотоефект?

1. Кількість електронів, які вириваються світлом з поверхні металу за 1 секунду, прямо пропорційна поглинутій за цей час енергії світлової хвилі.
2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає з частотою світла та не залежить від його інтенсивності.

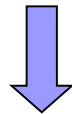
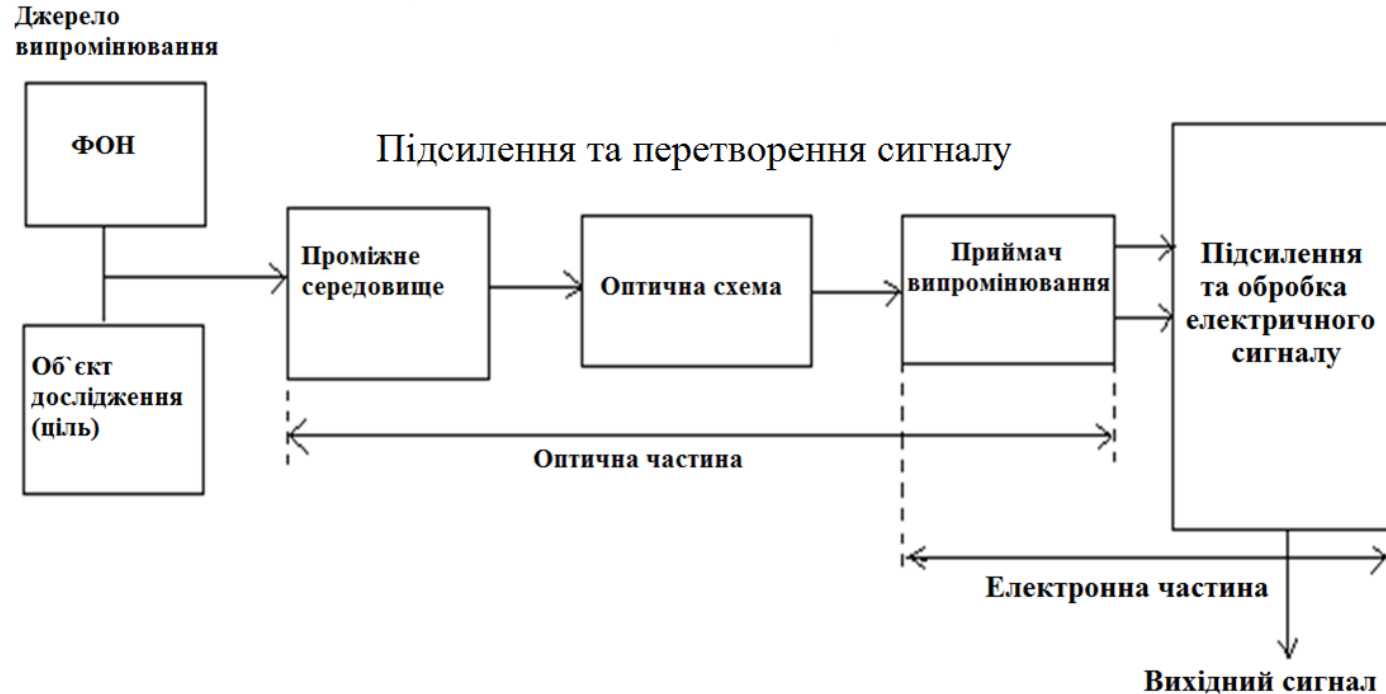
## Історичний огляд



25 липня 1907 професор Петербурзького технологічного інституту Борис Львович Розінг (1869-1933) подав заявку на патент "Спосіб електричної передачі зображень на відстань", тобто спосіб використання трубки Брауна (лауреата Нобелівської премії 1909 року) для прийому телевізійного зображення. З 1897 року він почав дослідження з передачі зображення на відстань і прийшов до висновку, що передавати зображення вдасться тільки за допомогою електронно-променевої трубки, яка була відома з кінця XIX століття, а також за допомогою зовнішнього фотоефекту, відкритого Столетовим.

9 травня 1911 Розінгом було продемонстровано дослід: на мініатюрному екрані електронно-променевої трубки з'явилося нерухоме зображення з чотирьох блідих смуг на чорному фоні у вигляді ґратки.

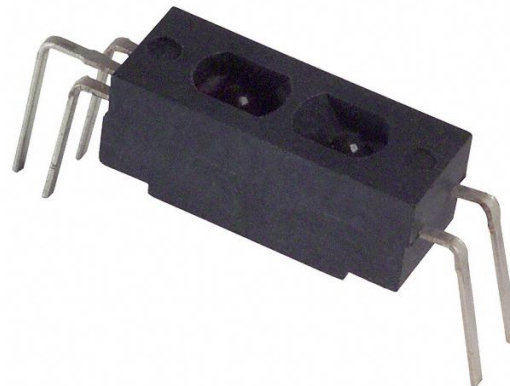
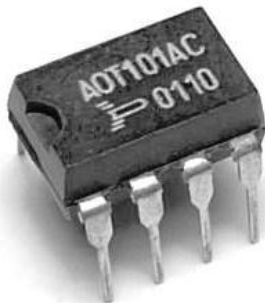
## Оптико-електронний прилад



- Пеленгатори;
- Далекоміри;
- Телевізійні системи;
- Оптико-фізичні прилади (фотометри, спектрометри...).

## Визначення оптоелектроніки

*Оптоелектроніка – галузь науки (фізики) і техніки, в якій вивчаються і застосовуються ефекти взаємного перетворення електричних і оптичних сигналів в речовині, головним чином в твердих тілах, для одночасного використання оптичних і електричних методів прийому, передачі, обробки, зберігання і відображення інформації*





## Елементна база оптоелектроніки:

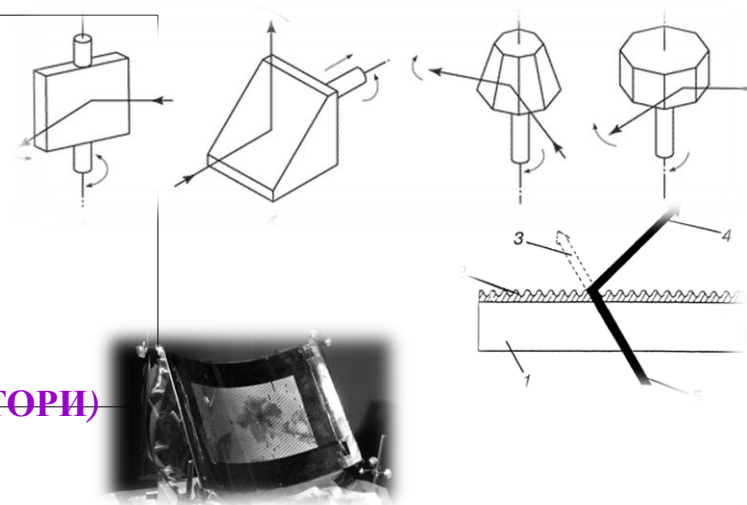
- **ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ (КОГЕРЕНТНІ ТА НЕКОГЕРЕНТНІ)**



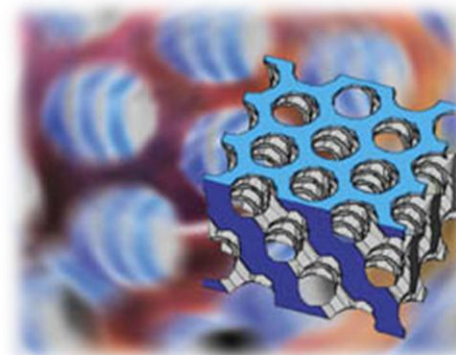
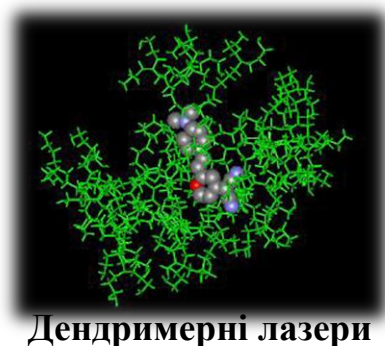
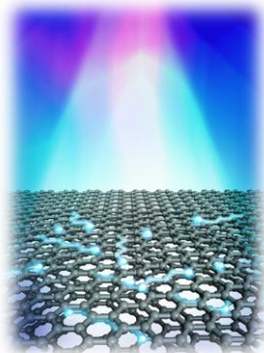
- **ПРИЙМАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

- **ПРИСТРОЇ КЕРУВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

- **ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ (ІНДИКАТОРИ)**

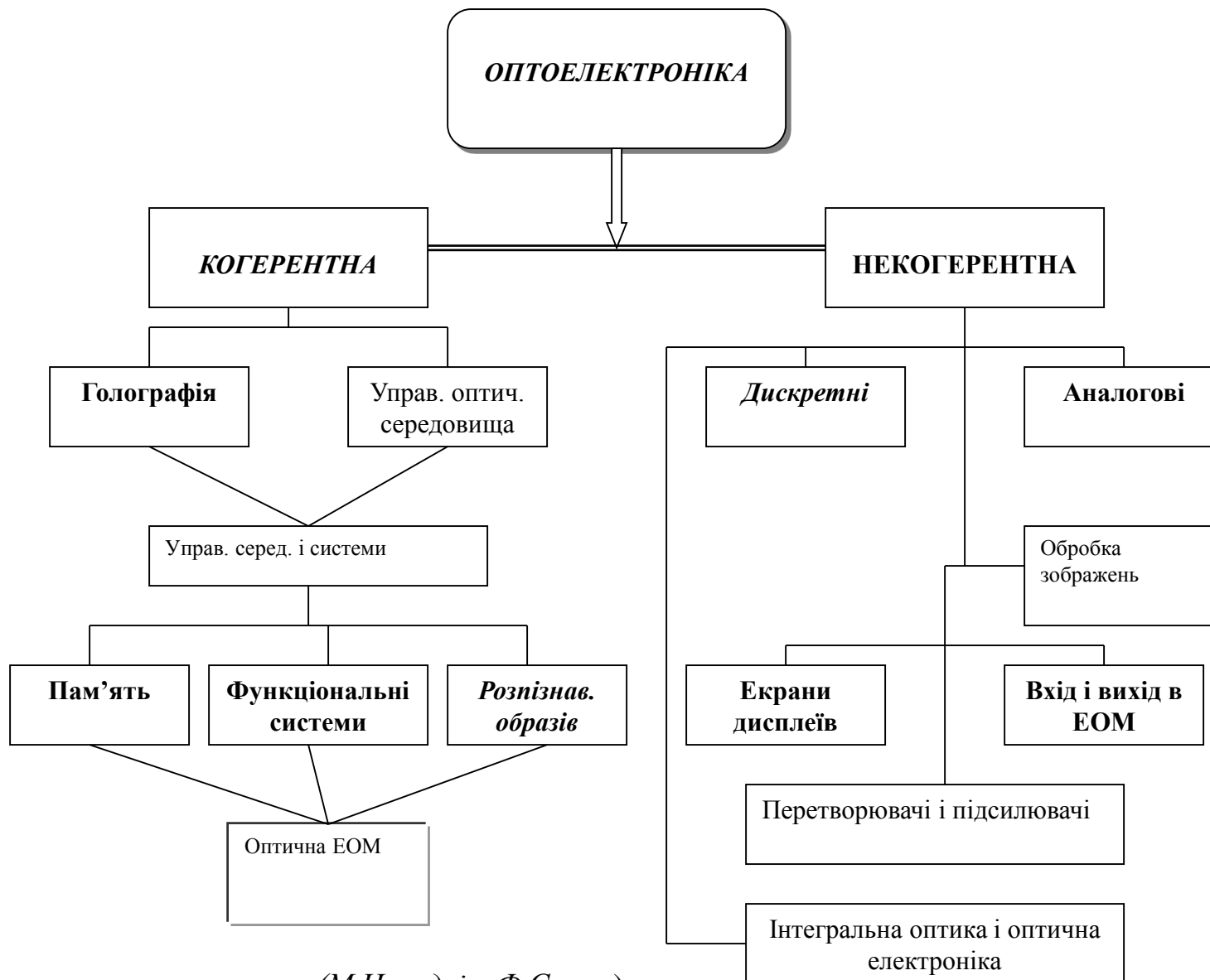


- **ОПТИЧНІ КАНАЛИ ЗВ'ЯЗКУ ТА ОПТИЧНІ АКТИВНІ СЕРЕДОВИЩА (світловоди та елементи узгодження; оптрони; середовища (постійні і реверсивні), які запам'ятовують)**





## Застосування пристроїв когерентної і некогерентної оптоелектроніки



(М.Находкін, Ф Сизов )

## Застосування пристроїв когерентної і некогерентної оптоелектроніки

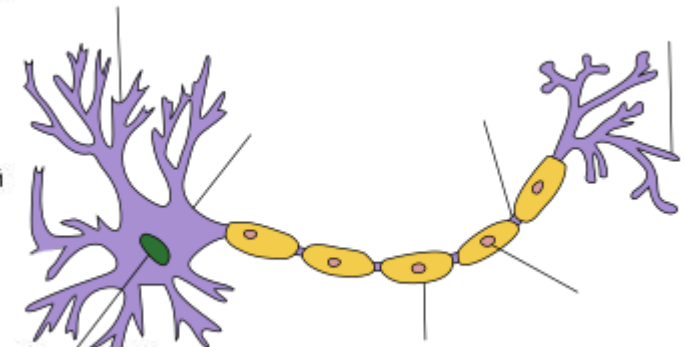
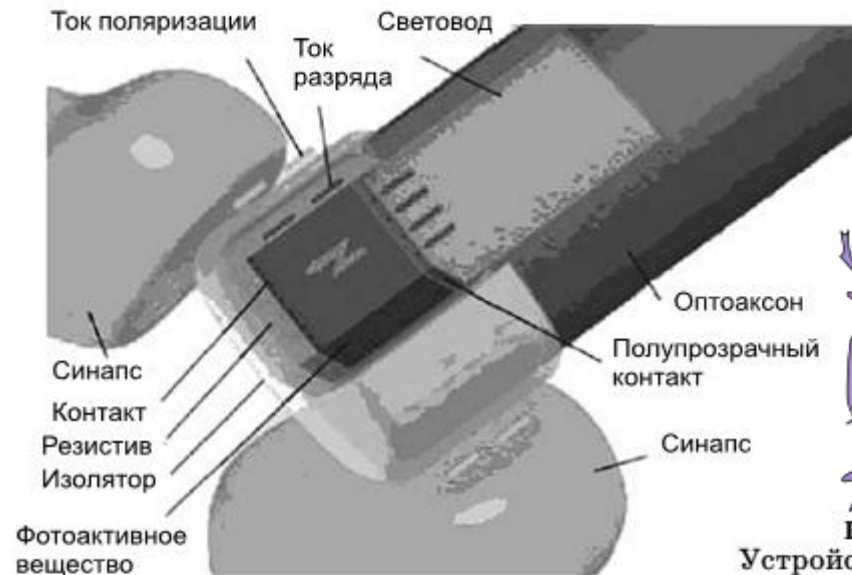


Рис. 10.21  
Устройство оптоаксона

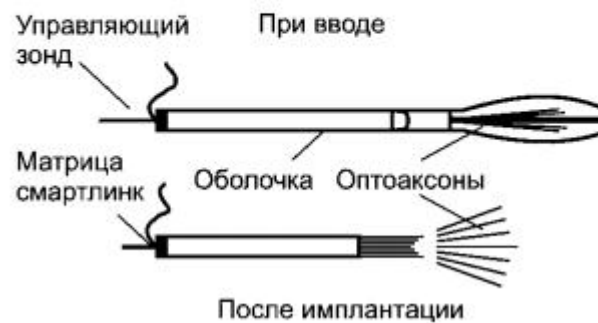
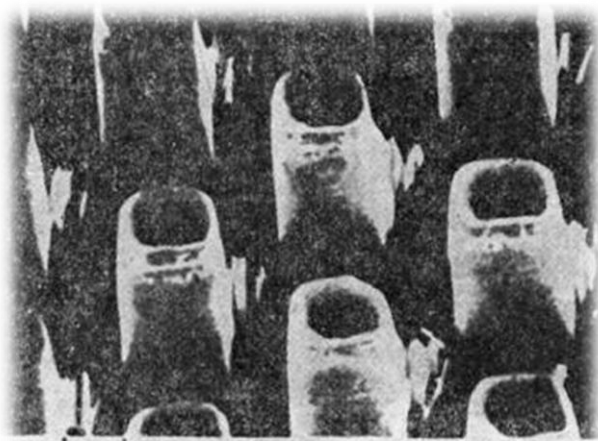


Рис. 10.22  
Устройство нейроинтерфейса

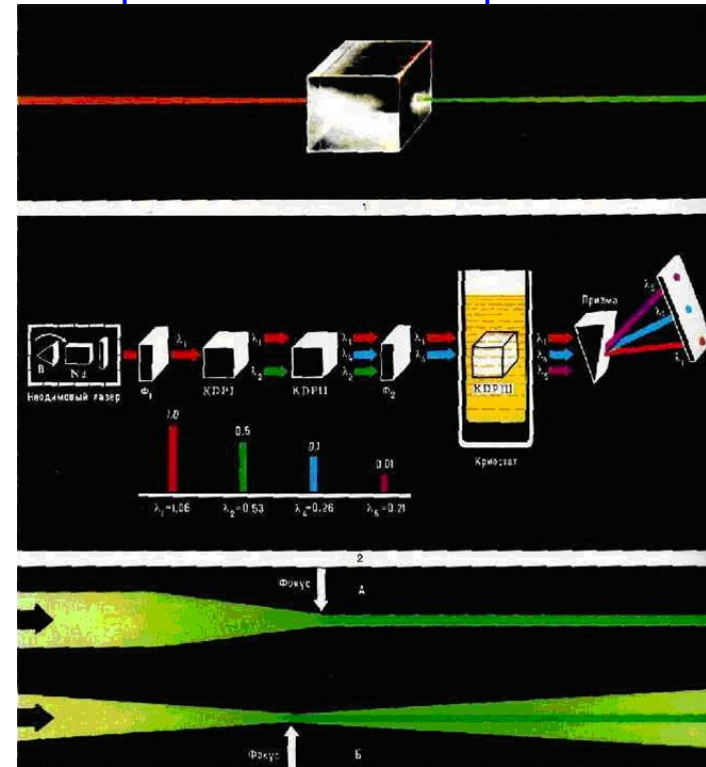
## Застосування пристроїв когерентної і некогерентної оптоелектроніки



Гратка оптичних бістабільних мікрорезонаторів GaAs - елемент процесора повністю оптичного комп'ютера. Характерний розмір  $\sim 2$  мкм.



Ейдофор



**Мал.1.** Подвоєння частоти світла у кристалі ніобату барію. Потужний промінь на неодимовому склі з довжиною хвилі  $\lambda=1,06$  мкм збуджує у кристалі випромінювання подвоєної частоти (другу гармоніку,  $\lambda=0,53$  мкм). Зелений колір - натуральний колір другої гармоніки; випромінювання, яке не бачить око від неодимового лазера, реєструється на спеціально сенсibiliзованій кольоровій плівці як червоне.

**Мал. 2.** Схема генератора п'ятої оптичної гармоніки. Випромінювання лазера на неодимовому склі ( $\lambda=1,06$  мкм), який працює у режимі модульованої добротності, збуджує ланцюг з трьох нелінійних кристалів KDP, у яких послідовно відбуваються: подвоєння частоти (на виході кристалу KDP I виникає випромінювання з  $\lambda=0,53$  мкм), ще одне подвоєння частоти (на виході KDP II ( $\lambda=0,26$  мкм), складання частот неодимового лазера та четвертої гармоніки. У результаті на виході кристалу KDP III виникає інтенсивне ультрафіолетове випромінювання з  $\lambda=0,21$  мкм. Кольори на малюнку умовні, четверта та п'ята гармоніки лежать у ультрафіолетовій області.  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  - фільтри, В - призма, яка обертається.

**Мал.3.** Промінь аргонного лазера, сфокусований на оптичному склі (вид збоку). А - самосфокусований пучок світла після фокальної точки практично не змінює свій діаметр на відстані порядку декількох см (власний хвилеводний канал); В - пучок розходить за фокальною точкою, але видно область сильного світлового поля, яке зберігається.



## Ключові дані світового ринку оптоелектроніки і фотоніки



## Тема 2. Елементи фізики випромінювання. Взаємодія електромагнітного випромінювання з атомними системами.

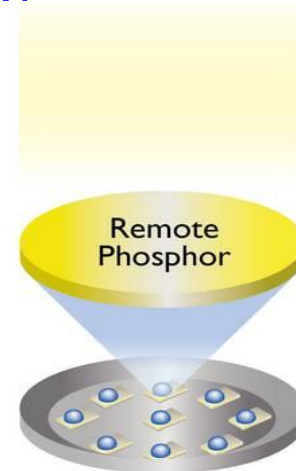
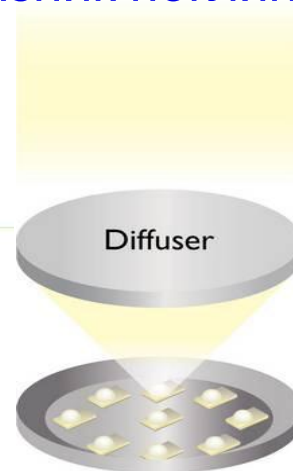
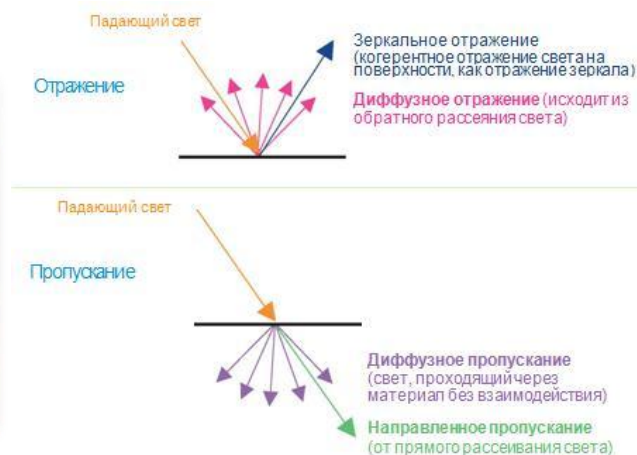
2.1. Оптичне випромінювання

2.2. Енергетичний стани атомів та молекул (самостійно) 

2.3. Квантові переходи. Спонтанне та вимушене випромінювання.  
Коефіцієнти Ейнштейна

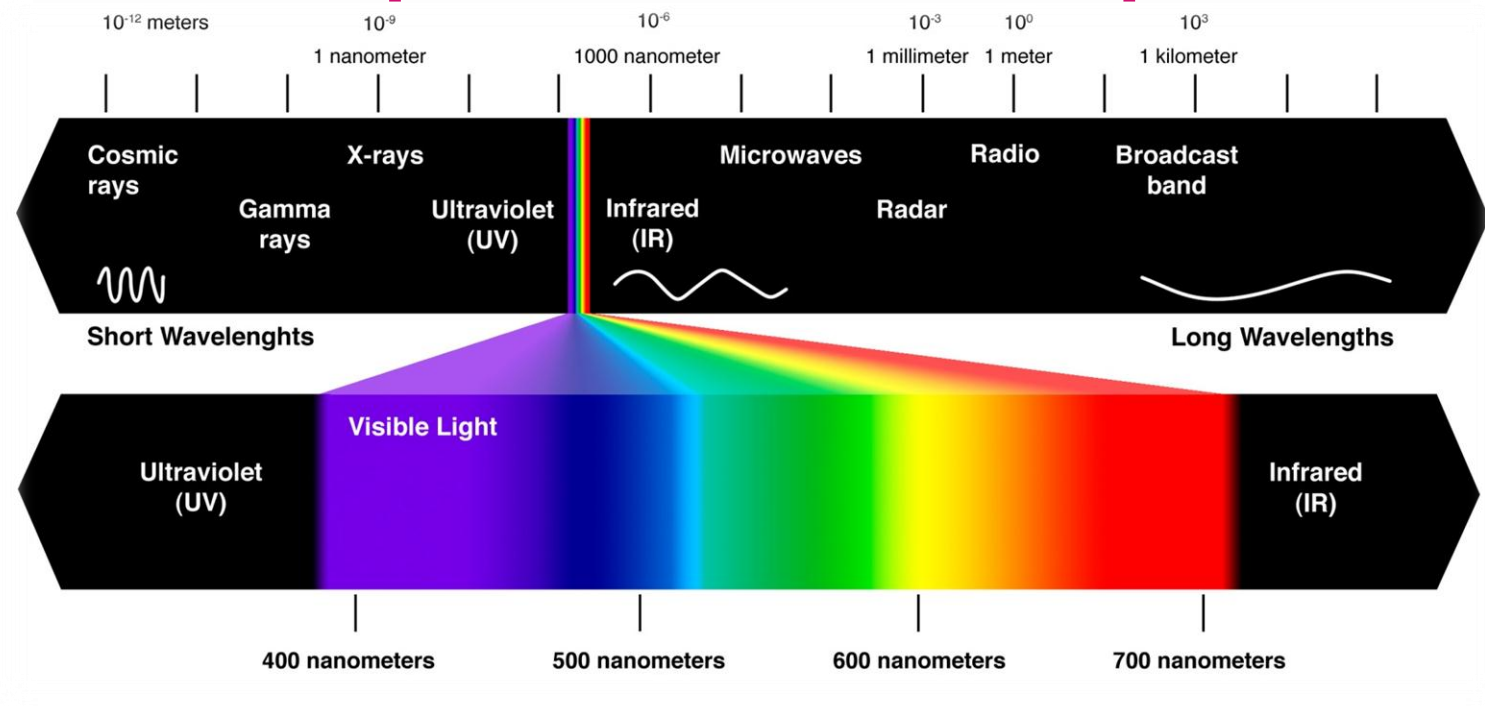
2.4. Спектри випромінювання. Розширення спектральних ліній  
(самостійно) 

2.5. Оптичні характеристики речовини (комплексний показник заломлення, коефіцієнт екстинції, показник поглинання)



## 2.1 Оптичне випромінювання

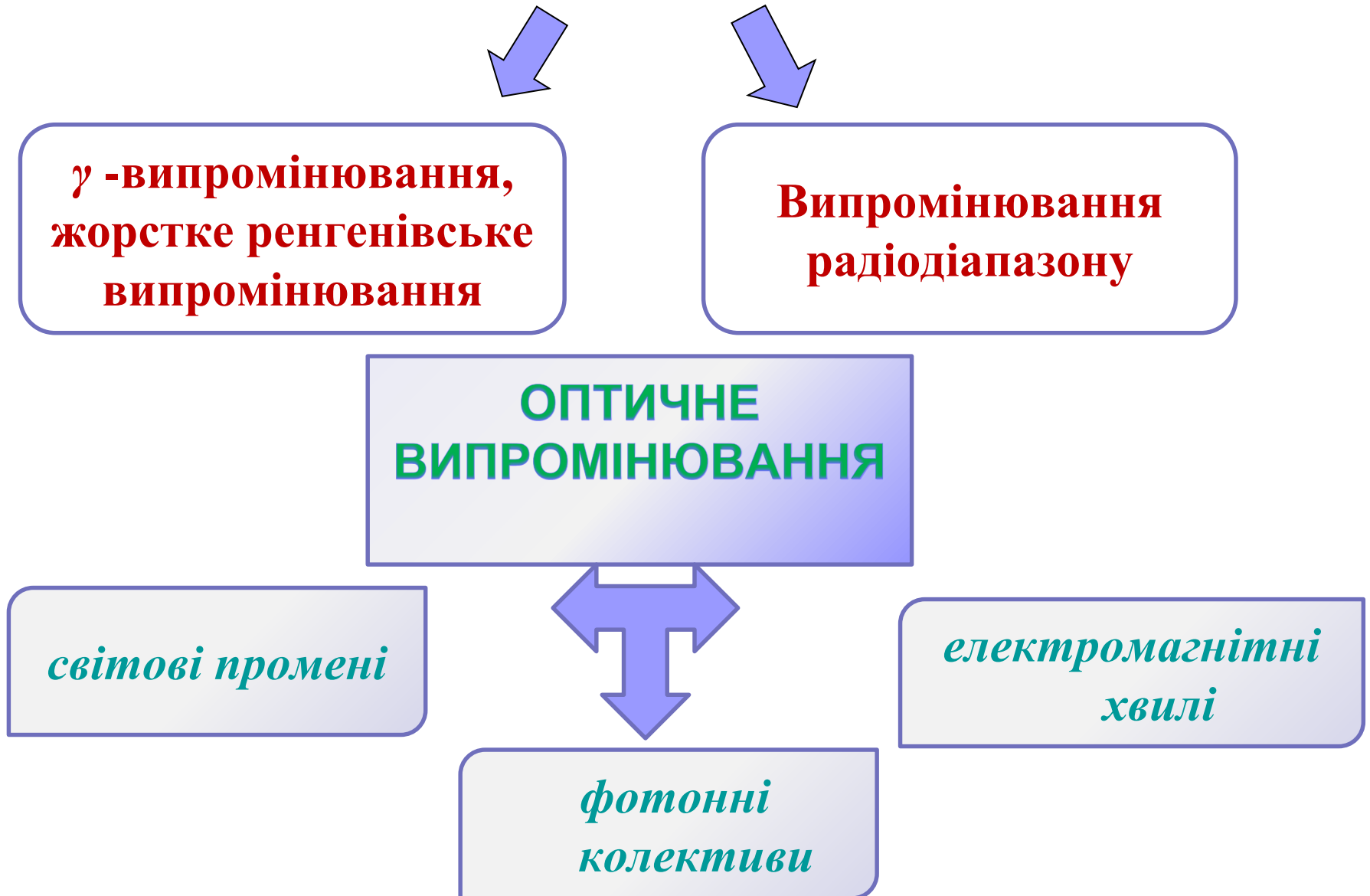
# Шкала електромагнітного випромінювання



- *Оптичний діапазон*  $10^{17} - 10^{11} (10^{12})$  Гц
- *Видиме світло*  $10^{15} - 0,5 \cdot 10^{14}$  Гц (0,38 – 0,78 мкм)
- *ІЧ випромінювання*  $10^{14} - 10^{12} (10^{11})$  Гц
- *Т- випромінювання (ТГц діапазон)*  $0,1 - 10$  ТГц

## 2.1 Оптичне випромінювання

### *Квантово-хвильовий дуалізм*



## 2.3. Квантові переходи. Спонтанне і вимушене випромінювання. Коефіцієнти Ейнштейна.

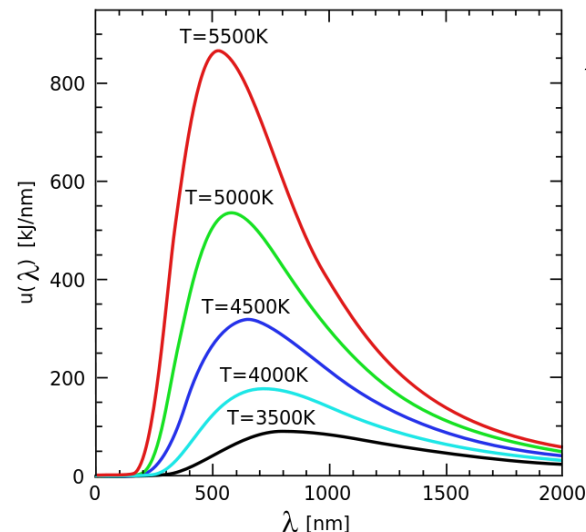


Макс Планк, 1858-1947

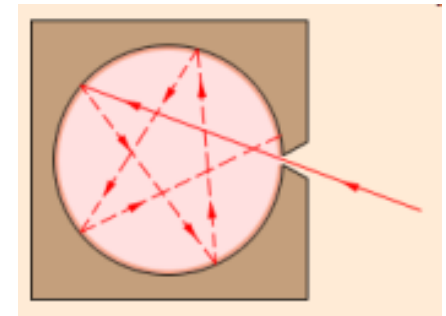
### Закони теплового випромінювання

#### Закон Планка

Спектр випромінювання АЧТ:



$$\rho(\omega) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$



*«Наукова істина тріумфує у міру того, як вимирають її супротивники»  
М.Планк*



## Закони теплового випромінювання



Джон Вільям Стретт (лорд Релей)  
1842-1919



Джеймс Гопвуд Джинс  
1877-1946



Вільгельм Він  
1864-1928

### Закон Віна

$$u_v = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot e^{-h\nu/kT}$$

### Закон Релея-Джинса

$$u(\omega, T) = kT \cdot \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

### Закон зміщення Віна:

$$\nu_{\max} = \frac{\alpha}{h} \cdot kT \approx (5,879 \cdot 10^{10}) \cdot T$$

## Закони теплового випромінювання

У тепlobаченні закон Планка використовують у вигляді:

Спектральна густина світності

$$r_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, [Вт / м^2 мкм]$$



## 2.5. Оптичні характеристики речовини (комплексний показник заломлення, коефіцієнт екстинкції, показник поглинання)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{rot rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\text{rot } \vec{B})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \text{grad } \rho$$

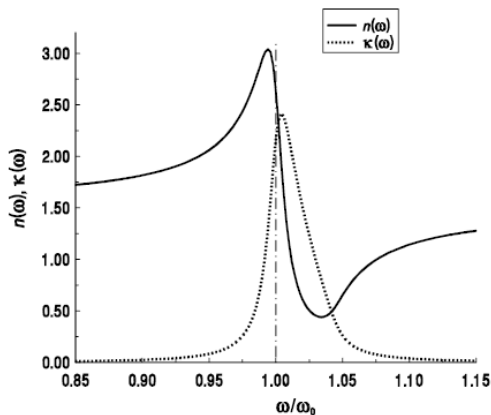
$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$$

$$\rho = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$

Монохроматична хвиля

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_\omega e^{-i\omega t}$$



$$\nabla^2 \vec{E}_\omega + \omega^2 \mu \left( \epsilon + i \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E}_\omega = 0$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + i\epsilon_1 = \epsilon + i \frac{\sigma}{\omega}$$

$$\nabla^2 \vec{E}_\omega + \omega^2 \mu \tilde{\epsilon} \vec{E}_\omega = 0$$

$$\tilde{n} = n + i\chi$$

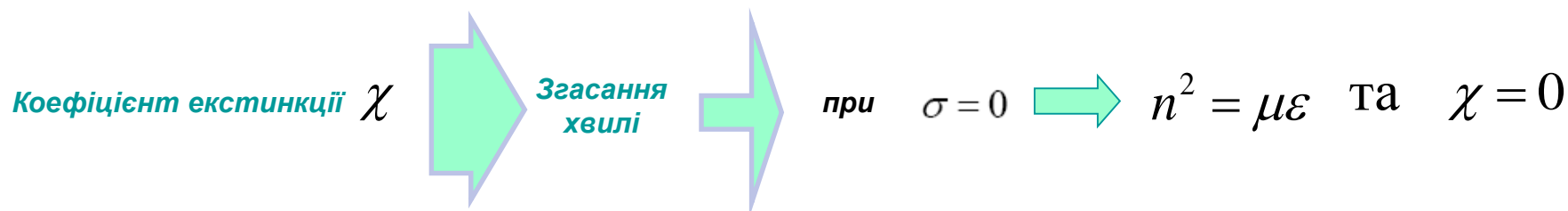
Коефіцієнт екстинкції  $\chi$

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

$$n^2 = \frac{\mu}{2} \left[ \sqrt{\epsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} + \epsilon \right]$$

$$\chi^2 = \frac{\mu}{2} \left[ \sqrt{\epsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} - \epsilon \right]$$

## 2.5. Оптичні характеристики речовини (комплексний показник заломлення, коефіцієнт екстинкції, показник поглинання)



Введемо комплексний хвильовий вектор  $\tilde{k}$

Аналогічно  $k = n\omega/c$ .

$$\tilde{k} = \tilde{n}\omega/c$$



$$\tilde{k} = n\frac{\omega}{c} + i\frac{\chi \cdot \omega}{c}$$



$$E_x = E_0 \cdot e^{-\frac{\omega \cdot \chi z}{c}} \cdot e^{-i\left(\omega t - \frac{\omega \cdot n z}{c}\right)}$$

$$H_y = H_0 \cdot e^{-\frac{\omega \cdot \chi z}{c}} \cdot e^{-i\left(\omega t - \frac{\omega \cdot n z}{c}\right)}$$

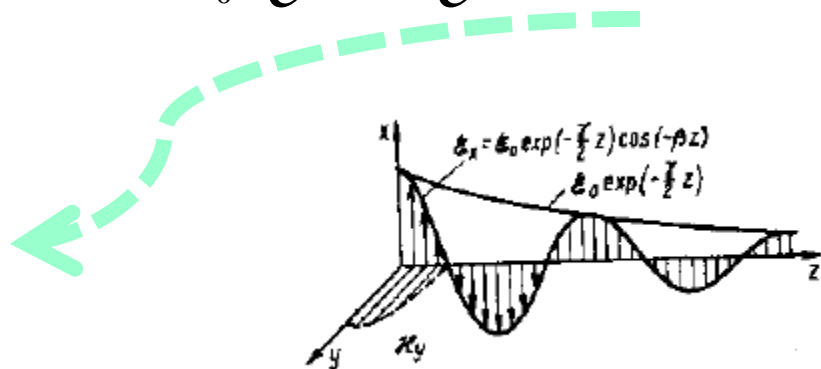
Аналогічно

Інтенсивність

Показник поглинання

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\frac{2\omega \cdot \chi z}{c}} = I_0 \cdot e^{-k_\omega \cdot z}$$

$$k_\omega = \frac{2\omega \cdot \chi}{c} = \frac{4\pi \cdot \chi}{\lambda_0}$$



## Тема 3. Елементи фізики напівпровідників

- 3.1. Основні типи кристалічних структур напівпровідників.
- 3.1.1. Елементарні напівпровідники і напівпровідникові сполуки.
- 3.1.2. Напівпровідники кристалічної структури типу алмазу, сфалериту, вюрциту, кам'яної солі.
- 3.1.3. Обернена ґратка та зони Брілюена.
- 3.2. Основи зонної теорії твердого тіла. Енергетичні стани в напівпровідникових кристалах.
- 3.2.1. Утворення зонної структури та фізичні властивості напівпровідників.
- 3.2.2. Коротко про методи аналізу електронних станів в кристалах. Теорема Блоха. Властивості хвильової функції і хвильового вектора.
- 3.2.3. Закон дисперсії  $E_n(k)$ . Енергетична структура деяких напівпровідників.
- 3.3. Прямозонні і непрямоzonні напівпровідники.
- 3.4. Оптичні переходи в напівпровідниках.
- 3.5. Напівпровідникові тверді розчини.
- 3.6. Власні та домішкові напівпровідники.
- 3.7. Статистична функція розподілу  $N(E)$ ,  $f(E)$ , функція густини станів, концентрація носіїв.

## Кристали GaAs, які були вирощені методами:



• *Чохральського;*



• *горизонтальної напрямленої кристалізації*  
(надано А. В. Марковим, лабораторія арсеніду галію, Гіредмет, Москва);

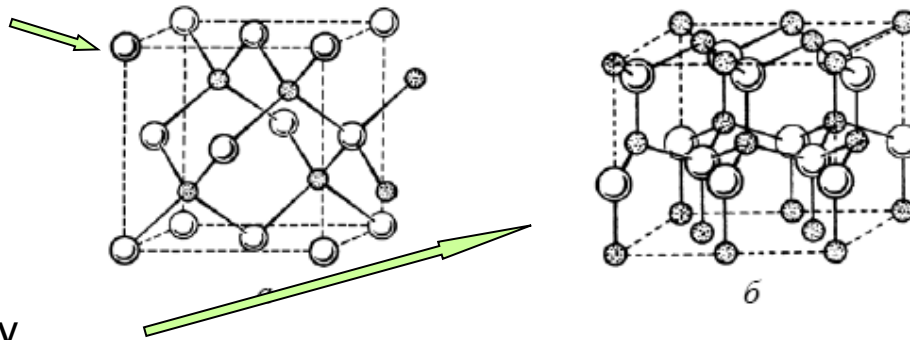


*Калібровані кристали арсеніду галію.*



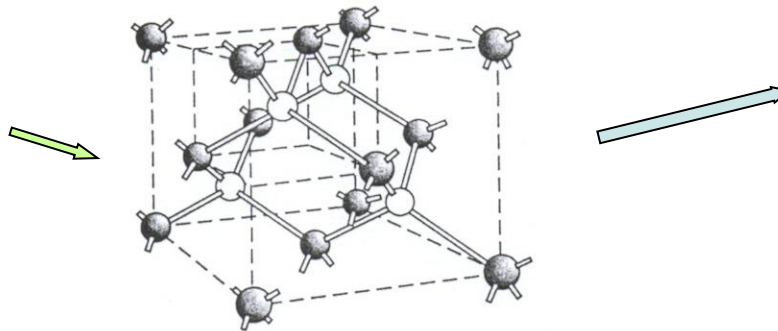
## 3.1.2. Основні типи кристалічних структур напівпровідників

- алмазу

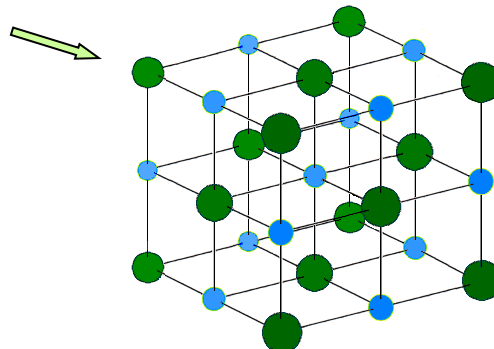


- в'юрциту

- сфалериту



- кам'яної солі



### 3.1.3. Обернена ґратка та зони Брілюєна

$$\mathbf{A}_{n_1 n_2 n_3} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3$$

$$\mathbf{B}_{m_1 m_2 m_3} = m_1 \mathbf{b}_1 + m_2 \mathbf{b}_2 + m_3 \mathbf{b}_3$$

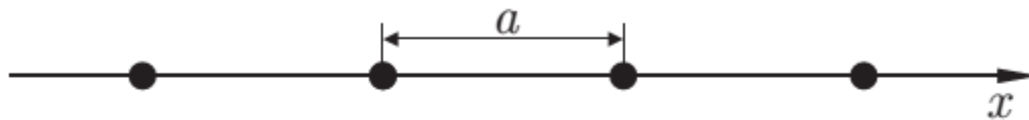
$$\mathbf{b}_1 = 2\pi \frac{[\mathbf{a}_2 \mathbf{a}_3]}{([\mathbf{a}_2 \mathbf{a}_3] \mathbf{a}_1)}$$

$$\mathbf{b}_2 = 2\pi \frac{[\mathbf{a}_3 \mathbf{a}_1]}{([\mathbf{a}_3 \mathbf{a}_1] \mathbf{a}_2)}$$

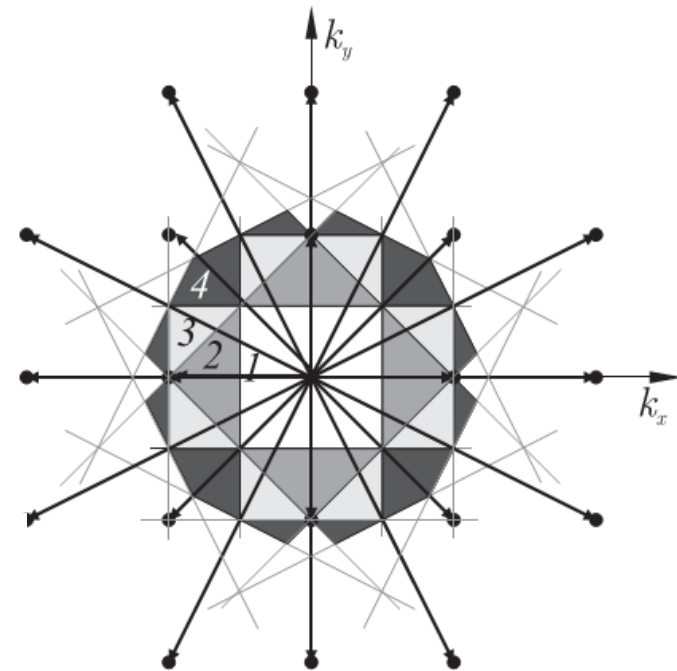
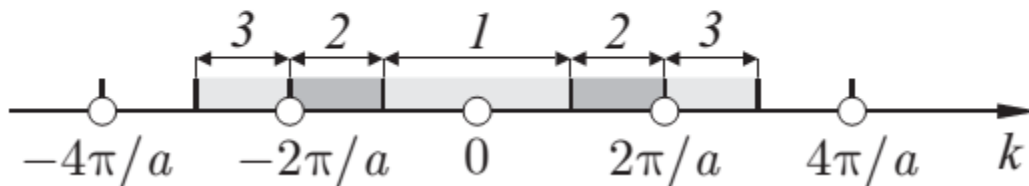
$$\mathbf{b}_3 = 2\pi \frac{[\mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2]}{([\mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2] \mathbf{a}_3)}$$

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = 2\pi \mathbf{N}$$

Основні вектори  
оберненої ґратки



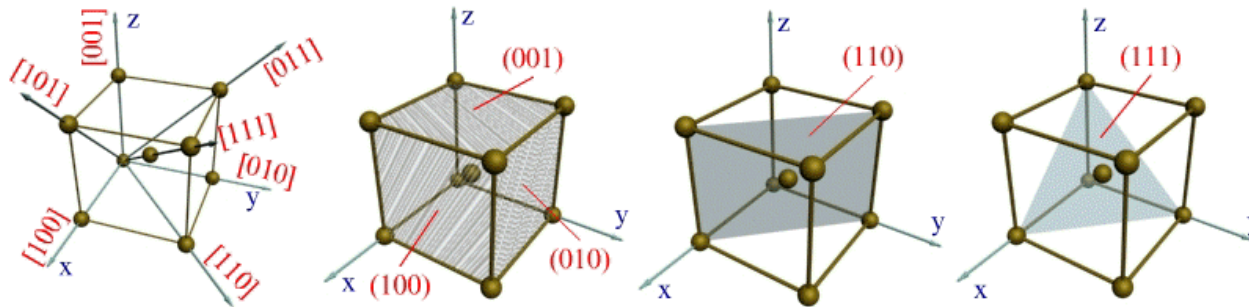
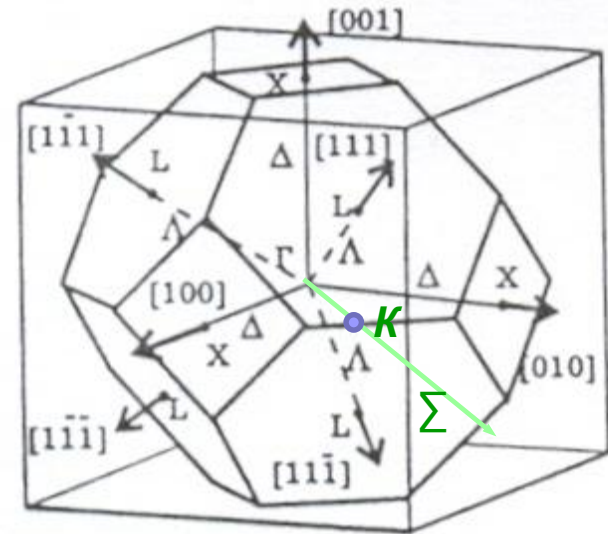
Перші 3 зони Брілюєна для одновимірного випадку



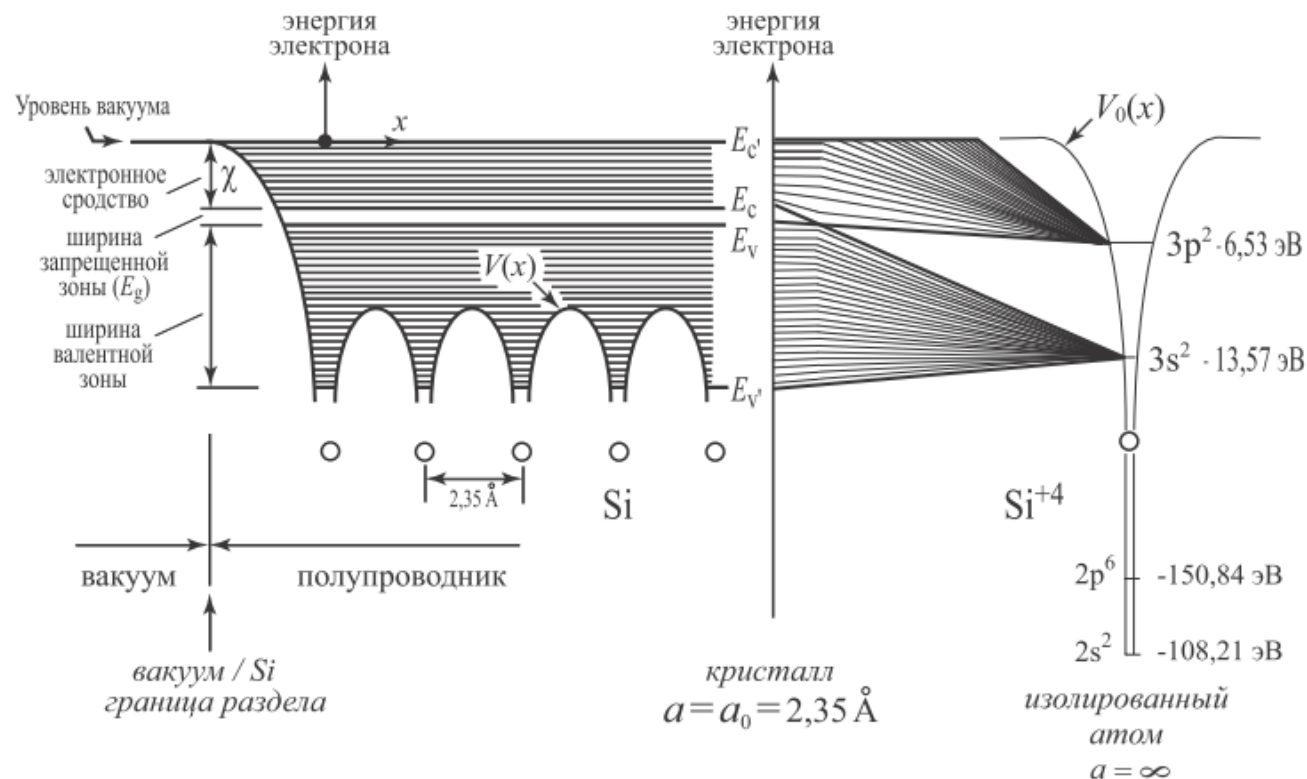
Перші 4 зони Брілюєна  
для плоскої квадратної  
ґратки

### 3.1.3. Обернена ґратка та зони Брілюєна

Перша зона Брілюєна для кристалічної ґратки типу алмазу з напрямками симетрії та характерними точками.



## 3.2.1. Утворення зонної структури та фізичні властивості напівпровідників



### 3.2.1. Утворення зонної структури та фізичні властивості напівпровідників

Період	Елемент	Структура зовнішньої оболонки	Постійна ґратки, Å	$E_g$ , eV	Клас за провідністю	$T_{пл}$ , К
2	C	$2s^2 2p^2$	3,6	5,4	Діелектрик	4300
3	Si	$3s^2 3p^2$	5,4	1,2	Високоомний напівпровідник	1683
4	Ge	$4s^2 4p^2$	5,6	0,78	Напівпровідник	1211
5	Sn	$5s^2 5p^2$	6,5	0,1	Низькоомний напівпровідник	905
6	Pb	$6s^2 6p^2$	7,0	0	метал	601

## 3.2.2. Коротко про методи аналізу електронних станів у кристалах. Теорема Блоха. Властивості хвильової функції та хвильового вектора

Знання енергетичного спектру

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}}, \quad \mathbf{v} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_{n\mathbf{k}}}{\partial \mathbf{k}}.$$

$V$  — потенційна енергія електрона в зовнішніх полях

$$E_{n\mathbf{k}} \neq \mathbf{p}^2 / 2m_0$$

метод  
ефективної  
маси

МЕМ: електрон в кристалі як вільний в полі  $V(\mathbf{r})$

$$H = E_{n\mathbf{k}} + V(\mathbf{r})$$

$$E_{\mathbf{k}} = E_0 + \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m}$$

$$\mathbf{v} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_k}{\partial \mathbf{k}} = \frac{\hbar \mathbf{k}}{m} = \frac{\mathbf{p}}{m}$$

- Метод сильного зв'язку
- Метод Кроніга-Пені
- Метод слабого зв'язку



### 3.2.2. Коротко про методи аналізу електронних станів у кристалах. Теорема Блоха. Властивості хвильової функції та хвильового вектора

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(\vec{r})\right)\psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = E_{n\vec{k}}\psi_{n\vec{k}}(\vec{r})$$

$$V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R})$$

$$\vec{R} = n\vec{a} + m\vec{b} + l\vec{c}$$

- Енергетичний спектр електронів – зони дозволених та заборонених значень енергії  $E_n(\mathbf{k})$
- Хвильові функції електрона в кристалі - функції Блоха

$$\psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = u_{n\vec{k}}(\vec{r}) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$$

$$u_{n\vec{k}}(\vec{r}) = u_{n\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R})$$

## Загальні властивості хвильової функції та хвильового вектора у кристалі

1. Стани з  $\vec{r}$  та  $\vec{r} + \vec{R}$   $|\psi_{\vec{k}}(\vec{r})|^2 = |\psi_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R})|^2$
2.  $\psi_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R}) = \Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{R})$
3. Стани з різними  $\vec{k}'$  та  $\vec{k}''$  описуються однаковими хвильовими функціями?

$$\Psi_{k'}(x) = \Psi_{k''}(x)$$

$$\Psi_{k'}(x + a) = \Psi_{k''}(x + a)$$

$$\Psi_{k'}(x) \cdot e^{ik'a} = \Psi_{k''}(x) e^{ik''a} \quad \Rightarrow$$

$$k' = k'' + n \cdot \frac{2\pi}{a}$$

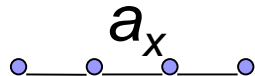
Область нееквівалентних  
значень хвильового вектора  
– зона Брілюена



схема приведених зон  
( $k' = k + G$ )

## Загальні властивості хвильової функції та хвильового вектора у кристалі

4. Дискретність хвильового вектора (для кристалів скінченних розмірів).



Кристал довжиною  $L_x = N_x a_x$

$$\Psi(x + L_x) = \Psi(x)$$

$$e^{ikx} \cdot u(x) = e^{ik(x+L_x)} \cdot u(x + L_x)$$

Умова тотожності:  $e^{ik_x L_x} = 1$



$$k_x = n_x \left( \frac{2\pi}{L_x} \right) = n_x \left( \frac{2\pi}{N_x \cdot a_x} \right)$$

$$\Delta k_x = \left( \frac{2\pi}{N_x \cdot a_x} \right)$$

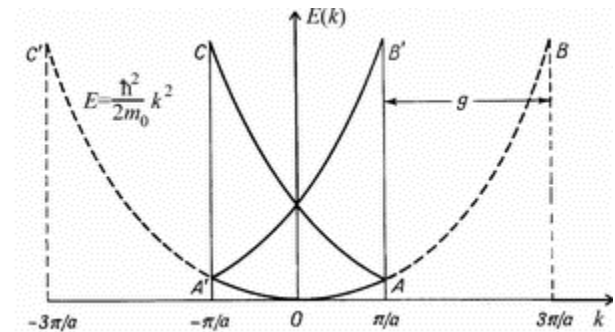
Якщо:  $-\frac{\pi}{a_x} \leq k_x \leq \frac{\pi}{a_x}$

$$-\frac{N_x}{2} \leq n_x \leq \frac{N_x}{2}$$

## 3.2.3. Закон дисперсії $E_n(k)$ . Енергетична структура основних напівпровідників

*Властивості дисперсійних кривих:*

1. Періодичність  $E_n(\vec{k}) = E_n(\vec{k} + \vec{G})$
2. Парність  $E_n(\vec{k}) = E_n(-\vec{k})$
3. Дискретність



$$E_{\mathbf{k}} = E_0 + \left( \frac{\partial E_{\mathbf{k}}}{\partial k_x} \right)_{\mathbf{k}=0} k_x + \left( \frac{\partial E_{\mathbf{k}}}{\partial k_y} \right)_{\mathbf{k}=0} k_y + \left( \frac{\partial E_{\mathbf{k}}}{\partial k_z} \right)_{\mathbf{k}=0} k_z + \frac{1}{2!} \sum_{ij} \left( \frac{\partial^2 E_{\mathbf{k}}}{\partial k_i \partial k_j} \right)_{\mathbf{k}=0} k_i k_j + \dots$$

$$E_{\mathbf{k}} = E_0 + \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m}$$

$$E_{\mathbf{k}} = E_0 + \frac{\hbar^2}{2} \left\{ \frac{(k_{x'} - k_{x'0})^2}{m_x} + \frac{(k_{y'} - k_{y'0})^2}{m_y} + \frac{(k_{z'} - k_{z'0})^2}{m_z} \right\}.$$

## 3.2.3. Закон дисперсії $E_n(k)$ . Енергетична структура основних напівпровідників

*Властивості дисперсійних кривих:*

1. Періодичність
2. Парність
3. Дискретність

$$E_n(\vec{k}) = E_n(\vec{k} + \vec{G})$$

$$E_n(\vec{k}) = E_n(-\vec{k})$$

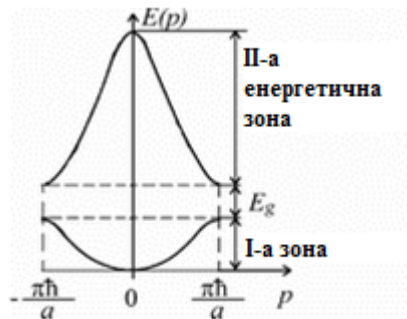
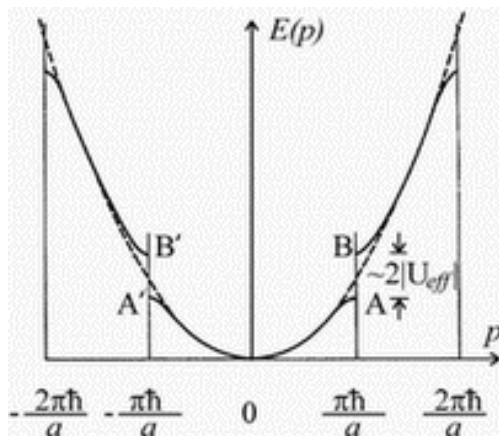
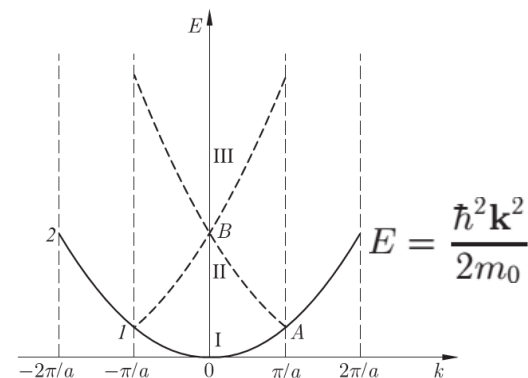


Схема приведених зон

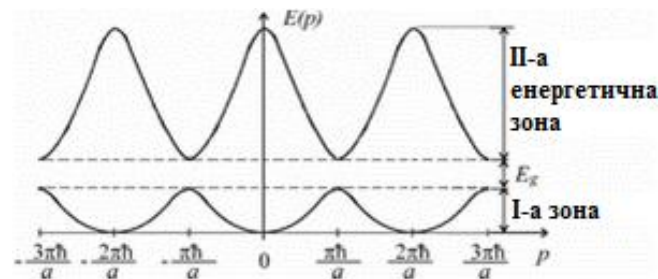
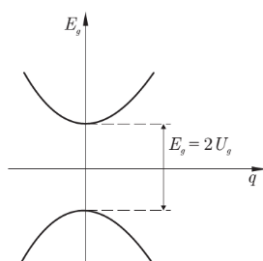


Схема розширених зон

*Зміна параболічного закону дисперсії електронів на межі першої і другої зон Брілюєна*

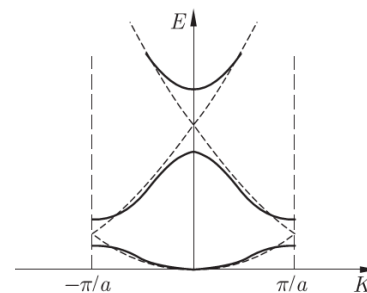
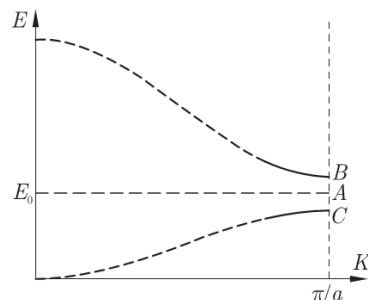


$$E = \pm \left[ |U_G| + \frac{b^2 q^2}{2|U_G|} \right]$$

$$b = \hbar^2 G / 2m_0$$

Метод слабкого зв'язку

$$m^* = \pm \frac{\hbar^2 |U_G|}{b^2} \equiv \pm \frac{\hbar^2 E_g}{2b^2}$$



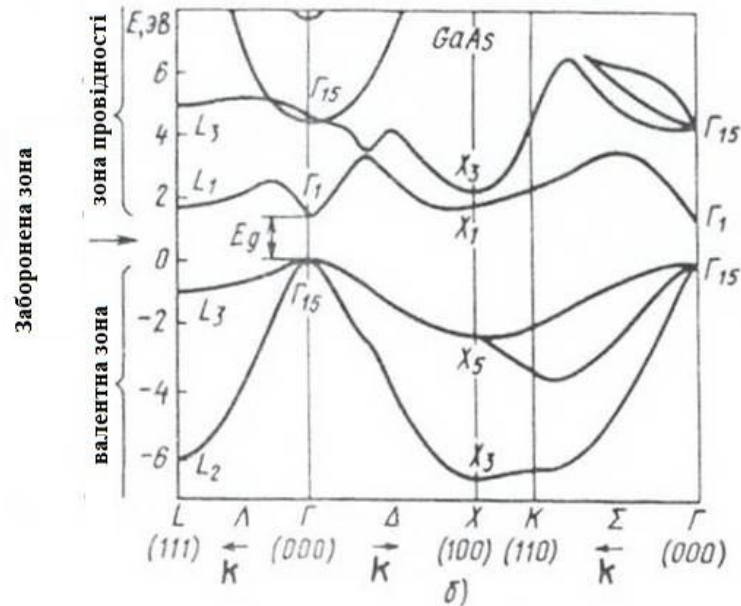
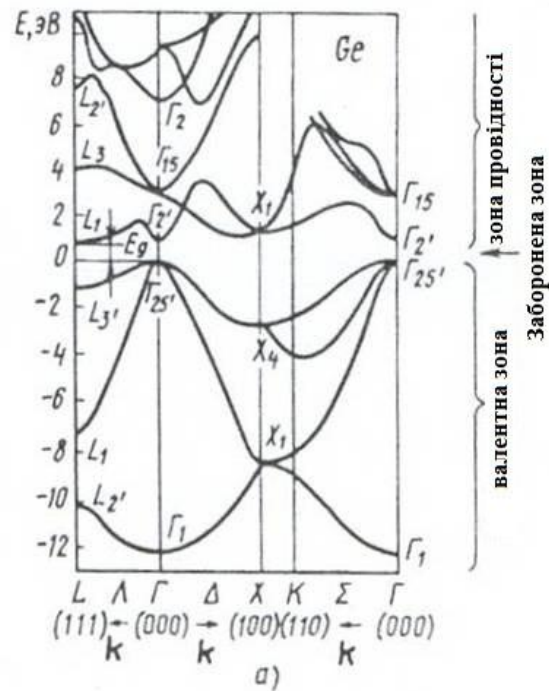
InSb  $E_g \approx 0,2$  эВ,  $m^* \approx 0,013m_0$

GaAs  $E_g \approx 1,52$  эВ,  $m^* \approx 0,07m_0$

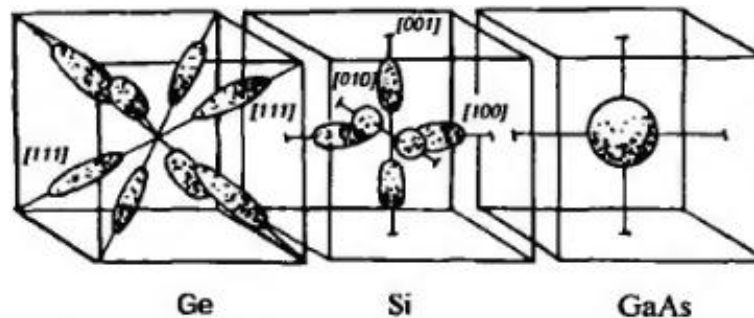
## Зонні структури германію і арсеніду галію

Ge

GaAs

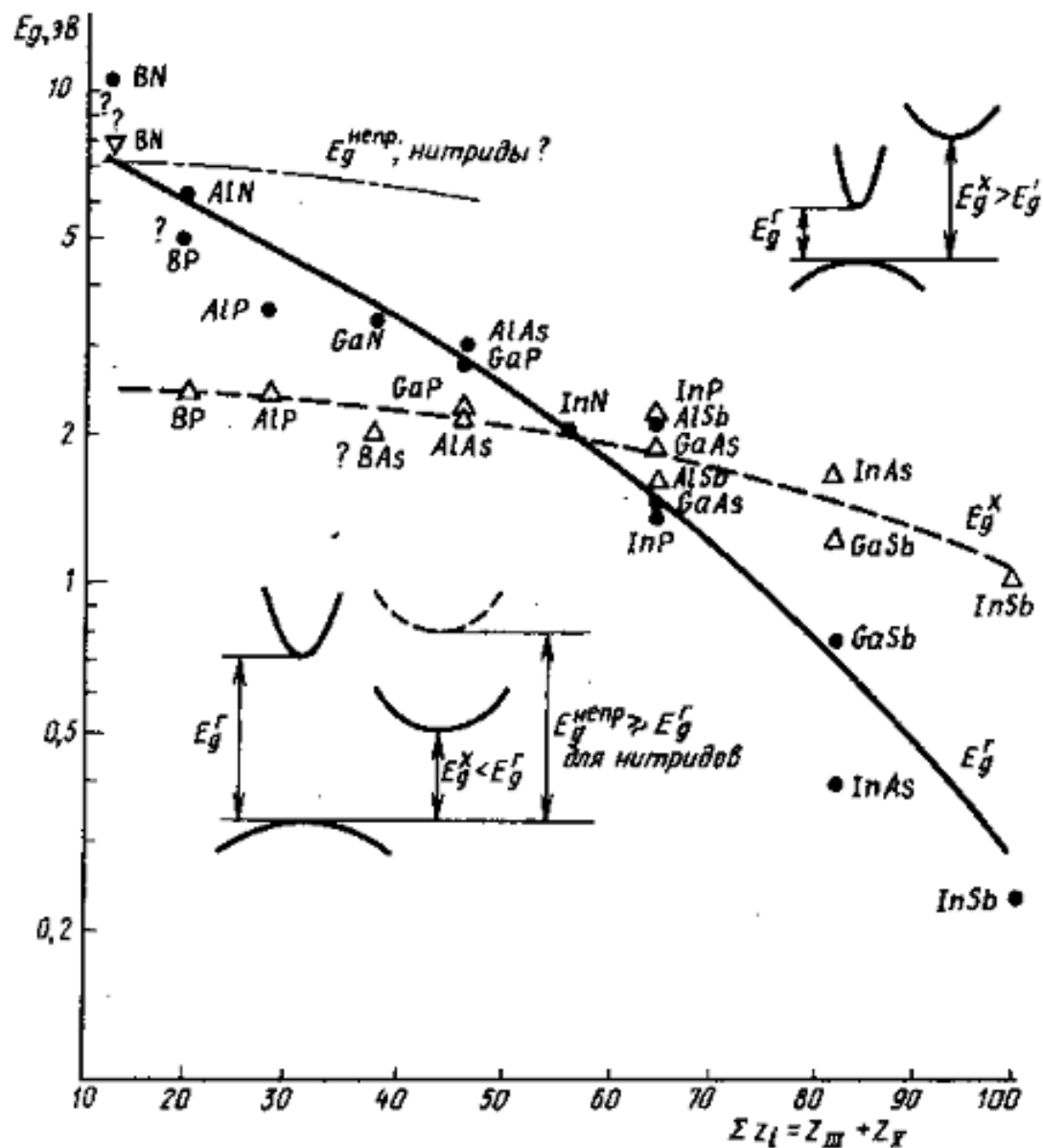


Ізоенергетичні поверхні:

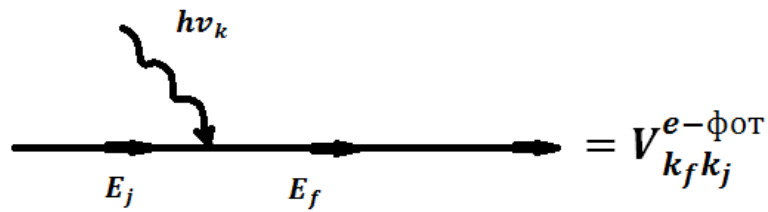




## 3.3. Прямозонні та непрямозонні напівпровідники

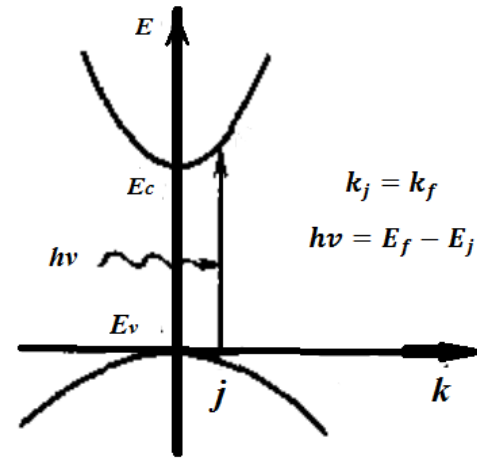


## 3.4. Оптичні переходи в напівпровідниках



$$V_{k_f \cdot k_j}^{e-фот} = \int \Psi_{k_f}^* V \Psi_{k_j} dr$$

$$V = E_0 \cdot e^{-i\omega t} \cdot \exp(ik_{\phi om} r) = A \cdot \exp(ik_{\phi om} r)$$



$$V_{k_f \cdot k_j}^{e-фот} = \int B \cdot \exp(i(-k_f + k_{\phi om} + k_{k_j})r) dr \Rightarrow -k_f + k_{\phi om} + k_j = 0$$



$$j \rightarrow f$$

$$k_{\phi om} + k_j = k_f$$

$$k_{\phi om} = \frac{2\pi}{\lambda} \ll \frac{2\pi}{a}$$



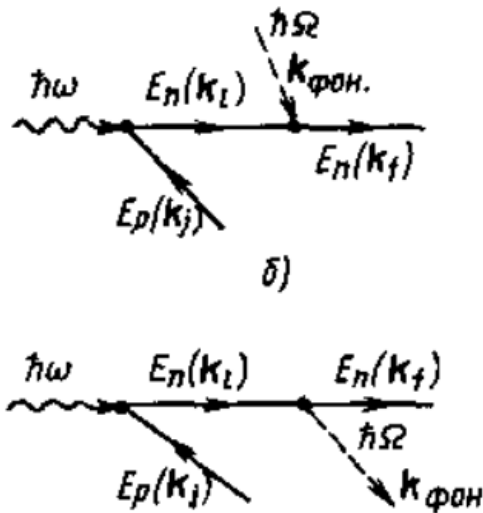
**Прямий перехід  
(вертикальний)**

$$k_j = k_f$$

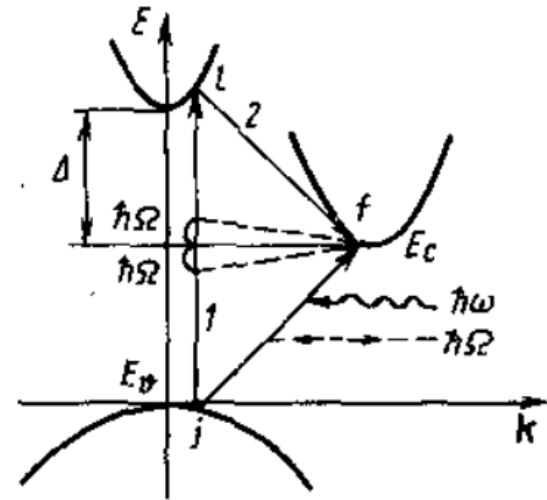
$$E_j + \hbar\omega = E_f$$

## 3.4. Оптичні переходи в напівпровідниках

### Непрямий перехід



$$= \frac{V^{e-\text{фон}} \cdot V^{e-\text{фот}}}{(E_j + \hbar\omega - E_l)}$$

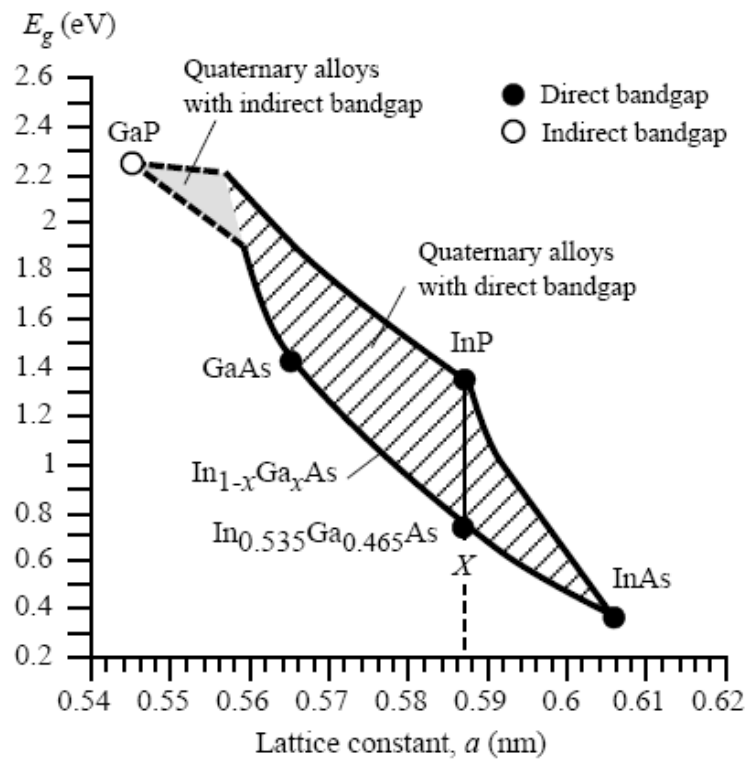


**$l$**  - Проміжний (віртуальний) стан

$$k_j \pm k_{\text{фон}} = k_f$$

$$E_j + \hbar\omega \pm \hbar\Omega = E_f$$

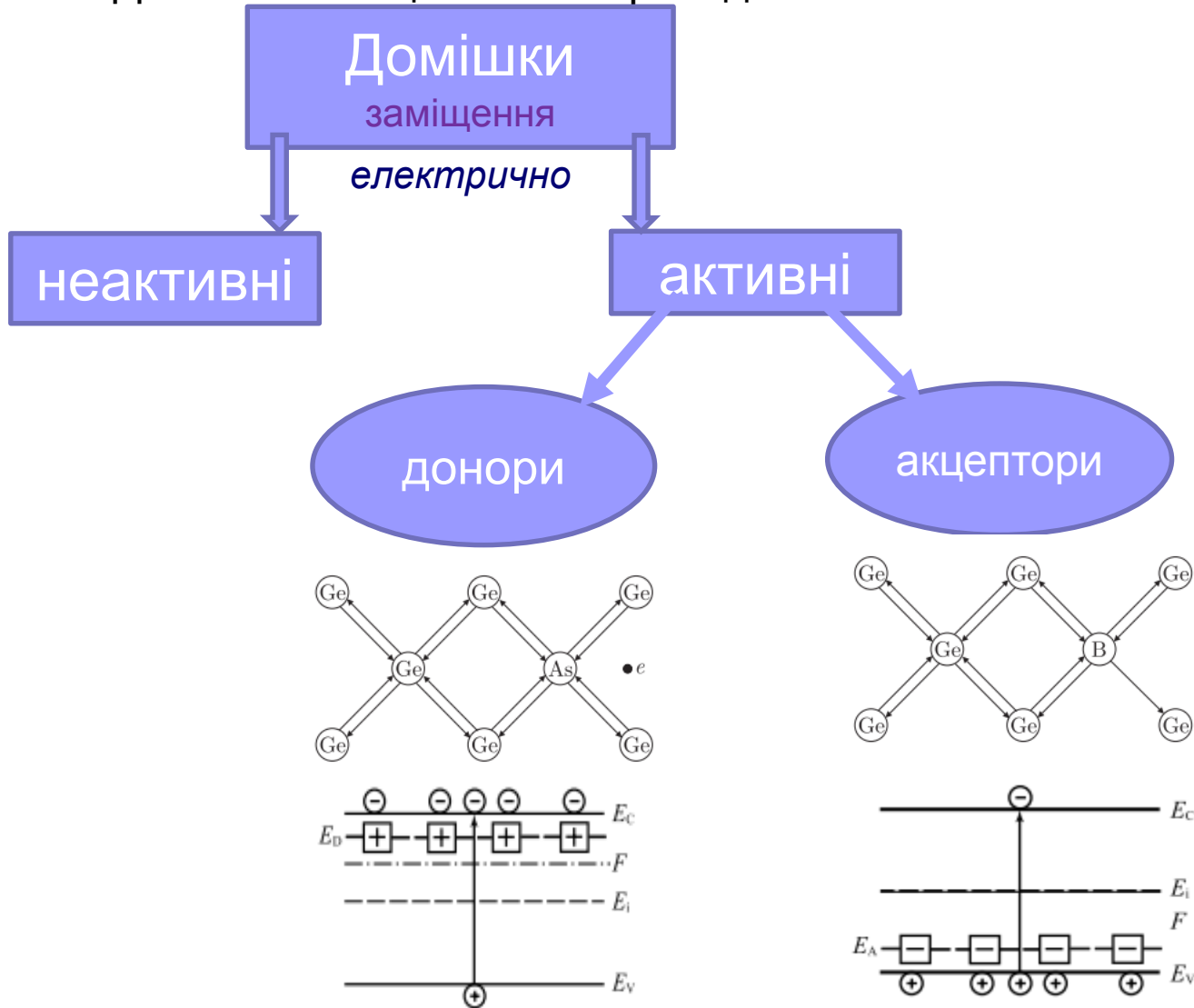
### 3.5. Напівпровідникові тверді розчини



Ширини заборонених зон та параметри ґраток деяких твердих розчинів  $A^3B^5$

## 3.6. Власні та домішкові напівпровідники.

Домішки заміщення та впровадження



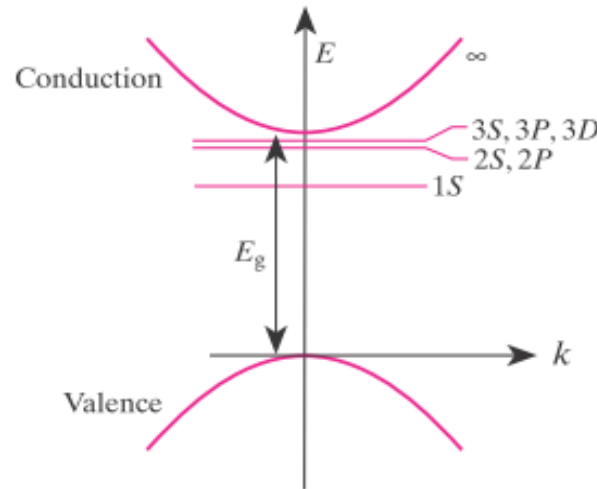
## 3.6.1. Дрібні (воднеподібні) домішки

Застосування методу ефективної маси для донорного електрона в полі атома донора, вбудованого в ґратку н/п

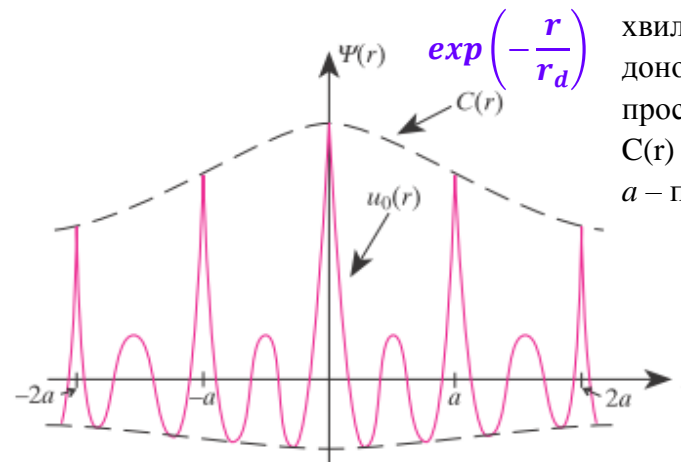
$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\nabla^2\psi - \frac{e^2}{\epsilon r}\psi = E\psi$$

$$E_n = -\frac{m^* e^4}{2\epsilon_r^2 \hbar^2 n^2} = -13,6 \frac{m^*}{m_0} \frac{1}{\epsilon_r^2 n^2}$$

$$r_d = a_0 \epsilon_r \frac{m_0}{m^*} = 0,53 \epsilon_r \frac{m_0}{m^*} \text{ \AA}$$



Принципова схема для  $n=1, 2, \text{ і } 3$  зв'язаних станів дрібного донорного електрона поблизу дна параболічної зони провідності (відповідає  $n=\infty$ ).



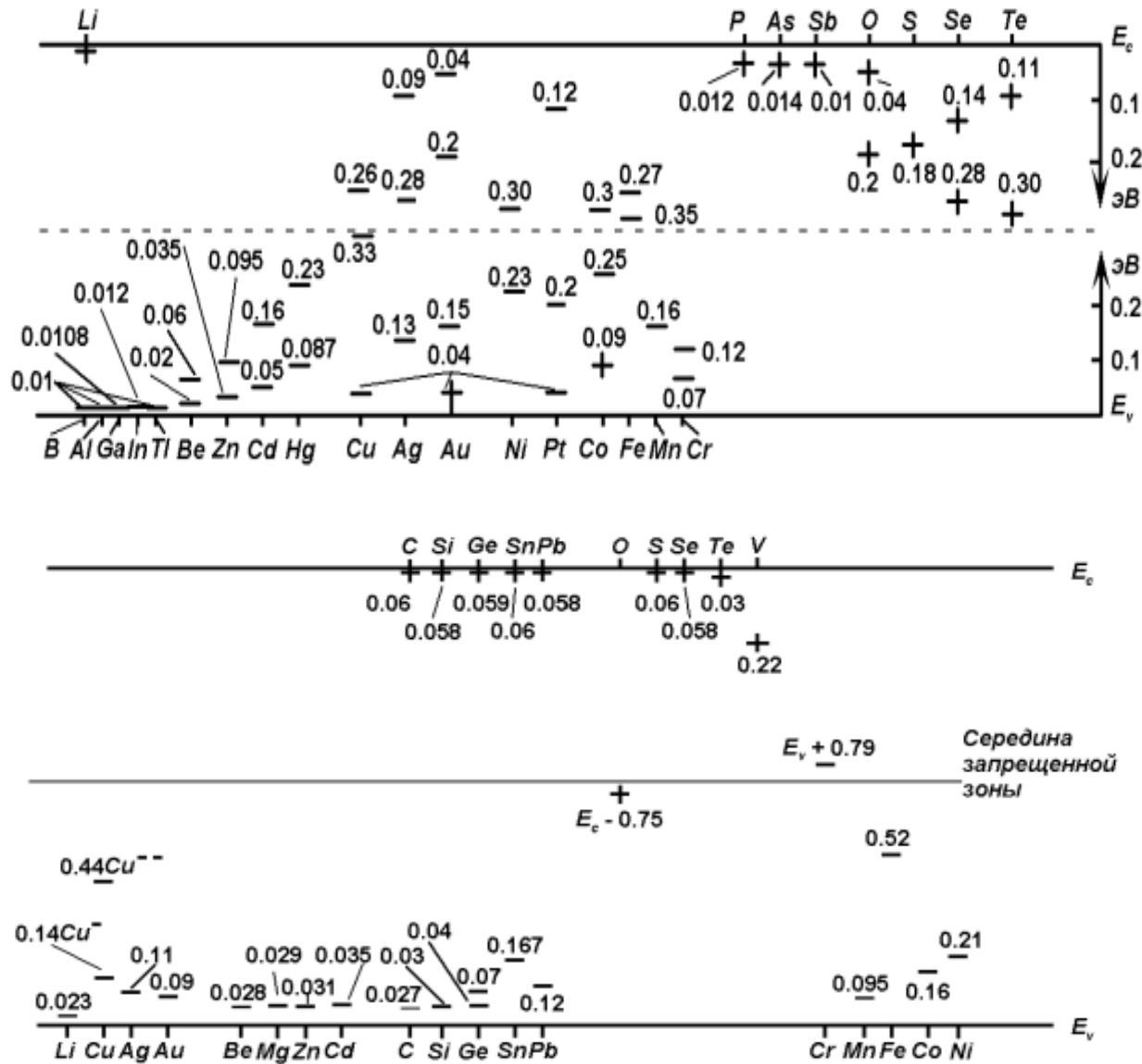
Принциповий вид хвильової функції дрібного донорного електрона в реальному просторі:  $U_0(r)$  - функція Блоха;  $C(r)$  - експоненційний множник;  $a$  - параметр ґратки.



## Термічна енергія іонізації домішок елементів III і V груп

Кремний				Германий			
Доноры		Акцепторы		Доноры		Акцепторы	
Атом	$E_i$ , эВ	Атом	$E_i$ , эВ	Атом	$E_i$ , эВ	Атом	$E_i$ , эВ
Li	0.033	B	0.045	P	0.0120	B	0.0104
P	0.044	Al	0.057	As	0.0127	Al	0.0102
As	0.049	Ga	0.065	Sb	0.0096	Ga	0.0108
Sb	0.039	In	0.16			In	0.0112
Bi	0.069	Tl	0.26			Tl	0.01

### 3.6.2. Багатозарядні домішки



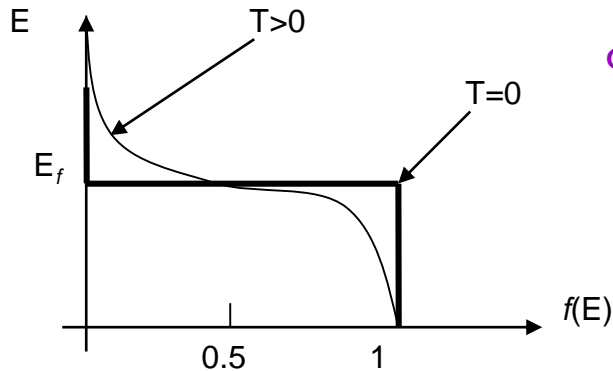
## Енергетичні рівні домішок у Ge

## Енергетичні рівні домішок у GaAs

(А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. - М.: Мир, 1977.)

## 3.7. Статистична функція розподілу $N(E)$ , $f(E)$ , функція густини станів, концентрація носіїв.

$$N(E) = \frac{dn(E)}{dE} = \frac{dn}{dn_c} \frac{dn_c}{dE} = f(E)\rho(E)$$



Функція розподілу Фермі-Дірака

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}$$

Концентрація електронів в зоні провідності:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) f(E) dE$$

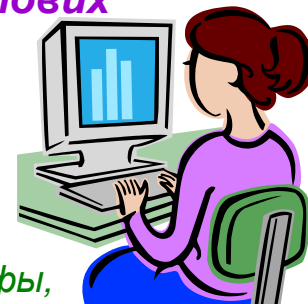
## Тема 4. Некогерентні джерела випромінювання

- 4.1. Люмінесценція.
  - 4.1.1. Механізм та види люмінесценції.
  - 4.1.2. Збудження в напівпровідниках. Квазірівновага в  $v$  і  $c$  зонах. Концентрація нерівноважних носіїв.
- 4.2. Рекомбінаційна люмінесценція. Механізми випромінювальної рекомбінації в напівпровідниках.
- 4.3. Інжекційна люмінесценція.
  - 4.3.1.  **$p$ - $n$**  перехід.
  - 4.3.2. Ефективність інжекції.
- 4.4. Квантова ефективність електролюмінесценції.
- 4.5. Електролюмінесцентні джерела випромінювання.
- 4.6. Світлодіоди.
  - 4.6.1. Типи світлодіодів на гомопереходах.
  - 4.6.2. Спектральні характеристики СД.
  - 4.6.3. ККД СД.
  - 4.6.4. Конструкції над'яскравих СД.
  - 4.6.5. Гетеропереходи (ГП), зонні діаграми і типи ГП. Світлодіоди на гетеропереходах.

## 4.1. Люмінесценція

*Люмінесценція - випромінювання, надлишкове над тепловим, при даній температурі, тривалість якого значно перевищує період світлових коливань (С.І. Вавилов)*

### 4.1.1. Механізми та види люмінесценції

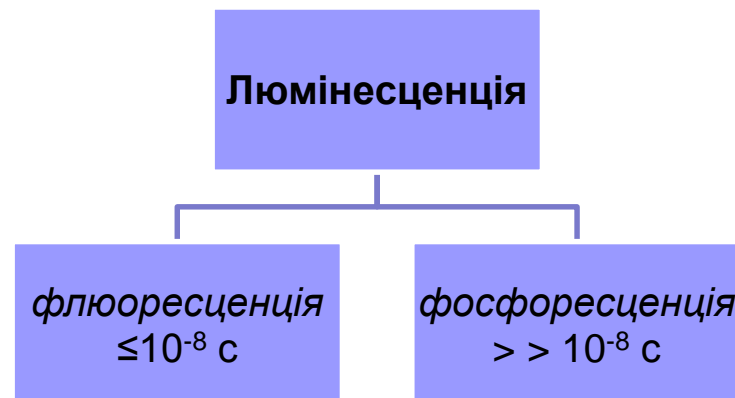


#### ВИДИ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

фотолюмінесценція;  
катодолюмінісценція;  
електролюмінесценція:  
- передпробійна;  
- інжекційна;  
хемілюмінесценція  
(в т.ч. біолюмінесценція);  
триболюмінесценція;  
кристалолюмінесценція

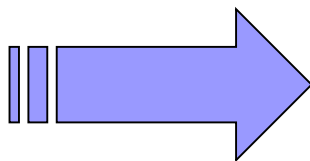
*«Прибрежья, где ходили тавро-скифы,  
уже не те - лишь море в летний штиль  
все так же сыплет ласково на рифы  
лазурно-фосфорическую пыль.»*

*И.Бунин*



## 4.1.1. Механізм та види люмінесценції

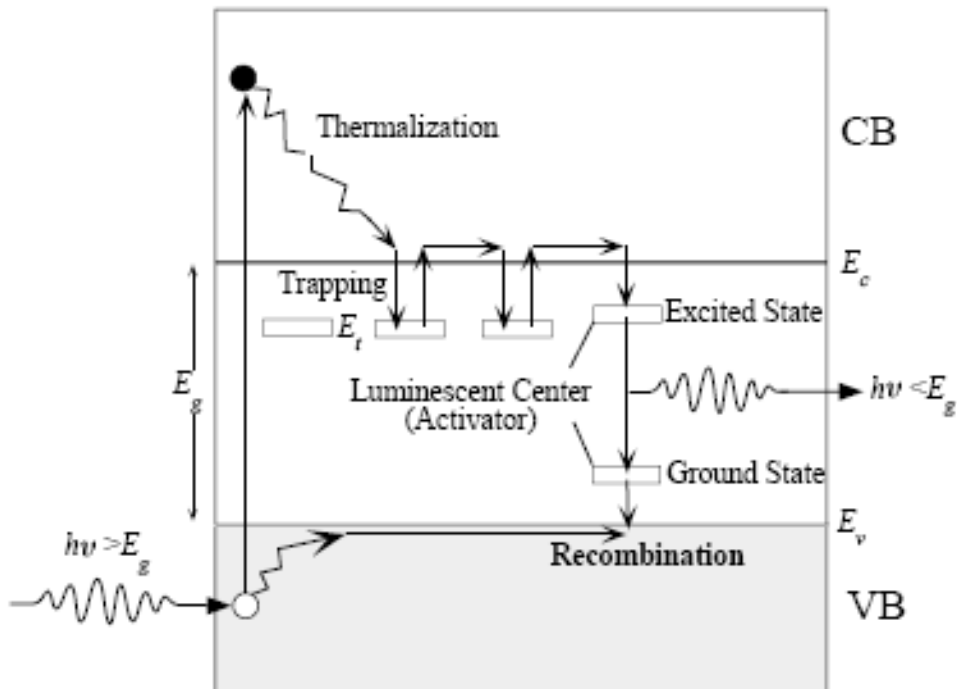
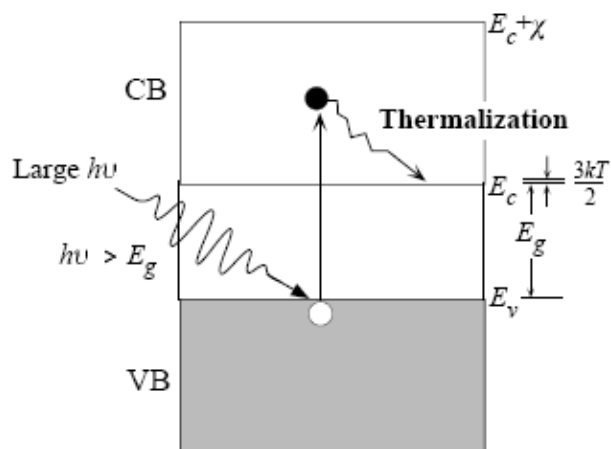
Напівпровідники



РЕКОМБІНАЦІЙНА  
ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ

Етапи:

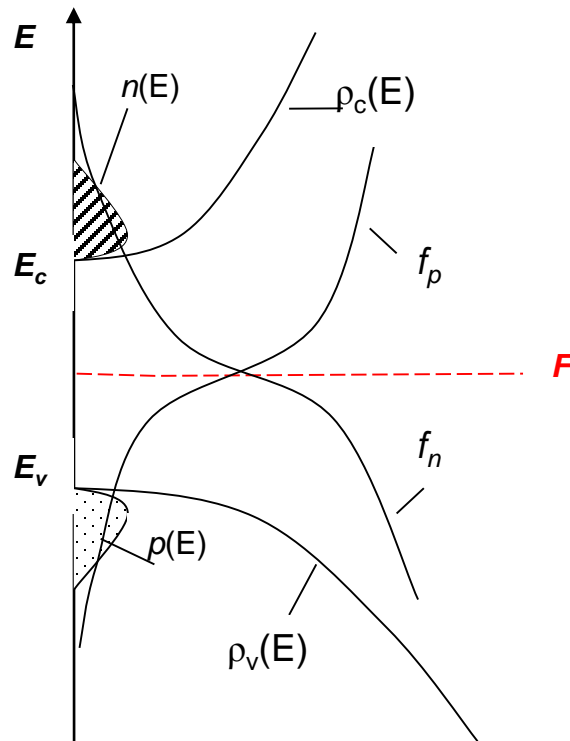
Збудження → Термалізація → Квазірівновага → Рекомбінація



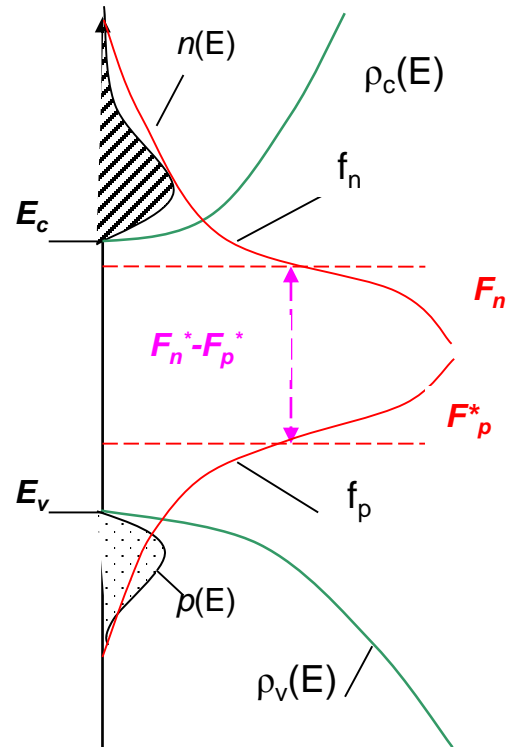
«Квазірівновага» у зонах – за  $10^{-11}$ - $10^{-13}$  с  $\sim 10$ - $10^2$  «зіткнень з ґраткою»

## 4.1.2. Збудження у напівпровідниках. Квазірівновага в $v$ та $c$ зонах. Концентрація нерівноважних носіїв

Розподіл носіїв заряду по енергії:



■ у стані рівноваги



■ за наявності збудження (нерівноважний стан)

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_n - F_n^*}{kT}} + 1}$$

$$f_p = \frac{1}{e^{\frac{F_p^* - E_p}{kT}} + 1}$$



## Розподіл носіїв заряду по енергії та концентрації нерівноважних носіїв у **C** і **V** зонах за наявності збудження

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_n - F_n^*}{kT}} + 1}$$

$$f_p = \frac{1}{e^{\frac{F_p^* - E_p}{kT}} + 1}$$

$F_n^*$  і  $F_p^*$  - квазірівні Фермі для електронів зони провідності і дірок валентної зони

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho_c \frac{1}{e^{\frac{E_n - F_n^*}{kT}} + 1} dE = N_c \Phi_{1/2}(\xi)$$

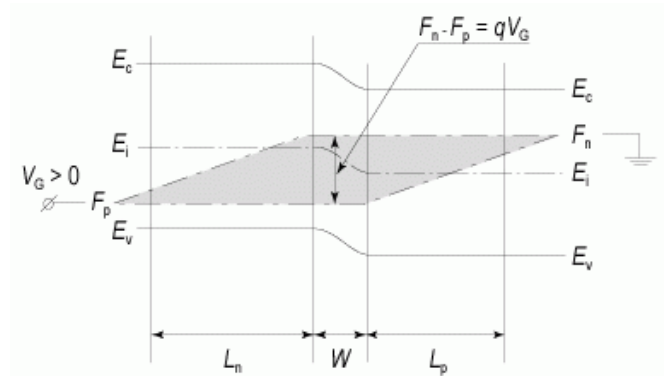
$$p = \int_{-\infty}^{E_v} \rho_v \frac{1}{e^{\frac{F_p^* - E_p}{kT}} + 1} dE = N_v \Phi_{1/2}(\eta)$$

Для невідроджених зон

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - F_n^*}{kT}}$$

$$p = N_v e^{-\frac{F_p^* - E_v}{kT}}$$

$$np = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}} e^{\frac{F_n^* - F_p^*}{kT}}$$



$$F_n^* - F_p^* = kT \ln\left(\frac{np}{n_i^2}\right)$$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$



$$F_n^*$$

$$F_p^*$$

?

## Розподіл носіїв заряду по енергії та концентрації нерівноважних носіїв у с і v зонах за наявності збудження

Положення квазірівнів Фермі  $F_n^*$  та  $F_p^*$  за наявності нерівноважних носіїв  $\Delta n$  та  $\Delta p$



$$F_n^* = F + kT \ln\left(1 + \frac{\Delta n}{n_0}\right)$$



$$F_p^* = F - kT \ln\left(1 + \frac{\Delta p}{p_0}\right)$$

$F$  - рівноважний рівень Фермі

## 4.2. Рекомбінаційна люмінесценція.

### Загальні зауваження

Швидкість рекомбінації

$$R = B_r np$$

$B_r$  - коефіцієнт рекомбінації, м<sup>3</sup>/с

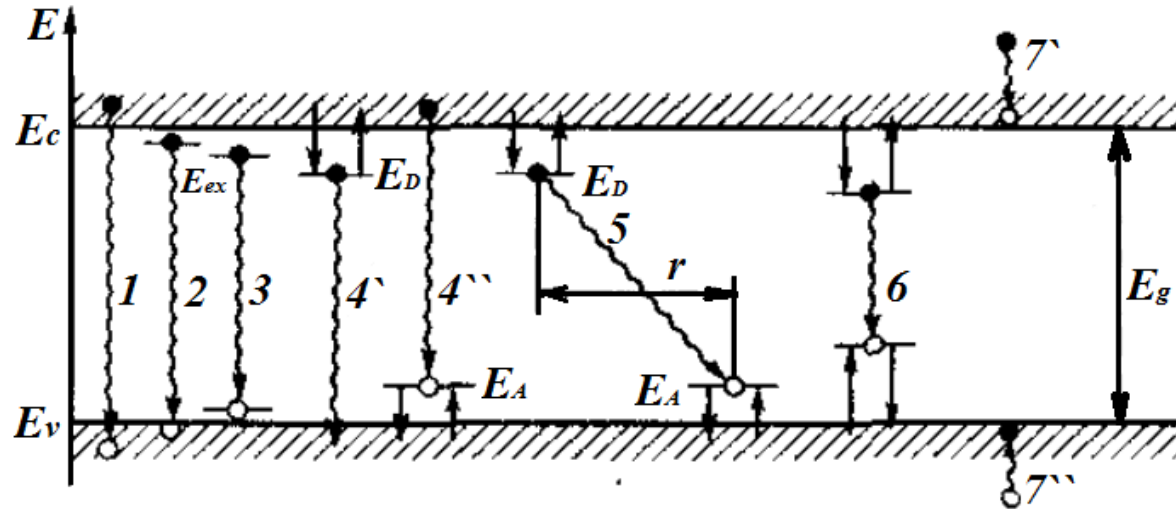
$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -(R - G_0) = -B_r(np - n_0 p_0)$$

лінійна  $\frac{d(\Delta n)}{dt} = -B_r(n_0 + p_0)\Delta n = -\frac{\Delta n}{\tau}$

квадратична  $\frac{d(\Delta n)}{dt} = -B_r\Delta n^2$

Рекомбінація

## 4.2. Рекомбінаційна люмінесценція. Механізми випромінювальної рекомбінації в напівпровідниках

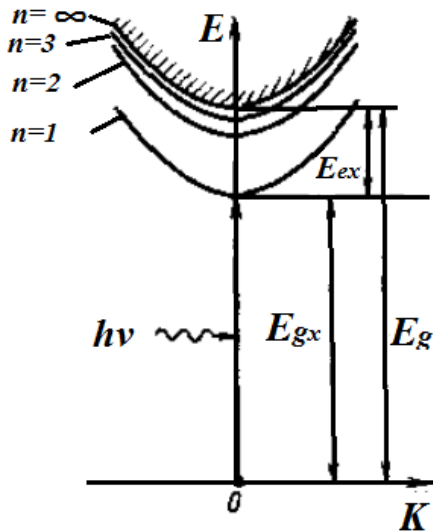


### Рекомбінація випромінювальна:

- 1 – міжзонна (власна);
- 2,3 – вільних та зв'язаних екситонів;
- 4 – вільних носіїв зі зв'язаними на домішках;
- 5 – міждомішкова;
- 6 – внутрішньоцентровий перехід;
- 7 – внутрішньозонні переходи за участі гарячих носіїв

## Рекомбінація

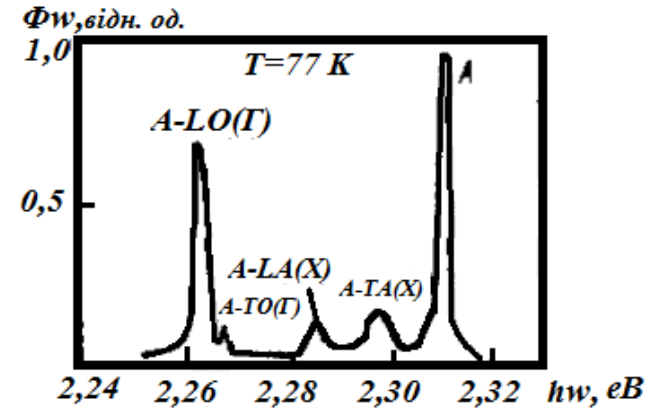
- вільних екситонів (Ванье-Мотта)
- зв'язаних екситонів → на ізоелектронних пастках : \* донорних  
\* акцепторних



$$E_{ex}(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 K^2}{2M} + E_g + E_{ex/n}$$

$$E_{ex/n} = -\frac{E_{ex}}{n^2} = -\frac{R_{ex}}{n^2}$$

$$M = m_p + m_n$$



Спектри випромінювальної рекомбінації екситонів, зв'язаних на пастці **N** в **GaP**

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = e^{\frac{i}{\hbar}(\mathbf{p}\mathbf{R})} \chi(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{R} = \frac{m_p \mathbf{r}_p + m_n \mathbf{r}_n}{m_p + m_n}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_p$$

Закони збереження:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2 K^2}{2M} + E_g + E_{ex/n}$$

$$\hbar\vec{k}_{\text{фот}} = \hbar\vec{K}$$



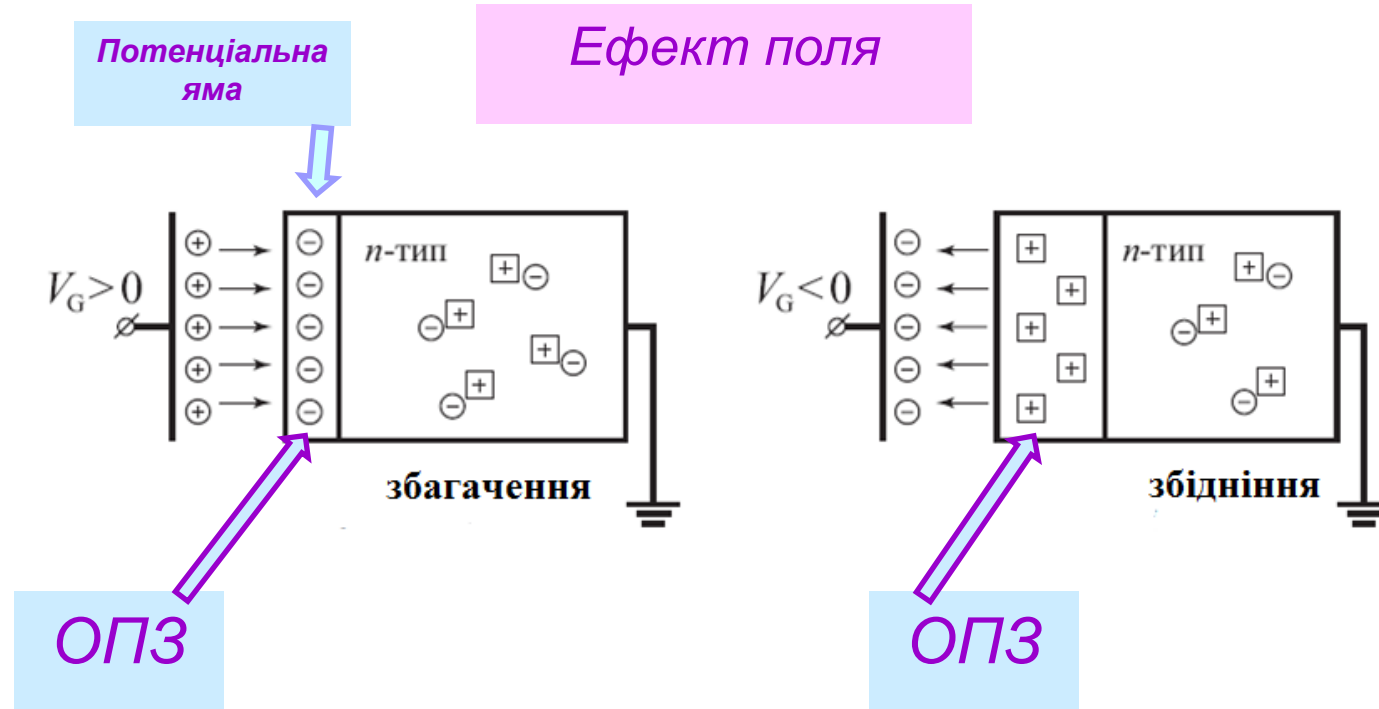
$$\vec{K} = 0$$

$$\hbar\omega = E_g - \frac{E_{ex}}{n^2}$$

## 4.3. Інжекційна люмінесценція.

### 4.3.1. *p-n* перехід.

Утворення *p-n* переходу



Наявність електричного поля  $E(x)$  в ОПЗ змінює потенціальну енергію електрона

ВИГІН ЗОН

## ЕФЕКТ ПОЛЯ

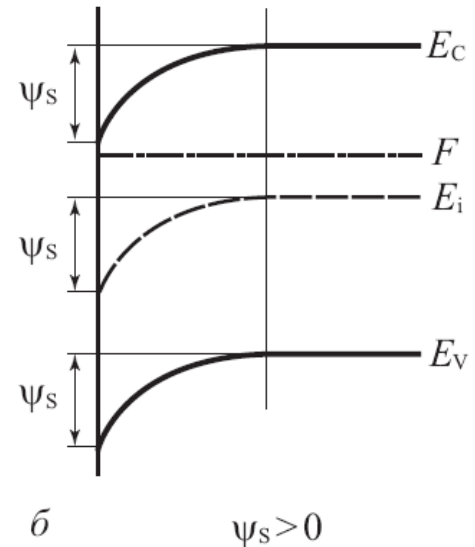
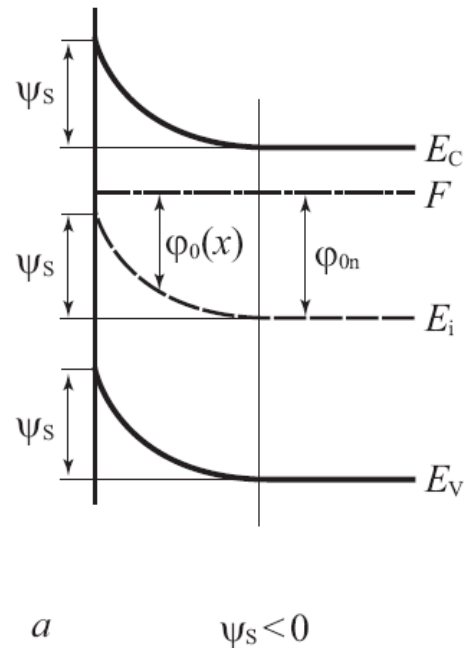
Зміна потенціальної енергії в порівнянні з квазінейтральним об'ємом

$$\Delta U = U(z) - U(\infty) = \int_{\infty}^z E(z) dz$$

електростатичний потенціал

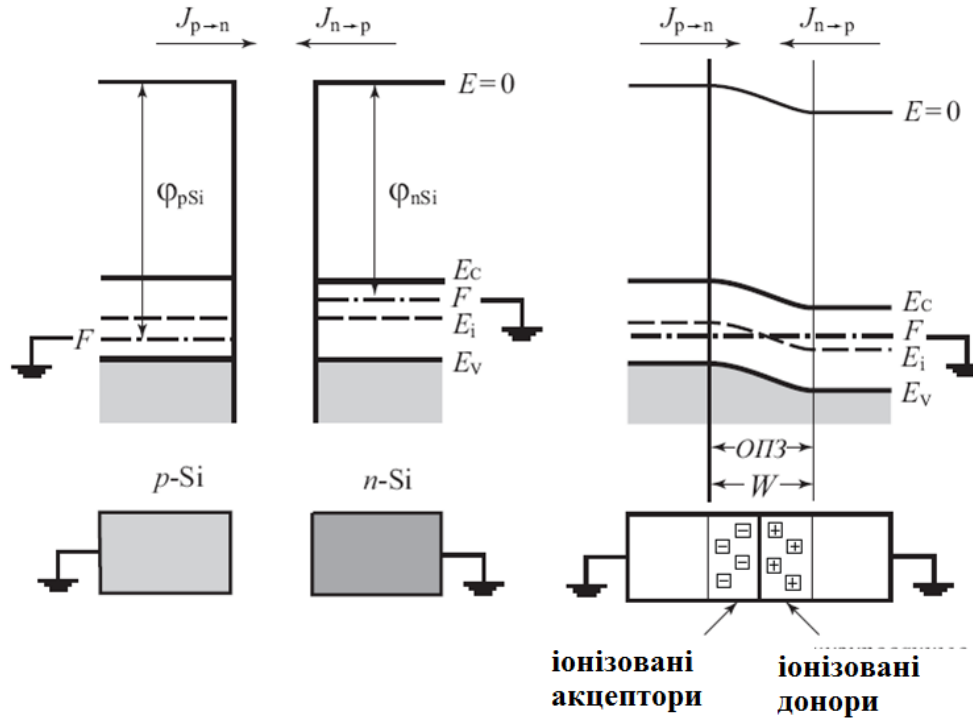
$$\psi = (1/e)[U(\infty) - U(z)] = (-1/e) \int_{\infty}^z E(z) dz$$

поверхневий потенціал при  $z=0$





## Утворення *p-n* переходу



гомоперехід

Струм термоелектронної емісії

$$j_t = AT^2 e^{-\frac{\Phi}{kT}}$$

Константа Річардсона  $A = \frac{4\pi e m^* k^2}{h^3}$

$$j_n > j_p$$



ОПЗ



Ефект поля

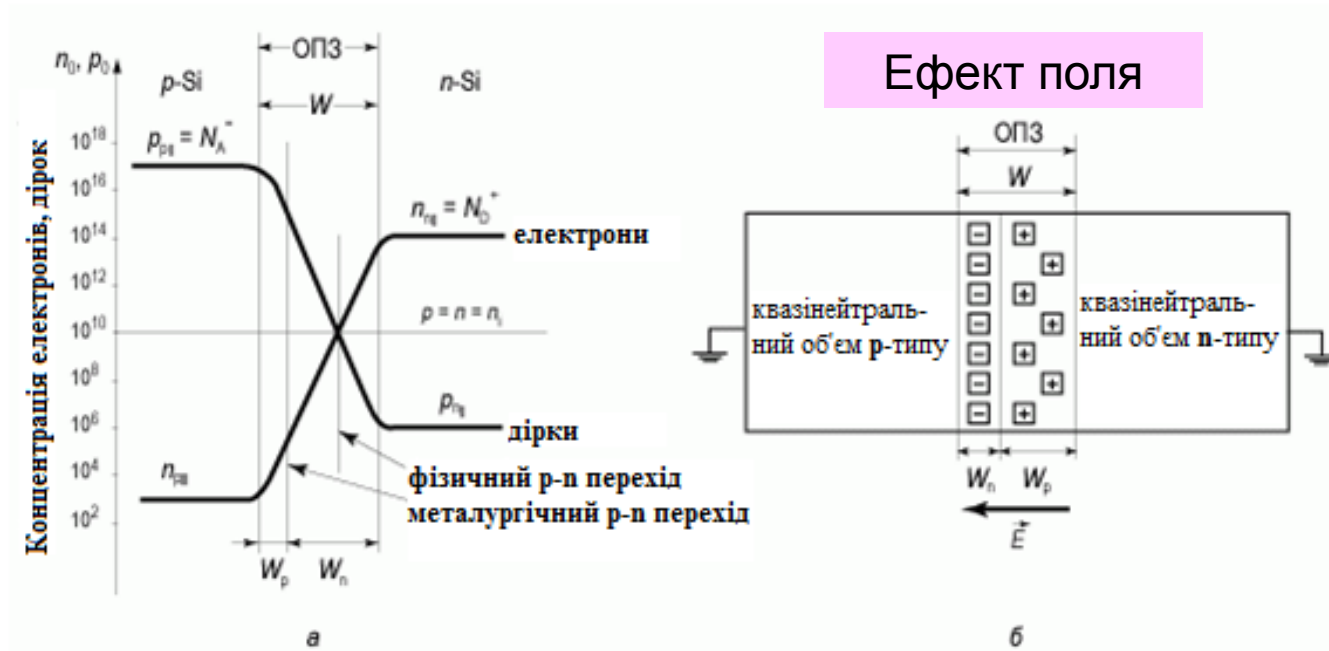


Поле в ОПЗ змінює потенціальну енергію електрона

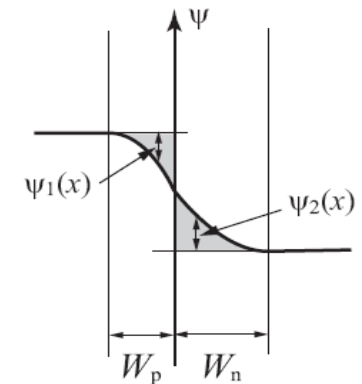
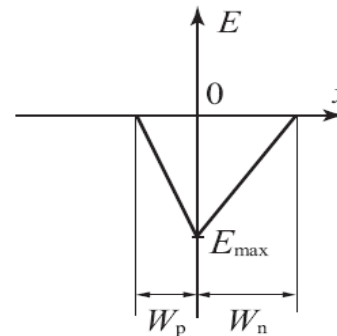


Вигин зон

## Утворення *p-n* переходу

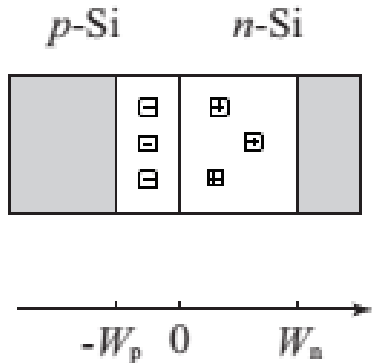


Розподіл  
електричного поля та  
потенціалу у *p-n*  
переході

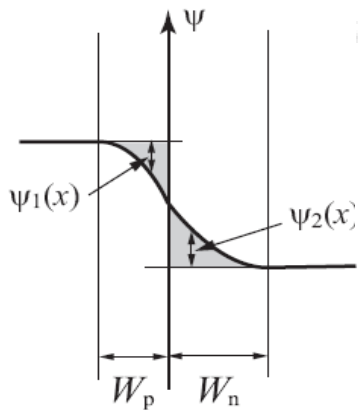


## Утворення *p-n* переходу

Поле і потенціал в *p-n* переході



$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0}$$



$$\psi_1(x) = \frac{qN_A^+}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x+W_p)^2, x < 0,$$

$$\psi_2(x) = -\frac{qN_D^+}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x-W_n)^2, x > 0.$$

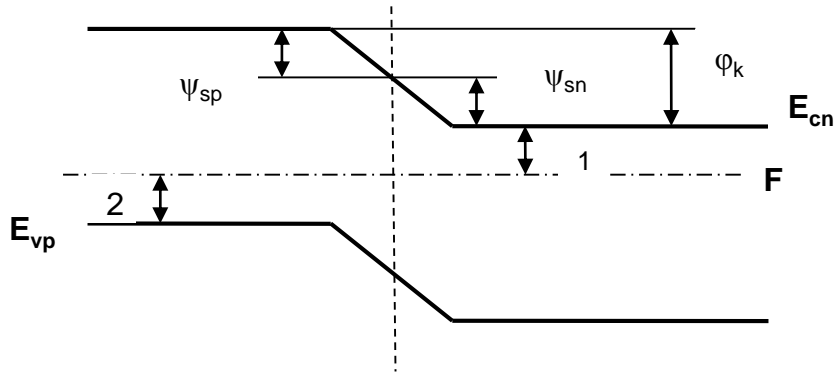
Якщо всі домішки іонізовані

$$W_n \cdot N_D = W_p \cdot N_A$$

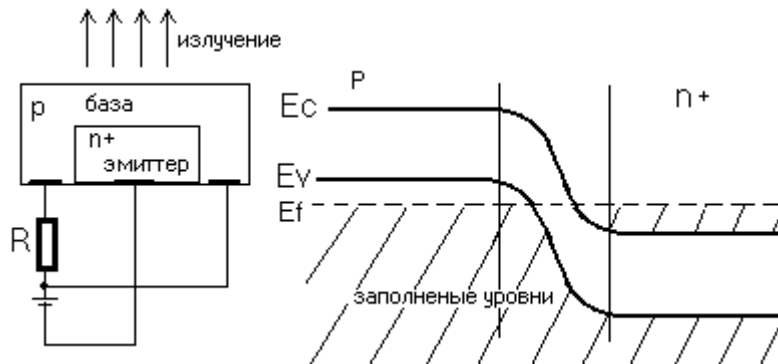
Контактна різниця  
потенціалів

$$\varphi_k = \frac{e}{2\epsilon_r\epsilon_0} W_p^2 N_A^2 \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

## Контактна різниця потенціалів



$$\begin{aligned} \varphi_k &= \psi_n - \psi_p \\ e\varphi_k &= E_g - \left[ (F - E_{vp}) + (E_{cn} - F) \right] = \\ &= kT \cdot \ln \left( \frac{n_{n_0} \cdot p_{p_0}}{n_i^2} \right) \approx kT \cdot \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \end{aligned}$$



## У стані рівноваги

$$n_{n_0} \cdot p_{n_0} = n_{p_0} \cdot p_{p_0} = n_i^2$$

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( \frac{p_{p_0}}{p_{n_0}} \right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( \frac{n_{n_0}}{n_{p_0}} \right)$$

### Концентрації носіїв по обидві сторони переходу



## Концентрації носіїв по обидві сторони переходу

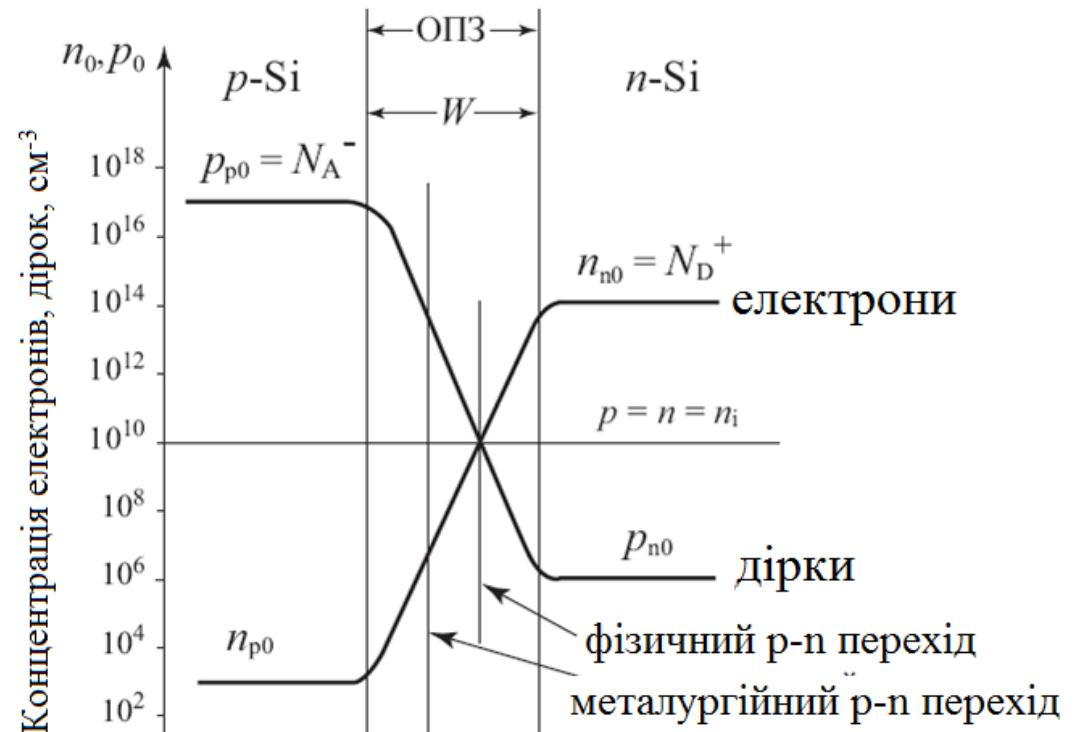
?

$$\rightarrow n_{p_0} = n_{n_0} \cdot e^{\frac{e\phi_{kn}}{kT}}$$

$$\rightarrow p_{n_0} = p_{p_0} \cdot e^{-\frac{e\phi_{kp}}{kT}}$$

$$\phi_{kn} < 0$$

$$\phi_{kp} > 0$$

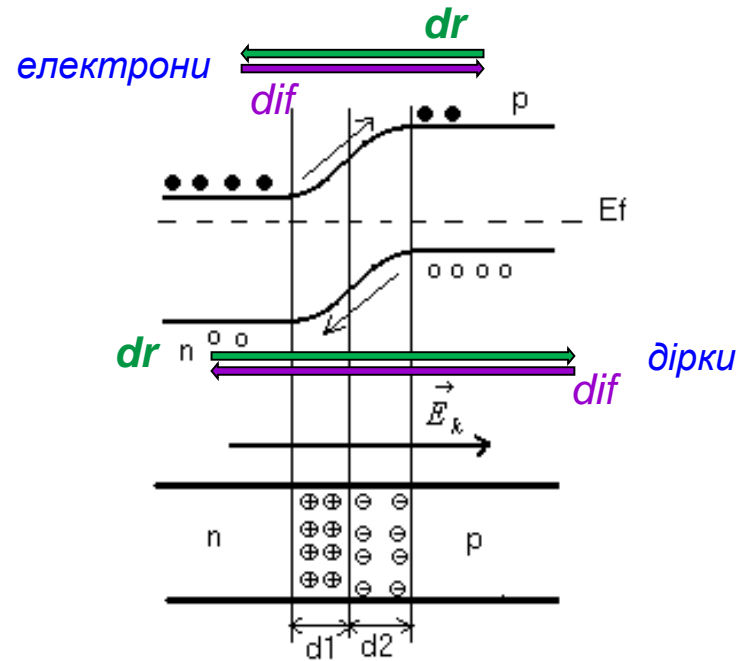


в урівноваженому р-п переході

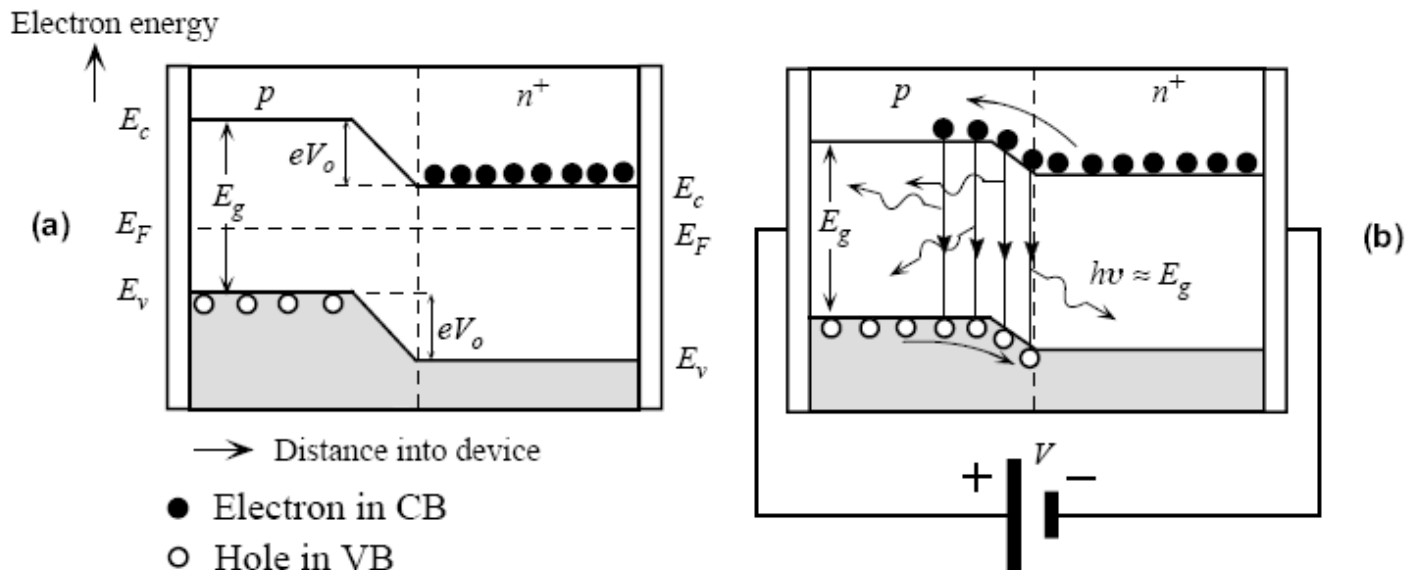
$$\begin{cases} \vec{j}_n = \vec{j}_{n\,dif} + \vec{j}_{n\,dr} = 0 \\ \vec{j}_p = \vec{j}_{p\,dif} + \vec{j}_{p\,dr} = 0 \end{cases}$$



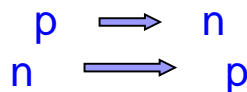
сталість рівня Фермі



## Інжекційна електролюмінесценція



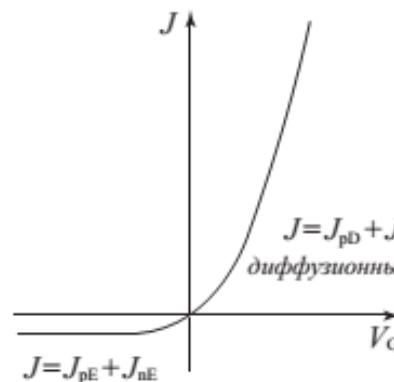
Зниження потенційного бар'єру при прикладанні  $U_{np}$  → дифузійні струми основних носіїв → інжекція через p-n перехід →



гомоперехід

$$n_n > n_p$$

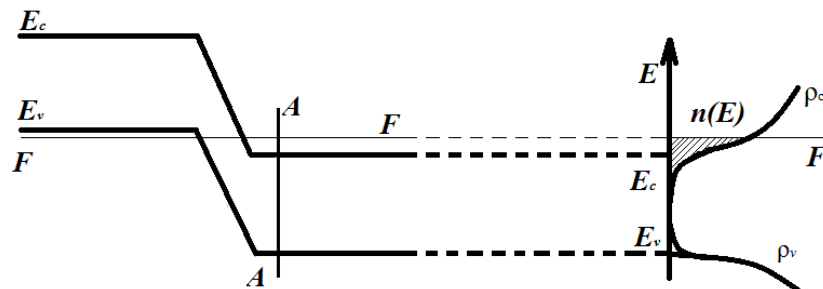
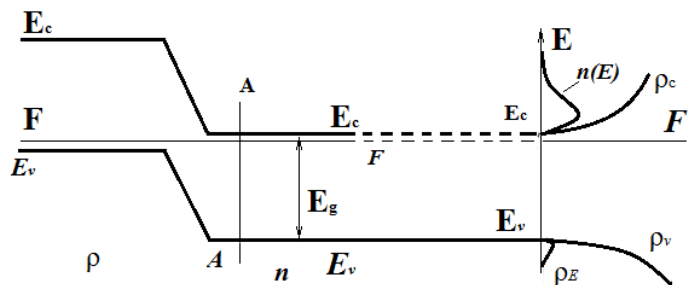
$$j = \left( \frac{eD_p \cdot p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n \cdot n_{p0}}{L_n} \right) \cdot \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$



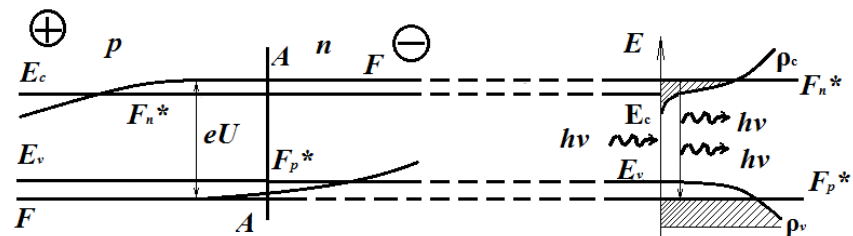
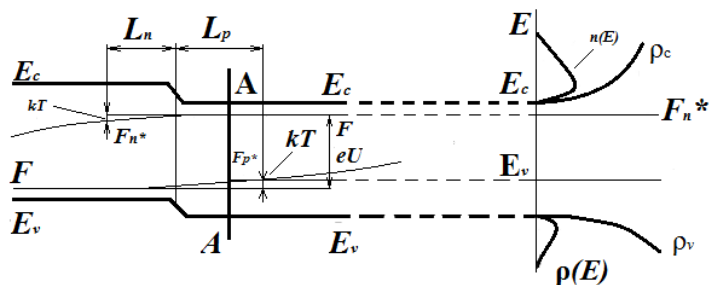
гомоперехід



а)



б)

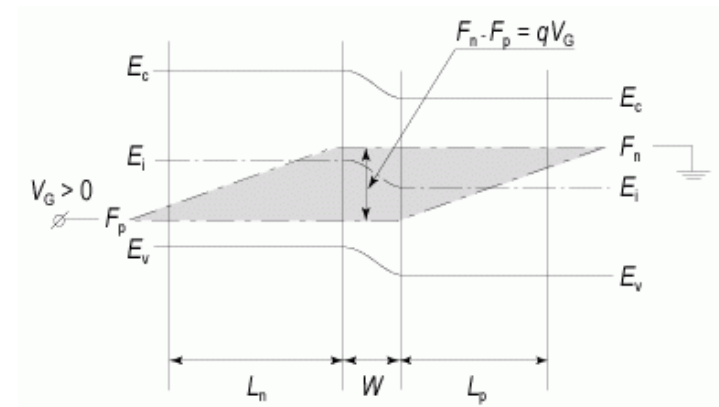
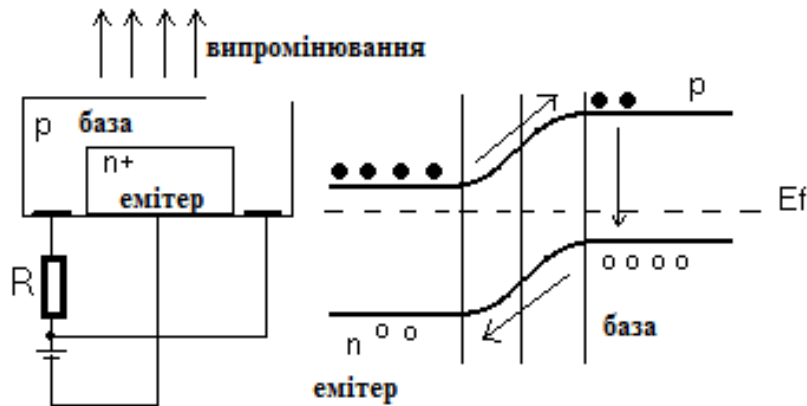


Зонні діаграми р-п та р<sup>+</sup>-п<sup>+</sup> переходів:

а) незміщеного,

б) прямозміщеного

## 4.3.2. Ефективність інжекції



## Ефективність інжекції

$$\gamma = \frac{I_n}{I} = \frac{I_n}{I_n + I_p + I_{рек} + I_{тун} + I_{нов}},$$

## 4.4. Квантова ефективність електролюмінесценції

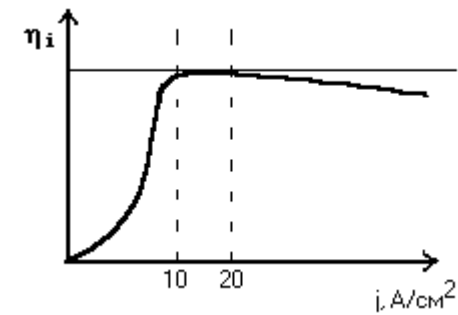
Зовнішній  
квантовий вихід  $\eta_{ef}$ :

$$\eta_{ef} = \gamma \eta_i \eta_{ont}$$

$$\eta_i = \frac{N_{ph}}{N_{рек}} = \frac{\text{кількість фотонів, що генеруються}}{\text{повне число рекомбінацій}} = \frac{W_{изл}}{W}$$

$$W = W_{изл} + W_{безизл}$$

$$\eta_i = \frac{W_{изл}}{W} = \frac{\tau}{\tau_R} \Rightarrow \left| \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_N} \right| \Rightarrow \eta_i = \frac{\tau_N}{\tau_N + \tau_R} = \left( 1 + \frac{\tau_R}{\tau_N} \right)^{-1},$$



## 4.5. Електролюмінесцентні джерела випромінювання

### Передпробійна електролюмінесценція

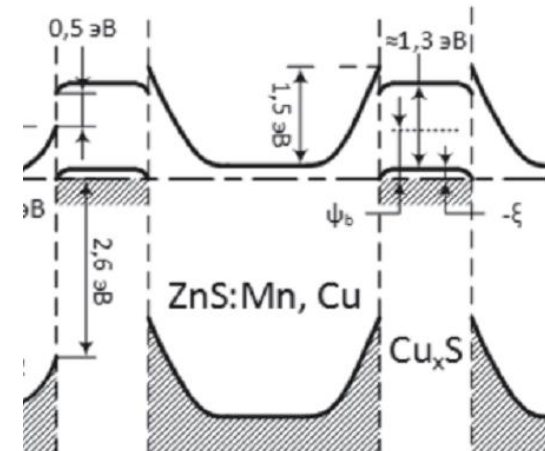
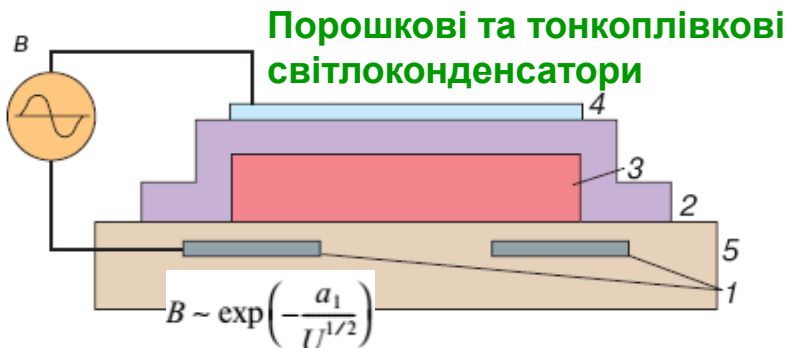
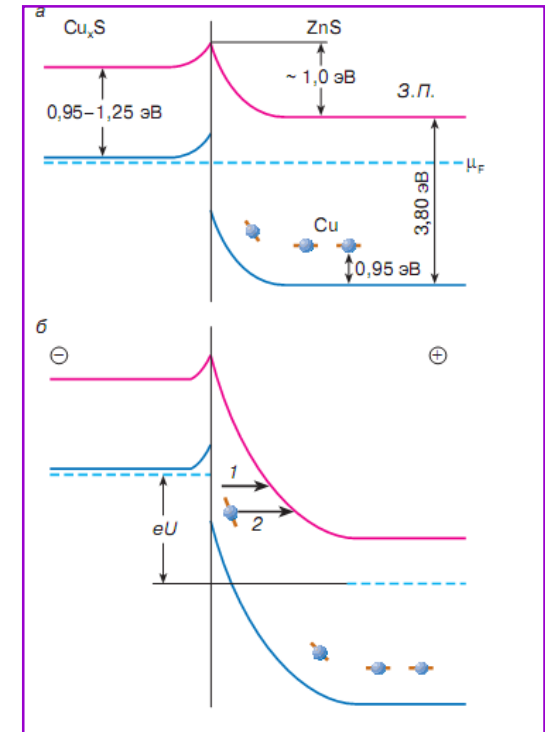
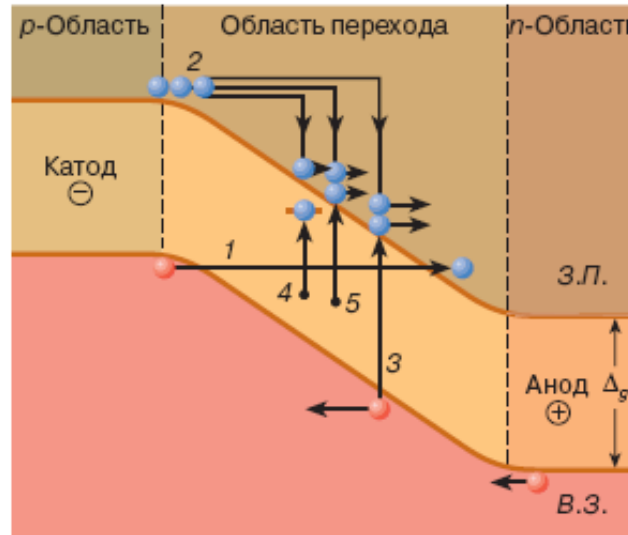
Тунельна  
іонізація 1

Ударна іонізація  
3,4,5

Ймовірність  
міжзонного  
бесфоновного  
тунелювання

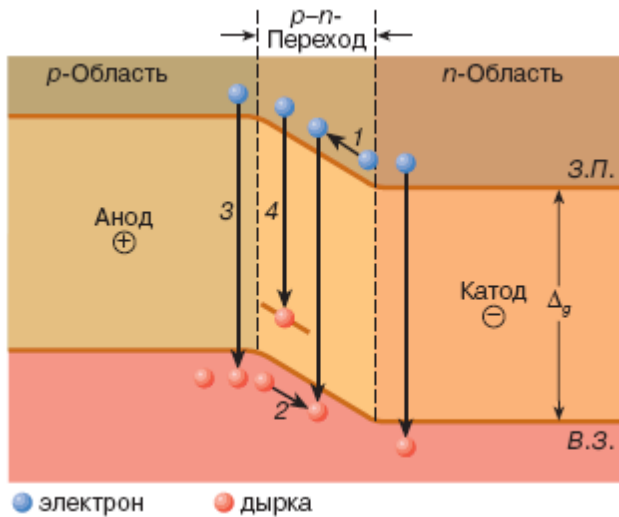
$$W_{\text{тун}} = \frac{eEd}{2\pi\hbar} \exp\left[-\frac{\pi}{4e\hbar E} \sqrt{2m^*} \Delta_g^{3/2}\right]$$

(C. Zener)



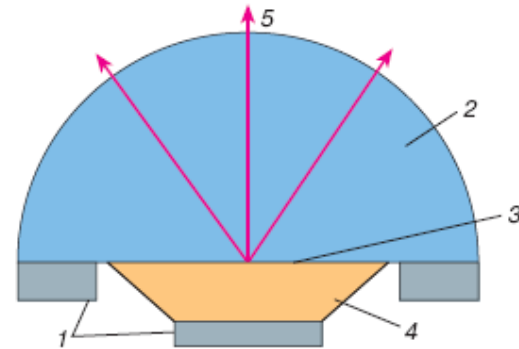
## 4.6. Світлодіоди

### Характеристики та конструкції світлодіодів Світлодіоди на гомопереходах



База

Емітер



1- металеві контакти

2- n-область

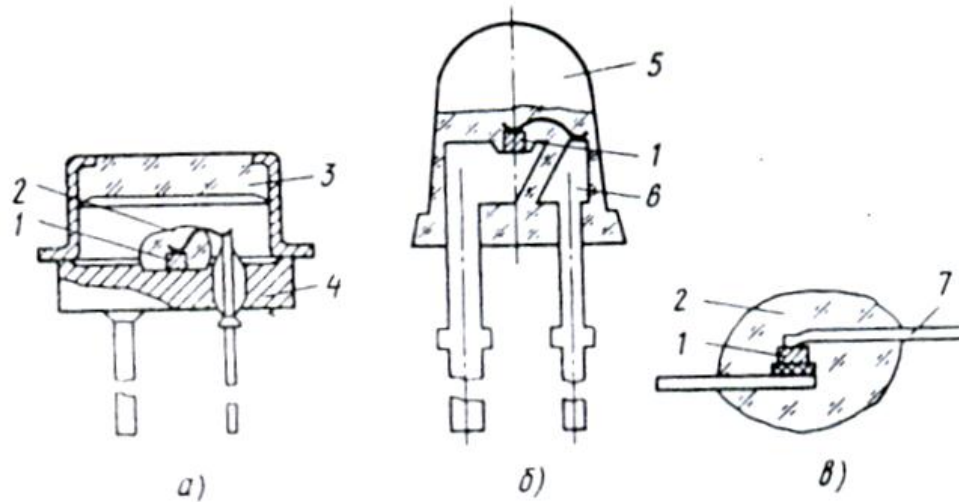
3- р-п перехід

4- р-область

## 4.6. Світлодіоди

Характеристики та конструкції світлодіодів  
Світлодіоди на гомопереходах

Колір	Матеріал	Підкладка	$\lambda$ , нм	$\eta_{\Sigma}$ , Лм/Вт
Червоний	GaP:ZnO	GaP	700	0.4-0.8
	GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>	GaAs	655	0.15
	Al <sub>0.35</sub> Ga <sub>0.65</sub> As	GaAs	665	0.4-0.7
Помаранчевий	GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> :N	GaP	600	0.4
Жовтий	GaP:N	GaP	590	2.4
	GaAsP <sub>0.85</sub> :N	GaP	580	0.66
Зелений	GaP:N	GaP	565	0.7
Блакитний	GaN (МДП)	SiC	490	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	SiC	SiC	480	$1.4 \cdot 10^{-6}$
Фіолетовий	ZnS (МДП)	-----	456	$2.5 \cdot 10^{-2}$

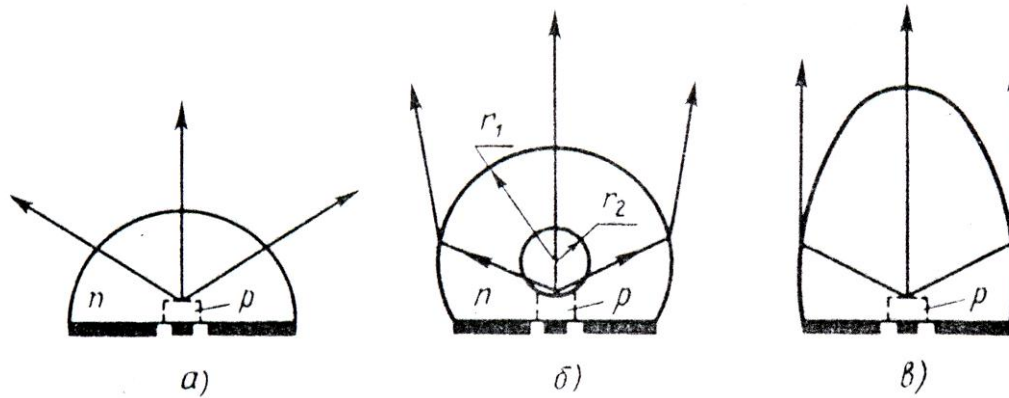


## Конструкції деяких типів світлодіодів:

- а) АЛ-102 в корпусі;
- б) АЛ-307 з лінзою;
- в) АЛ-336 безкорпусний:
  - 1 - кристал світлодіода;
  - 2 - полімерний захист;
  - 3 - скляне вікно;
  - 4 - металоскляна ніжка;
  - 5 - полімерна лінза;
  - 6 - утримувач;
  - 7 - гнучкий вивід.



## Над'яскраві світлодіоди

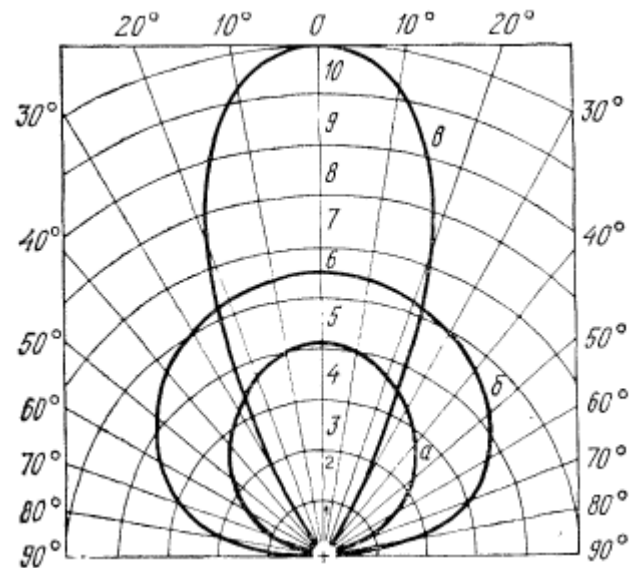


Півсфера

сфера Веєрштраса

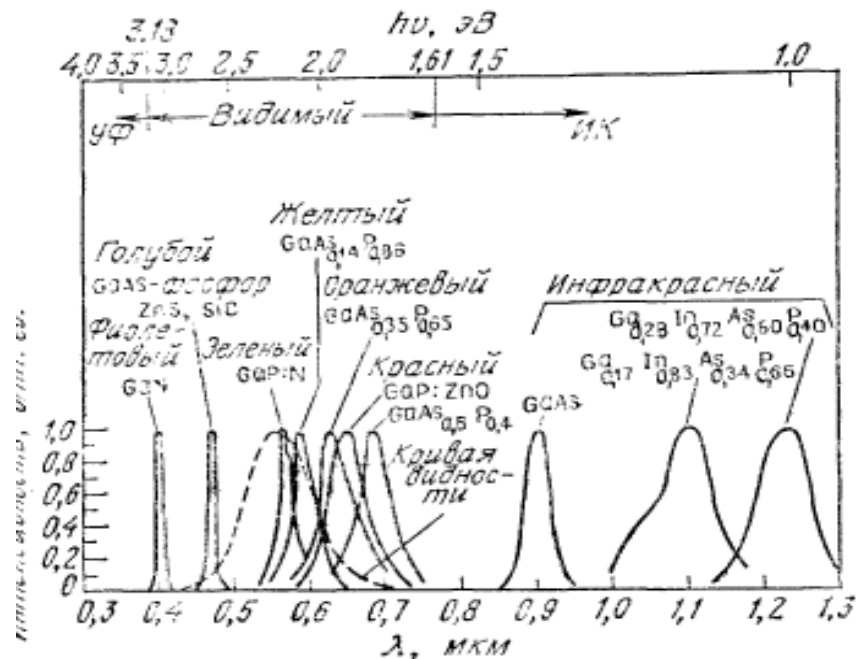
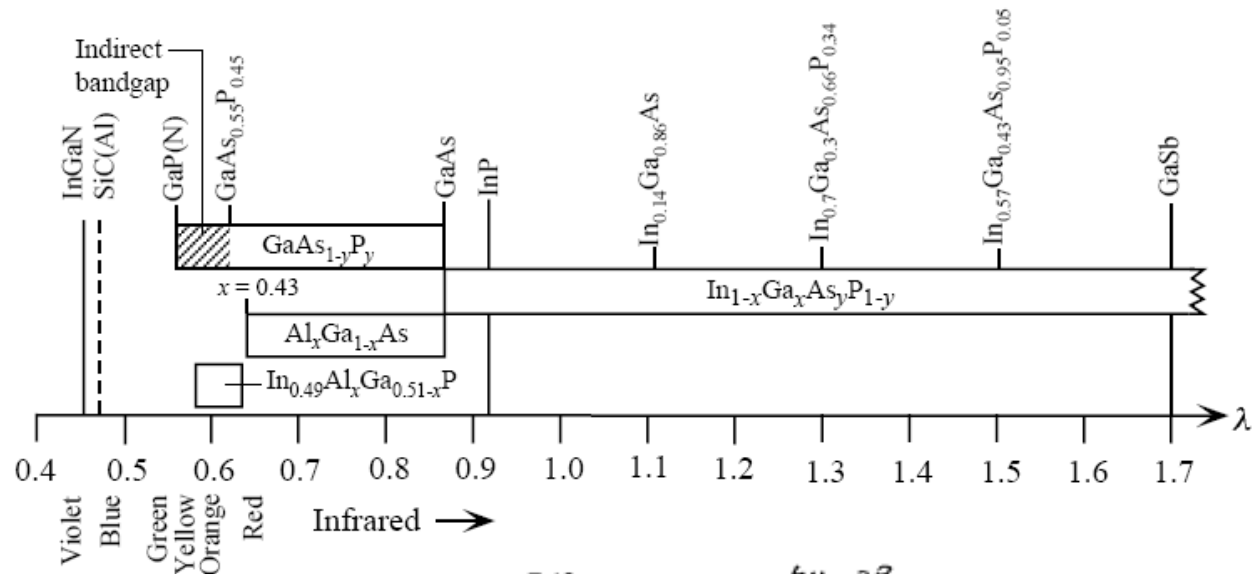
еліпсоїд

Типи конфігурацій випромінюючих кристалів із зменшеним коефіцієнтом оптичних втрат



Діаграми напрямленості світлодіодів  
плоскої, сферичної та параболічної  
геометрії

## Матеріали світлодіодів

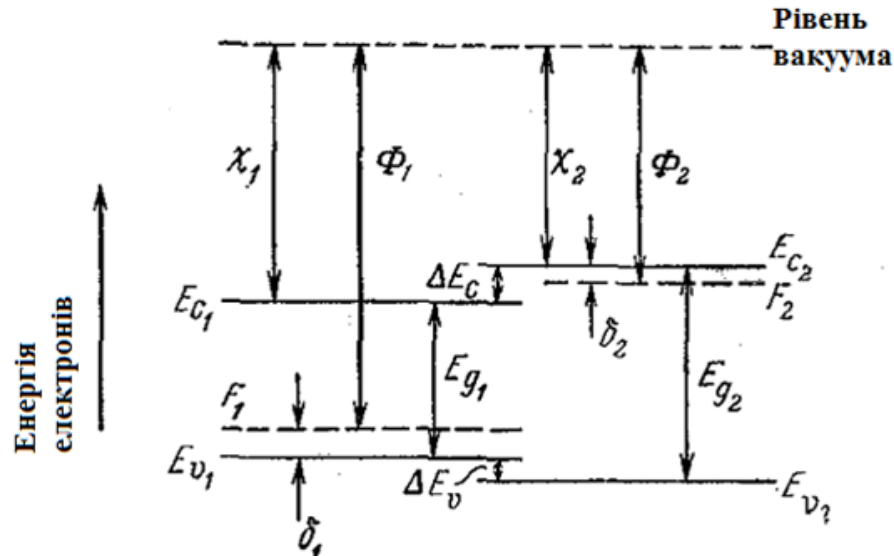


## 4.6.5. Гетеропереходи (ГП), зонні діаграми та типи ГП. Світлодіоди на гетеропереходах

**«Напівпровідникові гетероструктури - основа розвитку сучасної електроніки та високоефективної енергетики» Ж. І. Алфьоров**



## Утворення гетеропереходу

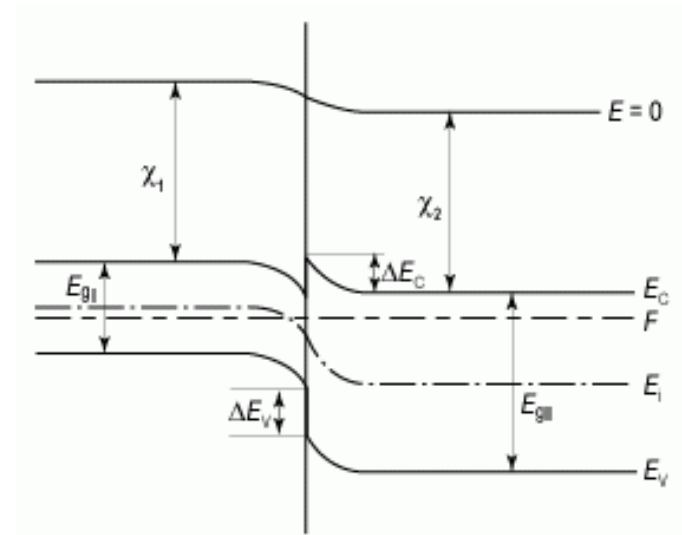


Правило Андерсена →

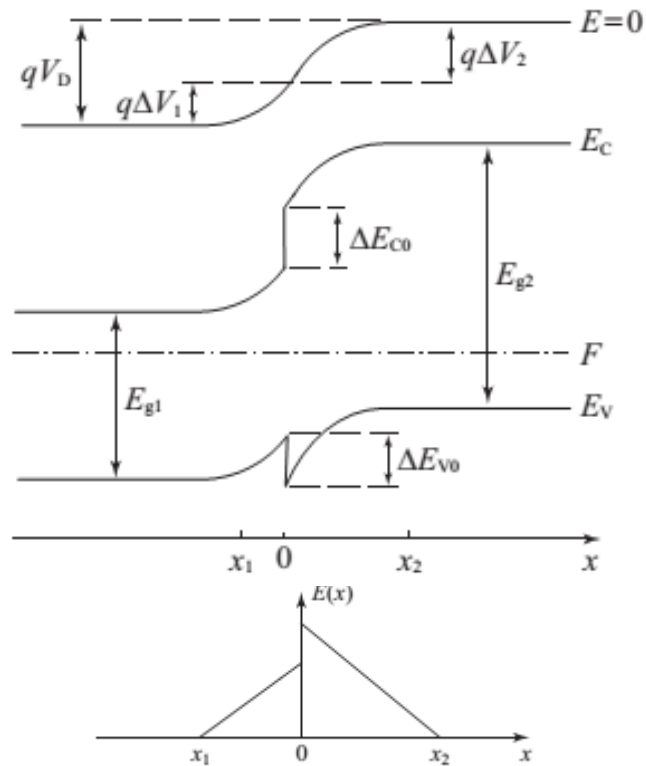
$$E_{C1} - E_{C2} = \Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 = \Delta \chi$$

$$\Delta E_V = E_{V2} - E_{C2} - \Delta E_C$$

$$\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta \chi$$



## Утворення гетеропереходу

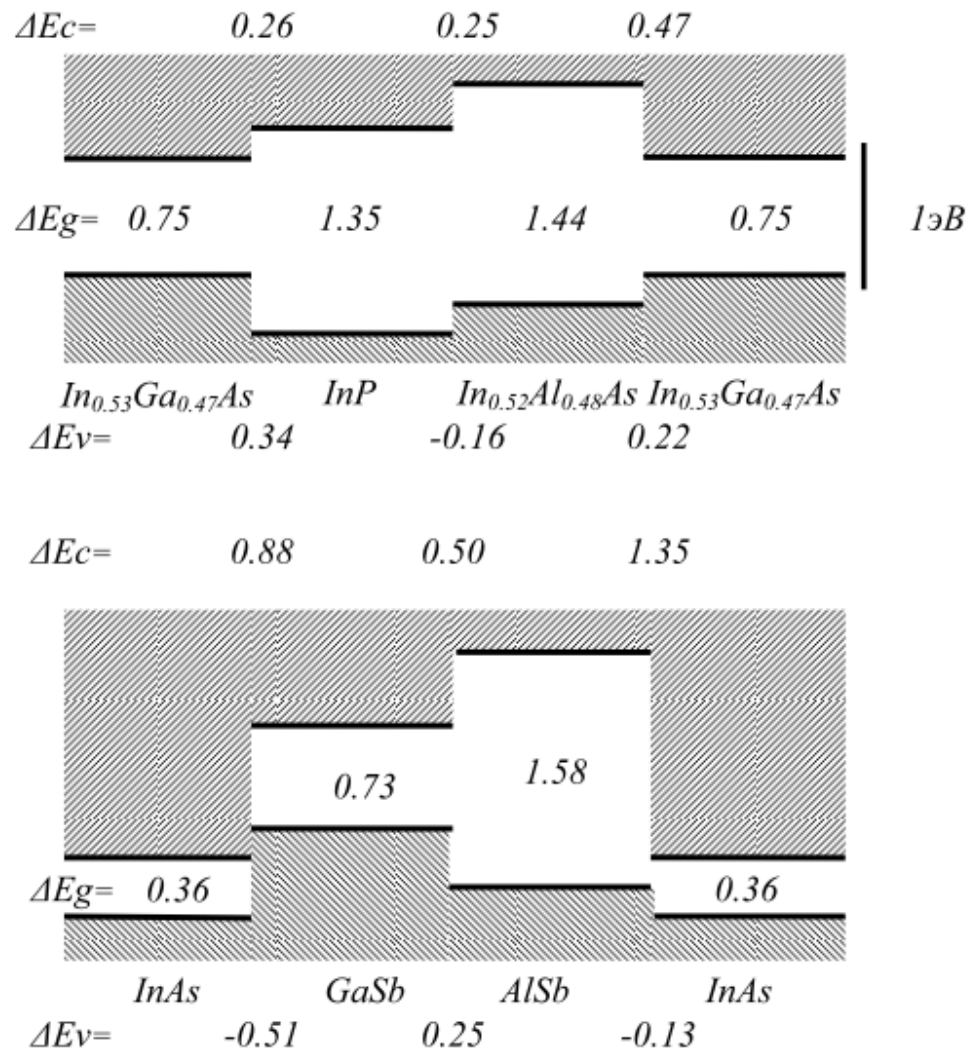


$$\varepsilon_1 E_{1\max} = \varepsilon_2 E_{2\max}$$

Розподіл електричного поля в ОПЗ гетеропереходу (n-Ge – P-GaAs)

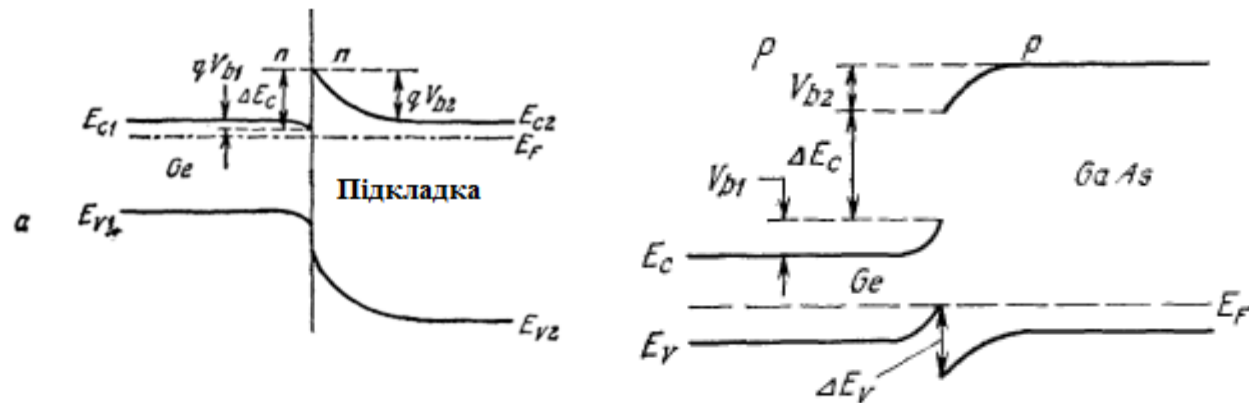
## Утворення гетеропереходу

Гетеропереходи I-го і II-го роду

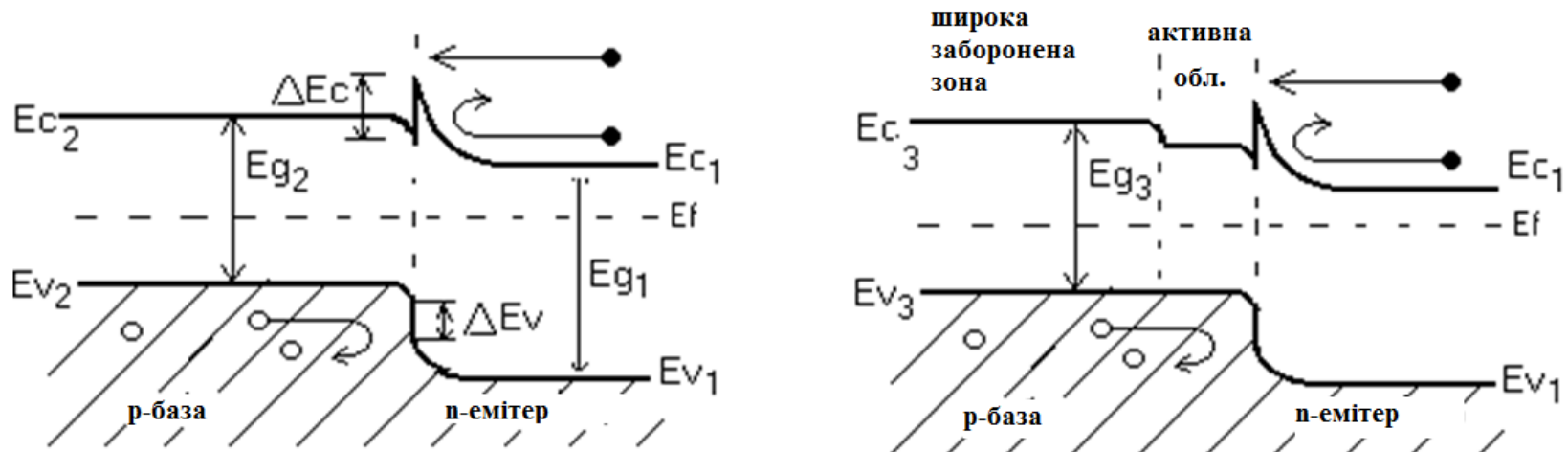


Експериментально визначені розриви валентної зони і зони провідності двох найближчих за параметрами ґратки гетеропар: а)  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  -  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  -  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  -  $\text{InP}$  та б)  $\text{InAs}$  -  $\text{GaSb}$  -  $\text{AlSb}$  -  $\text{InAs}$

## Ізотипні та анізотипні гетеропереходи



## Одинарні та подвійні гетероструктури

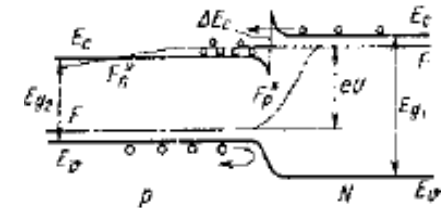
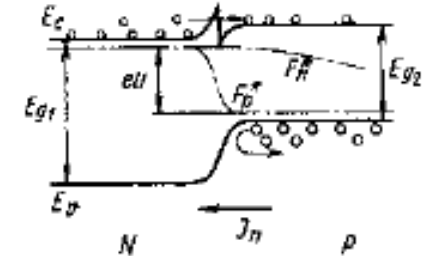


## Властивості гетеропереходів

1. Ефект широкозонного вікна

2. Ефект односторонньої інжекції

3. Ефект надінжекції



Оптичне та електронне обмеження

$$n^2 \sim E_g^{-1} \Rightarrow n \sim E_g^{-1/2}$$

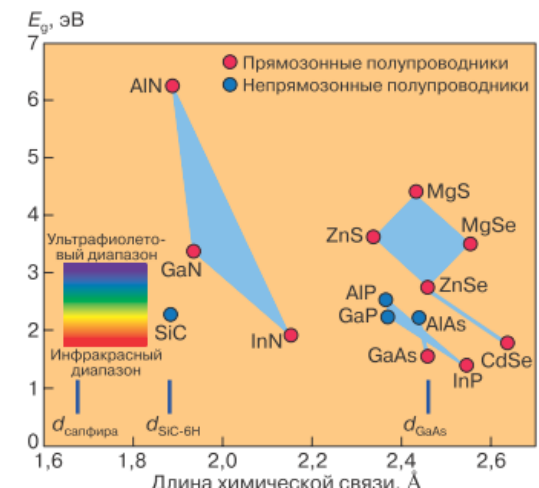
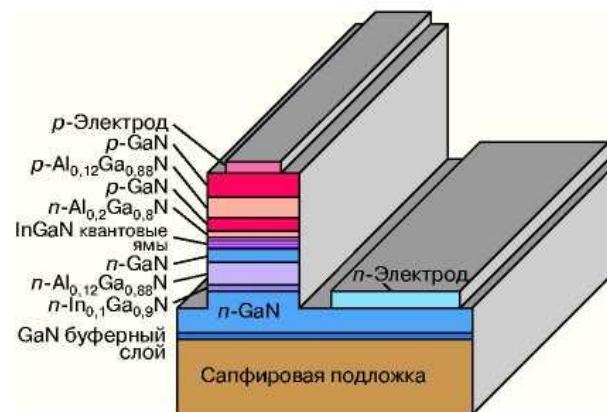
Формула Мосса



## Характеристики некоторых типов светодиодов

Semiconductor	Substrate	D or I	$\lambda$ (nm)	$\eta_{\text{external}}$ (%)	Comment
GaAs	GaAs	D	870 - 900	10	Infrared LEDs
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $0 < x < 0.4$ )	GaAs	D	640 - 870	5 - 20	Red to IR LEDs. DH
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ( $y \approx 2.20x$ , $0 < x < 0.47$ )	InP	D	1 - 1.6 $\mu\text{m}$	$> 10$	LEDs in communications
InGaN alloys	GaN or SiC Sapphire	D	430 - 460 500 - 530	2 3	Blue LED Green LED
SiC	Si; SiC	I	460 - 470	0.02	Blue LED. Low efficiency
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$	GaAs	D	590 - 630	1 - 10	Amber, green red LEDs
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ( $y < 0.45$ )	GaAs	D	630 - 870	$< 1$	Red - IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ( $y > 0.45$ ) (N or Zn, O doping)	GaP	I	560 - 700	$< 1$	Red, orange, yellow LEDs
GaP (Zn-O)	GaP	I	700	2 - 3	Red LED
GaP (N)	GaP	I	565	$< 1$	Green LED

## Конструкция синього світлодіода на КЯ



## Нобелівська премія з фізики 2014 р.

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources".



**Ісаму Акасакі (Isamu Akasaki) та Хіросі Амано (Hiroshi Amano) з Нагойського університету, а також Сюдзі Накамура (Shuji Nakamura)**

Зараз на освітлення витрачається 20% світових електричних потужностей, однак масове застосування світлодіодів зменшить цю частку до 4%.

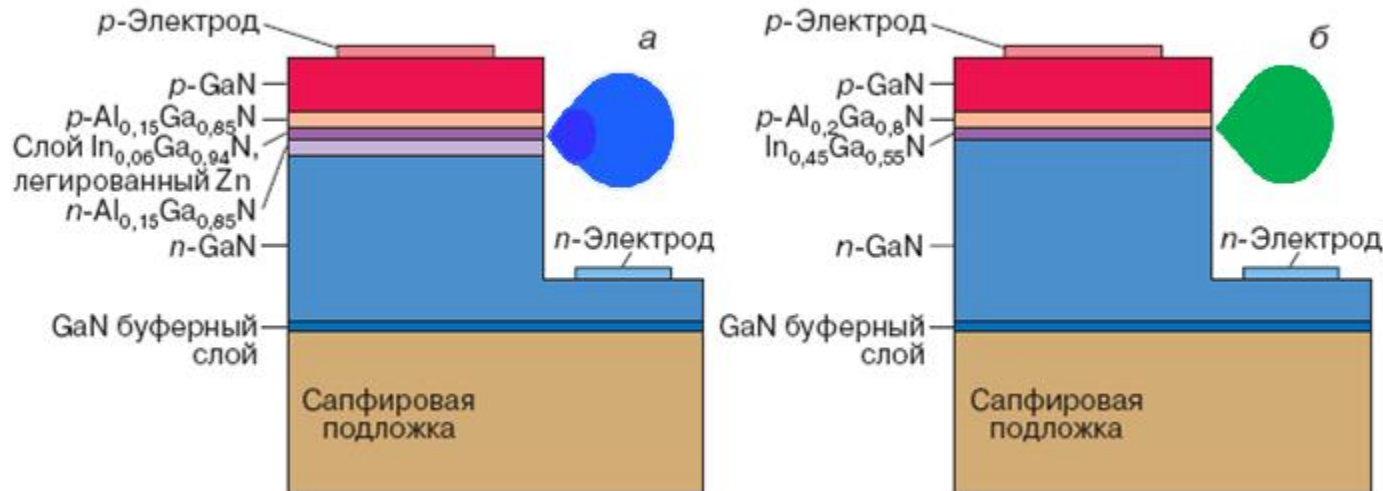
## Порівняння характеристик деяких світлодіодів

Світлодіод	Матеріал	Довжина хвилі випромінювання, нм	Інтенсивність люмінесценції, мккд	Вихідна потужність, мкВт	Квантовий вихід, %
Червоний	GaAlAs	660	1790	4855	12,83
Зелений	GaP	555	63	30	0,07
Зелений	InGaN	500	2000	1000	2,01
Синій	SiC	470	9	11	0,02
Синій	InGaN	450	2500	3000	5,45

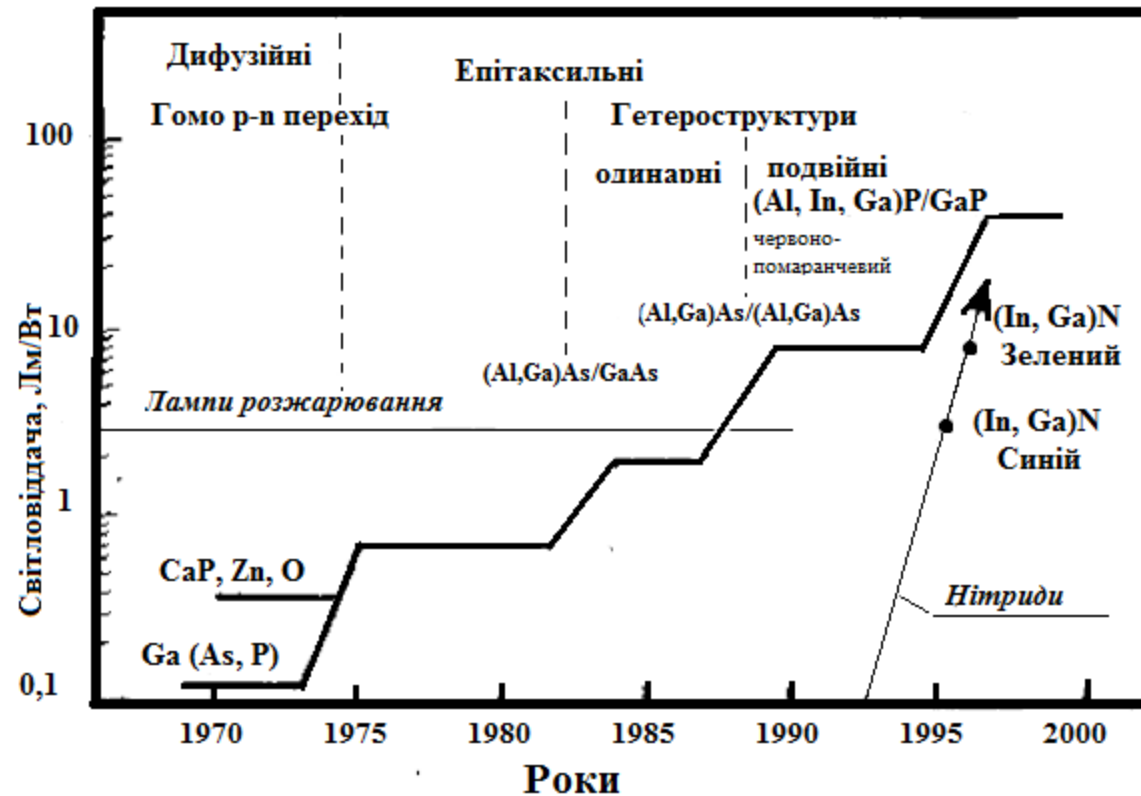
29 листопада 1993 "Nichia Chemical Industries Ltd" оголосила про початок виробництва світлодіодів на GaN

Ш.Накамура про перемогу в гонці з І.Акасакі:  
«Я був впевнений, так як в Японії, коли конкурують університетський професор та компанія, компанія зазвичай виграє, тому що університети за короткий час не можуть дістати багато грошей»

Структури світлодіодів:  
а) на ПГС; б) на КЯ

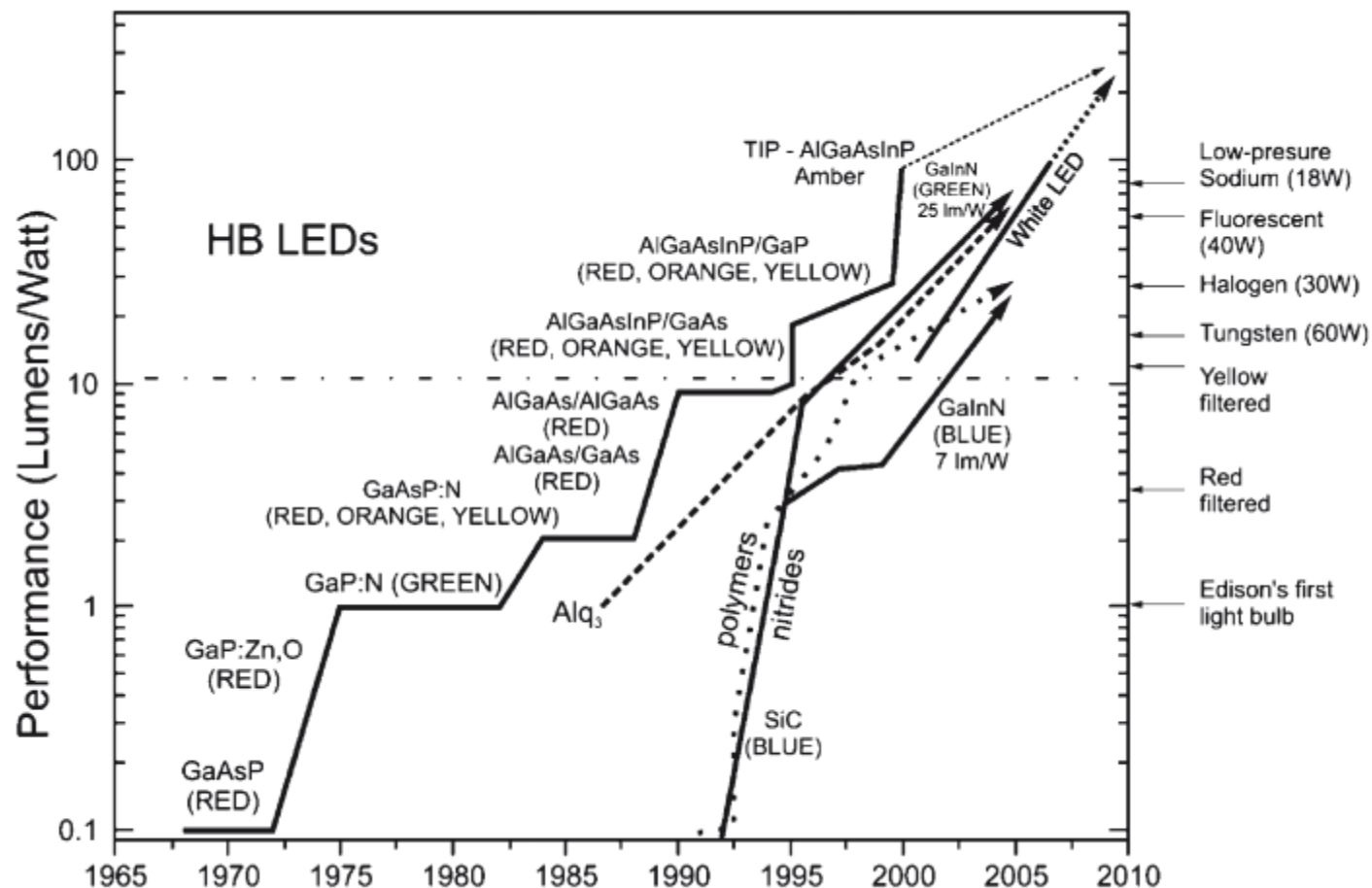


## Еволюція ефективності червоних світлодіодів



Піхтін А.Н.

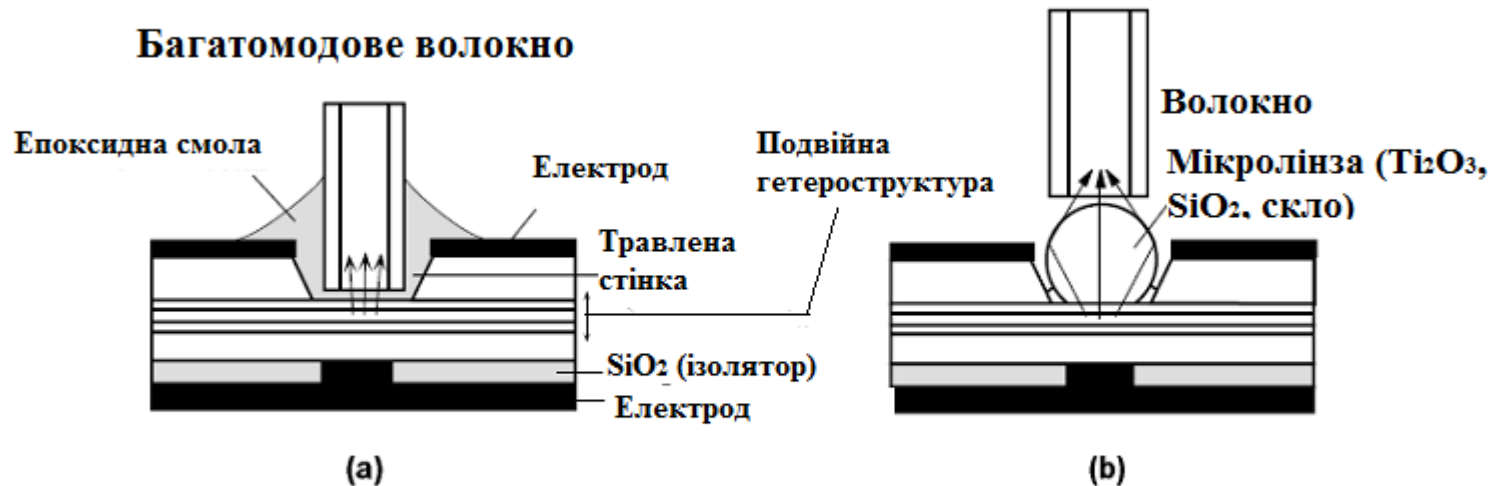
## Еволюція ефективності LED та OLED



### Optoelectronics

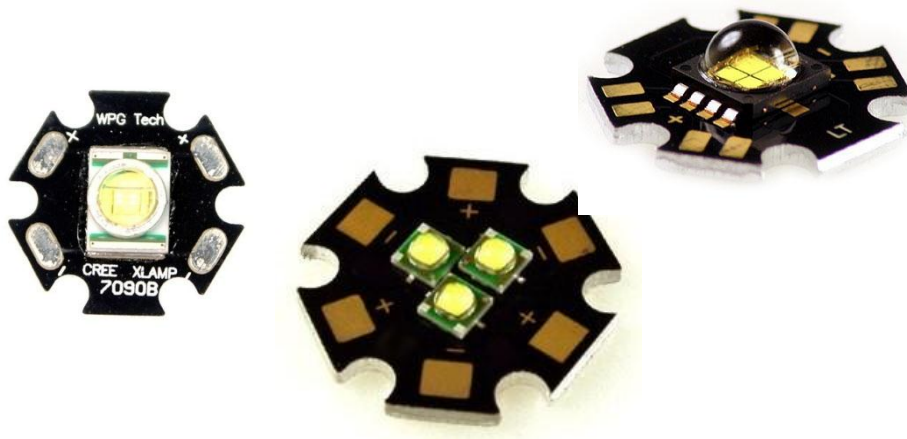
Jaroslav Kováčč, František Uherek, Daniel Donoval,  
Jaroslav Kováččjr., and Alexander Šatka

## Поверхнево випромінюючі світлодіоди на гетеропереходах для ВОЛЗ



З'єднання з волокном за допомогою епоксидної смоли з відповідним показником заломлення

Мікролінза фокусує світло від поверхнево-випромінюючих світлодіодів



**Кристали світлодіодів Cree LED**  
**Властивості:**

- 1) *Висока ефективність*
- 2) *Мінімум 300 мВт, 350 мА, 450...470 нм*
- 3) *Ламбертівський розподіл випромінювання*



## Виробництво та використання світлодіодів

Ефективність освітлювальних приладів: **хороші лампи розжарювання** - 16 Лм/Вт, **компактні флуоресцентні** – 64 Лм/Вт, довгі **трубки денного світла** – 80 Лм/Вт, **над'яскравий світлодіод** - 160 Лм/Вт *(на сьогодні до 300)*

Теоретична межа для світлодіодів - 320 Лм/Вт

### СВЕРХЪЯРКИЕ СВЕТОДИОДЫ CREE

www.cree.com





**В стандартных корпусах**

- ◇ Двухвыводной корпус
- ◇ Круглое или овальное сечение
- ◇ Диаметр: 3, 4 или 5 мм
- ◇ Цвет свечения: белый или монохромный
- ◇ Угол свечения: от 15 до 140 градусов



**В корпусах типа P4 (Пиранья)**

- ◇ Четырехвыводной корпус
- ◇ Размеры: 7,5 x 7,5 мм
- ◇ Цвет свечения: белый или монохромный
- ◇ Линза: круглая или овальная
- ◇ Угол свечения: от 40 до 120 градусов
- ◇ Рабочий ток: 30 – 70 мА



**В корпусах типа PLCC**

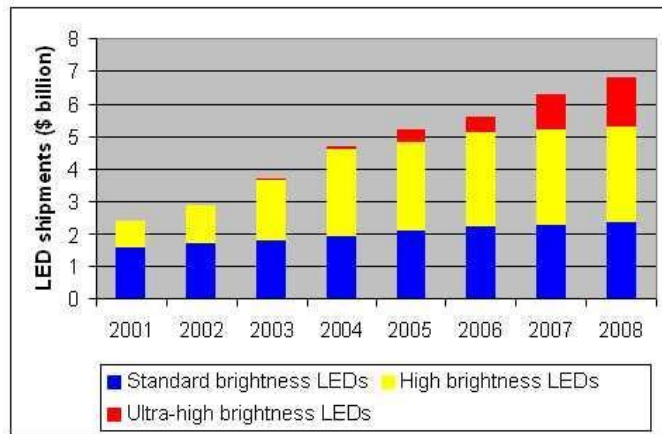
- ◇ Корпуса: PLCC-2, PLCC-4 и PLCC-6
- ◇ Однокристалльные и многокристалльные
- ◇ Одноцветные (белый или монохромный) и многоцветные (RGB)
- ◇ Угол свечения: от 40 до 120 градусов
- ◇ Рабочий ток: 20 – 50 мА на кристалл



**CLN6A**

- ◇ Корпус для поверхностного монтажа
- ◇ Размеры: 5,0 x 5,0 x 1,3 мм
- ◇ Цвет свечения: белый холодный или белый теплый
- ◇ Световой поток: до 101,8 лм
- ◇ Рабочий ток: до 350 мА
- ◇ Угол свечения: 115 градусов

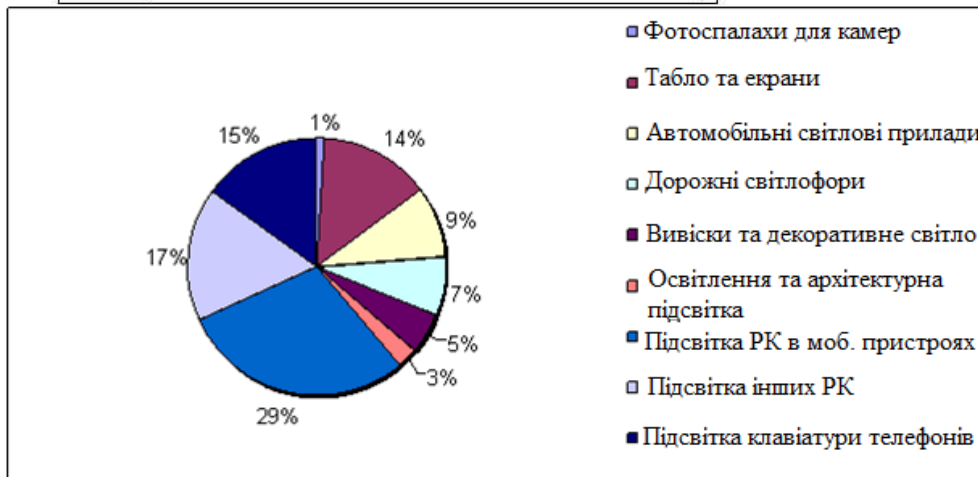
## Виробництво та використання світлодіодів



ВОЛЗ  
Оптрони  
Підсвітка  
Екрани



Sony 11-дюймовий OLED



**Світлодіоди ультрависокої яскравості**

(Ultra-high brightness LEDs) - десятки кандел;

**Світлодіоди високої яскравості**

(High brightness LEDs) - сотні міллікандел;

**Світлодіоди стандартної яскравості**

(Standard brightness LEDs) - десятки міллікандел.



## Тема 5. Когерентні джерела випромінювання

### 5.1. Особливості напівпровідникових лазерних активних матеріалів

5.1.1. Види поглинання в кристалах

5.1.2. Умова інверсії і посилення в напівпровідниках

### 5.2. Напівпровідникові лазери з електронним і оптичним накачуванням

### 5.3. Інжекційні лазери

5.3.1. Інжекційні лазери на гомо- і гетеропереходах (ПГС лазери)

5.3.2. Порівняльна характеристика гомо- і ПГС лазера (ПГС – подвійна гетероструктура)

5.3.3. Гранична густина струму накачування

5.3.4. ККД напівпровідникового лазера

5.3.5. Смугові ПГС лазери

### 5.4. Гетеролазери з роздільними електронним і оптичним обмеженнями (РОПГС - лазери)

5.4.1. Квантоворозмірні структури: квантові ями, нитки і точки. Надґратки.

5.4.2. Густина станів у квантово-розмірних структурах

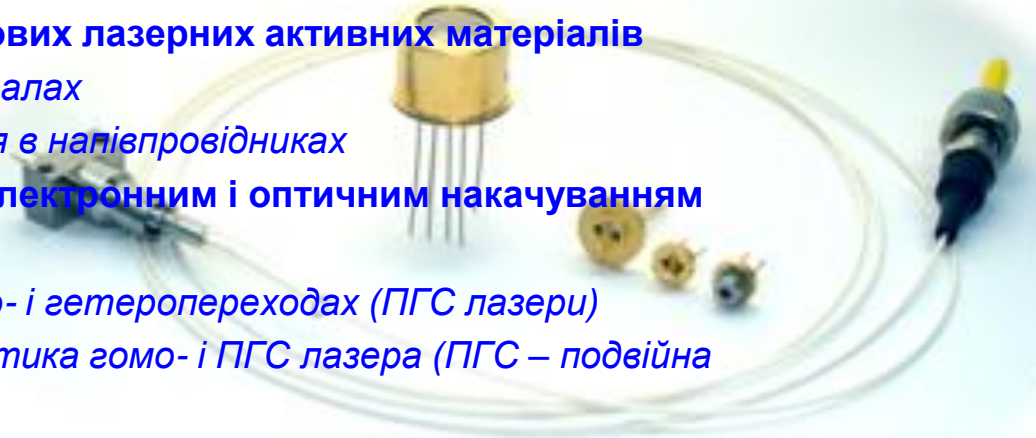
5.4.3. РОПГС - лазери

### 5.5. Робочі характеристики інжекційних лазерів

### 5.6. Каскадні лазери

### 5.7. Поверхнево випромінюючі лазери

### 5.8.РЗЗ та РБВ лазери



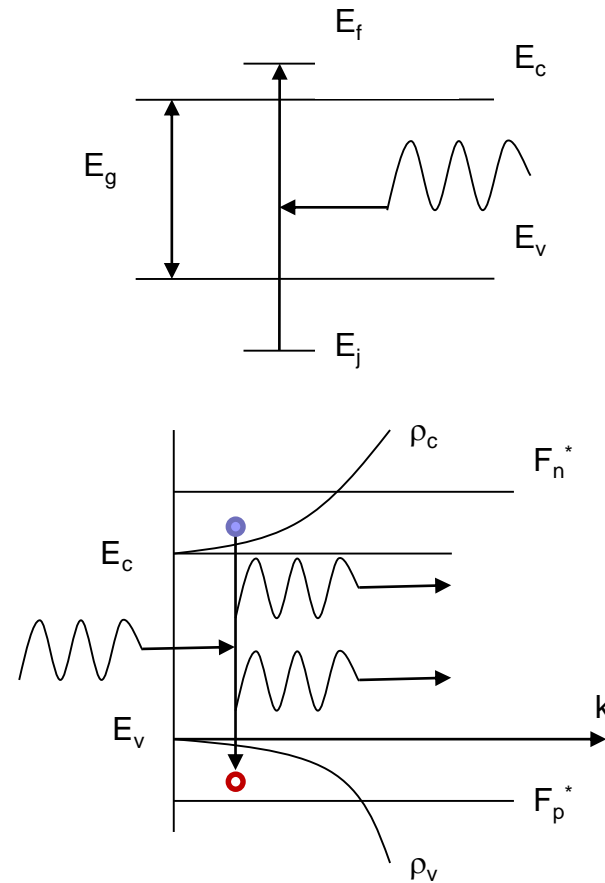
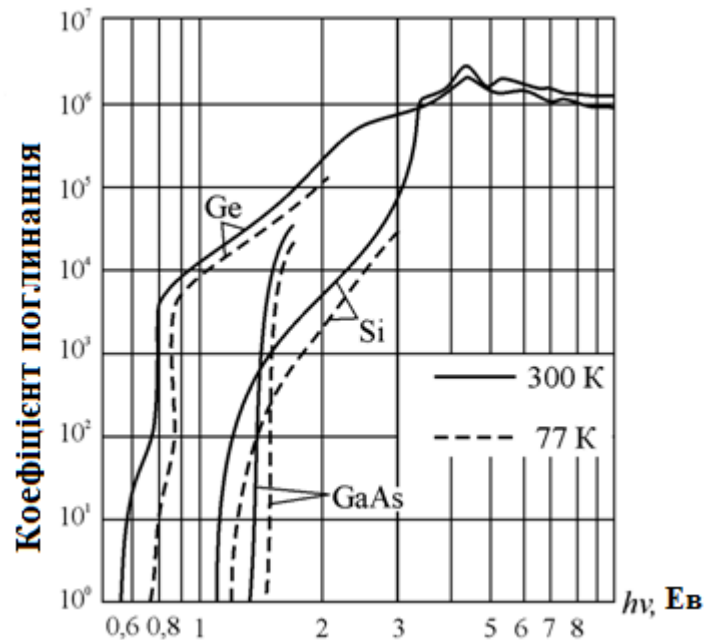
## 5.1. Особливості напівпровідникових лазерних активних матеріалів

### 5.1.1. Види поглинання в кристалах

### 5.1.2. Умова інверсії і посилення в напівпровідниках

#### Види поглинання в кристалах:

- фундаментальне
- ґраткове
- домішкове
- вільними носіями



## 5.1. Особливості напівпровідникових лазерних активних матеріалів

5.1.1. Види поглинання в кристалах

5.1.2. Умова інверсії і підсилення в напівпровідниках

$$k_{\omega} \sim \omega_{ff} N(\hbar\omega)$$

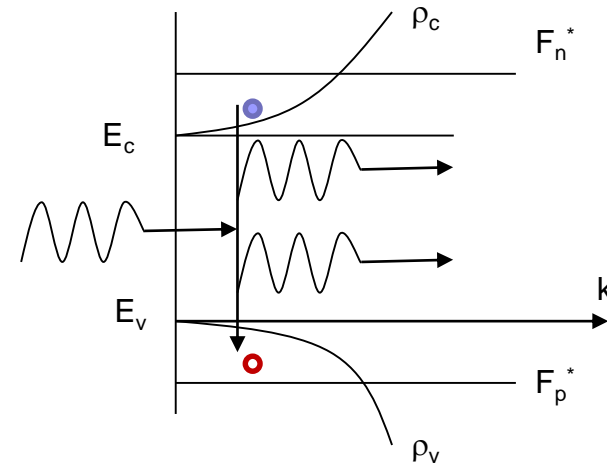
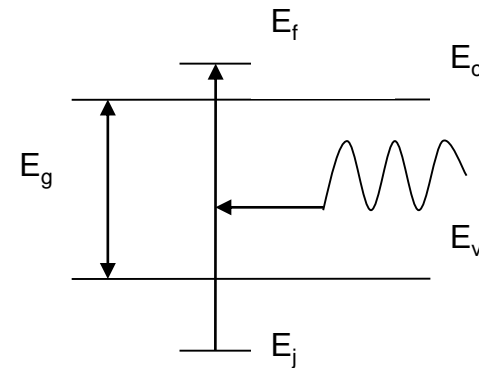
$$N(\hbar\omega)d(\hbar\omega) = \frac{8\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (\hbar\omega - E_g)^{1/2} d(\hbar\omega)$$

$$k_{\omega} = A(\hbar\omega - E_g)^{1/2}$$

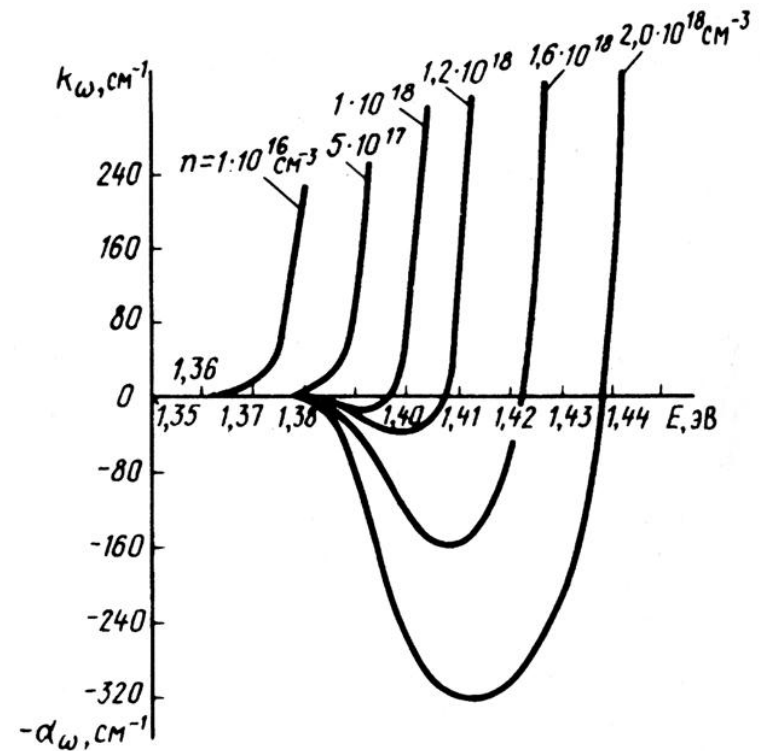
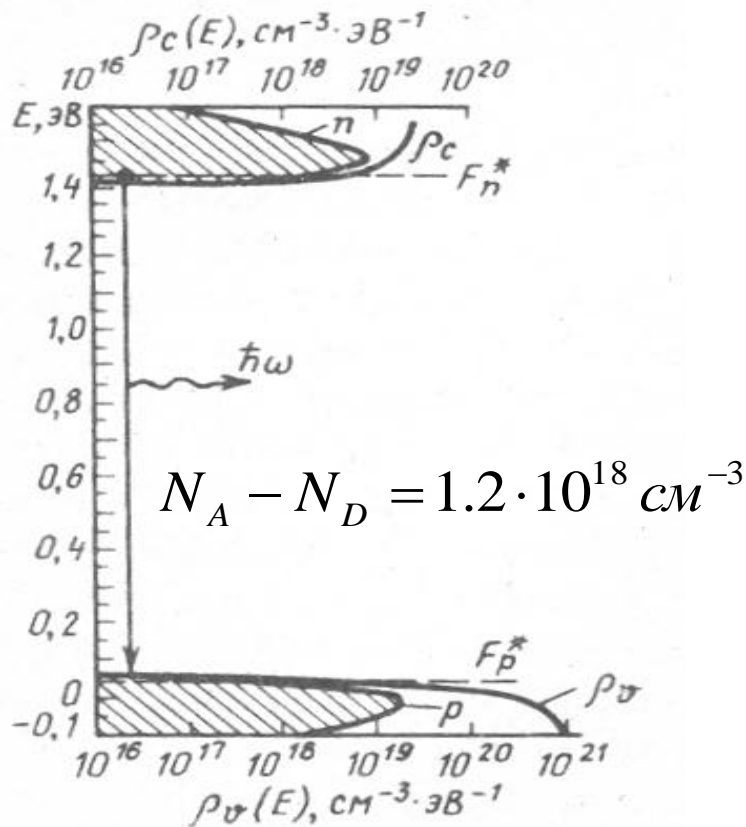
$$A = \frac{e^2 (2m_r)^{3/2}}{nch^2 m \varepsilon_0} \frac{3|V_{cv}|^2}{2m\hbar\omega}$$

$$f_n > 1 - f_p$$

$$F_n^* - F_p^* > \hbar\omega > E_g$$

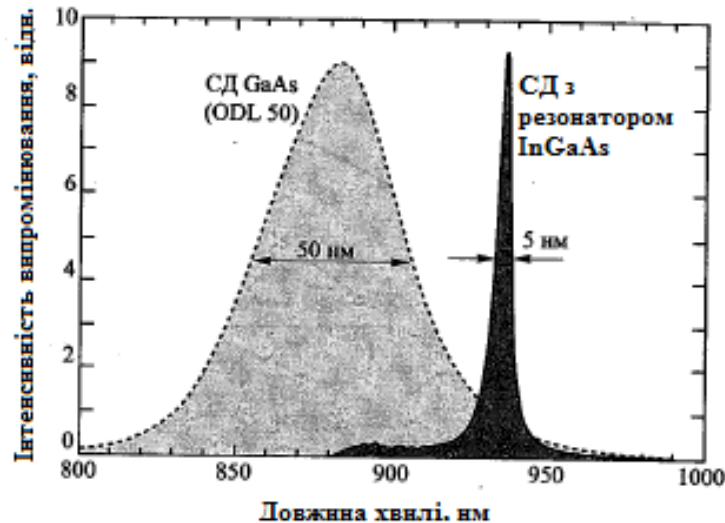
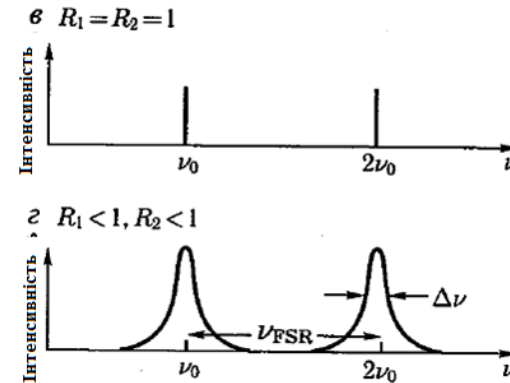
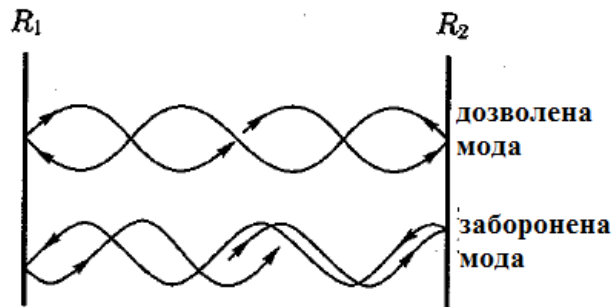


$$k_{\omega} = A \left( \hbar\omega - E_g \right)^{1/2} (1 - f_p - f_n) = A \left( \hbar\omega - E_g \right)^{1/2} \left[ \exp\left( -\frac{\hbar\omega - (F_n^* - F_p^*)}{kT} \right) - 1 \right] f_p f_n$$

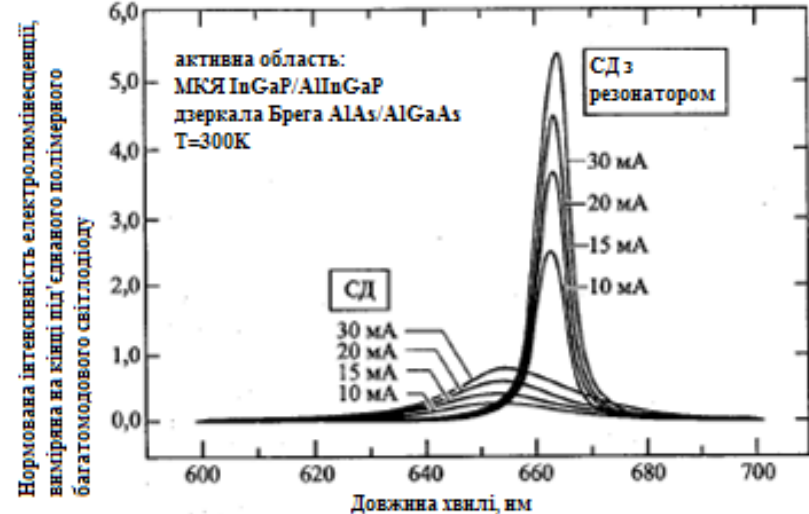


## 5.2. Напівпровідникові лазери з електронним і оптичним накачуванням

Проходження світлової хвилі і спектри оптичних мод у резонаторі Фабрі-Перо

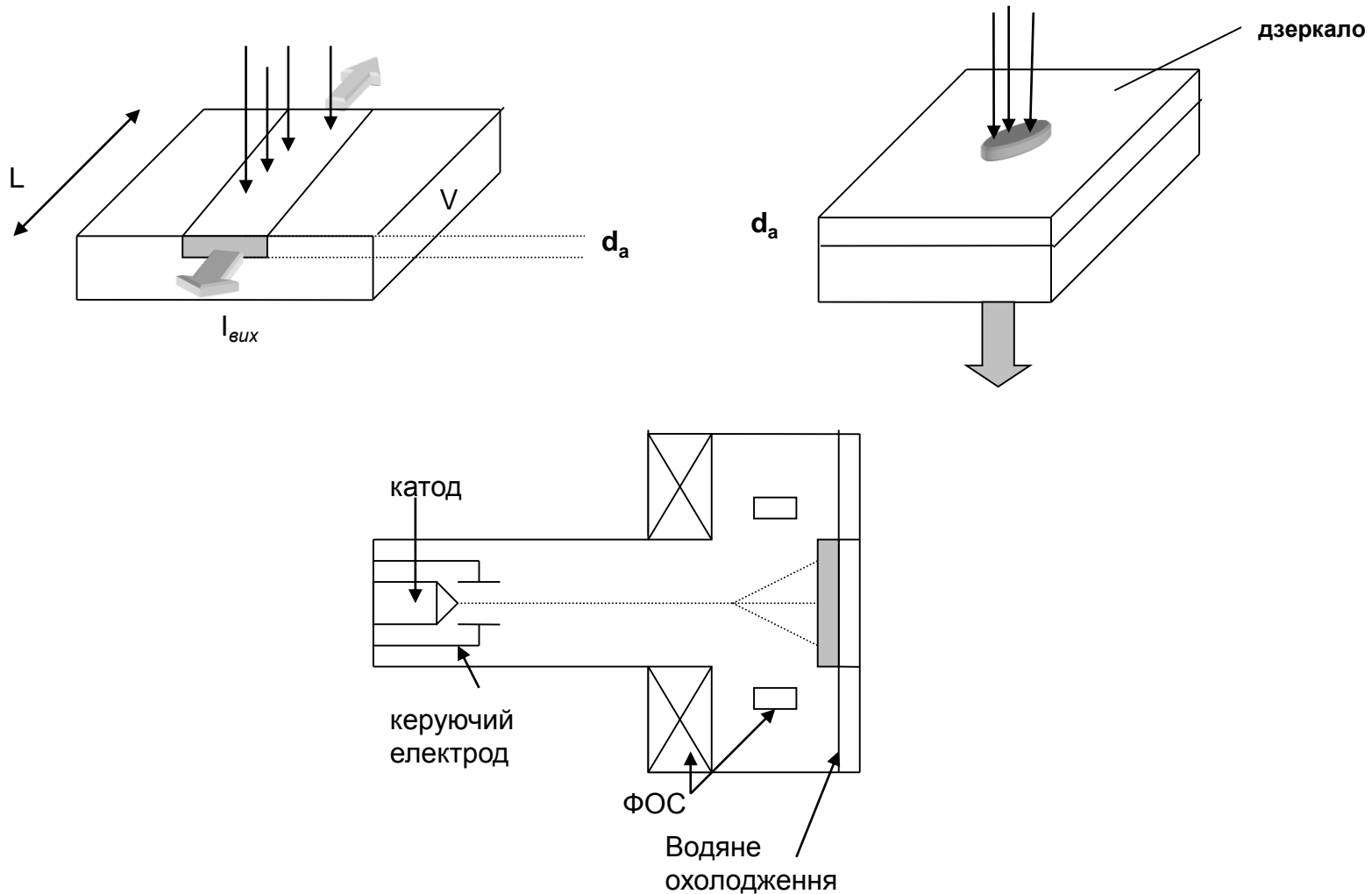


Порівняння спектрів випромінювання світлодіода (870 нм) та лазерного діода (930 нм)



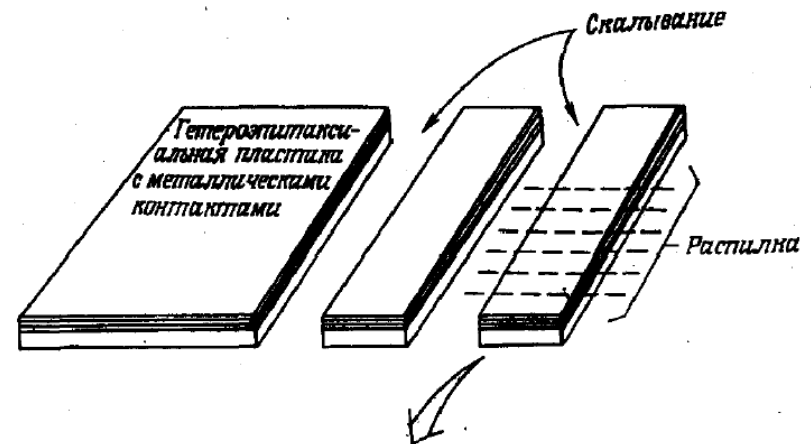
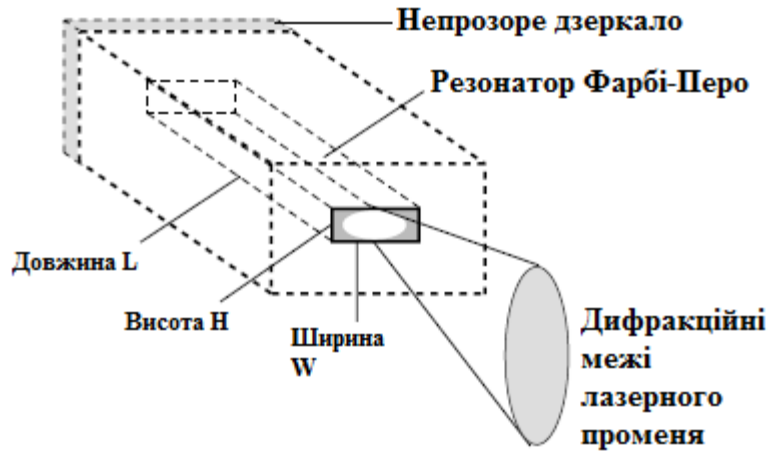
Порівняння спектрів випромінювання світлодіода на численних КЯ і лазерного діода (СД з резонатором) при різних значеннях робочого струму

## 5.2. Напівпровідникові лазери з електронним і оптичним накачуванням

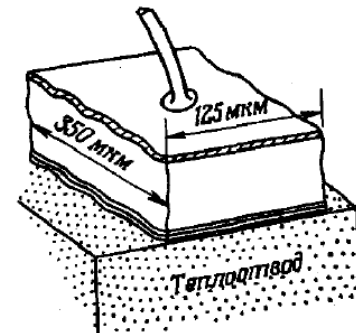


## 5.3. Інжекційні лазери

### 5.3.1. Інжекційні лазери на гомо-і гетеропереходах (ПГС лазери)

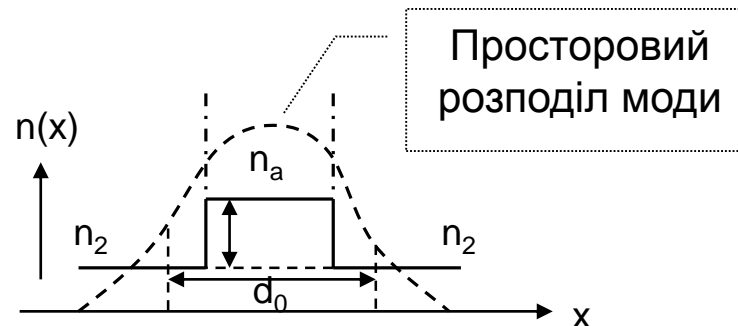
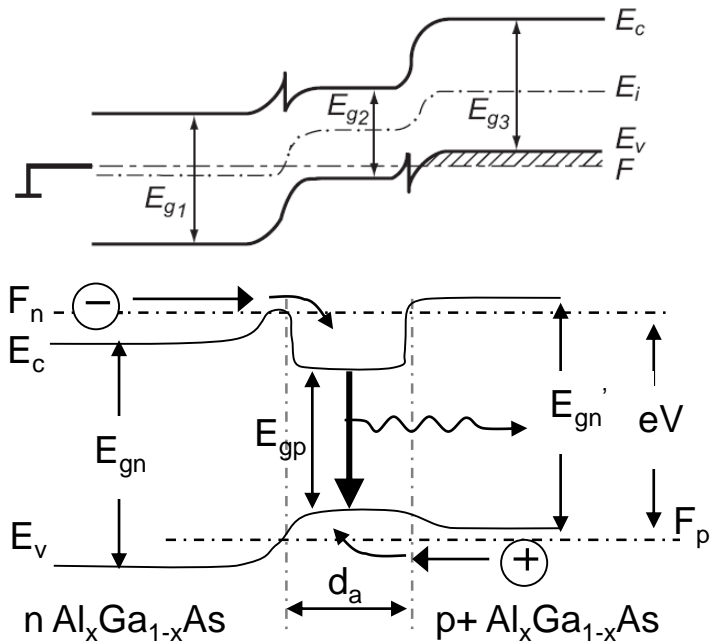
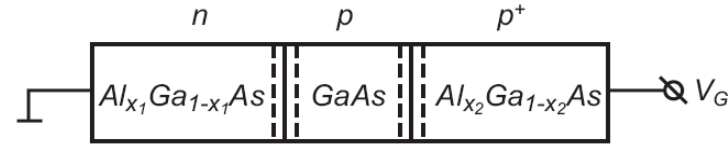


Виготовлення лазера з широким контактом



## Лазери на подвійних гетероструктурах - ПГС лазери

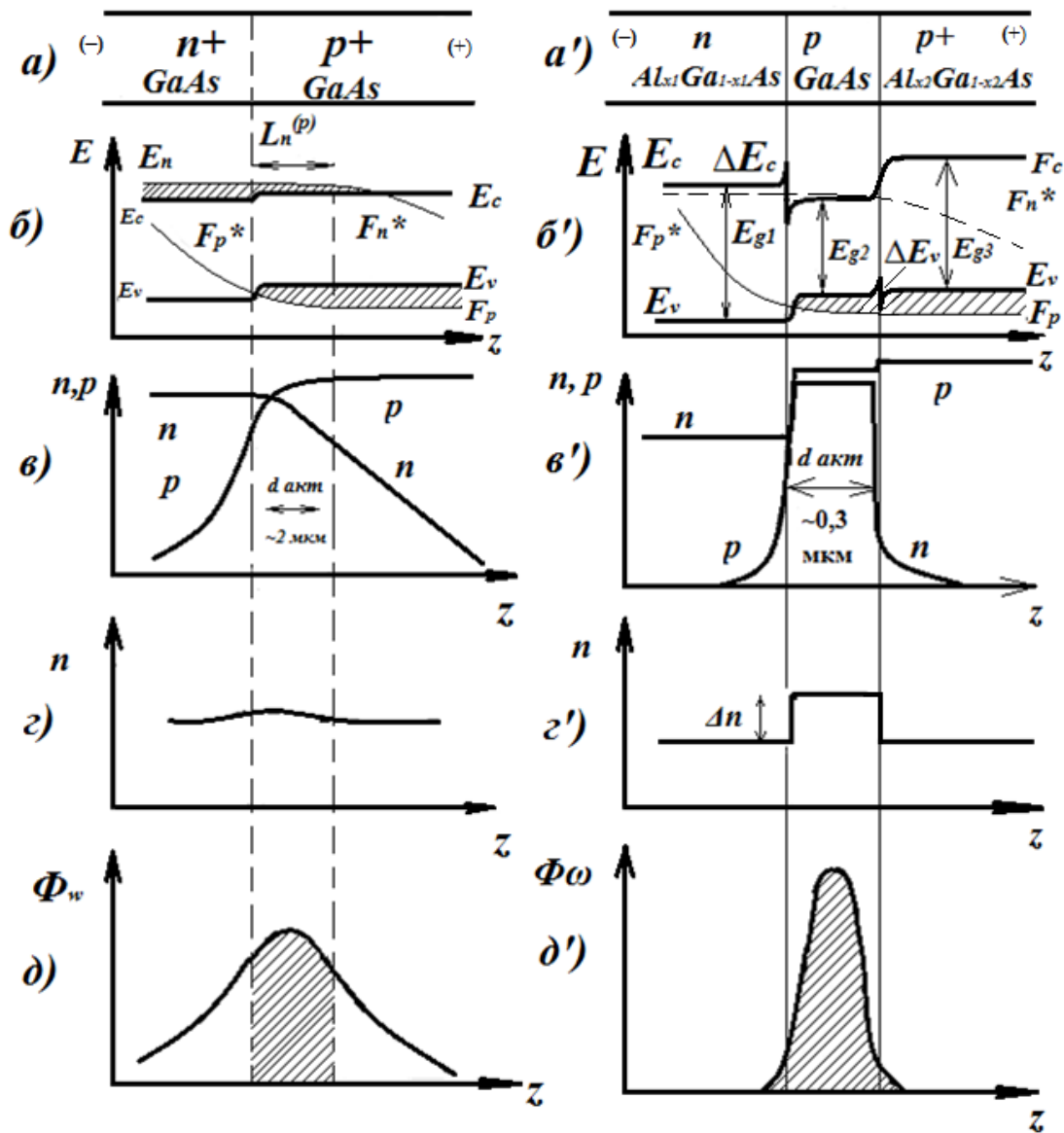
Зонна діаграма  
ПГС-лазера



Просторовий  
розподіл моди



## 5.3.2. Порівняльна характеристика гомо- і ПГС лазера



## 5.3.3. Гранична густина струму накачування

$$R \cdot \exp((\alpha_{\omega} - \beta_{\omega})L) \geq 1$$

$$\alpha_{\omega}^0 \xi \geq \beta_{\omega} + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right) \quad \alpha_{\omega}^0 = A_0 (n - n_0)$$

$$n = \frac{\tau_n}{ed_a} J \quad \tau_n = \frac{1}{nB}, \quad n = \sqrt{\frac{J}{eBd_a}} \quad \alpha_{\omega}^0 = \frac{A_0}{\sqrt{eB}} \sqrt{\frac{J}{d_a}} - \alpha_0$$

$$J_{nop} = \frac{eB}{A_0^2} \cdot \frac{d_a}{\xi^2} \left[ \alpha_0 \xi + \beta_{\omega} + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right) \right]^2$$

## 5.3.4. ККД напівпровідникового лазера

$$\Gamma = 10^2 \times d^2 / \lambda_0^2$$

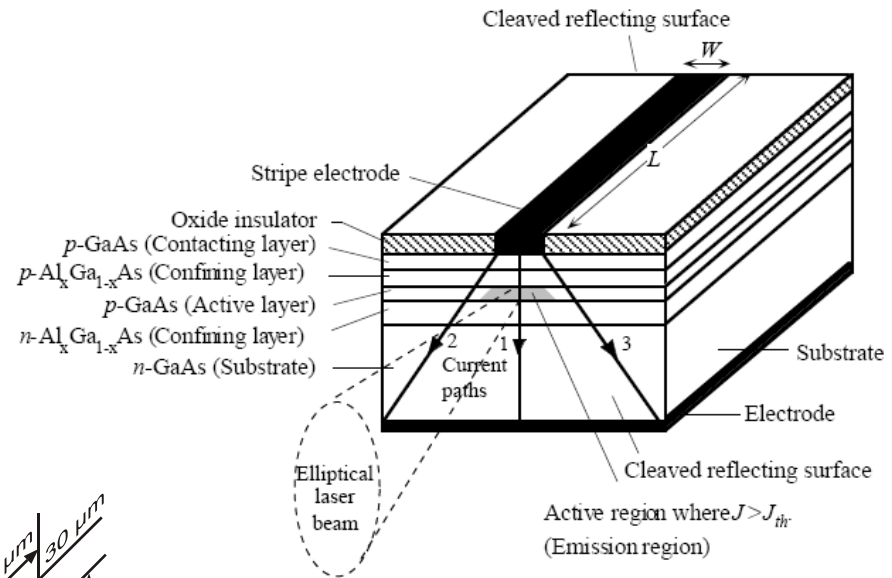
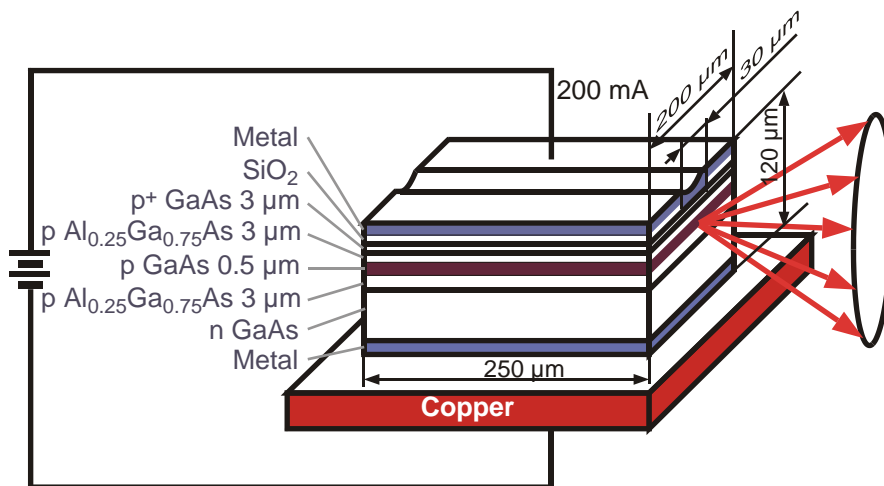
$$КПД = \eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{полн}}}$$

$$P_{\text{вых}} = h\nu \eta_i \eta_{onm} \left( \frac{J - J_{nop}}{e} \right)$$

$$\eta_{onm} = \frac{\alpha_{\omega} \xi - \beta_{\omega}}{\alpha_{\omega}^0 \xi} = \frac{\ln R}{\ln R - \beta_{\omega} L}$$

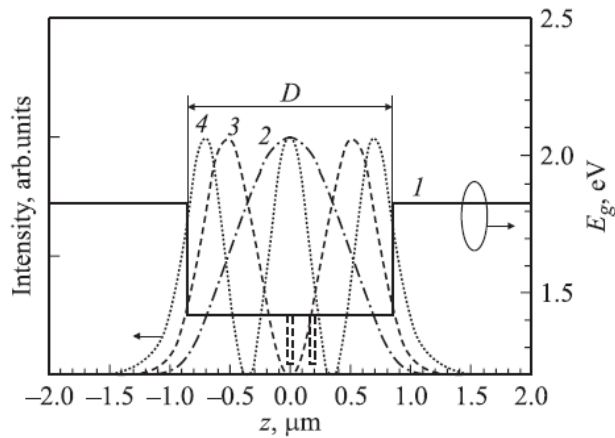
$$\eta = \eta_i \eta_{onm} \left( 1 - \frac{J_{nop}}{J} \right) = \eta_i \frac{\ln R}{\ln R - \beta_{\omega} L} \left( 1 - \frac{J_{nop}}{J} \right)$$

## 5.3.5. Смушкові ПГС лазери

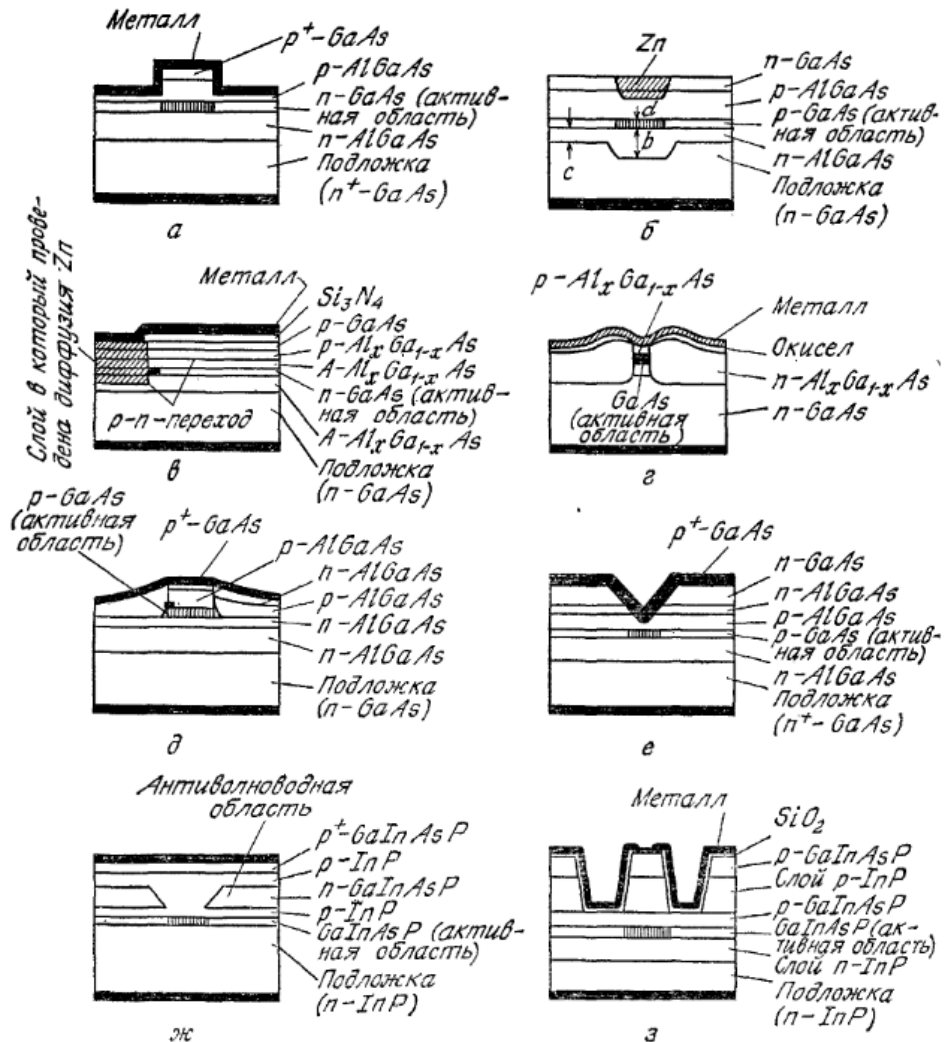


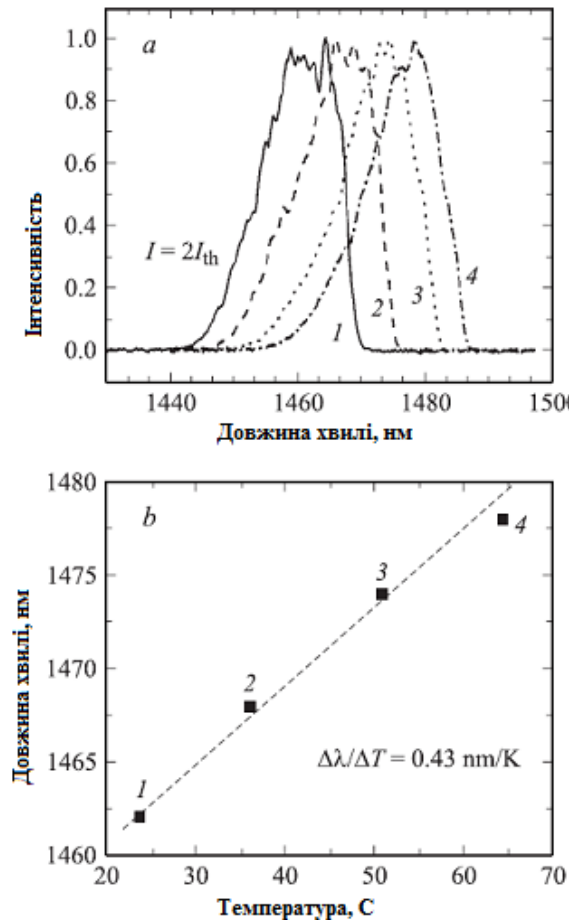
Схематичне зображення першого в світі напівпровідникового лазера (смугового), який працював у безперервному режимі при кімнатній температурі 1970 р.

## 5.3.5. Смушкові ПГС лазери

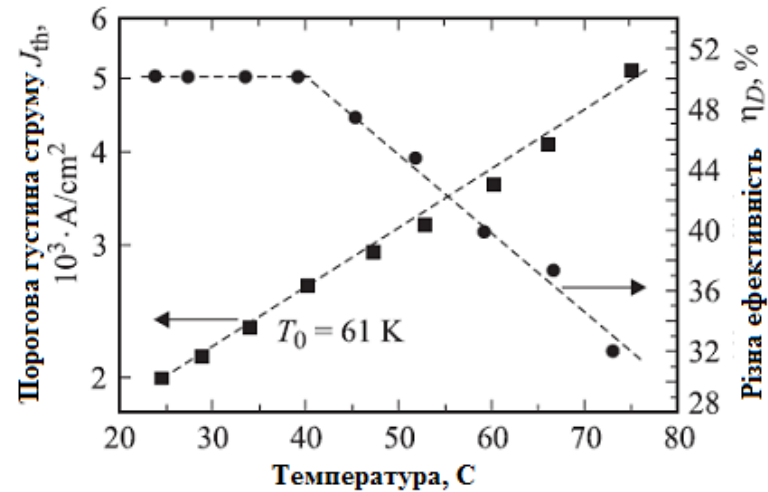


Мал. 1. Енергетична зонна діаграма симетричної та асиметричної лазерних гетероструктур роздільного обмеження з шириною хвильовода  $D=1.7 \mu\text{m}$  (1) та розподіл інтенсивності електромагнітного поля для нульової (2), першої (3) та другої моди (4). Напрямок  $z$  перпендикулярний шарам структури.

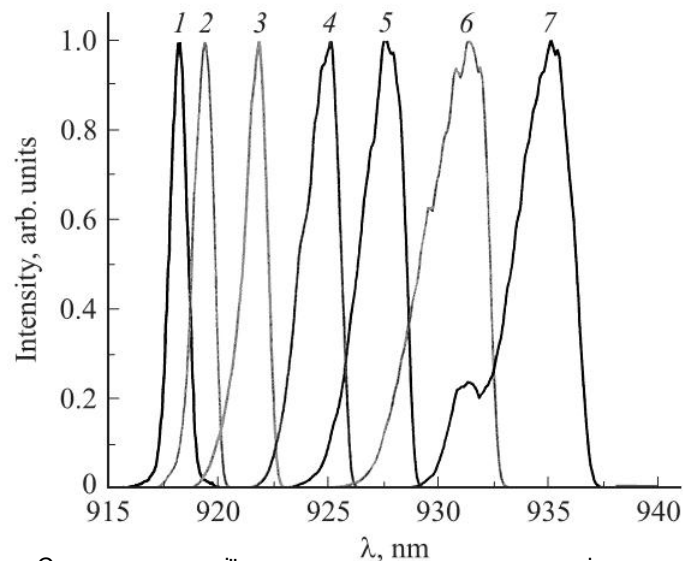




Мал. 3. Спектри лазерної генерації при різних температурах (а) та температурна залежність довжини хвилі генерації (б) для полоскового лазера. Ширина полоски 100 мкм, довжина 1500 мкм. Температура, С: 1-23, 2-36, 3-51, 4-65.



Мал. 4. Температурна залежність диференційної ефективності та порогової густини струму



Спектри генерації лазера в неперервному режимі, виготовленого з гетеро-структури з 4-ма активними областями між хвильовідними шарами при струмах накачки; А: 1— 1.45, 2—2, 3—3, 4—4, 5—5, 6—6, 7—7 (Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 10, с. 1417-1421)

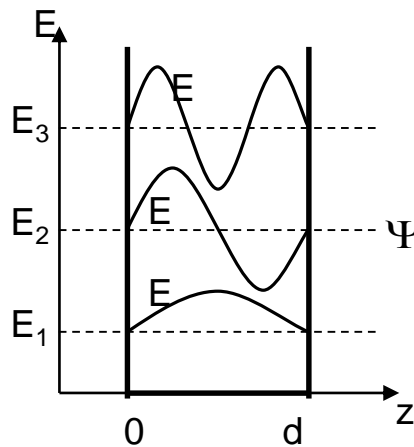
## 5.4. Гетеролазери з роздільними електронним і оптичним обмеженнями (РОПГС - лазери)

5.4.1. Квантоворозмірні структури: квантові ями, нитки і точки. Надґратки

2D - квантові ями

1D - квантові нитки

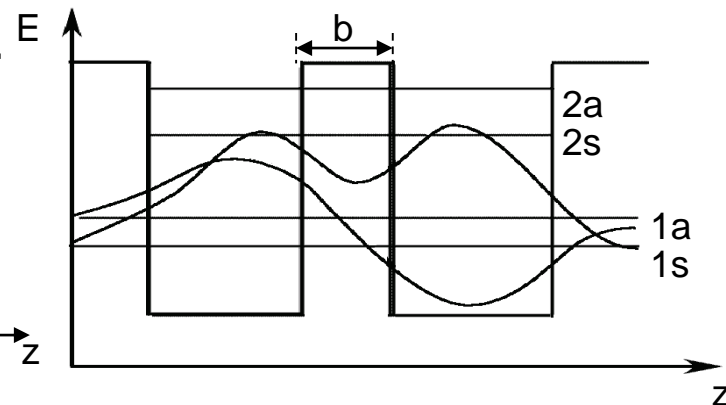
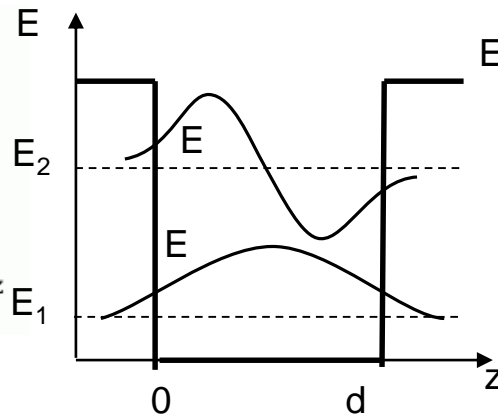
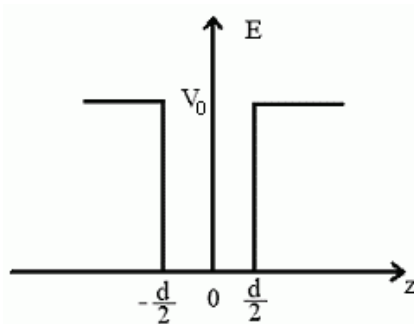
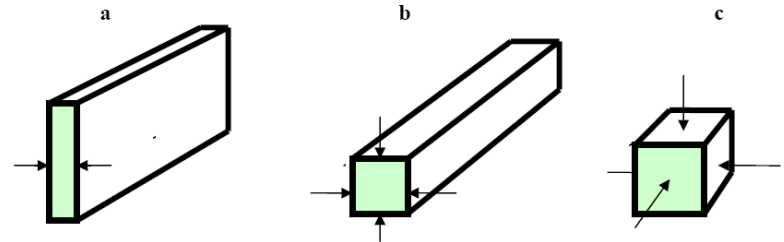
0D - квантові точки



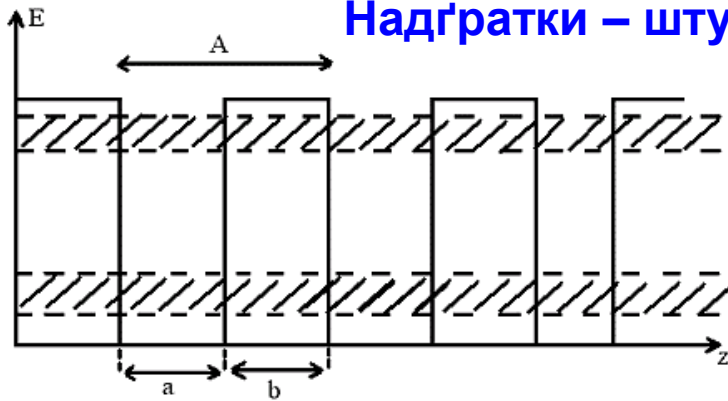
$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* \cdot d^2} n^2, \quad n \in \mathbb{N}$$

$$\Psi_g = \sqrt{\frac{2}{d}} \cos\left(\pi \frac{z}{d} n\right), \quad n = 2K + 1, K \in \mathbb{N}$$

$$\Psi_h = \sqrt{\frac{2}{d}} \sin\left(\pi \frac{z}{d} n\right), \quad n = 2K, K \in \mathbb{N}$$

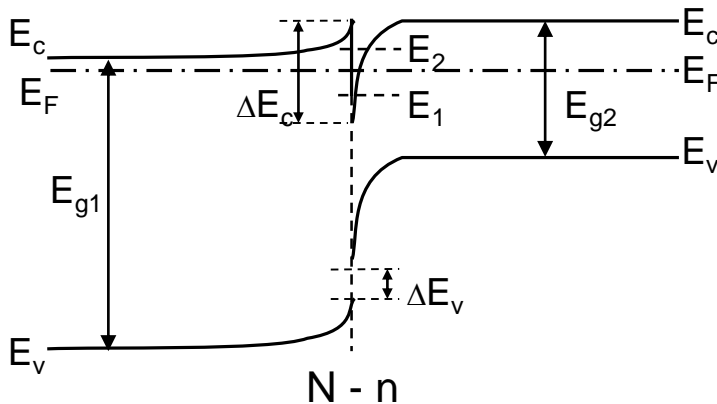


## Надґратки – штучні кристали



Напівпровідники - кращі матеріали для  
квантоворозмірних об'єктів:  
МДП-структури  
гетероструктури

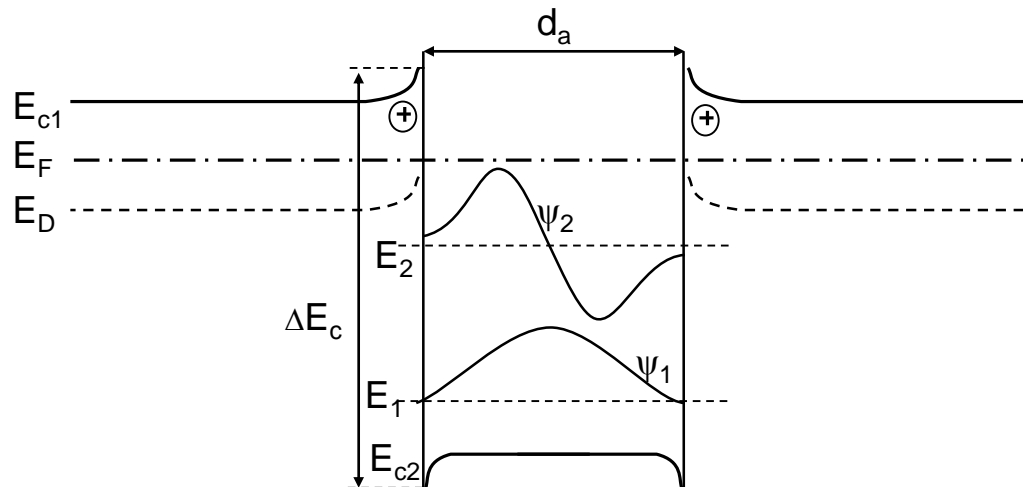
$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{m_e kT}} \approx 10 \text{ нм}$$



Потенціальна яма гетерограниці, утвореної за рахунок розривів зон, за формою подібна до трикутної. Стінки ями утворені розривом  $\Delta E_c$  і електростатичним потенціалом

## Прямокутна потенціальна в ПГС-структурі

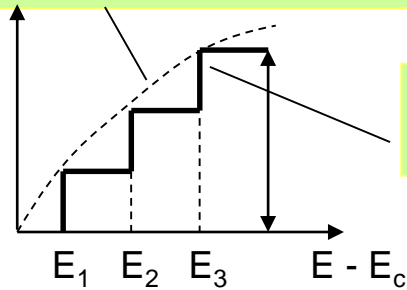
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$\text{GaAs}$	$\text{Al}_x\text{GaAs}$
$\text{InP}$	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	$\text{InP}$





## Густина станів у квантоворозмірних структурах

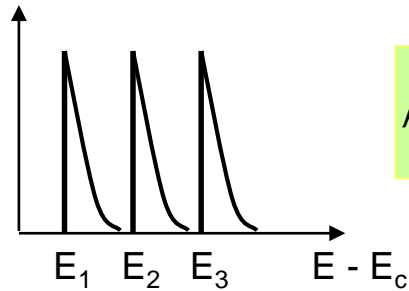
$$\rho_c^{3D} = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$



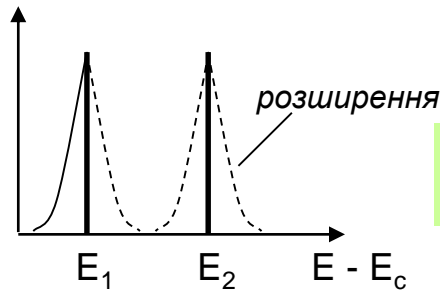
$$\rho_c^{2D} = \frac{m_n^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(E - E_n)$$

$$\rho_c^{3D} / \rho_c^{2D}(E_n) = \frac{\pi \hbar^2}{2\pi^2 m_n^*} \left( \frac{2m_n^*}{\hbar^3} \right)^{3/2} (E_n - E_c) = \frac{1}{d}$$

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n^2$$

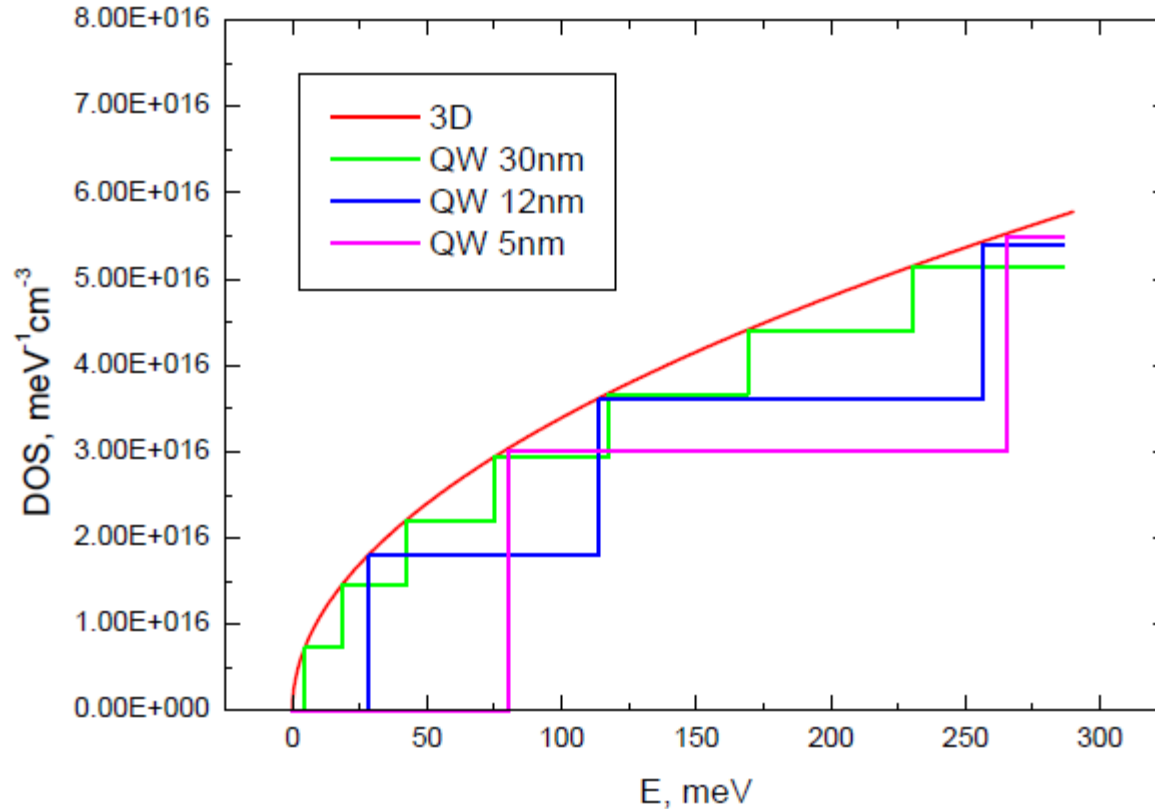


$$\rho_c^{1D} = \frac{\sqrt{2m_n^*}}{\pi \hbar} \sum_{n_1, n_2} \frac{\Theta(E - E_{n_1} E_{n_2})}{\sqrt{E - E_{n_1} E_{n_2}}}$$



$$\rho^{0D} = 2 \sum_{n_1, n_2, n_3} \delta(E - E_{n_1 n_2 n_3})$$

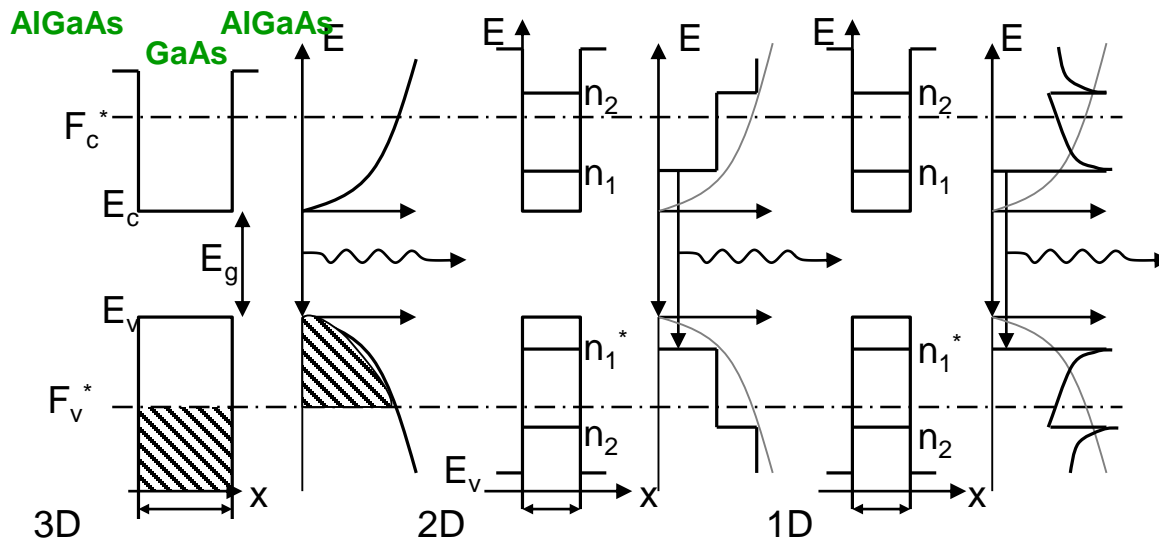
## Густина станів у квантоворозмірних структурах



$$\rho_c^{2D} = \frac{m_n^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(E - E_n)$$

Ширина сходинок  
 $\sim 10^{10} \text{ meV}^{-1}\text{cm}^{-2}/d_{QW}$

Залежність густини станів від кількості і ширини сходинок при збільшенні ширини КЯ



Правило відбору  
 $\Delta n=0$

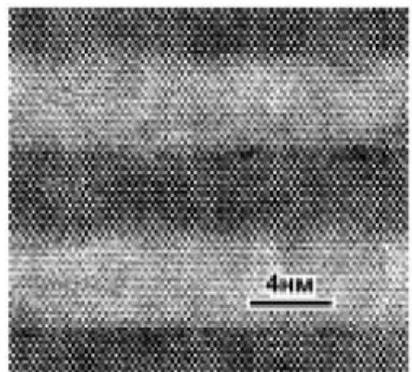
$1e \rightarrow 1lh$

$1e \rightarrow 1hh$

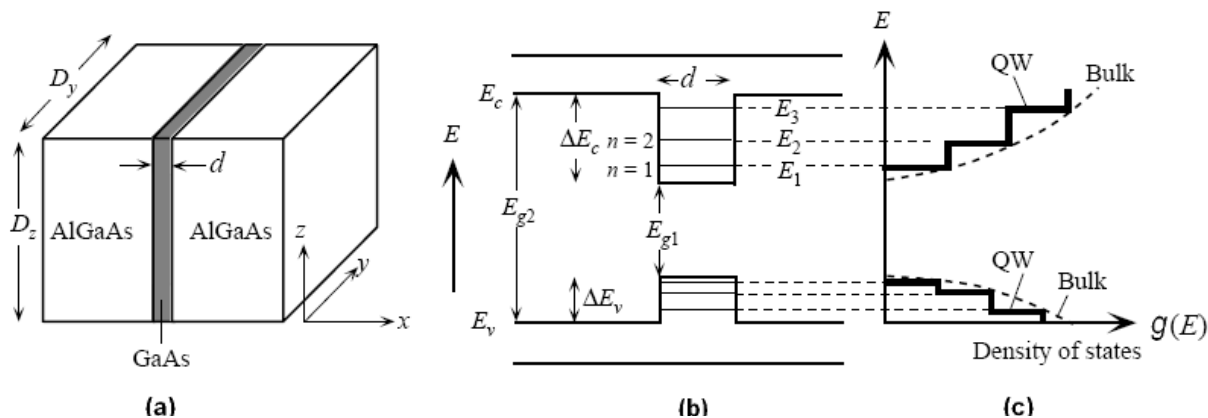
$2e \rightarrow 2lh$

$2e \rightarrow 2hh$

## Лазери на квантоворозмірних структурах



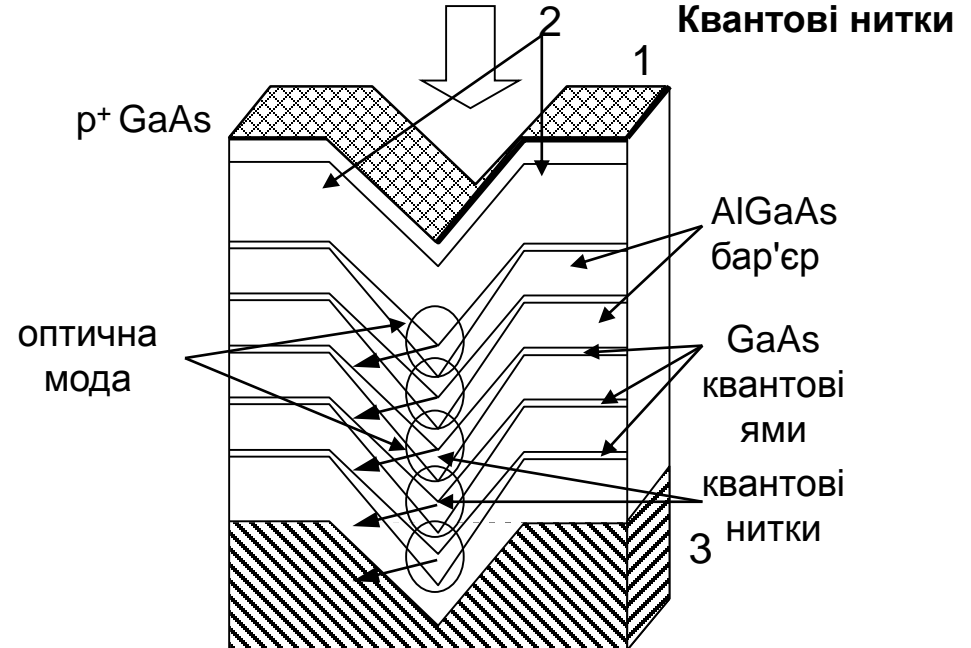
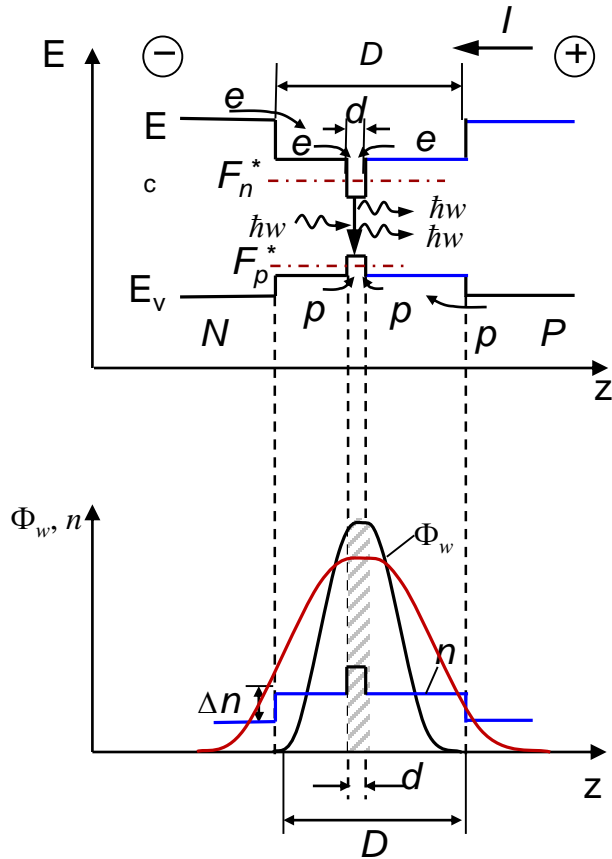
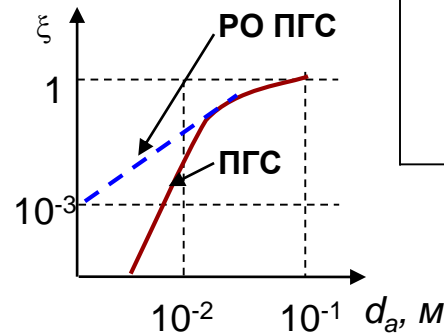
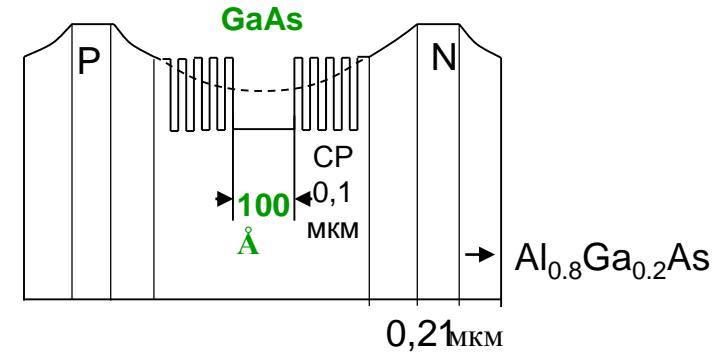
Зображення гетероепітаксiальної структури GaAs / AlGaAs у високороздільному електронному мікроскопі



A 1550 nm MQW-DFB InGaAsP laser diode pigtail-coupled to a fiber. (Courtesy of Alcatel.)

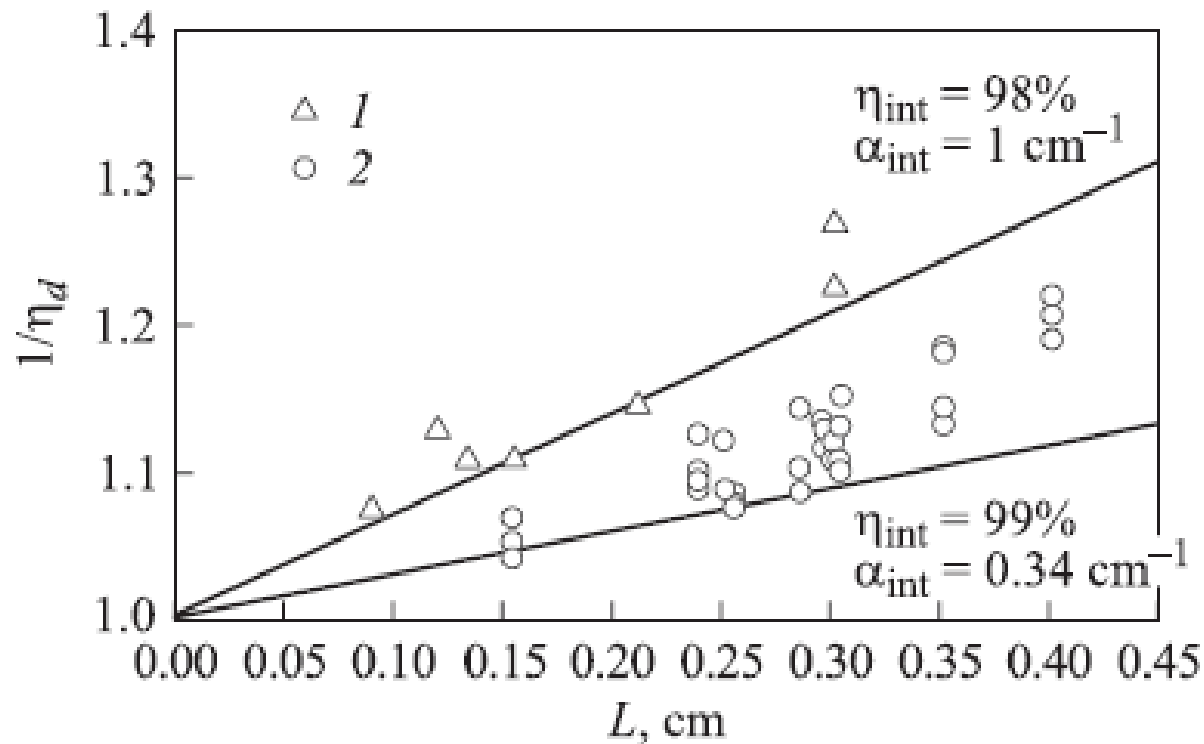
## РОПГС лазери

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   
 $x = 0.4 \dots 0.8$



ФТІ кафедра ПФ

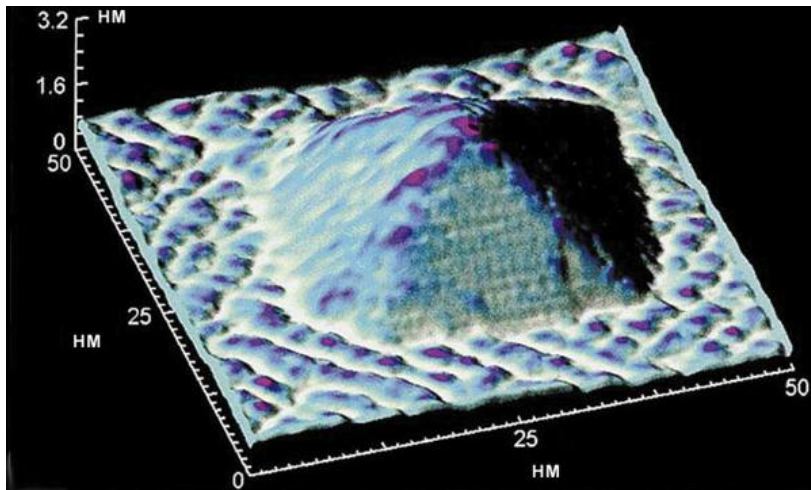
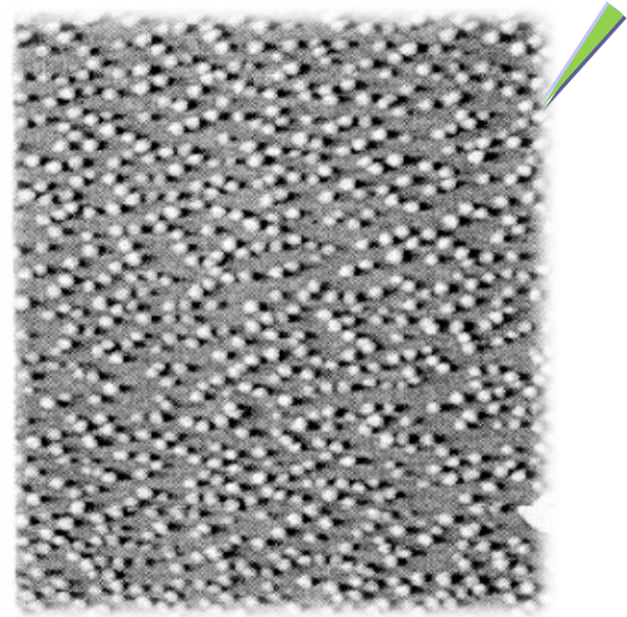
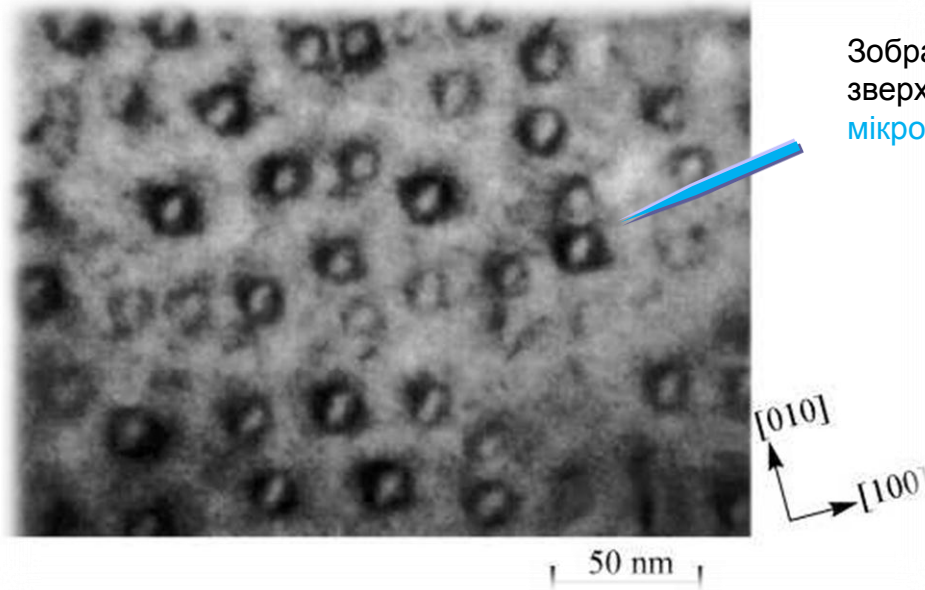
## РОПГС лазери



Мал. 3. Експериментальна залежність оберненої величини зовнішньої диференційної квантової ефективності від довжини резонатора у лазерах на основі симетричної гетероструктури з  $D=0.4$  мкм (1) та з асиметричною гетероструктурою з  $D=1.7$  мкм (2).

## Квантові точки

Зображення квантових точок InAs в матриці GaAs (вид зверху), отримане за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії та атомно-силового мікроскопа.



Об'ємне зображення квантової точки, що представляє собою пірамідку з атомів германію, яке спонтанно утворилося на кремнієвій підкладці.

## Квантові точки



Випромінювання р-і-п діода з InAs з квантової точкою  
в активному шарі при струмовій апертурі  $A < 1$  мкм  
(яскрава крапка в центрі)

У спектрі випромінювання присутня лише одна лінія, відповідна рекомбінації екситону одиночної InAs квантової точки.

(Автокореляційна функція екситонного випромінювання, отримана на інтерферометрі Ханбурі - Браун - Твісса, демонструє субпуассонівську статистику випромінювання, тобто однофотонний характер випромінювання)

## 5.5. Робочі характеристики інжекційних лазерів (AlGaAs / GaAs; GaInAs / InP)

### •Довжина хвилі випромінювання

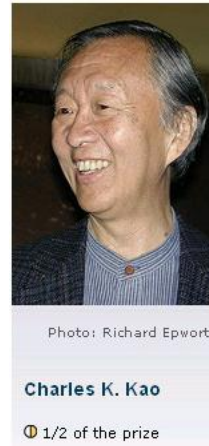
$$\lambda = 0.67 \div 1.67 \text{ мкм}$$

для оптоволокна:

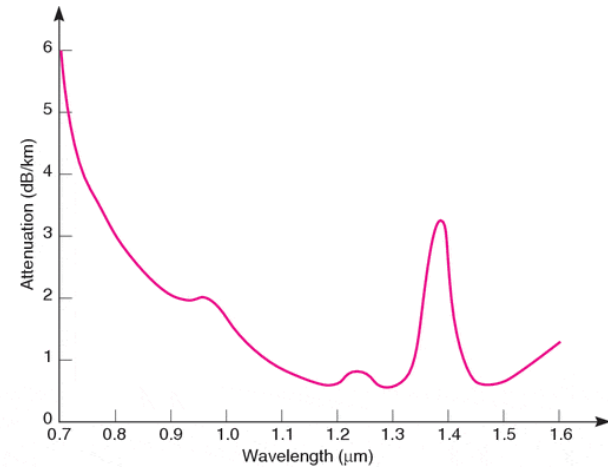
$$\lambda = 0.84 \text{ мкм (GaAs / Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As)}$$

$$\lambda = 1.3 \text{ для In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$$

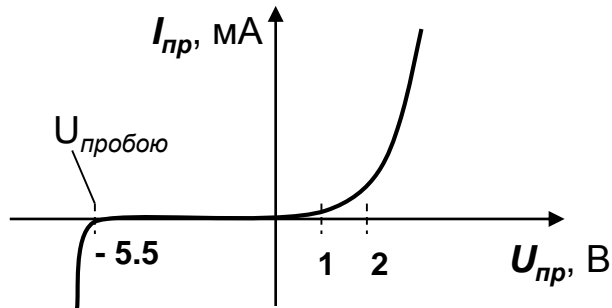
$$\lambda = 1.55 \text{ мкм для In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}_{0.88}\text{P}_{0.12}$$



1/2 of the prize



### •Вольт-амперна характеристика $I_{пр}(U_{пр})$ :

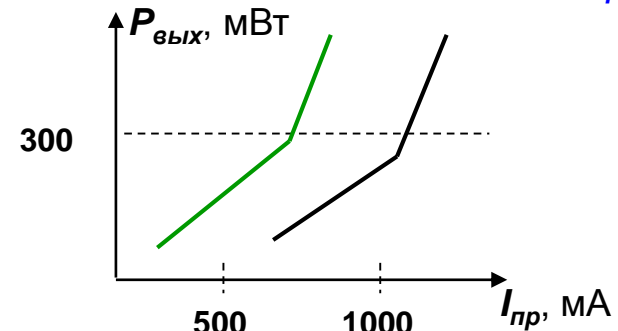


Робочий режим:

Напруга прямого зміщення

$U_{пр} = 1,1 \dots 1,2 \text{ В}$  при струмі  $I_{пр} = 1 \text{ мА}$

### •Ватт-амперна характеристика $P_{вих}(I_{пр})$ :



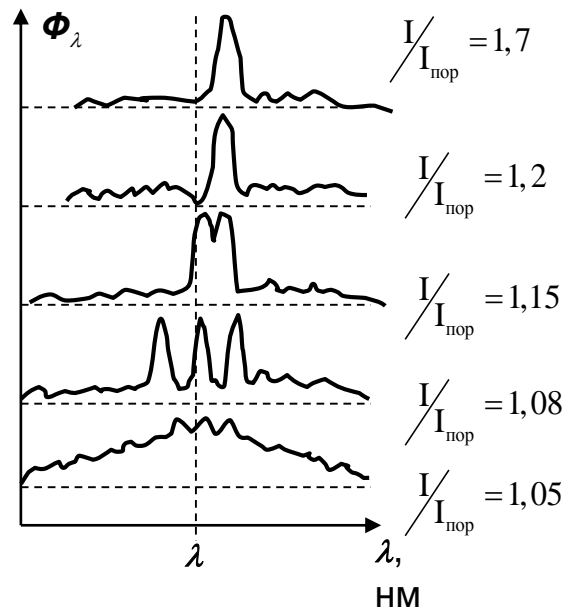
Ширини смужок складають:

$$w_1 = 5 \text{ и } w_2 = 100 \text{ мкм.}$$

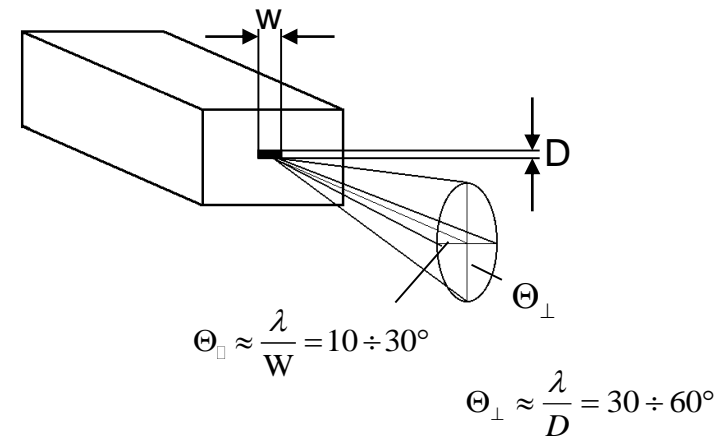


## 5.5. Робочі характеристики інжекційних лазерів (AlGaAs / GaAs; GaInAs / InP)

### •Спектральні характеристики:



### •Напрявленність випромінювання



**САМОСТІЙНО:**

Модуляційні і частотні характеристики  
Потужні лазерні лінійки і решітки

## 5.6. Каскадні лазери:

- уніполярні на внутрішньозонних переходах (1971);
- біполярні.

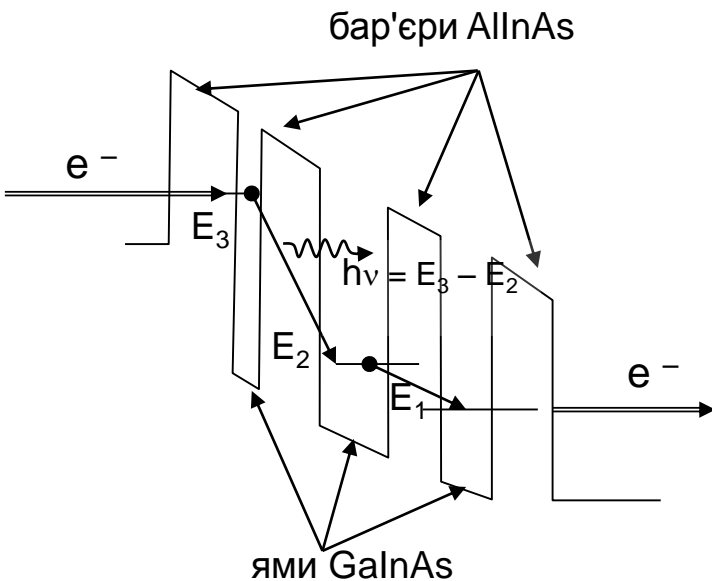
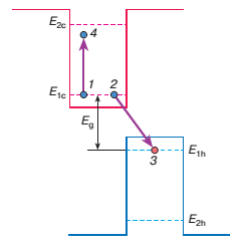
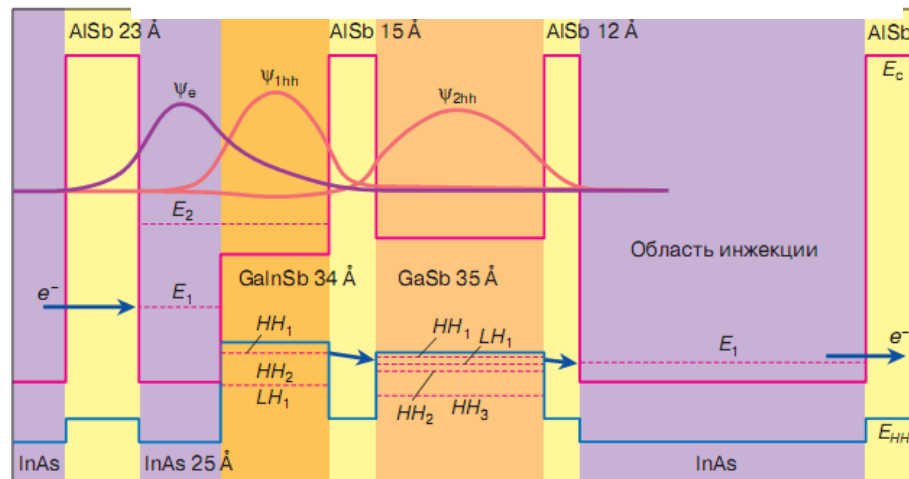
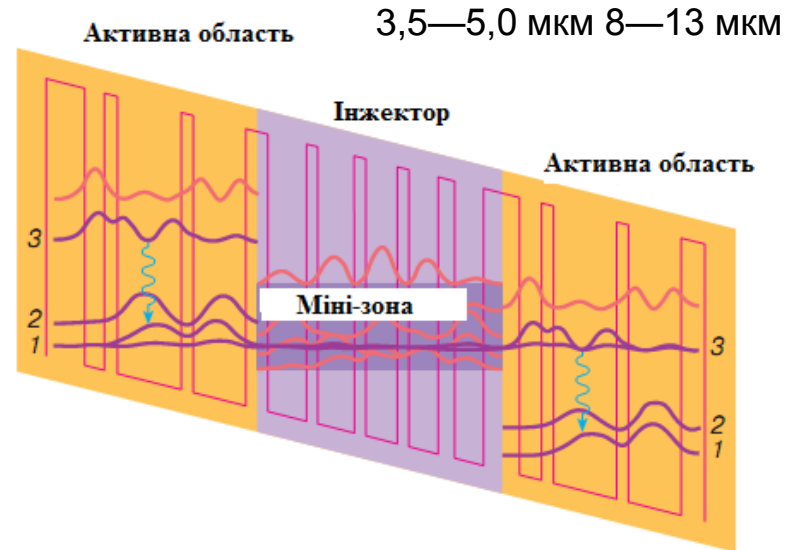


Схема оптичних переходів у каскадному лазері

**4 мкм**  
**Структура з 23 періодів**  
**Квантовий вихід 200% (м.б. 2300%)**  
**Пороговий струм 130 А/см<sup>2</sup>**

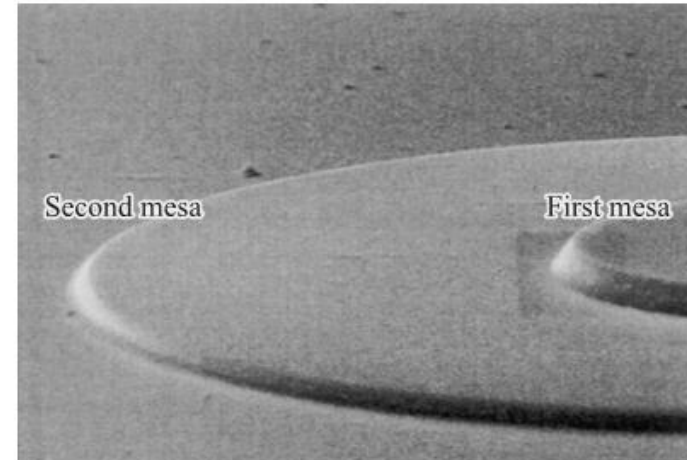
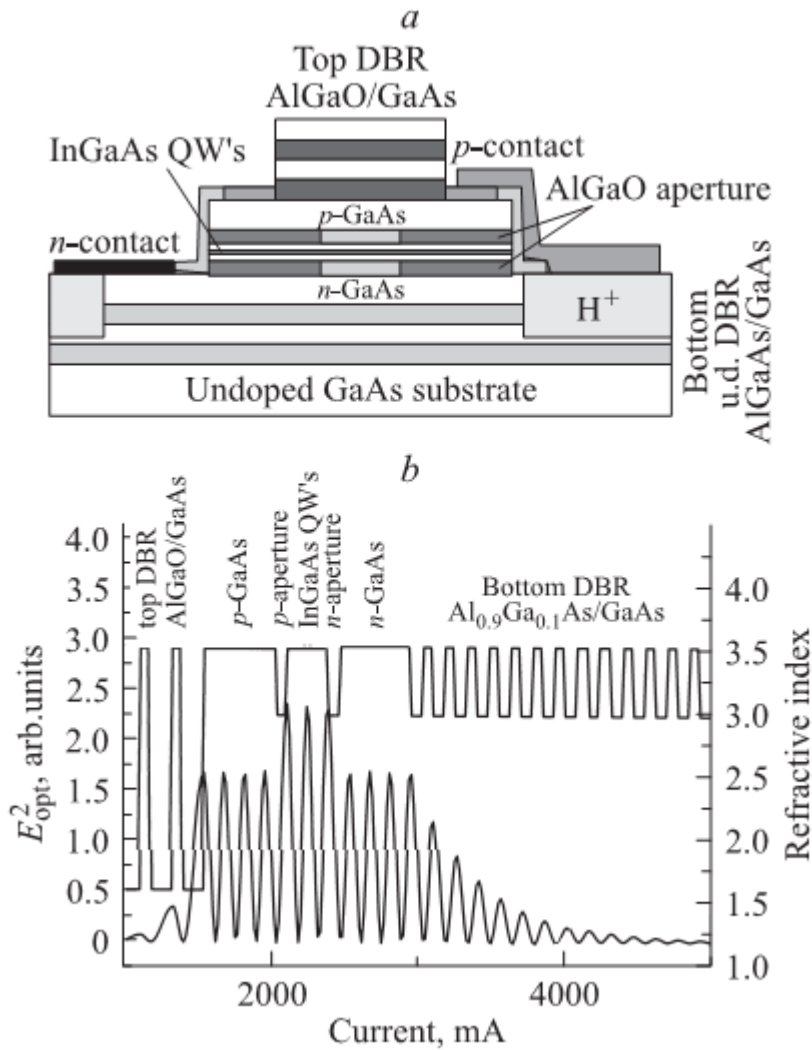


Зонна діаграма одного періоду структури біполярного каскадного лазера

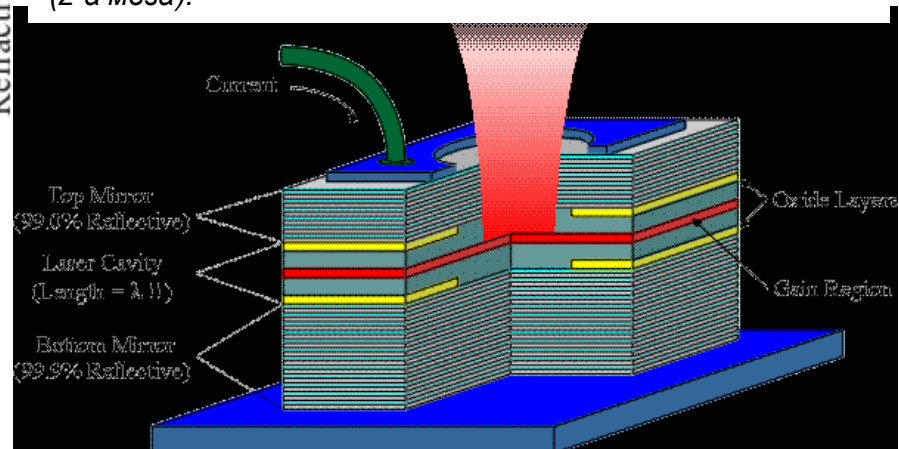
## 5.7. Поверхнево випромінюючі лазери (VCSELs)



720нм, 850нм, 1310нм, 1550нм

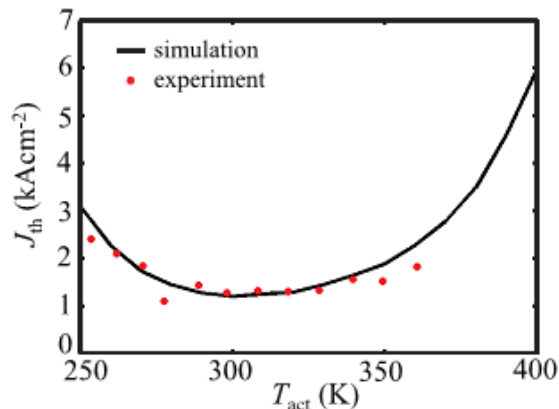


Мал. 4. Фотографія структури вертикально випромінюючого лазера після сухого травлення верхнього брегівського відбивача до контактного р-шару (1-а меза) та резонатора до контактного n-шару (2-а меза).

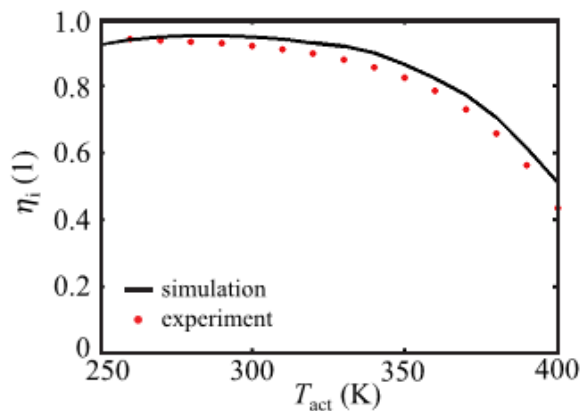


## 5.7. Поверхнево випромінюючі лазери (VCSELs)

### Температурна залежність

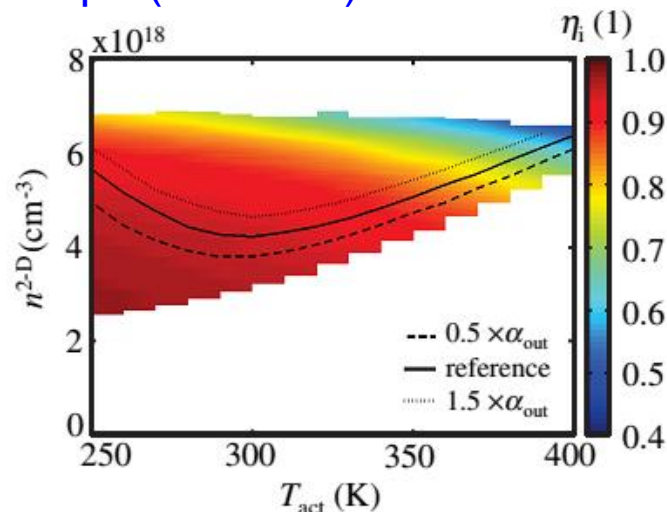


(a)

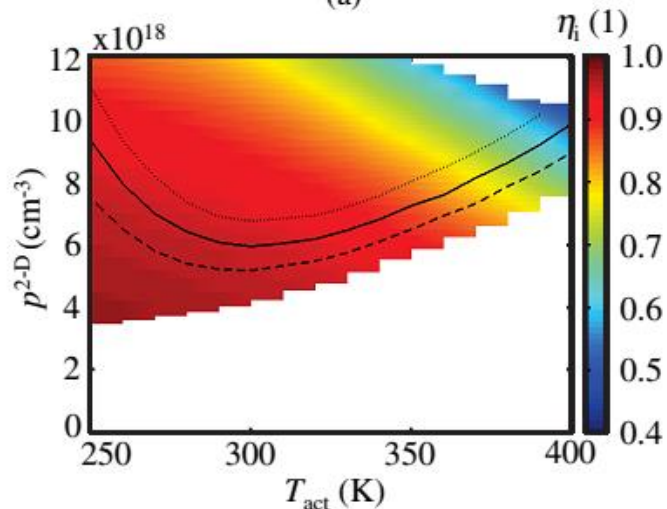


(b)

Comparison of experimental characteristic VCSEL data of a 20μm diameter device with simulated results. (a) Threshold current density  $J_{th}$  versus effective active layer temperature  $T_{act}$ . (b) Injection efficiency  $\eta_i$  versus effective active layer temperature  $T_{act}$ .

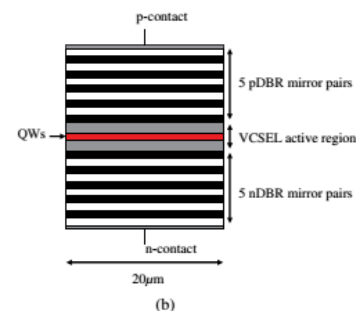
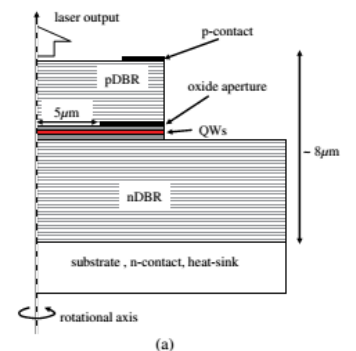


(a)



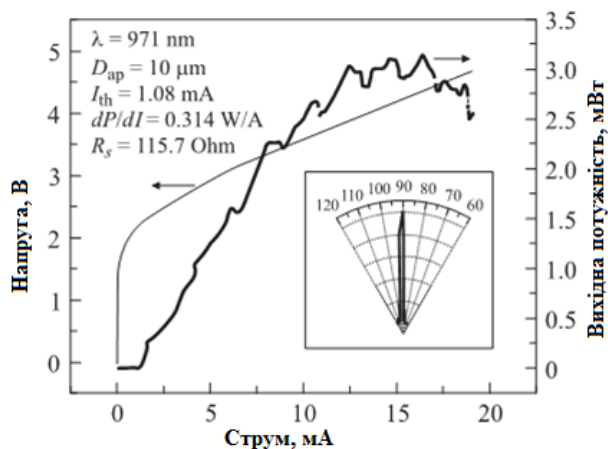
(b)

The dependence of the injection efficiency of a three-QW AlGaAs active layer as a function of active layer temperature and electron carrier density (a) and hole carrier density (b), respectively. The injection efficiency is color coded.



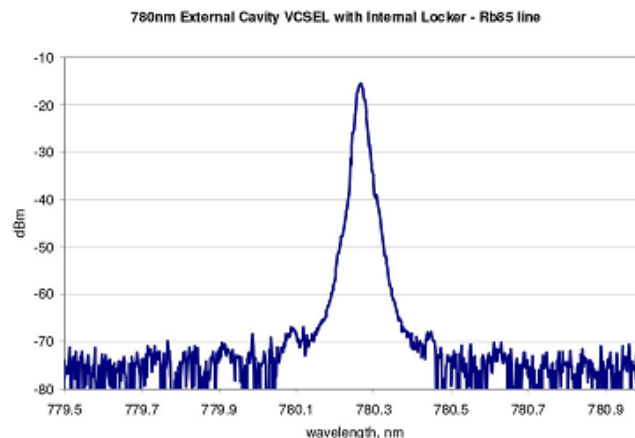
# ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

## Використання VCSELs – поверхнево випромінюючих лазерів з вертикальним резонатором

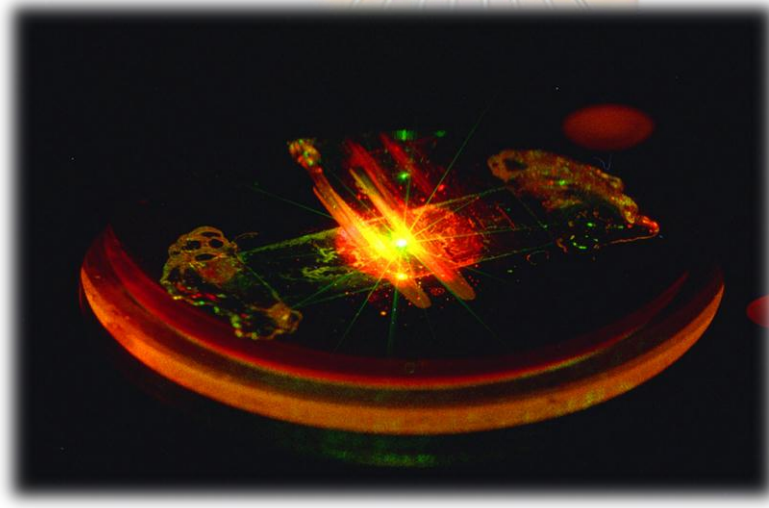
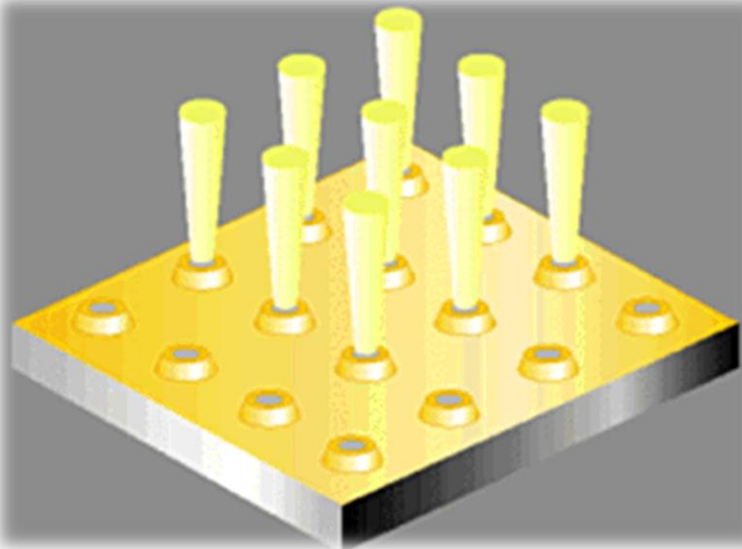
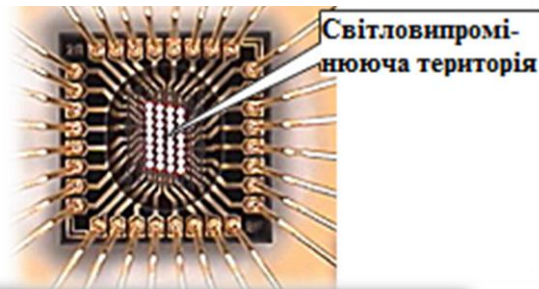


Типові вольт-амперні та потужнісні характеристики для реалізованих вертикально випромінюючих лазерів. На вставці - діаграма напрямленості вихідного випромінювання.

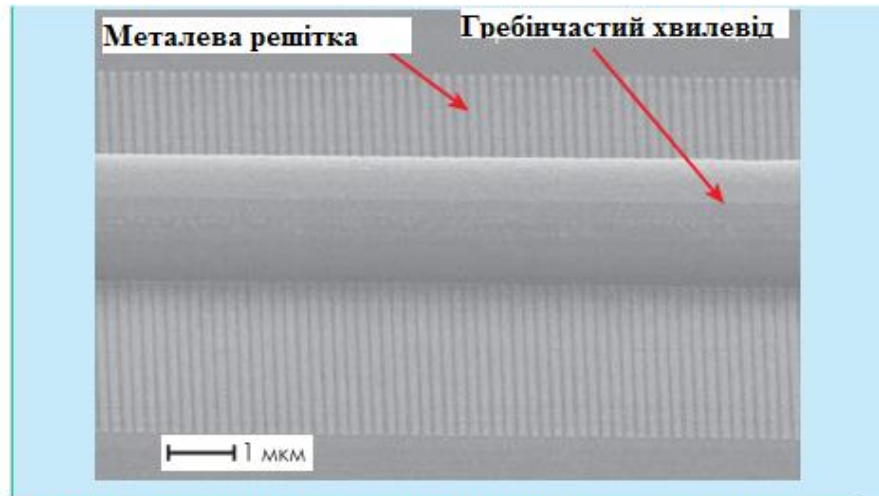
$I_{пор} = 0,5 - 1,5 \text{ mA}$



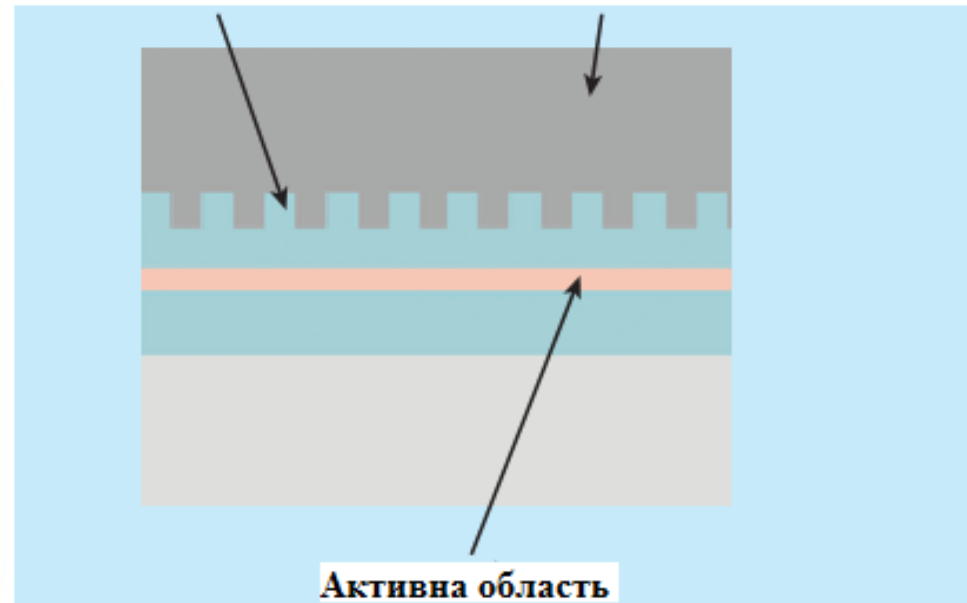
масив 8x4 одночасно випромінюючих VCSEL точок



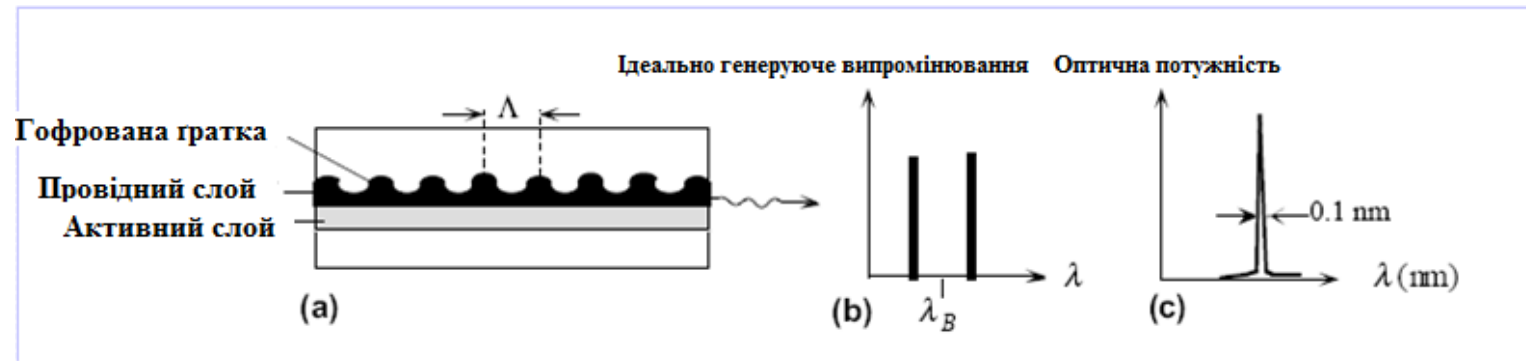
### РЗЗ (DFB)



Мал 4. Електронна фотографія DFB-лазеру з продольною металевою решіткою

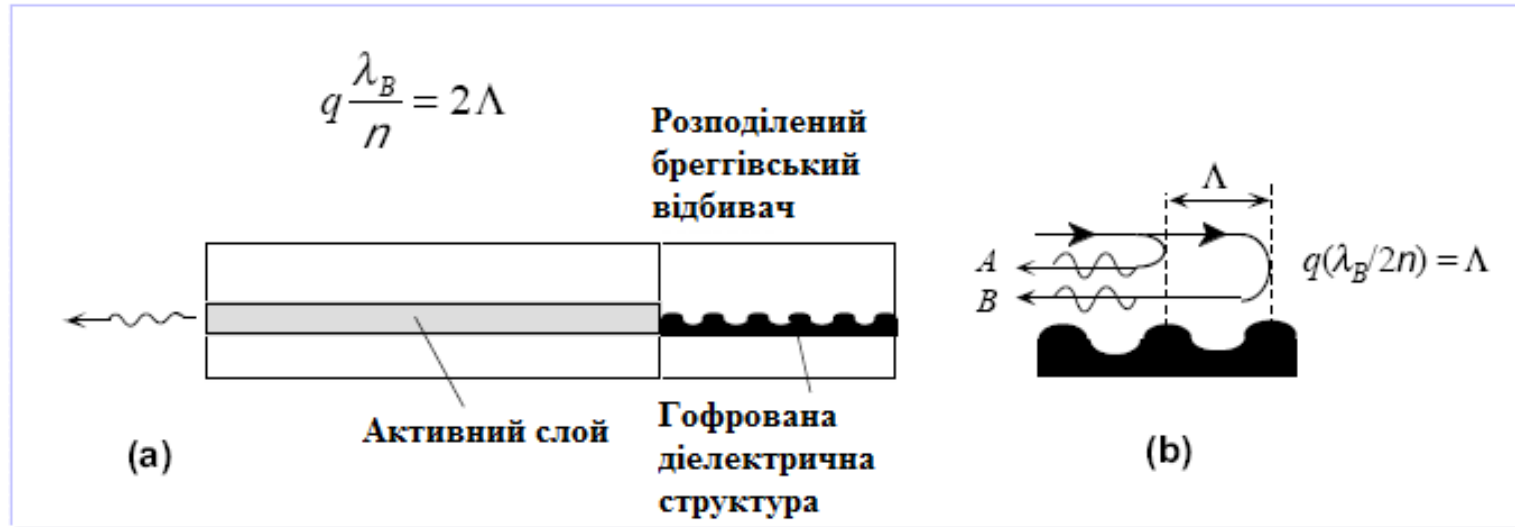


Типова структура звичайного DFB-лазеру з решіткою, витравленою у хвильоводі

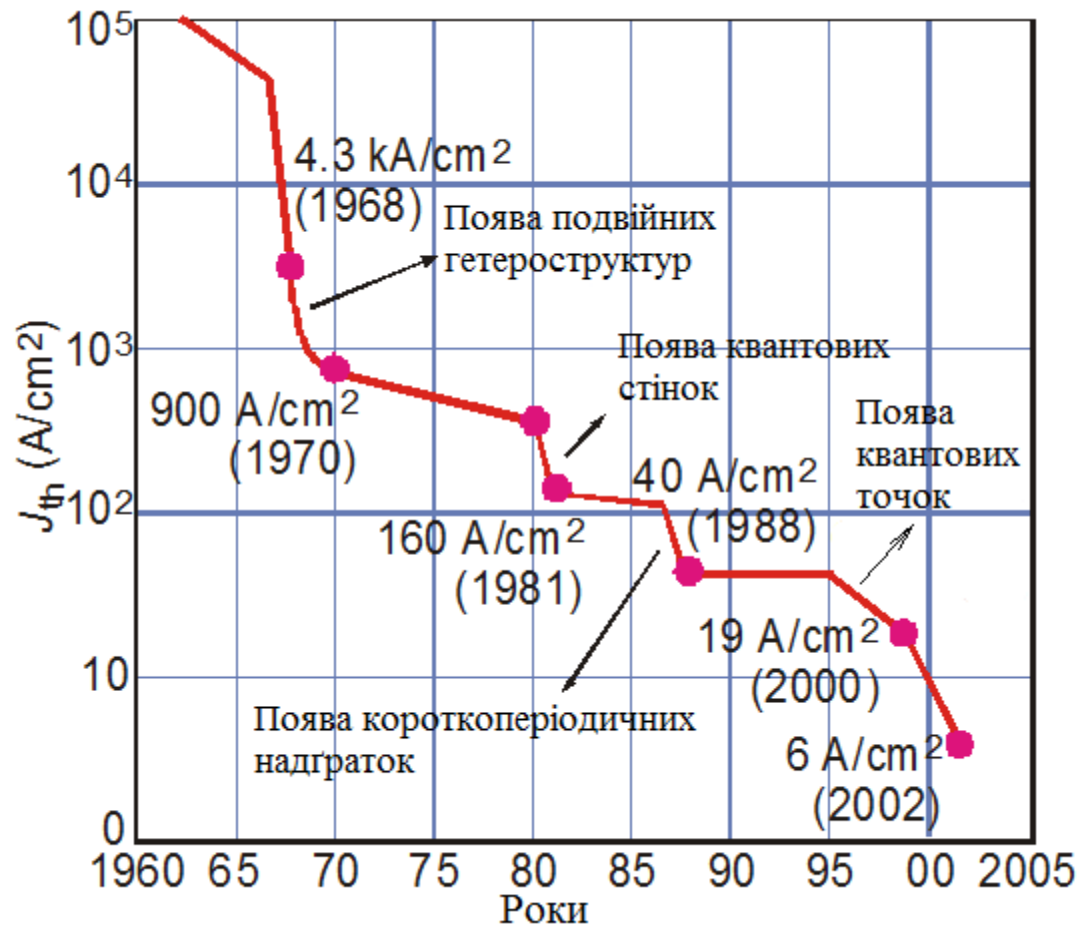




## РБВ (DBR) лазери

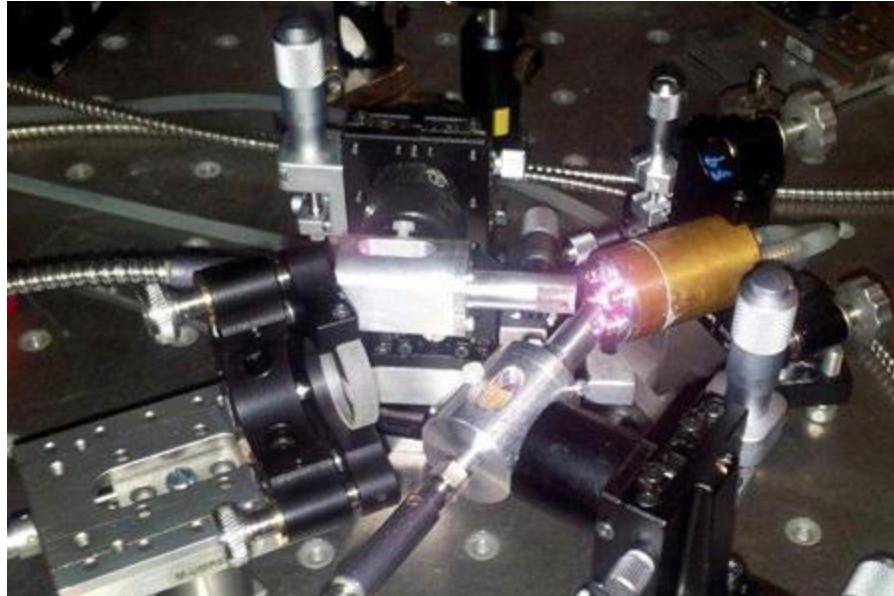


## Еволюція порогового струму напівпровідникових лазерів





## Еволюція потужних напівпровідникових лазерів



A high-powered SDL (semiconductor disk laser) using two fiber-coupled pump sources, developed by a Scottish consortium of the new Fraunhofer Centre for Applied Photonics, Glasgow's Institute of Photonics and M Squared Lasers (15 Nov 2013).

High-power semiconductor disk lasers (also known as vertical external-cavity surface emitting lasers, VECSELs), are now an established laser format. Recent key results include greater than 100W output power at 1028nm, above 10W at 2 $\mu$ m, and multiple watts of average power in the mode-locked regime.

## Еволюція потужних напівпровідникових лазерів



## Тема 6. Приймачі оптичного випромінювання

**6.1. Класифікація приймачів випромінювання.**

**6.2. Основні характеристики приймачів випромінювання (чутливість, пороговий потік  $NEP$ , питома виювлювальна здатність  $D^*$ , спектральна щільність потужності шуму  $NPS$ ).**

**6.3. Приймачі з зовнішнім фотоефектом. Фотоелектронні помножувачі. Типи фотокатодів.**

**6.4. Приймачі з внутрішнім фотоефектом.**

6.4.1. Фоторезистори. Статичні характеристики фоторезисторів.

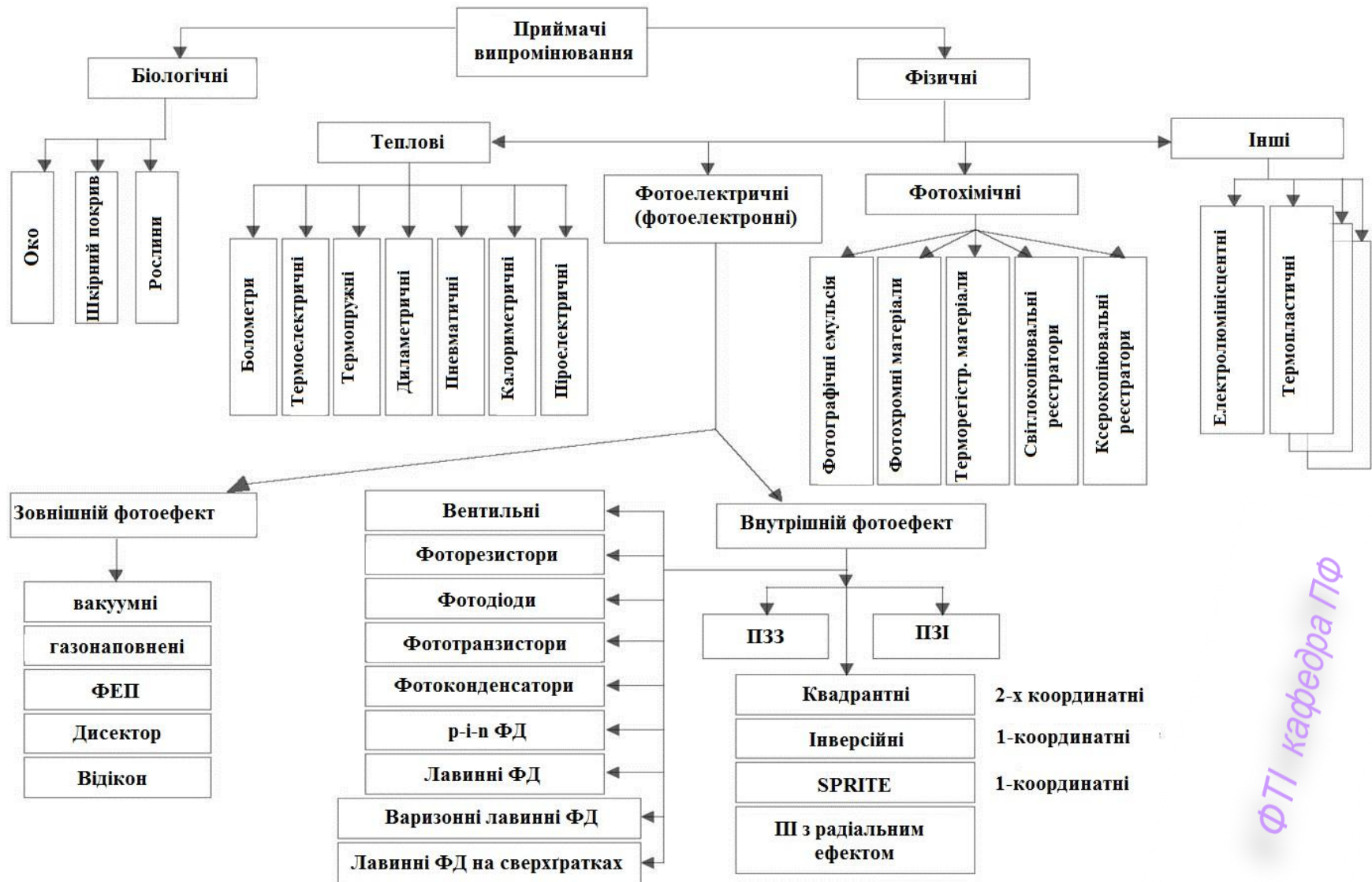
6.4.2. Фотодіоди. p-i-n фотодіод.

6.4.3. Лавинні фотодіоди. Варизонний лавинний фотодіод. Лавинний фотодіод на надгратках. Фотодіоди з гетеропереходами. Фотодетектори з надграток.

6.4.4. Фото ПЗЗ-структура.

**6.5. Шуми напівпровідникових фотодетекторів. Фотонний шум. Власні шуми фоторезисторів і фотодіодів.**

## 6.1. Класифікація приймачів випромінювання



# ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

Фотонні приймачі

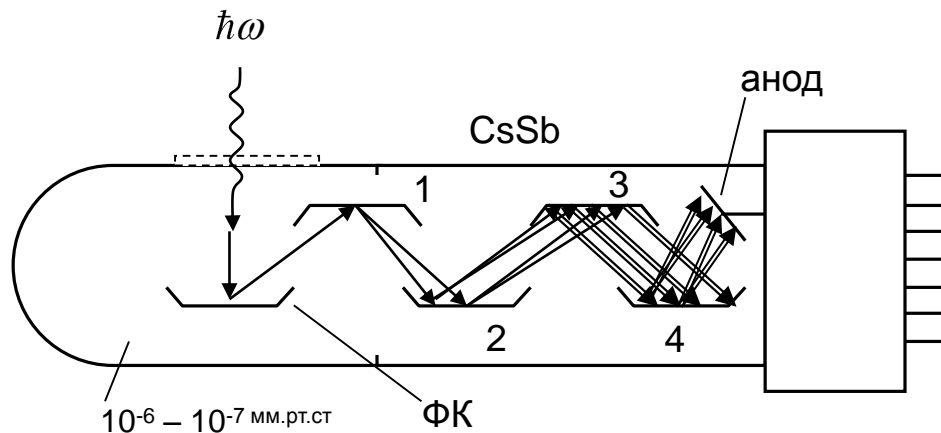
на зовнішньому фотоэффекті

на внутрішньому фотоэффекті

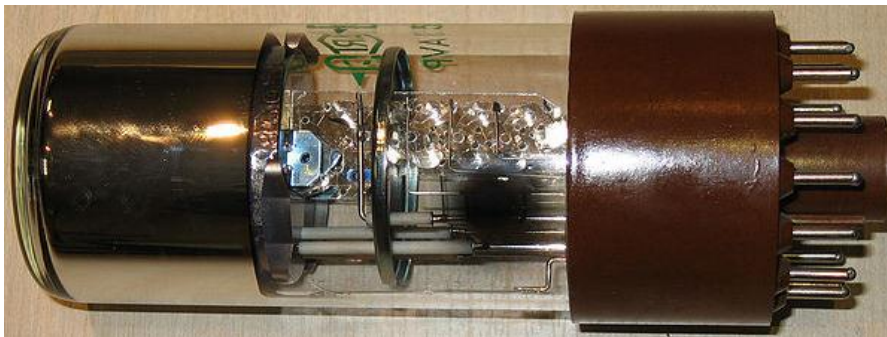
Фотоелектронні  
помножувачі (ФЕП)

ОЕП

Фотоелементи



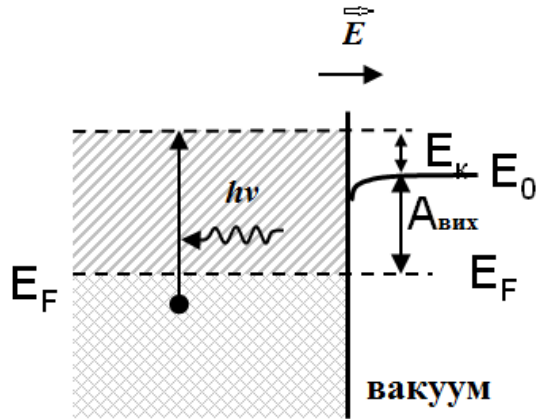
$$\Phi_{ph0} \sim 10^{-19} \text{ Вт}$$



ФТІ кафедра ПФ

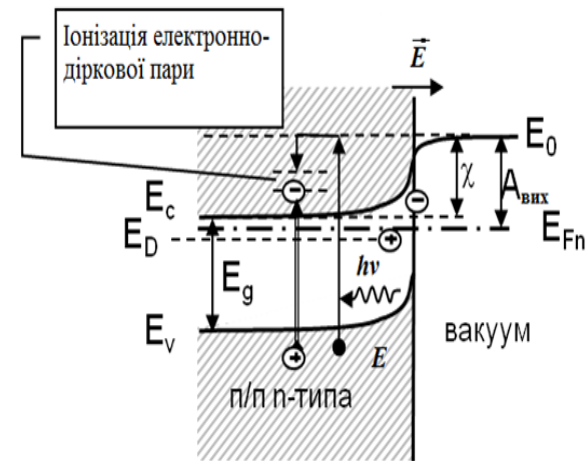
Рис. 1

## 6.3. Фотоелектронні помножувачі (ФЕП) ФОТОКАТОДИ

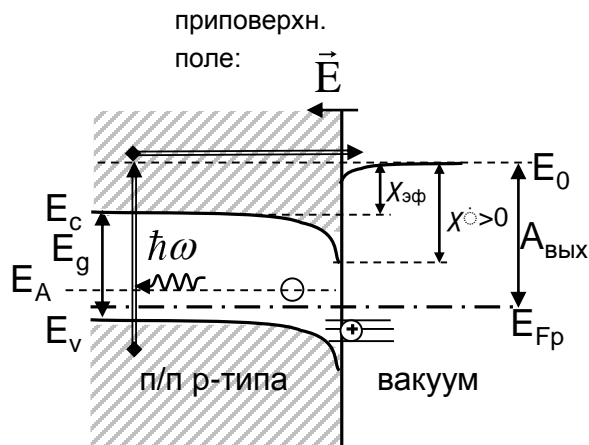


метал

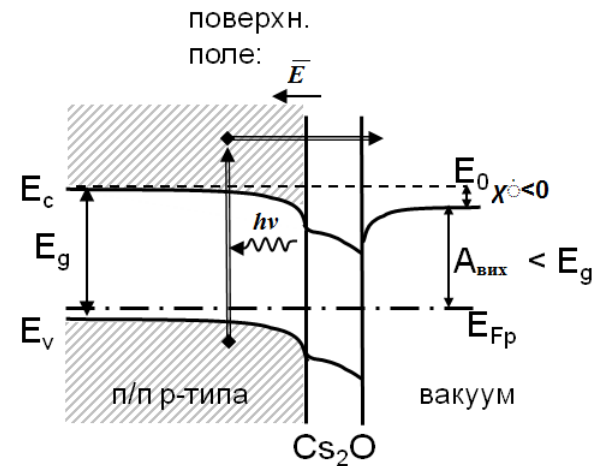
а) металевий фотокатод



б) фотокатод з напівпровідниками n-типу



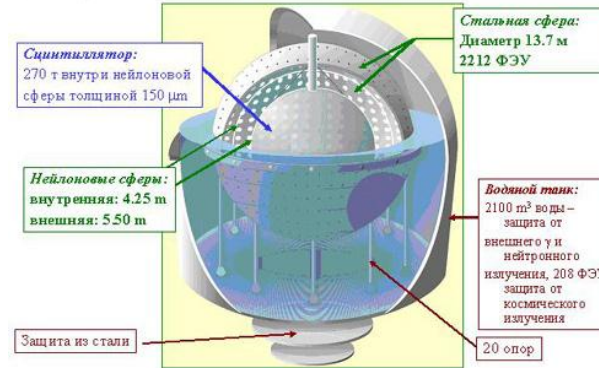
в) фотокатод з напівпровідниками p-типу



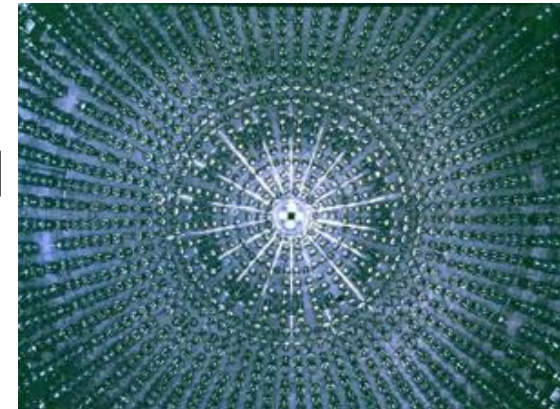
г) фотокатод з напівпровідниками p-типу з від'ємною електронною спорідненістю



## Застосування ФЕП

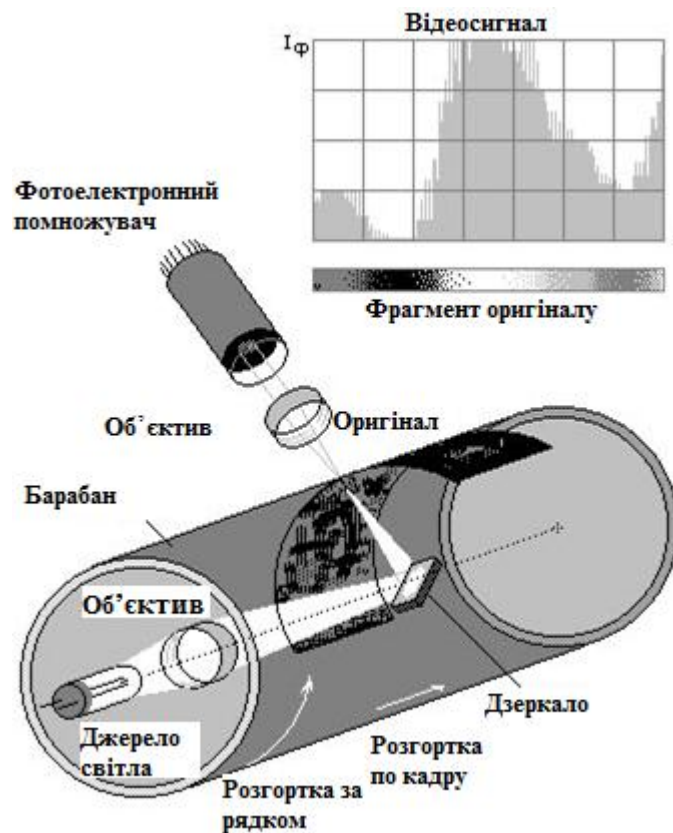
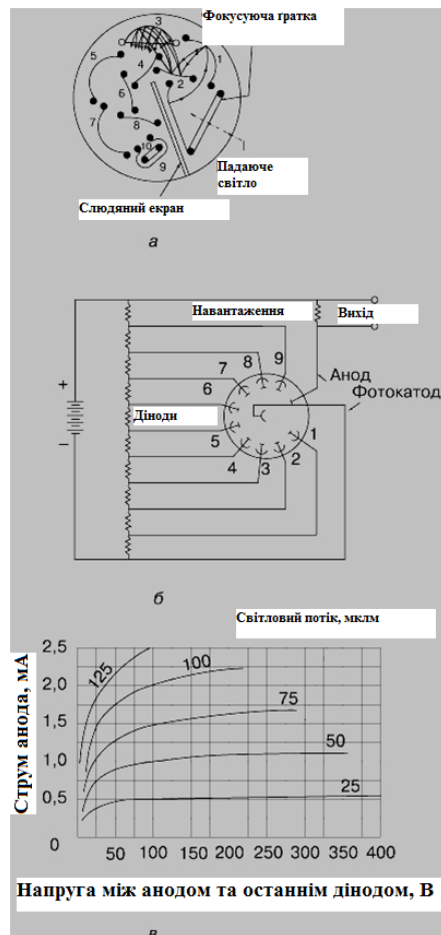


2212 ФЕП



Детектор Борексіно, створений за участю міжнародних кооперацій провідних світових наукових центрів в підземній лабораторії, розташованій в гірському масиві Гран Сассо (Італія), розпочав реєстрацію нейтрино, що випромінюються Сонцем. Вперше були спостережені сонячні нейтрино з енергією менше 1 МеВ (мегаелектронвольт), які народжуються в ядерних реакціях, що відбуваються в центральній області Сонця.

## Застосування ФЕП



### Схема барабанного сканера з ФЕП

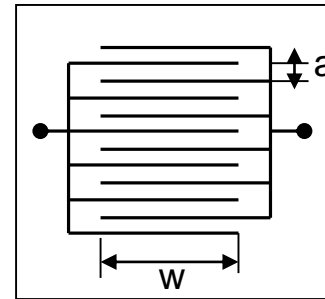
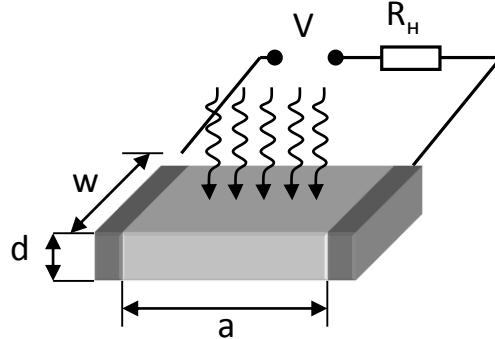
Обертанням барабана забезпечується рядкова розгортка зображення, а переміщенням фотоголівки уздовж барабана - кадрова



## 6.4. Приймачі з внутрішнім фотоефектом.

### 6.4.1. Фоторезистори

Елемент  
структури  
фоторезистора



Гребінчаста  
структура  
фоторезистора

### 6.4.2. Статичні характеристики фоторезисторів

■ кратність:  $K(\Phi) = \frac{I_\Phi - I_T}{I_T} = \frac{R_T}{R_{cb}}$   $K = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_T}$   $\Delta\sigma = \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_p = e\mu_n(n - n_0) + e\mu_p(p - p_0) = e(\mu_n\Delta n + \mu_p\Delta p)$

■ спектральна чутливість  $S_\lambda = \frac{\delta I_\Phi}{\delta \Phi_\omega} = \frac{\nu_R \Delta\sigma_\Sigma}{\delta \Phi_\omega} = \frac{\nu_R \Delta\sigma \cdot w \cdot d}{\delta \Phi_\omega a} = \eta_{in} \frac{e\mu_n \tau_n \nu_R}{\hbar \omega a^2}$

■ коефіцієнт внутрішнього підсилення фотоструму  $K_T = \frac{I_\Phi / e}{\Phi_\omega / \hbar \omega} = \eta_{in} \mu_n \tau_n \frac{\nu_R}{a^2} = \eta_{in} \frac{\tau_n}{t_{np}}$

$t_{np}$  середній час прольоту через фоторезистор:  $t_{np} = \frac{a}{v_{cp}} = \frac{a}{\mu_n E} = \frac{a^2}{\mu_n \nu_R}$

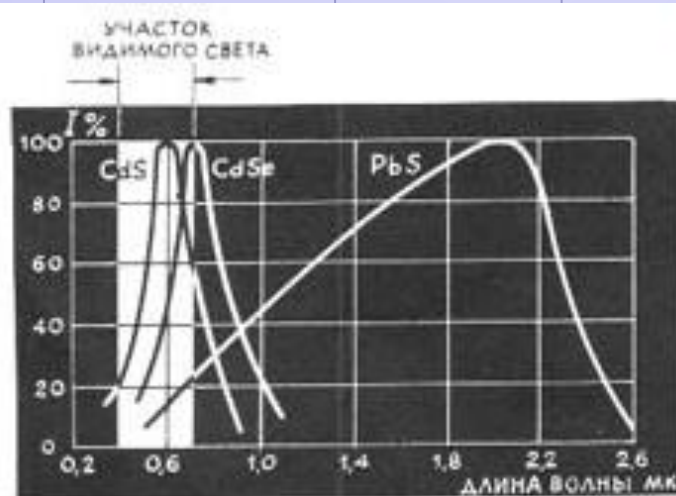
Фотострум  $I_\Phi = \eta_{in} \frac{e \tau_n}{t_{np}} \frac{\Phi_\omega}{\hbar \omega} V = e \frac{\Phi_\omega}{\hbar \omega} K_T V$

## Вплив товщини ФР

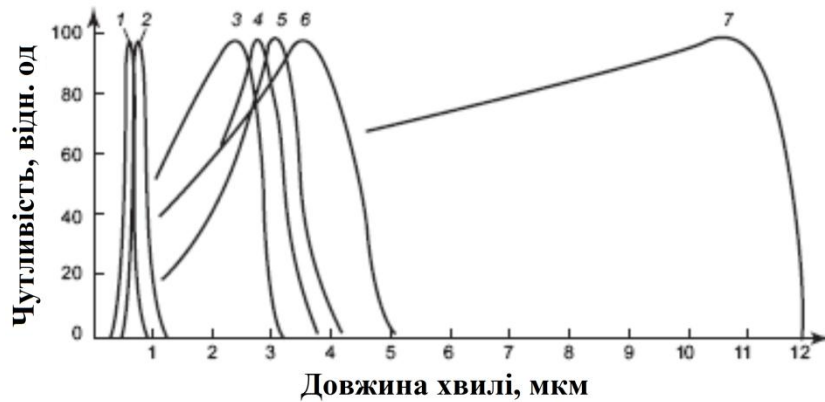
$$K = \frac{K_0}{d} (1 - \exp(-k_\omega d)) = \begin{cases} K_0 k_\omega & k_\omega d \ll 1 - \text{тонкі плівки} \\ \frac{K_0}{d}, & k_\omega d \gg 1 \end{cases}$$

## Характеристики деяких промислових ФР

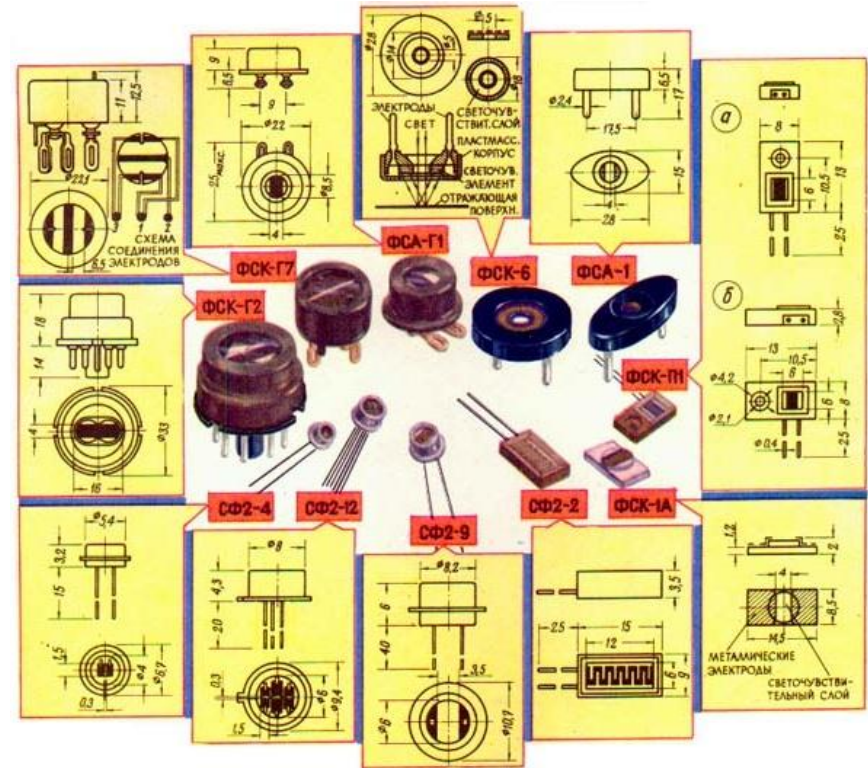
	Т <sub>робоча</sub>	$\lambda_1 \div \lambda_2$	Su, В/Вт	$D^*, \text{см} \cdot \Gamma\mu^{1/2} / \text{Вм}$	$\tau$ , мс	$R_{\text{темн}}, \text{Ом}$
CdS	кімнатна	0.4÷0.8 мкм		$10^{14}$	10÷200	$(0.1 \div 100) 10^6$
PbS	кімнатна	1.0÷3.0 мкм	$3 \cdot 10^5$	$10^{11}$	0.4	$(0.02 \div 5) 10^6$
HgCdTe	-196° С (77 К) азотна	2÷26 мкм	$4 \cdot 10^4$	$10^{10}$	0.001	$50 \cdot 10^6$



## Фоторезисторы

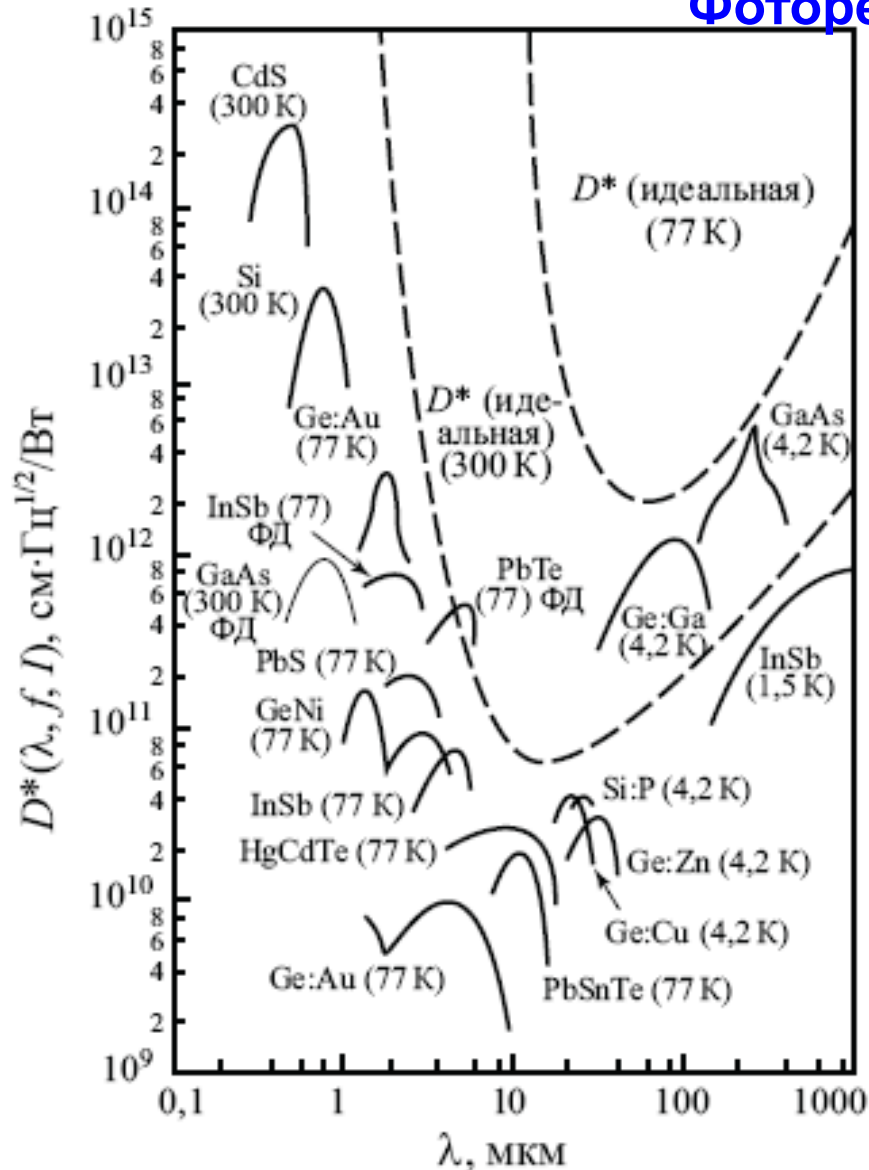


Спектральна чутливість фоторезисторів на основі CdS (крива 1), CdSe (2), PbS (3), твердого розчину PbS-PbSe (4, 5), PbSe (6), PbSn (Te) (7)



Плівкові  
фоторезистори

## Фоторезистори



### APPLICATIONS

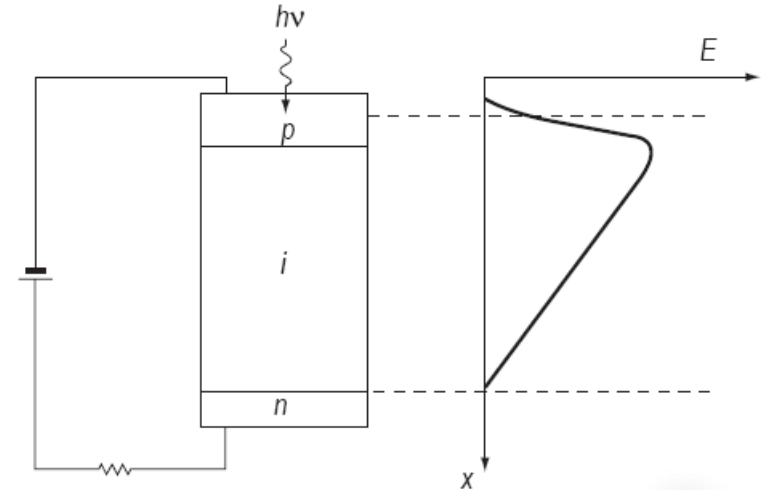
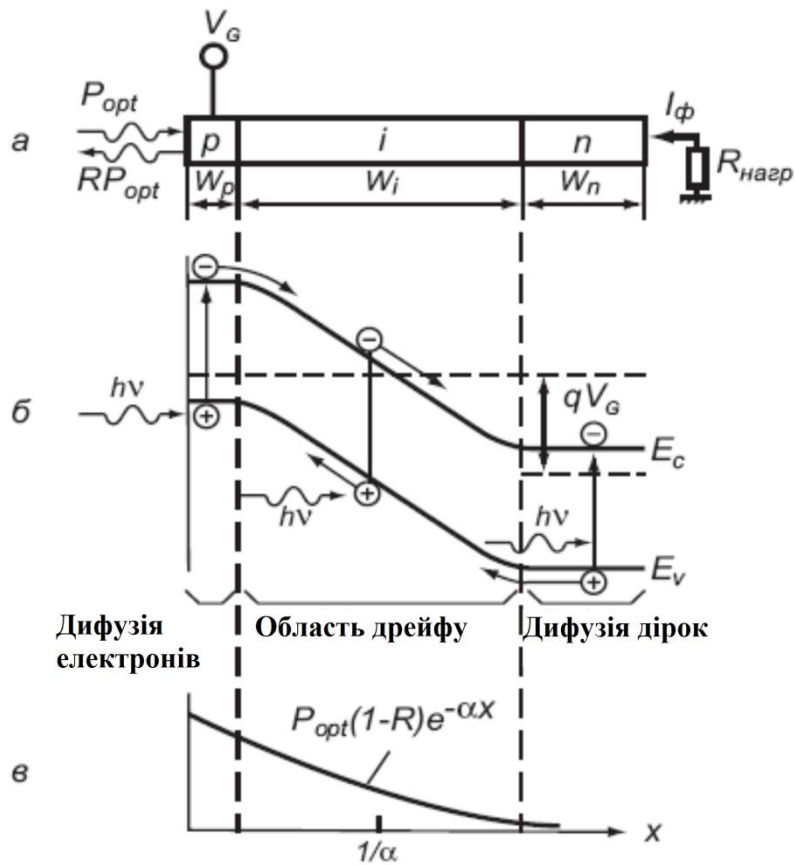
- High Speed Optical Communications
- Single/Multi-Mode Fiber Optic Receiver
- Gigabit Ethernet/Fibre Channel
- SONET/SDH, ATM
- Optical Taps

### FEATURES

- High Speed
- High Responsivity
- Low Noise
- Spectral Range 900nm to 1700nm

Залежність виявлювальної здатності  $D^*$  від довжини хвилі випромінювання для різних фоторезисторів (ФР) і фотодіодів (ФД)

## 6.4.2. Фотодіоди. *p-i-n* фотодіод

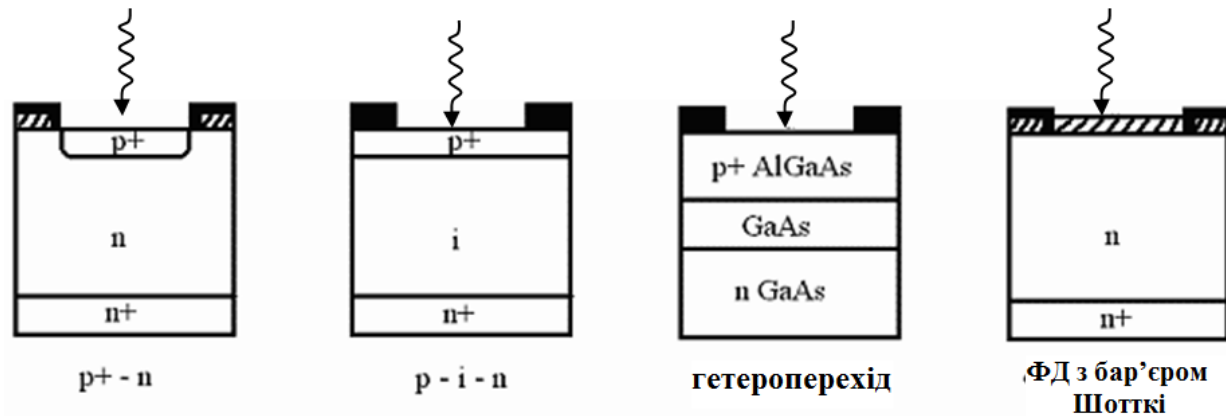


### Квантова ефективність ФД

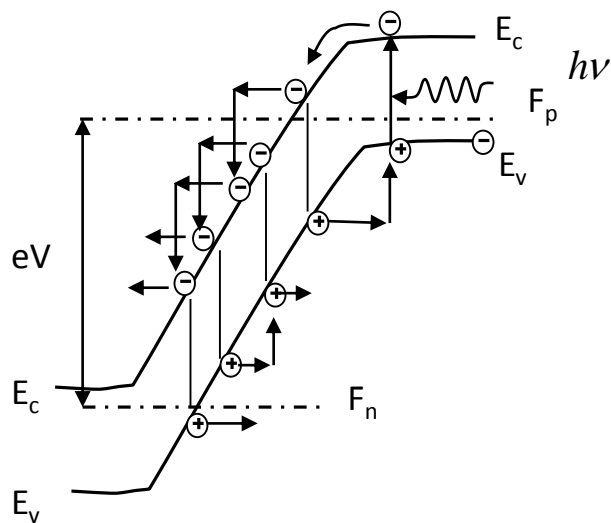
$$\eta = \frac{I_\Phi / e}{\Phi_\omega / A} = (1 - R) \left( 1 - \frac{\exp(-k_\omega w)}{1 + k_\omega L_p} \right)$$

Принцип роботи р-і-п фотодіода: а - поперечний переріз діода;  
б - зонна діаграма в умовах зворотного зсуву,  
в - розподіл інтенсивності випромінювання

## Різні конфігурації ФД



## 6.4.3. Лавинні фотодиоди



## Коефіцієнт лавинного множення:

$$M = \frac{I_{\Phi \text{ з множенням}}}{I_{\Phi \text{ без множенням}}}$$

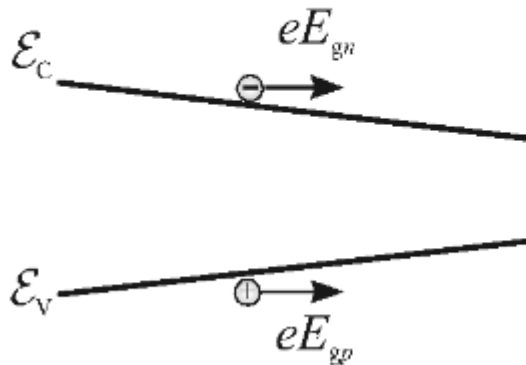
$$M = \frac{1}{1 - (U / U_{\text{проб}})^n}$$

$U$  – напруга на ЛФД,  
 $n = 1.5 \div 2$  для p-Si,  $n = 3.4 \div 4$  для n-Si.

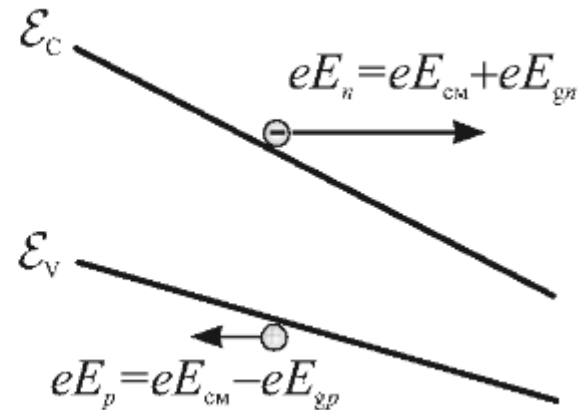
При  $U \sim U_{\text{проб}}$  коефіцієнт множення  $M$  доходить до  $10^3$ .  
 Зазвичай підбирають  $U$  так, щоб  $M = 10 \div 100$ .

## 6.4.3. Лавинні фотодіоди

### 6.4.3.1. Варизонні лавинні фотодіоди



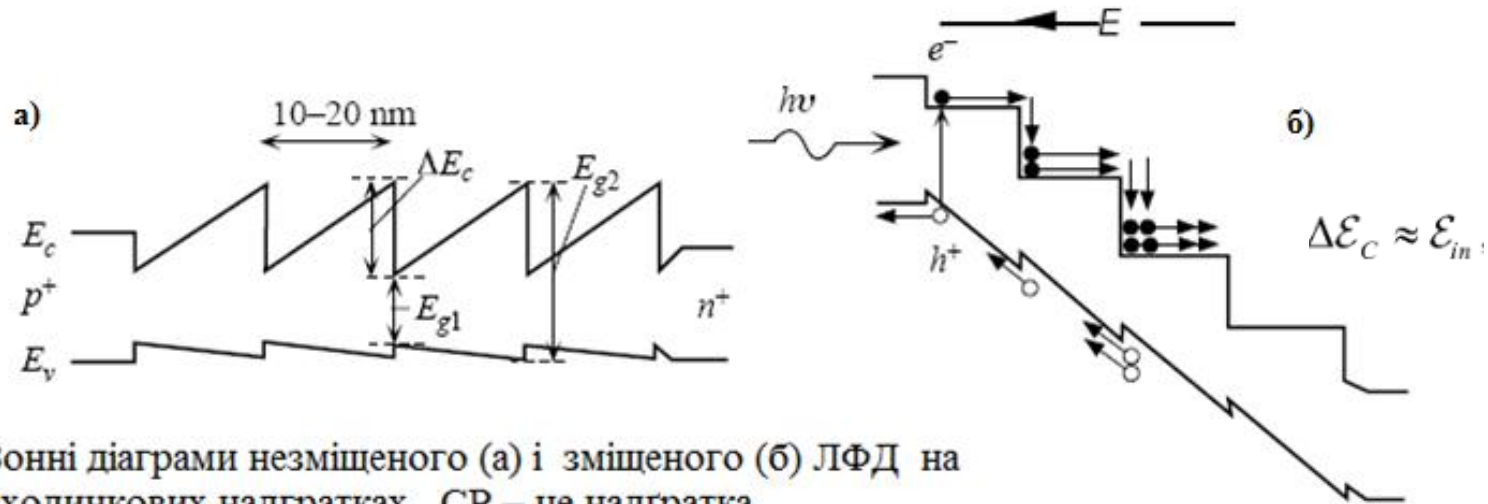
Квазіелектричне поле у власному варизонному напівпровіднику



Квазіелектричне поле і зовнішнє зміщення

## ФП на квантоворозмірних структурах

### 6.4.3.2. Сходинкові лавинні фотодіоди (каскадні)



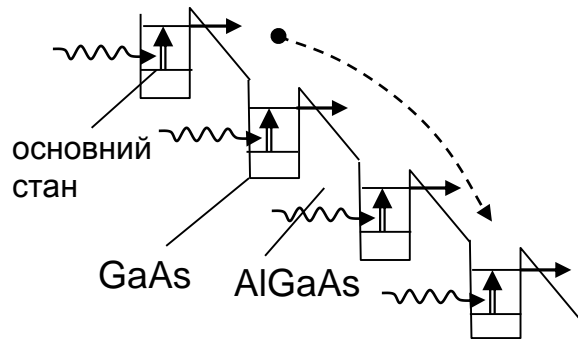
Зонні діаграми незміщеного (а) і зміщеного (б) ЛФД на сходинкових надгратках. СР – це надгратка

Аналог ФЕП

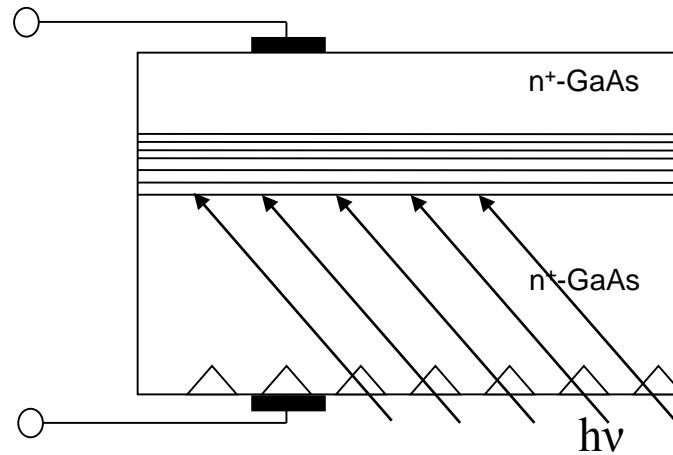
ФТІ кафедра ПФ



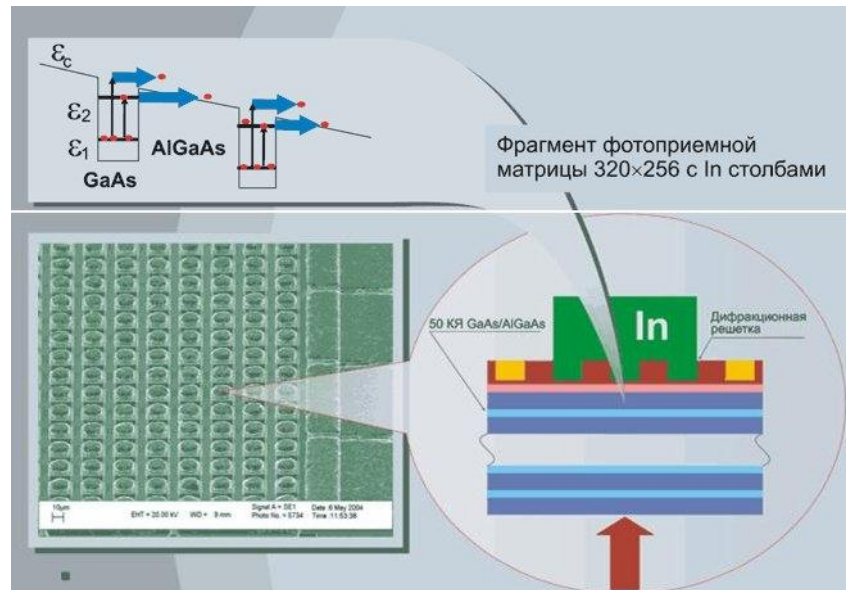
## 6.4.4. ФП на квантоворозмірних структурах



ФП на міжпідзонному поглинанні



КЯ InGaAs



Матрица ФП на міжпідзонному поглинанні

ФТІ кафедра ПФ

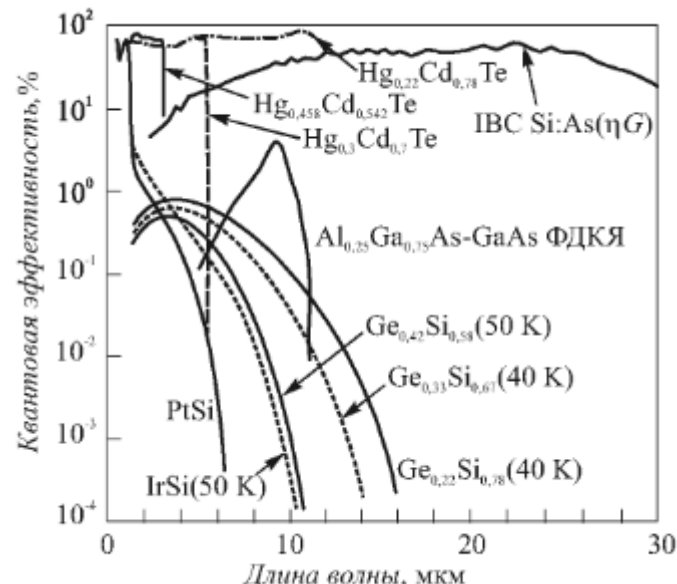
### Типові параметри ФД:

Чутливість, А/Вт	• $0,5 \div 5$ , в залежності від $\Delta\lambda$
Спектральна область, мкм	• $\lambda = 0,3 \div 15$
Інерційність, с	• $10^{-8} \div 10^{-10}$
Квантова ефективність, %	• $60 \div 90$
Темновий струм, А	• $10^{-7} \div 10^{-9}$ (в залежності від $A_{\text{ФД}}$ , фонового випромінювання та $\lambda_{\text{крас}}$ )
NEP, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	• $< 10^{-11} \div 10^{-14}$
$D^*$ , Гц <sup>1/2</sup> ·см/Вт	• $10^9 \div 10^{14}$

## Фотодіоди

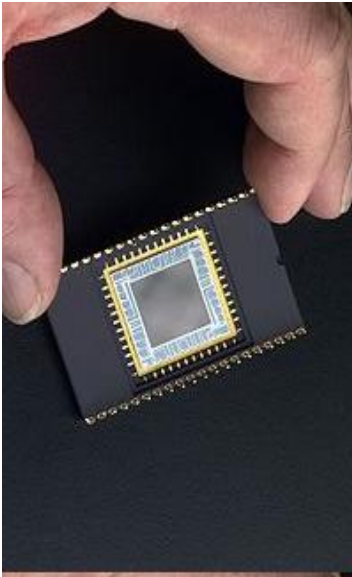
### Типові параметри ФД:

Матеріал ФД	Тип	$\Delta\lambda$ , мкм	$D^*$	$\tau$	T
Si	p-n	0.4÷1	$3 \cdot 10^{12}$	1÷10 мкс	295 K
	p-i-n	0.4÷1.1	$3 \cdot 10^{13}$	<2 нс	
	ЛФД	0.4÷1.1	$10^{14}$	<2 нс	
Ge	p-n	0.5÷1.8	$5 \cdot 10^{10}$	1÷10 мкс	295 K
	ЛФД	0.5÷1.8	$10^{12}$	<0.1 мкс	
KPT (HgCdTe)		8÷14	$10^{10}$	0.01 мкс	80 K



Квантова ефективність ІЧ ФД

## 6.4.4. Прилади із зарядовим зв'язком (Нобелівська премія з фізики 2009)



Copyright © National Academy of Engineering

Willard S. Boyle

🕒 1/4 of the prize



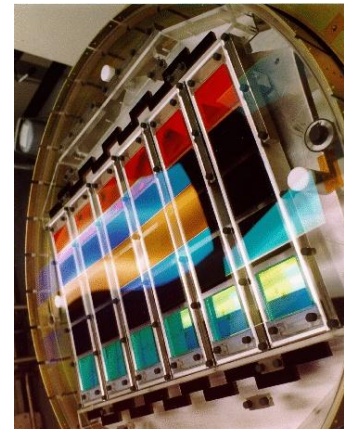
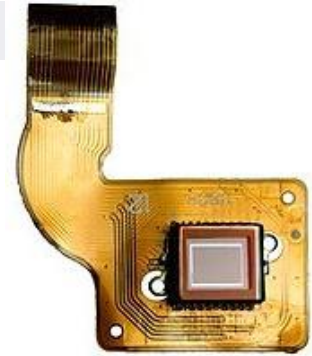
Photo: National Inventors Hall of Fame Foundation/SCANPIX

George E. Smith

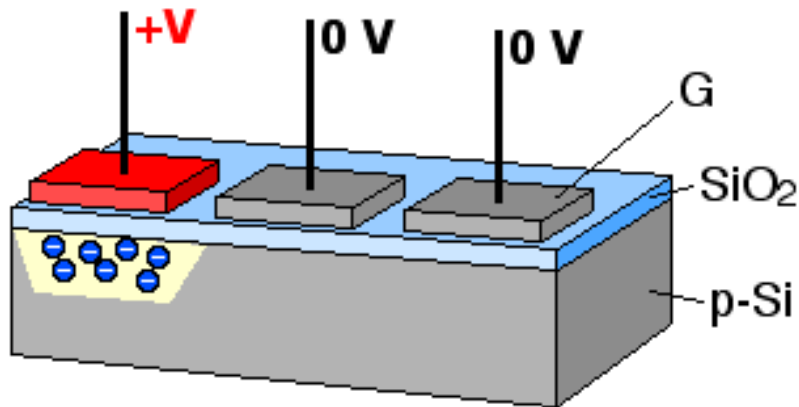
🕒 1/4 of the prize



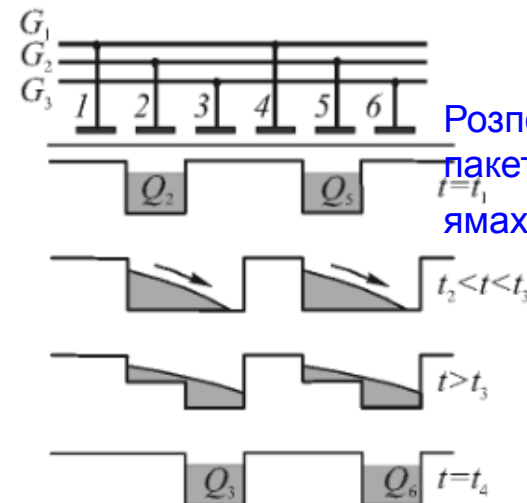
ПЗЗ-лінійка CCD from a fax machine



Array of 30 CCDs used on Sloan Digital Sky Survey telescope imaging camera



Принцип роботи ПЗЗ

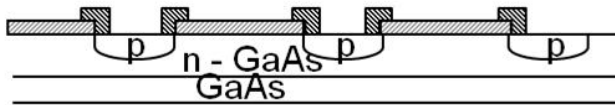


Розподіл зарядових пакетів в потенційних ямах під затворами

## Тема 7. Оптоелектронні засоби відображення інформації

- 7.1. Класифікація оптоелектронних засобів відображення інформації.
- 7.2. Електронно-променеві трубки.
- 7.3. Плазмові панелі.
- 7.4. Світлоклапанні дисплеї. Рідкокристалічні дисплеї.
  - 7.4.1. Орієнтаційні ефекти в РК мезофазі.
  - 7.4.2. Принципи побудови.
- 7.5. Характеристики РК дисплеїв.
- 7.6. Порівняльна характеристика плазмових і РК дисплеїв.

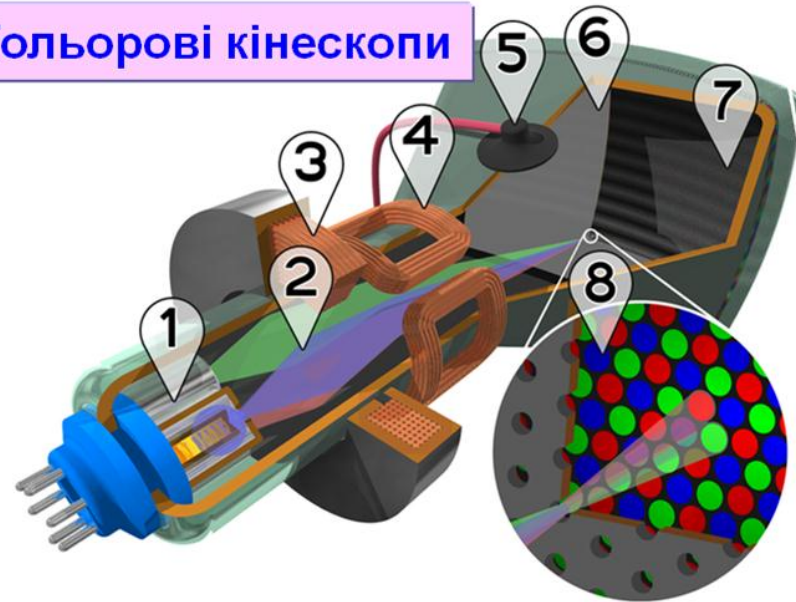
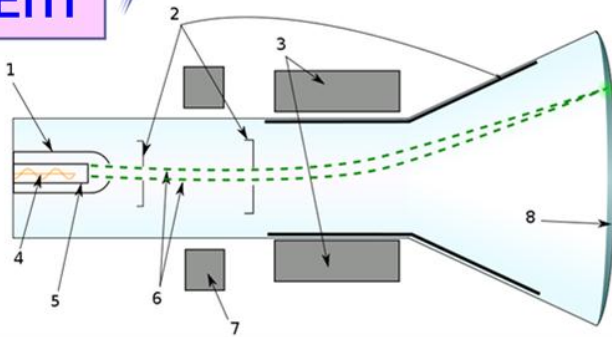
## Класифікація оптоелектронних засобів відображення інформації



Випромінювальні дисплеї

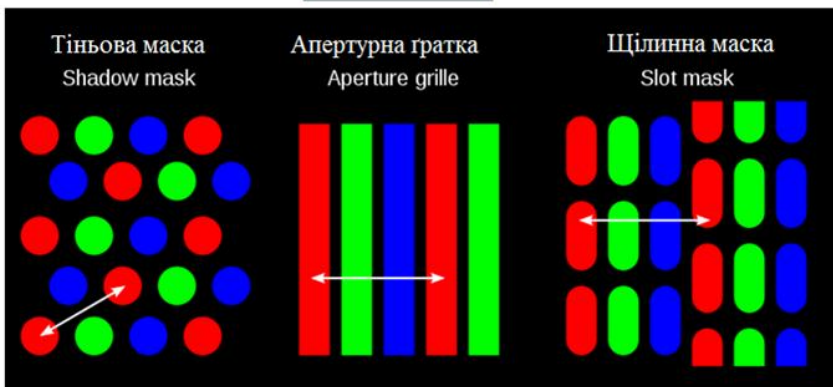
Кольорові кінескопи

ЕПТ



ФТІ кафедра  
ПФ

маски



Прожектор:

- Δ прожектор

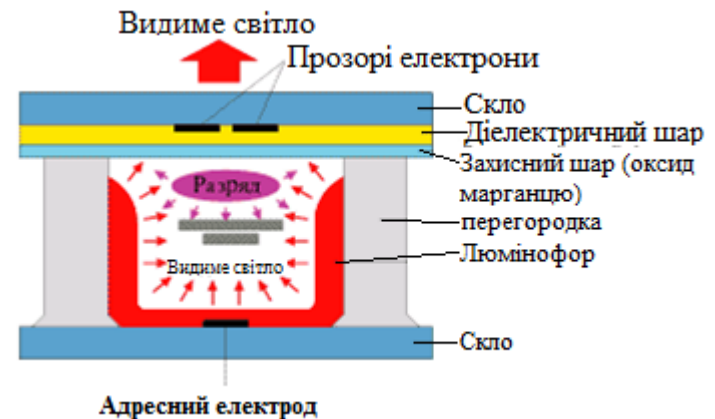
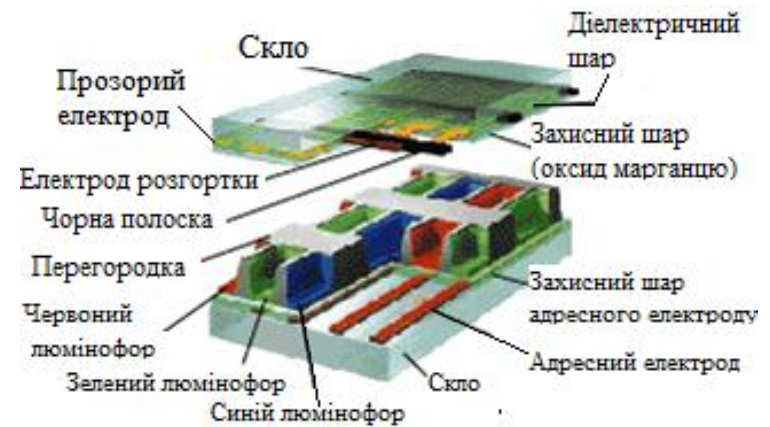
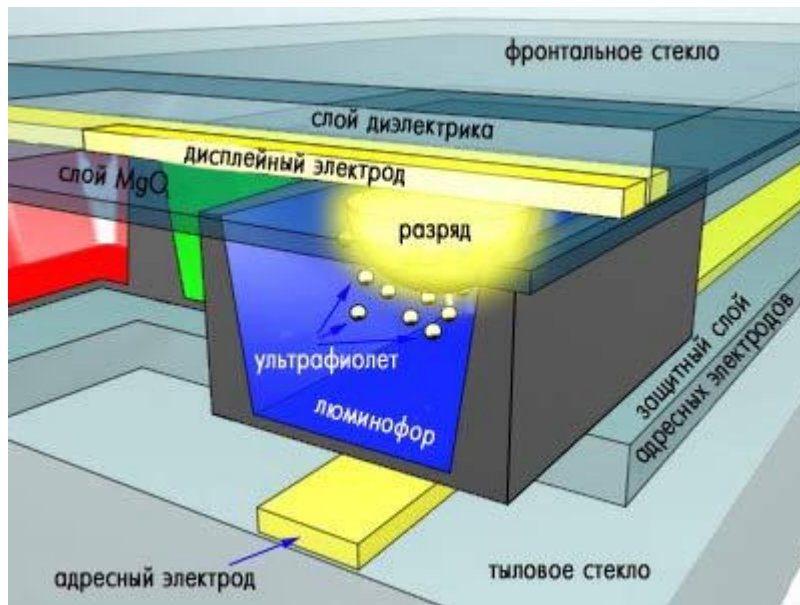
- компланарний

$$L = \xi j (U - U_0)^\epsilon$$



# ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

## “Плазмові” панелі



### Люмінофори:

Зелений:  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}^{2+}$  /  $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{2+}$

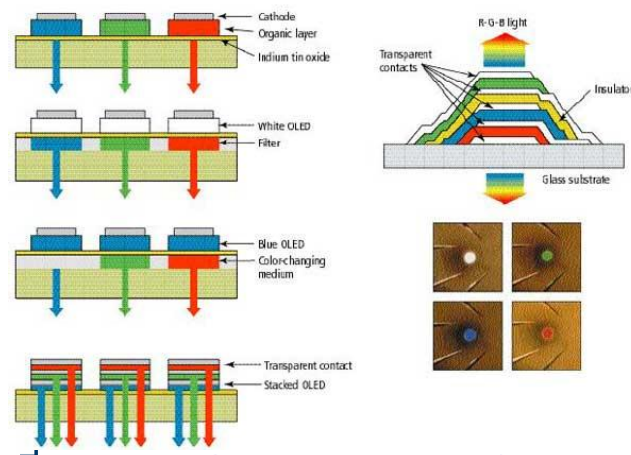
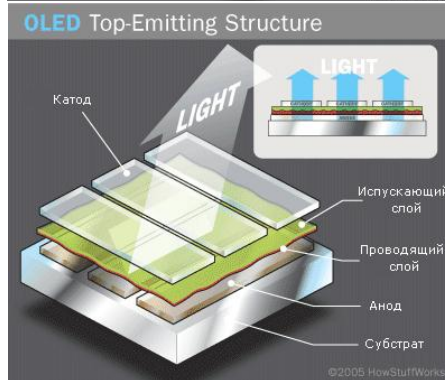
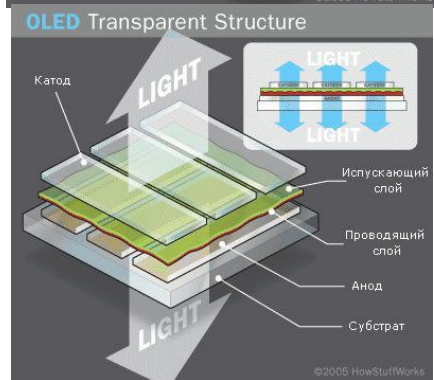
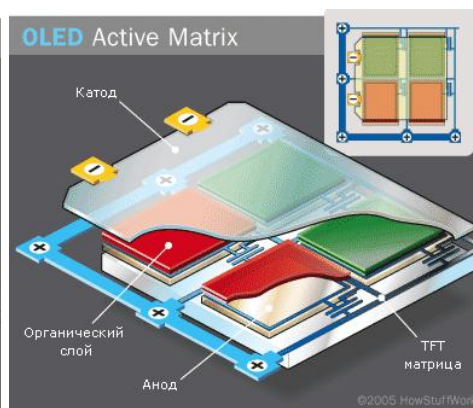
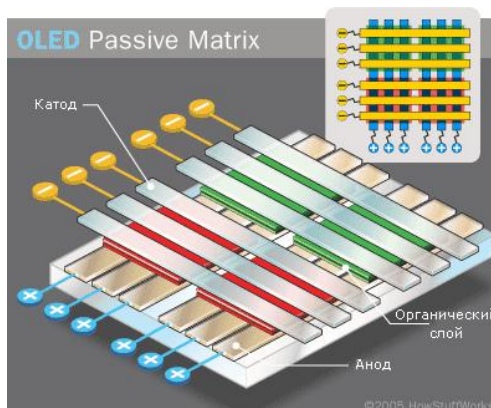
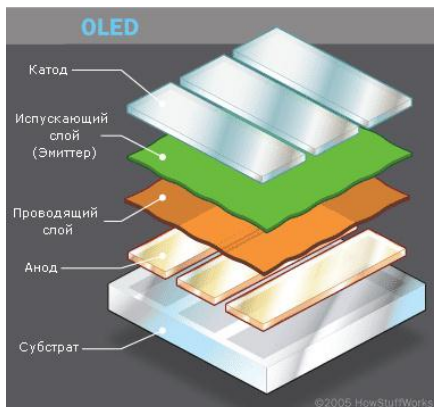
Червоний:  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$  /  $\text{Y}_{0,65}\text{Gd}_{0,35}\text{BO}_3:\text{Eu}^{3+}$

Синій:  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$

510 и 525 нм для зеленого, 610 нм для красного та 450 нм для синього.

# ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

## Матриці на ОСД (OLED)



### Яскравість

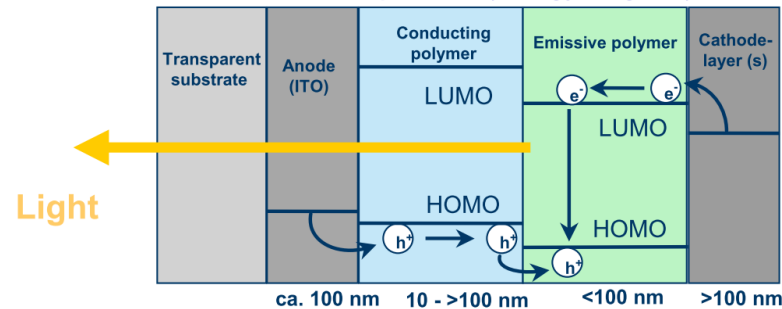
Від декількох  $\text{кд/м}^2$  (для ночі) до більше  $100\,000 \text{ кд/м}^2$ , рекомендується — до  $1\,000 \text{ кд/м}^2$ .

### Контрастність

10 000:1 (у ЖК — до 2000:1 ЭЛТ — до 5000:1).

Термін служби 2-3 роки

### OLED device operation (energy diagram)



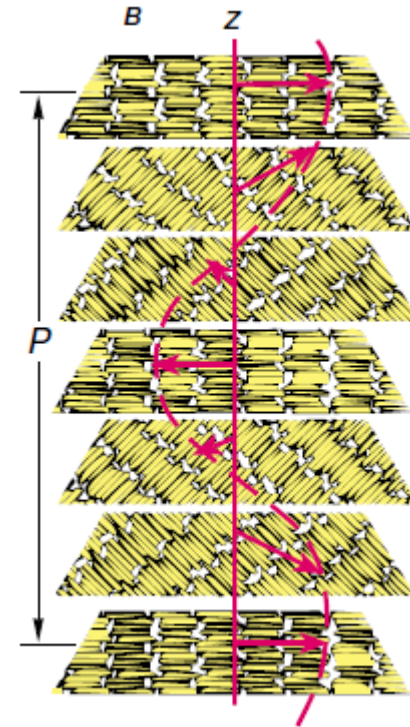
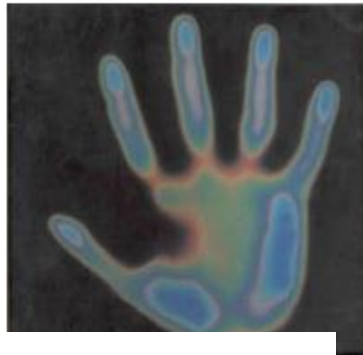




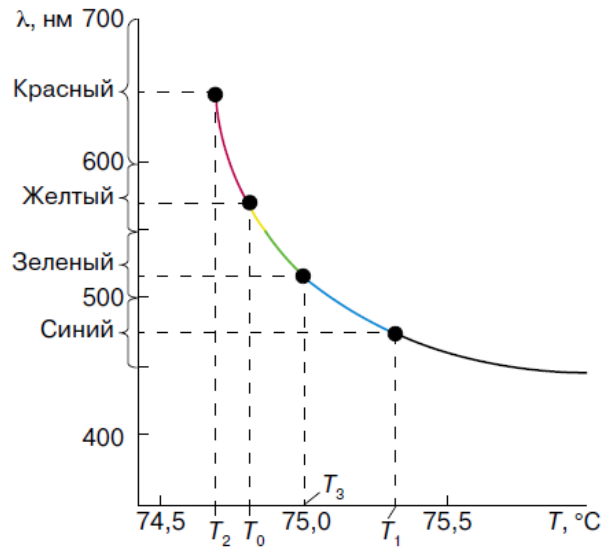
## Світлоклапанні дисплеї

### Рідкі кристали ХРК

Термоіндикатори на основі холестериків



ФТІ кафедра ПФ



**Фазовий перехід при зміні температури у холестерику**  
(При зміні температури спостерігається перехід в ізотропний розплав - в схрещених поляризаторах видно темне зображення.)

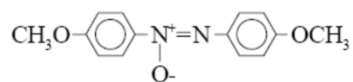
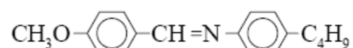
Зміна кроку спіралі  $\longrightarrow$  спостерігається зміна кольорів.

**Рис. 7.** Температурная зависимость длины волны селективного отражения света  $\lambda_{\text{max}}$  слоя холестерического жидкого кристалла – холестерилпеларгоната.

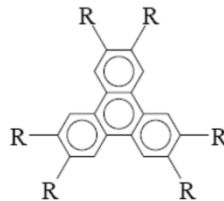
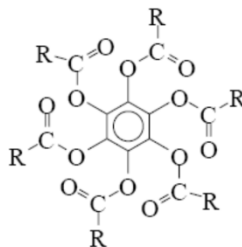
## Світлоклапанні дисплеї

### Рідкі кристали

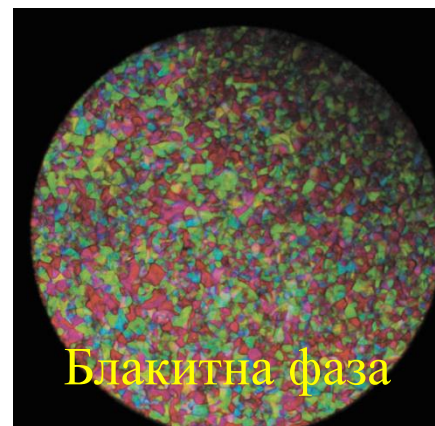
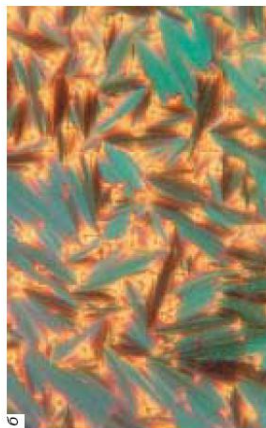
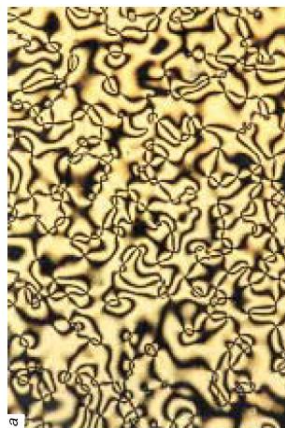
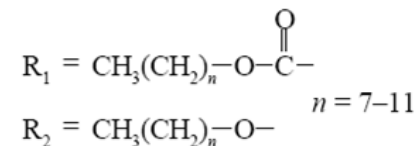
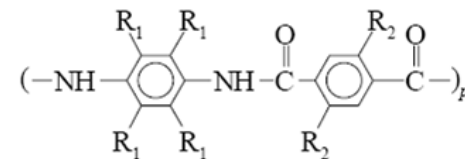
Стрижневі мезогени (каламимітики)



Дискотичні мезогени (дискотики)



Планкообразні мезогени (сандіки)

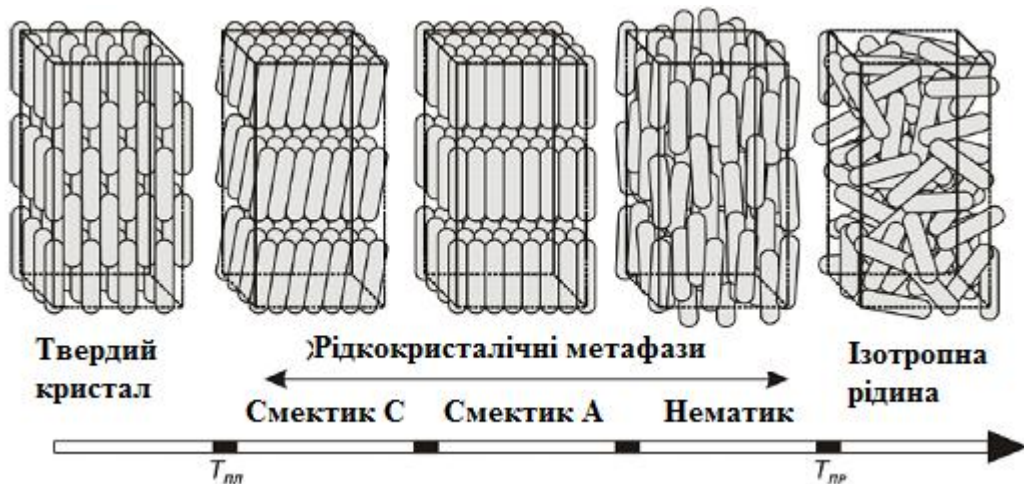


Блакитна фаза

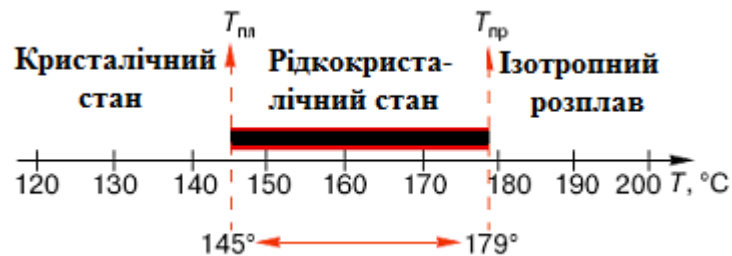
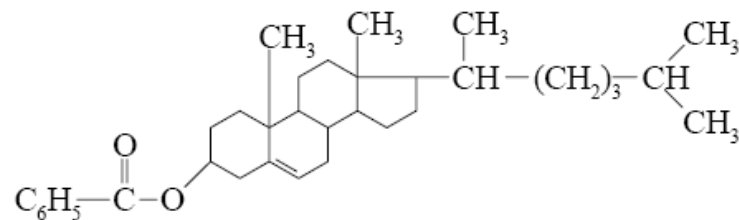
Типові текстури нематичних (а), смектичних (б) і холестеричних (в) рідких кристалів: а– шлірен, б– віялова, в– конфокальна текстура.

## Світлоклапанні дисплеї

### Рідкі кристали (термотропні)



Перша рідкокристалічна сполука - холестерилбензоат



НРК  $\Rightarrow \Delta n = (n_e - n_o) \geq 0$

ХРК  $\Rightarrow \Delta n \leq 0$

анізотропія діелектричної проникності



### Види деформацій:

S-поперечний

а)



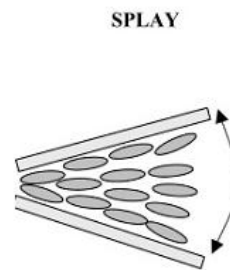
T-кручення

б)

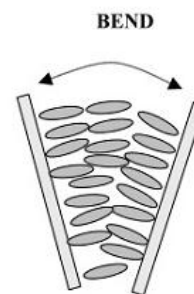


в)

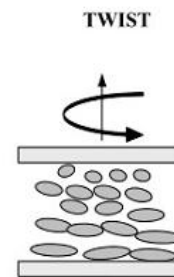
B-поздовжній



SPLAY



BEND



TWIST

$$F = \int_V \left\{ \left[ \frac{K_1}{2} (\text{div } \mathbf{n})^2 + \frac{K_2}{2} (\mathbf{n}, \text{rot } \mathbf{n})^2 + \frac{K_3}{2} [\mathbf{n}, \text{rot } \mathbf{n}]^2 \right] + F_e \right\} d^3 \mathbf{r}.$$

Пружні константи Франка

Splay ( $K_{11}$ ), Torsion ( $K_{22}$ ), Bend ( $K_{33}$ )

$$F = F_d + F_e$$

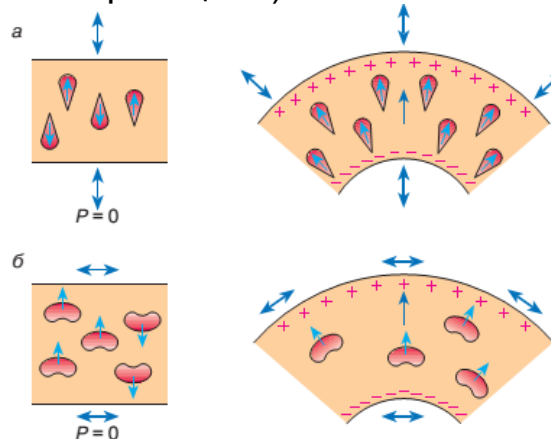
$$F_e = F_E + F_f$$

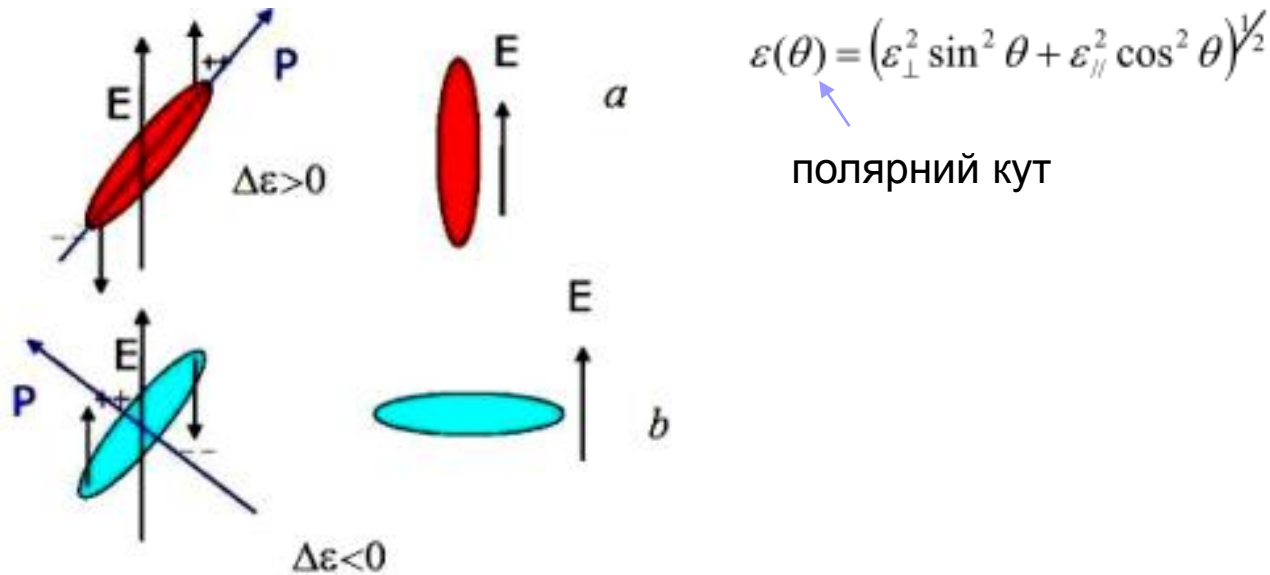
$$F_E = - \mathbf{DE} / 8\pi = - \epsilon_{\perp} E^2 / 8\pi - \Delta \epsilon (\mathbf{E} \mathbf{n})^2 / 8\pi$$

$$F_f = - (\mathbf{P} \mathbf{E})$$

(Франка-Озеена)

Флексоелектричний ефект (поява поляризації  $\mathbf{P}$ )





## Переходи Фредерікса

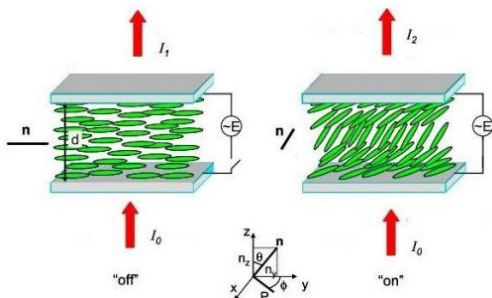
$$U_{th} = \pi \frac{\sqrt{K_{11}}}{\sqrt{\epsilon_o \Delta\epsilon}}$$

**S-ефект**

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\perp} - \epsilon_{\parallel} > 0$$

**B-ефект**

$$\Delta\epsilon < 0$$



$$n(z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z)}}$$

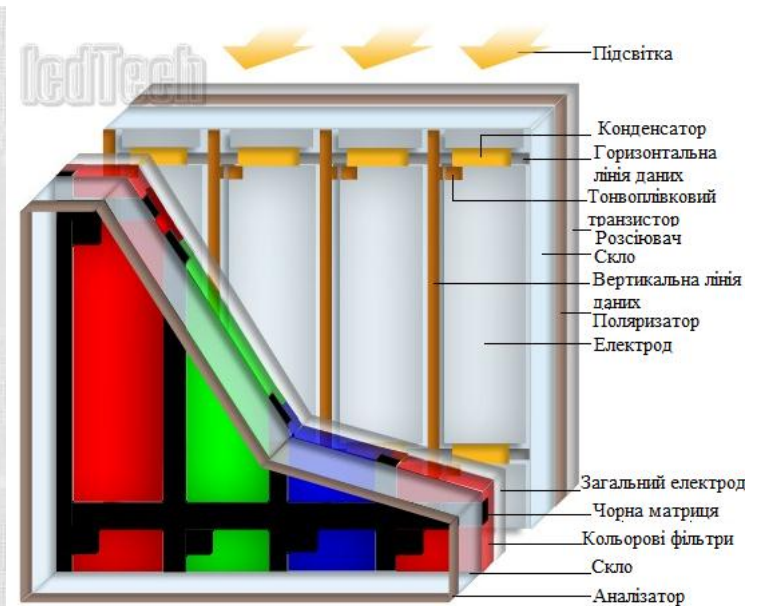
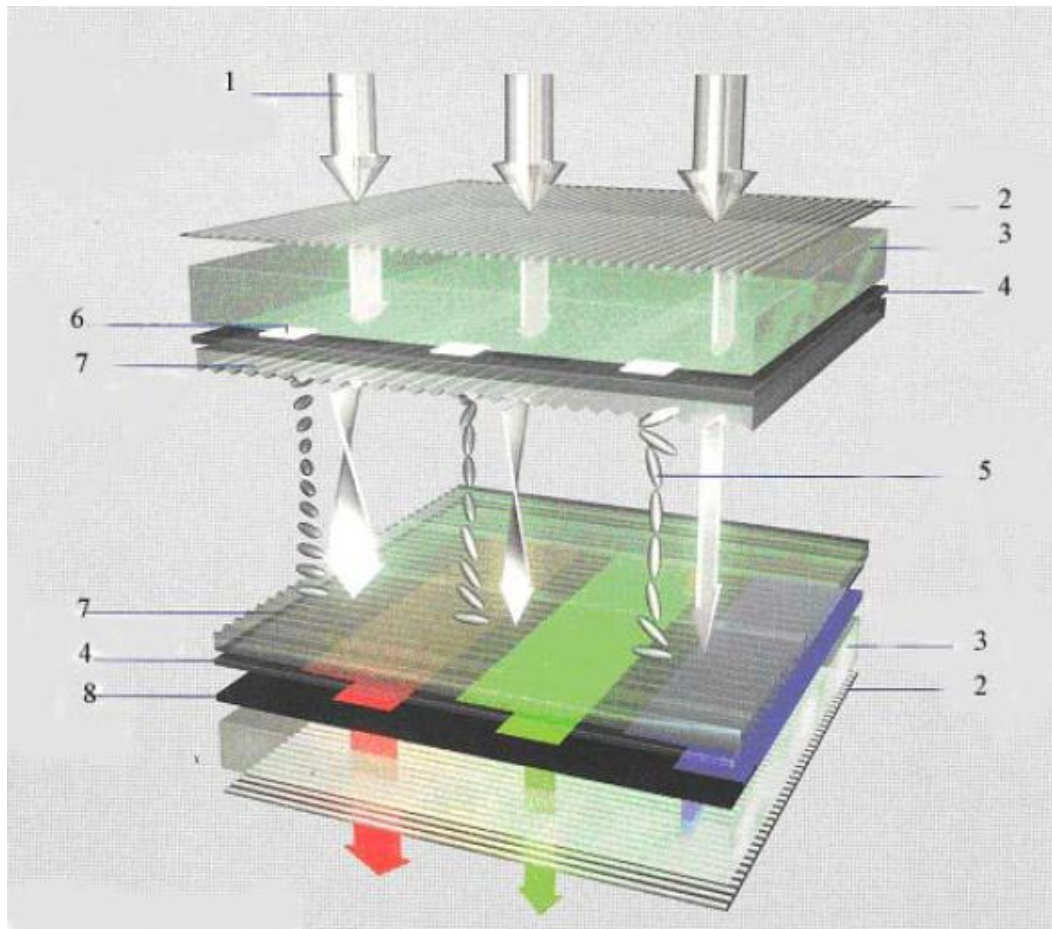
$$\Delta n = (1/d) \int_0^d (n(z) - n_o) dz,$$

$$n_e^{eff} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta_p + n_o^2 \cos^2 \theta_p}}$$

### Управління подвійним променезаломленням

$$I = \frac{1}{2} I_{np} (\cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \sin^2 \frac{\delta}{2})$$

## Світлоклапанні дисплеї



### Схема AMLCD TN дисплея:

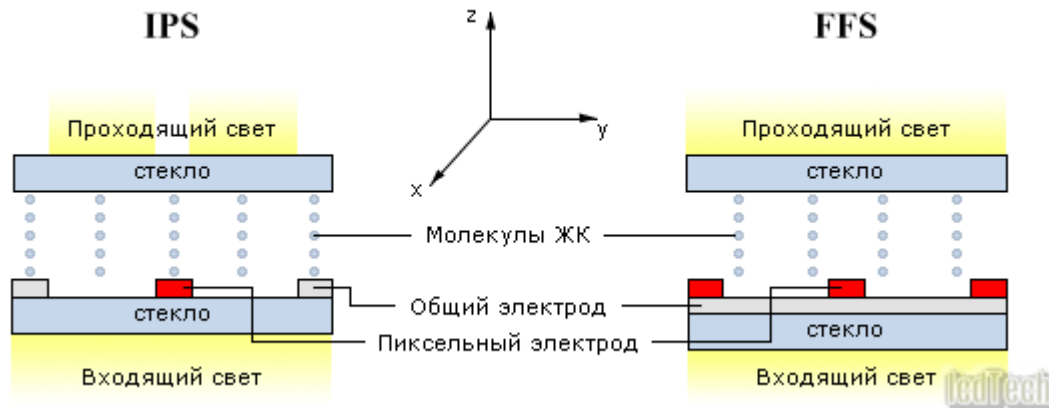
1 - поляризоване світло; 2 - поляризатор; 3 - скляна підкладка, 4 - ITO; 5 - шар НРК; 6 - TFT; 7 - орієнтуючий шар; 8 - кольоровий фільтр

ФТІ кафедра ПФ

$$I = \frac{1}{2} I_{np} (\cos^2 \beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \sin^2 \frac{\delta}{2})$$

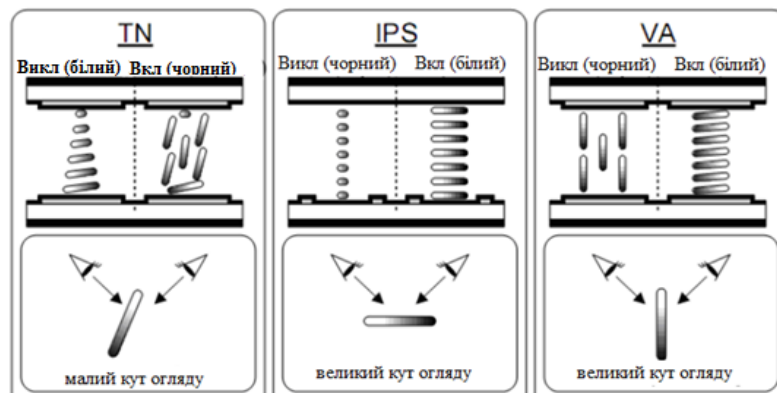
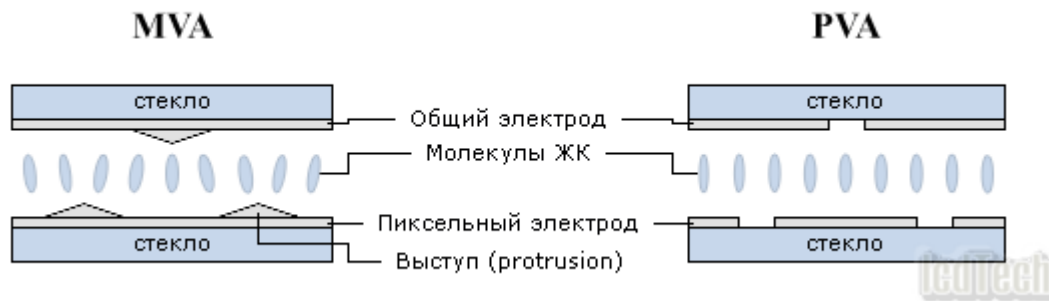


## 2. Планарна орієнтація



- IPS (In-Plane Switching)
  - Super IPS
  - UA-IPS (Ultra Advanced IPS)
  - HA-IPS (Advanced High Performance)
- FFS (Fringe Field Switching)

## 3. Гомеотропна орієнтація



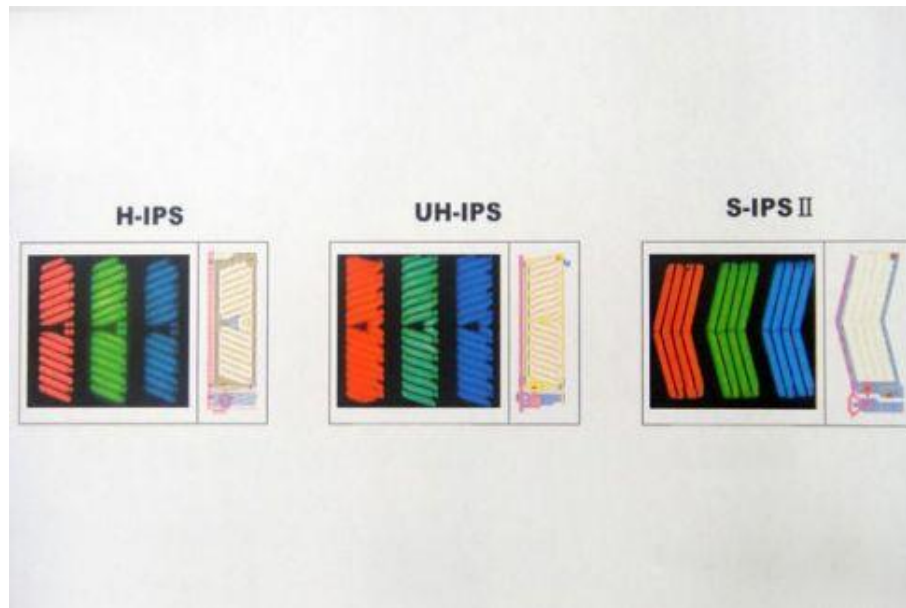
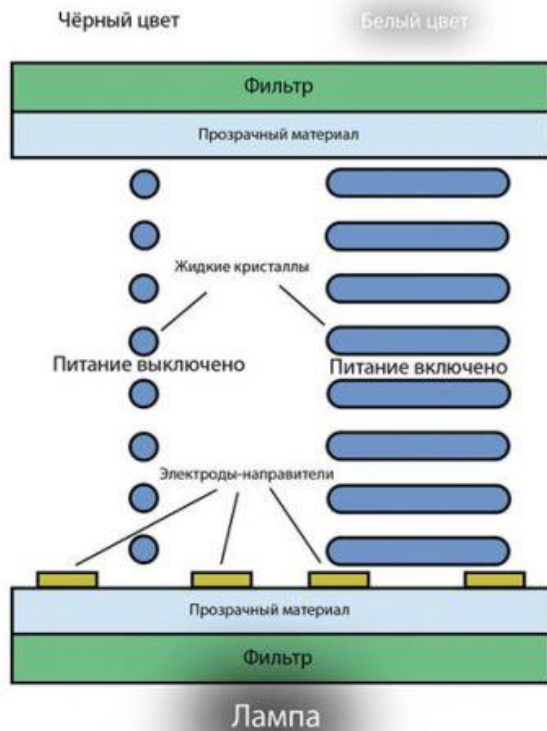
- MVA (Multi-Domain Vertical Alignment)
- PVA (Patterned Vertical Alignment)



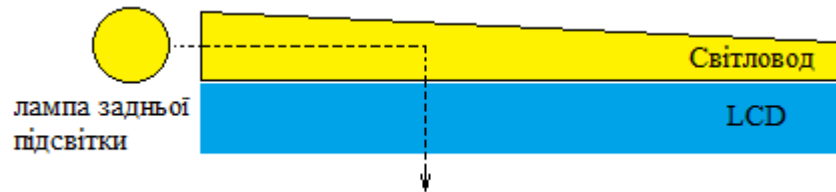
- TN (Twist Nematic)

## 1. Твіст (закручена) орієнтація

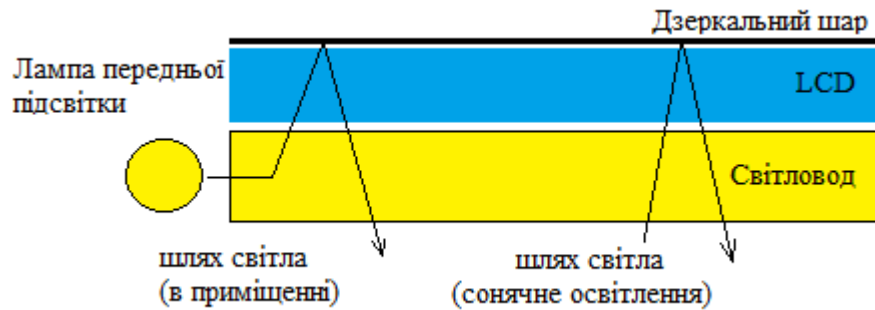
## •IPS (In-Plane Switching)



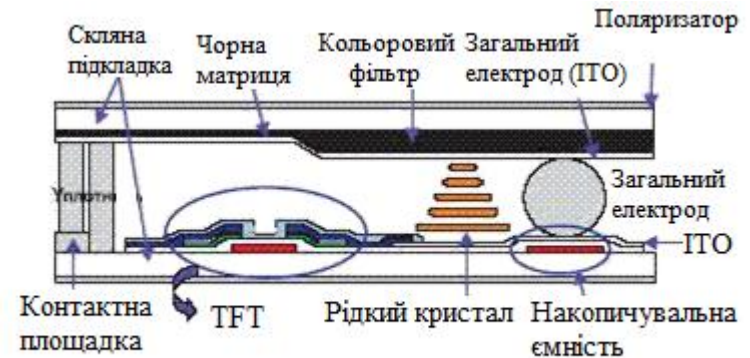
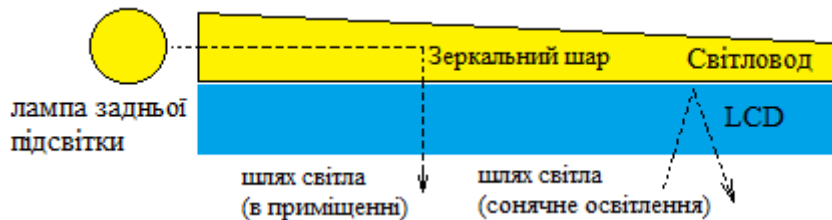
пропускаючий – для роботи в приміщенні



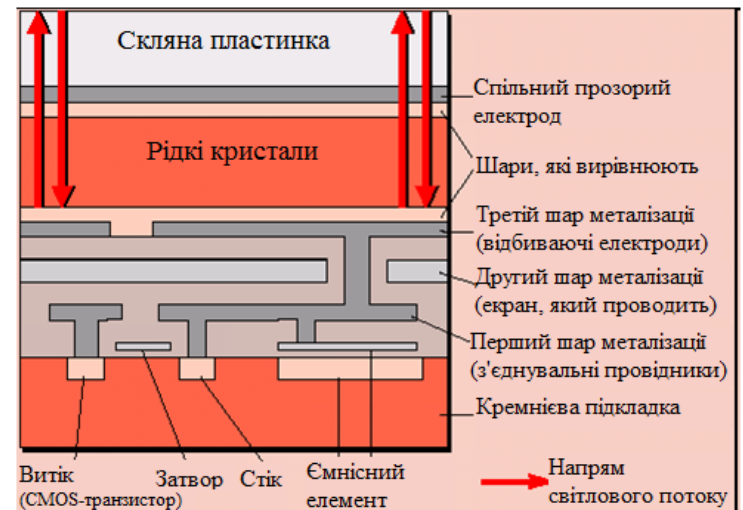
відбиваючий - у калькуляторах і часах



напівпрозорий



LCoS



# ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

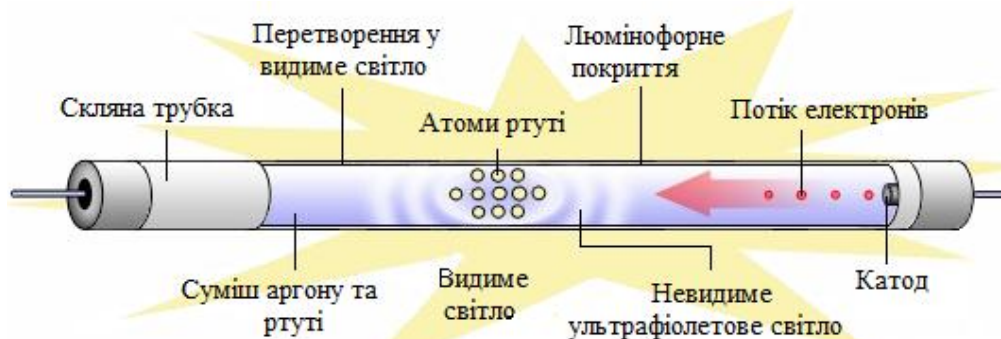
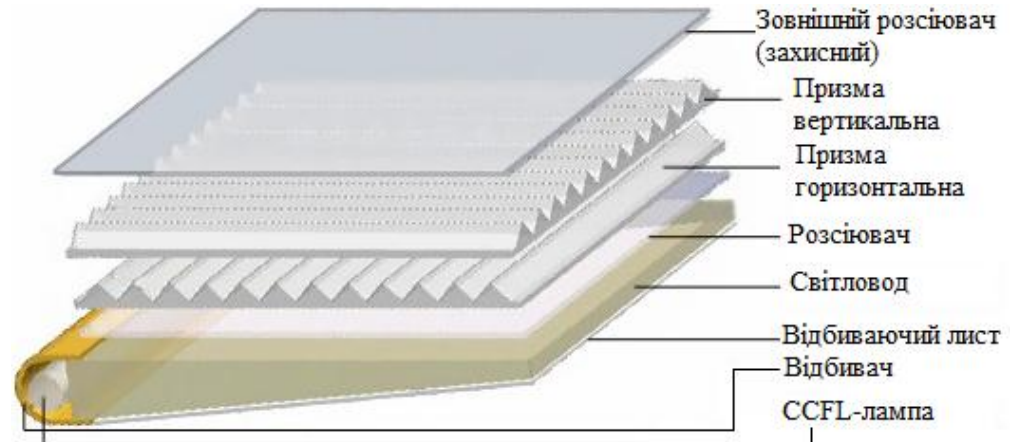
## Підсвічування РК дисплеїв (LCD)

на базі флуоресцентних ламп

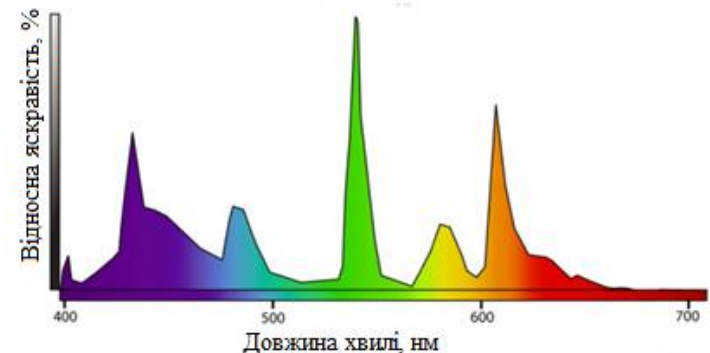
Крізь тіло панелі (поляризатори, електроди, цветофільтров тощо) проходить лише незначна частина початкового світлового потоку від ламп підсвічування, не більше 3%. Тому власна яскравість модуля підсвічування повинна бути значною - як правило, застосовуються лампи з яскравістю понад  $30000 \text{ кд/м}^2$ .



© <http://lcdtech.no-ip.info/>



CCFL - флуоресцентні лампи з холодним катодом

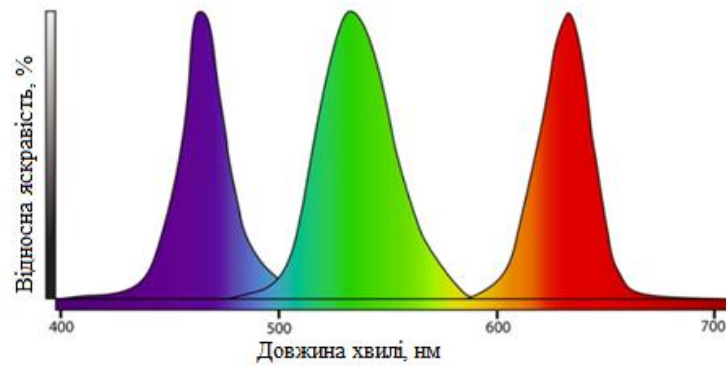


## Підсвічування РК дисплеїв (LCD)



**LED LCD**

на базі світлодіодів



## Характеристики РК дисплеїв

### Монітори

**19.0"**

**1280×1024**

**Acer**

AL1923	300	1300:1		178/178	AUO	Prem.MVA	M190EN03 V2
--------	-----	--------	--	---------	-----	----------	-------------

**22.0"**

**1680×1050**

**Samsung**

225BW	280	700:1	5	160/160	CMO	TN TFT	M220Z1-L01
2233BW	300	1000:1	5	170/160	CMO	TN TFT	M220Z1-L03

**29.8"**

**2560×1600**

**Apple**

M9179	270	400:1	16	170/170	LG.Philips	S-IPS	LM300W01
-------	-----	-------	----	---------	------------	-------	----------

### LCD панелі для моніторів

**19"**

Samsung

LTM190EP01	PVA	1280×1024	16.7M (8 bit)	300	1000:1	178/178	8мс
	396.0 × 324.0 × 20.0			4×CCFL	2650	glossy	

### LCD панелі для ноутбуків

**10.6"**

Samsung

LTN106W2	TN TFT	1280×768	262K (6 bit),	250	500 :1	90/65	35мс
	243.4 × 152.0 × 5.3			1×CCFL	210		

## Порівняльна характеристика плазмових і РК дисплеїв

	Характеристики плазмових дисплеїв	Характеристики TFT-LCD
Розміри діагоналі моніторів	42" – 102"	4" – >50" Sony BRAVIA KD-84X9005 (2012г.) <b>84"</b> (3840 x 2160) (содержит около 8,29 мегапикселя, что в 4 раза больше, чем в стандарте Full HD)
Максимальна яскравість	Відмінна (500-1200 кандел/м²)	Хороша (200-400 кандел/м²)
Контраст	Відмінний (1:1000 і вище)	Хороший (1:250 - 1:700)
Перенесення кольорів	Прекрасна (10 <sup>9</sup> )	Обмежена (17·10 <sup>6</sup> )
Час роботи	60 тис. год.	60 тис. год.
Кут огляду	160°	145°, зображення змінює контрастність на великих кутах
«Вигорання» на статичних зображеннях	Можливе при неправильній експлуатації, тобто при показі статичних зображень протягом довгого часу	Можливе при неправильній експлуатації, тобто при показі статичних зображень протягом довгого часу, але цей час істотно більший, ніж у плазмових панелей