

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника”

---

Фізико-технічний факультет

Кафедра матеріалознавства і новітніх технологій

В.О. Коцюбинський

Основи оптоелектроніки

Курс лекцій



м. Івано-Франківськ

2017

---



ББК 32.86я73

*Рекомендовано до друку Вченою радою Фізико-технічного інституту  
ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника" (протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 2016 року)*

---

**Рецензенти:**

**Когут Ігор Тимофійович**, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки  
фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,  
доктор технічних наук, професор

**Любомир Іванович Никируй**, професор кафедри фізики і хімії твердого тіла  
фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,  
кандидат фізико-математичних наук

**Коцюбинський В.О. Основи оптоелектроніки** : [Електронний ресурс] /

*Володимир Олегович Коцюбинський* / Фізико-технічний факультет;

ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника". – Івано-Франківськ, 2017. – 212 с.–

Режим доступу : <http://lib.pu.if.ua/e-library.php>

Навчально-методичний посібник адаптований до програми навчання студентів спеціальності «Прикладна фізика та наноматеріали». Основна увага приділяється фізичним явищам, на яких базується робота оптоелектронних елементів і систем, описані їх основні характеристики та окреслено області застосування. Викладено фізичні основи роботи випромінюючих та приймаючих оптоелектронних приладів, принципи модуляції оптичного сигналу. Зроблено акцент на принципах функціонування приладів, призначених для використання в інформаційно-комунікаційних системах та інтегрально-оптичних пристроях.

ББК 32.86я73

© Коцюбинський В.О. 2017

© Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2017

---

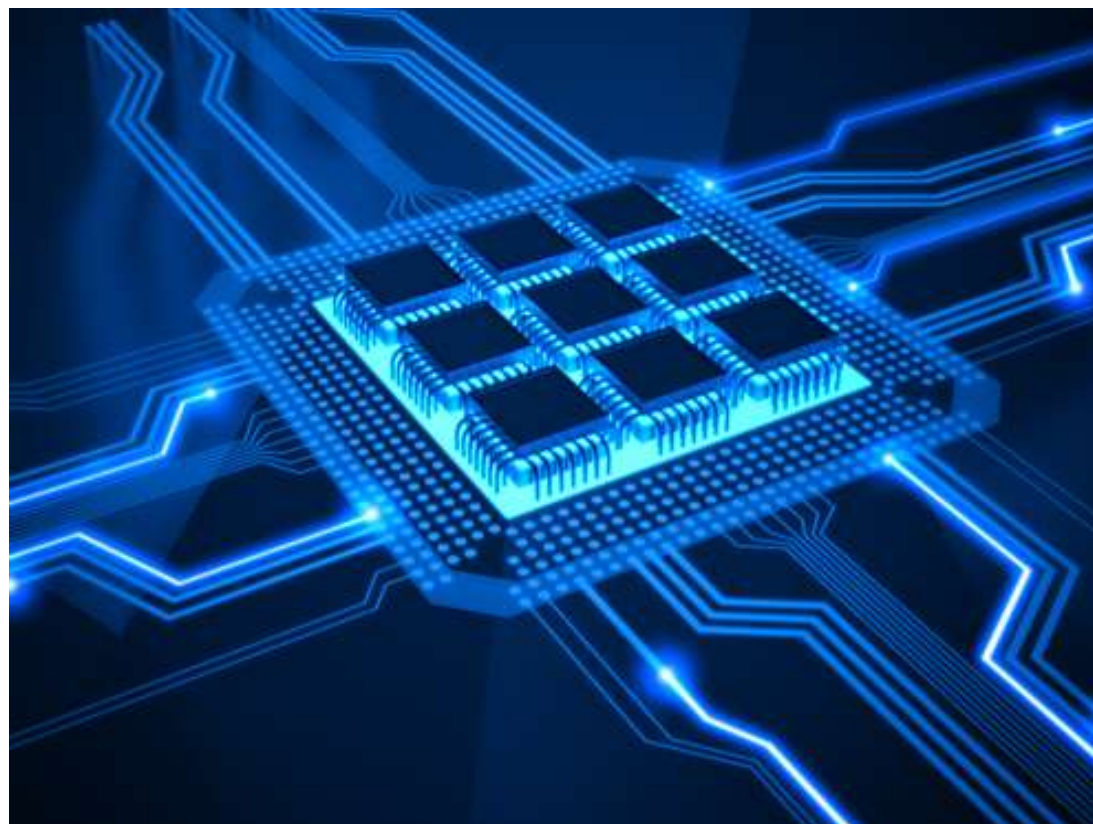


# Лекція 1

---

## Оптоелектроніка

1. Мікроелектроніка. Характеристики чіпа
2. Параметри елементів ІС
3. Закон Мура
4. Мікроелектроніка-наноелектроніка
5. Функціональна електроніка
6. Оптоелектроніка
7. Переваги оптоелектроніки
8. Електромагнітна хвиля
9. Спектр ЕМХ
10. Показник заломлення середовища
11. Класифікація оптоелектронних пристроїв
12. Переваги оптоелектронних пристроїв
13. Недоліки оптоелектронних пристроїв



## Мікроелектроніка. Характеристики чіпа

---

**Мікроелектроніка** - галузь електроніки, що об'єднує комплекс фізичних, радіотехнічних і технологічних компонентів та процесів, спрямованих на створення пристроїв обробки, зберігання та передачі інформації.

**Основа** – твердотільні мікросхеми, створювані на окремому кристалі - чіпі, як правило, кремнієвому.

**Інтегральна схема (ІС)** - сукупність дискретних елементів, взаємодіючих між собою через з'єднання.


Для кожного функціонального елемента ІС на чіпі можна виділити відмежовану за своїми характеристиками область простору.

---

### Параметри елементів ІС

- $N$  - число активних елементів на чіпі;
  - $\tau$  - час перемикання елемента між двома електричними (логічними) станами під дією сигналу;
  - $\nu = 1/\tau$  - тактова частота;
  - $N\nu$  - функціональна швидкодія (ФБ) схеми;
  - $P$  - потужність, що розсіюється в процесі перемикання елемента;
  - $P\tau$  - показник якості елемента, що визначає кількість енергії, що розсіюється елементом в одиничному акті перемикання;
  - $d$  - характерний розмір активної області елемента (довжина каналу, ширина бази), який визначається роздільною здатністю технологічного процесу (мінімальною шириною дискретного елемента на чіпі)
- 

### Основні характеристики ІС з точки зору кінцевого споживача:

- вартість біта інформації (С) або вартість одного елемента чіпа
  - надійність роботи ІС- ймовірність відмови елемента чіпа.
- 
- 

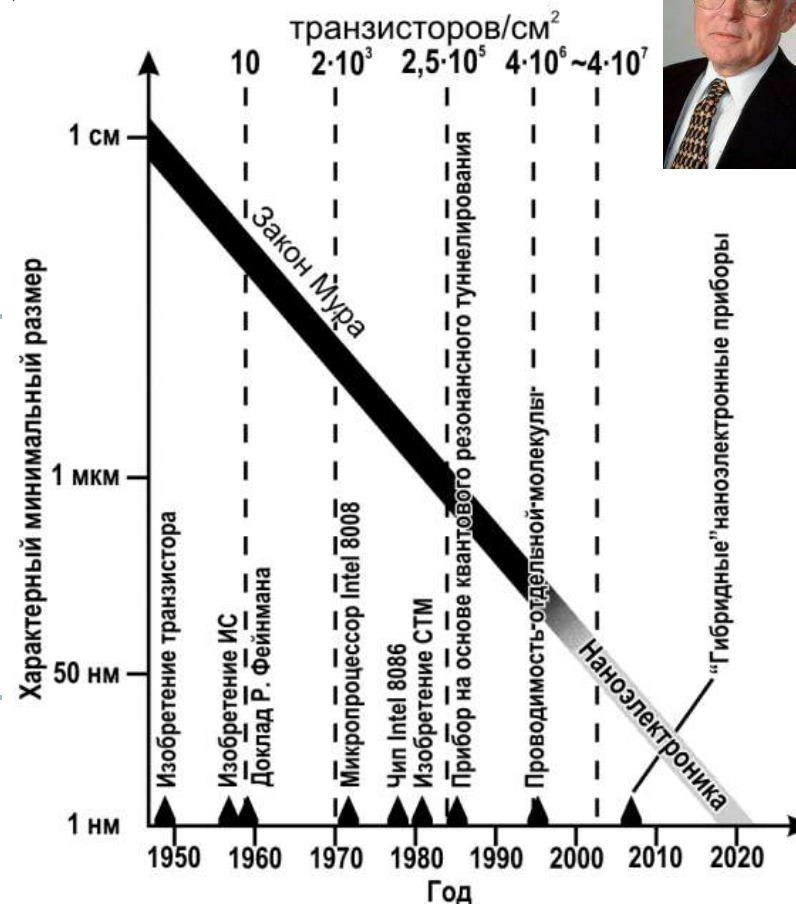
## Мікроелектроніка. Характеристики чіпа - сучасний стан

### Параметри елементів ІС (2014 рік)

- мінімальний характерний розмір елемента ІС - 20-30 нанометрів;
- більше  $10^8$  транзисторів/см<sup>2</sup> для логічних ІС;
- більше  $10^{10}$  біт/см<sup>2</sup> для ІС пам'яті;
- вартість менша ніж  $2,7 \cdot 10^{-7}$  долар/транзистор для логічних ІС;
- вартість менша ніж  $7 \cdot 10^{-9}$  долар/біт для ІС пам'яті;
- робоча частота - близько 13 ГГц;
- розсіювана потужність – менша  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Вт/транзистор

З початку сімдесятих років розвиток мікроелектроніки відбувається відповідно до **закону Мура** – продуктивність ІС подвоюється кожні 18 місяців. Збільшення досягається за рахунок:

- зменшення характерних розмірів елементів,
- оптимізації та вдосконалення існуючих і впровадження нових технологій.



### Проблеми з якими треба боротися

- фізичні квантові ефекти
- особливості поведінки системи при малих струмах
- підвищення розсіюваної потужності,
- ускладнення схемотехнічних рішень
- тунельні струми

## Нові перспективи

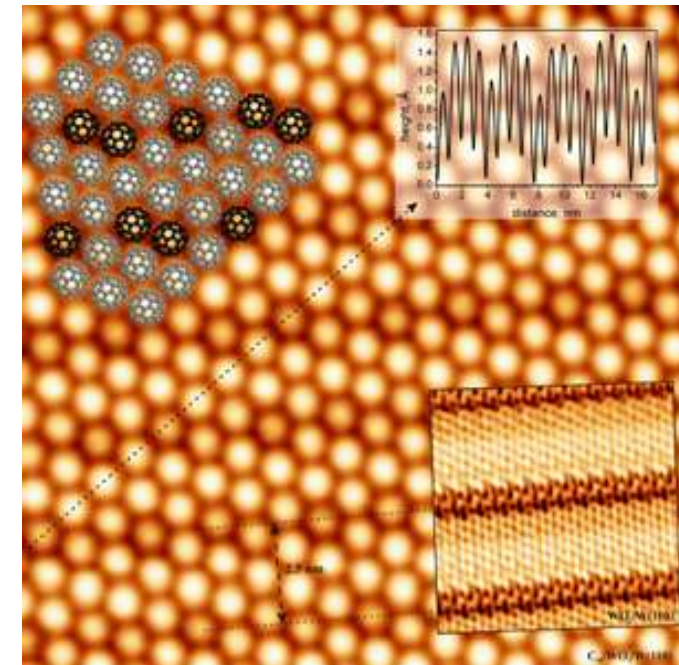
Використання нових фізичних ефектів, що проявляються як результат розмірного квантування носіїв заряду в елементах ІС нанометрових розмірів.

## Для досягнення високого ступеня інтеграції необхідно:

- вміти створювати елементи нанорозмірів;
- забезпечити функціонування кожного окремого елемента без неконтрольованого впливу на інші ;
- забезпечити узгоджене функціонування всіх елементів в складі ІС.

## Можливі обмеження на розміри елементів

1. Фізичні обмеження, що виникають в технології виробництва ІС  
(обмеження, пов'язані з розсіюванням експонуючого променя при літографії, флуктуації легуючих домішок, однорідність і мінімальні розміри при використанні пучкових технологій)
2. Фізичні обмеження функціональності окремих елементів чіпа (обмеження, обумовлені змиканням р-п переходів, пробоем надтонких діелектричних шарів, розігрівом носіїв).
3. Фізичні обмеження на ступінь інтеграції N елементів і розміри елементів, пов'язані із взаємодією між собою.

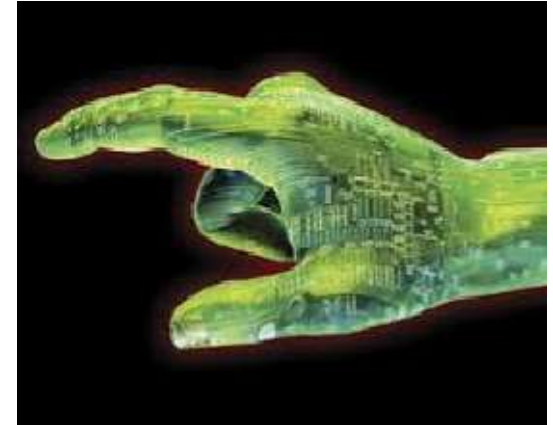


### Основна ідея

Носієм інформації служить не електричний струм, а багатовимірний сигнал різної природи (електромагнітні хвилі, акустичні хвилі, спінові хвилі).

Роль **топології схеми** виконують **динамічні** неоднорідності середовища, які формуються керуючим сигналом: пружні хвилі, магнітні домени, зарядові пакети.

Переміщення й перетворення цих неоднорідностей дозволяє здійснювати **запис та обробку інформації**.



### Напрямки функціональної електроніки

**оптоелектроніка,**

акустоелектроніка,

магнітоелектроніка,

молекулярна електроніка

### Функції пристроїв функціональної електроніки:

передача,

перетворення,

збереження **інформації**.

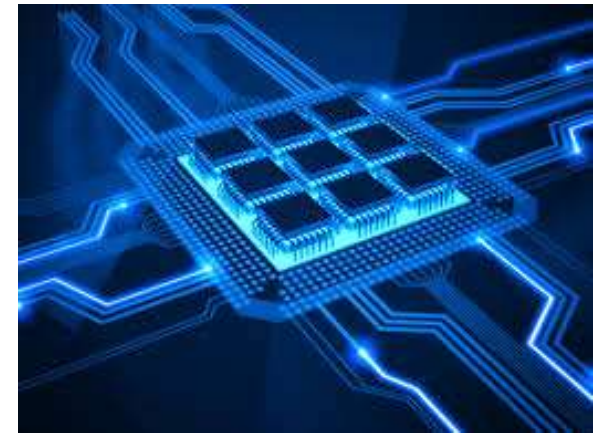
### Основні переваги пристроїв функціональної електроніки:

В ряді випадків простіша конструкція порівняно з ІС,

**Можливість паралельної обробки двох- та тримірних масивів інформації**



**Оптоелектроніка** – один із напрямків ФЕ, вивчає фізичні принципи управління оптичними і електронними процесами в різних фізичних середовищах з метою передачі, прийому, обробки, зберігання і відображення інформації.



**Основний напрям оптоелектроніки** – управління інформаційними процесами в мікро- і наноструктурах при інтеграції джерел, приймачів і елементів управління випромінюванням в єдиному кристалі або гібридній структурі.

**Основоположний принцип оптоелектроніки** – використання в якості матеріального носія інформації разом з електроном електрично **нейтрального фотона**. На відміну від звичайної електроніки і оптики в оптоелектроніці можлива **зміна носія** інформації в процесі обробки сигналу.

**Взаємодія між фотонами, атомами і електронами, відбувається шляхом поглинання і випромінювання фотонів.**

**Електрон-фотонне перетворення** базується на випромінюванні квантів світла атомними системами під час переходу їх із збуджених станів в стани з нижчою енергією.

**Фотон-електронне перетворення** базується на явищах зовнішнього та внутрішнього фотоефекту

**Когерентна оптоелектроніка** – носієм інформації є когерентне лазерне випромінювання; використовує для передачі сигналу з певними частотою, фазою, амплітудою й поляризацією світлової хвилі; Швидкість передачі й обробки інформації –  $10^{10}$  біт/с.

**Некогерентна оптоелектроніка** – когерентність світлових хвиль не використовується; оптичний канал застосовується як засіб розв'язки, дистанційного управління, захисту від перешкод при передачі інформації.





## Переваги оптоелектроніки

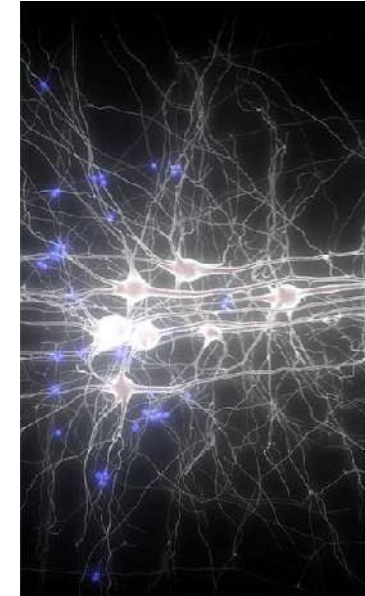
Можливість паралельної обробки великих масивів інформації з виконанням математичних операцій додавання, множення, інтегрування

Розширення можливостей систем обробки і передачі інформації.

Частота оптичних коливань ( $3 \cdot 10^{14}$  Гц при довжині хвилі 1 мкм) забезпечує можливість одночасної передачі інформації по багатьох каналах (ріст пропускної здатності в  $10^3$ - $10^4$  разів порівняно з радіодіапазоном).

Мала довжина хвилі дозволяє досягнути високої густини запису інформації – мінімальна площа піта в оптичних системах пам'яті має величину порядку  $\lambda^2$

Можливість використання двомірних некогерентних і тривимірних когерентних оптичних сигналів. Приклад : подвійна (часова і просторова) модуляція потоку, що забезпечує високу інформаційну місткість оптичних сигналів і можливість паралельної обробки великих масивів інформації без поелементного розкладання в часі.



Мозок людини містить близько  $10^{12}$  нервових з'єднань, місткість пам'яті людського мозку близько  $10^{13}$  біт. Передача інформації по нервових волокнах відбувається за рахунок біохімічних реакцій, швидкість до  $10^2$  м/с.

В електронних схемах сигнал розповсюджується з швидкістю близько  $10^8$  м/с.

Але

Людина конкурує комп'ютерами при грі в шахи.

Порівняно повільне розповсюдження сигналу по нервовому волокну компенсується одночасною роботою близько  $10^4$ - $10^5$  волокон.

Літо 2016

Моделювання 1 Секунди  
нейронної активності на  
суперкомп'ютері з потужністю  
30 петафлопс тривало 20 хв.

82 944 процесори і  
1 петабайт оперативної пам'яті  
(24 байта на синапс)



# Електромагнітна хвиля

**Електромагнітні хвилі** - поперечні хвилі в яких відбуваються коливання (зміна з часом в просторі) взаємопороджуваних електричного та магнітного полів

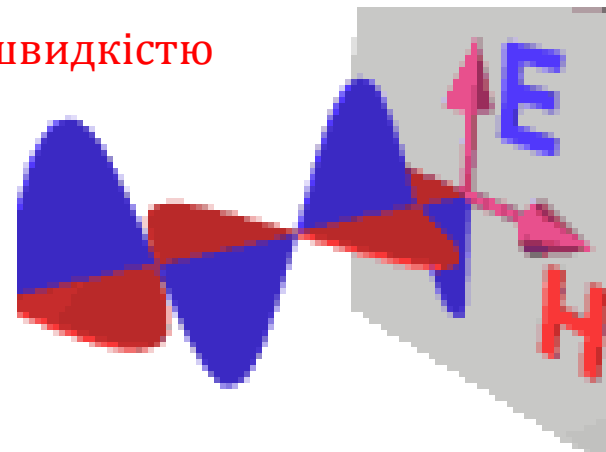
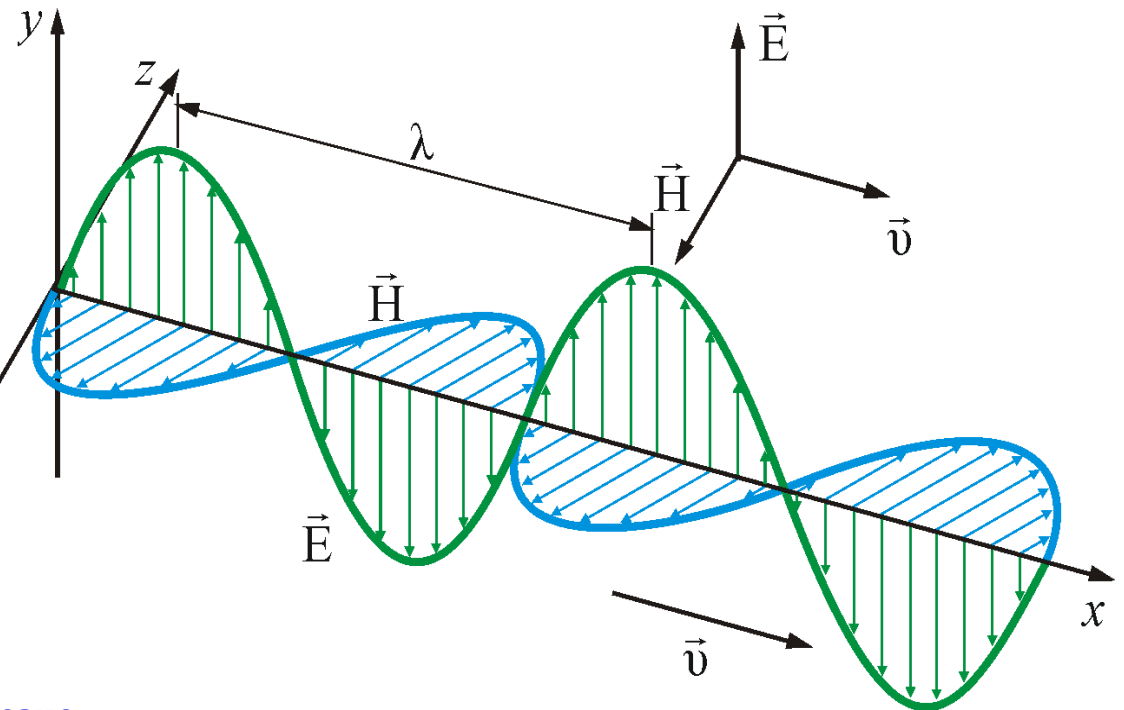
## Властивості

У будь-якій точці простору **вектори напруженості електричного і магнітного полів взаємно перпендикулярні** і перпендикулярні до напрямку розповсюдження і одночасно набувають масимальних та мінімальних значень

Поля змінюють свій напрямок у просторі з часом  
Електрична і магнітна складові змінюються синфазно

**Будь-які ЕМХ у вакуумі поширюються з однаковою швидкістю**

$$\tilde{n} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \tilde{n}^{-1}$$
$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$
$$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}$$
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



## Спектр ЕМХ

Довжина	Назва	Частота
більше 100 км	Низькочастотні коливання	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радіохвилі	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	Кілометрові (дуже низькі частоти)	3 – 3-кГц
10 – 1 км	Кілометрові (низькі частоти)	30 – 300 кГц
1 км – 100 м	Гектометрові (середні частоти)	300 кГц – 3 МГц
100 – 10 м	декаметрові (високі частоти)	3 – 30 МГц
10 – 1 м	метрові (дуже високі частоти)	30 – 300 МГц
1 м – 10 см	дециметрові (ультрависокі)	300 МГц – 3 ГГц
10 – 1 см	сантиметрові (надвисокі)	3 – 30 ГГц
1 см – 1 мм	міліметрові (супервисокі)	30 – 300 ГГц
1 – 0.1 мм	дециміліметрові (гіпервисокі)	300 ГГц – 3 ТГц
2 мм – 760 нм	Інфрачервоне випромінювання	150 ГГц – 400 ТГц
760 – 380 нм	Видиме випромінювання (оптичний спектр)	400 - 800 ТГц
380 – 3 нм	Ультрафіолетове випромінювання	800 ТГц – 100 ПГц
10 нм – 1 пм	Рентгенівське випромінювання	30 ПГц – 300 ЭГц
<10 пм	Гамма-випромінювання	>30 ЭГц

## Показник заломлення середовища

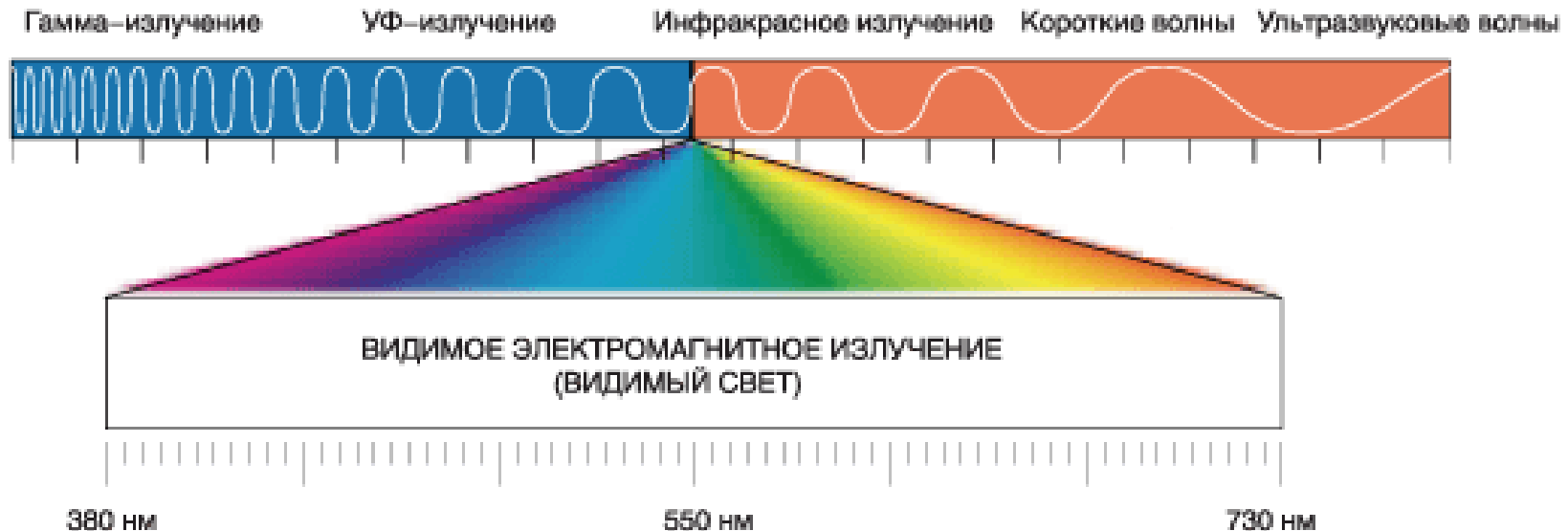
У речовині швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль зменшується в  $n$  разів.

Показник заломлення  $n$  - фізична величина, рівна відношенню швидкості електромагнітних хвиль у вакуумі до їх швидкості в середовищі.

$$n = \frac{c}{v}$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у речовині залежить від електричної та магнітної проникності цієї речовини.

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



## Класифікація оптоелектронних пристроїв

**Квантова електроніка** - область фізики, що досліджує взаємодію електромагнітного випромінювання з електронами, що входять до складу атомів, молекул, твердих тіл і створює на основі цих дослі  $\rightarrow$  джень квантові пристрої різних діапазонів довжин хвиль і різних призначень.

**Оптоелектроніка** - це напрям науки і техніки, що об'єднав в собі можливості оптики та електроніки.

**Оптоелектронний пристрій** - елемент або вузол, вживаний в оптоелектронній апаратурі.

### Класифікація оптоелектронних приладів по виконуваних функціях

<b>Джерела світла</b>	світлодіод, напівпровідниковий лазер, газовий лазер, твердотільний лазер
<b>Приймачі світла</b>	фоторезистор, фотодіод (сонячна батарея), фототранзистор, лавинний фотодіод, фотоелемент, фотопомножувач
<b>Оптичні хвилеводи</b>	волоконно-оптичний світловід, плівковий світловід, хвилевідна лінза
<b>Оптична пам'ять</b>	Пристрої на основі фотоплівки, фотохромних матеріалів, термопластиків, аморфних напівпровідників
<b>Функціональні прилади</b>	Перетворювач некогерентного випромінювання в когерентне, оптичний бістабільний елемент, оптичний вентиль, оптрон
<b>Модулятори і дефлектори</b>	Система дзеркал, електрооптичні модулятори, магнітооптичні модулятори, Акустооптичні модулятори, волоконно-оптичні розгалужувачі і фільтри
<b>Дисплеї</b>	Світлодіодний, електролюмінесцентний, рідкокристалічний, плазмовий



## Переваги оптоелектронних пристроїв

---

Основні переваги оптоелектронних приладів (ОЕП) обумовлені особливостями електромагнітних хвиль оптичного діапазону та властивостями фотона, як носія інформації.

1. **Висока частота** оптичних коливань ( в  $10^3 - 10^5$  разів більше ніж у радіодіапазоні , що дозволяє значно збільшити пропускну здатність систем зв'язку).
2. **Фокусування** . Теоретично допускається можливість фокусування в точку з розмірами  $\approx \lambda / 2$  . Ця величина визначає щільність запису оптичної інформації  $10^9 - 10^{10}$  біт/см<sup>2</sup> .
3. **Відсутність електричного зв'язку між окремими вузлами** і блоками пристрою , завдяки електричній нейтральності фотонів , як носіїв оптичної інформації .
4. **Односпрямованість** потоку інформації і відсутність зворотного зв'язку між передавачем і приймачем.
5. **Візуалізація** . Перетворення електричних сигналів у візуальну форму , зручну для сприйняття.
6. **Фоточутливість** . Ця властивість ОЕП дає можливість перетворювати оптичні сигнали в електричні , а також оптичні сигнали різних областей спектру в видимий діапазон ( ультрафіолетове і інфрачервоне випромінювання).
7. **Просторова модуляція** . Можливість модулювати потік фотона не тільки в часі , але й у просторі, що дозволяє проводити паралельну обробку інформації.



## Недоліки оптоелектронних пристроїв

---

1. **Низький ККД**. На сьогоднішній день ККД ЕОП не перевищує 10 - 20 % (за винятком лазерів, їх ККД становить до 70 %). В складних ОЕ системах, де відбувається багаторазове перетворення оптичного і електричного сигналів, ККД падає до 1%.
2. **Гібридність**. У складних ОЕ системах, де прилади виготовлені з великого числа різнорідних матеріалів, присутні втрати через поглинання і розсіювання на межах розділу оптичних середовищ. Це призводить до додаткового падіння ККД.
3. **Необхідність точного налаштування оптичних елементів**, їх чутливість до механічних і теплових впливів визначає складність виробництва і відносно велику вартість виробів.
4. **Деградація ОЕП**. При впливі зовнішніх факторів і при тривалій експлуатації відбувається погіршення параметрів та ефективності приладу, що веде до незворотного порушення оптичних властивостей.



## Лекція 2

---

### Джерела світла I.

1. Теплове випромінювання.
2. Закони теплового випромінювання
3. Закони теплового випромінювання
4. Постулати Бора
5. Люмінесценція
6. Зонна структура
7. Електронний спектр твердого тіла.
8. Трансляційна симетрія.
9. Напівпровідники
10. Електрони і дірки. Ефективна маса.  
Анізотропія ефективної маси
  1. Метали і напівпровідники
  2. Енергія Фермі
  3. Концентрація носіїв заряду
  4. Концентрація електронів і дірок у власному напівпровіднику
  5. Концентрація електронів і дірок в домішковому напівпровіднику
  6.  $p$ - $n$  -перехід
  7. Інжекційна люмінесценція в напівпровідниках





## Теплове випромінювання.

### Теплове випромінювання –

електромагнітне випромінювання тіла, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги з навколишнім середовищем, здійснюється всіма тілами при будь-яких температурах  $T$  відмінних від абсолютного нуля.

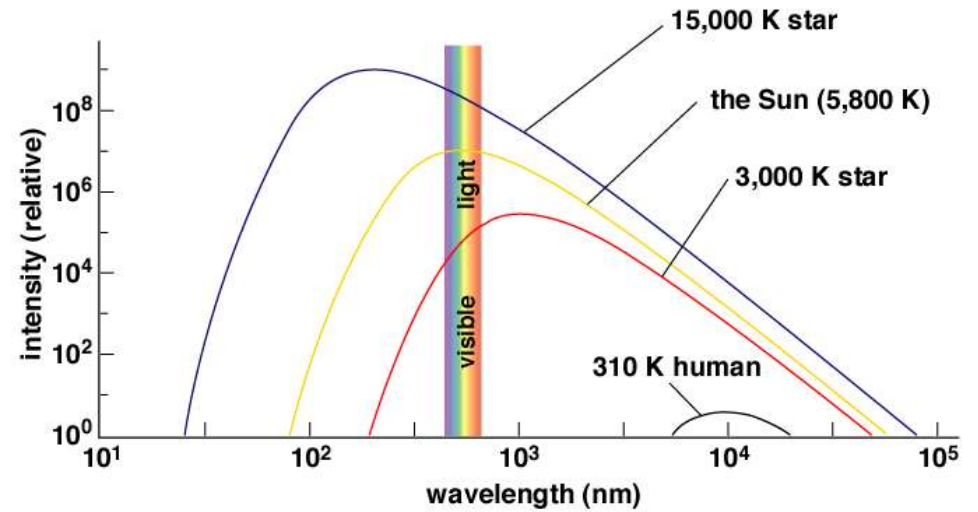
Енергія кванта випромінювання  $E = h\nu = \hbar\omega$

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$\hbar = h/2\pi$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

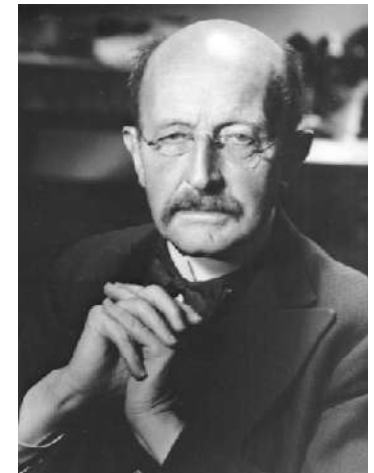
$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$



Випромінююча здатність абсолютно чорного тіла

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Формула Планка



## Закони теплового випромінювання

**Закон Кірхгофа** визначає співвідношення між випромінюючою і поглинальною здатностями тіл: *відношення випромінюючої і поглинальної здатностей тіла не залежить від природи тіла і є універсальною для всіх тіл функцією частоти і температури.*

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$

### Закон Стефана-Больцмана

*Випромінююча здатність АЧТ пропорційна четвертому степеню термодинамічної температури*

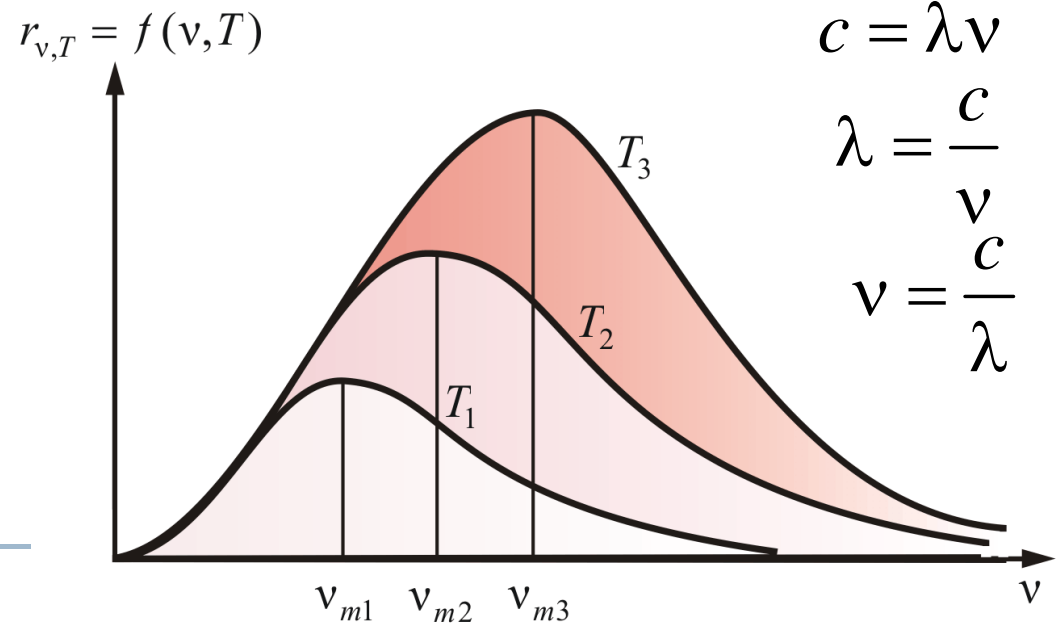
$$R = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ \AA} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

*стала Стефана-Больцмана*

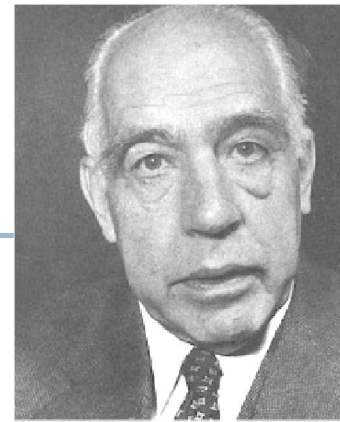
### Закон зміщення Віна

*Довжина хвилі  $\lambda_{\max}$  при якій випромінювальна здатність АЧТ максимальна обернено пропорційна температурі тіла*



$$\lambda_{\max} = b/T \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

*стала Віна*



## Постулати Бора

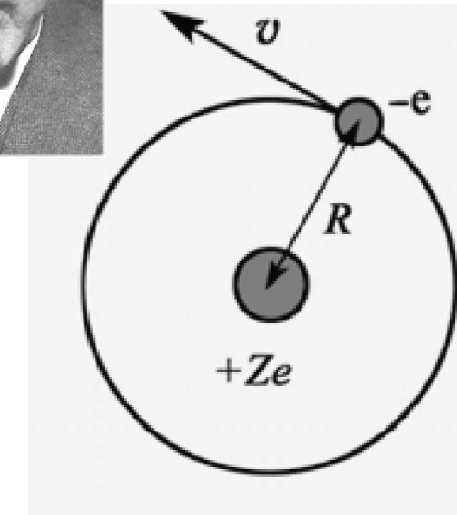
1. Електрони рухаються тільки по певних (стаціонарних) орбітах. При цьому не відбувається випромінювання ЕМХ.

**Умова для стаціонарних орбіт:**

з усіх орбіт електрона можливі тільки ті, для яких момент імпульсу електрона, дорівнює цілому кратному постійної Планка:

$$m_e v r = n \hbar$$

$n = 1, 2, 3, \dots$  головне квантове число

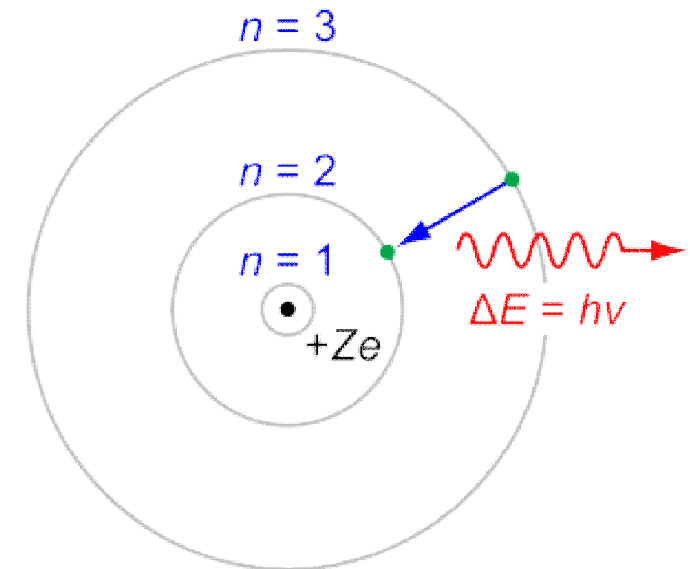
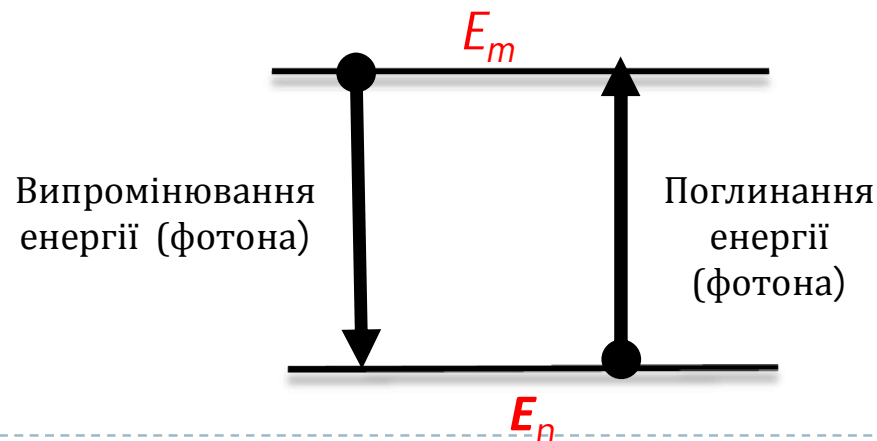


2. Випромінювання або поглинання енергії у вигляді кванта енергії  $h\nu$  відбувається *лише при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший*.

**Енергія кванта** дорівнює **різниці енергій тих стаціонарних станів**, між якими відбувається квантовий стрибок електрона  
 $m, n$  – номери станів.

$$h\nu = E_m - E_n$$

Правило частот Бора



## Люмінісценція

**Люмінісценція** - це випромінювання надлишкове над тепловим випромінюванням тіла при даній температурі, люмінесценція продовжується після припинення надходження енергії ззовні протягом часу, що перевищує період коливань вектора напруженості електричного поля ЕМХ.

Для збудження люмінесценції енергія повинна підводитися до тіла нетепловим способом.

За способом збудження виділяють **види люмінесценції**.

1. Фотолюмінесценція – світіння речовини під дією оптичного випромінювання видимого або ультрафіолетового).

**1. Електролюмінесценція** - світіння під дією електричного поля (пов'язана з протіканням через речовину електричного струму).

2. Катодолюмінесценція - світіння речовини при бомбардуванні пучком швидких електронів.

3. Радіолюмінесценція - світіння речовин під дією продуктів радіоактивного розпаду ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - частинок).

В оптоелектроніці найчастіше використовується електролюмінесценція твердих тіл.



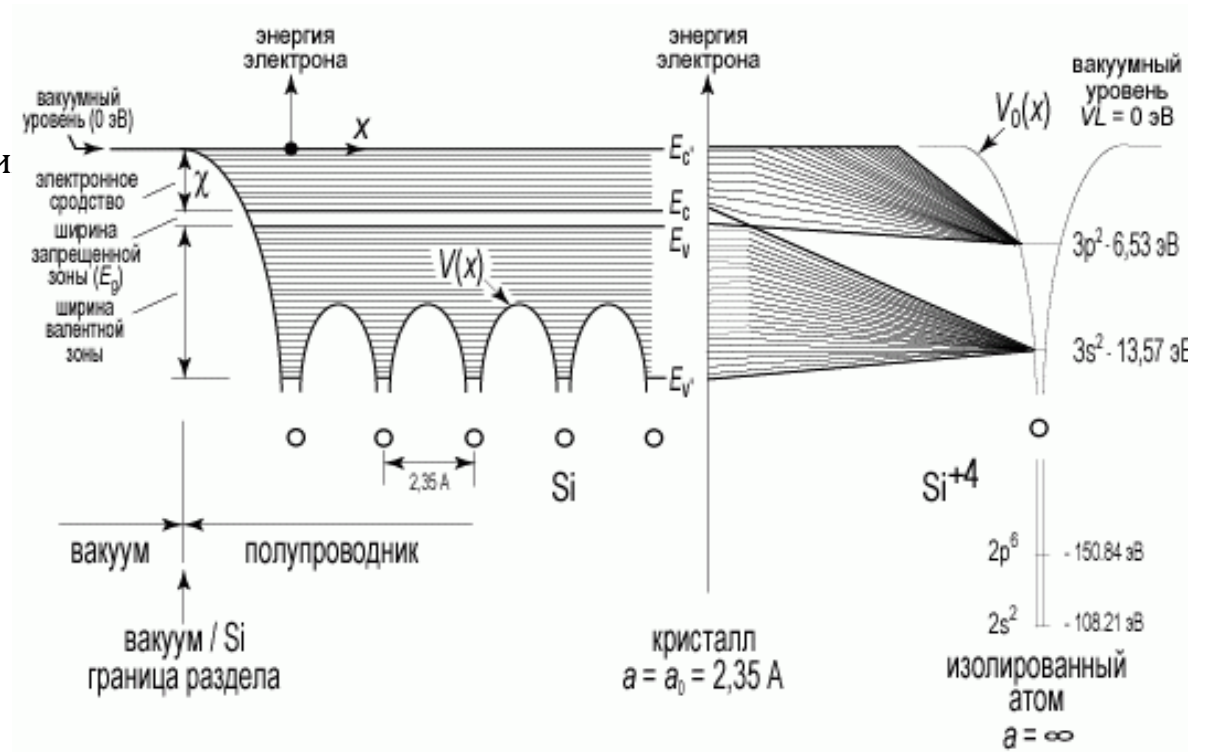
## Зонна структура

Згідно постулатів Бора енергетичні рівні електронів в **ізолюваному** атомі мають **дискретні** значення.

**Тверде тіло** – система окремих атомів об'єднани в періодичну кристалічну ґратку.

*Якщо тверде тіло складається з  $N$  атомів, то енергетичні рівні виявляються  $N$ -кратно виродженими.*

**Вироджені електронні рівні** — рівні, які мають однакову енергію, хоча відповідають різним станам системи. Кількість рівнів із однаковою енергією називається **кратністю виродження**.



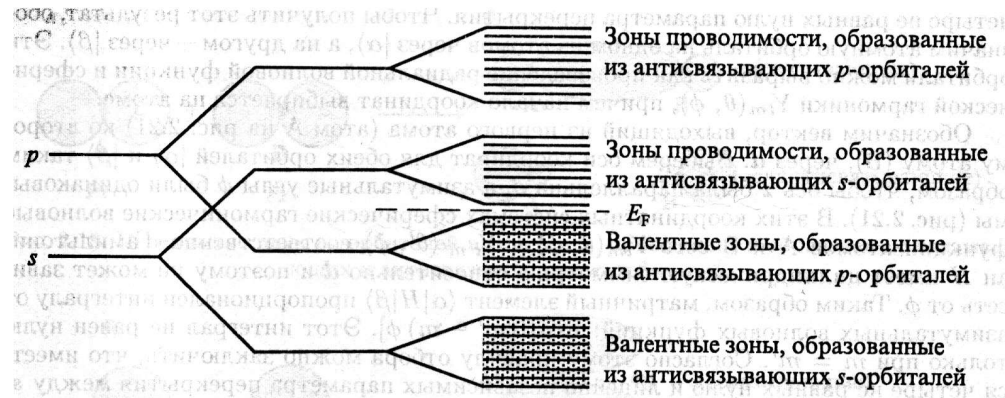
**Електричне поле ядер знімає виродження.**

Дискретні моноенергетичні рівні атомів, що формують тверде тіло, розщеплюються в **енергетичні зони**.

Дозволені й заборонені стани для електронів чергуються і число станів для електронів в дозволених зонах дорівнює кількості атомів, тобто розподіл енергетичних рівнів усередині дозволених зон є квазінеперервним.

# Електронний спектр твердого тіла.

## 1. Розщеплення атомних рівнів в зони



Еволюція атомних орбіталей приводить до утворення зони провідності і валентної зони в напівпровіднику

## 2. Квантово-механічна задача багатьох тіл

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_j \frac{P_j^2}{2M_j} + \frac{1}{2} \sum_{jj'} \frac{Z_j Z_{j'} \cdot e^2}{|R_j - R_{j'}|} - \sum_{ij} \frac{Z_j \cdot e^2}{|r_i - R_j|} + \frac{1}{2} \sum_{ii'} \frac{e^2}{|r_i - r_{i'}|}$$

Гамільтоніан кристалу

Наближення Борна-Оппенгеймера або адіабатичне наближення – частота коливань іонів  $10^{13}$  Гц, частота коливань електронів  $10^{15}$  Гц.

$$H = H_{ions}(R_j) + H_e(r_i, R_{j0}) + H_{e-ions}(r_i, \delta R_j)$$

Одноелектронне наближення - рівняння Шредінгера

$$H_{1e} \Psi_n(r) = \left( \frac{p^2}{2m} + V(r) \right) \Psi_n(r) = E_n \Psi_n(r)$$

$V(r)$ -періодична функція

# Трансляційна симетрія

$$\hat{H}_{1e} \psi_n(\mathbf{r}) = \left( \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \right) \psi_n(\mathbf{r}) = E_n \psi_n(\mathbf{r})$$

Розв'язок шукаємо у вигляді Блохівських функцій

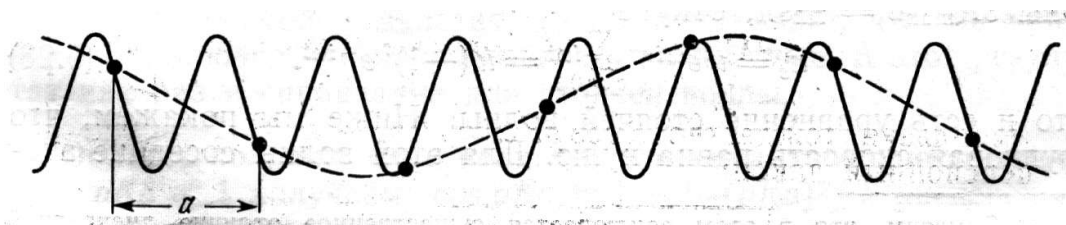
$$f(\vec{r} + \vec{a}) = f(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi}, \psi(\vec{r}) = U(\mathbf{r}) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

$U(\mathbf{r})$ -періодична функція з тою ж точковою симетрією, що і  $V(\mathbf{r})$ .

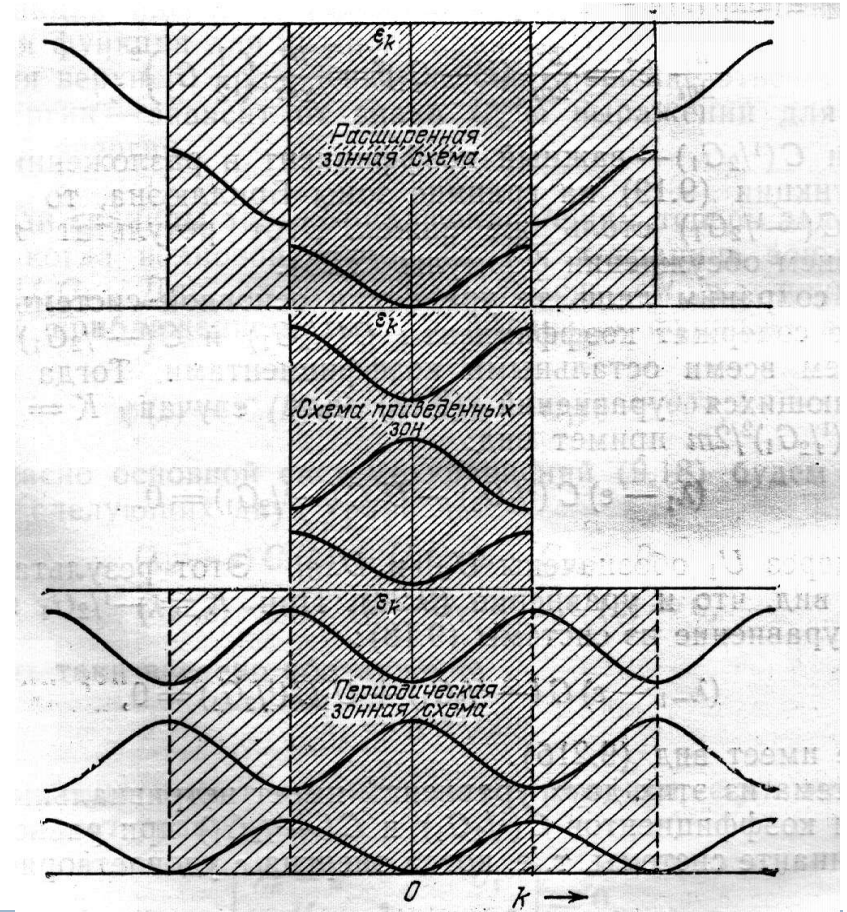
$\psi(\mathbf{r})$ - хвиля з хвильовим вектором  $\mathbf{k}$ .

**Обернений простір**  
(Простір хвильових векторів)

Хвильовий вектор визначений з точністю до вектора оберненої ґратки, тому вводиться поняття **квазіімпульсу**



Майже вільні електрони



## Напівпровідники

Для того, щоб використовувати для опису руху електронів і дірок у напівпровідниках класичні уявлення, вводяться поняття **ефективних мас** електрона і дірки  $m_n^*$  і  $m_p^*$ .

Рівняння  $a = F/m^*$ , або  $dp/dt = F$  будуть справедливі, якщо замість маси вільного електрона (електрона у вакуумі)  $m_0$  в них підставити ефективну масу електрона  $m_n^*$  ( $p = m_n^* \cdot v$ ).

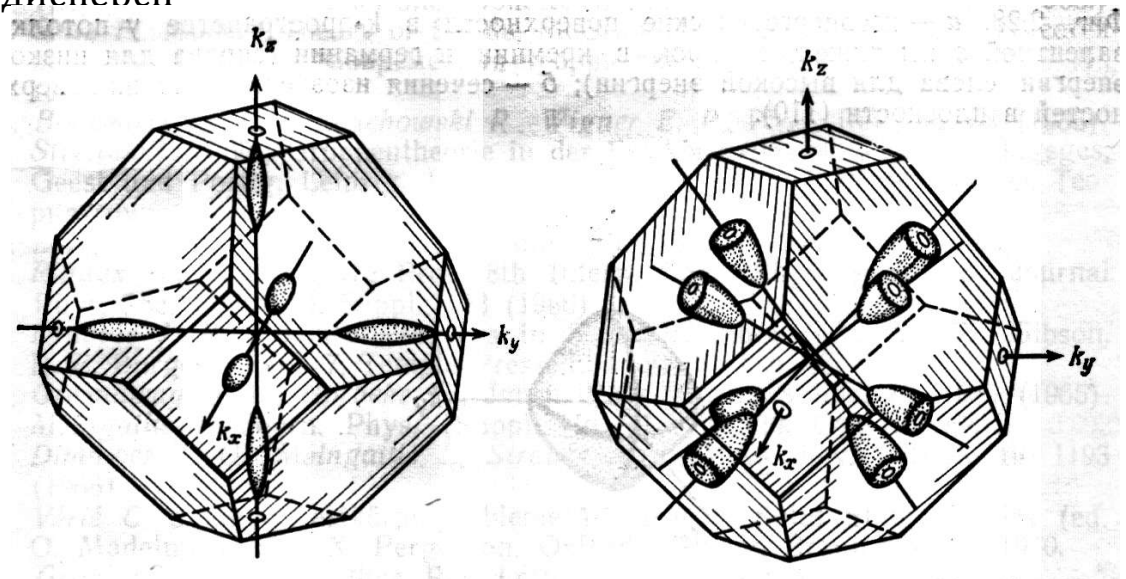
Ефективна маса враховує вплив періодичного потенціалу атомів в кристалі напівпровідника на рух електронів і дірок і визначається рівняннями дисперсії

$$\Delta E = \frac{(\Delta k)^2}{2m_{eff}}$$

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{q}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2\epsilon}{dk^2} \vec{E}$$

$\epsilon(k)$  - **закон дисперсії** - залежність енергії від хвильового вектора (довжини хвилі )



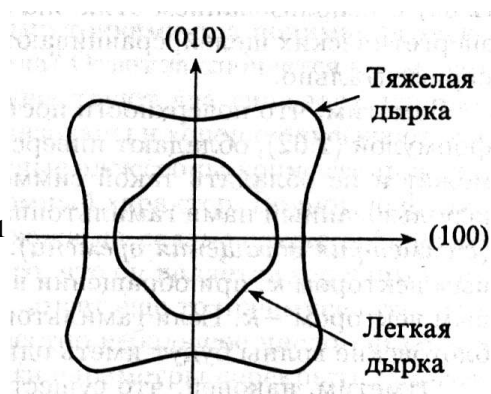
Ізоенергетичні поверхні в К-просторі біля дна зони провідності в **кремнії** (ліворуч) і **германії** (праворуч)



## Електрони і дірки. Ефективна маса. Анізотропія ефективної маси

$$m^* = \hbar^2 \cdot \left[ \frac{d^2 \epsilon}{dk^2} \right]^{-1}$$

$$m_{i,j} = \left( \frac{\partial \epsilon(p)}{\partial p_i \partial p_j} \Big|_{p=p_0} \right)^{-1}$$

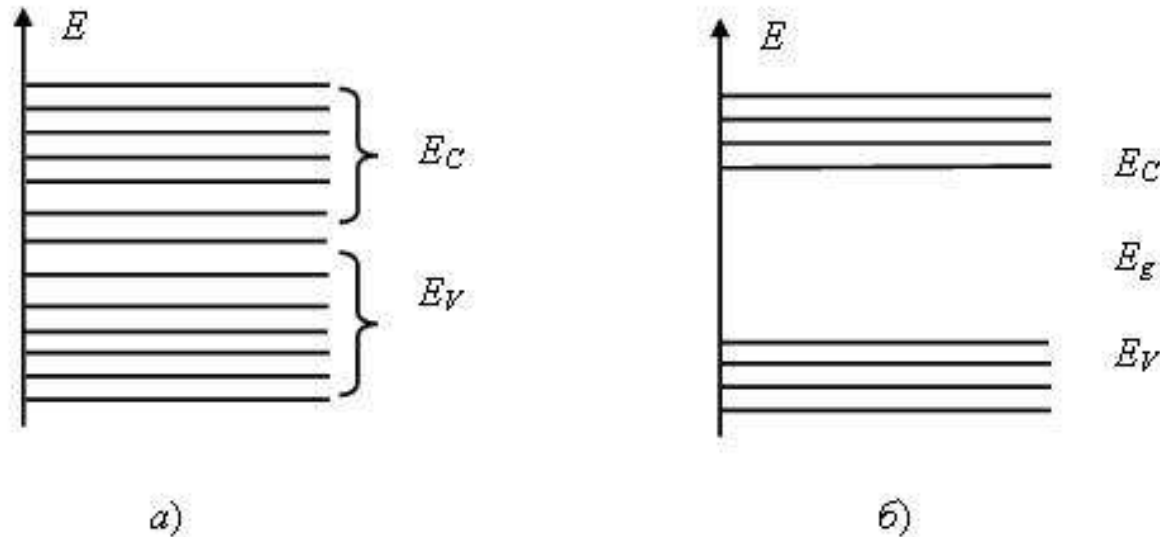


$\epsilon(k)$  -закон дисперсії - залежність енергії від хвильового вектора (довжини хвилі )

$$\Delta E = \frac{(\Delta k)^2}{2m_{eff}}$$

Матеріал	Ефективна маса електронів	Ефективна маса дірок
	<b>Група IV</b>	
Si (4.2K)	$1.08 m_e$	$0.56 m_e$
Ge	$0.55 m_e$	$0.37 m_e$
	<b>Група III-V</b>	
GaAs	$0.067 m_e$	$0.45 m_e$
InSb	$0.013 m_e$	$0.6 m_e$
	<b>Група II-VI</b>	
ZnSe	$0.17 m_e$	$1.44 m_e$
ZnO	$0.19 m_e$	$1.44 m_e$

## Метали і напівпровідники



Зонна енергетична структура **Металу** (провідника) (а) і **Напівпровідника** (б)

У металах провідність  $\sigma$  пов'язує густину струму  $j$  [А/м<sup>2</sup>] з напруженістю електричного поля  $E$  [В/м] у вигляді

$$j = \sigma E.$$

*закон Ома в диференціальній формі*

При кімнатній температурі більшість **металів** має електропровідність  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  [Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>]. Провідність **діелектриків** (ізоляторів) становить величину порядку  $10^{-16}$  [Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>].

## Енергія Фермі

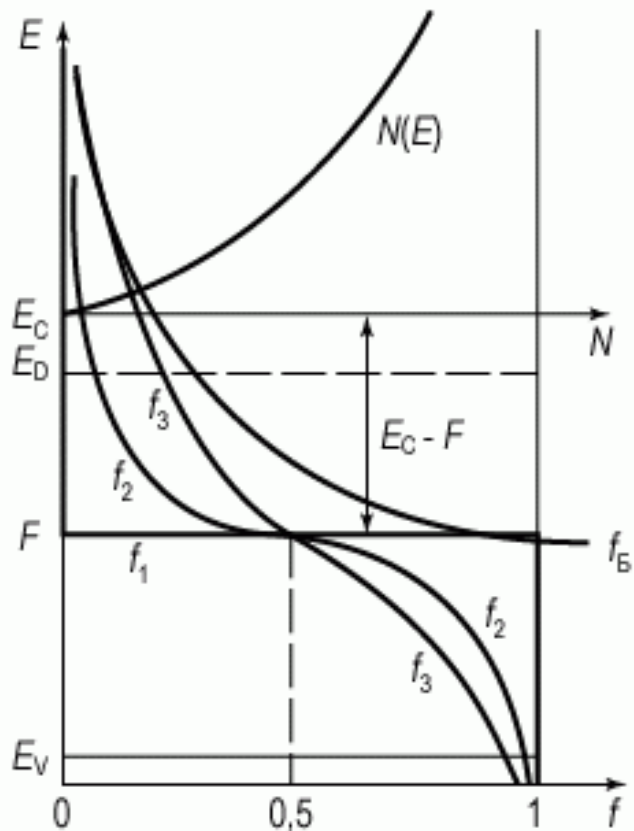
Електрони, як частинки, що володіють **півцілим спіном** ( $1/2, 3/2, 5/2$ ), підкоряються статистиці **Фермі-Дірака**.

Імовірність того, що електрон буде знаходитися в квантовому стані з енергією  $E$ , виражається **функцією Фермі-Дірака**:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$$

$F$  – енергія (рівень) Фермі.

**Рівень Фермі** – енергія такого квантового стану, ймовірність заповнення якого дорівнює  $1/2$ .



$$E - F > kT \longrightarrow f(E, T) = \exp\left(-\frac{(E - F)}{kT}\right)$$

розподіл Максвелла – Больцмана  
для електронів

## Концентрація носіїв заряду

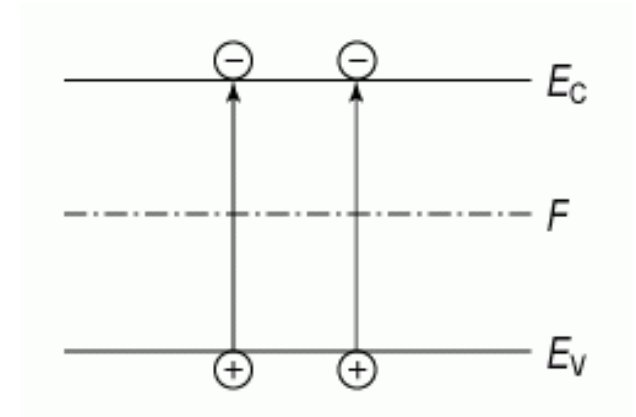
Концентрація дірок у валентній зоні  $p = N_V \exp\left[\frac{E_V - F}{kT}\right]$

$$E_g = E_C - E_V$$

Концентрація електронів в зоні провідності  $n = N_C \exp\left[\frac{F - E_C}{kT}\right]$



$$np = (n_i)^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right]$$



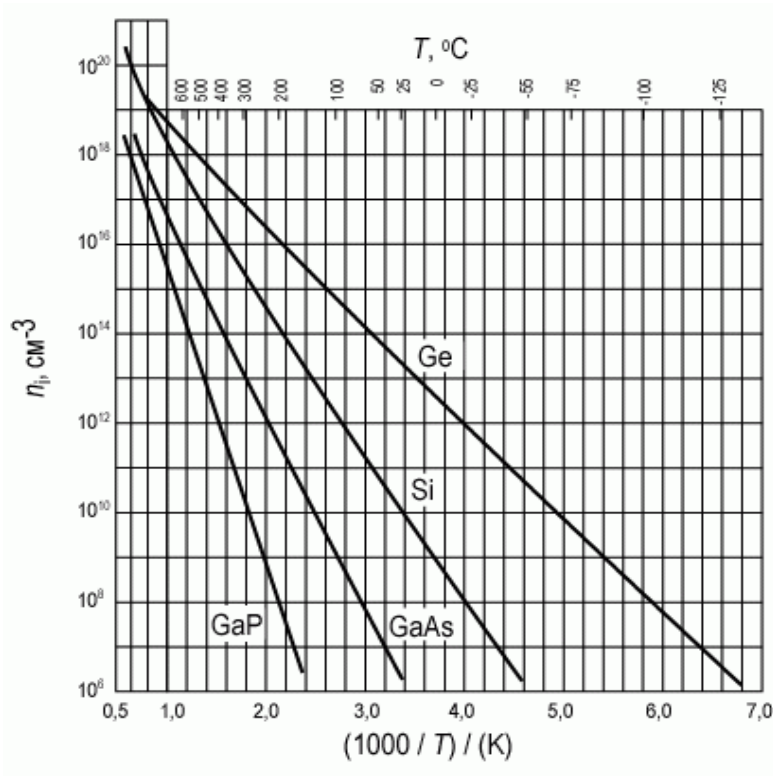
рівняння використовується для розрахунку  $p$  при відомому  $n$  або, навпаки, для розрахунку  $n$  при відомому  $p$ .

Величина  $n_i$  – *концентрація носіїв у власному напівпровіднику*  
(при певних температурах для певних напівпровідників стала величина )

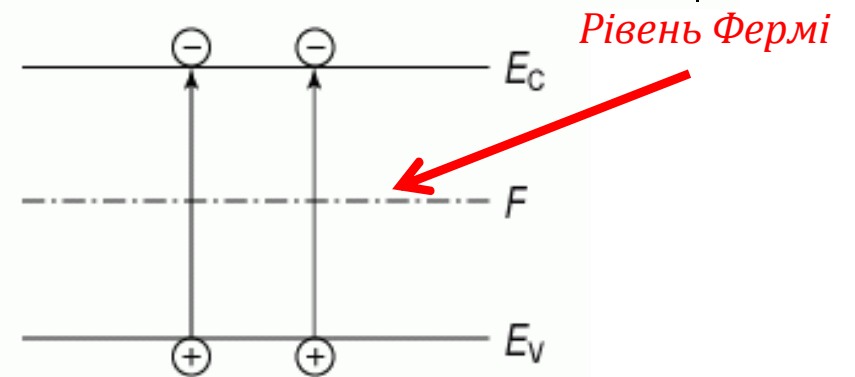
## Концентрація електронів і дірок у власному напівпровіднику

Напівпровідник називається *власним*, якщо в ньому відсутні донорні та акцепторні домішки. Електрони з'являються в зоні провідності за рахунок теплового переходу з валентної зони, тому  $n = p$

Концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику



$$n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

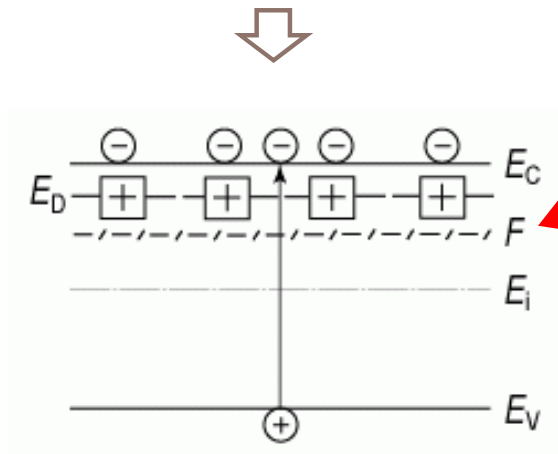


Концентрація власних носіїв визначається температурою та шириною забороненої зони напівпровідника

## Концентрація електронів і дірок в домішковому напівпровіднику

Нехай напівпровідник легований **донорами** з концентрацією  $N_D$ .

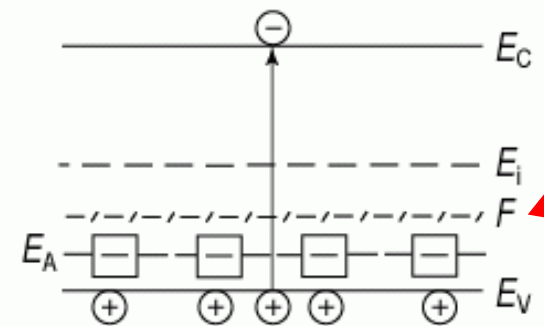
При кімнатній температурі всі донори іонізовані (енергія активації - онізації 0,01-0,05 eV).



Зонна діаграма напівпровідника n-типу

$$n = N_D \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

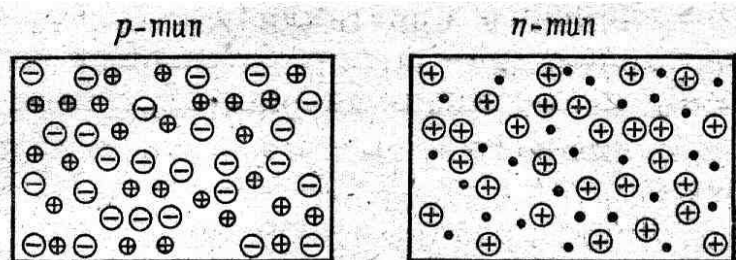
Для акцепторного напівпровідника



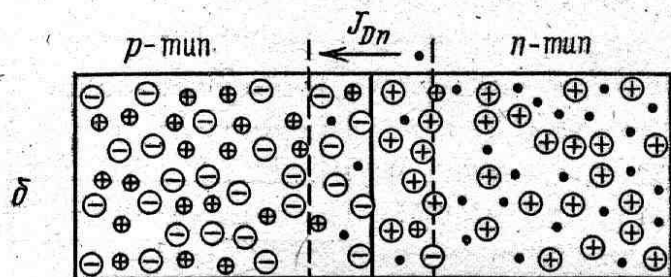
Зонна діаграма напівпровідника p-типу

$$p = N_A \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

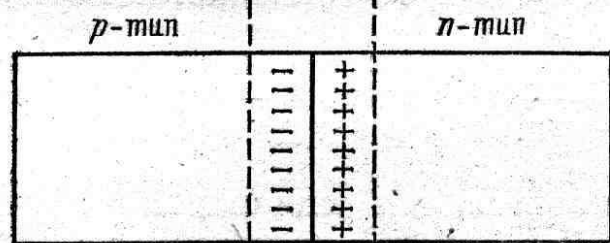
## p-n-перехід



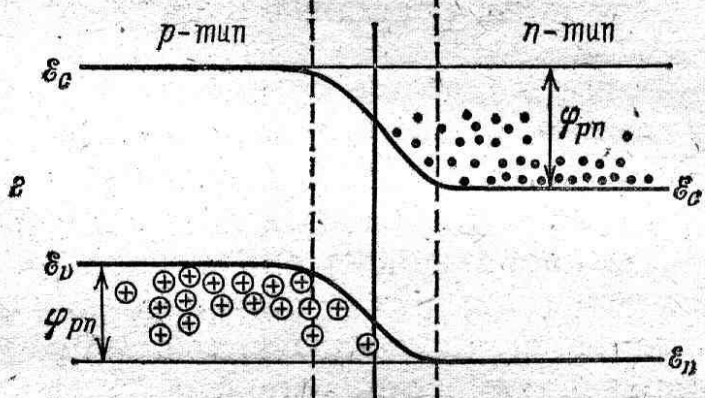
а



б



$E$

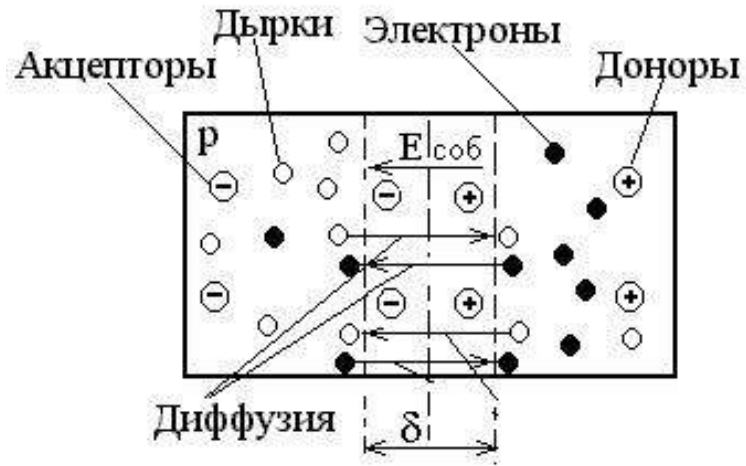


В області р-п-переходу виникає електричне поле, яке перешкоджає переходу електронів з п-в р-область, а дірок назад, що забезпечує вирямляючі властивості р-п-переходу.

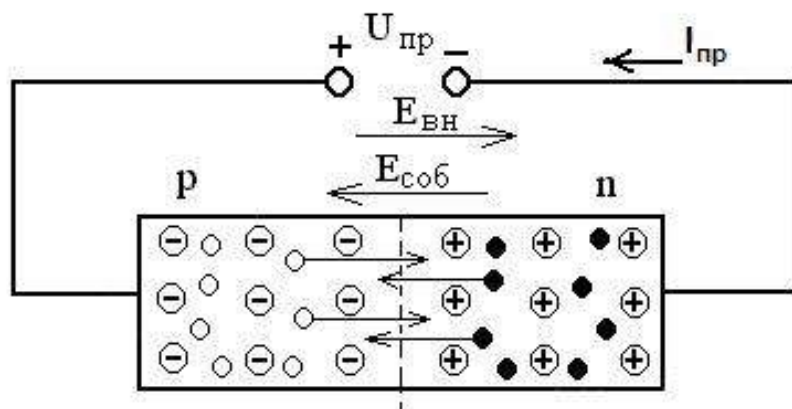
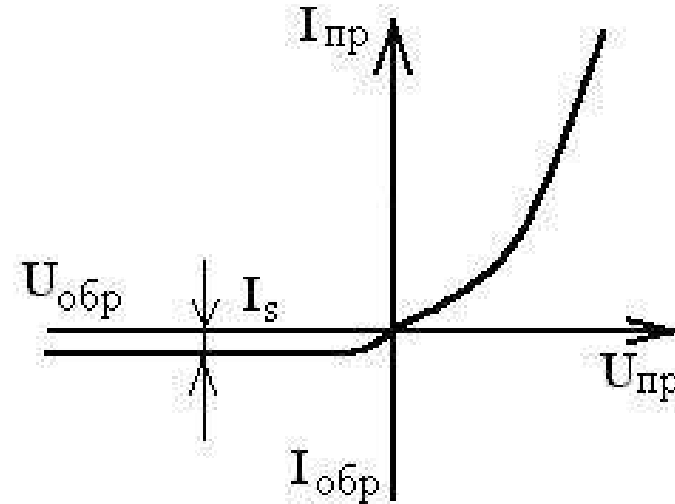
Зоною р-п-переходу називається область напівпровідника, в якій має місце просторова зміна типу провідності від п до р.

Формування потенціального бар'єру на переході

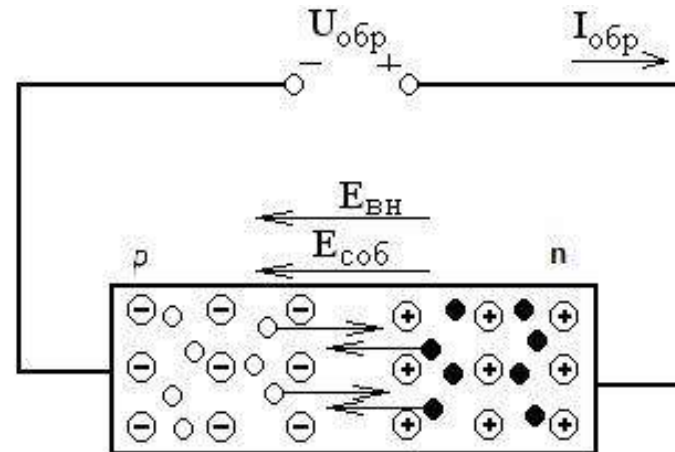
# p-n -перехід



Рівновага



Пряме включення

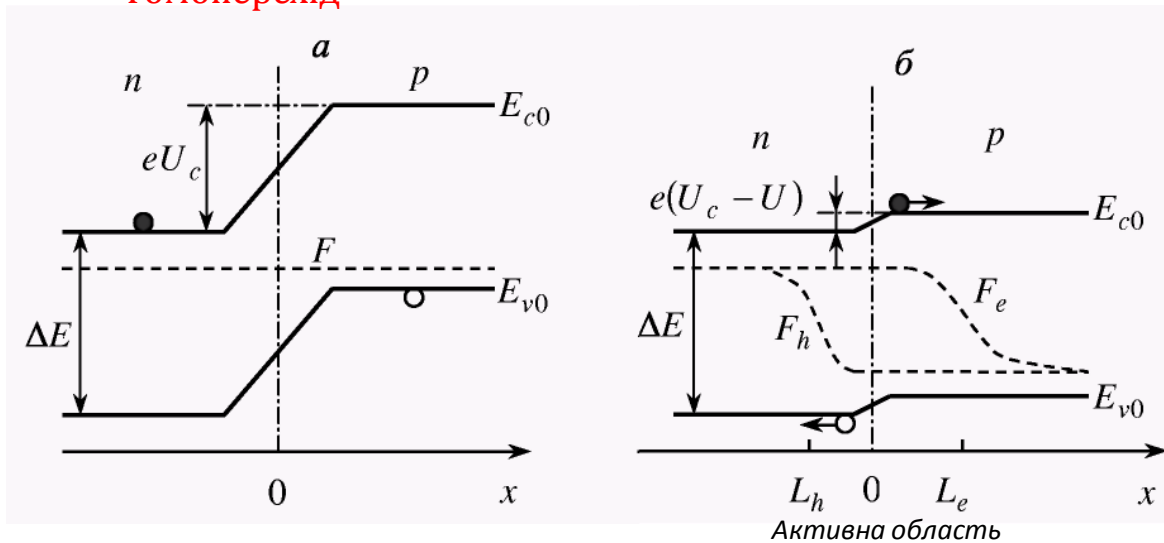


Зворотнє включення



# Інжекційна люмінесценція в напівпровідниках

## Гомоперехід



Зонні діаграми р-п-переходу в стані термодинамічної рівноваги (а)  
і при прямому зсуві (б)

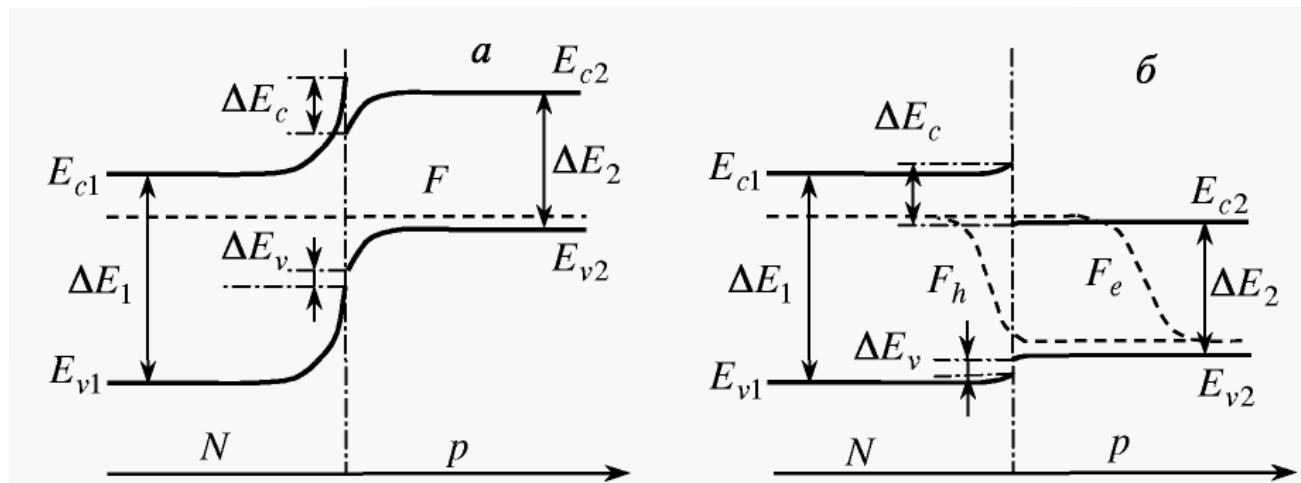
**Інжекційна люмінесценція** – світіння тонкого шару напівпровідника поблизу р-п-переходу, включеного в пряму напрямку, за рахунок інжекції неосновних носіїв заряду через р-п-перехід і подальшої їх рекомбінації з основними носіями заряду

- В рівноважних умовах електрони і дірки **не можуть рекомбінувати** одні з одними, оскільки вони **просторово розділені** енергетичним бар'єром заввишки  $eU_c$ , де  $e$  - заряд електрона,  $U_c$  - контактна різниця потенціалів.
- При включенні р-п-переходу **в пряму напрямку** полярність напруги зворотна полярності  $U_c$ .
- Висота бар'єра **знижується** до величини  $e(U_c - U)$ .
- Якщо  $e(U_c - U) < kT$ , то енергії теплового руху достатньо для проникнення електронів в р-область структури, а дірок в n-область.
- В основі інжекції лежить **теплова дифузія електронів і дірок** при зниженні потенціального бар'єру на р-п-переході.



## Інжекційна люмінесценція в напівпровідниках

### Гетероперехід



Зонна діаграма різкого N-p-гетеропереходу в стані термодинамічної рівноваги (а) і при прямому зсуві (б)

Потенціальні бар'єри для електронів і дірок на N-p-гетеропереході **різні**, тоді як на звичайному p-n-переході вони **однакові**.

**Наслідок** - в гетероструктурі повинна спостерігатися **одностороння інжекція** електронів з широкозонного N-шару у вузькозонний p-шар.

Перехід між двома різними напівпровідниками в одному і тому ж кристалі називається **гетеропереходом**, а структура з одним або більш гетеропереходами – **гетероструктурою**.

Якщо напівпровідники мають однаковий тип провідності, гетероперехід називається **ізотипним**, якщо різний - **анізотипним**.

Тип провідності речовини з більшою шириною забороненої зони позначають прописними буквами **N** або **P**, з меншою - рядковими **n** або **p**.

Гетероперехід називається **різким**, якщо його ширина рівна декільком міжатомним відстаням, і **плавним**, якщо його ширина більше дифузійної довжини неосновних носіїв заряду.



## Інжекційна люмінесценція в напівпровідниках

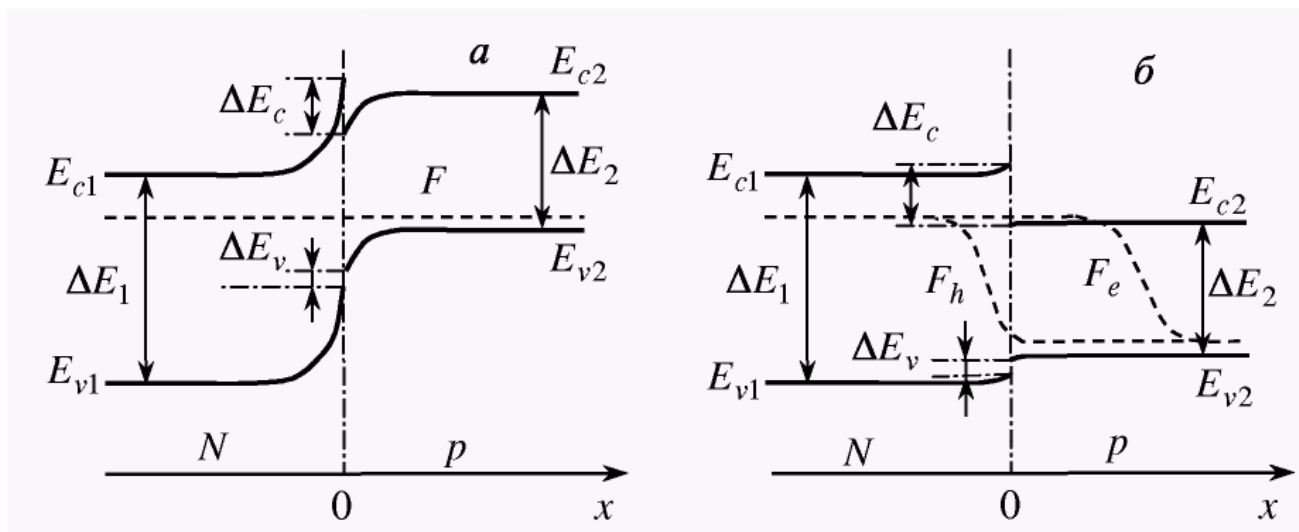
### Суперінжекція.

При прямому зсуві дно зони провідності у вузькозонному шарі може виявитися нижче, ніж в широкозонному. Положення ж квазірівня Фермі для електронів по відношенню до дна зони провідності поблизу переходу у вузькозонному шарі виявиться вище, ніж в широкозонному.

**Наслідок** концентрація електронів стає більшою, ніж в емітері.

Суперінжекція сприяє досягненню інверсії населеностей в інжекційних лазерах.

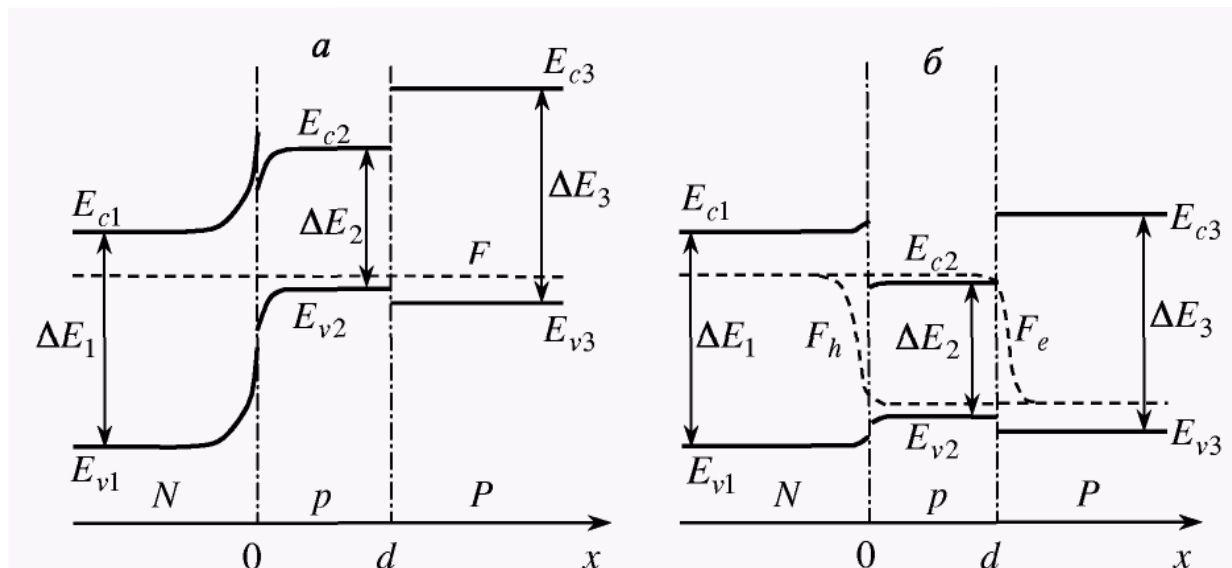
Завдяки ній досягається динамічна виродженість носіїв в активній області лазера при їхній інжекції з невинродженого (слаболегованого) емітера.



### Одностороння гетероструктура -

ізотипний гетероперехід розташований поблизу звичайного р-п-переходу

## Інжекційна люмінесценція в напівпровідниках



**Двохстороння гетероструктура** (ДГС) р-п-гомоперехід замінюється на N-р-гетероперехід. В ДГС вузькозонний активний шар з обох боків оточений широкозонними емітерами. Розрив в зоні провідності на р-Р-гетеропереході створює потенціальний бар'єр для електронів, розрив валентної зони на N-р-гетеропереході разом з частиною контактної різниці потенціалів створює бар'єр для дірок.

**Наслідок** : ДГС має місце обмеження не тільки неосновних, але і основних носіїв заряду.

Показник заломлення вузькозонного матеріалу вищий, ніж широкозонного –

**Наслідок**- частина випромінювання всередині активного шару зазнає повного внутрішнього відбивання на гетерограницях (ефект оптичного обмеження).

Обидва емітери ДГС прозорі для випромінювання, що генерується в активному шарі.

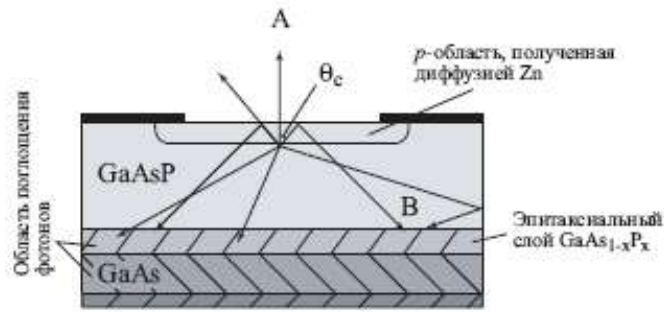
## Лекція 3

### Джерела світла II.

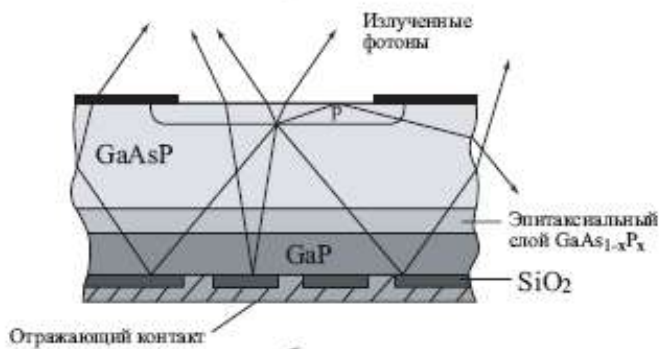
1. Світлодіоди
2. Спектральні лінії
3. Вимушене випромінювання.
4. Лазер
5. Лазерна генерація
6. Типи лазерів
7. Твердотільний лазер
8. Твердотільний лазер
9. Напівпровідниковий лазер
10. Інжекційні лазери
11. Надгратки
12. Наноструктури. Наноструктури .  
Розмірні оптичні ефекти
13. Інжекційні нанолазери
14. Лазерні наноструктури .
15. Уніполярний квантовий каскадний лазер
16. Лазер на вільних електронах
17. Фотонні кристали
18. Застосування фотонних кристалів
19. Лазери на фотонних кристалах
20. Характеристики джерел випромінювання



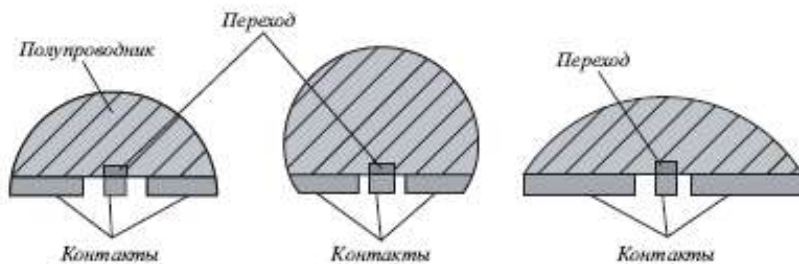
# Світлодіоди



а



б



Випромінювальна здатність світлодіода характеризується: **внутрішньою квантовою ефективністю** (відношення кількості народжених фотонів до кількості інжектованих носіїв), і **зовнішньою квантовою ефективністю** (відношення кількості випромінених діодом фотонів до кількості носіїв заряду, що пролітають крізь нього).

Для оцінки світлодіодів використовуються параметри:

сила світла  $I$  ( $I=10^{-1}-10^2$  мКд)

світловий потік  $\Phi$  ( $\Phi=10^{-1}-10^2$  мЛм)

яскравість  $B$  ( $B = 10-10^3$  Кд/м<sup>2</sup>)

потужність випромінювання  $P_B$  ( $P_B=10^{-1}-10^3$  мВт).

## Спектральні лінії

При квантових переходах **атом не випромінює або поглинає фотони однієї і тієї ж частоти.**

Спектри випромінювання (або поглинання) не складаються з нескінченно тонких спектральних ліній, а мають певну ширину  $\Delta\nu$ .

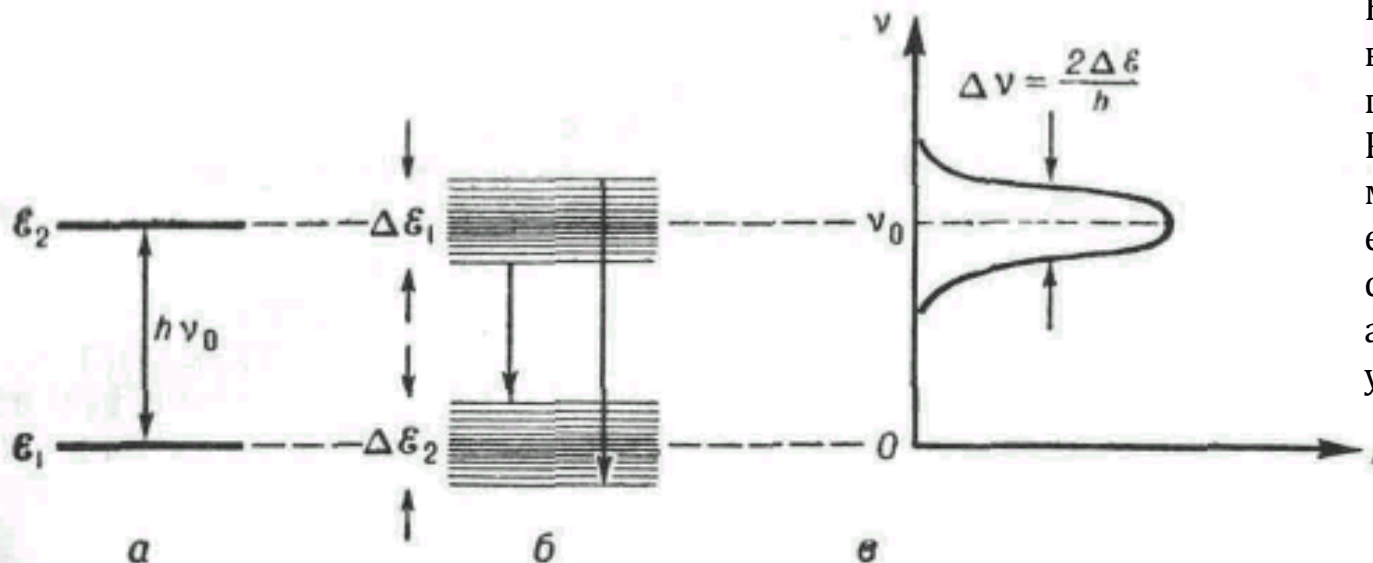
Ширина спектральних ліній пов'язана з тим, що **рівні енергії атомів в реальних умовах розмиті.**

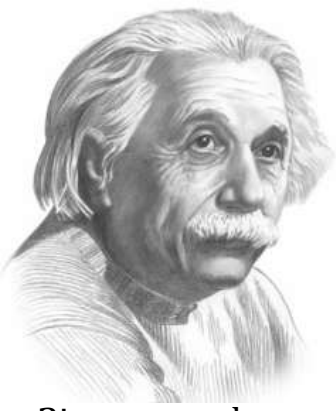
$$h\nu = E_m - E_n$$

У **газах**, наприклад, рівні атомів або молекул розмиваються через зіткнень часток між собою і зі стінками посудини, тому в газах ширина лінії  $\Delta\nu$  зростає із збільшенням тиску. Навіть у розріджених газах лінії розширюються через ефект Доплера, що викликається тепловим рухом частинок.

У **твердих тілах** ширина спектральних ліній пов'язана з тепловими коливаннями атомів біля положень рівноваги, тому  $\Delta\nu$  зростає із збільшенням температури тіла.

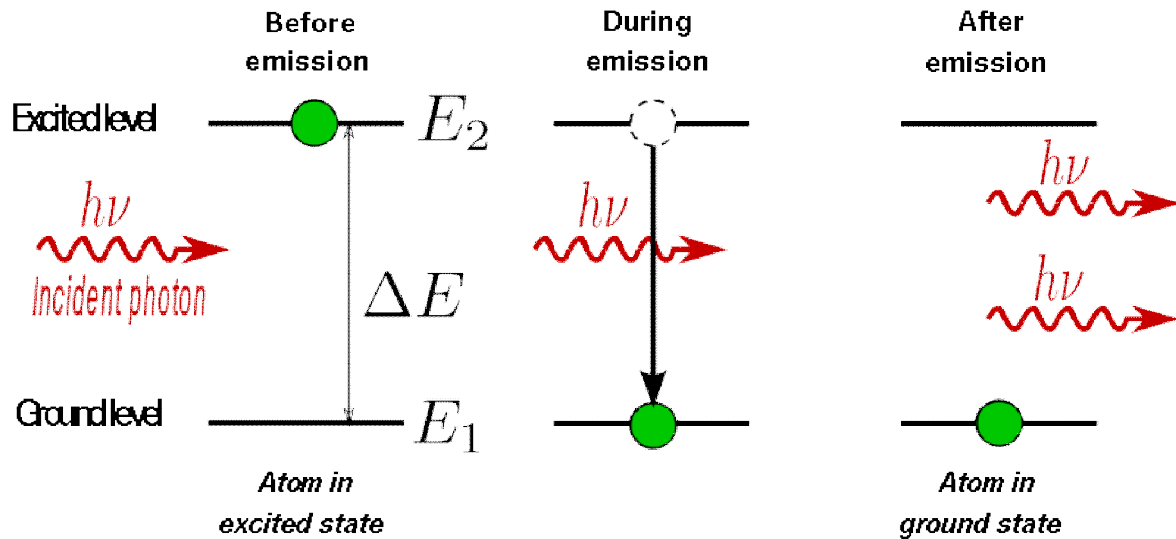
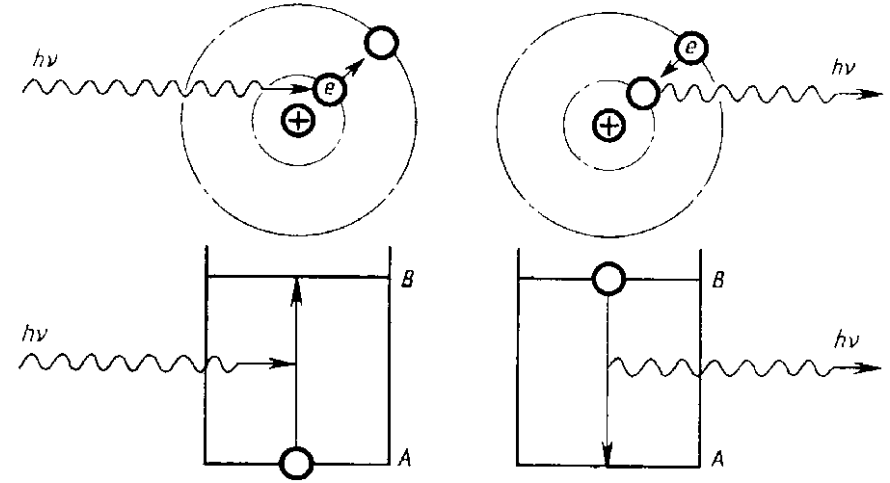
Енергія атома залежить **також** від величини електричного поля, в якому він знаходиться. Різні атоми в твердому тілі можуть мати відмінні рівні енергії і спостережувана спектральна лінія (поглинання або випромінювання) буде уширюватися (**ефект Штарка**).





## Вимушене випромінювання.

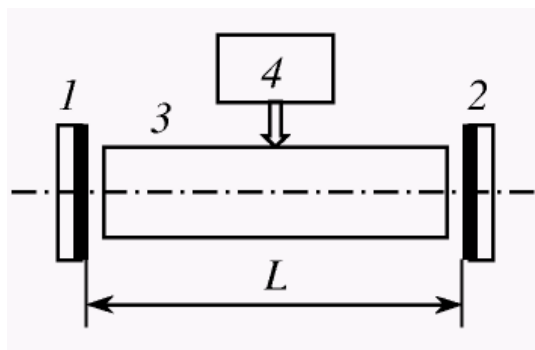
Зіткнення фотона, що володіє енергією  $h\nu$ , з атомом, що знаходиться у збудженому стані, стимулює перехід атома в основний стан з випусканням фотона з такою ж енергією  $h\nu$  і фазою, рівною фазі падаючого випромінювання - **стимульоване випромінювання**.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$



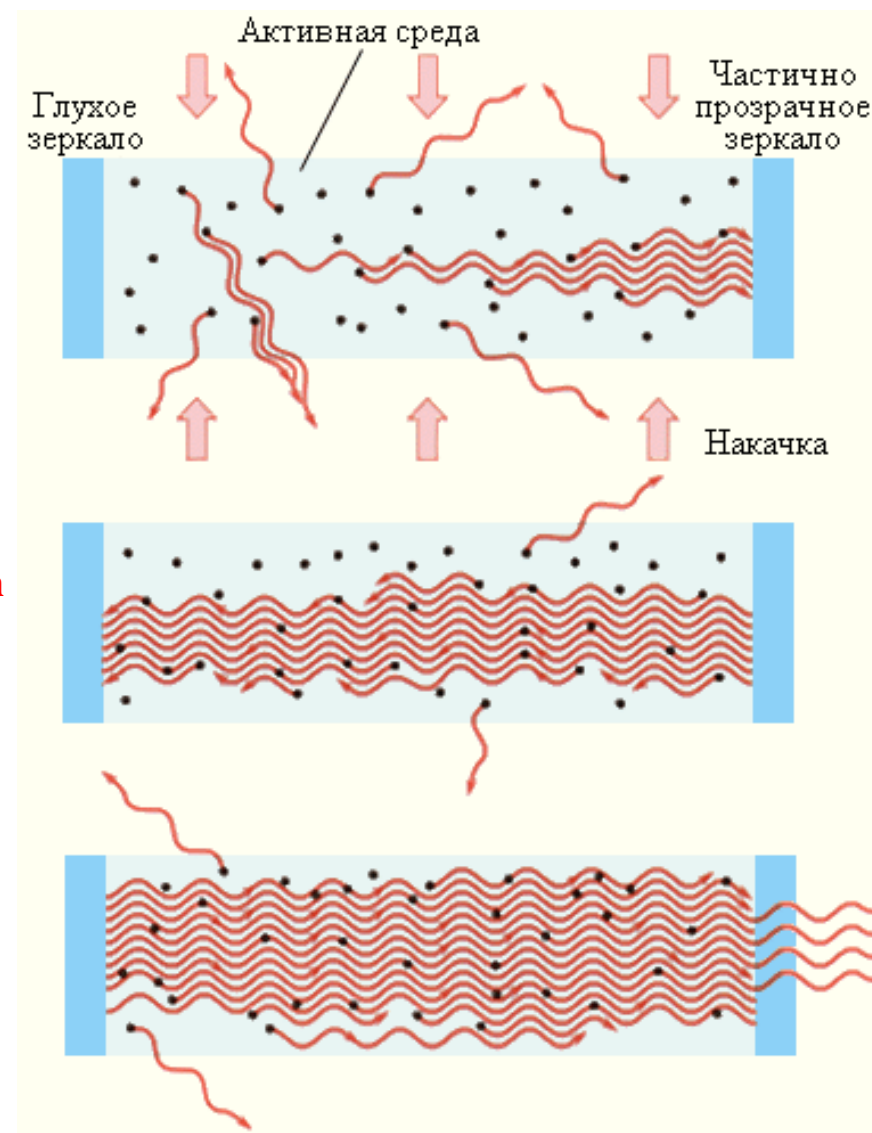
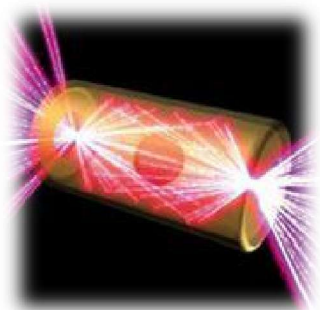




*Принципова схема лазера:*  
1 і 2 - дзеркала резонатора;  
3 - активна речовина;  
4 - система накачування

Для роботи лазера необхідно забезпечити можливість максимальної кількості вимушених переходів за час співмірний з часом когерентності –  
**тоді окремі цуги інтерферуватимуть** – принцип дії лазера

Лазерне випромінювання формується за рахунок **вимушених переходів**, при яких всі фотони, що випромінюються ідентичні (високою часова когерентність).



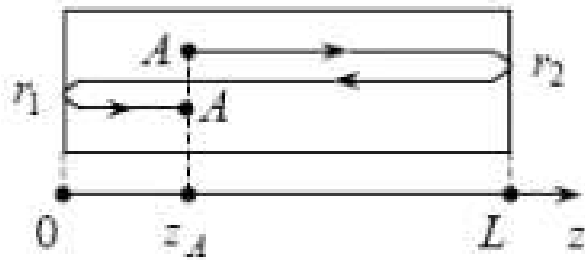
## Лазерна генерація

Умова роботи лазера - **ПОЗИТИВНИЙ ОПТИЧНИЙ ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК** (поміщення активної речовини у оптичний резонатор, між двома паралельними дзеркалами, одне з яких напівпрозоре для виходу випромінювання)

Світло, що розповсюджується в середовищі

**поглинається** - внутрішні втрати, характеризуються коефіцієнтом  $a_i$

**підсилюється** в результаті індукованого випромінювання, характеризуються коефіцієнтом  $g_i$ .



Напруженість електричного поля хвилі в точці А з координатою  $z_A$

$$E_A = E_0 \exp[-i(\omega t + kz_A + \varphi_0)]$$

Після повного (подвійного) обходу резонатора світловою хвилею і повернення її в ту ж точку напруженість поля рівна

$$E_A = E_0 \cdot r_1 \exp[-i\delta\varphi_1] \cdot r_2 \exp[-i\delta\varphi_2] \cdot \exp\left[\frac{1}{2}(g - a_i)2L\right] \exp[-i(\omega t + k[z_A + 2L] + \varphi_0)]$$

$r_1$  і  $r_2$  - модулі коефіцієнтів відбивання дзеркал резонатора по амплітуді

$$R_1 = r_1^2$$

$\delta\varphi_1$   $\delta\varphi_2$  - фазові зсуви при відбиванні від дзеркал,

$$R_2 = r_2^2$$

Коефіцієнти відбивання

$L$  - довжина резонатора, повністю заповненого активною речовиною.

умова стаціонарної генерації  $\sqrt{R_1 R_2} \exp[-i(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) + (g - a_i)L] = 1$

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

## Лазерна генерація

Умова стаціонарної генерації  $\sqrt{R_1 R_2} \exp[-i(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) + (g - a_i)L] = 1$

$$\sin(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) = 0 \longrightarrow \text{Фазова умова генерації}$$

$$\sqrt{R_1 R_2} \exp[(g - a_i)L] \cdot \cos[\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL] = 1 \rightarrow \text{Амплітудна}$$

Фазова умова стаціонарної генерації

$$\sin(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) = 0$$

$$q \gg 1 \Rightarrow L = q \frac{\lambda_q}{2}$$

умова утворення стоячих хвиль в резонаторі

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + \frac{4\pi}{\lambda_q} L = q$$

$$L = q \frac{\lambda_q}{2} \left( 1 - \frac{\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2}{2\pi q} \right)$$

$q$  - ціле число

Оскільки для всіх лазерів  $L \gg \lambda$  значення  $q$  дуже велике (порядку  $10^3$  для напівпровідникових і  $10^6$  для газових лазерів)



Амплітудна умова стаціонарної генерації

$$\sin(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) = 0 \Rightarrow \cos(\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL) = 1$$

$$\sqrt{R_1 R_2} \exp[(g - a_i)L] \cdot \cos[\delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 + 2kL] = 1$$

$$\sqrt{R_1 R_2} \exp[(g - a_i)L] = 1$$

$$g = a_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \text{Енергетична умова генерації}$$

**Моди резонатора** - власні типи коливань відкритого резонатора, відповідні встановленню в ньому стоячих світлових хвиль.

*Підсилення випромінювання в активній речовині мусить компенсувати внутрішні втрати і втрати на вихід випромінювання через дзеркала резонатора.*

Мінімальна потужність накачки, при якій виконується дана умова, називається порогом генерації.



**Робоче тіло (активне середовище)** - основний визначальний фактор робочої довжини хвилі, а також інших властивостей лазера

**Рідина** - в лазерах на барвниках. Органічний розчинник (метанол , етанол або етиленгліколь) , в яких розчинені барвники (кумарин або родамін ). Конфігурація молекул барвника визначає робочу довжину хвилі.

**Гази** - (вуглекислий газ , аргон , криптон або суміші -гелій- неон) -найчастіше накачуються електричними розрядами.

**Тверді тіла** - кристали і скло. Матеріал легується ( активується ) добавкою хрому , неодиму , ербію або титану . Типові кристали : алюмо-ітрієвий гранат, літієво- ітрієвий фторид, сапфір і силікатне скло. - накачуються імпульсною лампою або іншим лазером.

**Напівпровідники** - матеріал , в якому перехід електронів між енергетичними рівнями може супроводжуватися випромінюванням.

**Твердотільні лазери** – довжина когерентності сотні кілометрів

**Газові лазери** – довжина когерентності десятки кілометрів

**Напівпровідникові**– довжина когерентності десятки метрів

**Люмінісцентна лампа** - довжина когерентності 3 мм

---



# Твердотільний лазер

У твердотільних лазерах, активною речовиною є діелектричні кристали (скло), що містять домішки хімічних елементів (активаторів), властивості енергетичних рівнів яких сприятливі для створення *інверсії заселенностей рівнів*.

Концентрація атомів (або іонів) домішки  $10^{17}-10^{20} \text{ см}^{-3}$

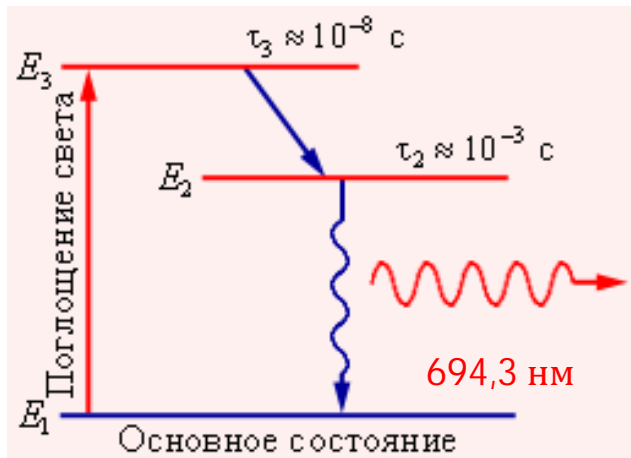
Домішка забезпечує високі абсолютні величини інверсії заселенностей енергетичних рівнів активаторів, що дозволяє отримати великі потужності генерованого випромінювання.



**Інверсія заселенностей рівнів** – значна кількість атомів речовини перебуває в збудженому стані, Забезпечується **накачкою енергією** активного середовища (**через спалах світла**)

## Рубіновий лазер

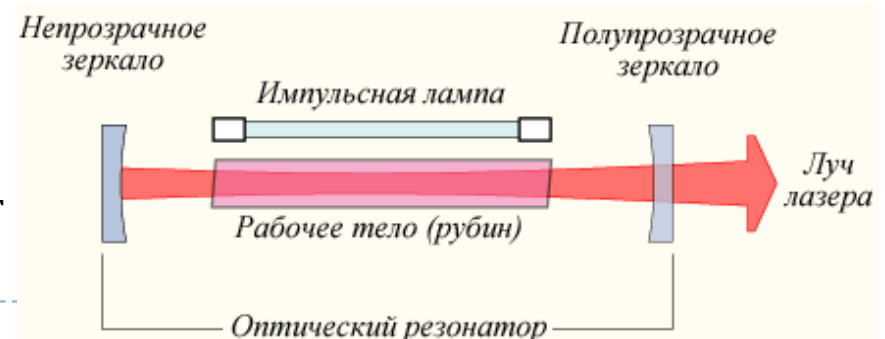
Рубін - кристал окису алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ), вміст хрому 0,05% ( $1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ).



**Трирівнева схема оптичної накачки.** Вказані «часи життя» рівнів  $E_2$  і  $E_3$ . Рівень  $E_2$  - метастабільний. Перехід між рівнями  $E_3$  і  $E_2$  безвипромінювальний. Лазерний перехід здійснюється між рівнями  $E_2$  і  $E_1$ . У кристалі рубіна рівні  $E_1$ ,  $E_2$  і  $E_3$  належать домішковим атомам хрому



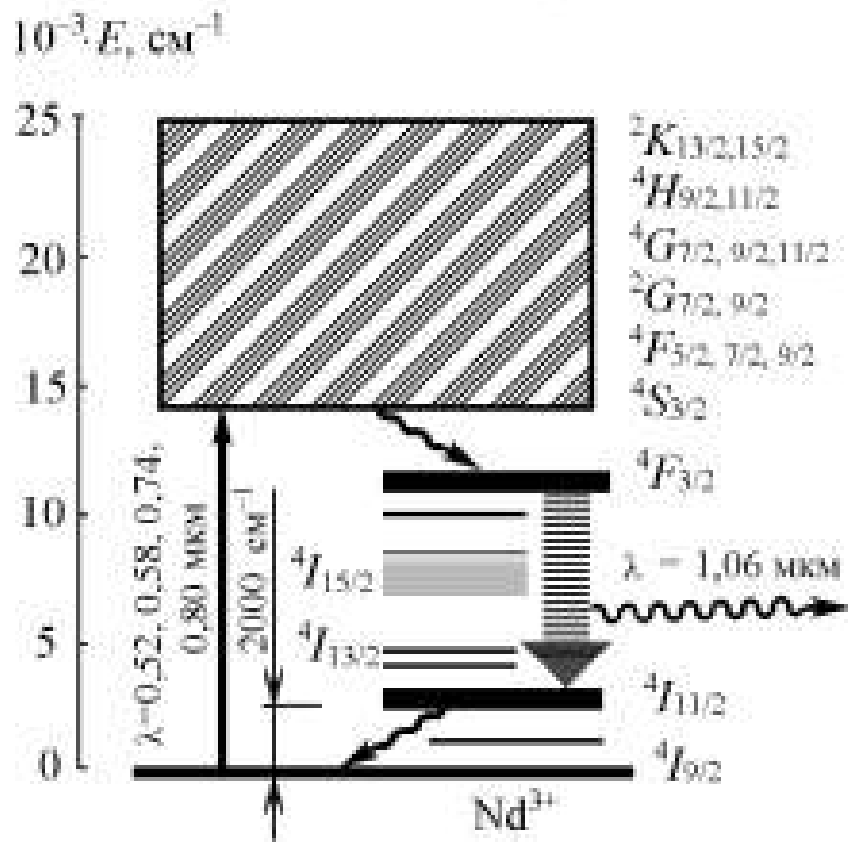
**Певавага:** потужність імпульсу тривалістю 10-20 нс – до 50 МВт



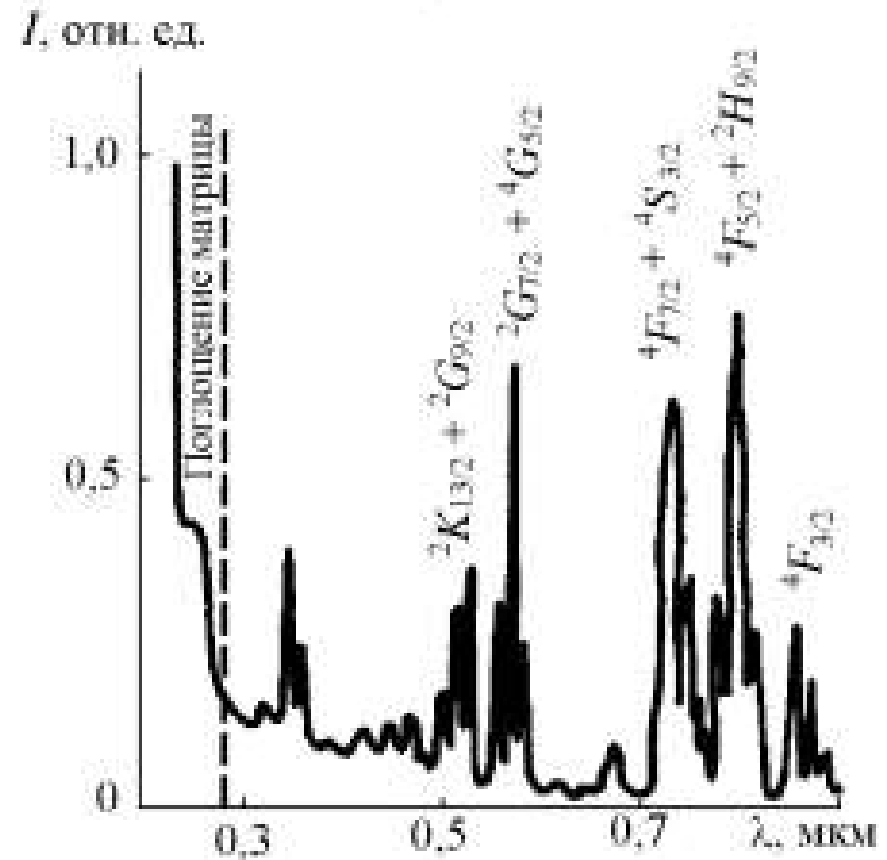
# Твердотільний лазер

## Неодимовий лазер

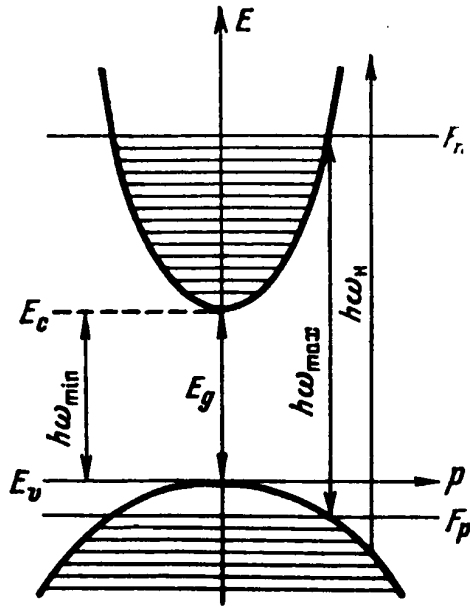
Активне середовище - скло, активоване йонами неодиму, кристали алюмо-ітрієвого гранату, в которых часть ионов  $Y^{3+}$  замещена йонами  $Nd^{3+}$  ( $Al_5Y_3O_{12} : Nd^{3+}$ ).



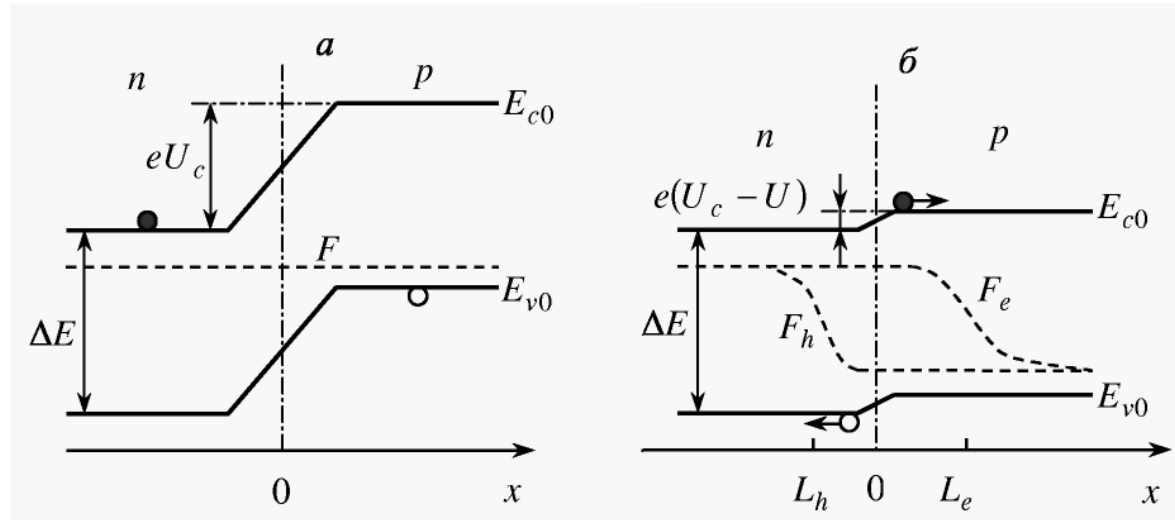
1,06 мкм



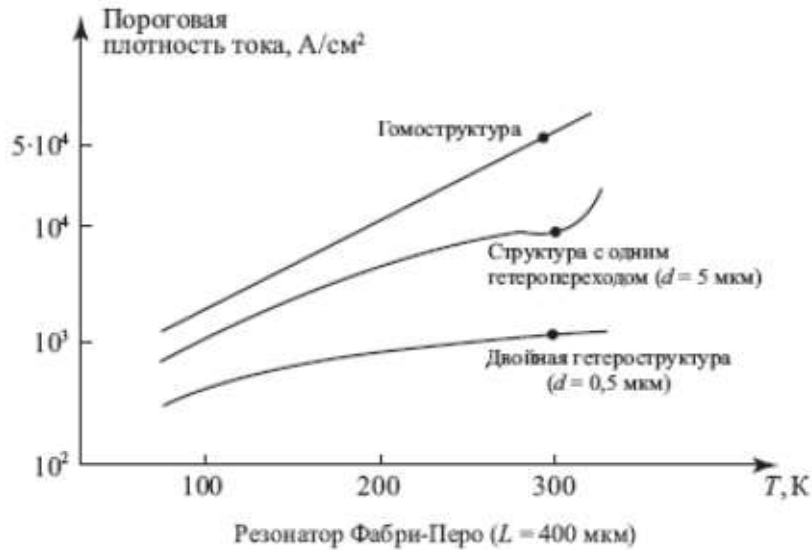
# Напівпровідниковий лазер



Інверсна заселеність в прямозонному напівпровіднику



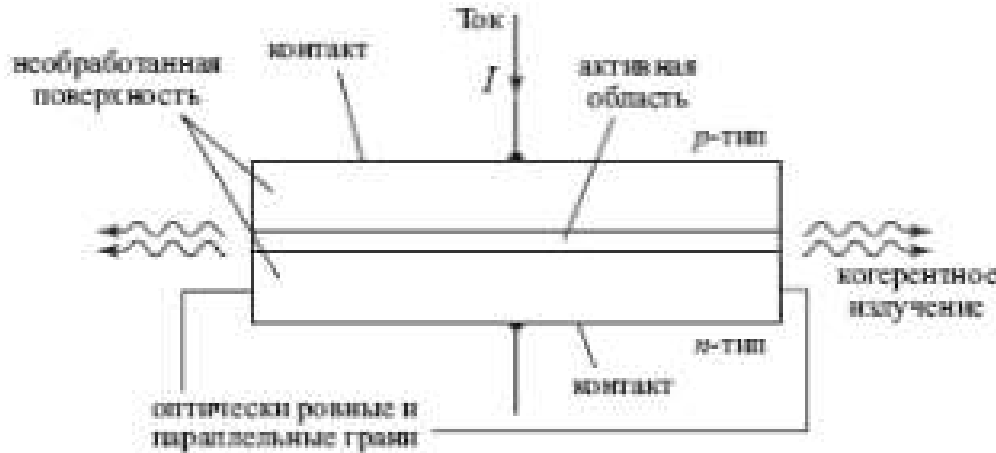
Інжекційна люмінесценція



Умова лазерної генерації



## Інжекційні лазери

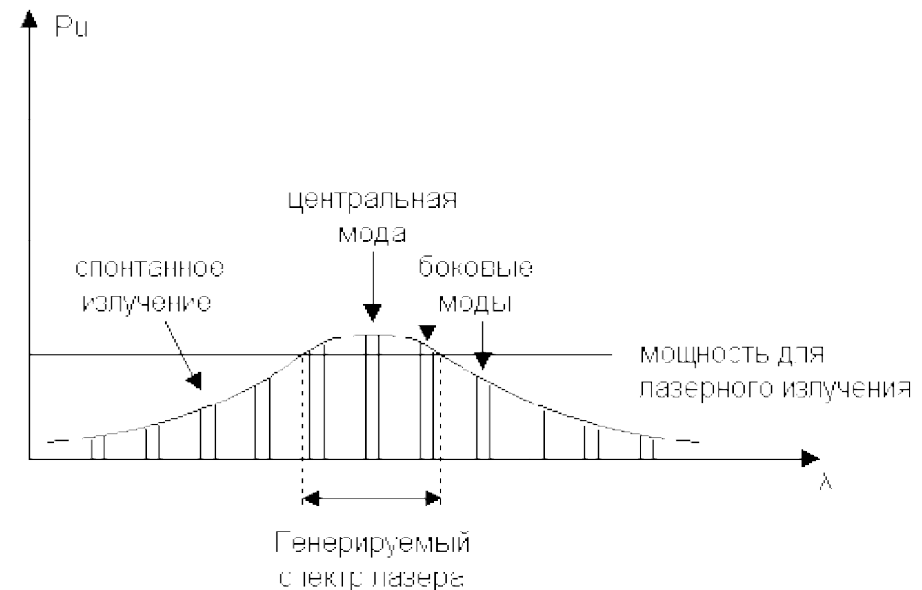
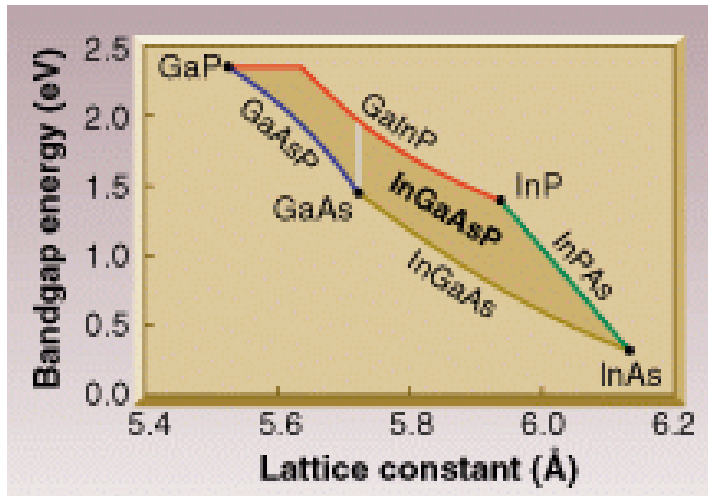


Інжекційний лазер - схема

Шар p-n - переходу розміщується між електродами. Розміри активної області **200-500 мкм**, Відбиваючі поверхні (резонатор) створюються сколом граней кристалу.

**Недолік:** розмір пучка ( 5 мкм) перевищує розмір перерізу активної області (1 мкм), випромінювання проникає в p- і n- області, викликаючи їх розігрів.

**Наслідок:** порогова густина струму  $10^5 \text{ А/см}^2$  для GaAs – лазер недовговічний через перегрів.



Напівпровідники, з'єднані суцільними лініями, утворюють **стабільні проміжні сполуки**.

### Приклад

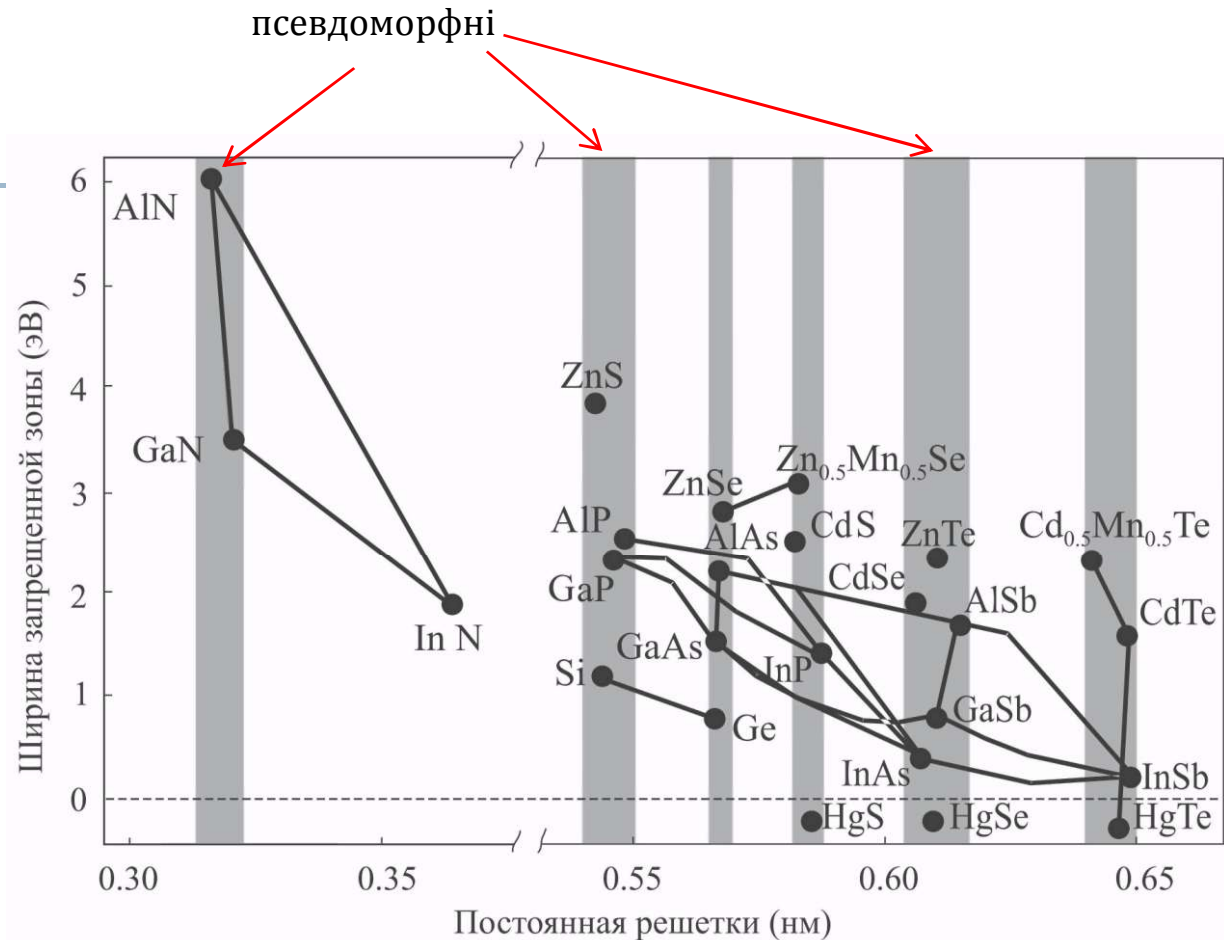
подвійних сполук SiGe,  
потрійних - AlGaAs,  
четверних - GaInAsP.



$$0 < x < 1$$

$$\Delta a < 0,15\%$$

$$\Delta E_g < 0,8 \text{ eV}$$



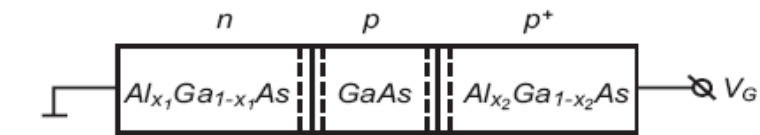
Матеріали, що використовуються при формуванні надґраток

### Правило Вегарда:

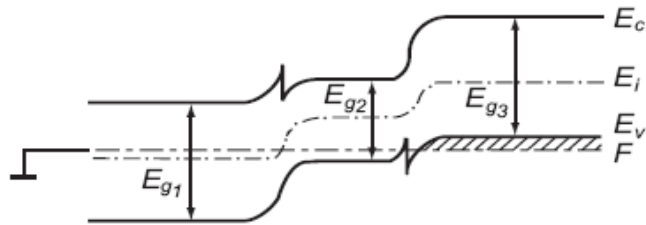
стала ґратки проміжної сполуки  $a(x)$  лінійно змінюється в інтервалі між постійними ґраток матеріалів, які утворюють її

$$a(x) = xa_1 + (1 - x)a_2$$

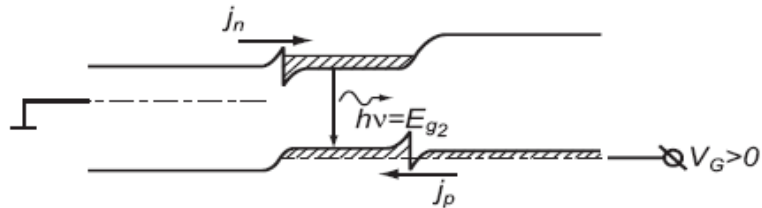
## Інжекційні лазери



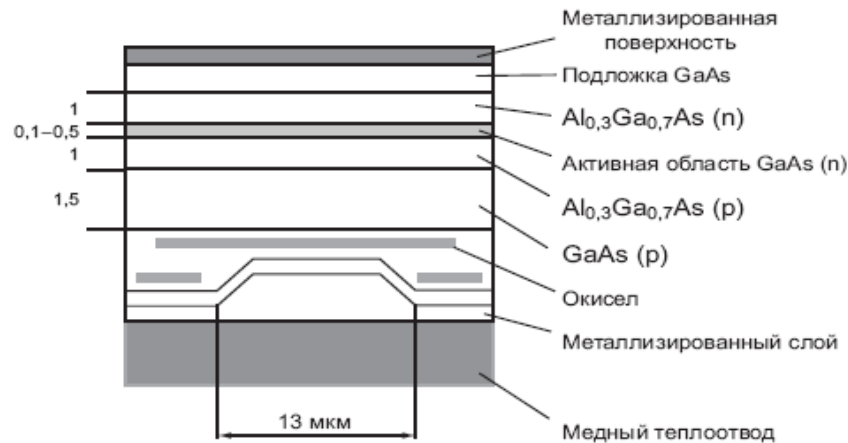
а



б



в



г

Схема напівпровідникового лазера на подвійному гетеропереході. Активна область - шар з GaAs (n)

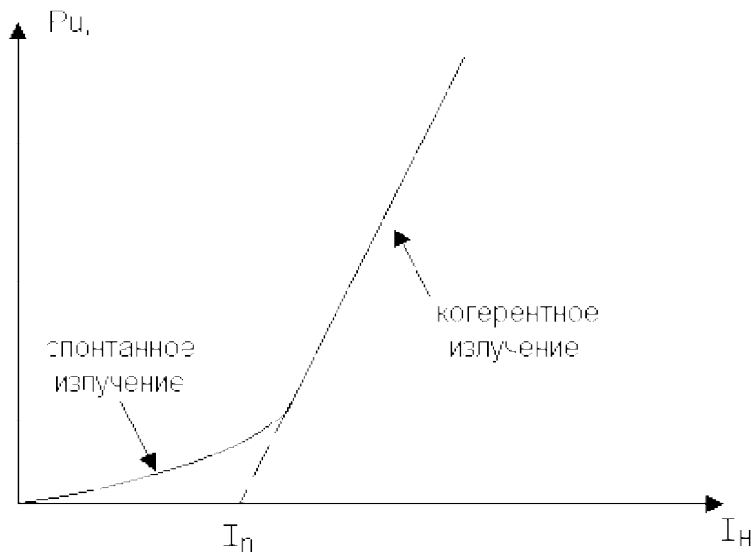
**Активна область** - шар GaAs товщиною 0,1-0,3 мкм.

Порогова густина струму майже  $10^3$  А/см<sup>2</sup>

Наслідок - неперервний режим при кімнатній температурі.

**Переваги** - всі інжектовані електрони та дірки, які залишилися, ефективно утримуються тільки в активній області; лазерний пучок зосереджений тільки в активній області, де і відбувається його підсилення та розповсюдження; лазерний пучок не поглинається в областях, сусідніх з активною.

Довжина хвилі 0,85 мкм - потрапляє в діапазон в якому оптичний волоконний кварц має мінімум втрат



## Інжекційні лазери

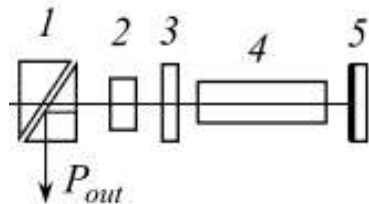
### Переваги інжекційних лазерів:

- Довжина резонатора – 10 мкм, площа поперечного перерізу – 1 мкм<sup>2</sup>, об'єм активної області – 10<sup>-12</sup> см<sup>2</sup>.
- Великий ККД (70%)- вся енергія електричного струму накачки переходить в енергію збуджених атомів.
- Зручність управління: низькі струми й напруги збудження сумісні з ІС.
- Можливість генерації потрібної спектральної лінії вибором НП із потрібною шириною забороненої зони.
- Сумісність із транзисторами.

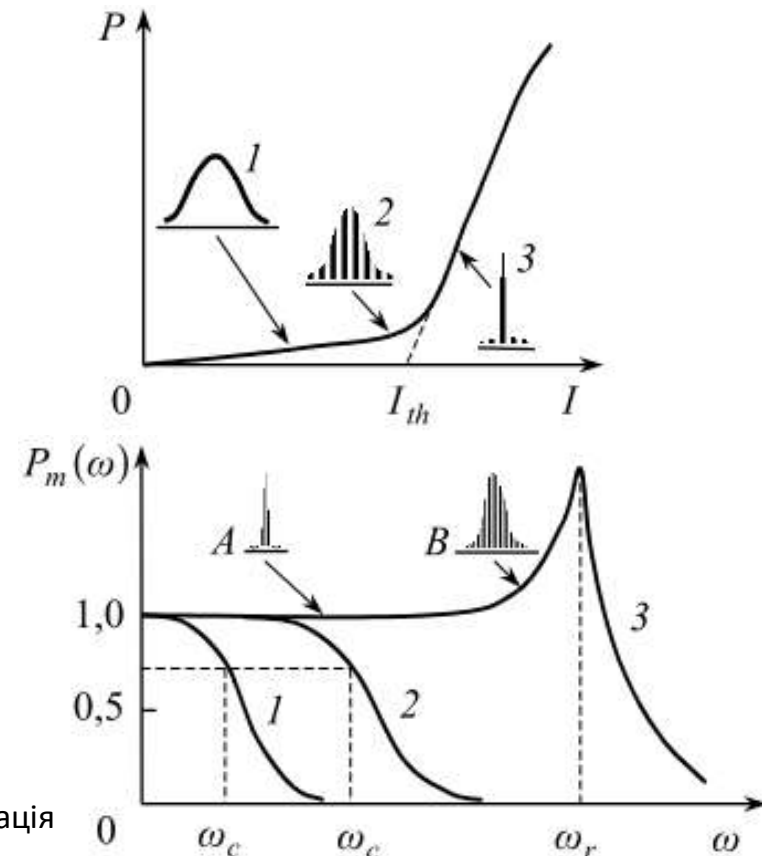
### Недоліки інжекційних лазерів:

- Низька порівняно з твердотільними лазерами когерентність випромінювання.
- Мала генерована потужність.
- Зменшення потужності випромінювання при нагріванні й дії радіації.
- Явище деградації (збільшення кількості центрів безвипромінювальної рекомбінації при проходженні струму накачки, руйнування дзеркал резонатора, виникнення механічних напруг і дефектів).

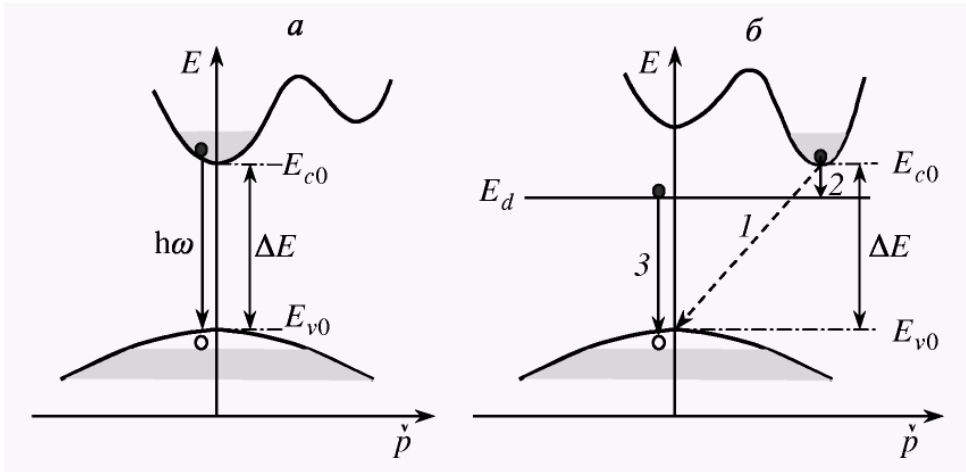
$$R = \left( \frac{\bar{n} - \bar{n}_0}{\bar{n} + \bar{n}_0} \right)^2$$



1. Люмінесценція
2. Суперінжекція
3. Лазерна генерація



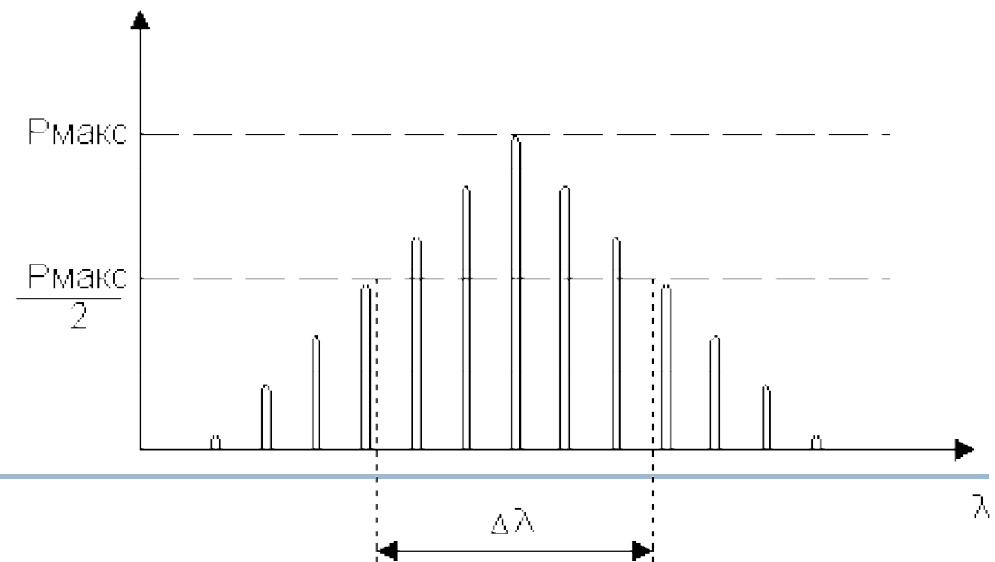
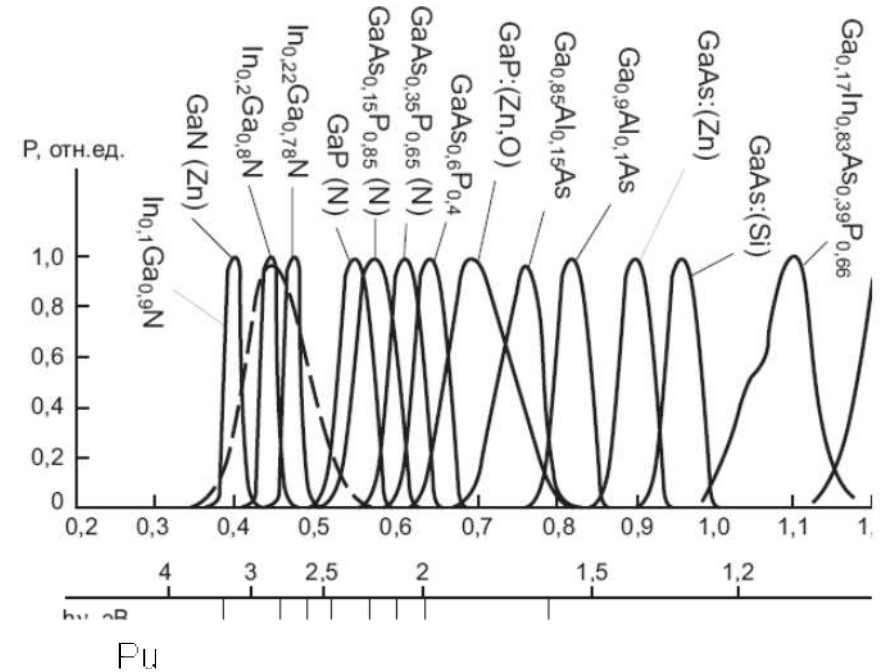
# Напівпровідниковий лазер

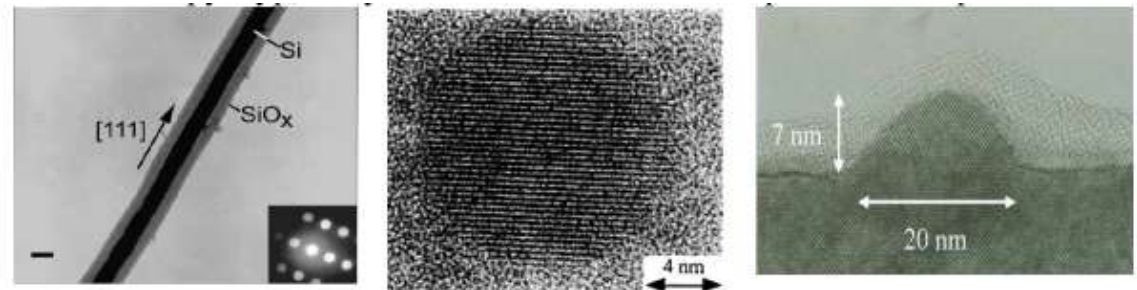
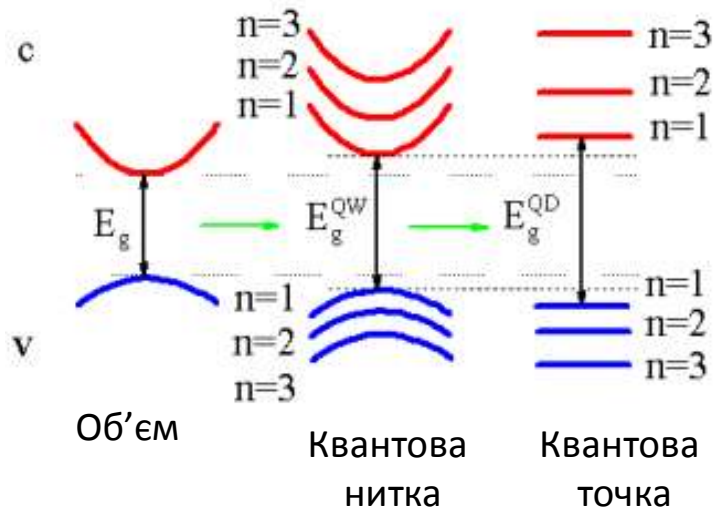


Дисперсійні криві  $E(p)$  і механізми випромінювальних переходів в прямозонних (а) і непрямоzonних (б) напівпровідниках

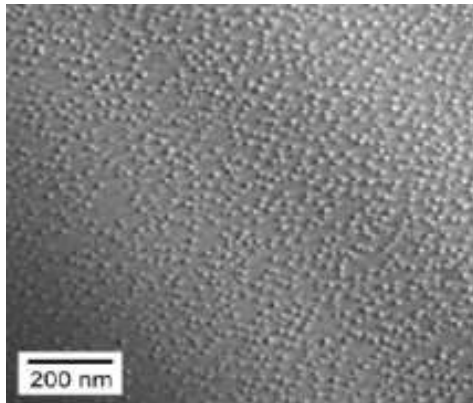
**Прямозонні** - GaAs, AlGaAs, InGaAsP,

**Непрямоzonні** - Si, Ge, GaP

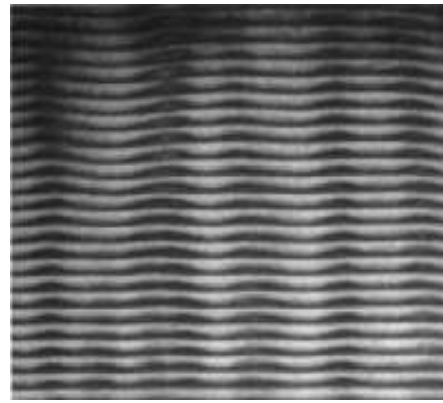




# Наноструктури . Розмірні оптичні ефекти



Двомірний масив квантових точок

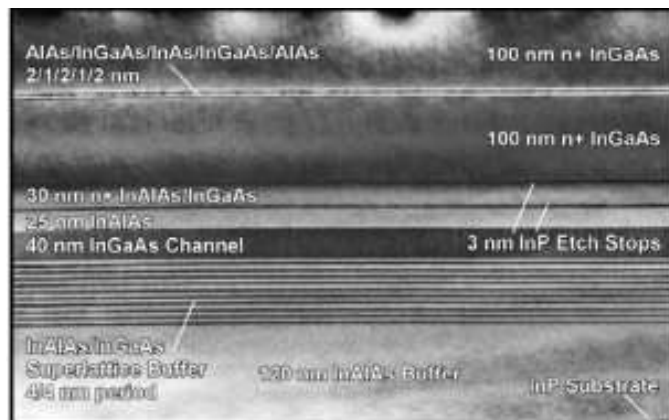
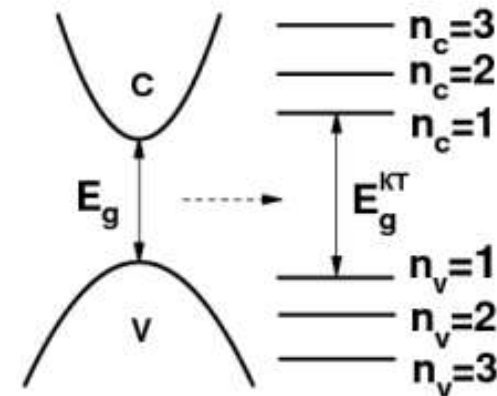


Тримірний масив квантових точок

Край фундаментального поглинання світла в тонких плівках кристалів повинен зміщуватися в синю область спектра при зменшенні їх товщини  $L$

$$\Delta E_g = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL_z^2}$$

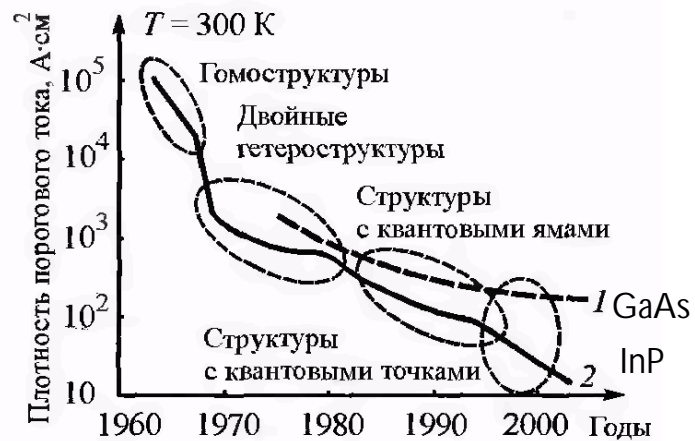
**Ефект розмірного квантування** – при зменшенні лінійних розмірів об'єкта квазінеперервні енергетичні спектри та хвильові функції модифікуються. Для квантових точок замість неперервного спектру виникають дискретні рівні



Багатошаровий масив квантових ям



## Інжекційні нанолазери



### Шлях.

зменшення активного об'єму- зменшення густини порогового струму  
У лазерах на гомоструктурах інжектвані носії могли вільно мігрувати в НП - активний об'єм не мав окреслених меж і густина струму велика .

### Ідея

Зниження порогу генерації досягається при використанні нанорозмірних гетероструктур - область локалізації носіїв визначається профілями густини ймовірності хвильових функцій, які залежать від товщини квантової ями, головного квантового числа, ефективної маси носіїв і висоти бар'єру.

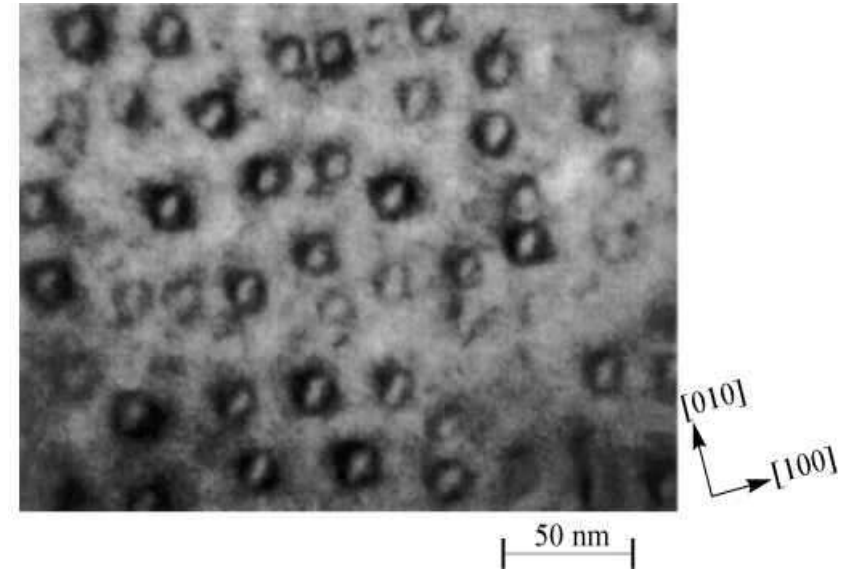
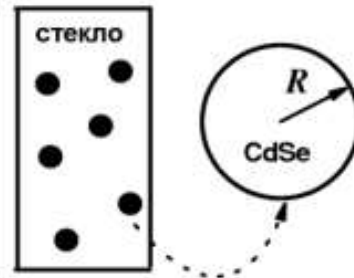


**Модель** - напівпровідникові квантові точки вбудовані в діелектричне середовище

$$\left( -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m^*} + V(\mathbf{r}) \right) \varphi(\mathbf{r}) = E \varphi(\mathbf{r})$$

$$V(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0, & |\mathbf{r}| \leq R, \\ \infty, & |\mathbf{r}| \geq R. \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi(0) \neq \infty \\ \varphi(\mathbf{r})|_{r=R} = 0 \end{cases}$$

$$\varphi_{nlm}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2}{R^3}} \frac{j_l(k_{nl}r)}{j_{l+1}(\xi_{nl})} Y_{lm}(\Omega), \quad E_{nl} = \frac{\hbar^2 k_{nl}^2}{2m^*}$$



*тримірне просторове обмеження руху носіїв заряду в квантовій точці призводить до розщеплення їх неперервного енергетичного спектру*

## Лазерні наноструктури

**Лазер на квантових точках** - напівпровідниковий лазер, який використовує в якості активного середовища квантові точки в їх випромінюючій області.

Через жорсткі обмеження на пересування носіїв заряду в квантових точках, вони мають електронну структуру, схожу на атоми.

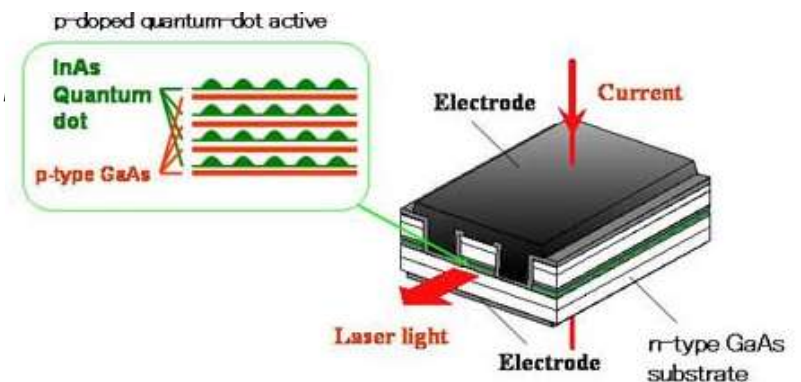
Лазери, виготовлені на таких активних середовищах, мають характеристики, схожі на характеристики **газових лазерів**, і в них вдається уникнути негативних аспектів пристроїв, які є у традиційних напівпровідникових лазерів з активним середовищем на основі об'ємних структур або на квантових ямах. Спостерігається поліпшення характеристик по смузі **частот**, порогу **генерації**, відносної інтенсивності **шуму**, **зменшенні** ширини спектральної лінії і нечутливості до коливань **температури**. Активну область квантової точки можна також розрахувати для роботи **на різних довжинах хвиль**, змінюючи **розмір** і **склад** точки.

З'явилася можливість виробляти лазери на квантових точках для роботи на таких довжинах хвиль, на яких раніше зробити це не представлялося можливим з використанням колишніх технологій напівпровідникових лазерів.

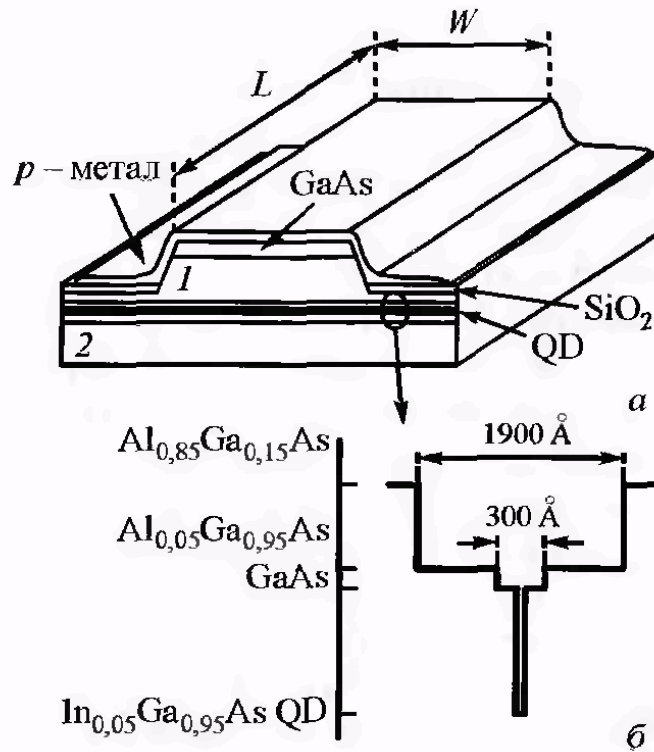
### Застосування

**медицина** (лазерні скальпелі, оптична когерентна томографія), **технології** (проекційні пристрої, лазерні телевізори), спектроскопія і телекомунікації.

**Приклад** : Серійний лазер на квантових точках для передачі даних на 10 Гбіт / с, нечутливий до коливань температури, розроблений для роботи у оптичних лініях зв'язку і оптичних мережах.



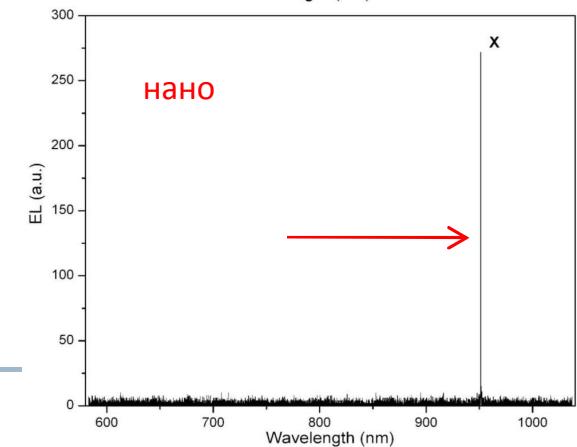
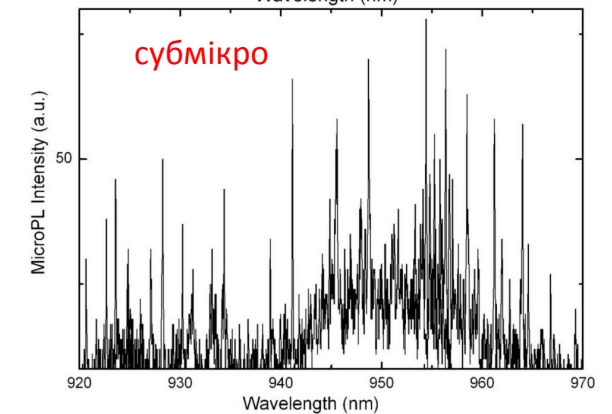
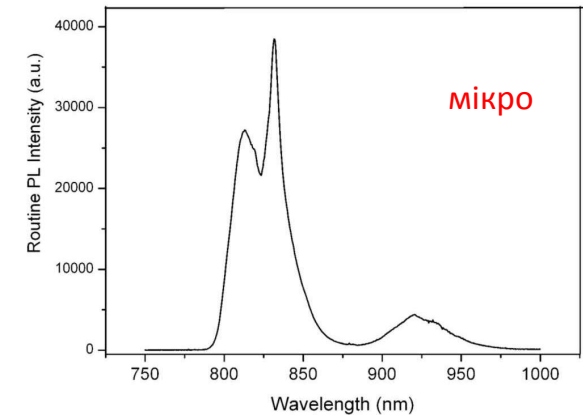
## Лазерні Наноструктури



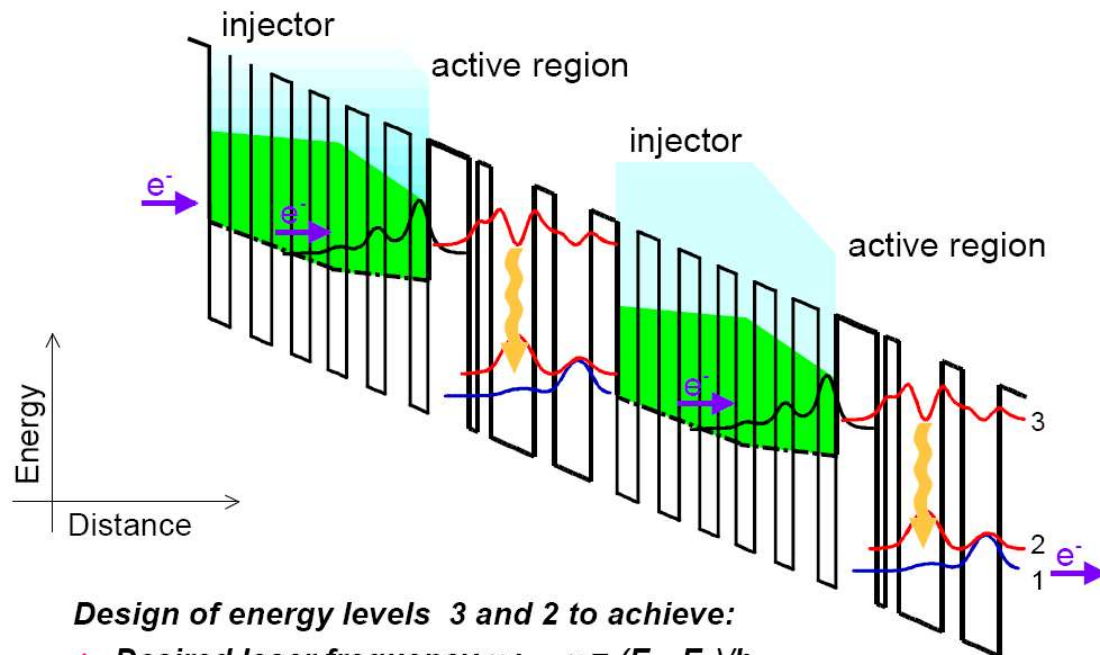
У лазерних наноструктурах в якості активного середовища використовуються квантові точки або квантові нитки

### Ідея

- Квантові точки мають дискретний енергетичний спектр, при якому не виникає теплового розширення смуги випромінювання
- Коефіцієнт підсилення має тенденцію до стабілізації
- Випромінювальний час збудженого нуль-мірного стану не залежить від температури – підвищена температурна стабільність.



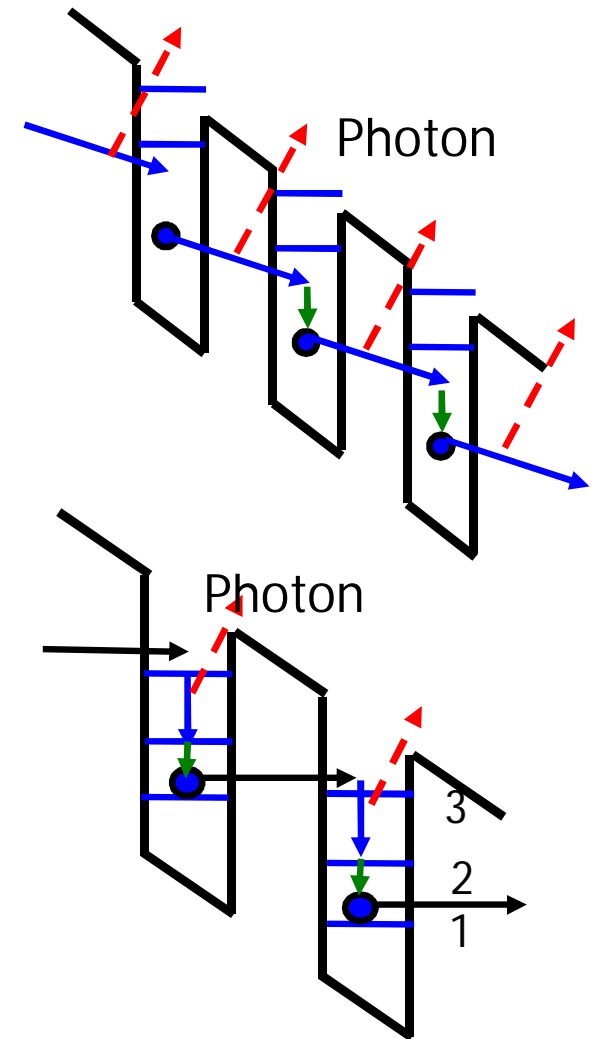
## Уніполярний квантовий каскадний лазер



**Design of energy levels 3 and 2 to achieve:**

- ◆ **Desired laser frequency  $\nu$ :**  $\nu = (E_3 - E_2)/h$
- ◆ **Light amplification:** level 3 full of electrons; level 2 empty of electrons

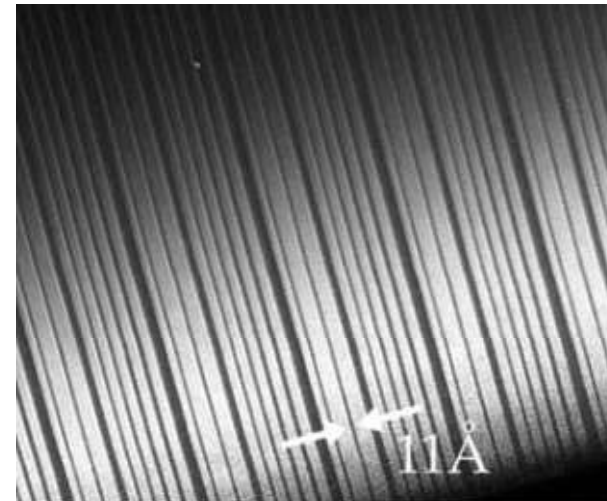
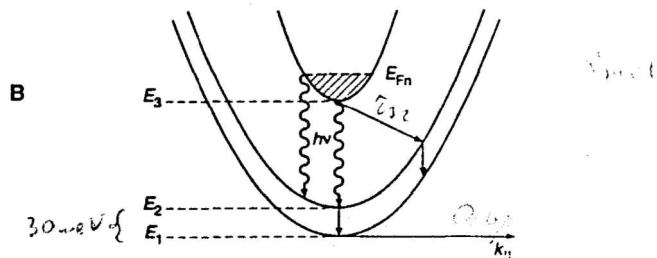
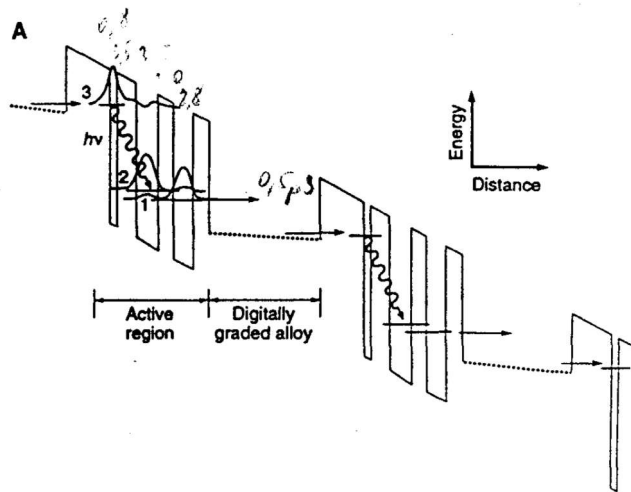
Багатошарова напівпровідникова періодична гетероструктура AlInBV (CVD)



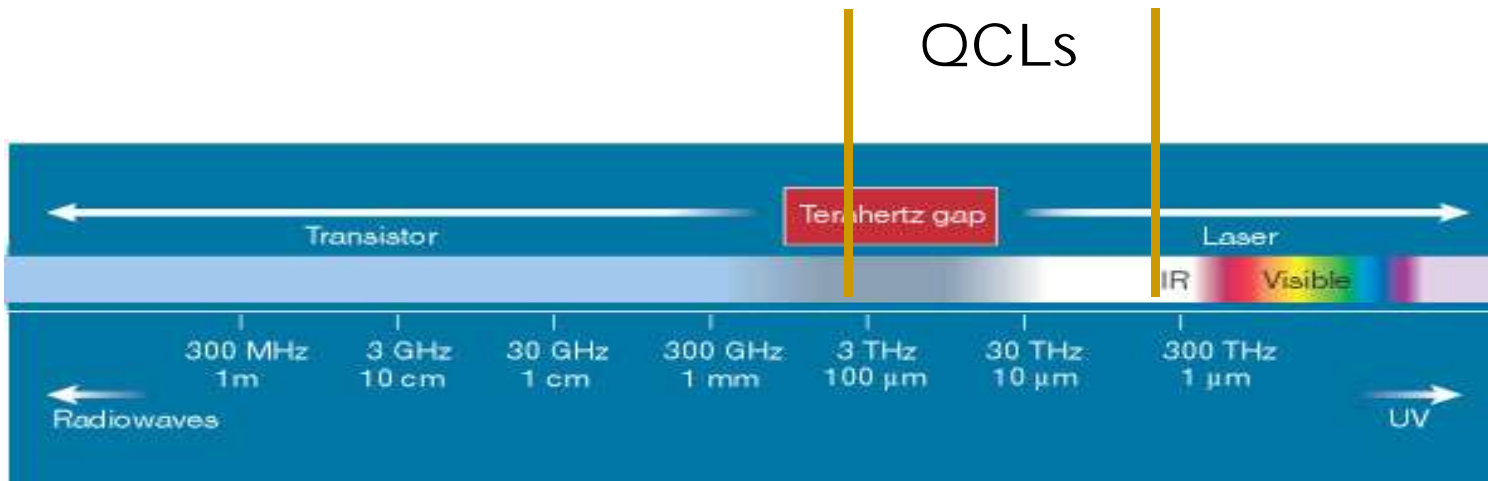
## Уніполярний квантовий каскадний лазер

### Переваги

- Енергії електронних рівнів в структурі з квантовими ямами залежать від товщини шарів і від зсуву напругою
- Частота лазерного випромінювання залежить від товщини шарів
- Частота лазерного випромінювання перестроюється прикладеною напругою
- Один електрон, проходячи через каскадну структуру, народжує багато фотонів
- Передумови для високої вихідної потужності
- Можливість створення інверсії населеності
- Довгохвильове лазерне випромінювання при кімнатній температурі



## Уніполярний квантовий каскадний лазер



$\lambda$ , $\mu\text{m}$	2.5 $\div$ 150
$\hbar\omega$ , meV	500 $\div$ 8
$f$ , THz	120 $\div$ 2

23  $\div$  85 ТГц – сенсори газів ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , ...)

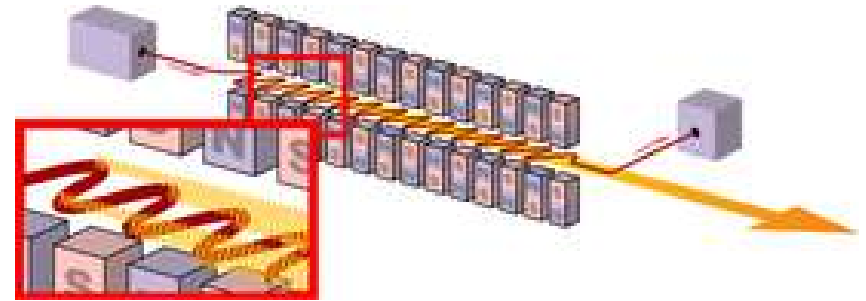
- Датчики контролю забруднення навколишнього середовища
- Контроль технологічних процесів у промисловості
- Медицина: аналіз видиху, рання діагностика виразки, раку і т.д.

23  $\div$  37 ТГц, 60  $\div$  100 ТГц - атмосферні вікна

- Оптичний зв'язок (через туман, дощ, дим - завдяки довгим хвилям)
- Круїз-контроль в автомобілях, радары

## Лазер на вільних електронах

**Лазер на вільних електронах** - вид лазера, випромінювання в якому генерується моноенергетичним пучком електронів, що розповсюджується в ондуляторі (**віглері**) - періодичній системі відхиляючих (електричних або магнітних) полів. Електрони, здійснюючи періодичні коливання, випромінюють фотони, енергія яких залежить від енергії електронів і параметрів ондулятора.

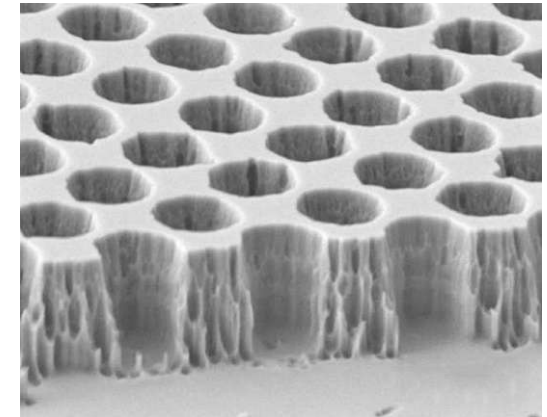
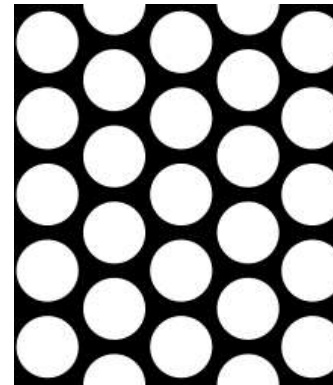
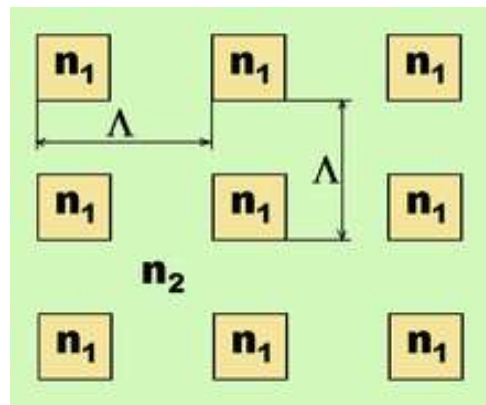
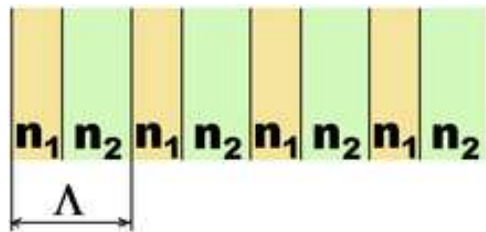


Міняючи енергію електронного пучка, а також параметри ондулятором (напруженість магнітного поля і відстань між магнітами), можна в широких межах **змінювати** частоту лазерного випромінювання, що виробляється FEL, що є головною відмінністю FEL від лазерів інших систем.



## Фотонні кристали

**Фотонний кристал** — матеріал, структура якого характеризується періодичною зміною показника заломлення в просторі **або** середовище, в якому діелектрична проникність періодично змінюється в просторі з періодом, що дозволяє брэгівську дифракцію



Фотонні кристали дозволяють отримати **дозволені** й **заборонені** зони для енергій фотонів, аналогічно напівпровідниковим матеріалам, в яких спостерігаються дозволені й заборонені зони для енергій носіїв заряду.

Якщо на фотонний кристал падає фотон, що володіє енергією (довжиною хвилі, частотою), яка відповідає забороненій зоні кристала, то він не може поширюватися в ньому і відбивається назад.

**фотонний кристал виконує роль оптичного фільтра**



# Фотонні кристали

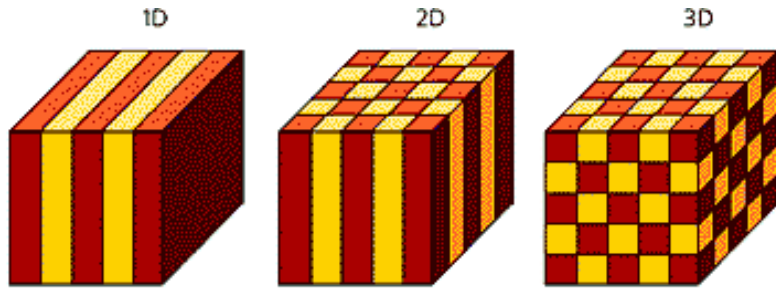


Рис. 1. Типи фотонних кристалів

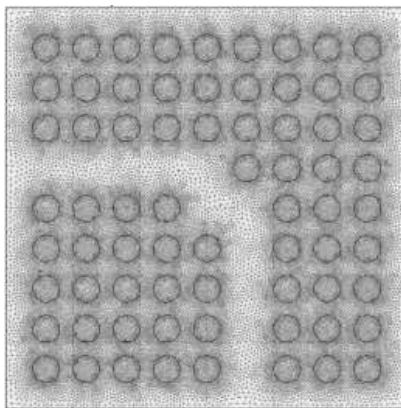


Рис. 2. Схема повороту у ФК

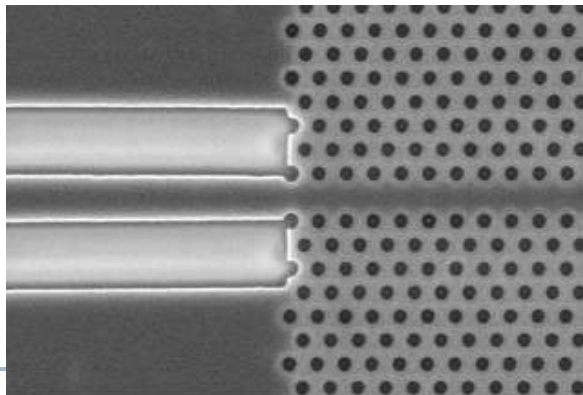


Рис. 3. Підведення інтегрального хвилеводу до ФК

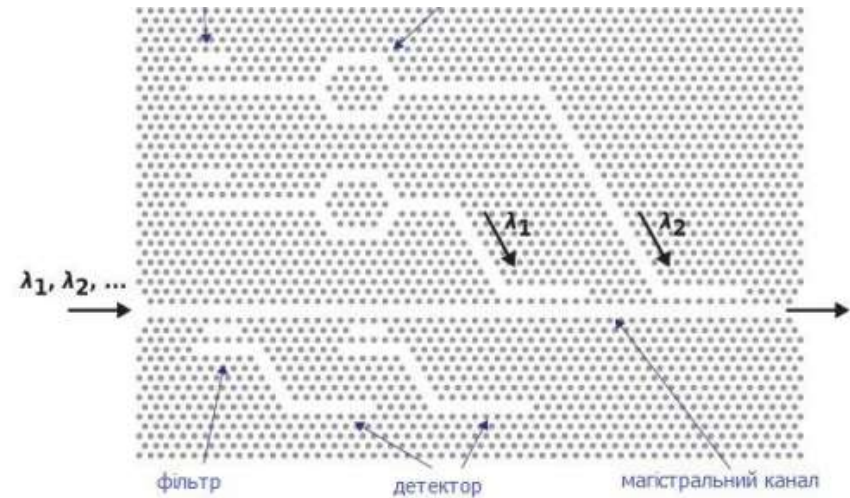


Рис. 4. Фільтрація хвиль структурою на основі фотонного кристала

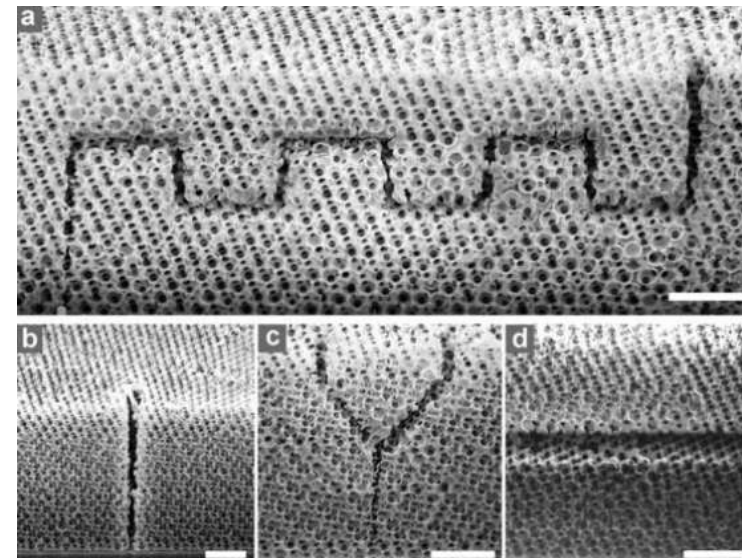
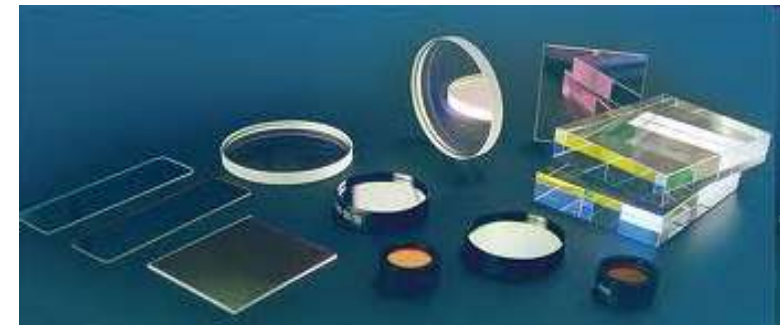


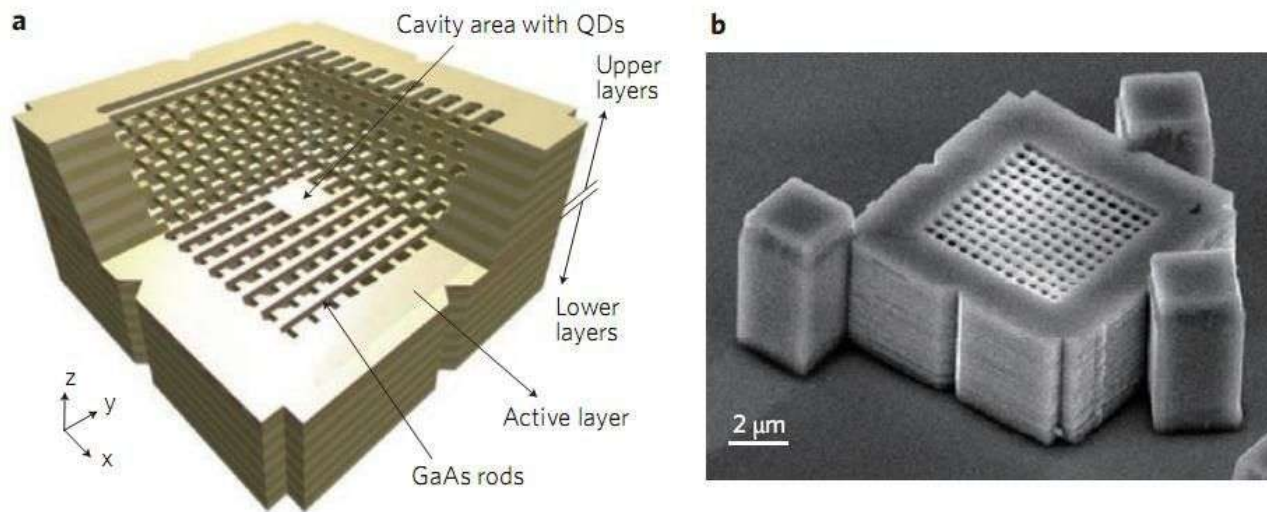
Рис. 5. Канали ФК, вигравлені методом двофотонної полімеризації

## Застосування фотонних кристалів

- Фотонні кристали передбачається використовувати для створення оптичних фільтрів, інтегральних схем так само, як напівпровідники, метали і діелектрики використовуються для створення електронних інтегральних схем
- Фотонні кристали використовують для створення перемикачів світла – оптичних транзисторів та оптичних ключів для побудови оптичних комп'ютерів
- Створення нового типу хвилеводів.



## Лазери на фотонних кристалах



У 3D фотонному нанокристалі періодична структура з діелектричного матеріалу формує **фотонну заборонену зону**, яка перешкоджає поширенню світла з певною довжиною хвилі, тобто є об'ємним дзеркалом.

Нанодрова, тобто смужки з арсеніду галію укладаються шар за шаром з періодом порядку довжини хвилі (кілька сотень нанометрів).

Активним середовищем лазера служить **квантова точка** - область арсеніду індію розміром в 1 мікромметр.

3D нанолазер стане основним елементом оптичних мікросхем, в яких електричні елементи замінені оптичними.

**Нанолазери** повинні стати заміною **транзисторів**, оптичні хвилеводи на основі фотонних кристалів замінять дроти.

## Характеристики джерел випромінювання

---

### Швидкодія.

Експериментальний параметр - **максимальна частота модуляції (МЧМ)**, визначається як частота вхідних електричних імпульсів, при якій вихідний оптичний сигнал перестає перетинати порогові значення 0,1 і 0,9 вихідної інтенсивності, залишаючись при цьому у внутрішній області .

*Для світлодіодів МЧМ досягає 200 МГц ,*

*Для лазерних діодів – МЧМ – одиниці ТГц .*

Часи наростання і спаду інтенсивності світлового сигналу несуть інформацію про смугу пропускання  $W$ . Якщо вони рівні між собою, то смуга пропускання визначається за формулою:  $W = 0,35/\tau_H$

### Деградація і час напрацювання на відмову.

При експлуатації оптичного передавача його характеристики поступово погіршуються - падає потужність випромінювання і він виходить з ладу.

Це пов'язано з деградацією напівпровідникового шару.

*Для світлодіодів до 50 000 годин і більше (5-8 років).*

*Для лазерних діодів – сотні годин*

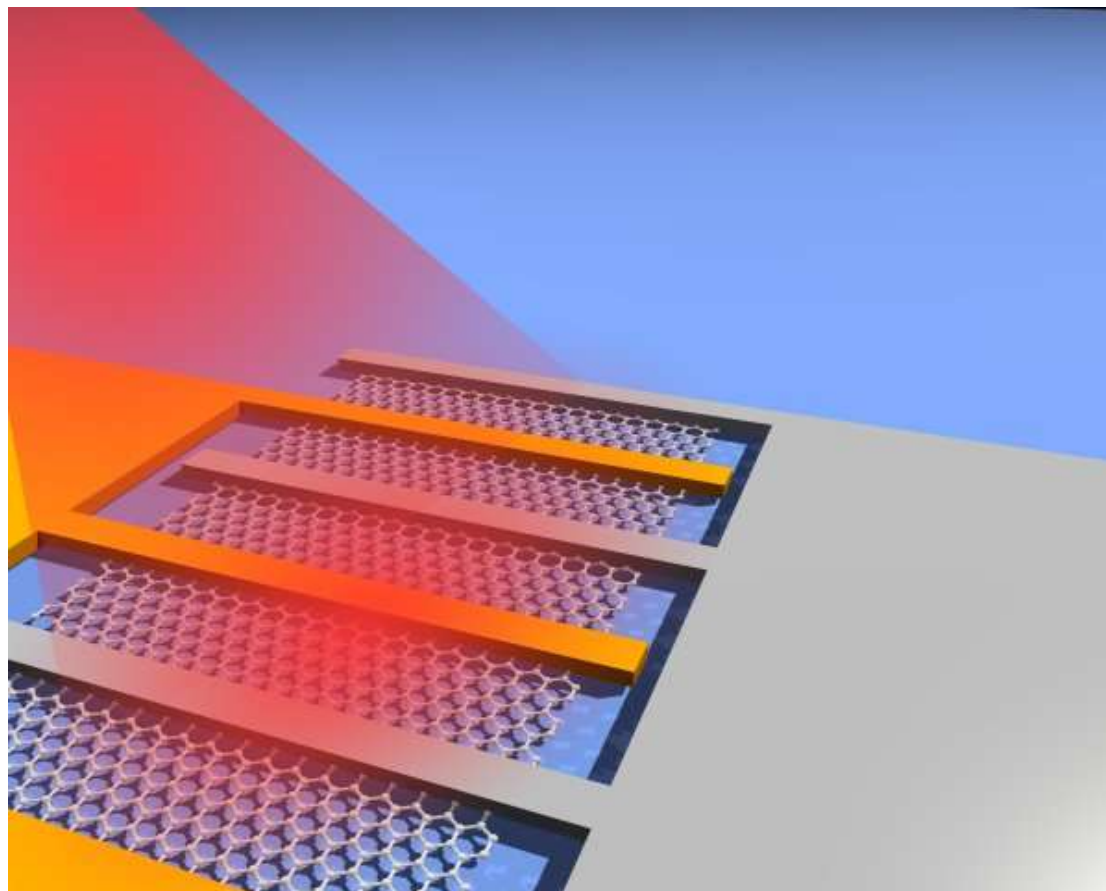


## Лекція 4

---

### Приймачі світла

1. Типи фотоприймачів (фотодетекторів)
2. Методи прийому оптичного випромінювання
3. Статистичні параметри фотоприймачів:
4. Вакуумні фотодетектори
5. Фоторезистор
6. Фотодіод.
7. p-i-n - фотодіоди
8. діоди Шоткі
9. Лавинний фотодіод
10. Лавинні фотодіоди на надгратках
11. Фототранзистор
12. Фотоприймачі на МДП-структурах
13. Польовий фототранзистор
14. Твердотільні матричні детектори
15. ПЗЗ матриці
16. Матриці фотопристроїв
17. Фільтр Байера
18. КМОН - матриці
19. Фотоприймачі на квантових точках
20. Фотоприймач на квантових ямах
21. Фотоматриці на квантових точках
22. Шуми при фотодетектуванні



### Типи фотоприймачів (фотодетекторів)

фотодіоди  
фоторезистори  
фототранзистори  
р-і-п Фотодіоди

### Процеси, що лежать в основі дії фотоприймачів:

**Генерація** носіїв під дією зовнішнього випромінювання.

**Перенесення** носіїв і збільшення їх кількості.

**Взаємодія струму** з елементами електричного кола, що забезпечує отримання вихідного сигналу.

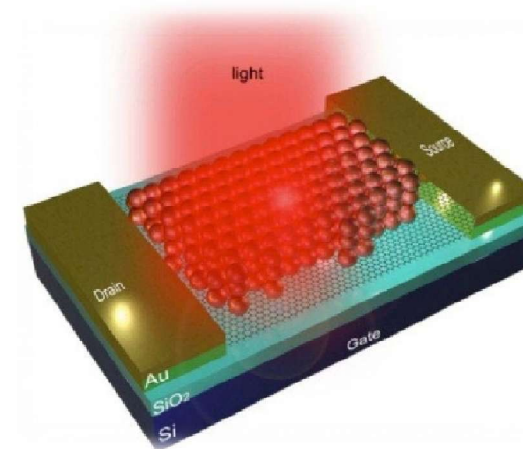
### Вимоги до фотоприймачів:

висока чутливість і швидкодія

низький рівень шумів

малі розміри

мінімальні керуючі напруги і струми.



## Методи прийому оптичного випромінювання

### Два варіанти

1. метод прямого фотодетектування
2. метод фотозміщення (когерентний прийом)

**Пряме фотодетектування** - полягає у вимірюванні фотоструму або в підрахунку числа імпульсів на виході фотодетектора, які викликаються попаданням на нього реєстрованого потоку фотонів.

Напруженість електричного поля світлової хвилі на чутливому елементі фотодетектора

$$E = E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi_0)]$$

### Квантова ефективність

**Квантова ефективність (вихід) фотодетектора** - відношення числа електронів, що генеруються за секунду до числа фотонів, що падають на приймач:

$$\eta = \frac{N_a}{N_\delta} = \frac{I_\phi / e}{P / h\nu} = \frac{I_\phi h\nu}{eP}$$

$I_\phi$  - фотострум;

$e$  - заряд електрона;

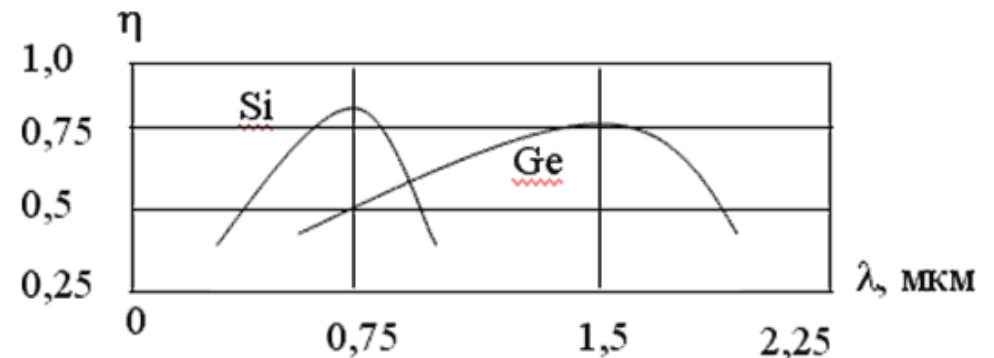
$h$  - постійна Планка;

$\nu$  - частота випромінювання;

$P$  - потужність оптичного випромінювання.

$$I = \eta e P / (h\nu).$$

Середній струм, що протікає через навантаження  $I = \frac{\eta e P}{h\nu}$



## Статистичні параметри фотоприймачів:

Якщо на виході фотоприймача змінюється струм, то фотоприймач характеризується струмовою чутливістю  $S_I$ .

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta P} \left[ \frac{A}{\hat{A}\dot{\theta}} \right]$$

**Струмова чутливість** - величина, яка характеризує зміну струму, що знімається з фотоприймача при одиничній зміні потужності падаючого оптичного випромінювання:

Якщо реєстрований сигнал на виході фотоприймача - напруга, то вводять поняття вольтової чутливості -

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta P} \left[ \frac{\hat{A}}{\hat{A}\dot{\theta}} \right]$$

**Вольтова чутливість** - величина, що показує, на скільки зміниться напруга на виході фотоприймача, при одиничному зміні потужності падаючого променевого потоку:

На фотоприймачі завжди є хаотичний сигнал, пов'язаний з флуктуаціями його мікропараметрів. Цей сигнал характеризується середнім квадратичним значенням шумової напруги:

$$\sqrt{U_m^2}$$

**Наявність шумової напруги на фотоприймачі є фізичною межею реєстрації зовнішнього сигналу.**

Параметр, що описує цей ефект, отримав назву порогової чутливості.

$$U_\phi$$

**Порогова чутливість** - це мінімальна енергія оптичного випромінювання  $P_m$ , яка викличе на виході фотоприймача сигнал, що знаходиться в заданому відношенні ( $m$ ) до шуму.

$$m = \frac{\Delta U}{\sqrt{U_m^2}} = \frac{P_m S_v}{\sqrt{U_m^2}}$$

$$P_m = \frac{m \sqrt{U_m^2}}{S_v} \quad [ \text{Вт} ]$$

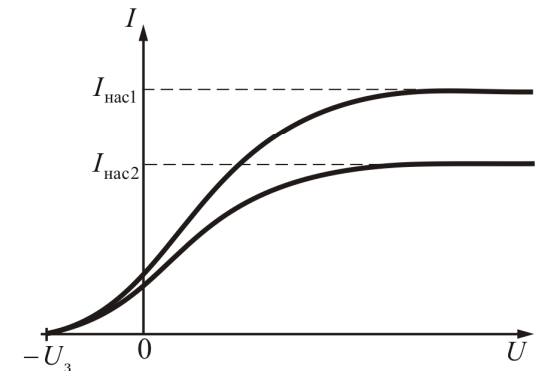
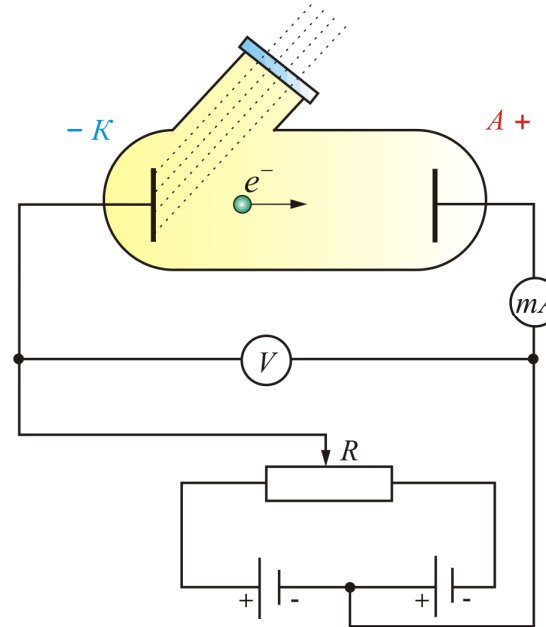
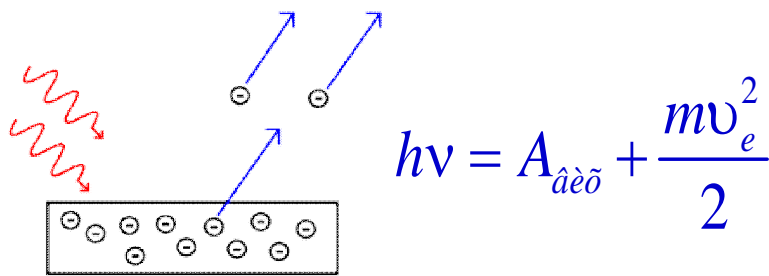
**Порогова чутливість**



## Фотоелектронна емісія

**Фотоемісія** – вивільнення електронів з поверхні металів і напівпровідників при опроміненні їх світлом.

Формула Енштейна для фотоелектронів :

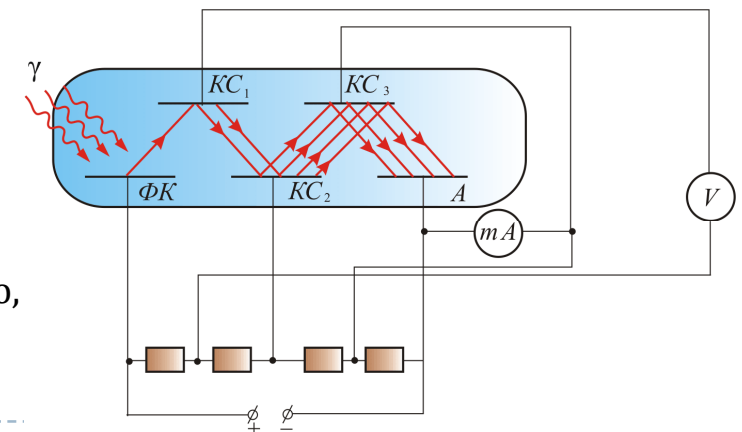


У фізичних приладах, що реєструють випромінювання, використовують **фотоелектронні помножувачі**

Використовують два емісійних ефекти: фотоефект і вторинну електронну емісію

Електрони вибиваються світлом з фотокатода (ФК).

Прискорюючись між ФК і першим емітером (КС1), вони набувають енергію, достатню, щоб вибити більше число електронів з наступного емітера



# Фоторезистор

**Внутрішній фотоефект** - зміна електричного опору напівпровідника за рахунок генерації додаткових вільних носіїв заряду під дією падаючого на нього випромінювання.

**Фоторезистор** - напівпровідниковий резистор, що змінює свій електричний опір під дією оптичного випромінювання.

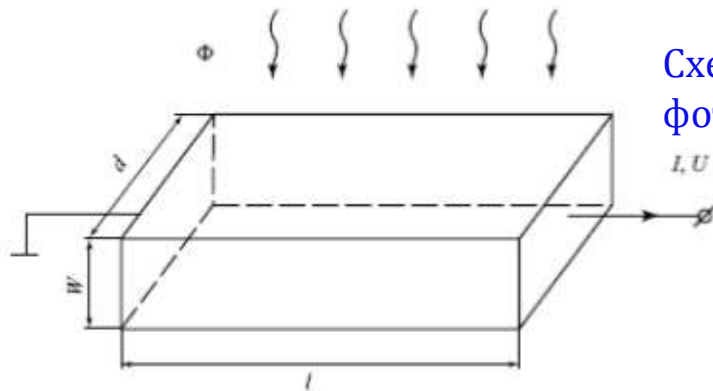
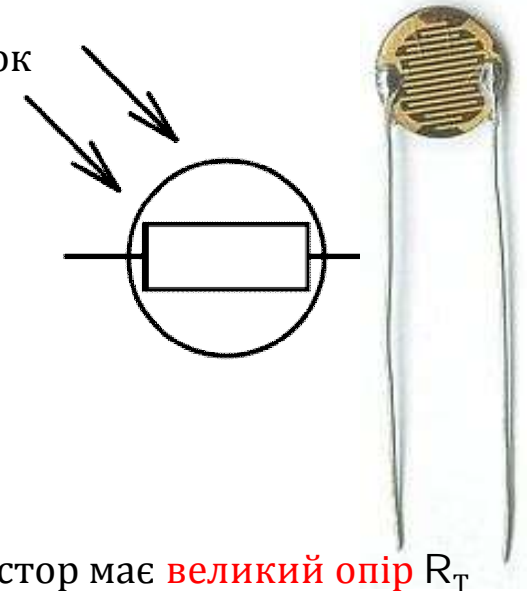
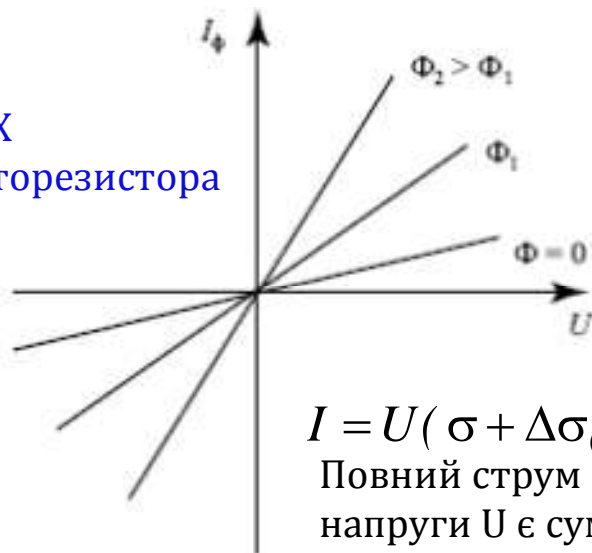


Схема фоторезистора

Якщо **опромінення немає**, то фоторезистор має **великий опір**  $R_T$  (темновий) параметр фоторезистора,  $10^4 - 10^7$  Ом.

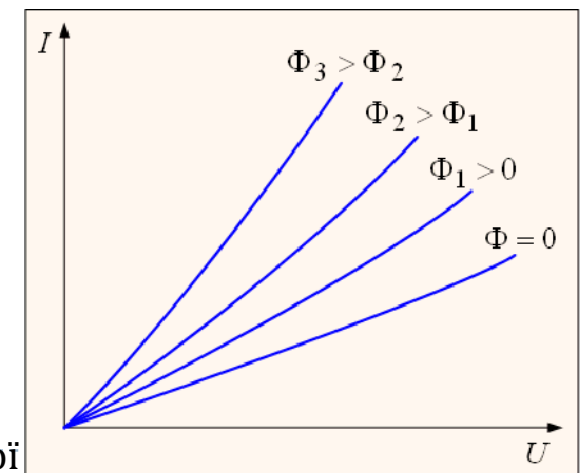
Відповідний **струм** через фоторезистор називають **темновим**

ВАХ фоторезистора



$$I = U(\sigma + \Delta\sigma_0) = I_T + I_\phi$$

Повний струм  $I$  через резистор при величині зовнішньої напруги  $U$  є сумою темнового  $I_T$  струму і фотоструму  $I_\phi$ .



## Фоторезистор

Характеристики фоторезисторів

**інтегральна чутливість  $S$**  - відношення фотоструму  $I_\phi$  до світлового потоку  $\Phi$  :

**питома чутливість** - чутливість поділена на прикладену напругу:

$$S = I_\phi / \Phi$$

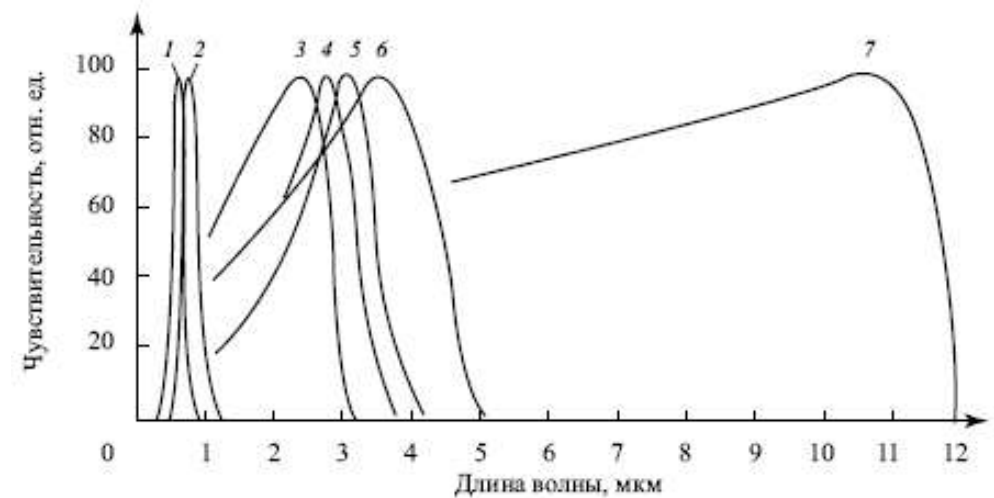
$$S_{i\phi\delta} = \frac{I}{(\hat{O}U)},$$

**Спектральна характеристика фоторезистора** -

залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла.

Для кожного фоторезистора існує свій максимум спектральної характеристики, що пов'язано з різною шириною забороненої зони використовуваних матеріалів.

Максимум спектральної характеристики може перебувати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектра.



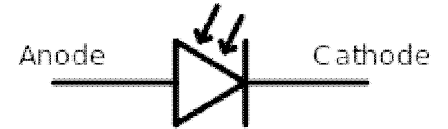
Спектральна чутливість фоторезистора

1 – CdS, 2 – CdSe, 3 – PbS, 4,5 – PbS-PbSe, 6 – PbSe, 7 - PbSnTe

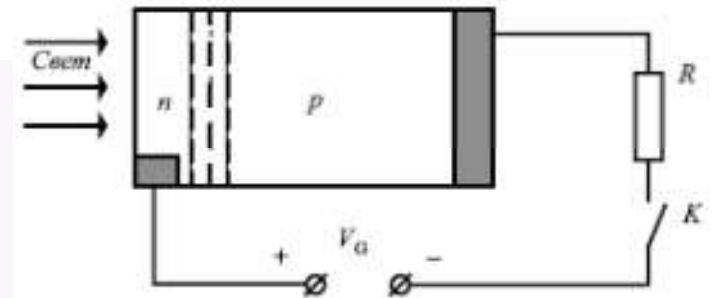
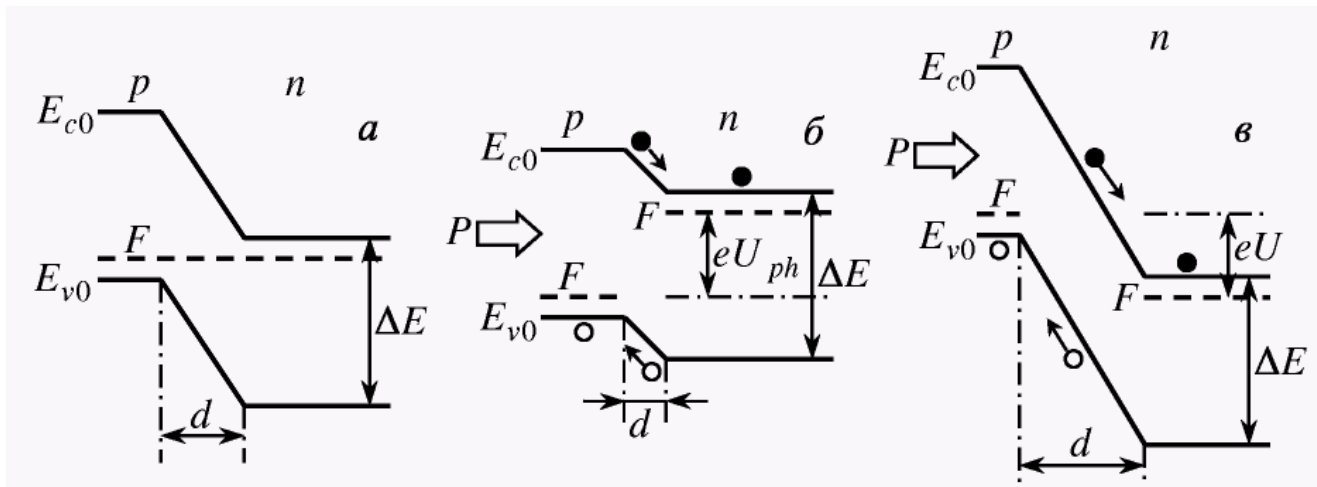


## Фотодіод

**Фотодіод** - напівпровідниковий пристрій, що містить один  $p-n$ -перехід в якому реалізується **фотогальванічний ефект**



**Фотогальванічний ефект**- виникнення фотоЕРС при генерації нерівноважних носіїв заряду світлом в області  $p-n$ -переходу



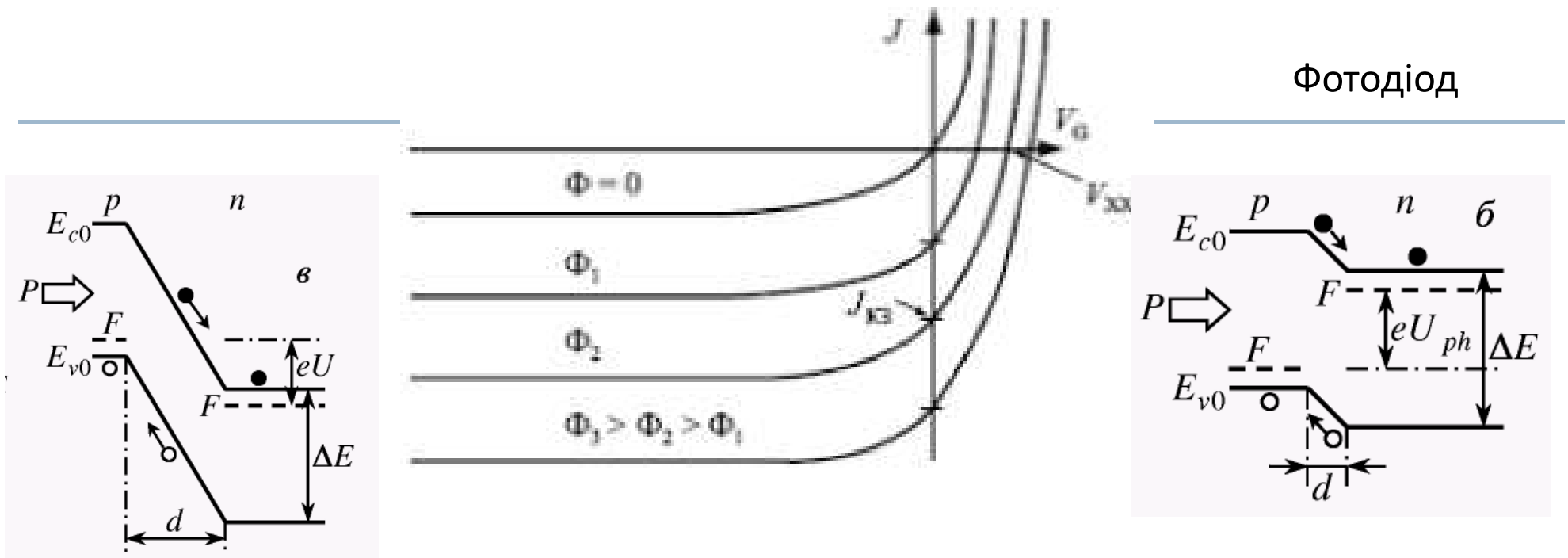
При освітленні переходу шириною  $d$  світлом в ньому **виникають пари вільних носіїв заряду**.

Пари, що виникають розділяються полем. При цьому **неосновні** носії проходять **через**  $p-n$ -перехід, а **основні залишаються** в тій області, де вони були створені світлом.

Освітлення приводить до накопичення електронів в  $n$ -області, а дірок - в  $p$ -області.

Різниця потенціалів  $U_{\phi}$  (**фотоЕРС**) **зміщує**  $p-n$ -перехід в прямому напрямі і знижує висоту потенціального бар'єру для електронів і дірок.

В результаті збалансування двох процесів в напівпровіднику встановлюється стаціонарний стан, а **величина фотоЕРС  $U_{\phi}$  стає пропорційною потужності падаючого світлового потоку**



Під впливом світлового потоку в електронно-дірковому переході і прилеглих областях відбувається **генерація** пар носіїв, **провідність** діода **зростає** і зворотний **струм збільшується**. Додаток до зворотного струму, пов'язаний з освітленням, називається **фотострумом**  $I_{\phi}$ .

Повна величина зворотного струму  $I = I_T + I_{\phi}$

Темновий струм  $I_{\delta} = I_0 [\exp(qU / kT) - 1]; U < 0$

Режим холостого ходу  $V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\delta}}{I_0} + 1\right)$

Режим короткого замикання  $I_{\hat{e}\zeta} = I_{\delta} = const \cdot \hat{O}$   
( $V_g = 0$ )

$I_0$  – зворотний струм p-n- переходу

$$I = I_{\delta} + I_0 (e^{\beta V_g} - 1)$$



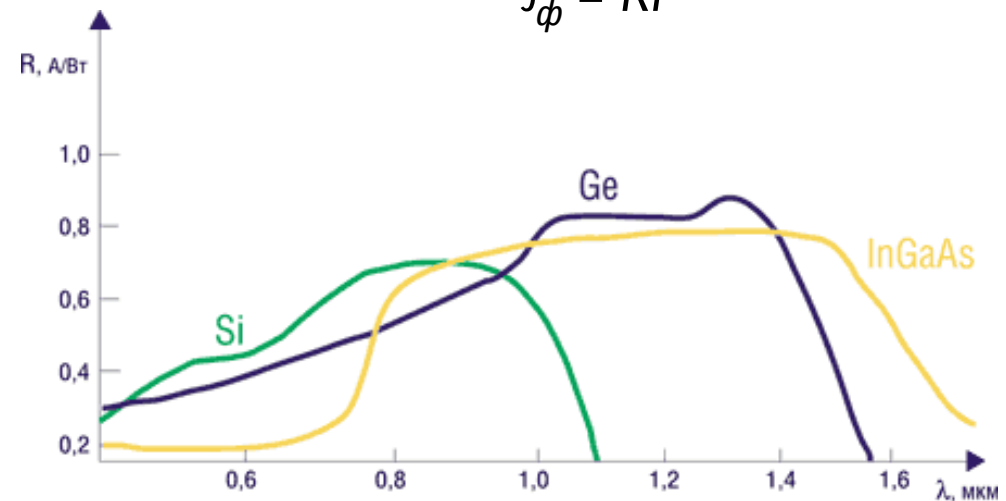
## Характеристики фотодіода

**Інтегральна струмова чутливість** – коефіцієнт пропорційності між величинами фотоструму та падаючого потоку випромінювання (в люменах або у ватах)

залежить від довжини хвилі і має максимум

$$J_{\phi} = S\Phi$$

$$J_{\phi} = RP$$



## Фотодіоди - інерційні фотоприймачі.

Інерційність залежить від ємності р-п-переходу, умов розділу електронно-діркових пар і опору навантаження.

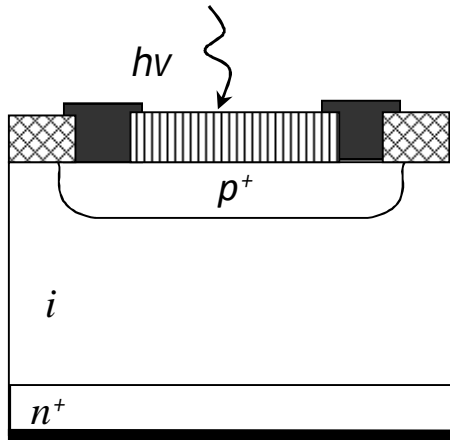
В оптичних лініях зв'язку, системах зчитування інформації потрібні фотоприймачі з високою швидкодією (менше  $10^{-9}$ ).

Тому на практиці використовують малоінерційні фотодетектори *р-і-п – фотодіоди*, структури з бар'єром Шоткі та *лавинні фотодіоди*.



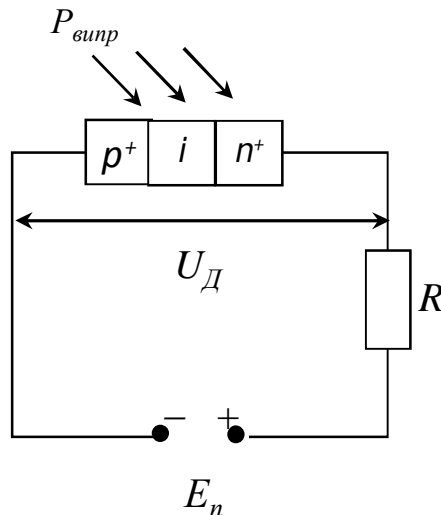
## p-i-n - фотодіоди

В p-i-n -фотодіоді на підкладці з n-типом провідності сформовано слаболегований i-шар (напівпровідник з власним типом провідності) і шар з p-провідністю товщиною до 0,3 мкм.



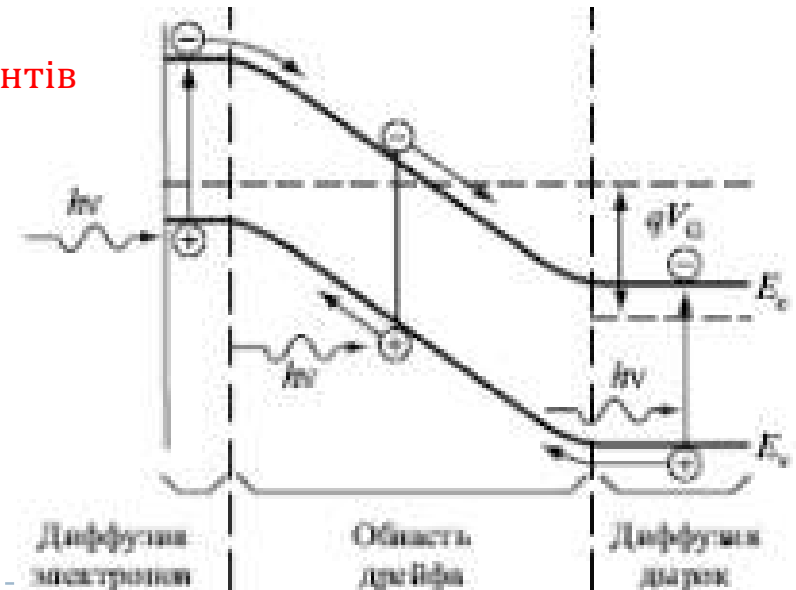
При подачі зворотної напруги між p і n областями створюється електричне поле, в результаті збідненою виявляється весь i-шар. Ємність переходу зменшується, розширюється область поглинання падаючого випромінювання і підвищується чутливість приладу. Електричне поле збідненого шару ( $E=10^3$  В/см), прискорює носії до швидкості  $10^7$  см/с). Електричне поле змушує електрони дрейфувати до позитивно зарядженої n-області, а дірки до негативно зарядженої p-області.

Результат - створюється **фотострум**



p-i-n -фотодіод є базовим елементом для всіх оптичних ліній зв'язку.

Використання i-шару дозволяє реєструвати неосновні носії заряду і забезпечує високу швидкість ( $10^7$ - $10^9$  Гц).

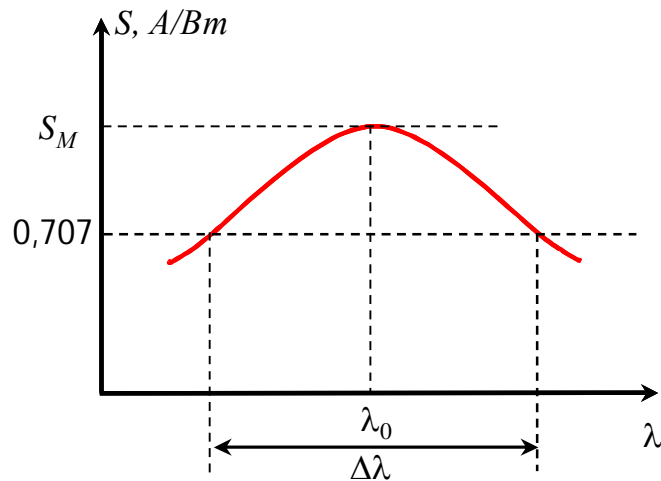


## p-i-n - фотодіоди

$N_e$  - число електронів, яке перейшло під впливом числа фотонів  $N_\phi$  з валентної зони через заборонену в зону провідності.  $N_e = N_\phi \cdot \eta_{вн}$

$\eta_{вн}$  - внутрішня квантова ефективність, що характеризує ефективність перетворення фотонів в електричний струм.

Число фотонів  $N_\phi$  за одиницю часу рівне відношенню потужності випромінювання  $P_{випр}$  до енергії фотона  $E_\phi$   $I_\delta = \frac{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}}}{E_\delta} \cdot \eta_{\hat{a}\hat{i}} \cdot q$   $E_\delta = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$



Полоса пропускання визначає рівень  $0,707 S_M$  де  $S_M$  - максимальна чутливість фотодіода на довжині хвилі  $\lambda_0$

Струмова чутливість фотодіода

$$S = \frac{I_\delta}{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{d}}} \Rightarrow S = \frac{\eta_{\hat{a}\hat{i}} q}{h\nu}$$

Фотострум може існувати якщо

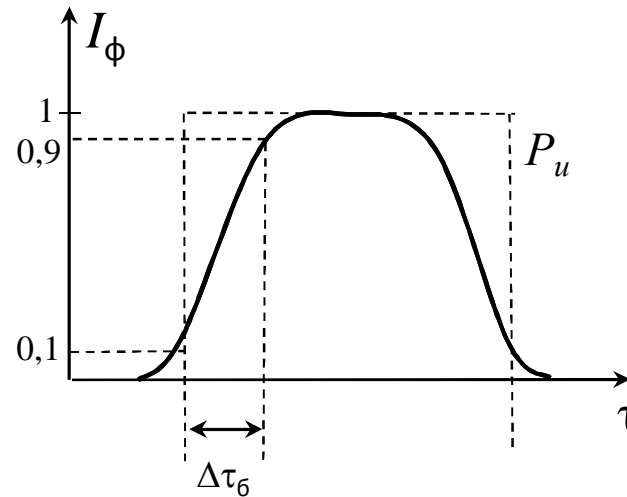
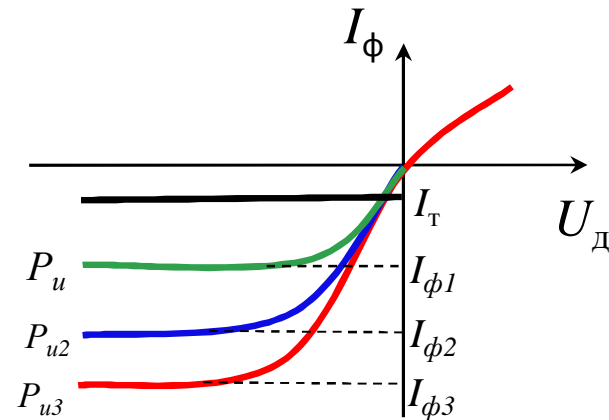
$$\lambda \leq \frac{h \cdot c}{E_g}$$

Залежність  $S = f(\lambda)$  - спектральна характеристика ФД спад  $S$  для довгих хвиль (на низьких частотах) пояснюється зменшенням  $I_\phi$  вище  $\lambda_{гр}$ , Спад для коротких хвиль (високих частот) пояснюється шунтуючою дією ємності p-n переходу



$$I_{\hat{o}} = \frac{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{o}}}{E_{\hat{o}}} \cdot \eta_{\hat{a}\hat{i}} \cdot q$$

## p-i-n - фотодіоди



Основна характеристика ФД застосовуваних у ВОЛЗ - їх **швидкодія**  $\Delta\tau_{\phi}$  - залежність часу наростання (спаду) фотоструму при впливі на діод імпульсу випромінювання. Величину визначають по рівні між  $0,1 I_{\phi m}$  і  $0,9 I_{\phi m}$ , де  $I_{\phi m}$  - максимальне значення фотоструму.

Швидкодія визначається часом дрейфу носіїв через i - область

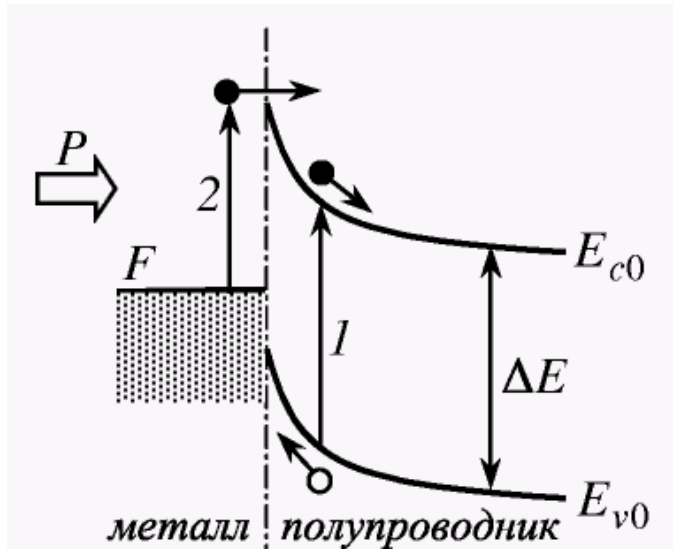
для збільшення швидкодії необхідно робити i - область вузькою.

**Але**

Для збільшення квантової ефективності i-область треба робити широкою.

За межами збідненого шару носії рухаються дифузійно з відносно низькою швидкістю ( $10^4$  см/с). За рахунок цього швидкодія знижується тому необхідно сконцентрувати поглинання випромінювання в збідненому шарі – шар p + роблять дуже тонким, а i-шар більше довжини поглинання випромінювання.

## діоди Шоткі



Якщо на електронний напівпровідник (**n-тип**) нанести шар **металу** з більшою, ніж в напівпровідника роботою виходу, то частина електронів з напівпровідника перейде в метал. Іонізована донорна домішка утворює в напівпровіднику шар позитивного просторового заряду. В металі поблизу тієї ж поверхні формується негативний об'ємний заряд надлишкових електронів. Оскільки в металі міститься велика кількість вільних електронів, товщина шару негативного об'ємного заряду буде невеликою. В напівпровіднику ж кількість електронів в зоні провідності набагато менша, тому область позитивного об'ємного заряду буде значно ширше. Наслідок - електричне поле переходу зосереджено в напівпровіднику

Для діодів Шоткі характерна розтягнена в довгохвильову зону область спектральної чутливості.

На спектральній характеристиці фотодіода Шоткі виділяються **дві** області.

**Перша** - область фотовідгуку, обумовленого генерацією вільних носіїв заряду при міжзонних переходах в напівпровіднику (перехід 1).

**Друга** - область фотовідгуку, пов'язана з міграцією електронів з металу в напівпровідник.



Використовуються кремній (Si), германій (Ge), арсенід галію (GaAs), потрібні сполуки (AlGaAs, InGaAs, GaAsP). Для отримання контактів використовуються золото (Au), срібло (Ag), платина (Pt), алюміній (Al), мідь (Cu)

Частота роботи фотодіодів Шоткі 10 ГГц і більш

## Лавинний фотодіод

**Лавинний фотодіод** - фотоприймач, в якому підвищення квантової ефективності реалізується за рахунок внутрішнього підсилення завдяки лавинному помноженню в обернено зміщеному **p-переході**.

Для реалізації лавинного множення необхідно виконати умови:

Електричне поле в переходу має бути достатньо великим, щоб на довжині вільного пробігу електрон набрав енергію більшу, ніж ширина забороненої зони  
Ширина переходу  $W$  повинна бути більшою, ніж довжина вільного пробігу

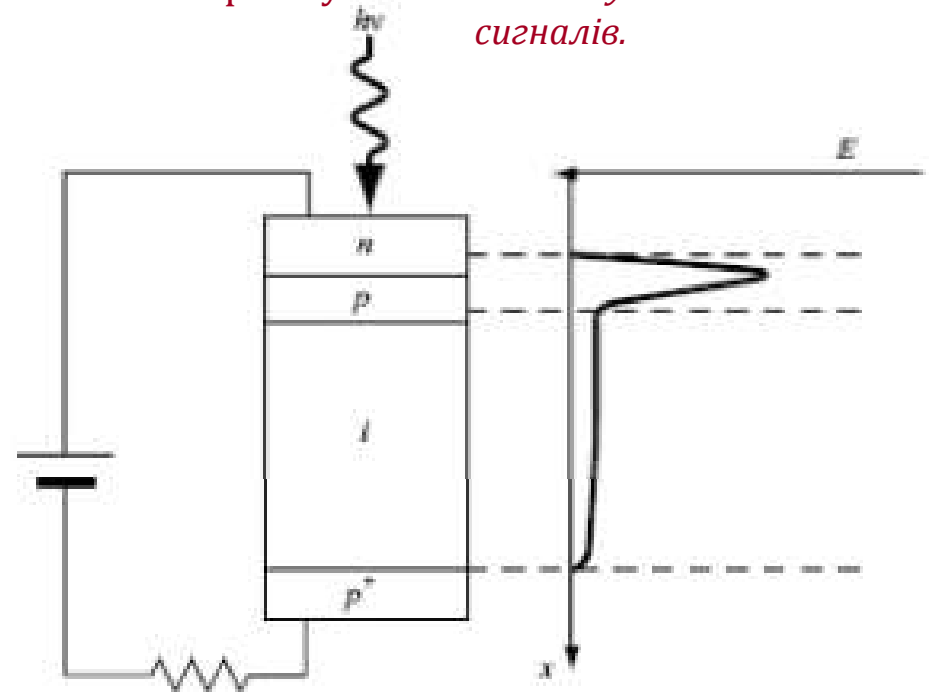
*Основний недолік – з лавинним множенням пов'язаний додатковий шум, що обмежує детектування слабких сигналів.*

Якщо до структури прикласти високу **зворотну** зворотну напругу, то прискорені електрони і дірки будуть **іонізувати** атоми ґратки напівпровідника. Вторинні електрони і дірки також прискорюються полем, викликають нові акти іонізації - *процес розмноження носіїв набуває лавиноподібного характеру*.

Процес ударної іонізації характеризується коефіцієнтом лавинного помноження

$$M = \frac{I}{I_0}$$

де  $I$  - струм через p-n-перехід в режимі лавинного помноження, а  $I_0$  - струм при малих зворотних напругах, коли помноження носіїв ще немає



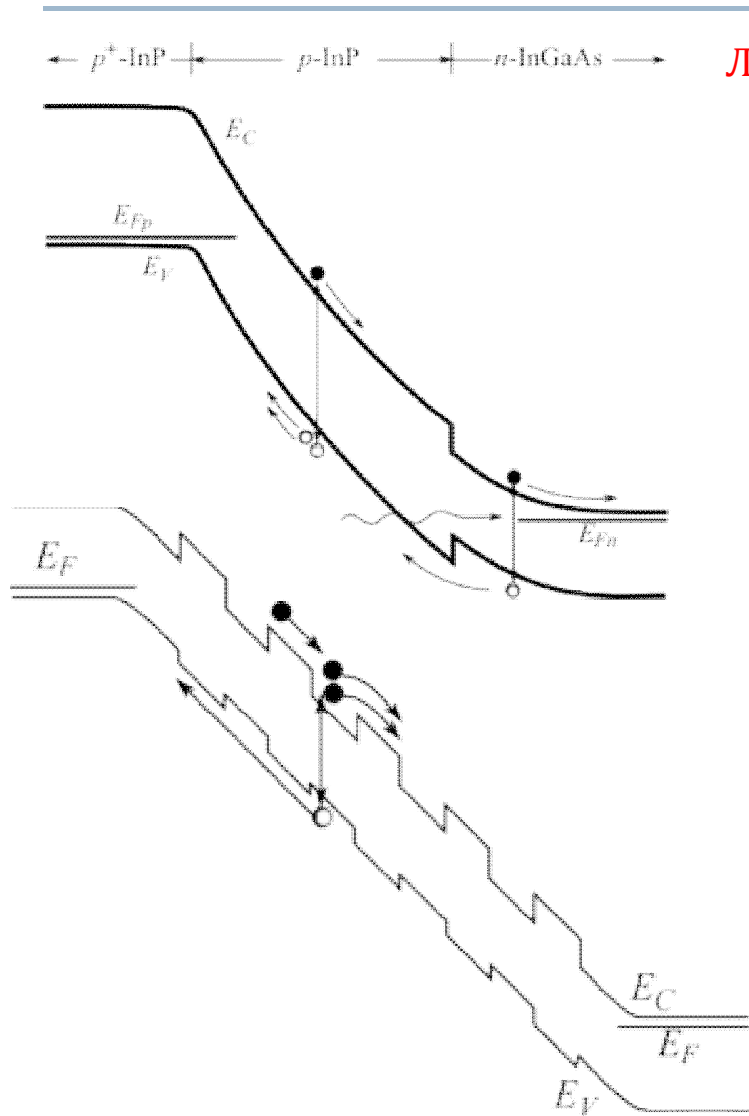
$U$  - напруга на p-n-переході,  $U_b$  - напруга лавинного пробігу.

Показник степеня  $a$  для різних речовин рівний від 2 до 6.

*Максимальна величина коефіцієнта помноження  $M$  в германієвих ЛФД досягає  $10^2 - 10^3$ , в кремнієвих -  $10^4 - 10^6$ .*

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{U}{U_b} \right)^a \right]^{-1}$$

## Лавинні фотодіоди на надгратках



Лавинні фотодіоди - фоточутливі прилади із внутрішнім підсиленням.

### Застосування надграток для побудови лавинних фотодіодів

- великі відмінності між коефіцієнтами ударної іонізації для електронів і дірок призводять до скорочення шумів.
- процес лавинного розмноження більш локалізований, що зменшує перешкоди.

Товщини окремих шарів 10-50 нм- це квантові ями

## Фототранзистор

**Фототранзистор** (ФТ) – це **p-n-p** транзистор, база якого є фоточутливим елементом.

Електричний контакт до бази **відсутній**, а управління струмом бази здійснюється шляхом зміни її освітленості.

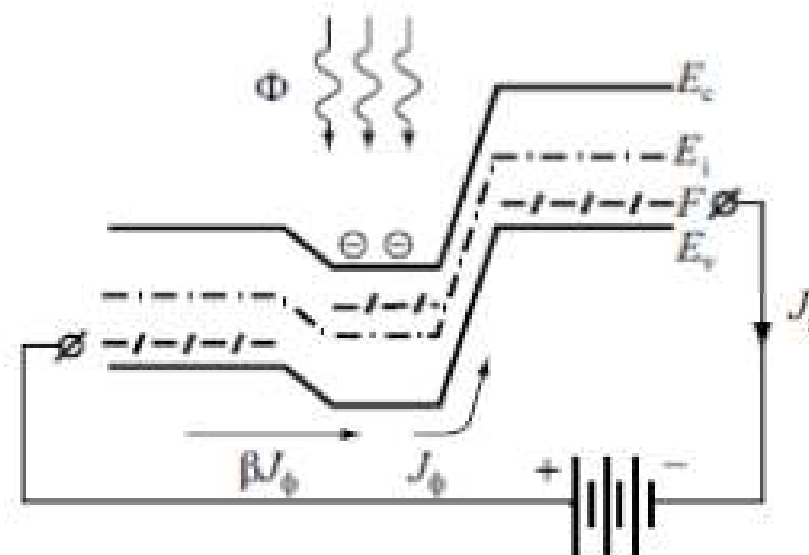
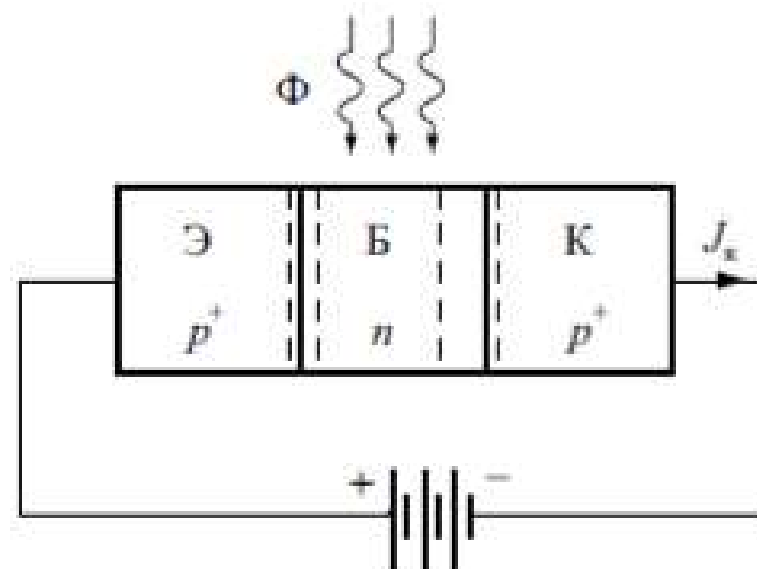
ФТ має тільки два **виводи** - емітер і колектор.

При попаданні світлового потоку на n-область бази в ній генеруються нерівноважні електрони і дірки.

Дірки будуть неосновними носіями, збільшення їх концентрації призведе до зростання дрейфової компоненти струму з бази в колектор.

Величина первинного фотоструму буде описуватися такими ж співвідношеннями, як і фотострум діода на основі p-n переходу.

Відмінність в тому, що нерівноважні носії, що беруть участь в фотострумів в ФТ, збираються в області бази, ширина якої  $W$  менша ніж дрейфова довжина дырок  $L_p$



$$J_{\kappa} = J_{\phi} \frac{2L_p^2}{W^2} + J_{k0}$$

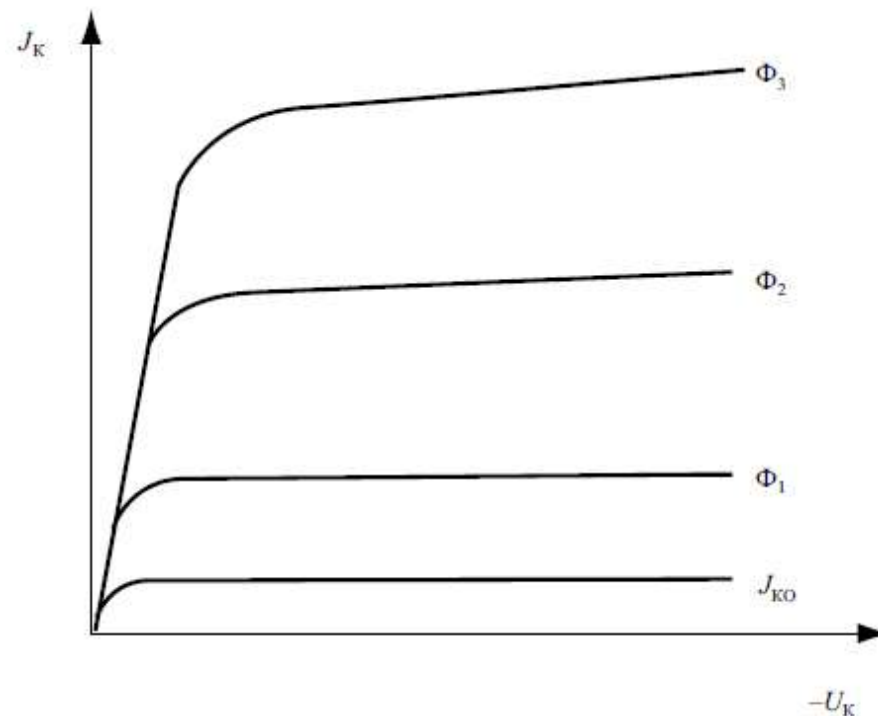
$J_{k0}$  – тепловий струм колектора

$J_{\phi}$  – фотострум

$L_p$  – дифузійна довжина області бази

$W$  – ширина бази

$$J_{\phi} = q \frac{\Delta p W}{\tau_p} = q W \eta \alpha \Phi$$



## Фотоприймачі на МДП-структурах

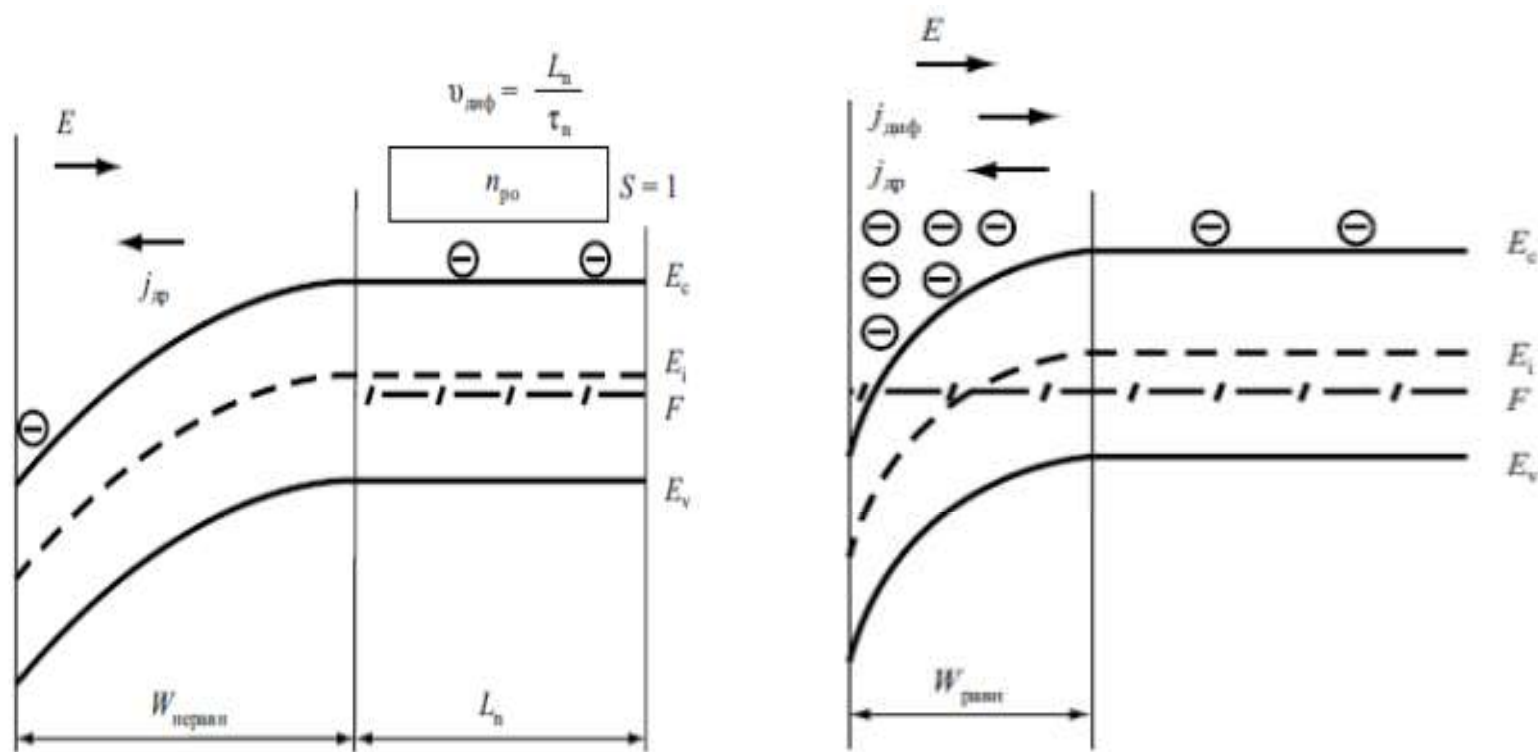
МДП -структура в стані нерівноважного збіднення є фізичною основою приладів з зарядовою інжекцією і приладів із зарядним зв'язком .

Залежно від методу вимірювання можна контролювати

зміну ємності МДН-структури

зміну заряду на електродах в процесі релаксації ємності при постійній напрузі  $V_g$

зміну напруги на затворі  $V_g$  в режимі постійного заряду  $Q_M$  на металевому електроді .



Рівноважний стан

Нерівноважний стан

## Польовий фототранзистор

### ФотоМДП - транзистори .

Польовий транзистор з каналом n- типу.

Управління струмом стоку в здійснюється за допомогою світла .

Світловий потік генерує носії заряду в області затвора і переходу затвор - канал .

Електричне поле цього переходу розділяє носії заряду.

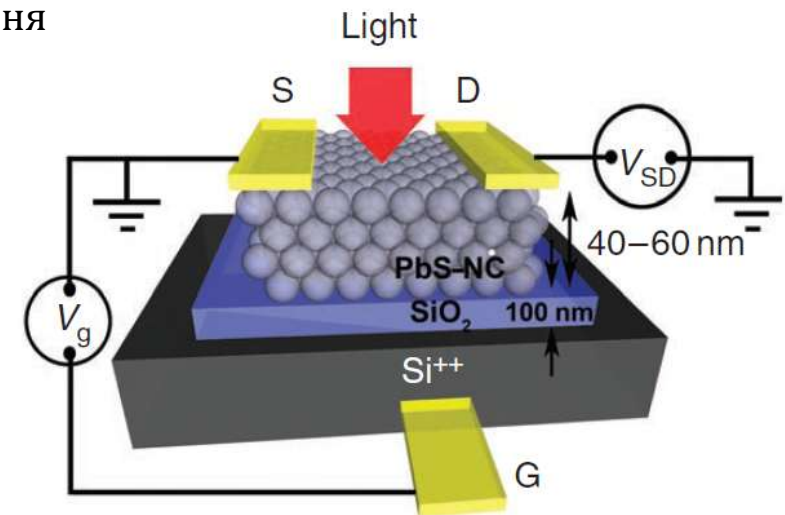
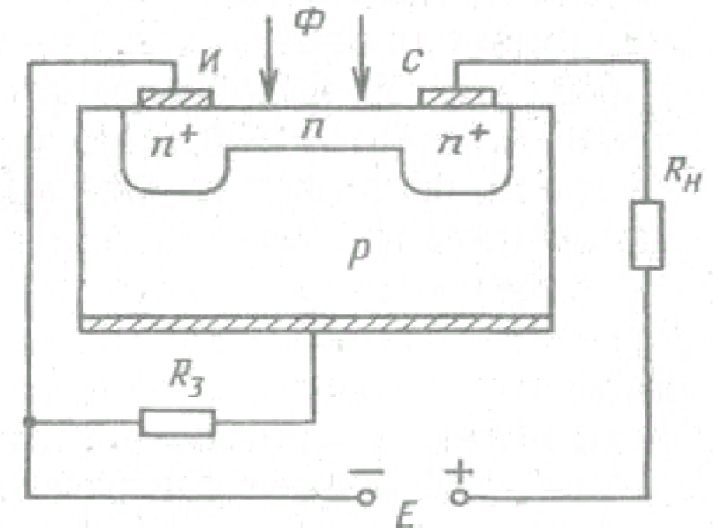
Концентрація електронів в каналі збільшується , опір каналу зменшується , струм стоку зростає.

Концентрація дірок в області затвора також зростає.

Виникає фотострум в ланцюзі затвора , який створює спад напруги на опорі .

Зворотна напруга на переході канал - затвор зменшується , ширина його також зменшується , що призводить до збільшення ширини каналу і додаткового збільшення струму стоку.

У фототранзисторах МДП з індукованим каналом за рахунок теплового впливу вдається змінювати значення порогового напруги і крутизну транзистора.





## Твердотільні матричні детектори

**Потреба** - здійснити **двокоординатну розгортку потужності** випромінювання з можливістю повтору процесу з частотою 10-1000 Гц, та здійснювати **аналіз зображень**.

**Багатоелементні приймачі випромінювання :**

1. приймачі з повною електричною розв'язкою фотоелементів
2. приймачі з внутрішніми електричними зв'язками.

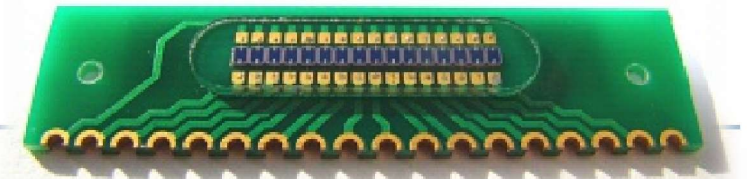
**Приймачі з електричною розв'язкою елементів** - дозволяють зчитувати інформацію з будь-якого чутливого елемента в довільному порядку.

Багатоелементні фотодіодні приймачі призначені для **перетворення двомірної оптичної інформації** від зображення в **одновимірну послідовність електричних сигналів**.

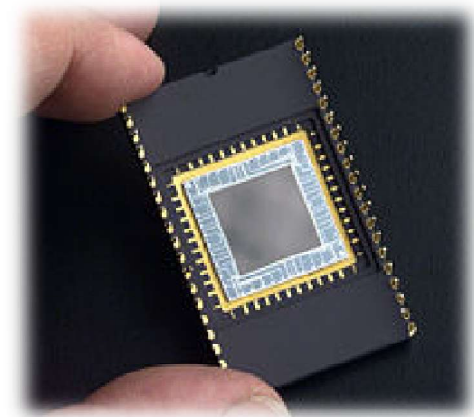
Виготовляються у вигляді лінійок та матриць.

**Лінійка** - фотодіоди розташовані в рядок з рівномірним кроком,

**Матриця** – набір лінійок



Фотодіодна лінійка (16)



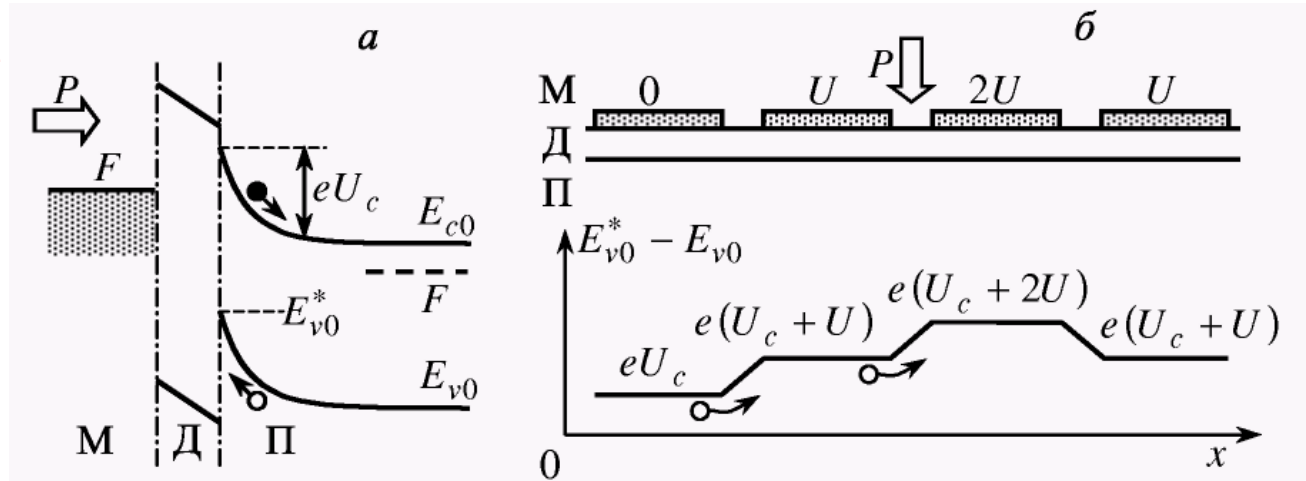
Фотодіодна матриця



Фотодіодна лінійка факса

## Твердотільні матричні детектори

Приймачі з електричними зв'язками – зчитування інформації може бути здійснене тільки шляхом послідовного доступу до чутливих елементів матриці.



прилади із зарядовим зв'язком

Нехай напівпровідник має електронний тип провідності, а робота виходу з нього менше, ніж з металу.

В цьому випадку частина електронів піде з напівпровідника в метал і між ними встановиться контактна різниця потенціалів  $U_c$ .

Глибина потенціальної ями для дірок рівна **при відсутності напруги**  $E_{v0}^* - E_{v0} = eU_c$

Глибина потенціальної ями для дірок рівна при накладанні напруги  $E_{v0}^* - E_{v0} = e(U_c + U)$

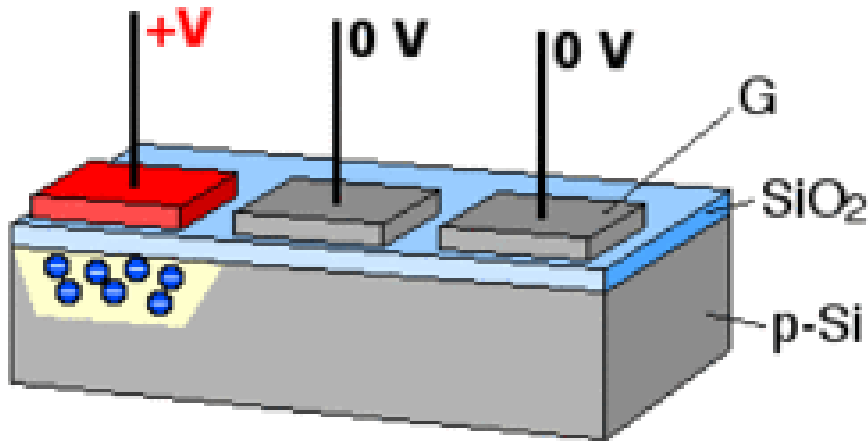
При освітленні структури в напівпровіднику виникають **нерівноважні електрони і дірки**, електрони переносяться углиб напівпровідника, а дірки накопичуються у потенціальній ямі на межі з діелектриком.

Заряд дірок, накопичений при освітленні під кожним напівпрозорим металевим електродом може бути **пересунутий уздовж рядка при подачі на сусідній електрод** більш високої напруги (дірки дифундують до більш глибокої потенційної ями).

В такий спосіб електричний сигнал може бути проведений по рядку і виведений в зовнішнє коло.....



## ПЗЗ матриці



ПЗЗ-матриця або CCD-матриця - аналогова інтегральна мікросхема, що містить двомірний масив з фотодіодів і використовує технологію приладів із зарядним зв'язком.

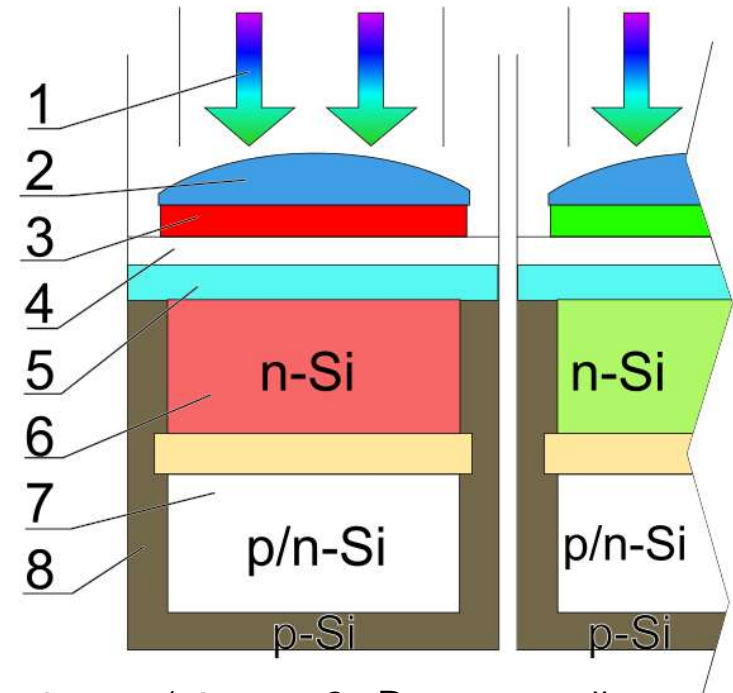
У 2009 році ці творці ПЗЗ-матриці (У. Бойл і Дж.Сміт) нагороджені Нобелівською премією з фізики.

ПЗС- матриця формується з полікремнію на кремнієвій підкладці, у якій при подачі напруги через затвори змінюються електричні потенціали поблизу електродів .

Різниця напруг на електродах створює потенціальну яму в якій накопичуються електрони , що утворилися в пікселі матриці в результаті впливу світла.

Чим інтенсивніше світловий потік під час експозиції , тим більше накопичується електронів в потенційній ямі , відповідно тим вище заряд даного пікселя.

Після експонування послідовні зміни напруги на електродах формують розподіл потенціалів, який спричиняє до перетікання заряду в заданому напрямку до вихідних елементів матриці .



- 1 - фотони світла, що пройшли через об'єктив фотоапарата;
- 2 - мікролінза субпікселя;
- 3 - R - червоний світлофільтр субпікселя, фрагмент [фільтра Байера](#);
- 4 - прозорий електрод з кремнію або оксидів індію та олова;
- 5 - оксид кремнію;
- 6 - кремнієвий канал n-типу: зона генерації носіїв - зона внутрішнього фотоефекту;
- 7 - зона потенціальної ями, де збираються електрони;
- 8 - кремнієва підкладка p-типу.

## Матриці фотопристроїв



Матриця складається з окремих пікселів, кількість яких визначає роздільну здатність при певному фізичному розмірі матриці .

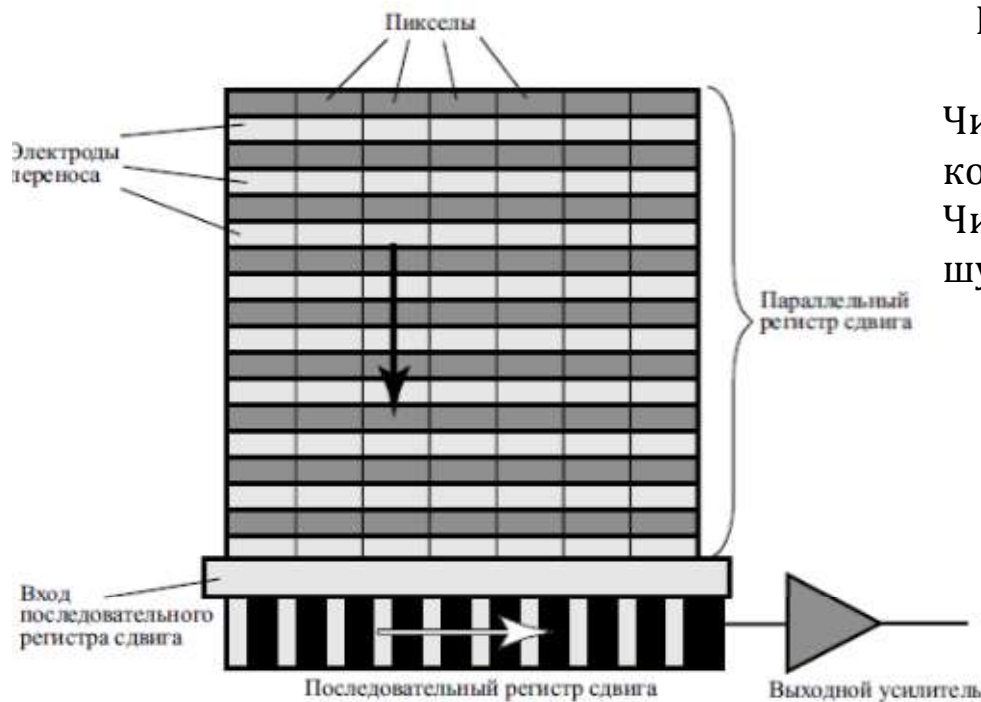
На матриці фотоапарата по горизонталі 2592, а по вертикалі - 1944 пікселів, то всього пікселів 5038848 , матриця 5-мегапіксельна .

Canon EOS 5D Mark II матриця 22М (36 x 24 мм) .

Матриця характеризується **рівнем шумів**.

Чим вища густина пікселів, тим менша площа кожного конкретного пікселя і тим менше фотонів він вловлює. Чим менше фотонів тим менше співвідношення сигнал / шум - чутливість камери знижується.

**фізичні розміри матриці визначають якість фотознімків, а максимальна величина знімка залежить від кількості пікселів.**



## Фільтр Байера

**Фільтр (Шаблон) Байера** - двомірний масив кольорових фільтрів, якими накриті фотодіоди матриць і складається з 25% червоних, 25% синіх і 50% зелених елементів, розташованих за певною схемою.

### Причина застосування

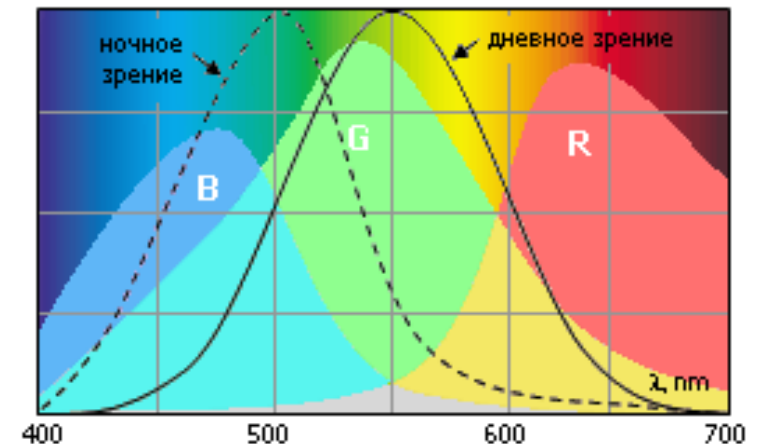
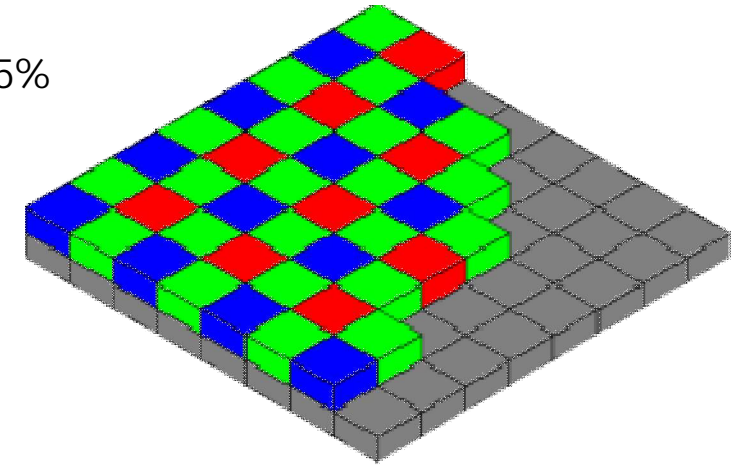
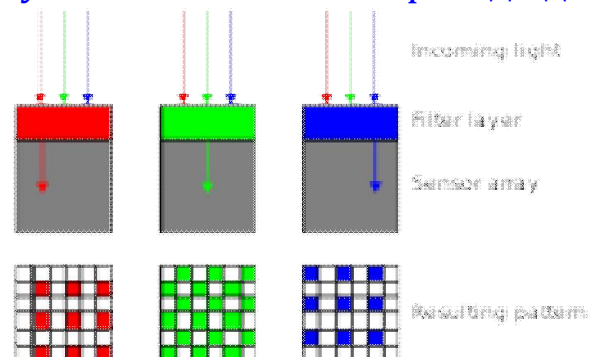
Напівпровідникові фотоприймачі приблизно однаково чутливі до всіх кольорів видимого спектру

Фотоприймач накривається світлофільтром одного з первинних кольорів : червоного, зеленого , синього ( модель RGB) .

**Наслідок** - фотоприймач сприймає лише 1/3 колірної інформації ділянки зображення, а 2/3 відсікається фільтром.

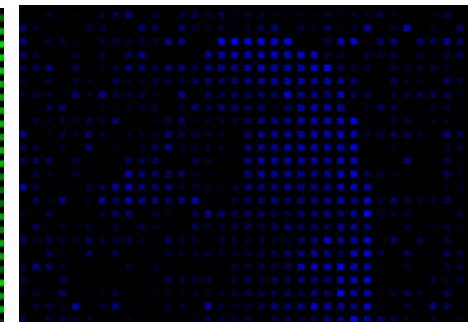
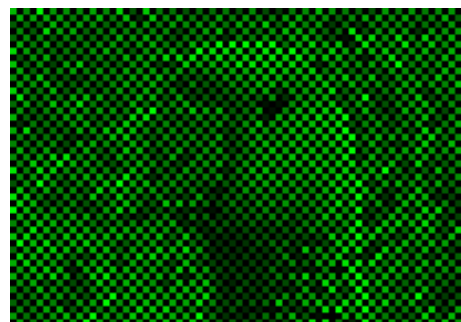
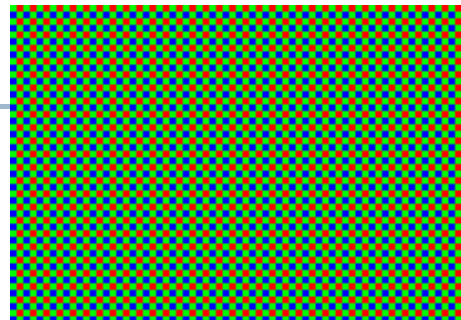
Для отримання решти колірних компонент використовуються дані з сусідніх пікселів - компоненти кольору розраховуються процесором камери на основі інтерполяції даних з сусідніх пікселів

У формуванні кінцевого значення кольорового пікселя бере участь 9 або більше фотодіодів матриці .

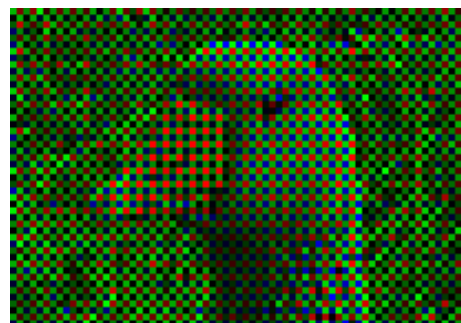




## Фільтр Байера



Процесор може застосувати операції :  
підвищення чіккості , зміни контрастності , яскравості,  
зменшення цифрового шуму.  
У професійних фотокамерах функції корекції  
зображення відсутні або їх можна вимкнути.



## Матриці фотопристроїв

Типи матриць залежно від виду світлофільтру –

RGB (найпоширеніший вид),

RGBW (підвищення чутливості до освітлення),

RGBE з фільтрами Баєра (наближеність кольорів до природних).

Типи матриць залежно від застосовуваної технології

ПЗЗ матриці (CCD),

КМОН матриці (CMOS).

КМОН-матриця - світлочутлива матриця, виконана на основі польових фототранзисторів з ізольованим затвором з каналами різної провідності.

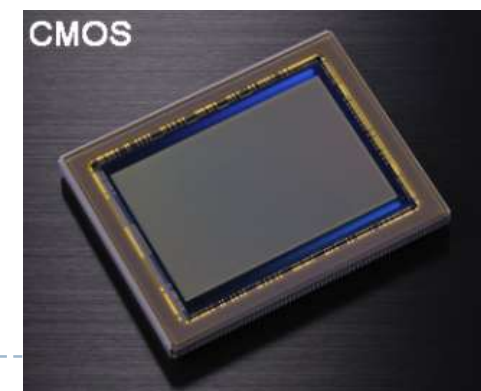
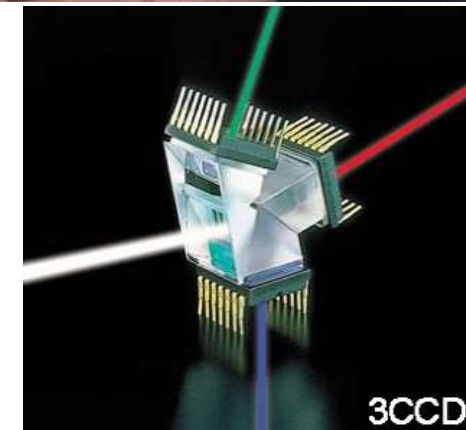
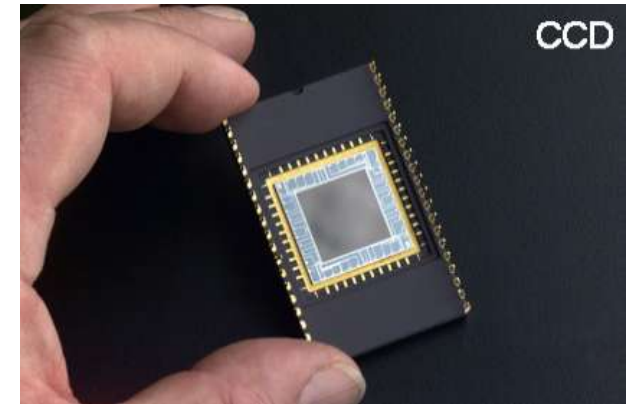
Різниця між CCD і CMOS.

ПЗЗ – спочатку оптична інформація повністю збирається в аналоговій версії і тільки потім оцифровується, якість зображення вища.

CMOS (комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник, КМОП) - кожен піксель оцифровується окремо, менше енергоспоживання і ціна, особливо при виробництві матриць великих розмірів, порівняно гірша якість зображення.

Технологія Active Pixel (APS) - до кожного пікселя доданий підсилювач, АЦП перетворення прямо в пікселі – прорив технології в 2008 році

*В сучасних фотоапаратах і телефонах в більшості CMOS матриці.*



### Переваги КМОП матриць –

---

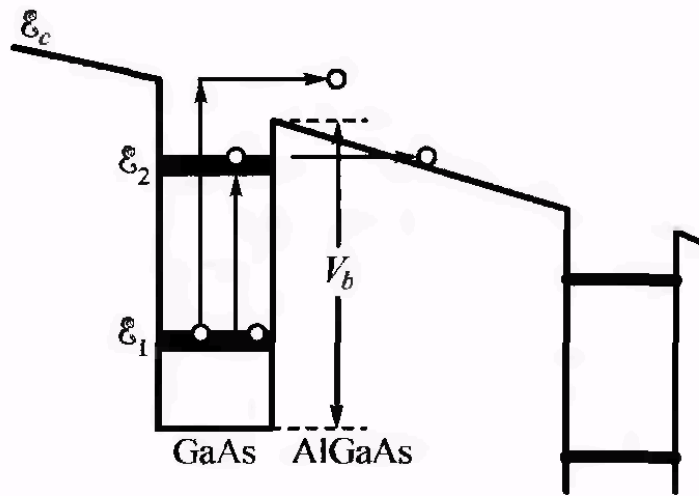
- низьке енергоспоживання в статичному стані (застосовування в складі енергонезалежних пристроїв - датчики руху і системи спостереження, що знаходяться в «очікування події» .
- технологічна єдність з іншими, цифровими елементами апаратури- можливість об'єднання в одному кристалі аналогової , цифрової та обробної частини ( КМОП- технологія включає процес фіксації та обробки сигналів), що є основою для мініатюризації камер і зниження їх вартості .
- за допомогою механізму довільного доступу можна виконувати зчитування обраних груп пікселів . (кадроване зчитування )- дозволяє зменшити розмір захопленого зображення і збільшити швидкість зчитування в порівнянні з ПЗС- сенсорами.
- можливість застосовувати одну й ту ж матрицю в різних режимах (швидко зчитуючи тільки малу частину пікселів , можна забезпечити якісний режим живого перегляду зображення на вбудованому в апарат екрані з відносно малим числом пікселів), можливість вести репортажну швидкісну зйомку з меншим розміром кадру і роздільною здатністю .
- підсилювальні схеми можуть бути розміщені в будь-якому місці по ланцюгу проходження сигналу (можливість створення підсилювальних каскадів і збільшувати чутливість в умовах поганого освітлення).
- можливість зміни коефіцієнта підсилення для кожного кольору, зокрема , баланс білого.
- дешевизна виробництва порівняно з ПЗС- матрицями , особливо при великих розмірах матриць .

### Недоліки КМОП матриць –

- фотодіод займає меншу площу елемента матриці, в порівнянні з ПЗС матрицею, тому матриці КМОН мають дещо нищу світлочутливість, крім того величина ж вихідної напруги залежить не тільки від параметрів фотодіода , а й від властивостей кожного елемента пікселя- виникає проблема розкиду світлочутливості і коефіцієнта контрасту пікселів матриці .
- наявність на матриці електронних елементів створює додатковий нагрів пристрою в процесі зчитування і приводить до зростання теплового шуму.



## Фотоприймачі на квантових точках



### Ідея

Гетероепітаксіальна структура, що складається з шарів, товщина яких кілька постійних ґратки матеріалу.

У таких шарах спостерігаються ефекти розмірного квантування.

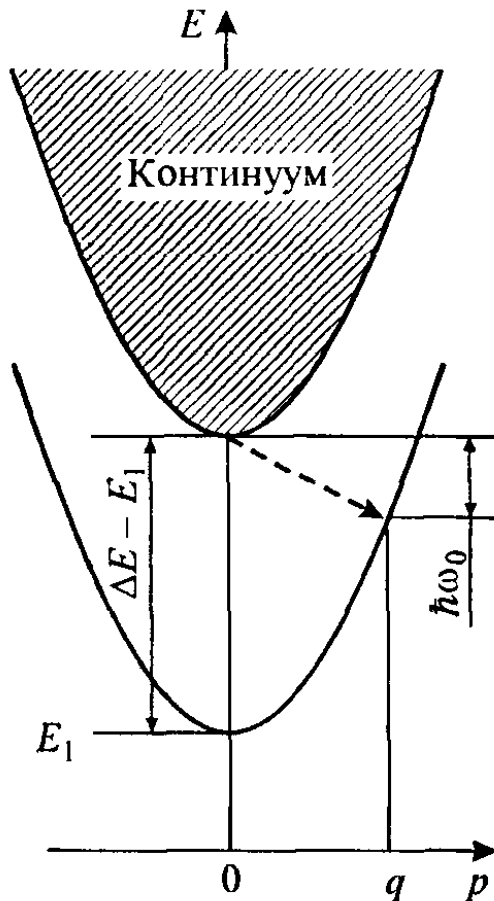
Структури мають властивості домішкових фотопровідників.

Фотопровідність здійснюється за рахунок збудження електронів і дірок з шарів з квантовими ямами в стан над бар'єром і подальшим дрейфом у зовнішньому електричному полі.

### Переваги

- У таких структурах фотоактивні носії в шарах строго впорядковані і розділені потенціальними бар'єрами, які перешкоджають протіканню наскрізного темнового струму.
- Зміна геометрії квантоворозмірних шарів дозволяє змінювати спектральні характеристики приладів.
- Фотопровідність в структурах з квантовими ямами забезпечує фотоіонізацію електронів і дірок через потенціальний бар'єр, тому не має принципового значення використовуваний матеріал.

## Фотоприймач на квантових ямах



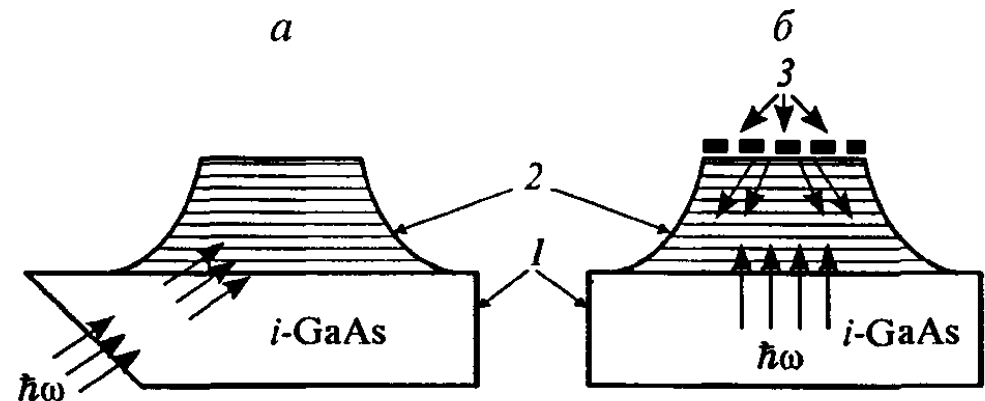
Процес захоплення нерівноважного електрона в квантову яму з випусканням оптичного фонуна.

Процеси оптичної іонізації квантових ям, можуть використовуватися для створення приймачів інфрачервоного випромінювання.

**Принцип приймача** : викид носіїв в зону провідності широкозонного НП збільшує провідність в напрямку, перпендикулярному шарам гетероструктури.

По своїй дії приймач нагадує домішковий фоторезистор, де в ролі центрів виступають квантові ями. В якості часу життя нерівноважних носіїв виступає характерний час захоплення в квантову яму.

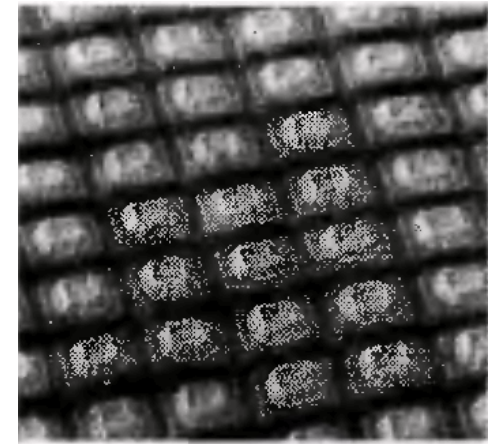
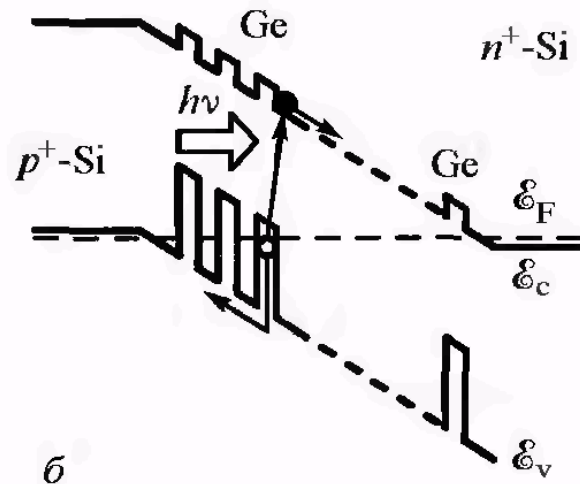
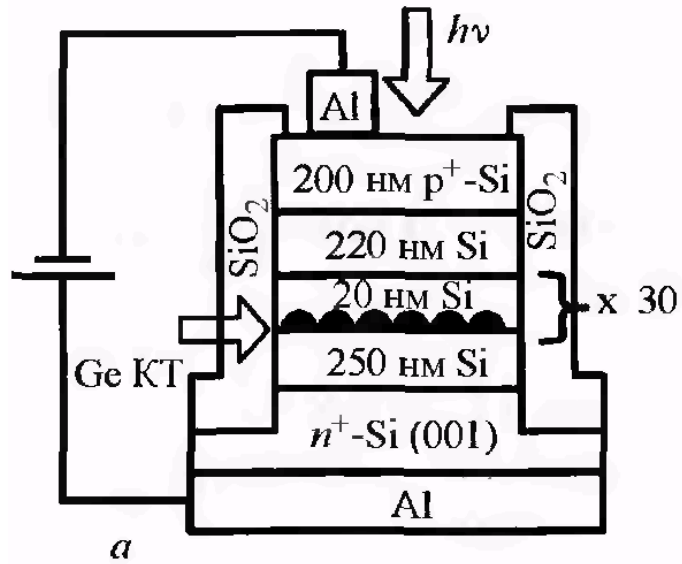
У порівнянні зі звичайним часом життя, пов'язаним із захопленням на рекомбінаційних центри він менший на два порядки і залежить від характеристик ями



Способи введення випромінювання в фотоприймач з квантовими ямами. а - через скошений торець підкладки, б - за допомогою дифракційної решітки.

1 - підкладка, 2 - фоточутлива структура з квантовими ямами, 3 - дифракційна решітка

## Фотоматриці на квантових точках



Фотоприймач з квантовими точками на основі р-і-п-структур (кремній з вбудованими квантовими точками германію)

## Шуми при фотодетектуванні

---

До **фундаментальних** (неусувних) видів шумів відносяться тепловий, дробовий та фотонний шуми.

---

**Тепловий шум** (джонсонівський шум, шум Найквіста) обумовлений хаотичним тепловим рухом носіїв заряду, внаслідок чого на кінцях будь-якого омичного опору виникає напруга, середньоквадратичне значення якої визначається формулою Найквіста:

$$U_n^T = \sqrt{4kT \Delta f R_i}$$

$\Delta f$  - ширина смуги реєстрованих частот,  $R_i$  - внутрішній опір фото-детектора.

Спектр теплового шуму рівномірний (білий) до частот порядку 100 ГГц.

---

**Дробовий шум** (шум Шоткі) обумовлений тим, що електричний струм – дискретний потік заряджених частинок, що створює на навантаженні з опором  $R$  шумову напругу, середньоквадратичне значення якої визначається:

$$U_n^I = R \sqrt{2eI \Delta f}$$

де  $I$  - середнє значення струму.

Спектр дробового шуму рівномірний.

---

**Фотонний шум** обумовлюється флуктуаціями числа фотонів, що потрапляє на фотодетектор за одиницю часу.

---

**Поріг чутливості фотодетектора** - значення падаючої на детектор оптичної потужності, при якому сигнал рівний середньоквадратичному значенню шуму в заданій смузі частот.

---



**Оптоелектронна пара** (оптрон)- оптоелектронний елемент, що містить джерело і приймач випромінювання, оптично і конструктивно пов'язані між собою.

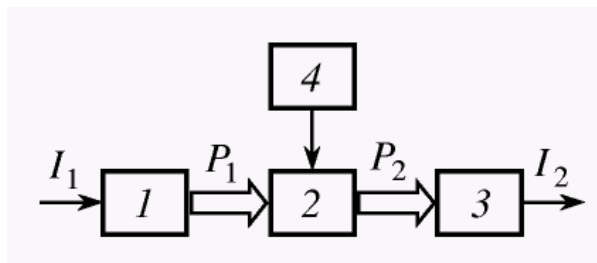


Схема оптрона:

- 1 – джерело випромінювання;
- 2 – оптичний канал;
- 3 – приймач випромінювання;
- 4 - управляючий елемент

Вхідний електричний сигнал  $I_1$  перетворюється джерелом випромінювання 1 в світловий потік  $P_1$ , який передається по каналу 2 на фотодетектор 3 де відбувається зворотне перетворення світлового потоку в електричний сигнал  $I_2$ .

Оптичний канал може бути керованим (електрооптичні ефекти). В загальному випадку світловий потік  $P_1$  може бути перетворений в світловий потік  $P_2$  за допомогою елемента управління 4

Оптон є чотирьохполюсником, його властивості визначаються трьома характеристиками – **вхідною**, **передавальною** і **вихідною**.

**Вхідна** - вольт-амперна характеристика випромінювача

**Вихідна** – вольт-амперна характеристика фотоприймача при заданому струмі на вході оптрона.

**Передавальна** характеристика - залежність струму на виході оптрона від струму на його вході

**Переваги оптрона:**

1. висока перешкодозахищеність (оптичний канал несприйнятливий до дії сторонніх електромагнітних полів) та також однонаправленість передачі оптичного сигналу;
2. широка частотна смуга пропускання і здатністю перетворювати та передавати не тільки імпульсні сигнали, але і постійну складову;
3. сумісність з іншими напівпровідниковими пристроями.

Тип оптрона відповідає типу використовуваного фотодетектора (**резисторний, діодний, транзисторний**).

В **діодних, транзисторних оптронах** основним матеріалом для приймача випромінювання є **кремній**.

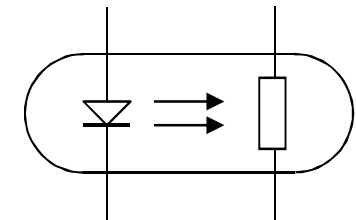
В **резистивних** оптронах широко використовуються приймачі на основі CdS і CdSe, які добре узгоджуються по спектру з випромінювачами на основі GaAsP і GaP.

**Оптичним передаючим середовищем оптрона служить повітря або скло.**

**Резисторні оптрони** характеризуються лінійною симетричною вихідною вольт-амперною характеристикою, відсутністю внутрішньої ЕРС, великим відношенням сигнал-шум, але мають велику інерційність (0,1–0,01 с).

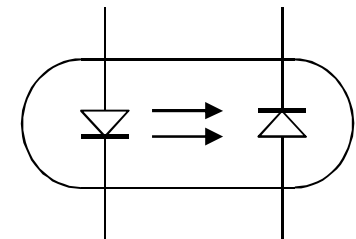
У якості джерела світла використовують світлодіоди на основі GaP.

**Перевага** - лінійність і симетричність вихідної характеристики.



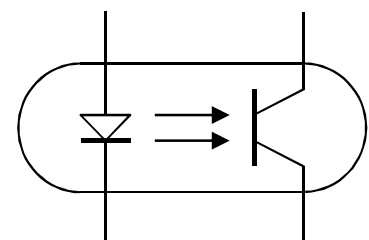
**Діодні оптрони** - на базі AsGa-світлодіодів і кремнієвих р-і-n-фотодіодів, мають найбільшу швидкодію ( $10^{-8}$  с), але малий коефіцієнт передачі по струму (кілька процентів). **Можуть** працювати без зовнішньої напруги на фотоприймачі.

При цьому оптрон виконує функцію керованого ізольованого джерела живлення.



**Транзисторні оптрони** - схемотехнічно гнучкі, мають високий коефіцієнт передачі по струму, але невисоку швидкодію (2–5 мкс). Дають можливість управляти колекторним струмом як електричним, так і оптичним методом.

При підвищенні температури зростає їх інерційність.

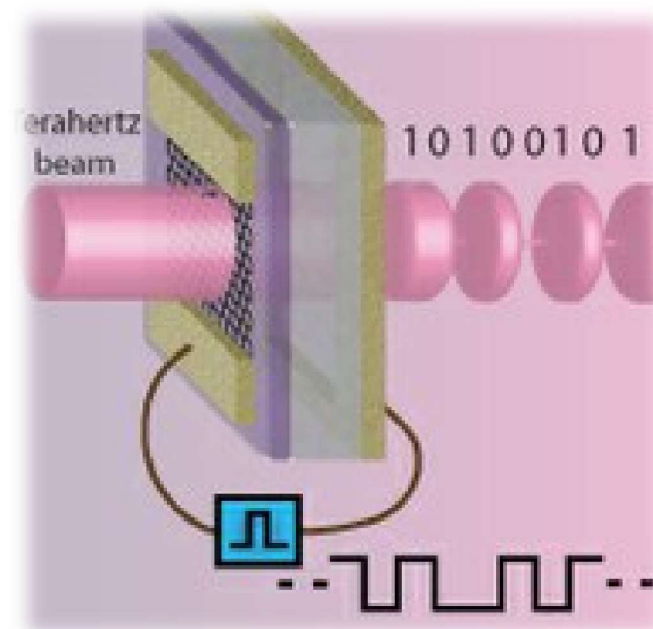


## Лекція 4

---

### Модуляція оптичного випромінювання

1. Взаємодія світла з модулюючим середовищем
2. Ефект Франца-Келдиша
3. Електрооптичні ефекти
4. Поляризація світла
5. Формули Френеля
6. Подвійне променезаломлення
7. Закон Малюса
8. Електрооптичні ефекти. Ефект Керра
9. Електрооптичні ефекти. Ефект Погкельса
10. Принцип дії модуляторів на електрооптичних ефектах
11. Магнітооптичний ефект Фарадея
12. Фотопружний ефект
13. Акустооптичні ефекти
14. Акустооптичні ефекти. Дифракція Рамана-Ната та Брега
15. Характеристики акустооптичних модуляторів



## Взаємодія світла з модулюючим середовищем

---

Для введення інформації в світловий промінь можна впливати на п'ять параметрів хвилі:  
*амплітуду, фазу, частоту, поляризацію і напрям розповсюдження.*

*Модуляція* - операція, за допомогою якої інформація вводиться в світлову хвилю  
(аналогова і цифрова, зовнішня і внутрішня)

*Демодуляція* - процес виділення інформації, що міститься в світловій хвилі

Операція зміни просторового положення світлової хвилі - *перемикання*,

Елемент, що здійснює перемикання - *перемикачем* або *дефлектором*.

*Сканування* - узагальнення поняття перемикання.

---

**Пряма або внутрішня модуляція** - модуляція випромінювання лазерного діода (ЛД) або світлодіода (СД) досягається зміною струму накачки; ці зміни керують інжекцією електронів і змінюють інтенсивність вихідного оптичного випромінювання.

**Зовнішня модуляція** - перетворення випромінювання відбувається за допомогою оптичного модулятора, що змінює характеристики середовища

---

**Оптичний амплітудний модулятор** - пристрій, в якому відбувається взаємодія оптичного випромінювання (світла) з кристалом, властивості якого змінюються під впливом керуючого або модулюючого сигналу: електричного, магнітного полів або зовнішнього тиску.

---



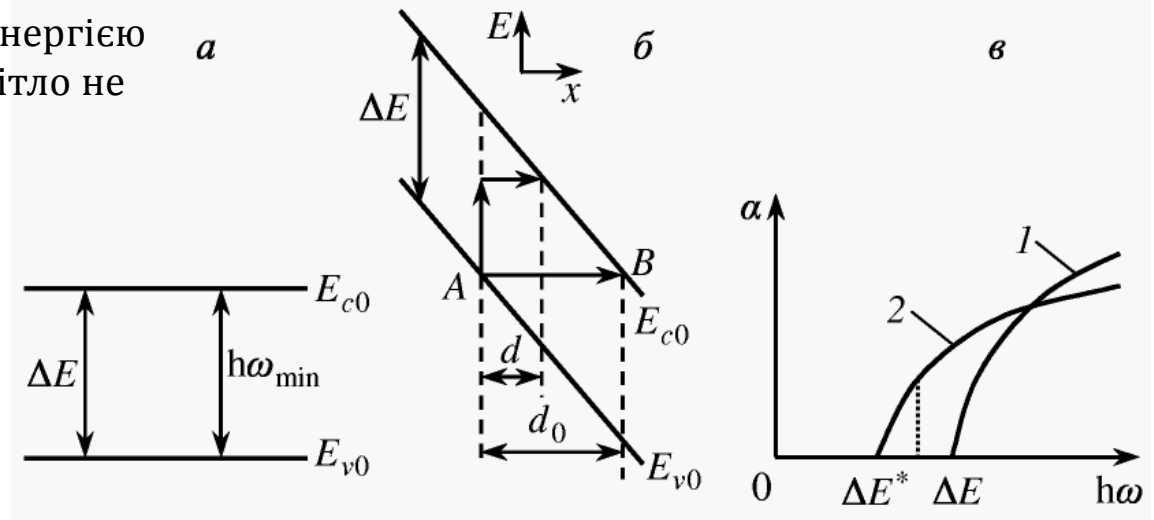


## Ефект Франца-Келдиша

**Ефект Франца – Келдиша** - явище тунелювання електрона з валентної зони в зону провідності при наявності електричного поля, супроводжуване поглинанням фотона

Нехай в напівпровіднику рухається фотон з енергією  $h\nu$ , меншою за ширину забороненої зони – світло не поглинається

Якщо в напівпровіднику створено електричне поле напруженістю  $E_m$ , енергетичні зони з горизонтальних стають похилими і електрон має можливість тунелювати з валентної зони в зону провідності через трикутний потенціальний бар'єр.



*Ефект Франца - Келдиша в напівпровіднику:  
а і б - зонні діаграми напівпровідника при відсутності і за наявності зовнішнього електричного поля;  
в - залежність коефіцієнта поглинання світла від енергії фотон при відсутності (1) і за наявності (2) поля*

$$eE_m d_0 = \Delta E$$

Ширина бар'єру

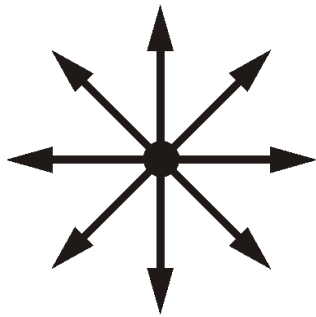
$$d_0 = \frac{\Delta E - \hbar\omega}{eE_m}$$

*Ефект Франца - Келдиша може бути використаний для модуляції світла по інтенсивності. Проте в об'ємних кристалах цей спосіб неефективний через необхідність застосування високих напруг.*

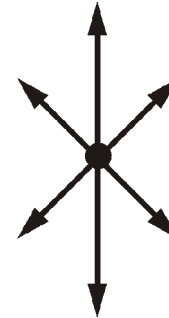
## Електрооптичні ефекти

**Електрооптичні ефекти** - явище виникнення подвійного променезаломлення в оптичних середовищах при накладенні постійного або змінного електричного поля.

Природне світло - неполяризоване



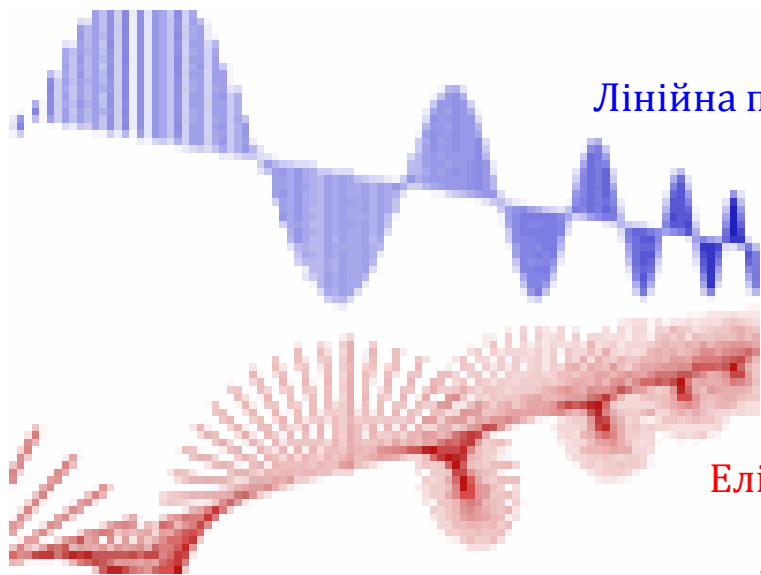
Світло з переважним напрямком коливань вектора  $E$  називають поляризованим світлом



Часткова поляризація

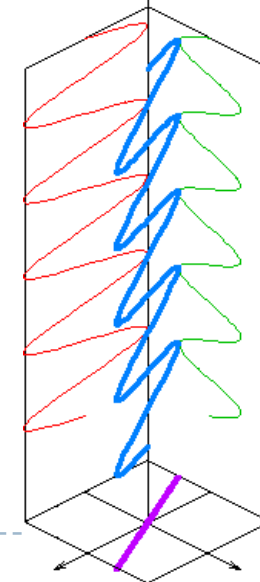


Лінійна поляризація

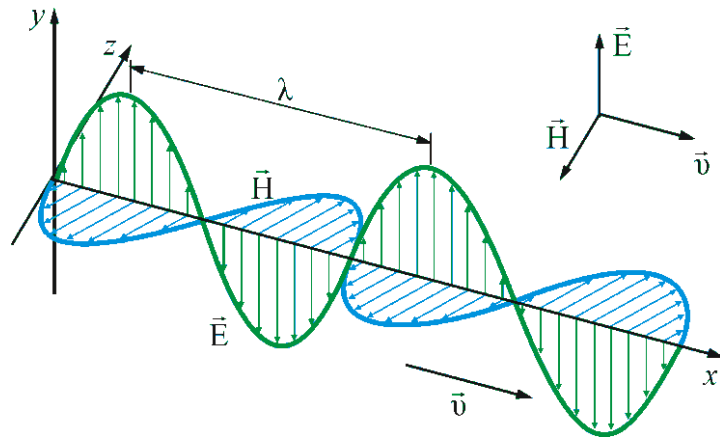


Лінійна поляризація

Еліптична поляризація

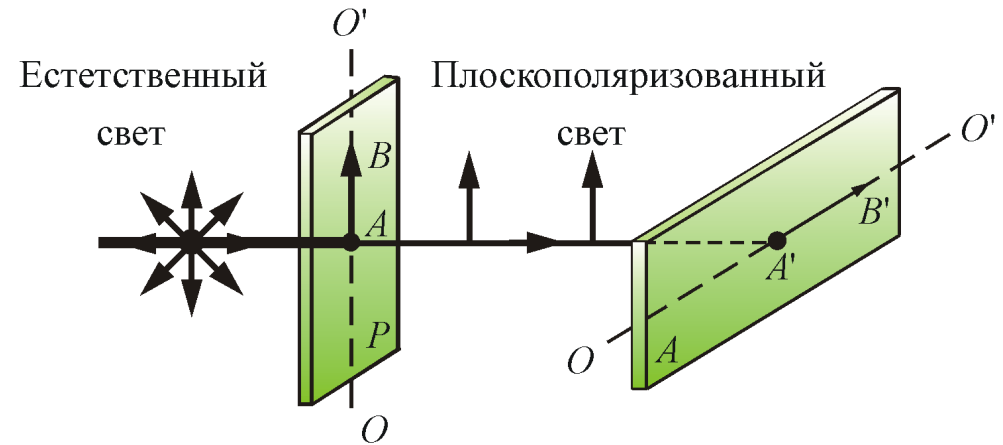


## Поляризація світла



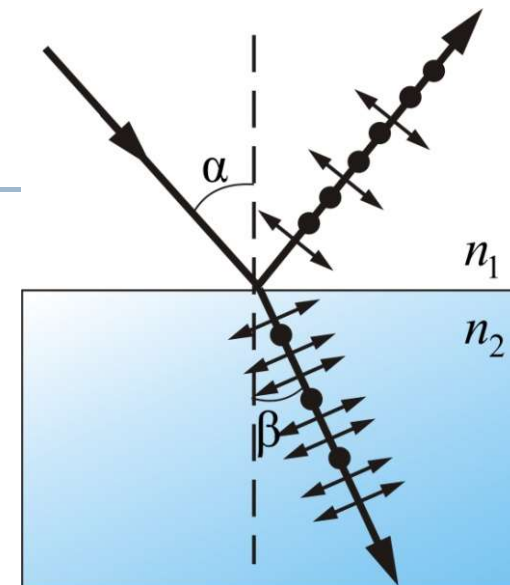
Пристрої, що дозволяють отримувати лінійно поляризоване світло з природного, називають **лінійними поляризаторами**:

*вільно пропускають коливання, паралельні площині поляризатора,  
повністю або частково затримують коливання перпендикулярні до його площини.*



Світло **поляризується** при **відбиванні** від межі розділу середовищ та при **заломленні**.

У відбитому промені переважають коливання, перпендикулярні до площини падіння, а в заломленому - коливання паралельні до площини падіння.



## Формули Френеля

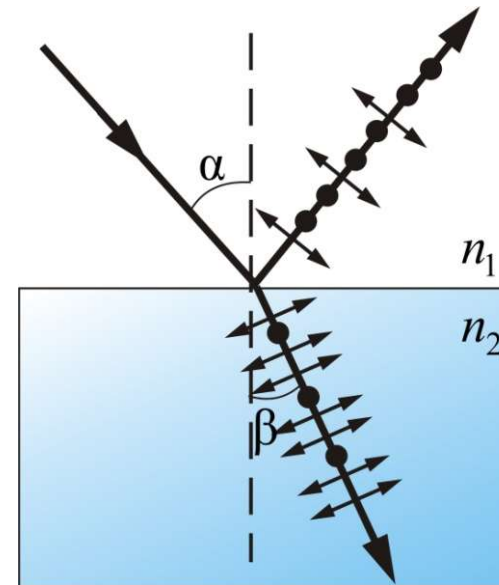
При падінні природного світла на межу розділу двох діелектриків

для відбитого променя:

$$\begin{cases} I_{r\perp} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \\ I_{r\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)} \end{cases}$$

для заломленого променя:

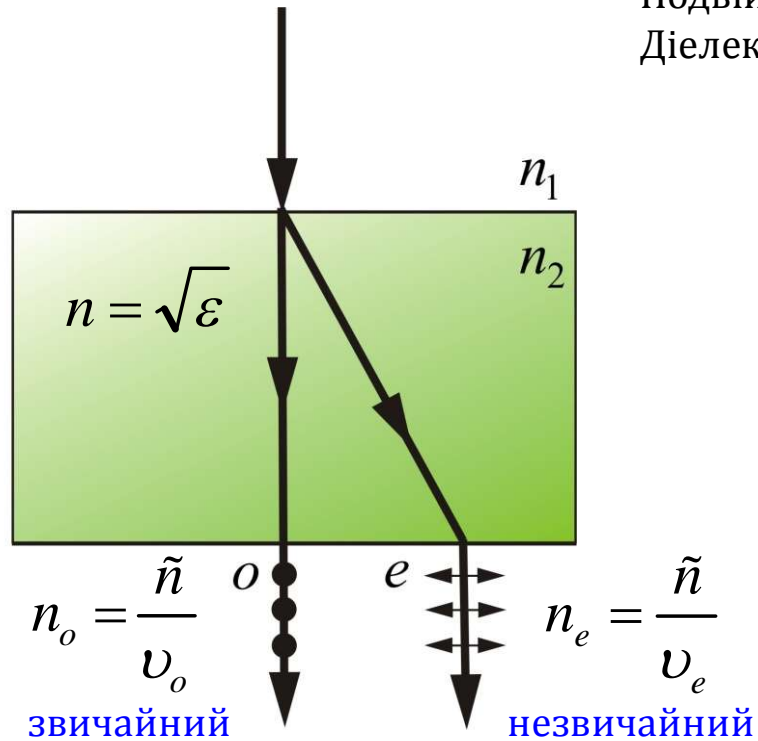
$$\begin{cases} I_{p\perp} = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 - \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \\ I_{p\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 - \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)} \right] \end{cases}$$



## Подвійне променезаломлення

### Явище подвійного променезаломлення

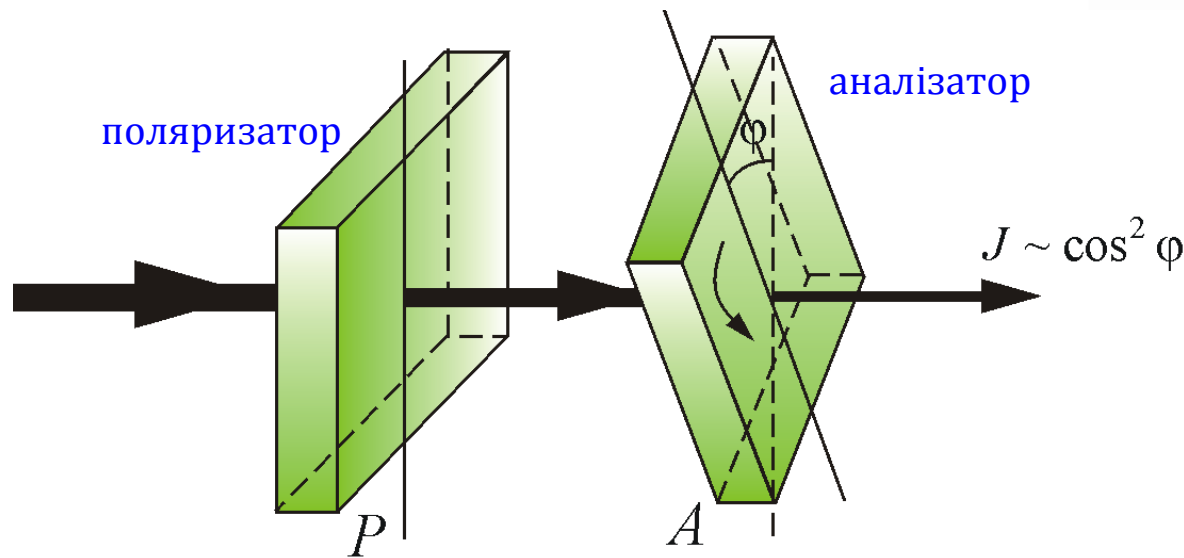
Подвійне променезаломлення пояснюється анізотропією кристала. Діелектрична проникність  $\epsilon$  - залежить від напрямку.



$$v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_y}} \quad v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_x}}$$



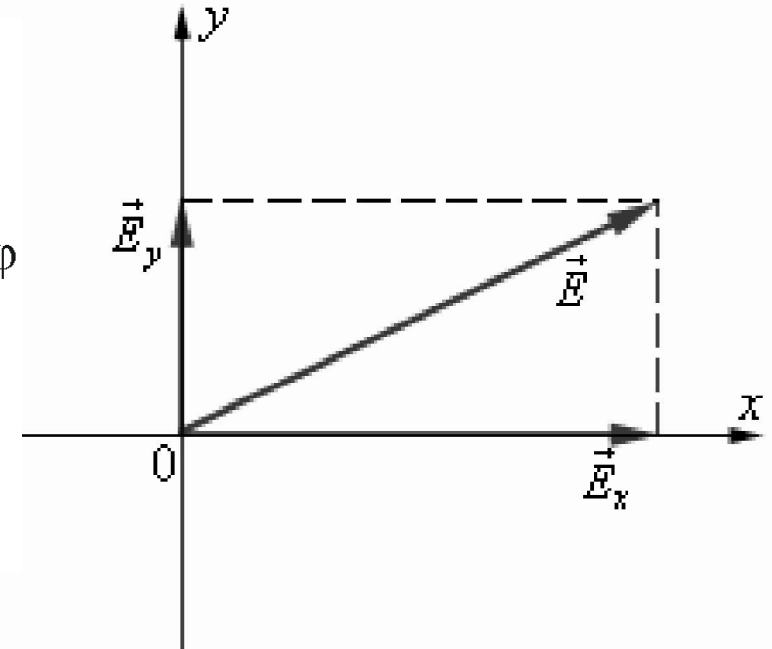
## Закон Малюса



$$J = J_0 \cos^2 \phi = \frac{1}{2} J_{\text{ідеальн}} \cos^2 \phi$$

У природному світлі всі значення  $\phi$  рівномірні і середнє значення  $\langle \cos^2 \phi \rangle = 1/2$

Інтенсивність природного світла після поляризатора зменшується в два рази.

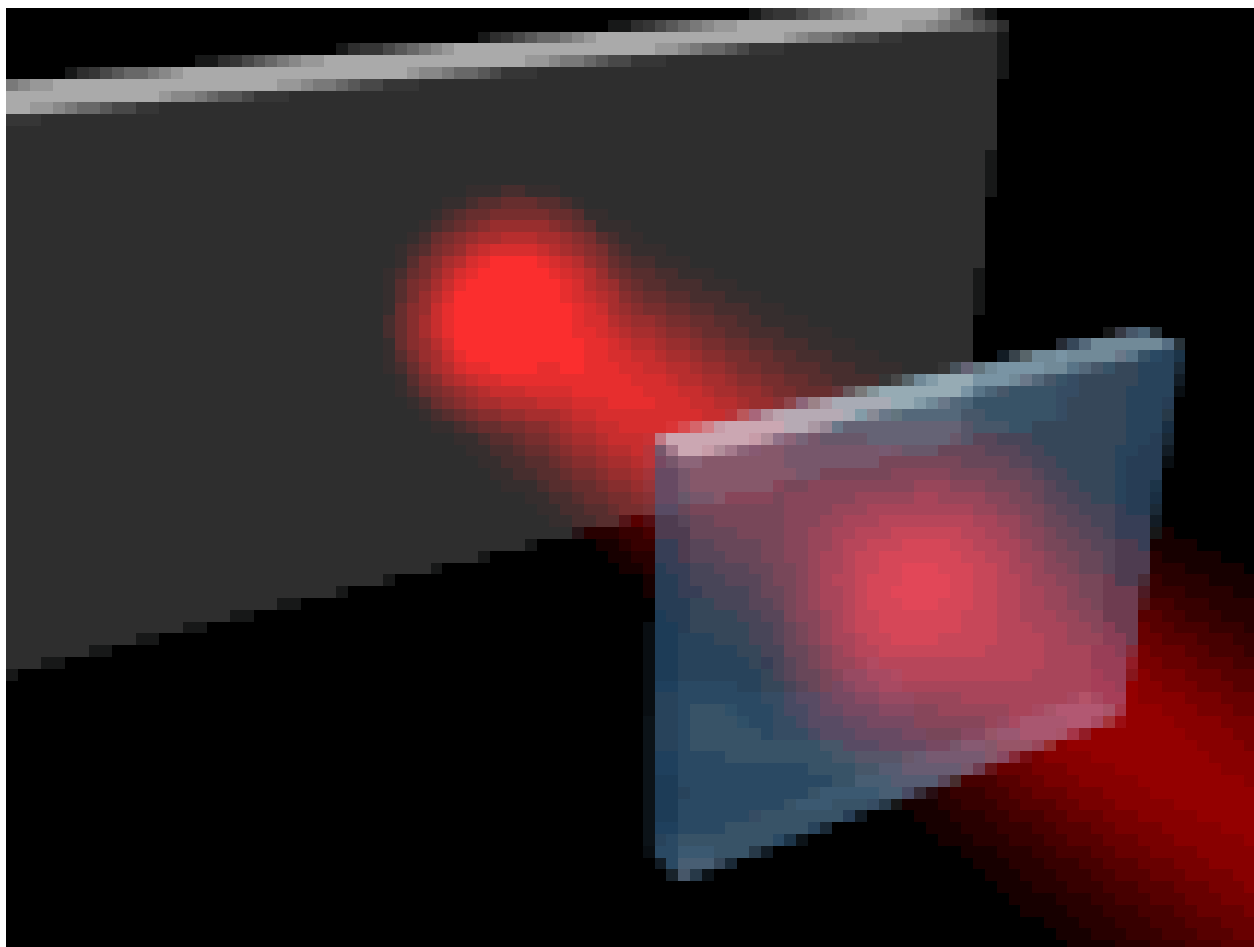


$$E_x = E_0 \cos \phi \quad \text{Пройде}$$

$$E_y = E_0 \sin \phi \quad \text{Не пройде}$$

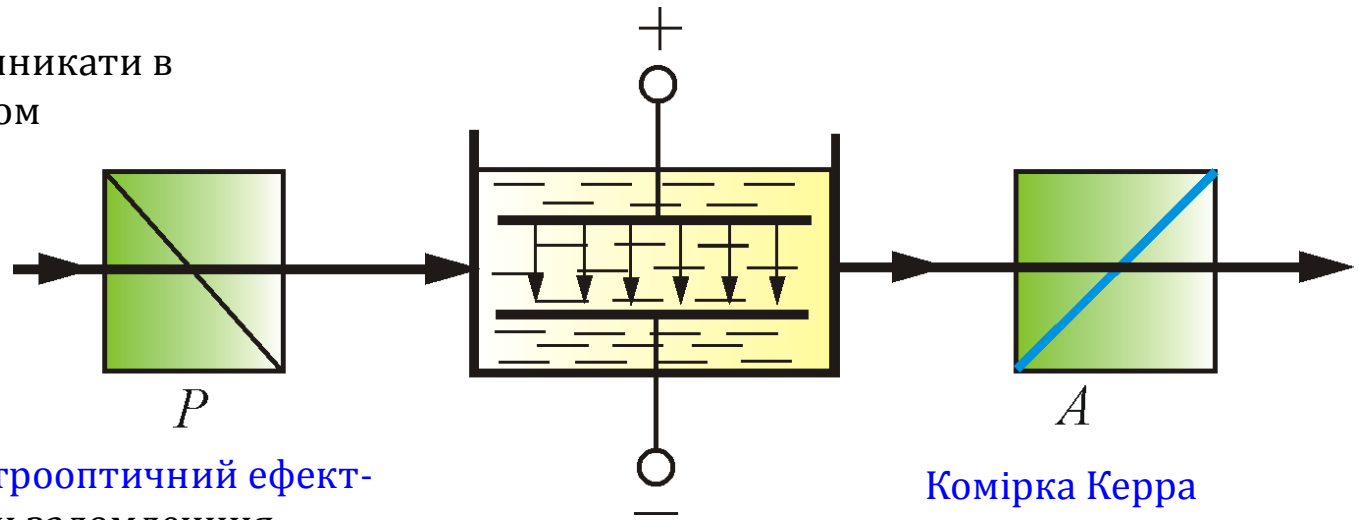
$$J \sim E^2 \quad J_0 \sim E_0^2 \quad J \sim E_0^2 \cos^2 \phi$$

$$J = J_0 \cos^2 \phi$$



## Електрооптичні ефекти. Ефект Керра

Явище штучної анізотропії може виникати в ізотропних середовищах під впливом електричного поля (ефект Керра).



Ефект Керра - квадратичний електрооптичний ефект- величина різниці між показниками заломлення незвичайного та звичайного променів прямо пропорційна квадрату напруженості електричного поля:

$$\bar{n}_e - \bar{n}_0 = a_k E^2$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{n}_e - \bar{n}_0) l = \frac{2\pi}{\lambda} a_k l E^2 = 2\pi b_k l E^2$$

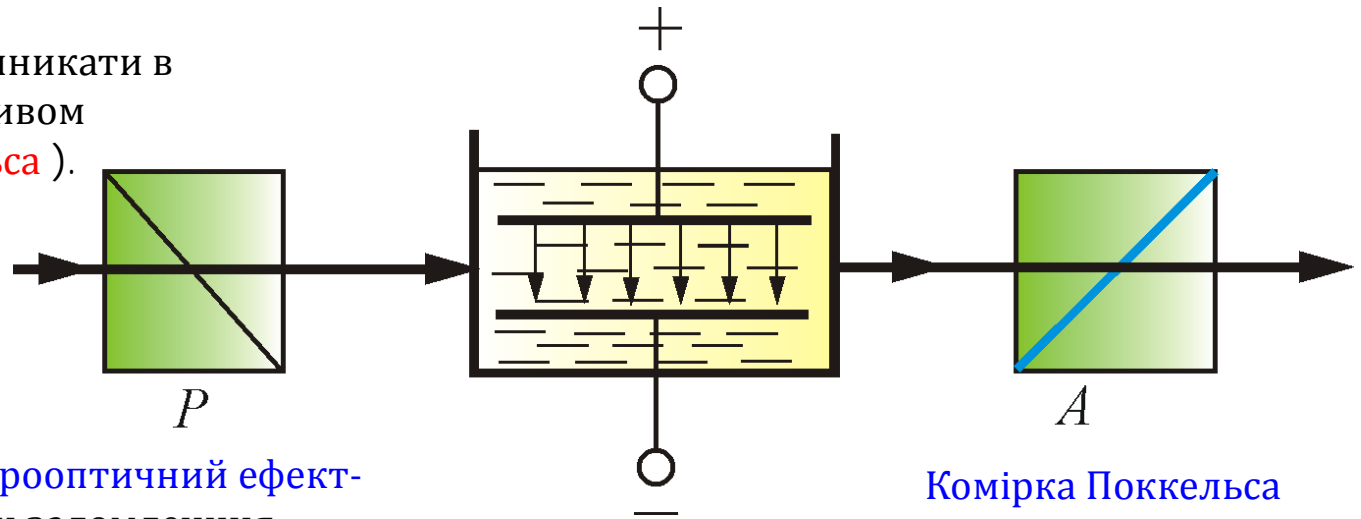
Матеріали, що використовуються  
КТаОЗ, нітробензол.

На основі комірок Керра побудовані затвори і модулятори світла з робочою частотою до  $10^{12}$  Гц.



## Електрооптичні ефекти. Ефект Поккельса

Явище штучної анізотропії може виникати в анізотропних середовищах під впливом електричного поля (ефект Поккельса).



Ефект Поккельса – лінійний електрооптичний ефект-величина різниці між показниками заломлення незвичайного та звичайного променів **у кристалі** прямо пропорційна квадрату напруженості електричного поля:

$$\bar{n}_e - \bar{n}_0 = a_p E$$
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{n}_e - \bar{n}_0) l = \frac{2\pi}{\lambda} a_p l E$$

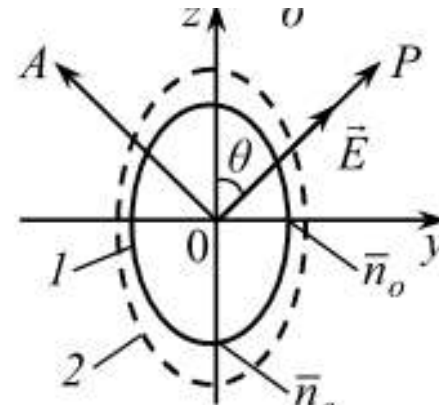
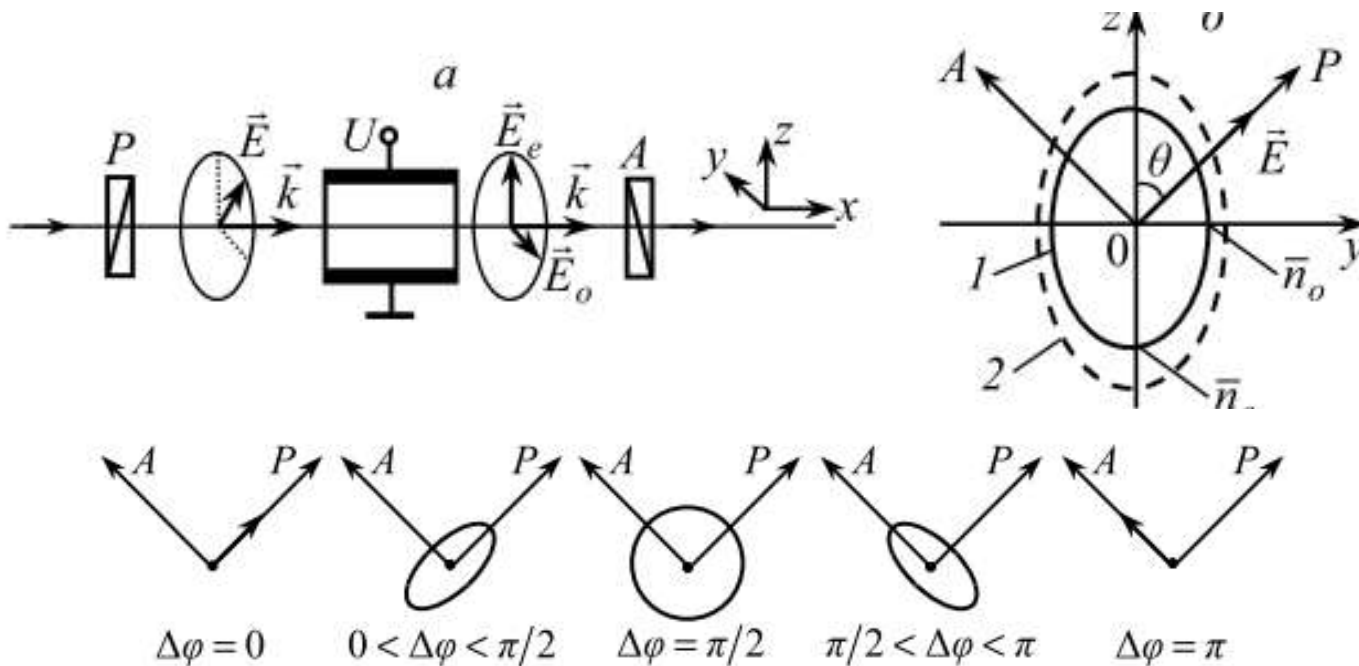
Матеріали, що використовуються

ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$ ,  
титанат барію  $\text{BaTiO}_3$ ,  
дигідрофосфат калію  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   
**GaAs, кварц**

На основі комірок Поккельса побудовані затвори і модулятори світла з робочою частотою до  $10^{13}$  Гц.

## Принцип дії модуляторів на електрооптичних ефектах

Випромінювання, що подається на Вхід модулятора, перетворюється в поляризаторі в лінійно поляризоване світло. При відсутності керуючого електричного поля промінь проходить через поляризатор і повністю гаситься аналізатором. При підключенні електричного поля лінійно поляризована світлова хвиля в комірці розпадається на дві- поляризовану вздовж поля (незвичайна) і перпендикулярно полю (звичайна). Звичайна і незвичайна хвилі мають в комірці різні швидкості поширення, внаслідок чого виходить з кристала світло виявляється еліптично поляризованим і частково проходить через аналізатор. При збільшенні напруги досягається стан, коли аналізатор стає повністю прозорим для вхідного променя (площина поляризації обертається на 90°). Змінюючи напругу, можна керувати інтенсивністю вихідного випромінювання – амплітудна модуляція



$$\bar{n}_e - \bar{n}_o = a_p E$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{n}_e - \bar{n}_o) l = \frac{2\pi}{\lambda} a_p l E$$

$$\frac{E_P^2}{E_0^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)} + \frac{E_A^2}{E_0^2 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)} = 1$$

$$P = P_0 \left\{ 1 + \sin \left[ \pi \frac{U_m}{U_\pi} \sin(\omega_m t) \right] \right\}$$

## Магнітооптичний ефект Фарадея

### Ефект Фарадея.

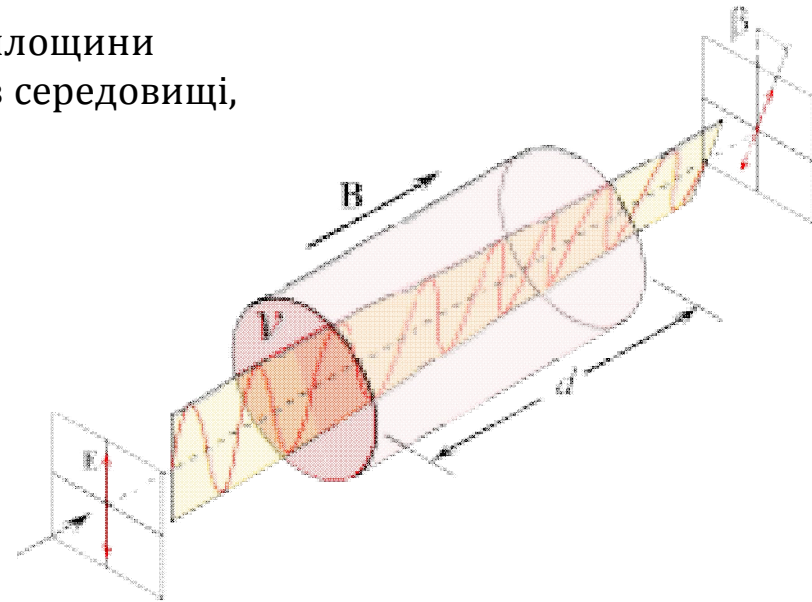
Магнітооптичний ефект Фарадея полягає в обертанні площини поляризації випромінювання, що розповсюджується в середовищі, поміщеному в зовнішнє магнітне поле.

$$\Delta\theta = V H l \cos \gamma$$

$V$  - постійна Верде,

$H$  - напруженість магнітного поля,

$\gamma$  - кут між напрямом поля і напрямом розповсюдження світла



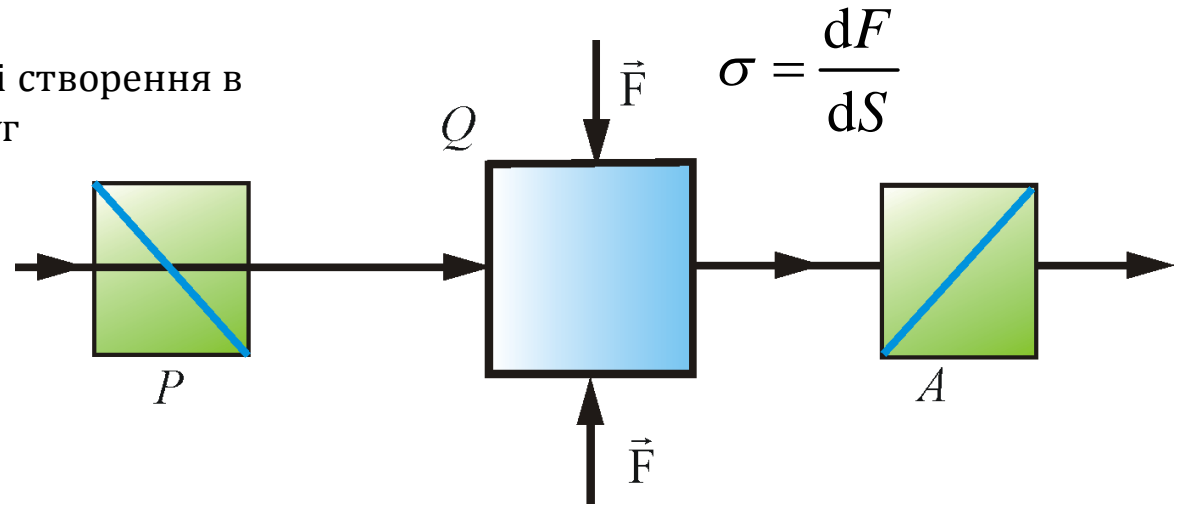
*Матеріали, що використовуються*  
залізо -ітрієвий гранат  $Y_3Fe_5O_{12}$ ,  
алюмо-ітрієвий гранат  $Y_3Al_5O_{12}$   
кварц, скло, бензин

Явище фотопружності

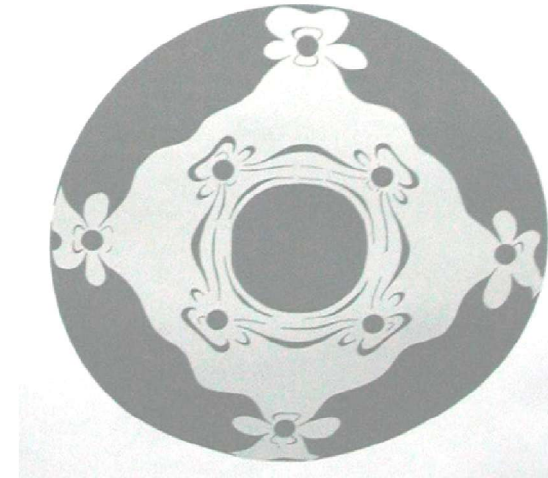
Створення оптичної анізотропії в результаті створення в речовині (твердій, рідкій) механічних напруг

$$\bar{n}_e - \bar{n}_0 = a_s \sigma$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{n}_e - \bar{n}_0) l = \frac{2\pi}{\lambda} a_s l \sigma$$



При відсутності механічної деформації світло через скло проходить не буде. Якщо ж скло піддати деформації, то світло може пройти, причому картина на екрані вийде кольорова. За розподілом кольорових смуг можна судити про розподіл напруг в скляній пластинці.



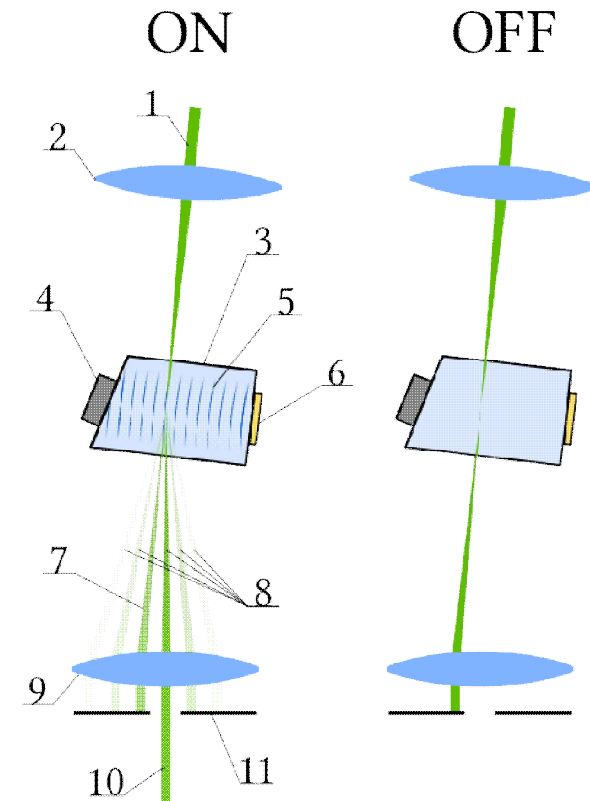
## Акустооптичні ефекти

### Акустооптичний ефект: режими дифракції Брегга і Рамана - Ната

Під дією механічних напруг, що викликаються звуковою хвилею, яка поширюється в речовині, в кристалі виникають смуги з різними показниками заломлення, що рухаються із швидкістю звуку.

Речовина набуває властивостей оптичної фазової решітки, період якої визначається довжиною звукової хвилі, а глибина модуляції показника заломлення - потужністю звукової хвилі.

Якщо період ґратки  $\Lambda$  співмірний з довжиною світлової хвилі  $\lambda$ , світло буде дифрагувати на звуковій хвилі.



Світловий пучок, дифрагуючи на динамічній решітці, утворює кілька вихідних пучків (дифракційних порядків), рознесених в просторі під рівними кутами один відносно одного.

За допомогою апертури (щілини) з усіх вихідних променів виділяється перший максимум, який існує тільки при наявності звукової хвилі в модуляторі і блокуються всі інші

Пристрій може працювати в режимі **модулятора** і **дефлектора** (тобто також відхиляти по куту падаючий промінь при зміні частоти звукової хвилі).



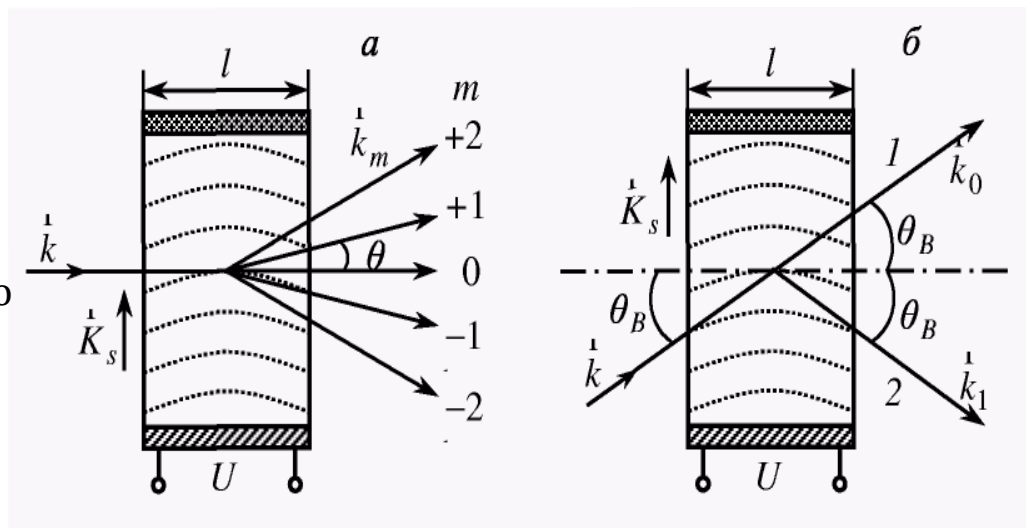
## Акустооптичні ефекти. Дифракція Рамана-Ната та Брега

Залежно від товщини скляної пластинки тіла можливі два варіанти:

**тонкий модулятор (дифракція Рамана -Ната)**- принцип роботи не відрізняється від того як це описано раніше,

**товстий модулятор (дифракція Брега)**- необхідно враховувати умови фазового синхронізму,

**Фазовий синхронізм**- умова найефективнішого енергообміну між основною та вторинними хвилями що поширюються в нелінійному середовищі з однаковою частотою



Дифракція світла на ультразвукових хвилях в режимах Рамана - Ната (а) і Брега (б)

дифракція Рамана-Ната  $l \ll \frac{\bar{n}\Lambda^2}{\lambda}$   $\sin \theta_m = m\lambda / \bar{n}\Lambda$   
 $m = 0 \pm 1 \pm 2 \pm 3$

SiO<sub>2</sub>

Світло (лазерний пучок) направляєється на скло під кутом Брега. Спостерігається дифракція Брега, при якій інтенсивності всіх максимумів, крім першого, малі.

дифракція Брега  $l \gg \frac{\bar{n}\Lambda^2}{\lambda}$   $\sin \theta_b = \lambda / 2\bar{n}\Lambda$



## Характеристики акустооптичних модуляторів

---

### 1. Дифракційний кут

Довжина звукової хвилі в склі :

де  $v$  - швидкість звуку,  $F$  - частота звуку.

$$\Lambda = \frac{v}{F}$$

При частоті модуляції 80 МГц (найпоширеніша) і швидкості звуку в склі 3 км/сек, довжина хвилі звуку в склі складає 40 мкм, кут відхилення дифрагованого променя першого порядку - близько 10 міллірадіан.

### 2. Інтенсивність

Інтенсивність дифрагованих променів залежить від інтенсивності звукової хвилі і кута повороту модулятора (бреггівського кута). Модулюючи інтенсивність звукової хвилі можна міняти (нелінійно) інтенсивність дифрагованих променів. Інтенсивність нульового порядку змінюється в межах 15-99%, інтенсивність першого порядку - 0-80%. Контрастність модуляції >1000 і досягає 10 000 (40 дБ).

### 3. Частота

Частота дифрагованих променів внаслідок ефекту Доплера змінюється за формулою  $\nu \rightarrow \nu + mF$   
Зсув частоти обумовлюється також законом збереження енергії і імпульсу (фотонів і фононів).

У деяких модуляторах акустичні хвилі, що поширюються в протилежних напрямках, створюють стоячу хвилю, в результаті частоти дифракційних порядків не змінюється.

### 4. Швидкодія

Швидкодія обмежується часом проходження звукової хвилі через переріз світлового пучка

$$t = \frac{d}{v}$$

( $d$  - поперечний розмір лазерного променя,  $v$  - швидкість звуку в матеріалі комірки)

і складає 2-10 мкс для лазерного променя діаметром кілька міліметрів.

Чим менше пляма фокусування, тим вища швидкодія, тому модулятор розміщується у фокусі лінзи, при цьому вихідні промені колімуються другою лінзою.

Для товстого модулятора можлива швидкодія приблизно 20 нс.

---

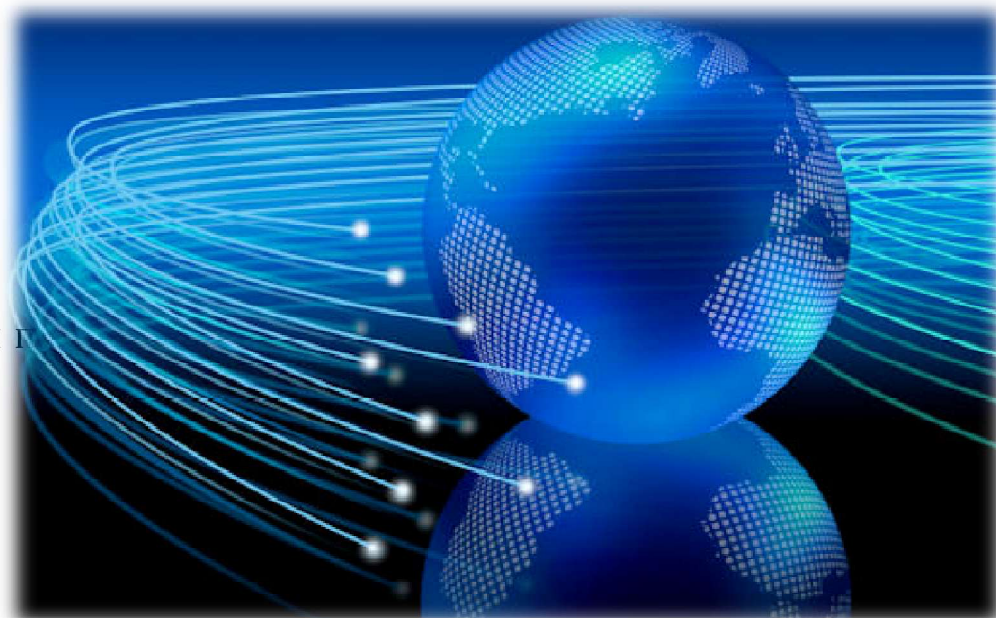


## Лекція 6

---

### Волоконна оптика

1. Закон заломлення світла
2. Повне внутрішнє відбивання
3. Транспортування оптичного випромінювання
4. Оптичне волокно
5. Типи оптичного волокна
6. Оптичні моди в хвилеводах
7. Втрати і спотворення оптичного сигналу у волокні
8. Втрати на поглинання
9. Дисперсія волокна
10. Виготовлення волокна
11. Виготовлення заготовки методом осадження з газової фази
12. Виготовлення заготовки
13. Фотоннокристалічні волокна
14. Зварка оптичного волокна
15. Ввід випромінювання у волокно
16. Спектральне ущільнення з мультиплексуванням довжини хвилі
17. Оптичне волоконний кабель
18. Оптичні підсилювачі
19. Принцип дії ербієвого підсилювача
20. Характеристики ербієвого підсилювача
21. Покоління ВОЛЗ
22. Переваги та недоліки оптичного волокна
23. Інтегральні лазери
24. РБВ-лазер
25. РЗЗ-лазер
26. Лазер з вертикальними резонаторами
27. WDM - технологія передачі оптичних сигналів
28. Регенератор оптичних сигналів
29. Структура волоконної лінії зв'язку



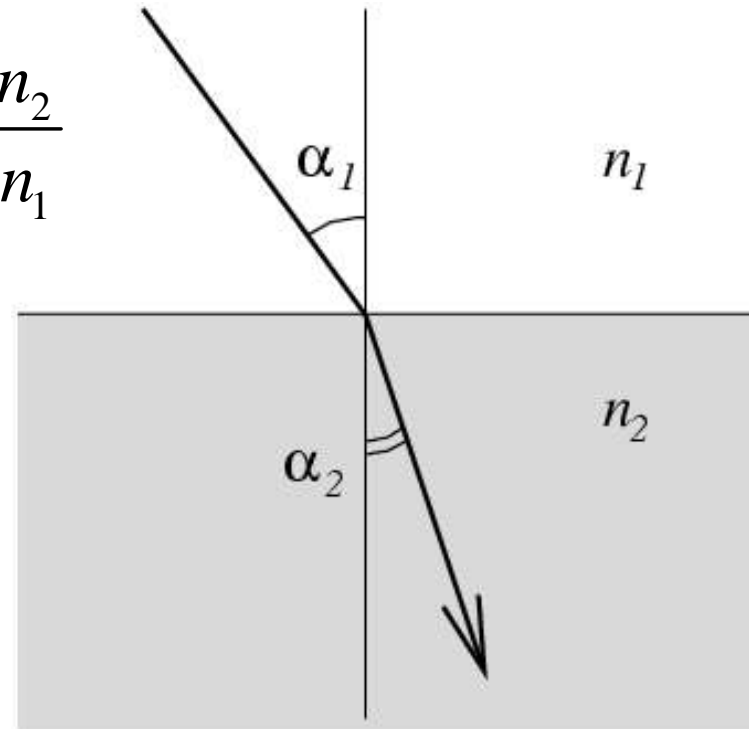


## Закон заломлення світла

**Закон заломлення** – падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр, проведений до межі розділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних середовищ:

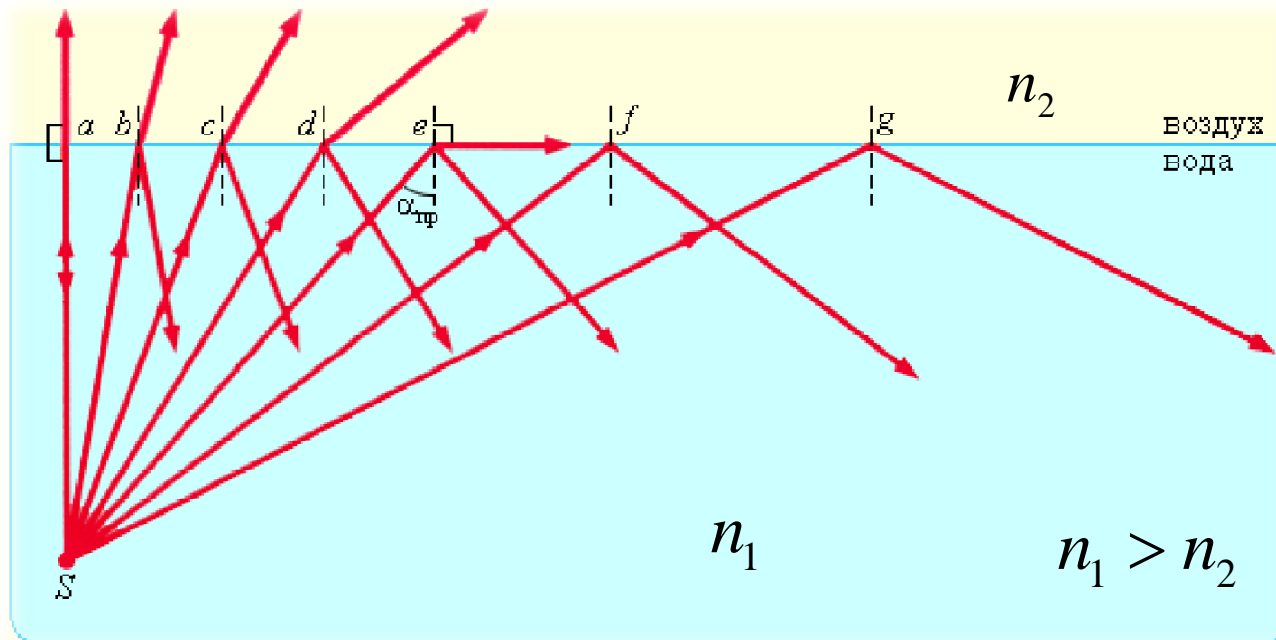
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 < n_2$$



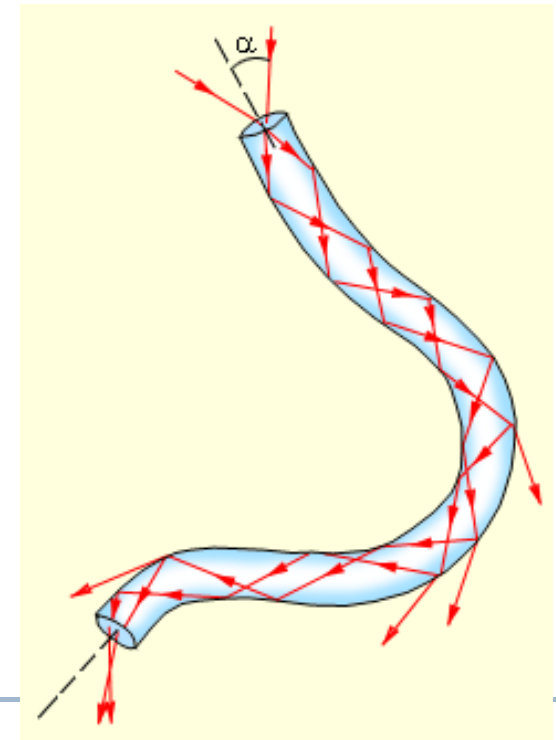
## Повне внутрішнє відбивання

Якщо світло переходить з середовища з більшим показником заломлення  $n_1$  (оптично густіше) в середовище з меншим показником заломлення  $n_2$  (оптично рідше) ( $n_1 > n_2$ ) (зі скла в повітря або з води в повітря), то згідно закону заломлення, заломлений промінь віддаляється від нормалі і кут заломлення стає більшим, ніж кут падіння.



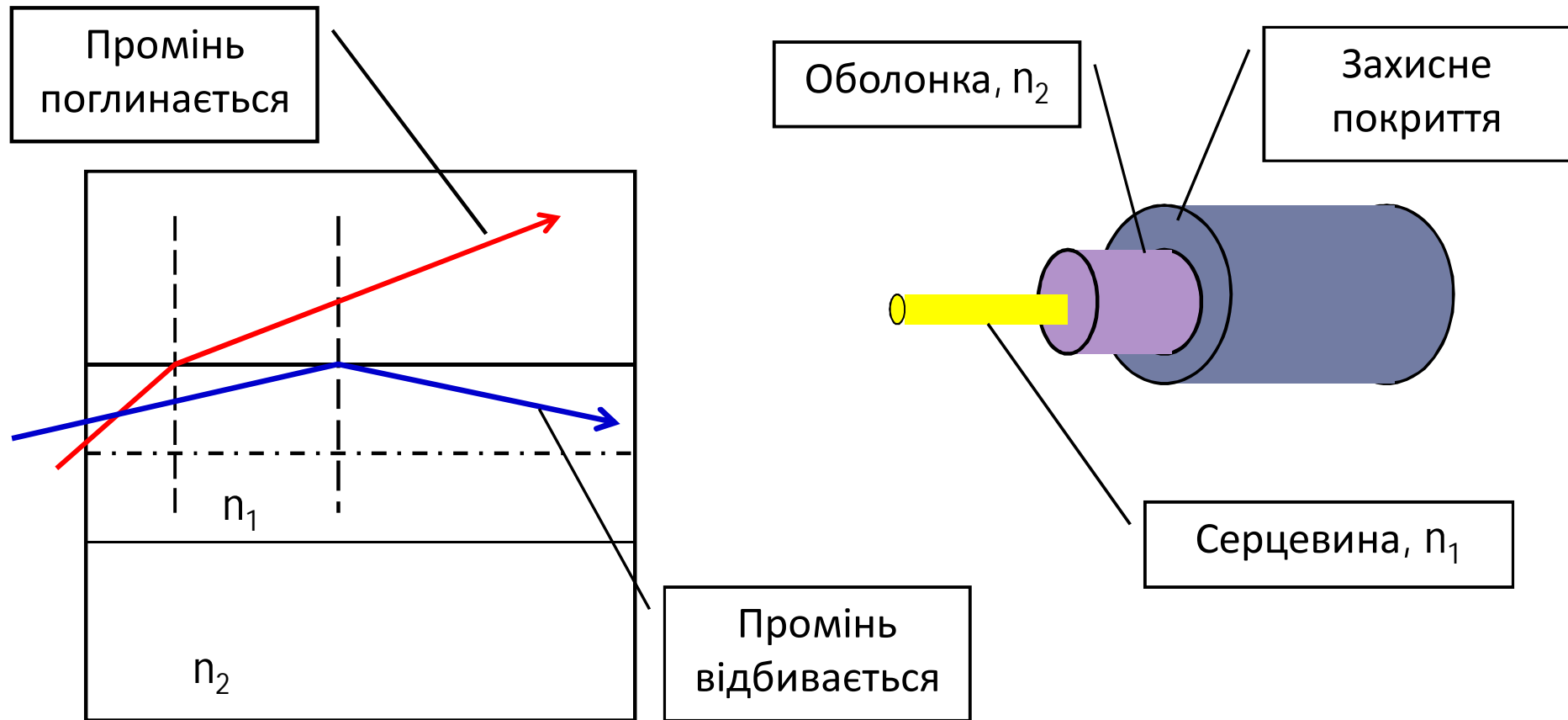
$$\sin \alpha_{\bar{a}\delta} = \frac{1}{n_1}$$

При всіх кутах падіння, більших за  $\alpha_{гр}$  промінь не заломлюється, а повністю відбивається в перше середовище, причому інтенсивності відбитого і падаючого променів однакові.

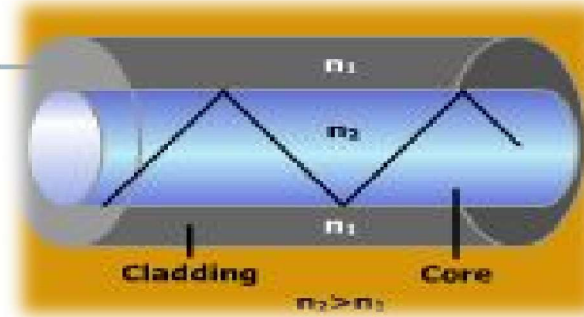


## Транспортування оптичного випромінювання

Передача випромінювання по оптичному волокну базується на ефекті *повного внутрішнього відбивання*.  
**Оптичне волокно** - циліндрична ниткою з прозорого діелектрика з показником заломлення  $n_1$  (серцевина) оточеного оболонкою з  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) покриті непрозорим шаром



## Оптоволокно



Передача сигналу в оптоволокні  $n_2 > n_1$ .

Типовий варіант:  $n_1 = 1,474$ ,  $n_2 = 1,479$

Різниця між  $n_1$  і  $n_2$  - 1%

У скляному волокні  $n$  змінюється за допомогою легування:

$B_2O_3$ , F - зменшують  $n$ ;

$GeO_2$ ,  $P_2O_5$  - збільшують  $n$ .

За матеріалом оптоволокно ділиться на:

скляні волокна;

скляні волокна з пластиковою оптичною оболонкою (PCS);

пластикові волокна.

Матеріал	Довжина хвилі в вакуумі	Показник заломлення
Скло	850	1,4525
	1300	1,4469
	1550	1,4440
GaAlAs	850	3,6
Пластик	650	1,4-1,5

Стандартні діаметри серцевини і оболонки (мкм):

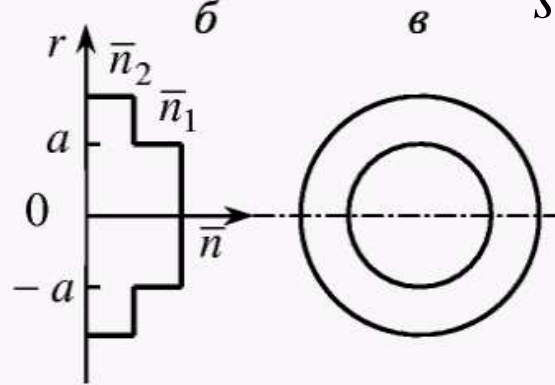
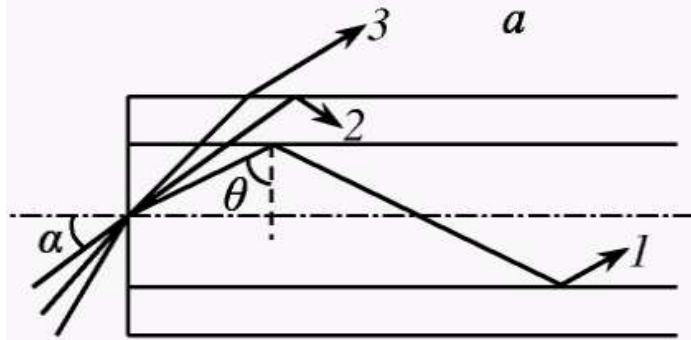
Позначення: 8/125, 62.5/125 ...

діаметр людської волосини - 100 мкм.

Діаметр серцевини, мкм	Діаметр оболонки, мкм
8	125
50	125
62,5	125
100	140

## Типи оптоволоконна

Східчасте волокно



$$\sin \alpha = \bar{n}_1 \cos \theta. \quad \bar{n}_1 \sin \theta_c = \bar{n}_2.$$

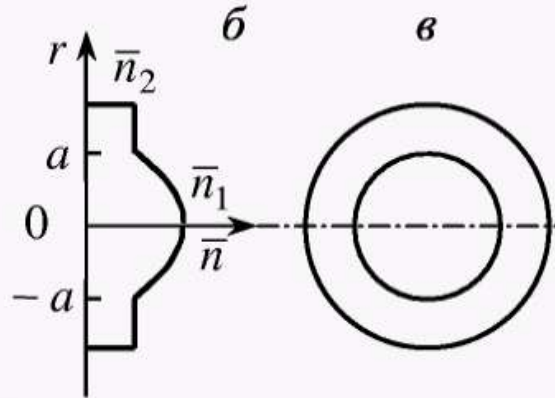
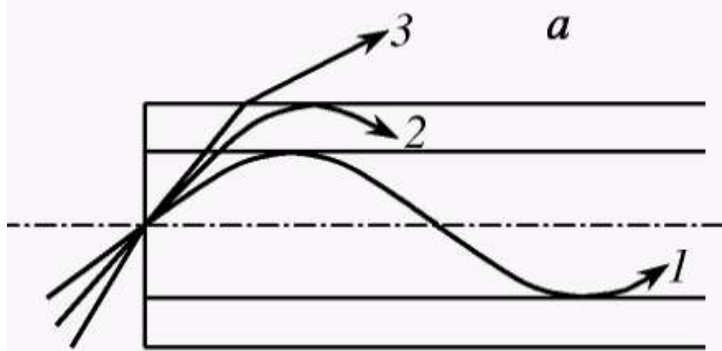
$$\sin \alpha = \bar{n}_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1}\right)^2}$$

$$\sin \alpha_{max} = \sqrt{\bar{n}_1^2 - \bar{n}_2^2}.$$

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad \Delta \bar{n} = n_1 - n_2$$

$$\sin \alpha_{max} = A = \sqrt{2\bar{n} \cdot \Delta \bar{n}}$$

Градiєнтне волокно

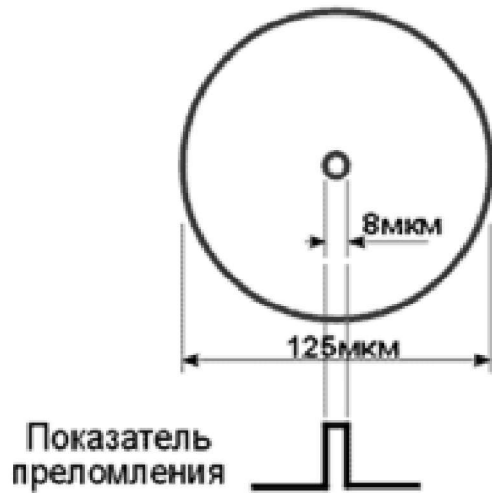


Фізичний зміст числової апертури – це синус максимального кута падіння променів на торець волокна, при якому ще можливе каналювання світла

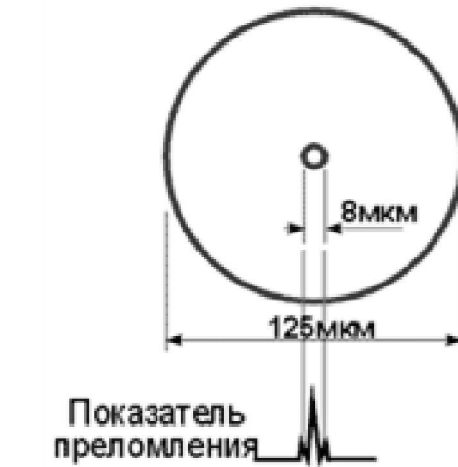
**A-числова апертура волокна.**

Чим більше A, тим більша частина світла, випромінюваного точковим ізотропним джерелом, поміщеним на осі волокна поблизу його торця, може бути введена у волокно.

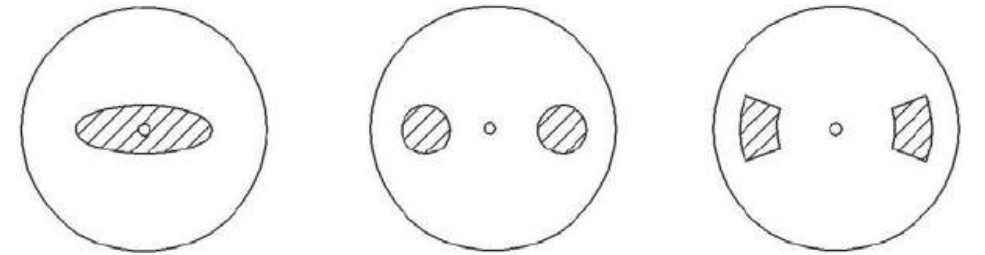
## Типи оптоволоконна



ступінчасте (SF)



зі зміщеною дисперсією (DSF)



із збереженням поляризації (напружуючі оболонки)



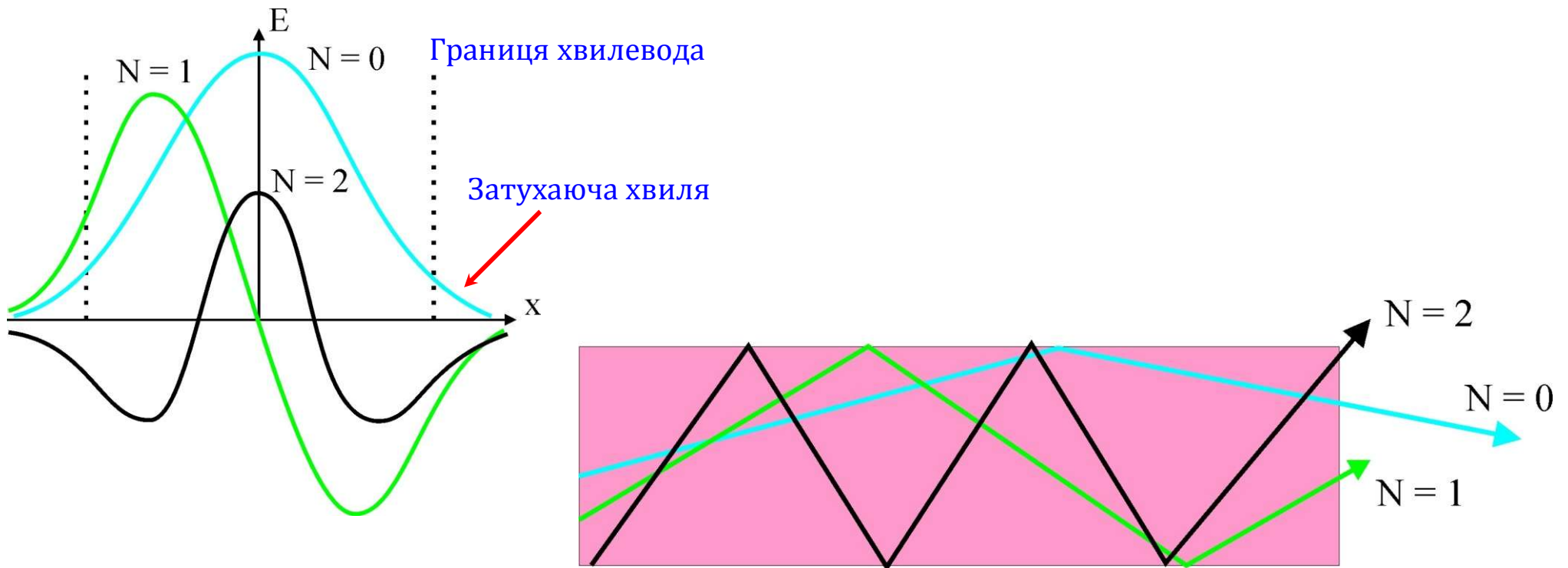
## Оптичні моди в хвилеводах

Для хвилеводів використання законів геометричної оптики для опису інжектованих світла є обмеженим – можливою є інтерференційна взаємодія падаючої та відбитої хвилі

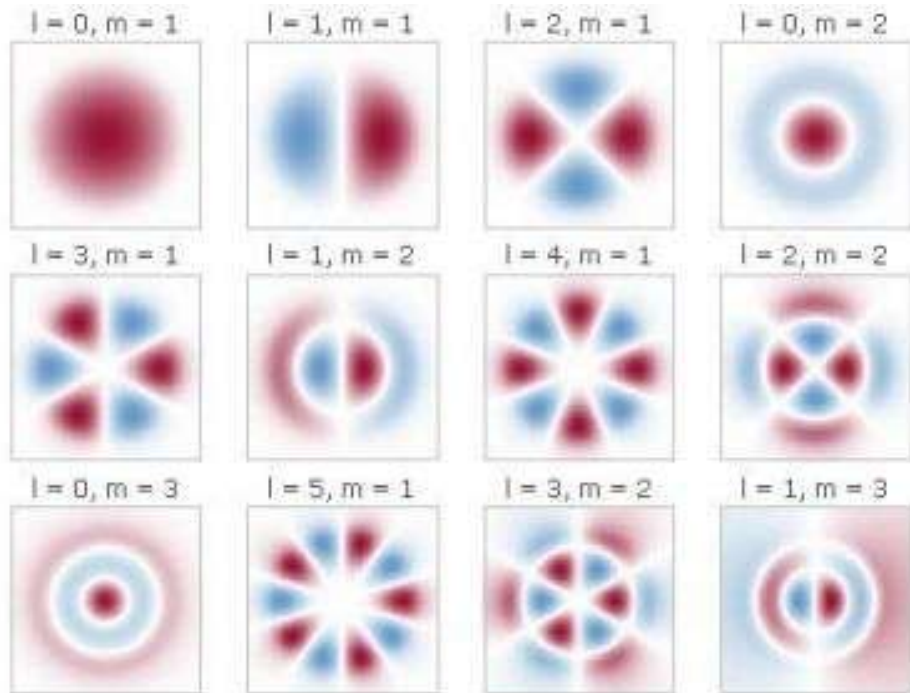
Розглядають розподіл поля для даної оптичної частоти і поляризацію в площині, перпендикулярній до напрямку поширення.

Розподіли, які не змінюються під час поширення, не враховуючи загальної зміни фази - моди хвилеводу.

У кожній моді є константа поширення, дійсна частина якої визначає затримку фази на одиниці відстані розповсюдження



## Оптичні моди в хвилеводах



*Амплітуди електричного поля для всіх мод оптоволоконна.  
Два кольори - різні значення величини електричного поля.*

Оптичні волокна можуть бути одномодовими і багатомодовими. Діаметр серцевини одномодових волокон становить від 7 до 10 мікрон. Завдяки малому діаметру досягається передача по волокну лише однієї моди випромінювання, за рахунок чого виключається вплив дисперсійних спотворень. **В даний час практично всі вироблені волокна є одномодовими.**





## Втрати і спотворення оптичного сигналу у волокні

1. Власні втрати на поглинання в кварцовому склі
2. Домішкові втрати на поглинання: Fe, Cu, Ni, Mg, Cr, OH.
3. Релеєвське розсіювання.
4. Втрати на мікро-і макровигинах.
5. Втрати в з'єднаннях волокон
6. Міжмодова дисперсія.
7. Матеріальна дисперсія (хроматична дисперсія).
8. Поляризаційна дисперсія.
9. Двопроменезаломлення
10. Вимушене розсіювання Мандельштама-Бріллюена
11. Вимушене раманівське розсіювання
12. Фазова само модуляція
13. Чотиривхвильове зміщення
14. Модуляційна нестійкість
15. Накопичений шум



### Загасання сигналу

#### Закон Бугера

$W_0$  – сигнал на вході,

$\alpha$  - коефіцієнт затухання (дБ/км),

$L$  – довжина волокна.

Одномодовое кварцеве волокно:  $\alpha \sim 0.2$  дБ/км,

пластиковое:  $\alpha \sim 300$  дБ/км.

$$W(L) = W_0 e^{-\alpha L}$$

Величина затухання, виражена в децибелах, дорівнює десятковому логарифму відношення  $W_0$  до  $W$ , помноженому на десять

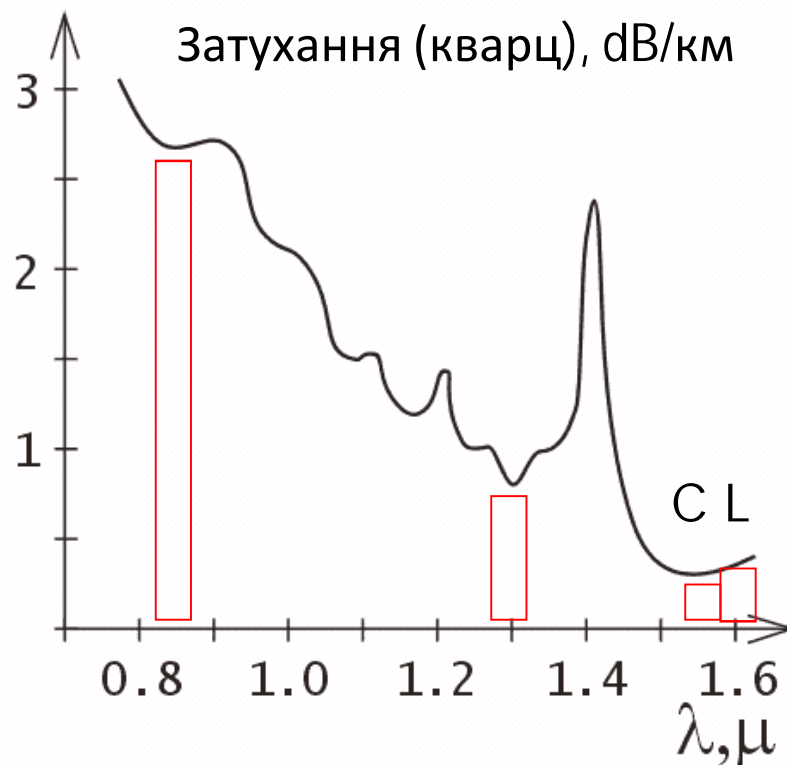
*Зміна на 1 дБ, відповідає зміні сигналу в 1,26 рази.*

*Зміна на 3 дБ відповідає зміні сигналу в 2 рази.*

## Втрати на поглинання

**Вікна прозорості** (всі в інфрачервоному діапазоні): 0.85мкм, 1.3мкм, 1,55 мкм. У відповідність цим вікнам випускаються і випромінювачі. На даний момент всі швидкісні системи оптичної передачі працюють в одному з трьох діапазонів:

- С-смуга(1530-1565нм)
- Lсмуга (1565-1620нм)
- вікно прозорості в околі 1.3мкм



Розсіювання енергії відбувається через мікроскопічні неоднорідності в волокні.

**Поглинання** - перетворення енергії світла в теплову. Технології дозволяють створити такі матеріали, в яких поглинання на 6 кілометрах довжини виявляється менше, ніж у віконному склі товщиною 3 мм.

**Втрати на стиках** – центрування, паралельність сколів, їх якість.

**Втрати на вигинах** -вихід випромінювання за межі серцевини і поглинання в оболонці.

Для оптичних кабелів, на основі одномодових волокон, що працюють на довжинах хвиль 1,3 і 1.5мкм вигин не критичний, оскільки волокна в кабелі вже попередньо закручені навколо осі.

## Втрати на поглинання

### Поглинання

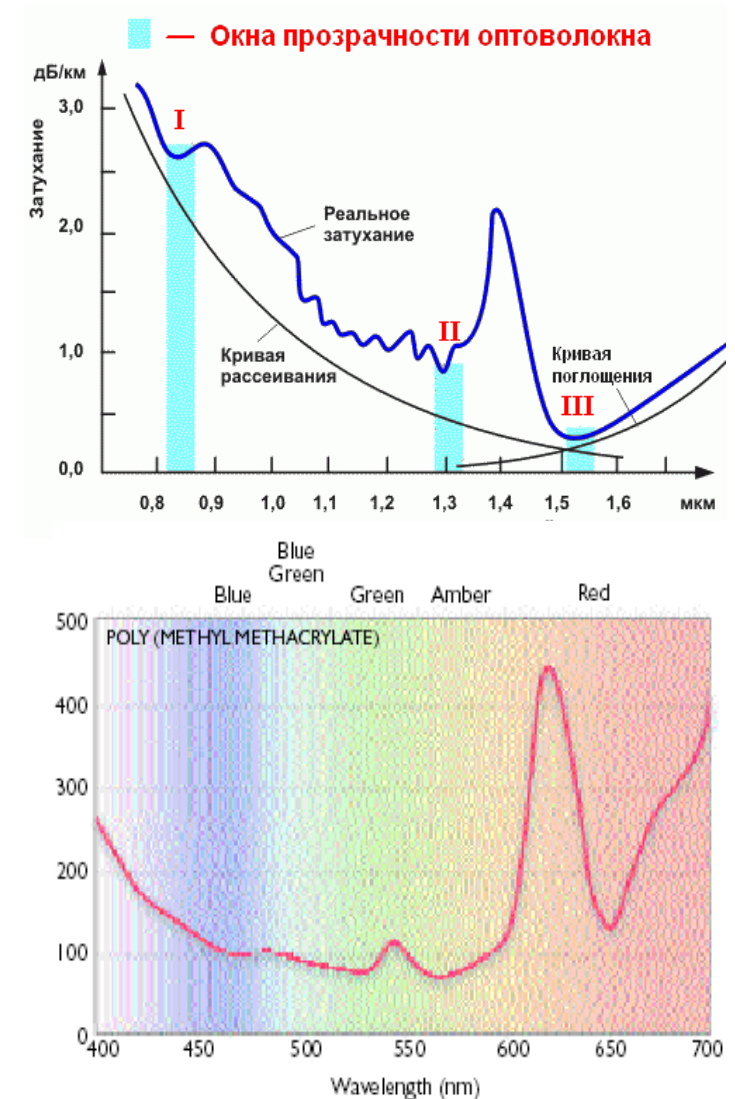
власне поглинання в матеріалі світловода

Причини: в УФ-області - переходи між енергетичними рівнями атомів, в ІЧ-області - багатофотонні і коливальні збудження молекул;

домішкове

концентрація домішки  $10^{-6}$  ваг.ч.:

Домішковий іон	втрати, дБ/км	$\lambda$ піка поглинання, мкм
Fe <sup>2+</sup>	0.68	1.1
Fe <sup>2+</sup>	0.15	0.4
Cu <sup>2+</sup>	1.1	0.85
Cr <sup>3+</sup>	1.6	0.625
V <sup>4+</sup>	2.7	0.725
ОН <sup>-</sup>	1.0	0.95
ОН <sup>-</sup>	2.0	1.24
ОН <sup>-</sup>	4.0	1.38



## Дисперсія волокна

Дисперсія волокна – розпливання (уширення) світлового імпульсу у міру його руху по оптоволокну.

### Типи дисперсії

#### модова

Причина: промені з різними кутами падіння проходять різні відстані.

Наявна тільки в багатомодових системах.

Для часу розповсюдження по волокну осьового променя:  $t_1 = \frac{\bar{n}_1 l}{c}$

$$\bar{n}_1 \sin \theta_c = \bar{n}_2$$

Для променя з мінімальним кутом  $\theta$  час розповсюдження рівний  $t_2 = \frac{\bar{n}_1 l}{c \cdot \sin \theta_c} = \frac{\bar{n}_1^2 l}{\bar{n}_2 c}$

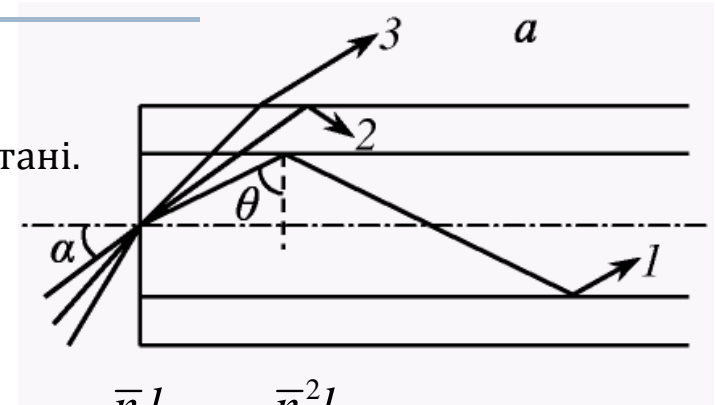
$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \cdot \frac{\Delta \bar{n} l}{c} \approx \frac{\Delta \bar{n} l}{c}$$

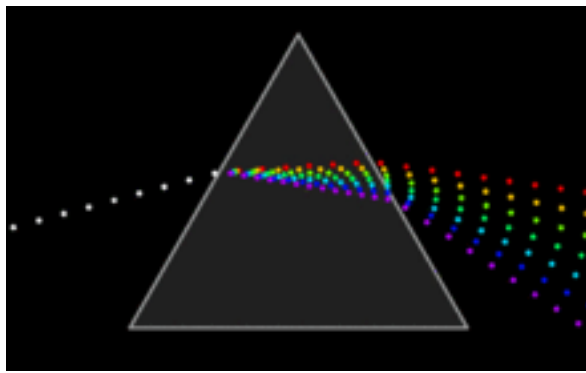
$\Delta \bar{n} = 0,01$  і  $l = 1$  км - уширення імпульсу  $\Delta t$  становить приблизно 33 нс.

*міжмодова дисперсія в градієнтному волокні менша, ніж в східчастому. Це пояснюється тим, що швидкість розповсюдження зовнішньоосевих променів в градієнтному волокні вища, ніж в східчастому через менший показник заломлення в периферійних шарах серцевини, де проходять траєкторії зовнішньоосевих променів*

### Хвилеводна дисперсія

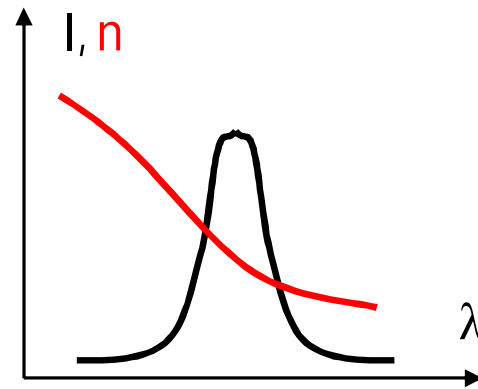
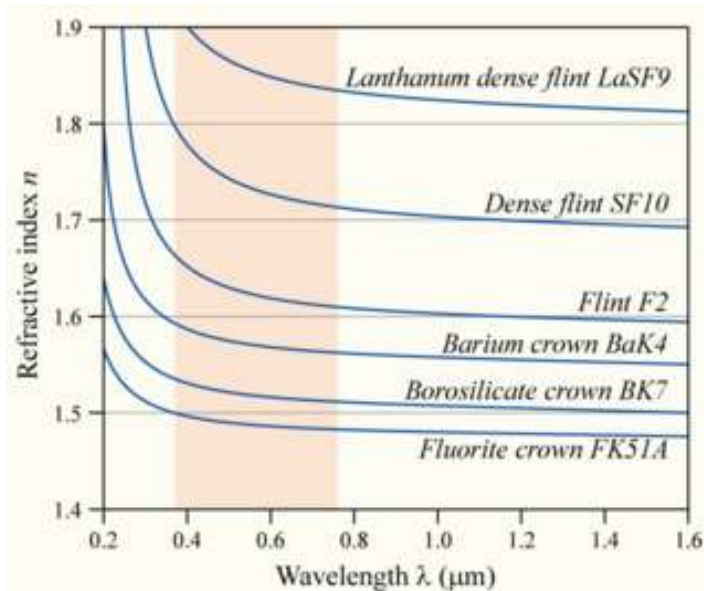
Причина: 20% світла поширюється по оболонці. Залежить від геометричних властивостей хвилеводу.





## Дисперсія волокна

При поширенні світла волокні хвилі різної довжини поширюються з різною швидкістю – виникає затримка по фазі на одиниці довжини шляху – **хроматична (матеріальна) дисперсія волокна**.



Приклад . Якщо ширина спектру випромінювання світлодіода зі свіченням в ближньому інфрачервоному діапазоні ( 800нм ) складає 50нм , то світлові імпульси розширюються на 5нс при проходженні кожного кілометра

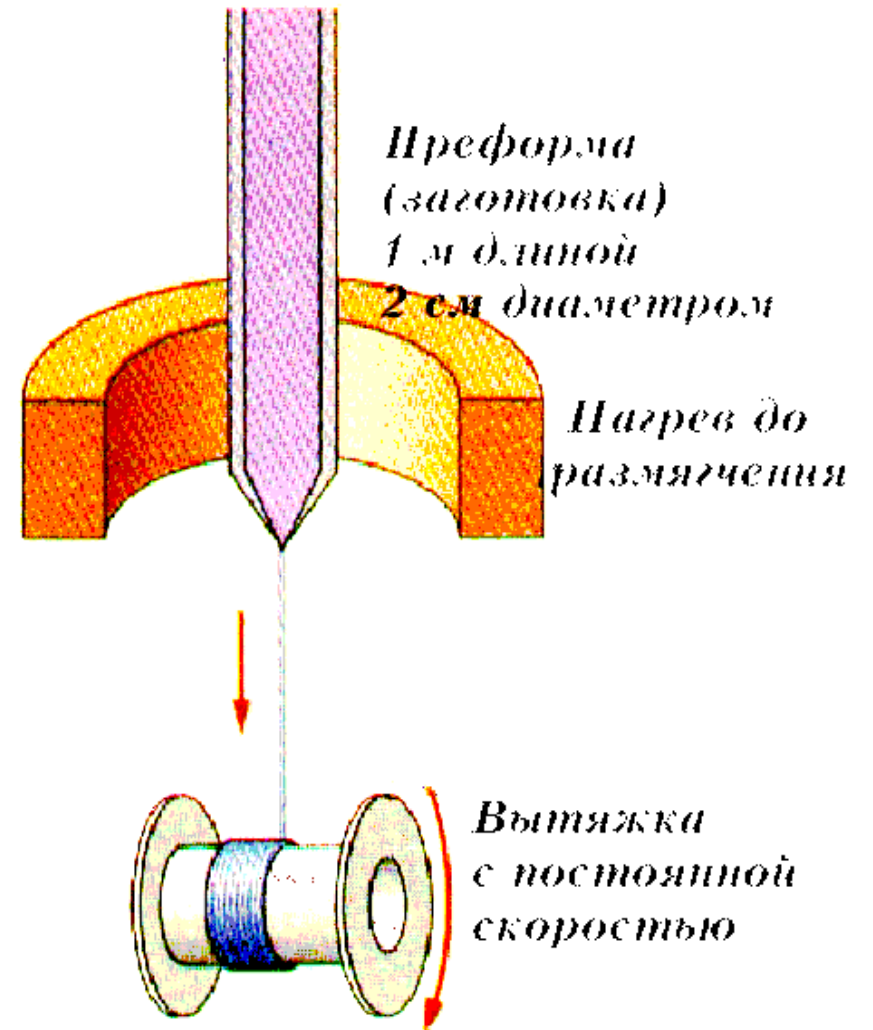
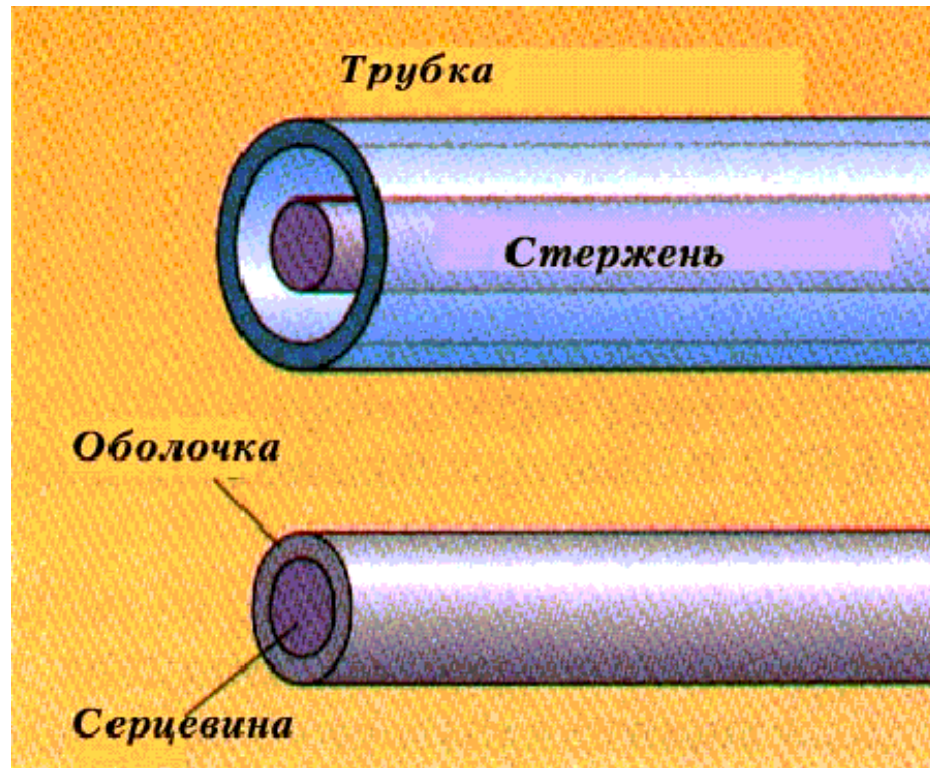
Крізь таку кілометрову лінію можна пропустити сигнал з максимальною частотою приблизно 100МГц , а смуга пропускання кабелю буде 100МГц/км .

Довжини хвиль 1.3мкм і 1.5мкм ( мінімуми з поглинання для волокон деяких типів) є також точками мінімальної матеріальної дисперсії .

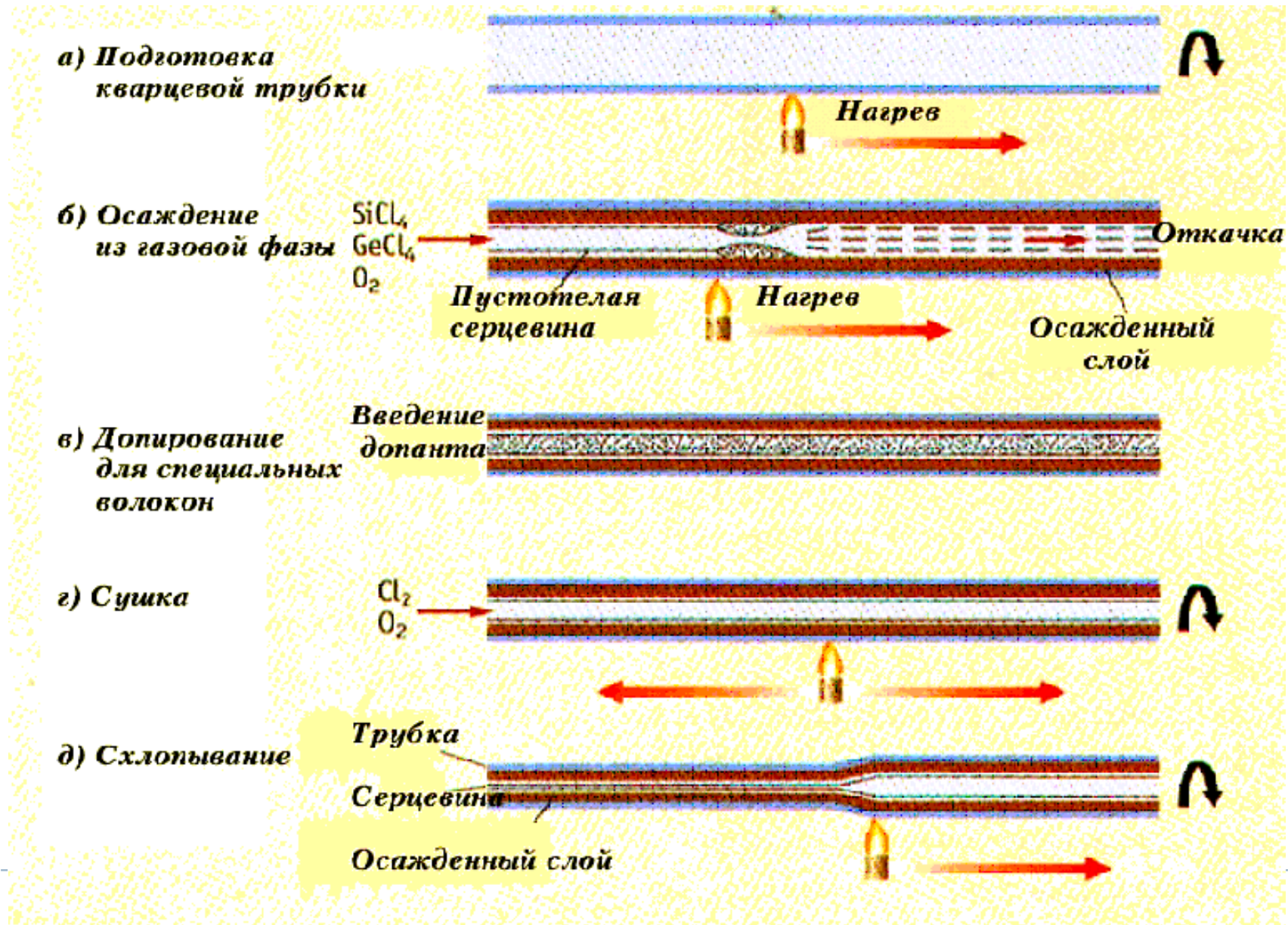
Підбір складу і легування оптичних волокон дозволяють вирівняти залежність  $n(\lambda)$



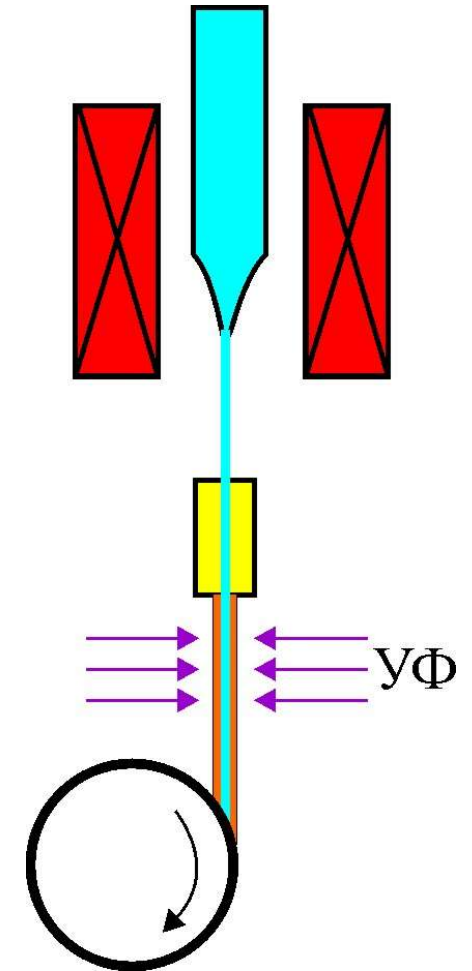
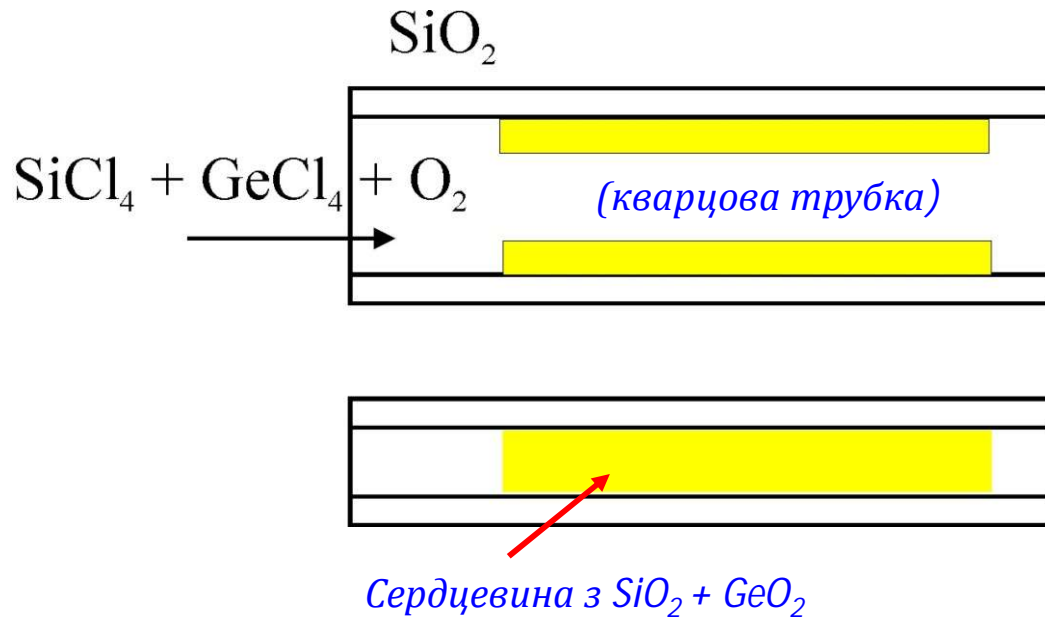
## Виготовлення волокна



## Виготовлення заготовки методом хімічного осадження з газової фази

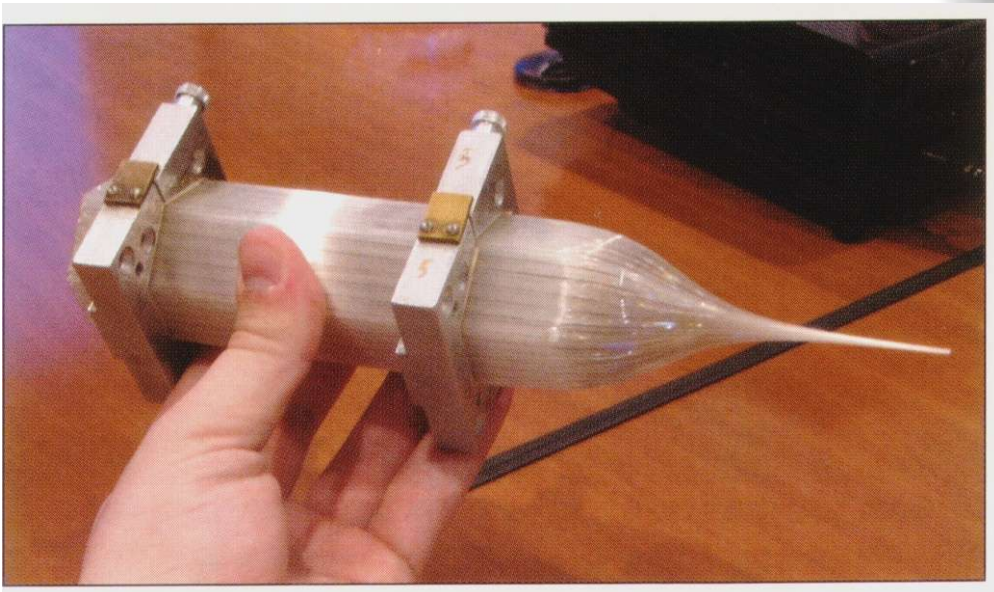
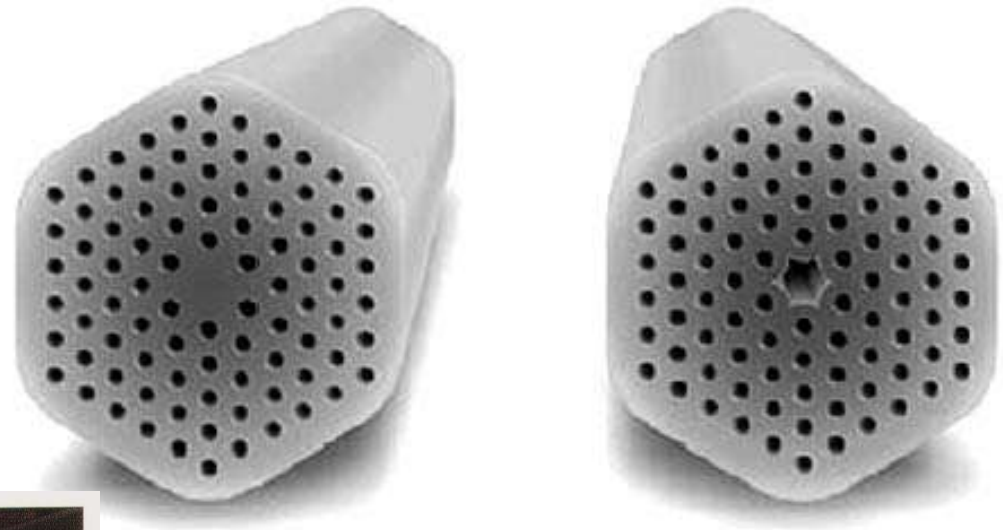


## Виготовлення заготовки





## Фотоннокристалічні волокна



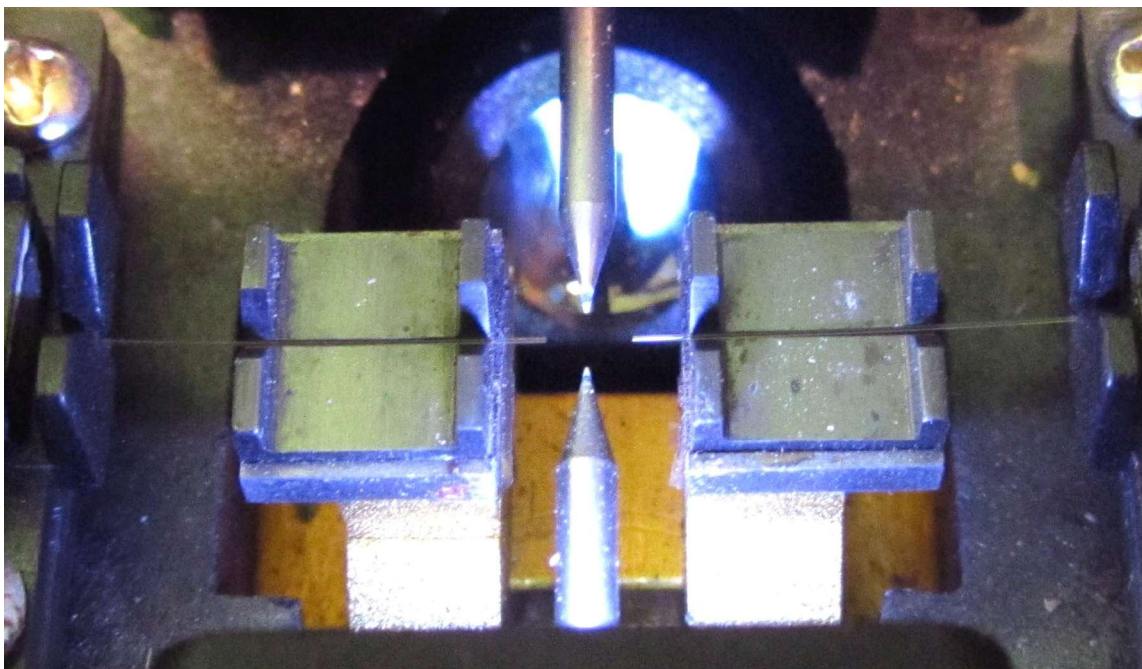
Втрати  
0.001...0.0001 дБ/км

Поперечний розмір:  
50...100 мкм



## Зварка оптоволокна

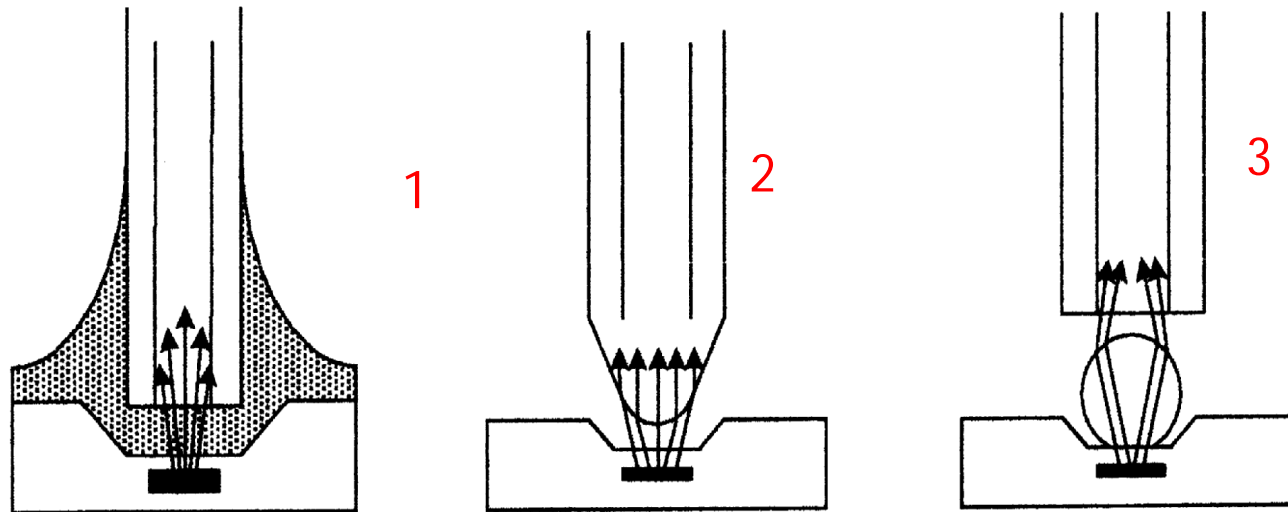
---



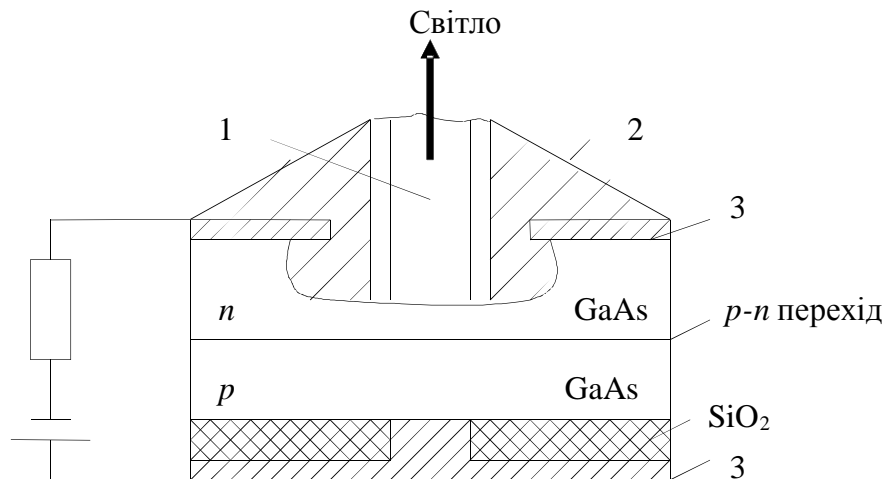
Зварка волокон



## Ввід випромінювання у волокно

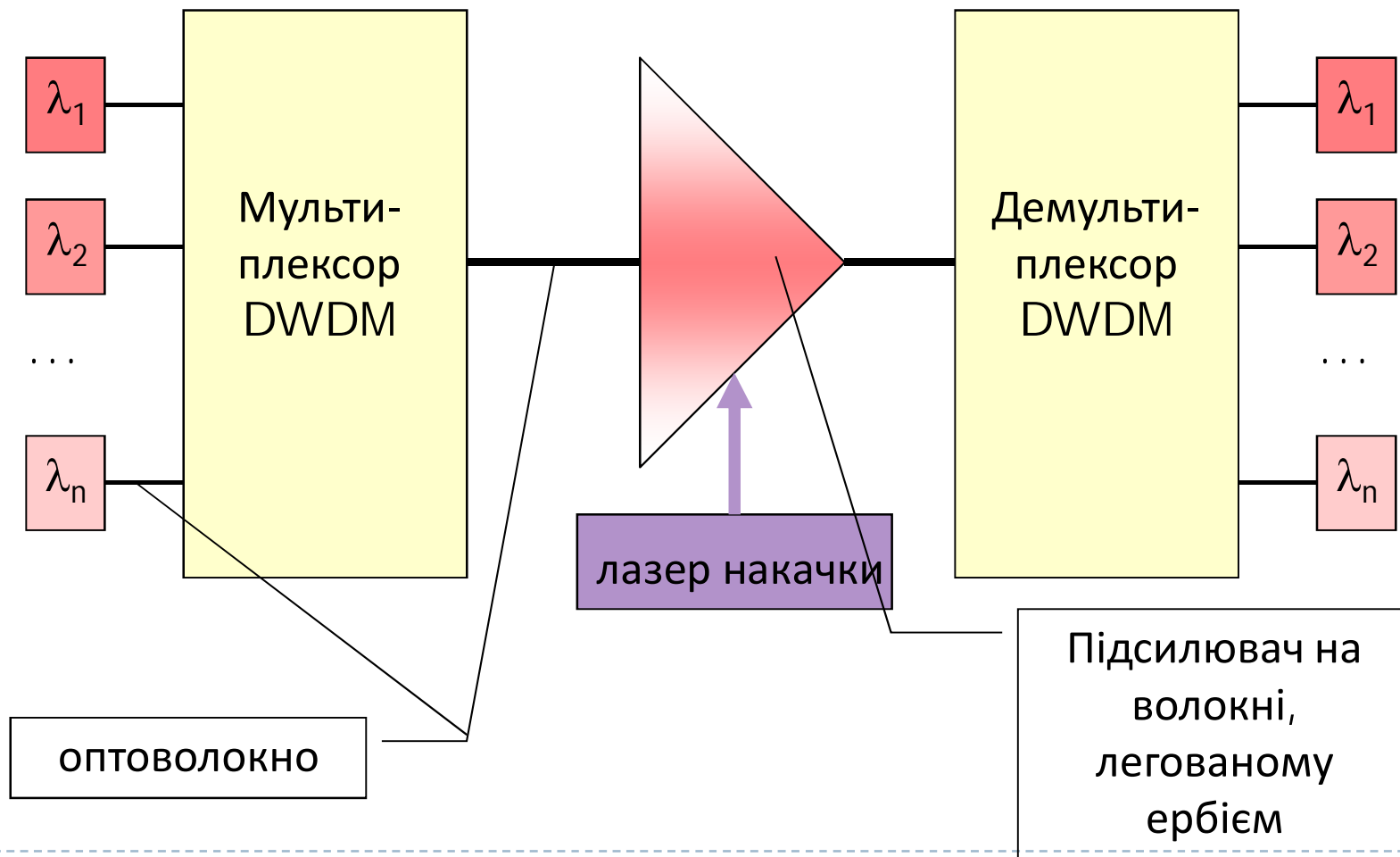


- 1) – використання імерсійного клею наповнювача з коефіцієнтом заломлення, близьким до коефіцієнта заломлення волокна;
- 2) - кінець волокна загострений і закруглений у формі лінзи, що збирає розбіжне випромінювання;
- 3) - сферична лінза, розташована на поверхні світлодіода

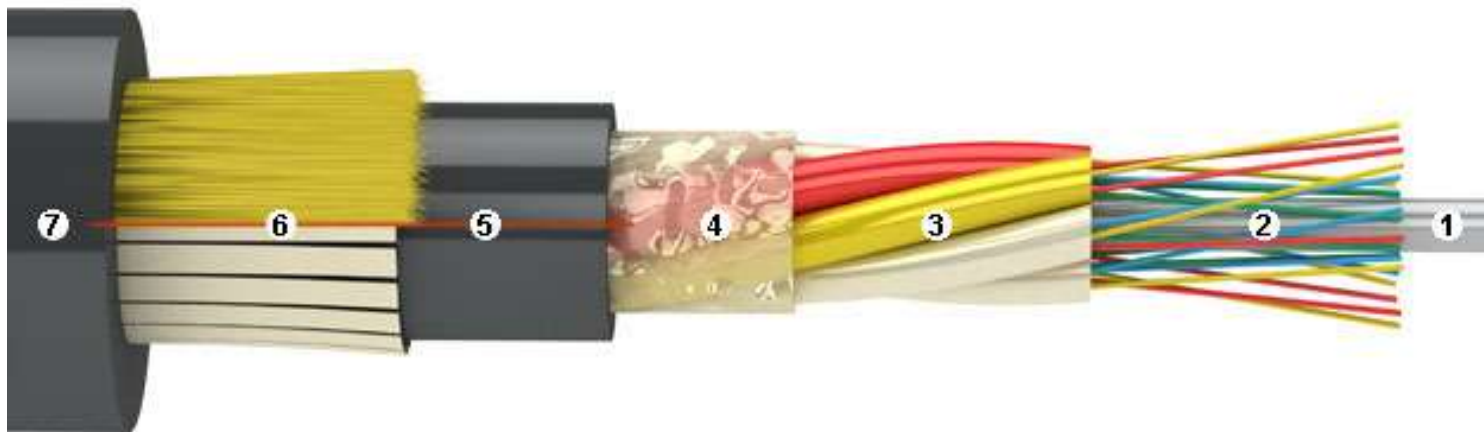


1. Оптичне волокно
2. Імерсійний клей
3. Електрод

## Спектральне ущільнення з мультиплексування по довжині хвилі



## Оптоволоконный кабель



- 1 - центральний силовий елемент
- 2 - оптичні волокна
- 3 - пластикові трубочки-модулі
- 4 - захисна плівка
- 5 - тонка внутрішня оболонка з поліетилену
- 6 - кевларові нитки або броня



**Оптичний підсилювач** - пристрій, що забезпечує збільшення потужності випромінювання.

Підсилення світла в оптичних системах здійснюється за рахунок енергії зовнішнього джерела. Основою підсилювача є активне фізичне середовище, в якому завдяки енергетичній підкачці збільшується потужність випромінювання.

В якості активного середовища застосовуються напівпровідники і скловолокна з домішками ербію (Er), неодиму (Nd), празеодиму (Pr), тулію (Tm).

### Вимоги до підсилювачів

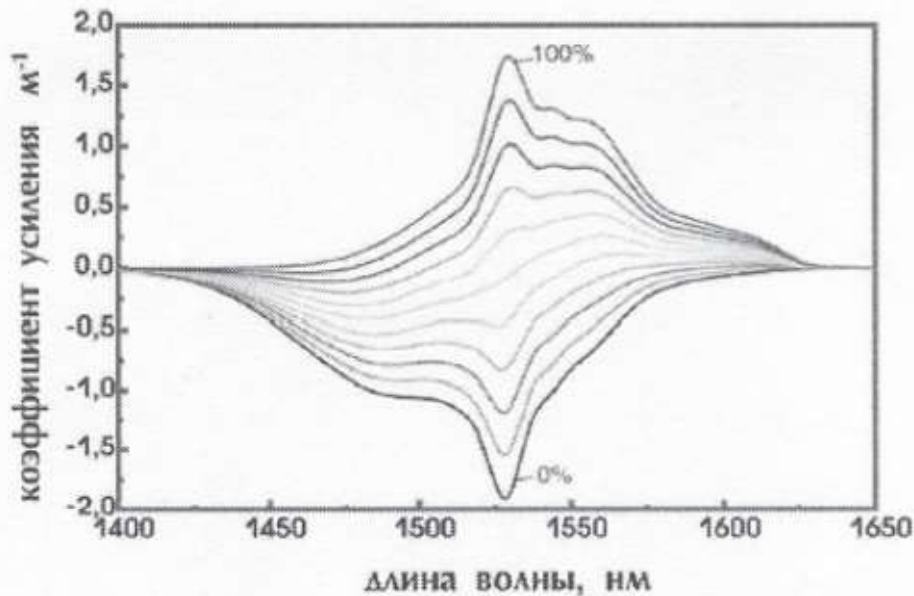
1. високий коефіцієнт підсилення в заданому діапазоні оптичних частот;
2. малі власні шуми;
3. нечутливість до поляризації;
4. узгодження з волоконно-оптичними лініями;
5. мінімальні нелінійні та лінійні спотворення оптичних сигналів;
6. великий динамічний діапазон вхідних сигналів;
7. потрібне посилення багаточастотних (багатохвильових) оптичних сигналів;
8. тривалий термін служби;
9. мінімальна вартість



## Принцип дії ербієвого підсилювача

Принцип роботи підсилювачів EDFA бізується на підсилення світла при вимушеному випромінюванні

Оптичний сигнал потрапляє в область волокна , доповану іонами ербію . Слітло зовнішнього джерела (лазер накачки) впливає на іони ербію, переводячи їх зовнішні електрони в збуджений стан. В системі створюється інверсна заселеність енергетичних рівнів ербію . Коли в систему входить фотон корисного сигналу , він взаємодіючи зі збудженим атомом ербію , змушує його випромінити енергію у вигляді кванта випромінювання , властивості якого , ідентичні властивостям початкового кванта корисного сигналу.



Спектральна залежність посилення / поглинання ербієвого волокна при різних значеннях відносної населеності метастабільного рівня енергії

## Принцип дії ербієвого підсилювача

Використання трирівневої схеми накачування визначає властивості ербієвого підсилювача:

**Наявність порогової потужності накачування. При перевищенні якої починається посилення сигналу. Величина порядку мВт.**

**Необхідність вибору оптимальної довжини ербієвого волокна (при якій підсилення максимальне) .**

При довжині волокна  $>$  оптимальної в далеких ділянках волокна спостерігатиметься поглинання сигналу , а при довжині  $<$  оптимальної - випромінювання накачування використовується не повністю.

Оптимальна довжина ербієвого волокна залежить від частоти підсилюваного сигналу .

Чим менша частота сигналу , тим довший відрізок ербієвого волокна відповідає максимальному підсиленню .



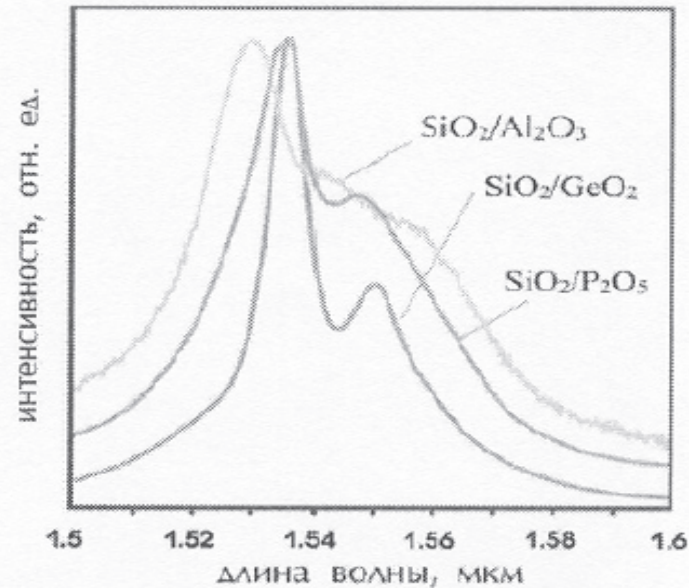
Оптичне накачування, необхідне для переводу іонів ербія в збуджений стан, здійснюється на довжинах хвиль, відповідних однієї з їхніх смуг поглинання.

Найбільша ефективність використання накачування - на довжинах хвиль 980 і 1480 мкм

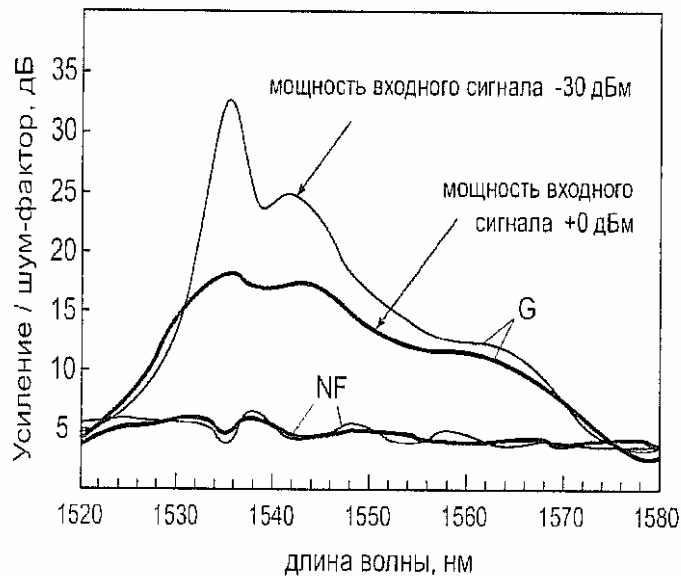




## Робота та характеристики ербієвого підсилювача



Спектри випромінювання іонів ербію в кварцевому склі з різними добавками



Спектральна залежність коефіцієнта шуму та підсилення ербієвого підсилювача

Для практичного використання в системах волоконно-оптичного зв'язку найбільше значення мають наступні параметри ербієвого підсилювачів:

- коефіцієнт підсилення  $G$ ;
- вихідна потужність сигналу та енергетична ефективність накачування;
- шум-фактор і потужність посиленого спонтанного випромінювання;
- спектральна ширина і рівномірність смуги підсилення.

Коефіцієнт підсилення - відношення потужності сигналу на виході оптичного підсилювача до потужності сигналу на його вході з врахуванням втрат на мультиплексорі і в оптичному ізоляторі.

У серійних підсилювачах коефіцієнт підсилення сигналу знаходяться в районі 30 дБ.

Основним джерелом шуму в підсилювачі на волокні, легovanому ербієм, є самовільне випромінювання при переході іона ербію з метастабільного рівня енергії 2 на основний рівень 1

### Покоління передачі і прийому оптичної інформації:

1. 1975 р. - діод, що працює на довжині хвилі 0.85 мкм , багатомодове оптоволокно , AlGaAs / GaAs світлодіодний або лазерний передавач , кремнієвий детектор.
2. 1982 р. - одномодові передавачі, що працюють на довжині хвилі 1.3 мкм.
3. 1989 р. - діодні лазери 1.55 мкм , одномодове волокно зі зміщеною дисперсією.
4. Когерентні системи зв'язку , частотна або фазова модуляція - велика дальність передачі .  
(Когерентна ВОЛЗ на швидкість передачі 2.5 Гбіт/с довжиною в 300 км ).  
в 1990 році вчені вперше створено систему зв'язку із застосуванням оптичних підсилювачів на швидкість 2.5 Гбіт / с на відстань 2200 км .
5. Застосування з 1990х років оптичних підсилювачів на основі світловодів , легованих ербієм , підсилення до 30 dB.



## Переваги та недоліки оптоволоконна

### Переваги оптоволоконна :

1. Висока частота передачі сигналу, широка смуга пропускання, висока швидкість передачі інформації ( до 100 Тбіт/ с);
2. Передача сигналу одночасно в двох напрямках , використання хвиль двох перпендикулярних поляризацій .
3. Частотне ущільнення по оптоволоконним лініям зв'язку - передача різних сигналів на різних довжинах хвиль.
4. Низькі втрати ( 0,2-0,3 дБ/ км при  $\lambda = 1,55$  мкм) . Втрати не залежать від частоти передачі сигналу;
5. Нечутливість до електромагнітних перешкод , відсутність спотворень ;
6. Мала вага і розмір;
7. Пожежо-і вибухобезпечність ;
8. Складність прослушки сигналу без порушення прийому / передачі, інформаційна безпека .

### Недоліки оптоволоконна:

1. Крихкість ;
2. Складність виготовлення ;
3. Зниження ефективності з часом;
4. Відносно дорожче обладнання , монтаж та обслуговування.
5. Електроніка відстає від оптики по частотах .



При інтеграції інжекційного лазера в оптичний хвилевід виникають труднощі, пов'язані з погіршенням зворотного зв'язку від грані, яка перебуває в оптичному контакті з хвилеводом.

$$R = \left( \frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2$$

*коефіцієнт відбивання грані різко зменшується через близькість показників заломлення матеріалу лазера і пасивного хвилевода, що приводить до збільшення втрат в резонаторі лазера.*

---

Вирішення проблеми –

лазери з розподіленими брегівськими відбивачами (РБВ)

лазери з розподіленим зворотнім зв'язком (РЗЗ)

лазери з вертикальними резонаторами (ВР)

---

**РБВ-лазер** - одновимірний фотонний кристал, виготовляють методом молекулярно-променевої епітаксії.

**Перевага** – можливість відбивати світлові хвилі з вузькою смугою частот

**Широке застосування** відбивачів в оптичній техніці (фільтри, вбудовані в волокна відбивачі, сенсори)

---



## РБВ-лазер

**РБВ-лазер** - в якості дзеркал резонатора використовується розподілений бреггівський відбивач (РБВ), що знаходиться **поза активним середовищем**.

РБВ – бреггівське дзеркало, світловідбиваючий пристрій, на бреггівського відбиванні в періодичній структурі.

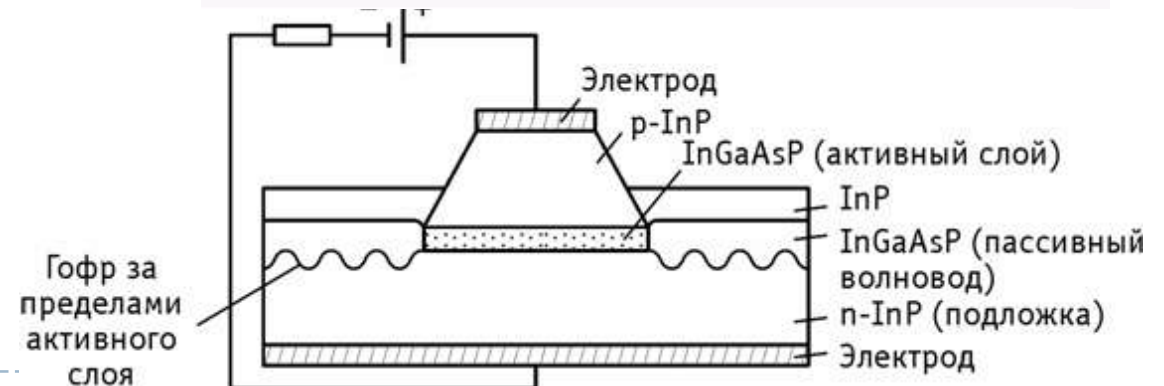
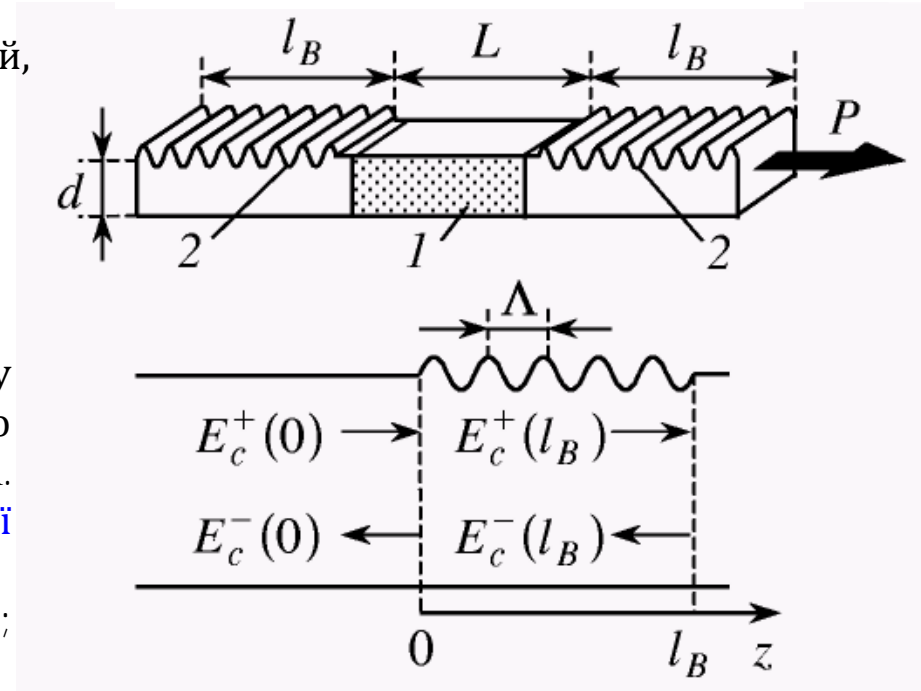
*Більшість твердотільних об'ємних мікролазерів використовують бреггівські дзеркала.*

**РБВ-лазер** складається з активної області, в яку інjektуються електрони і двох відрізків пасивного хвилеводу, верхні поверхні яких гофровані з періодом  $\Lambda$ . Поширення світла в структурі залежить від оптичної товщини хвилевода  $nd$ , де  $n$  - показник заломлення,  $d$  – геометрична товщина; **зміна  $d$  еквівалентна зміні показника заломлення  $n$ .**



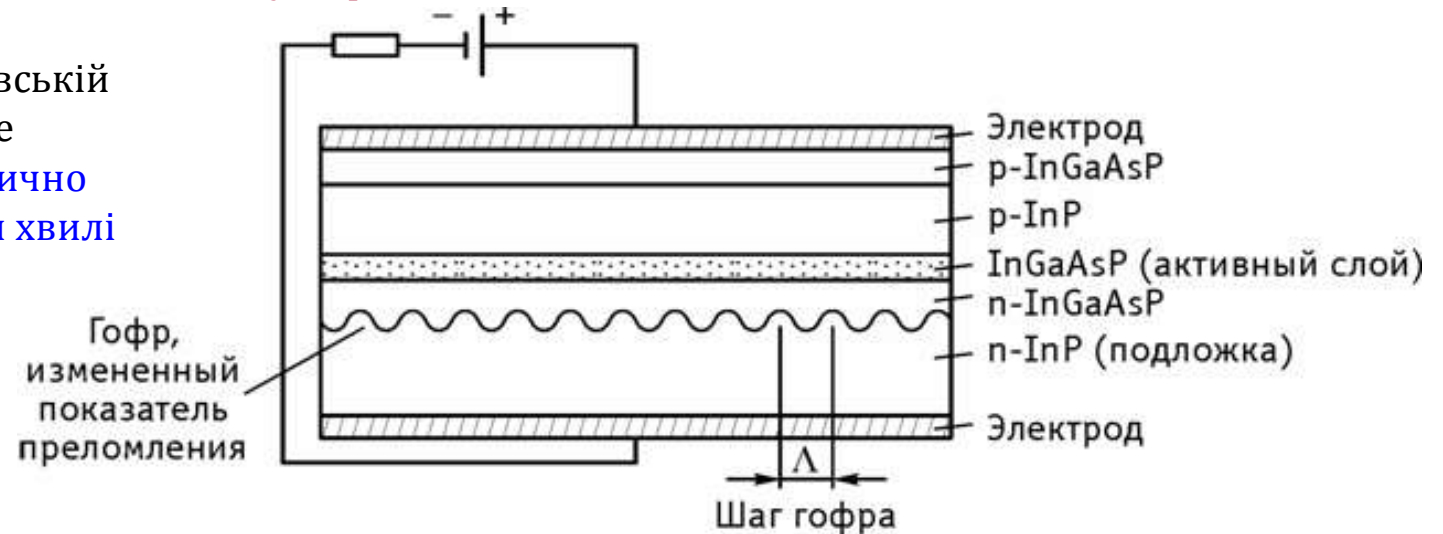
**Переваги –**  
вузька лінія  
випромінювання,  
одна мода

**РБВ-лазер.** 1 - активна область; 2 - розподілені бреггівські відбивачі



**РЗЗ-лазер** - в якості дзеркал резонатора використовується розподілений бреггівський відбивач (РБВ), що сформований безпосередньо в активному середовищі.

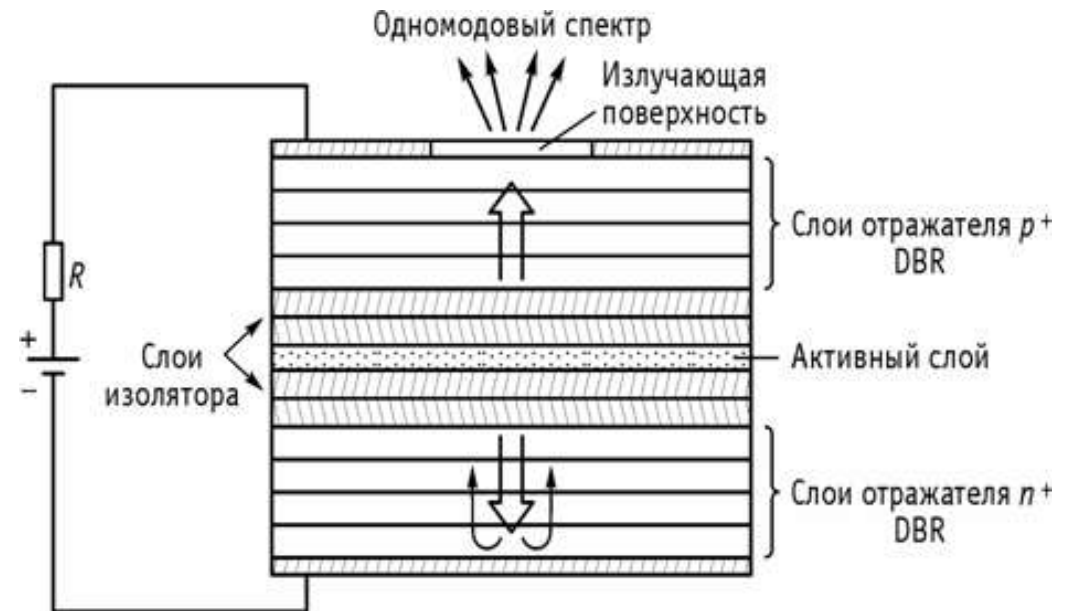
При цьому генерація на брегівській довжині хвилі заборонена, але генеруються **дві моди симетрично відносно брегівської довжини хвилі**

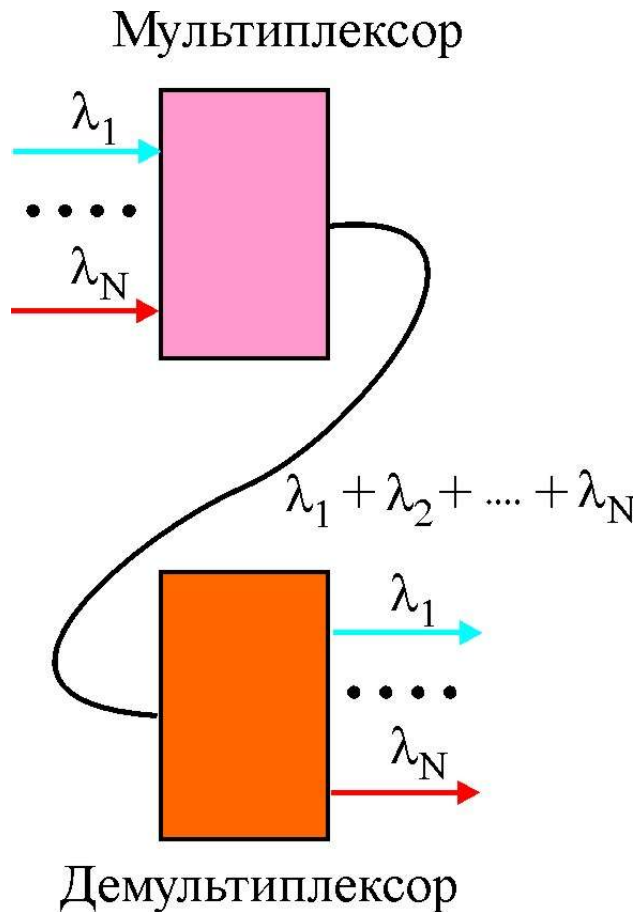


## Лазер з вертикальними резонаторами

Для отримання високої стабільності випромінювання лазерів використовуються **лазери з вертикальними резонаторами ЛВР**. Генерація випромінювання відбувається поперек р-п переходу . Перевага - генерація моди вузького спектру і високої стабільності .

ВР-лазери можуть формуватися групами на одній підкладці мікросхеми, шари відбивача виконані з набору чвертьхвильових пластин , фільтруючих моду випромінювання і формують структуру розподіленого бреггівського відбивача РБВ . Шари ізолятора зменшують спонтанну емісію фотонів.





## WDM - технологія передачі оптичних сигналів

**Спектральне ущільнення каналів** ( Wavelength - division multiplexing , WDM ) буквально мультиплексування з поділом за довжиною хвилі) - технологія, що дозволяє одночасно передавати кілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних несучих частотах.

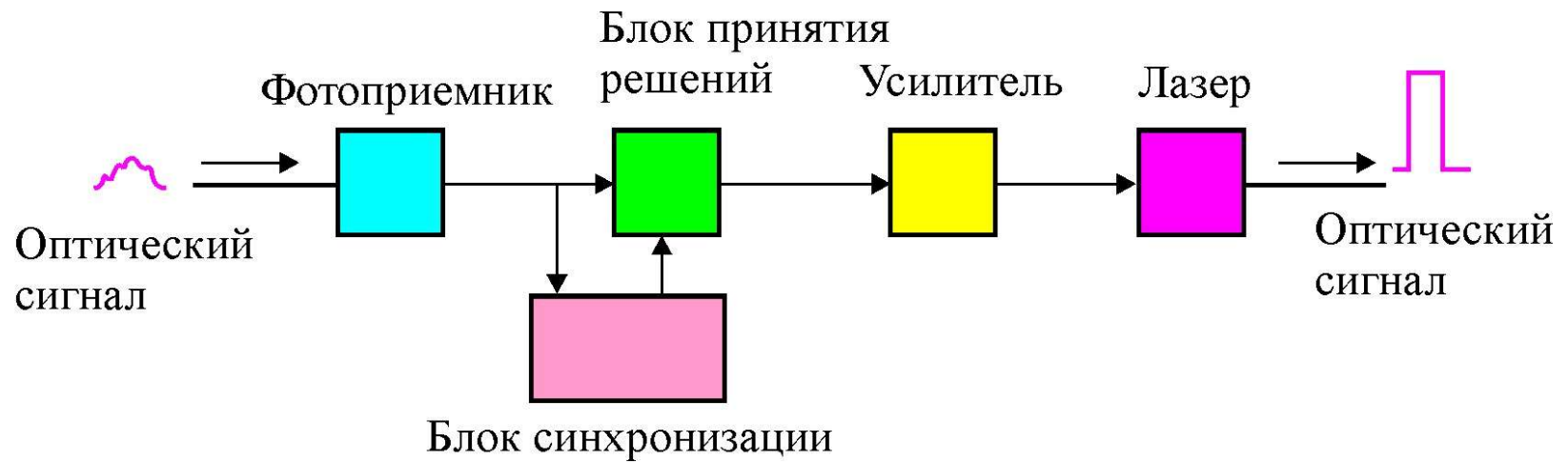
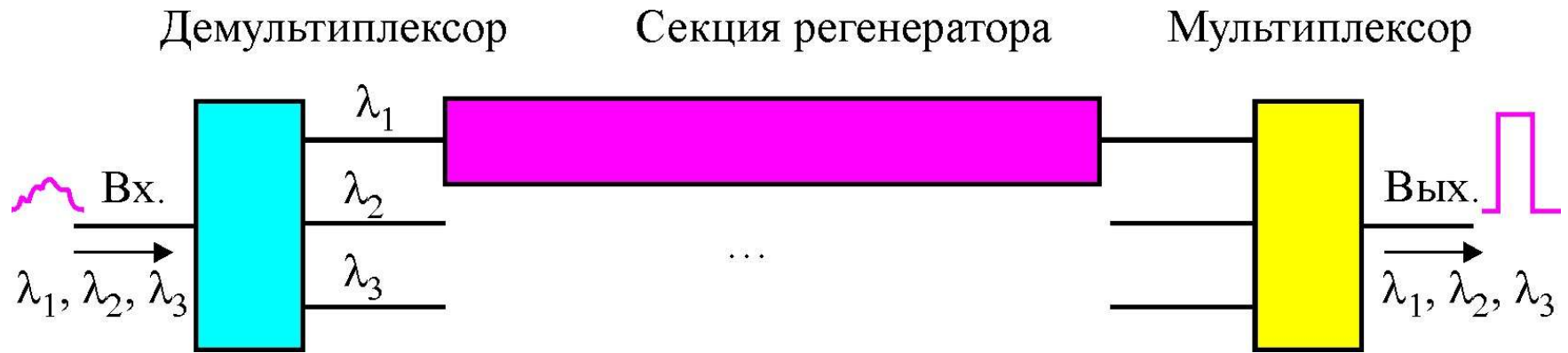
Технологія WDM дозволяє збільшити пропускну здатність каналу (до 2003 року досягнута швидкість 10,72 Тбіт/с , до 2017 - 30 Тбіт/с), причому використовуються вже прокладені волоконно -оптичні лінії. Перевага DWDM -систем -можливість передачі високошвидкісного сигналу на наддалекі відстані без використання проміжних пунктів (без регенерації сигналу і проміжних підсилювачів )

В одному волокні передається 80...320 потоків інформації на різних довжинах хвиль





## Регенератор оптических сигналов



## Структура волоконної лінії зв'язу



## Лекція 7

---

### Пристрої відображення інформації

1. Рідкокристалічний стан речовини
2. Рідкі кристали
3. Сметтики
4. Нематики
5. Доменна структура нематиків
6. Холестерики
7. Ефект Фредерікса в електричному полі
8. Діелектрична анізотропія речовини
9. Вплив магнітного поля на РК
10. Ефект динамічного розсіювання
11. Твіст-ефект
12. Рідкокристалічний індикатор на твіст -ефекті
13. Ефект «гість-господар»
14. Ефект деформації вертикально орієнтованої фази
15. Ефект вибіркового відбивання світла
16. LCD дисплей
17. E-Ink дисплей



## Рідкокристалічний стан речовини

Рідкокристалічний (РК) стан речовини - термодинамічно стійкий стан, при якому речовина зберігає анізотропію фізичних властивостей, притаманну твердим кристалам, і текучість, характерну для рідин.

У РК стані можуть перебувати бензол, стероїди, органічні сполуки

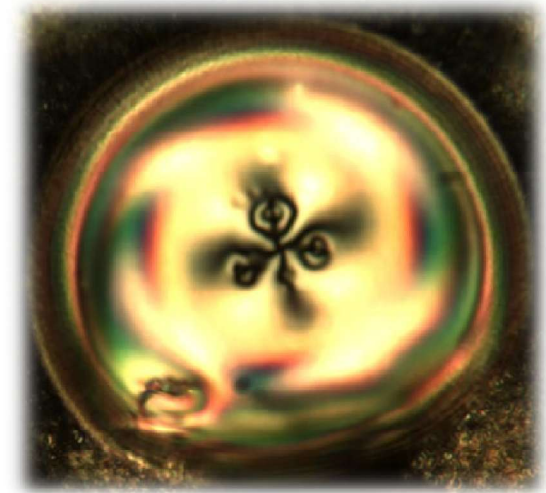
РК- стан речовини існує тільки в певному температурному інтервалі.

**Нижня межа інтервалу** - температура кристалізації  $T_c$

**Верхня межа інтервалу** - температура перетворення рідкого кристалу в однорідну рідину

Діапазон існування РК - від  $-15^{\circ}\text{C}$  до плюс  $+55^{\circ}\text{C}$

Рідкі кристали є діелектриками, питомий опір  $10^6 - 10^{10}$  Ом·см .



Рейнітцер 1888

Відкриття рідких кристалів



Отто Леман 1888

Термін «рідкий кристал»



Джеймс Фергюсон 1963

Зміна кольору РК при нагріванні



Характерна особливість рідкокристалічних речовин стержнеподібна форма молекул.  
Довжина молекул становить 1-10 нм, ширина – 0,1-1 нм.

Стержнеподібні молекулы  $|\vec{L}| = 1$

Директор – одиничний вектор, що має напрям дипольного моменту

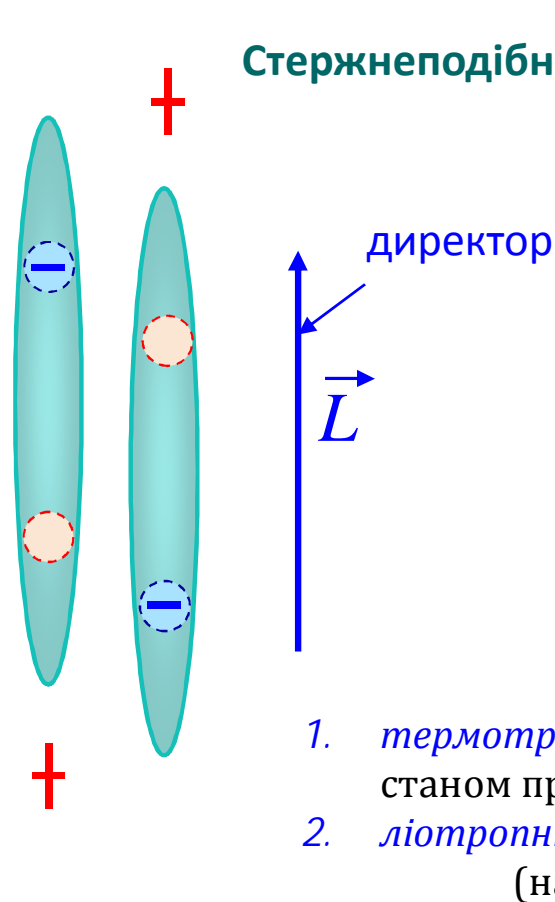
$\vec{L}$  і  $-\vec{L}$  – еквівалентні

директор

$\vec{L}$

Типи рідких кристалів за способом утворення

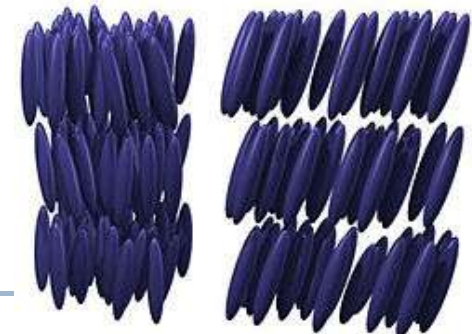
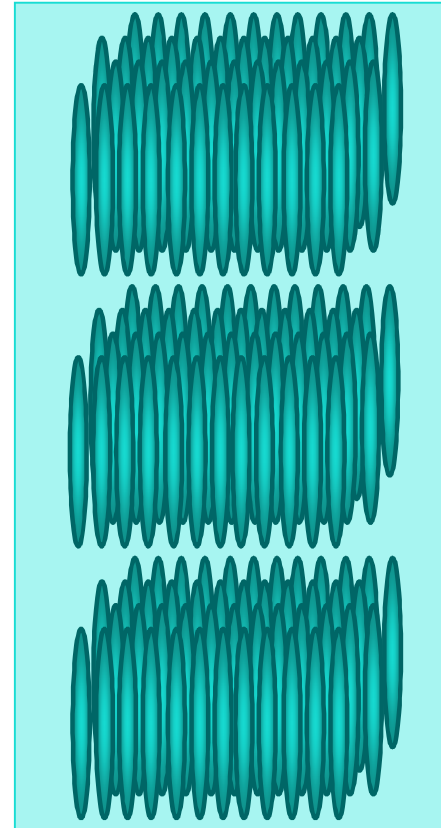
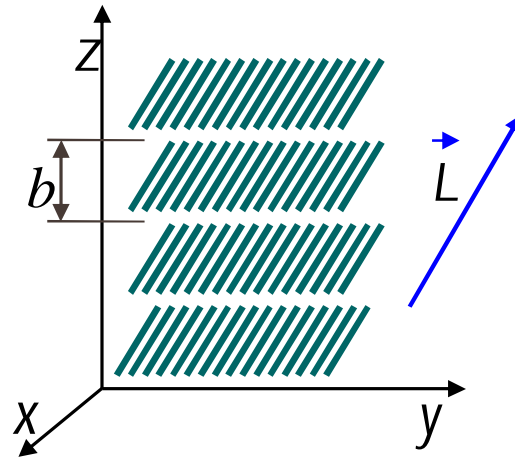
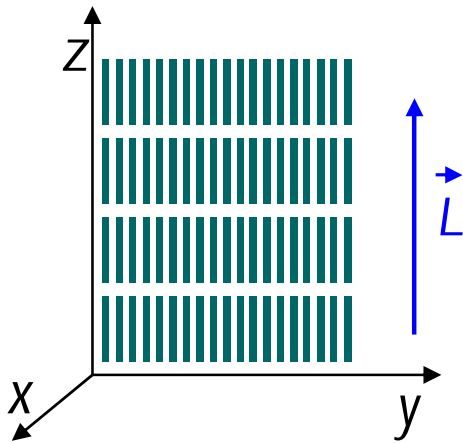
1. *термотропні РК*: проміжна фаза (мезофаза) між кристалічним і рідким станом при плавленні кристала.
2. *ліотропні РК*: розчини твердих органічних сполук у розчинниках (наприклад, мило у воді).

The diagram illustrates rod-like molecules in a liquid crystal phase. Two vertical, light-blue, elongated ellipsoidal molecules are shown. Each molecule has a dashed blue circle with a minus sign (-) at one end and a dashed orange circle with a plus sign (+) at the other end, representing a dipole moment. A red plus sign (+) is placed above the right molecule and below the left molecule. To the right of the molecules, a blue vertical arrow labeled 'директор' (director) points upwards. A blue vector labeled  $\vec{L}$  is shown pointing to the right, parallel to the director arrow. The text  $|\vec{L}| = 1$  is written in blue above the director arrow. Below the diagram, the text 'Директор – одиничний вектор, що має напрям дипольного моменту' and ' $\vec{L}$  і  $-\vec{L}$  – еквівалентні' are written in red and blue respectively.

## Типи рідких кристалів. Сметки

Розрізняють три види рідких кристалів:  
сметичні, нематичні і холестеричні.

**Сметики** - молекули розташовуються паралельно до своїх великих осей, їх центри мас лежать в одній площині. Кристал утворюється шарами однакової товщини.



$$\vec{L}(\vec{r}) = \text{const}$$

$$\rho(x, y) = \text{const}$$

$$\rho(z) = \rho(z + b)$$

текучість

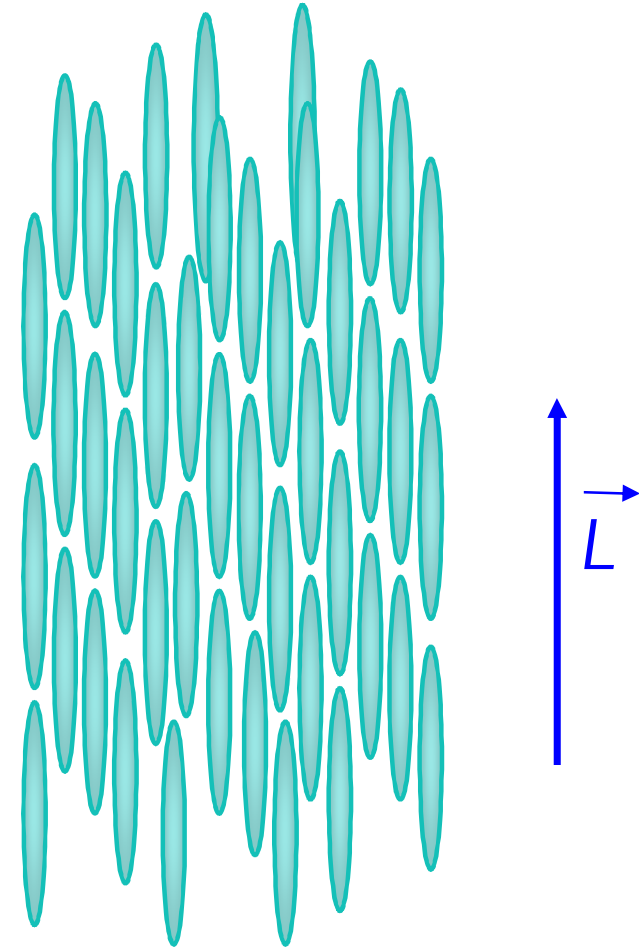
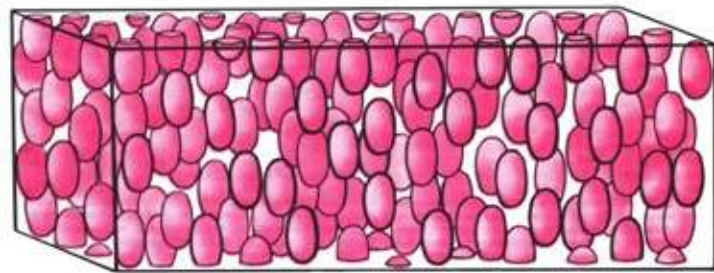


пружність



## Типи рідких кристалів. Нематики

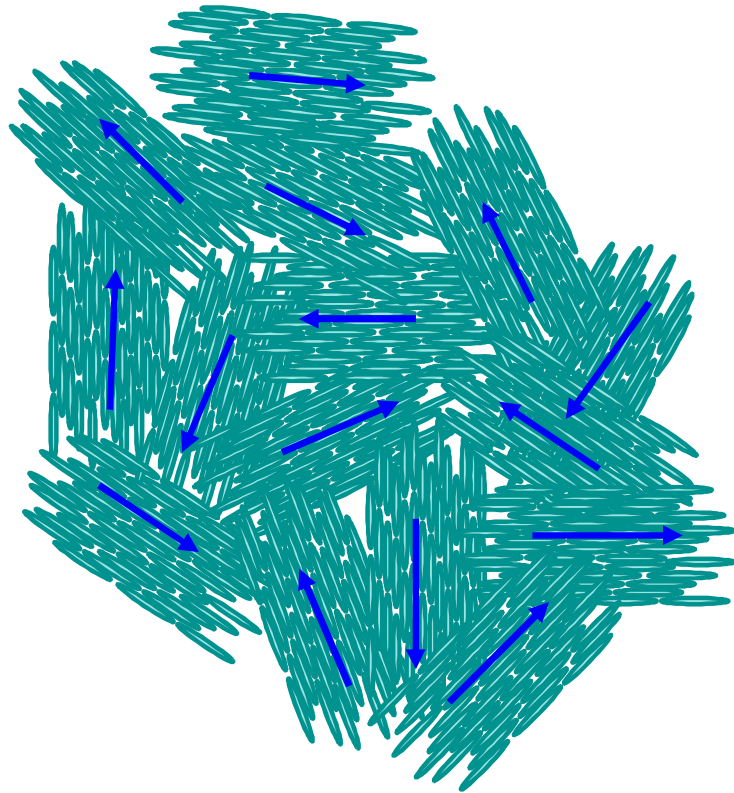
*Нематики* - осі молекул також орієнтовані паралельно одному, проте центри мас молекул розподілені в просторі хаотично і не утворюють чітко виражених шарів.



$$\rho(\vec{r}) = \text{const} \quad \vec{L}(\vec{r}) = \text{const}$$

## Доменна структура нематиків

---



Домени: розмір 0,01 – 0,1 мм

Хаотичний розподіл доменів:

$$|\vec{L}| = 0$$





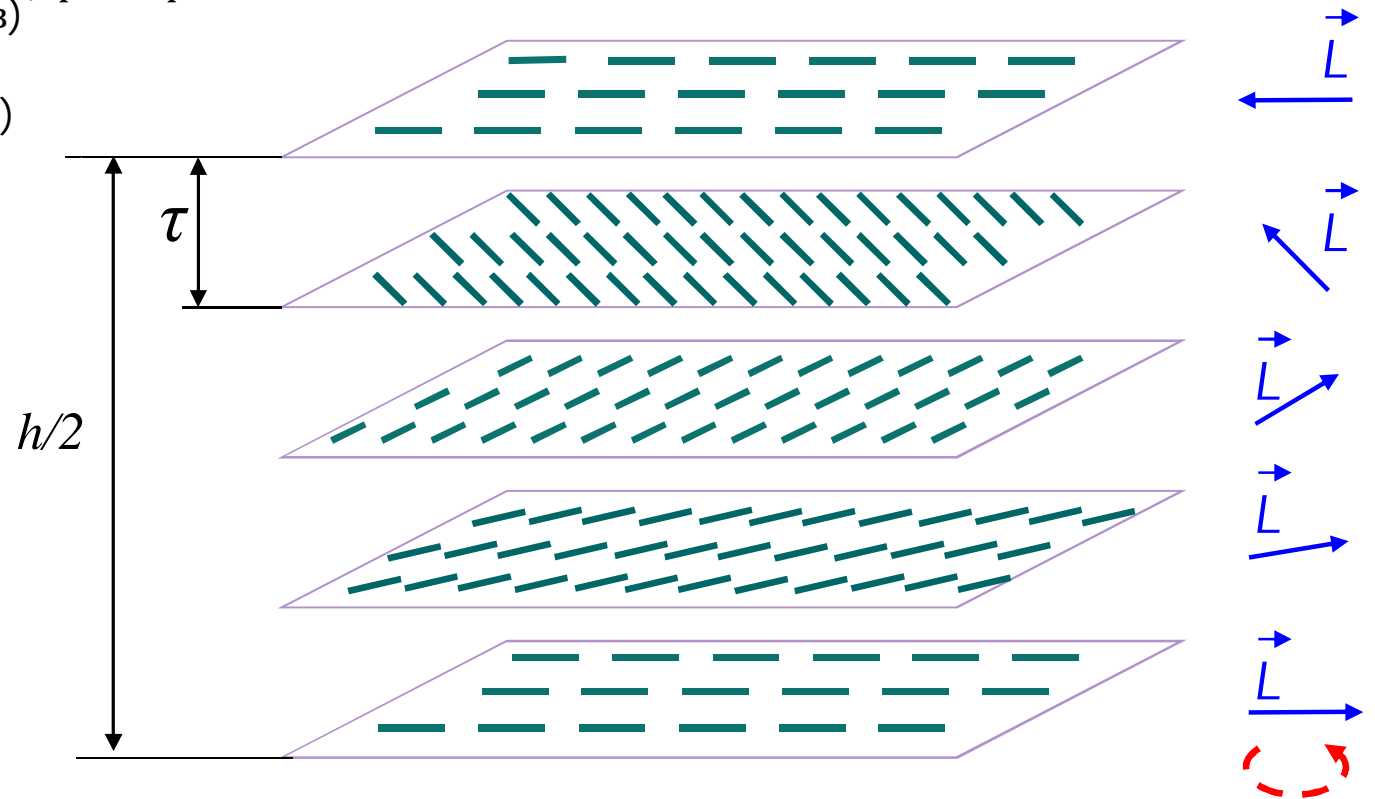
## Типи рідких кристалів. Холестерики

**Холестерики** - молекули розташовуються шарами, як і в смектиках, проте напрямок орієнтації їх осей монотонно змінюється від шару до шару, повертаючись на деякий кут

Крок спіралі:  $h = 2\pi\tau / \varphi$

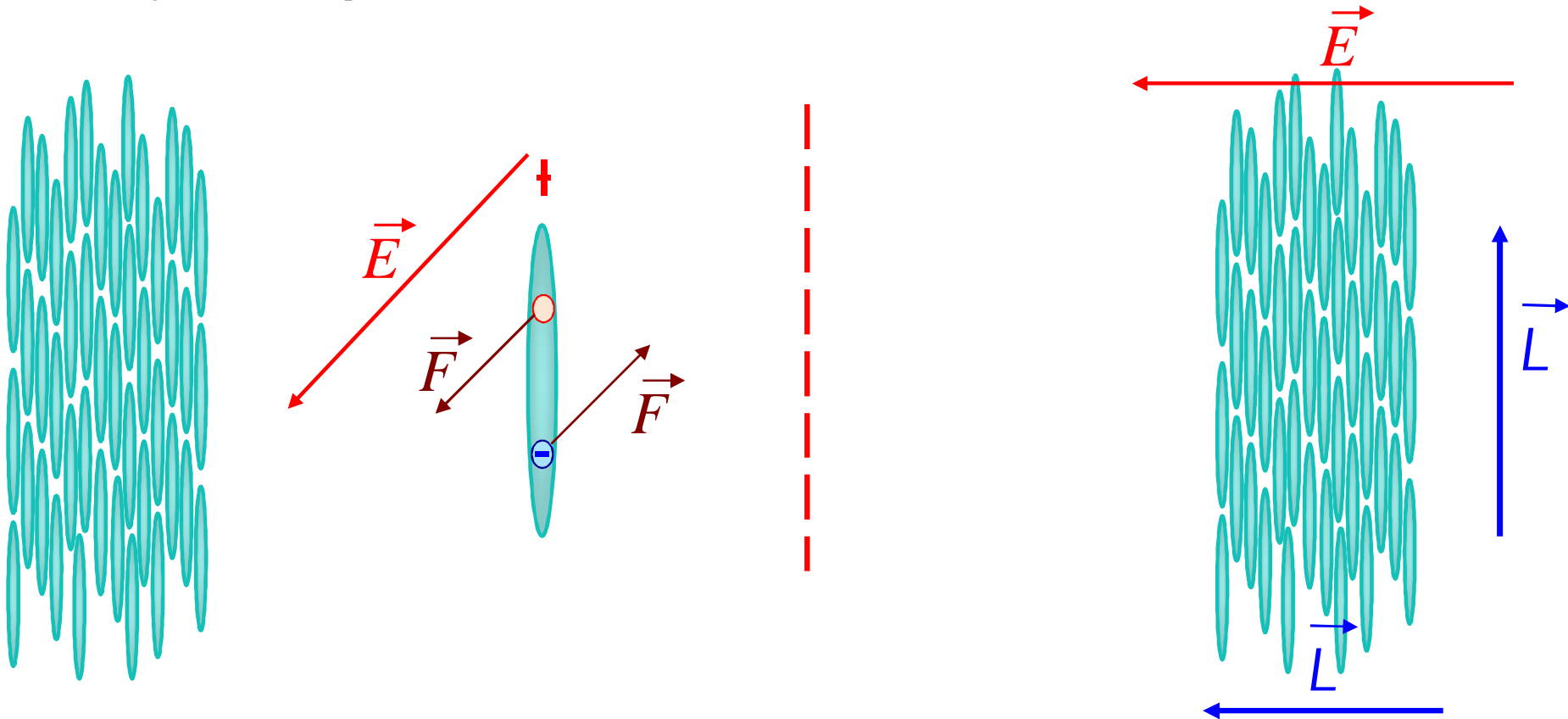
$\varphi$  - дискретний кут повороту директора  
(молекул сусідніх шарів)

$\tau$  - товщина шару  
(поперечний розмір молекул)



## Ефект Фредерікса в електричному полі

В.К.Фредерікс і В.Н.Цветков - радянські вчені в 1930-і роки вперше досліджували електричні та оптичні властивості РК.



Ефект Фредерікса має пороговий характер: переорієнтація директора відбувається за умови  $M_{\text{крут.ел}} \geq M_{\text{крут.пруж}}$

## Діелектрична анізотропія речовини

---

Форма сприяє паралельній упаковці молекул в кристалі, що призводить до анізотропії фізичних властивостей кристала, зокрема його діелектричної проникності.

Напрямок, в якому орієнтуються молекули рідкого кристала при накладанні електричного поля, залежить від знака різниці

$$\varepsilon_a = \varepsilon_p - \varepsilon_n$$

$\varepsilon_p$  діелектричні проникності в напрямках, паралельному і

$\varepsilon_n$  перпендикулярному орієнтації молекул

$\varepsilon_a$  діелектрична анізотропія речовини

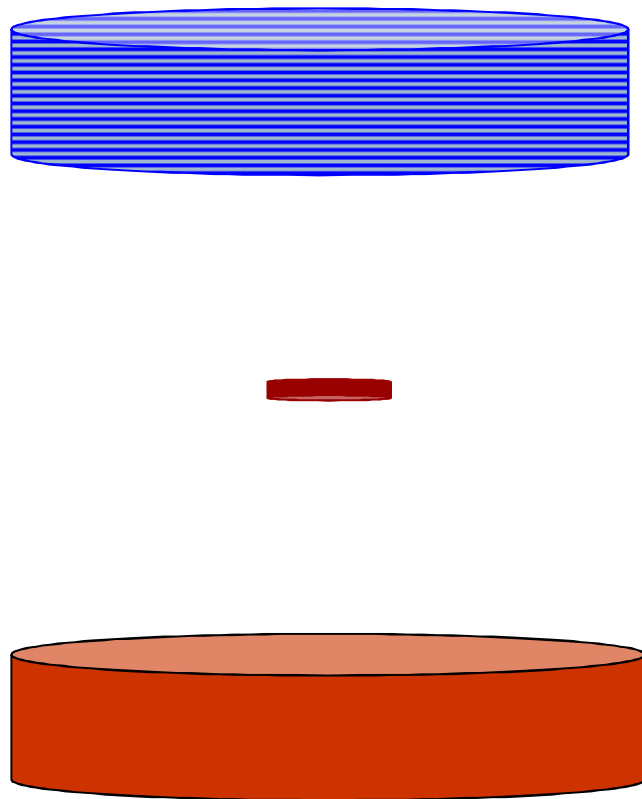
$\varepsilon_a > 0$  - осі молекул орієнтуються паралельно до електричного поля

$\varepsilon_a < 0$  - осі молекул орієнтуються перпендикулярно до електричного поля

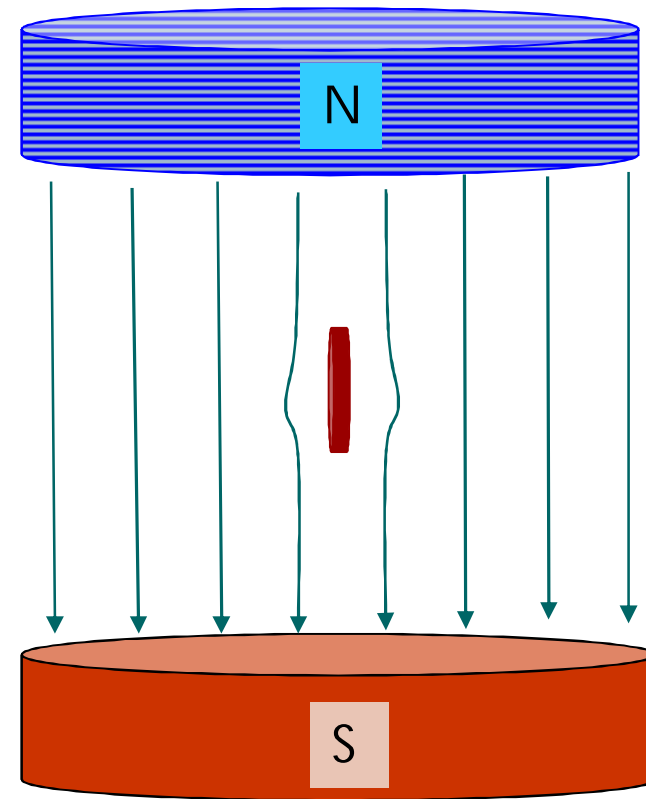
**Перехід Фредерікса** — явище переорієнтації молекул рідкого кристалу під дією електричного поля. У матеріалах із додатною діелектричною анізотропією молекули намагаються повернутись вздовж напрямку електричного поля. У матеріалі з від'ємною діелектричною анізотропією — впоперек напрямку поля. Кут повороту при цьому залежить від напруги



## Вплив магнітного поля на РК



Магнітне поле відсутнє



Магнітне поле включене



## Ефект динамічного розсіювання

---

Ефект динамічного розсіювання світла проявляється в помутнінні прозорого шару рідкого кристалу при внесенні його в зовнішнє електричне поле.

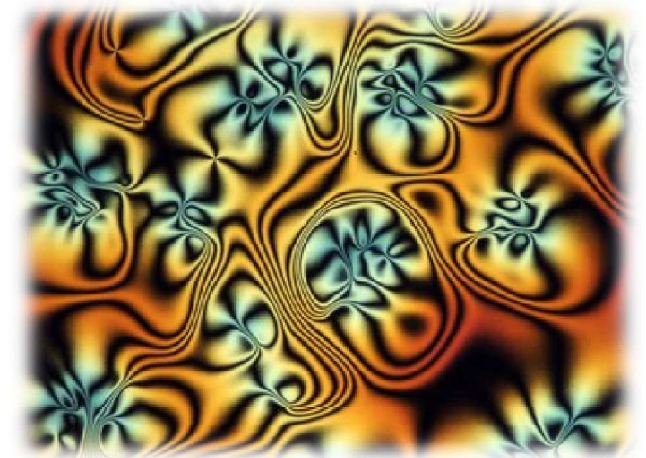
Для спостереження ефекту динамічного розсіювання в нематик з негативною анізотропією вводиться домішка, що надає кристалу іонну провідність.

При накладанні зовнішнього електричного поля молекули  $\epsilon_a < 0$  орієнтуються поперек поля. У цьому стані речовина прозора для падаючого випромінювання.

При накладанні поля іони домішки починають рухатися в напрямку силових ліній і, вдаряючись з молекулами кристала, порушують їх впорядковану орієнтацію. Зі збільшенням напруги цей процес протікає все більш інтенсивно.

При деякій напрузі (напруга електрогідродинамічної нестійкості) рух молекул в кристалі набуває турбулентного характеру. Впорядкована структура РК руйнується, кристал мутніє і починає сильно розсіювати падаюче на нього випромінювання.

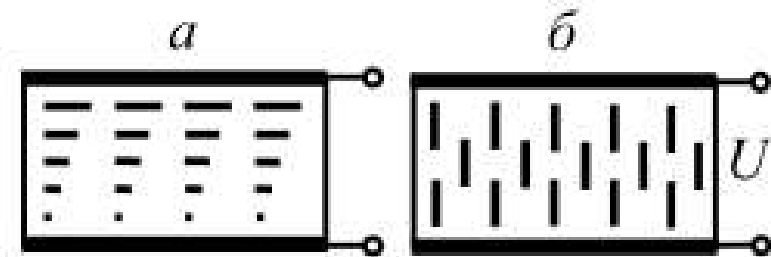
В результаті цього пропускання комірки різко зменшується.



Твіст - ефект (від англійського *twist* – закручувати) - спостерігається в нематичних рідких кристалах з позитивною діелектричною анізотропією

Рідкий кристал поміщають між двома прозорими пластинами, кожна з яких попередньо піддається шліфовці при поступальному русі.

В результаті обробки пластини набувають властивість орієнтувати прилеглі молекули РК в напрямку подряпин, сформованих при шліфовці. Пластини орієнтуються одна відносно одної так, щоб подряпин були взаємно перпендикулярні. Молекули РК, поміщеного між пластинами, змінюють свою орієнтацію від шару до шару по спіралі з повним кутом повороту біля протилежної пластини на  $\pi/2$ . На кожну пластину наноситься плівковий поляризатор і прозорі електроди.



Твіст - ефект в рідкому кристалі:  
а - розташування молекул при відсутності електричного поля;  
б – при наявності електричного поля;

Шар скрученого нематика обертає площину поляризації падаючого світла на кут  $\pi/2$ . Оскільки  $\epsilon_a > 0$ , при накладанні поля молекули рідкого кристала орієнтуються уздовж його силових ліній, закручений стан ЖК зникає і комірка перестає повертати площину поляризації світла, що проходить через неї.

Якщо осі поляроїдів схрещені, то за відсутності поля світло буде проходити через комірку, а при його накладенні - ні.

На відміну від ефекту динамічного розсіювання, для виникнення твіст - ефекту не потрібно протікання струму через кристалл.

Керуюча напруга для твіст - ефекту 0,1-1 В.  
Тривалість перехідного процесу між прозорим та затемненим станами комірки складає 30 - 200 мс.

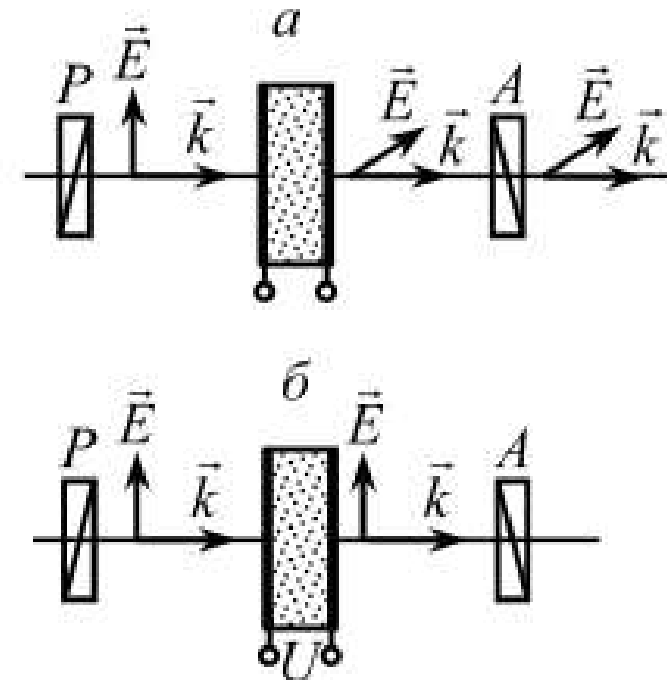
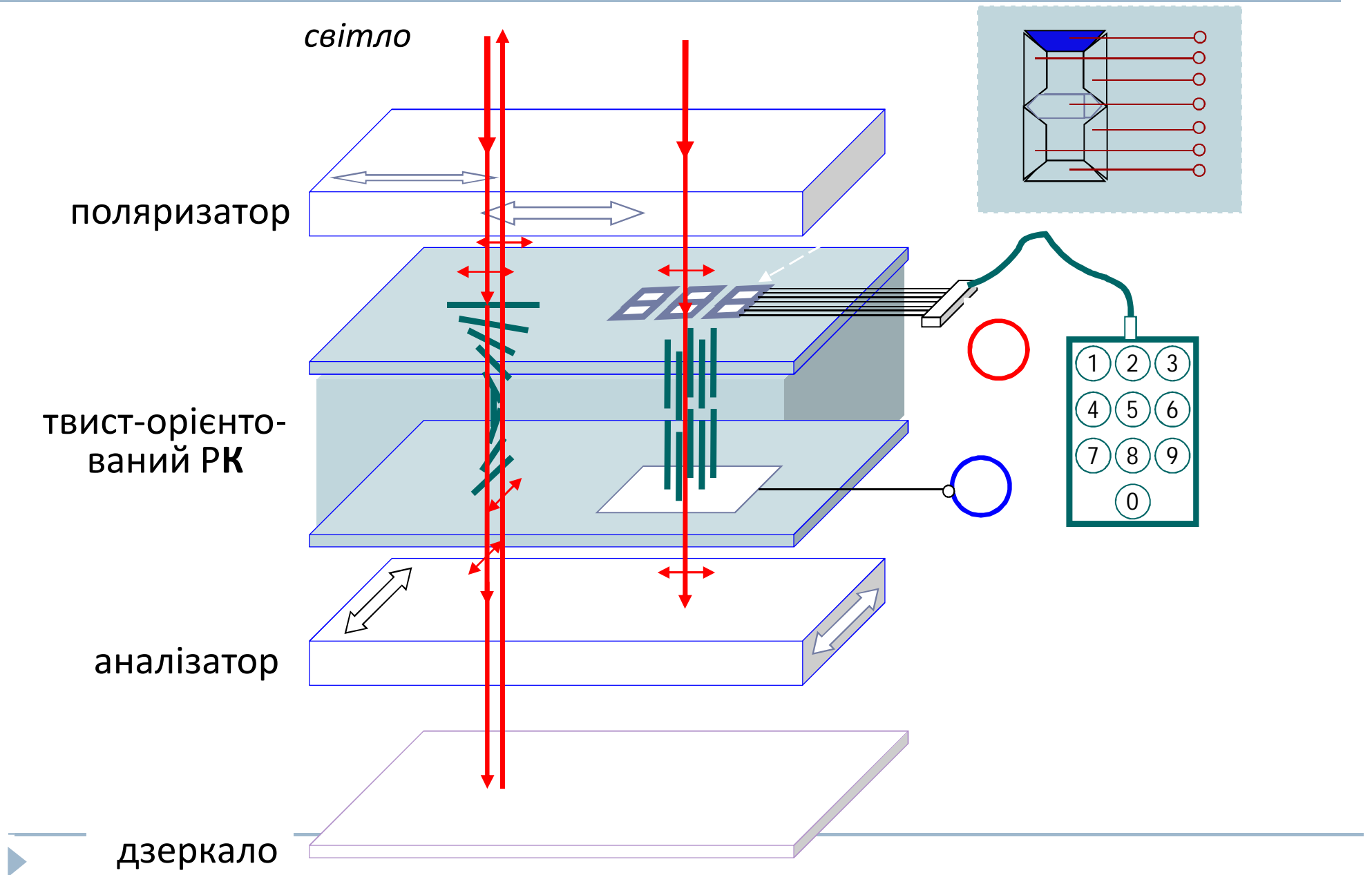


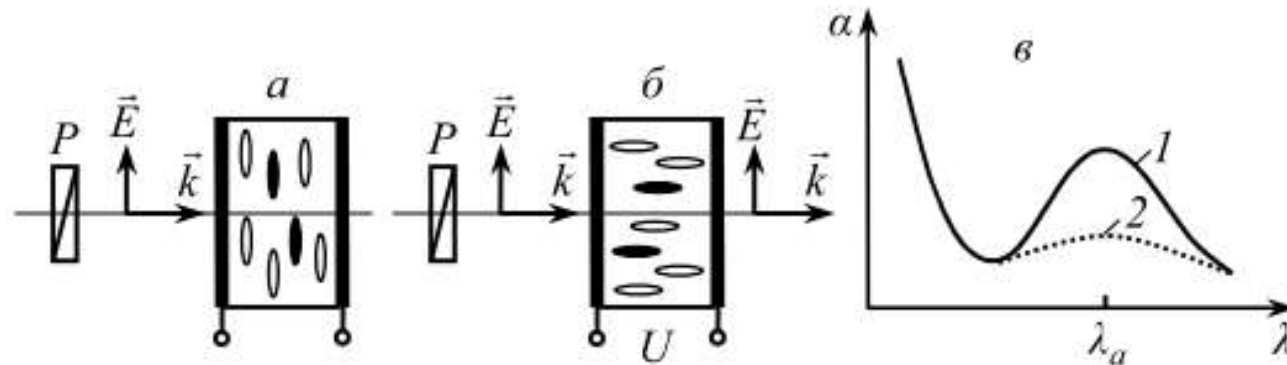
Схема спостереження твіст - ефекту:  
а - просвітлений стан РК-комірки ( $U = 0$ );  
б - затемнений стан РК-комірки ( $U \neq 0$ )

# Рідкокристалічний індикатор на твіст - ефекті





## Ефект «гість-господар»



Для спостереження ефекту в рідкий кристал (господар) вводяться молекули барвника (гість), які як і молекули РК, мають витягнуту форму.

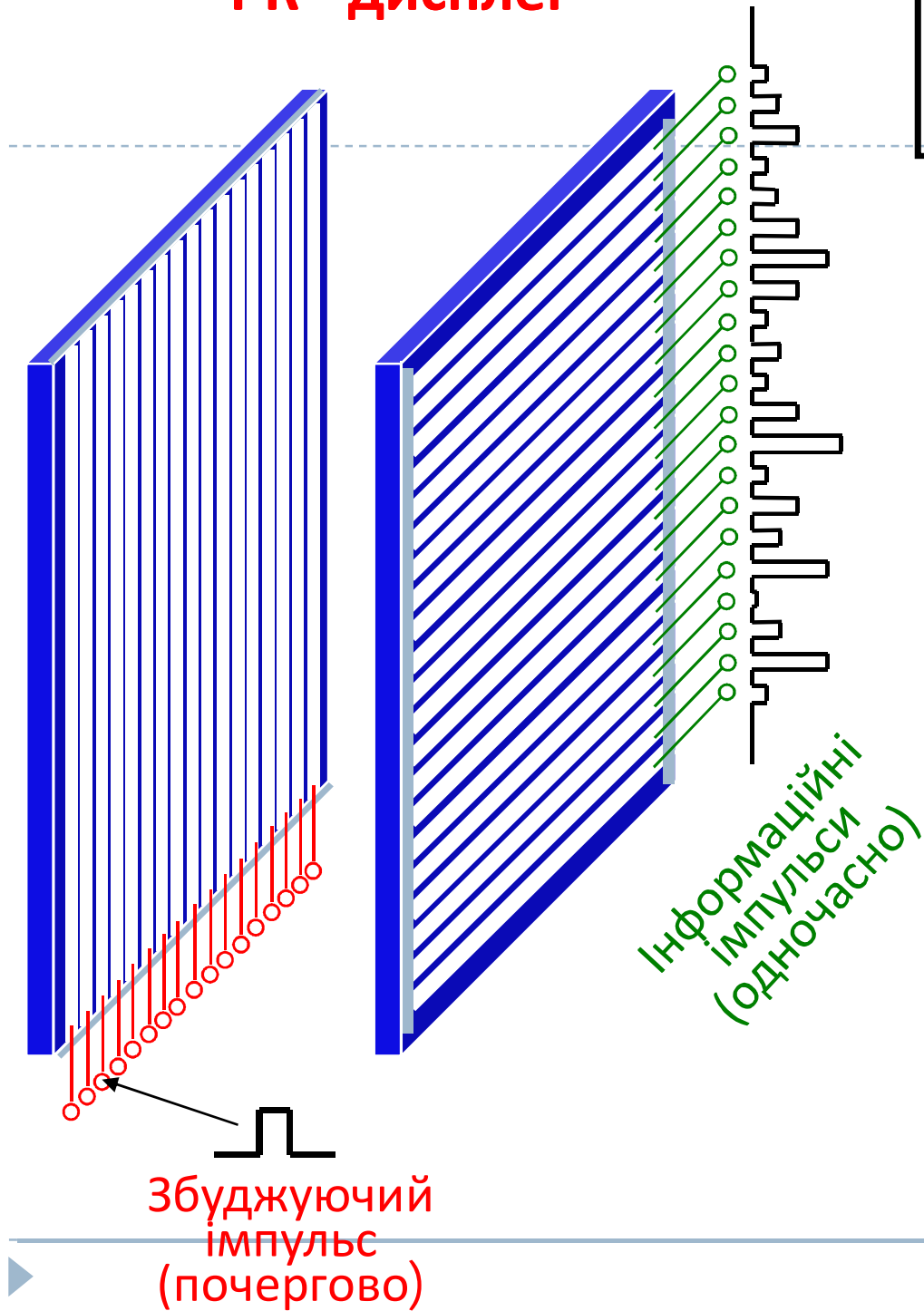
Тому обидва види молекул орієнтуються паралельно поверхням пластин.

**Світло певної довжини хвилі поглинається молекулою барвника тільки в тому випадку, коли її вісь паралельна до електричного вектора світлової хвилі**

(в цьому випадку енергія світлових коливань витрачається на рух електронів від одного кінця молекули до іншого).

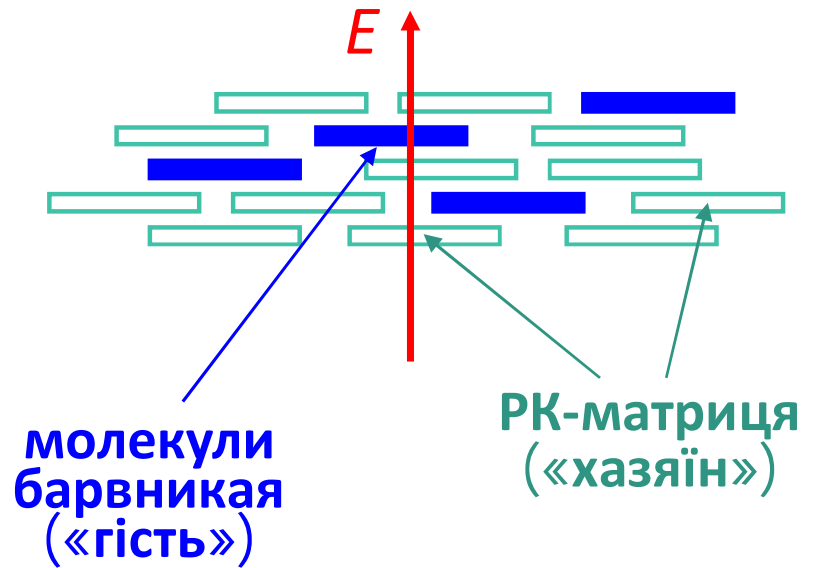
Якщо діелектрична анізотропія кристала позитивна ( $\epsilon_a > 0$ ), то при подачі на комірку напруги, поле поверне молекули рідкого кристалу, а разом з ними молекули барвника уздовж силових ліній поля. У цьому стані РК-комірка перестане поглинати падаюче на неї випромінювання, тобто стає прозорою.

# РК - дисплеї



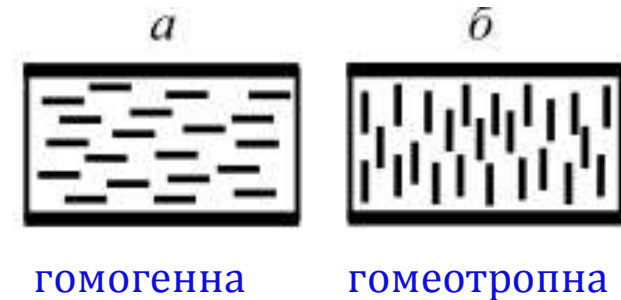
Для чорно-білих екранів –  
ефект Фредерікса

Для кольорових екранів –  
ефект «гість-хазяїн»



## Ефект деформації вертикально орієнтованої фази

На орієнтацію молекул РК впливає стан поверхонь пластин, що формують РК-комірку. Якщо ці поверхні обробити поверхнево-активною речовиною, то можна отримати гомогенну (паралельну до пластин) або гомеотропну (перпендикулярну до пластин) орієнтацію молекул.



На основі молекул з негативною діелектричною анізотропією створюють комірку з гомеотропною упаковкою молекул.

Комірку поміщають між схрещеними поляризатором і аналізатором. Пройшовши через поляризатор світло виявляється лінійно поляризованим.

Рідкий кристал має властивість подвійного променезаломлення, тому після проходження РК – комірки світло стає еліптично поляризованим.

При подачі на комірку напруги відбувається переорієнтація молекул в напрямку, паралельному до пластин і характер подвійного променезаломлення змінюється.

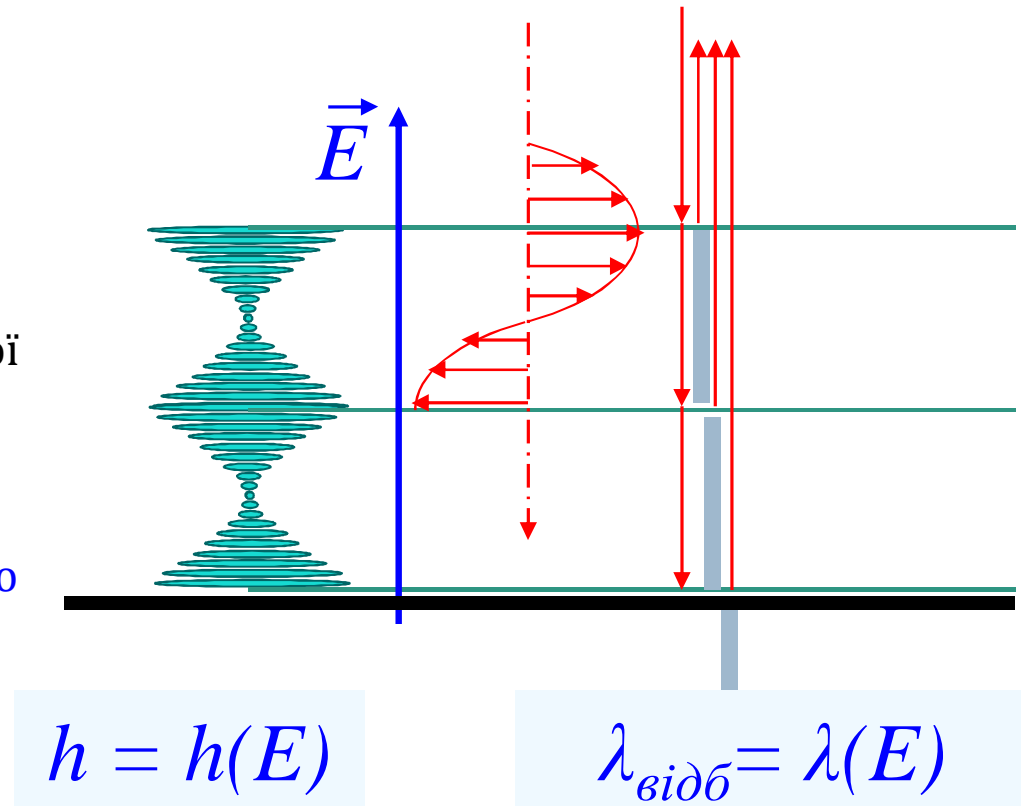
Відповідно до цього буде змінюватися і частка світла, що проходить через аналізатор.

Оскільки інтенсивність світла, що проходить через пристрій залежить від довжини хвилі випромінювання, то шляхом зміни напруги на комірці можна керувати не тільки **інтенсивністю**, але і **кольором** минулого випромінювання.

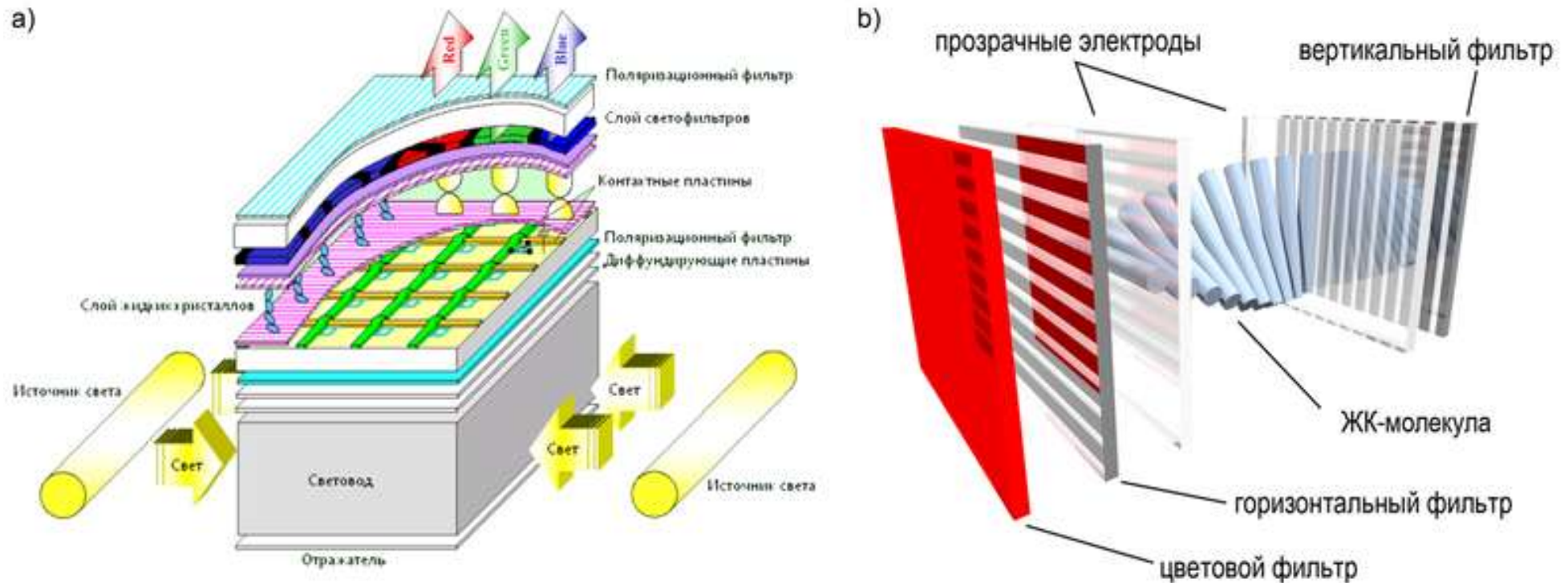
Це використовують для створення кольорових дисплеїв на основі рідких кристалів.

## Ефект вибіркового відбивання світла

У холестеричному рідкому кристалі в результаті відбивання світла від площин з однаковою орієнтацією молекул виникає інтерференція, при якій підсилюється світло з довжиною хвилі, яка дорівнює кроку просторової спіралі РК.  
Внаслідок цього рідкий кристал виглядає забарвленим.  
Керуючи кроком спіралі за допомогою поля, можна змінювати колір.



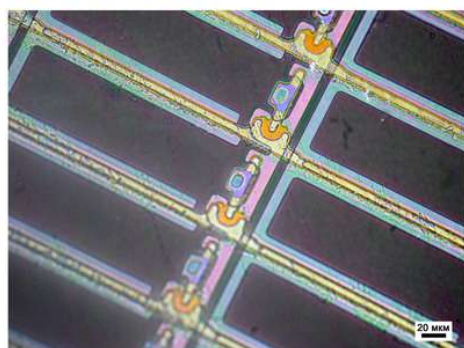
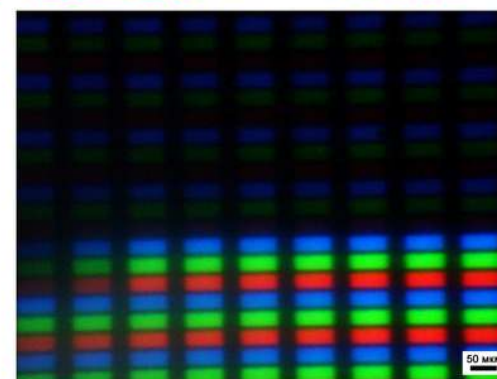
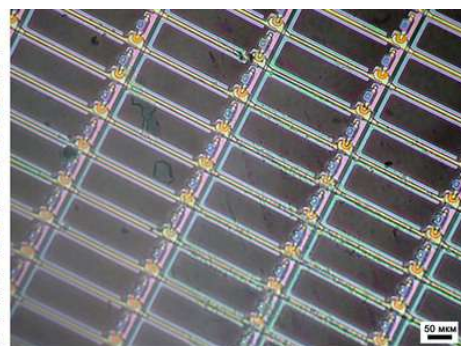
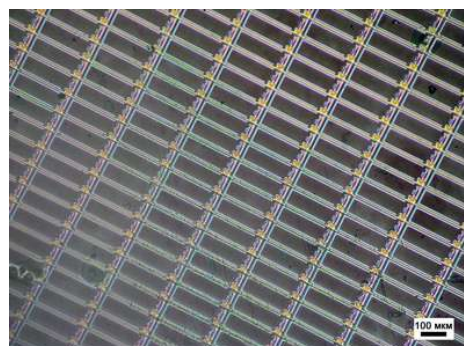
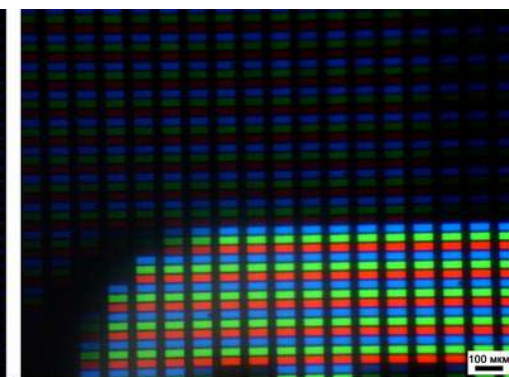
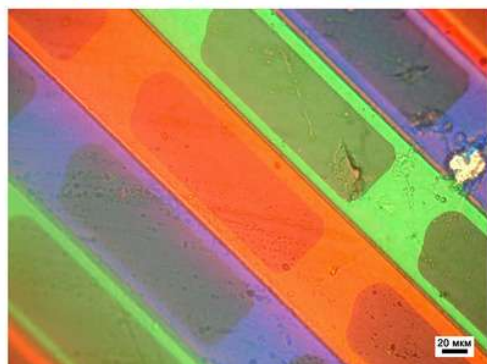
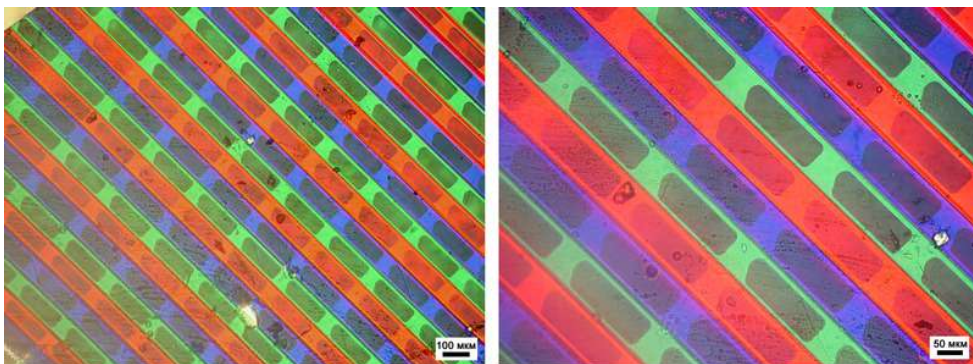
## LCD дисплей



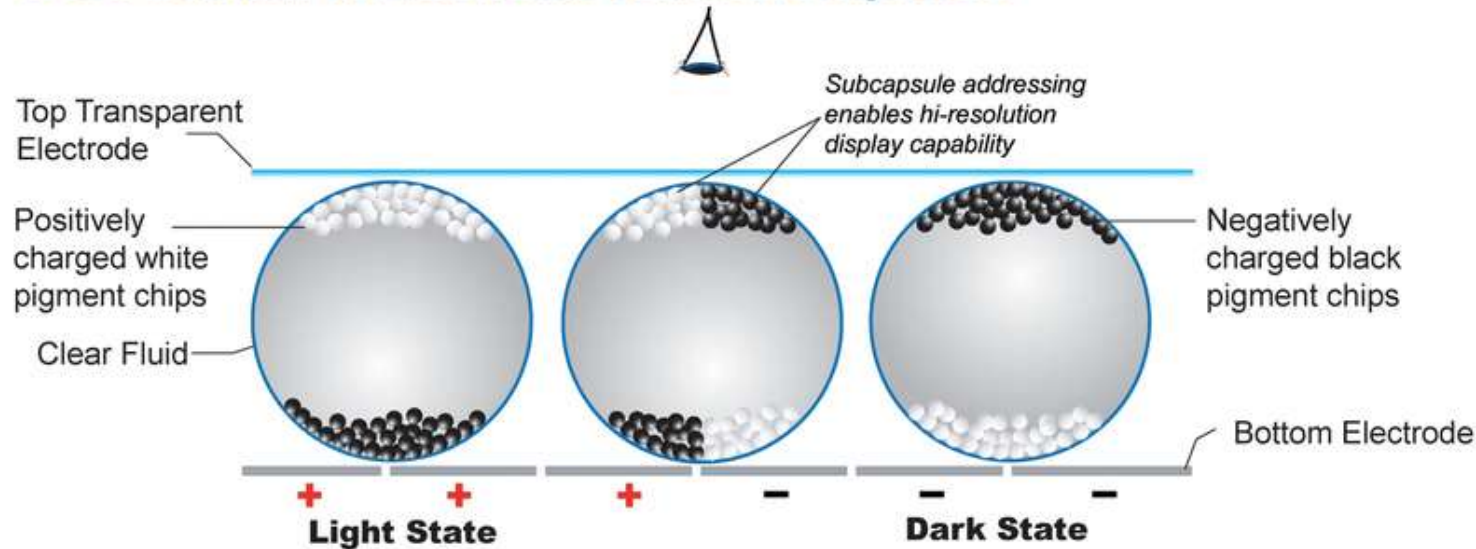
Світло від джерела (LED) через прозору пластину-хвилевід, розсіюється так , щоб вся матриця була рівномірно освітлена. Фотони проходять поляризаційний фільтр, який пропускає тільки хвилі із заданою поляризацією. Проникнувши через скляну підкладку, на якій знаходиться активна матриця з тонкоплівкових транзисторів, світло потрапляє на молекулу рідкого кристала. Молекула отримує «команду» від транзистора, на який кут повернути площину поляризації хвилі, так щоб вона, пройшовши крізь поляризаційний фільтр, задала інтенсивність світіння окремого субпіксела. За забарвлення субпіксела відповідає шар світлофільтрів (червоних, зелених або синіх). Змішуючись, хвилі від трьох субпікселів формують піксель зображення заданого кольору і інтенсивності.

# LCD дисплей

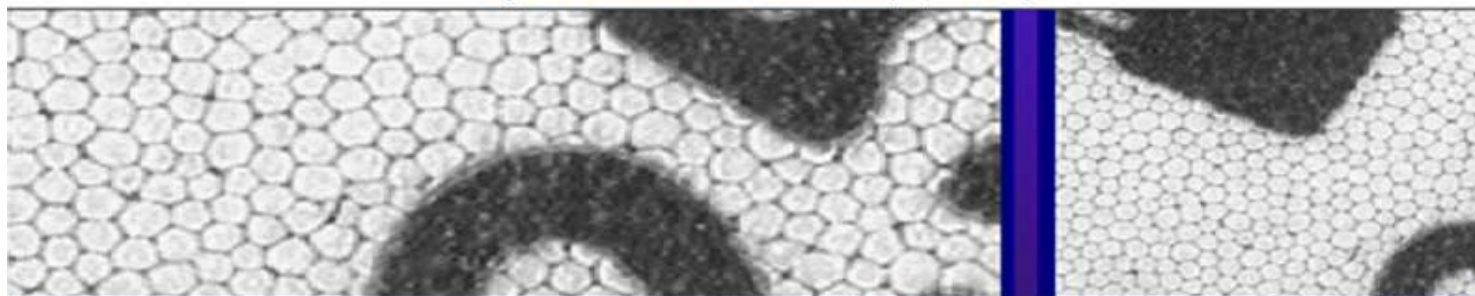
---



## Cross-Section of Electronic-Ink Microcapsules

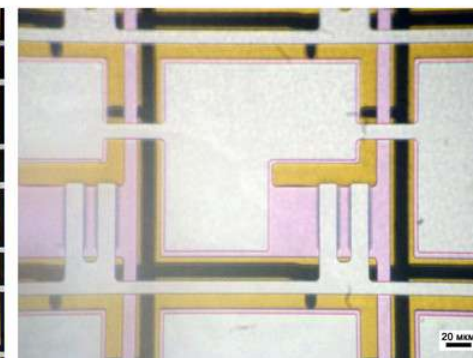
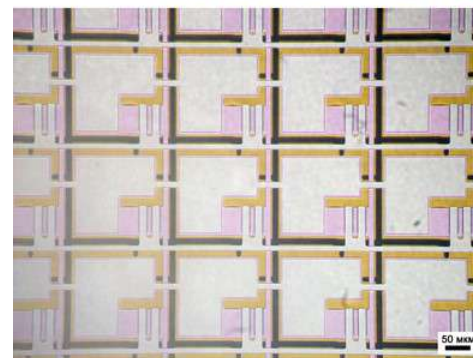
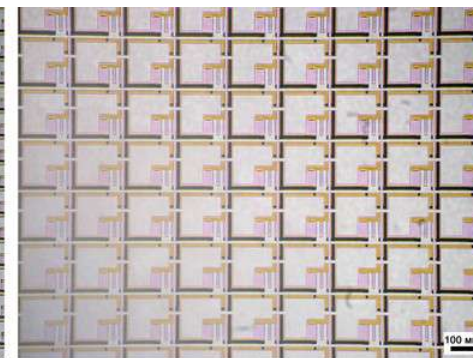
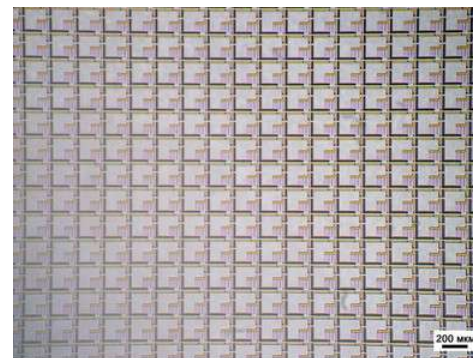
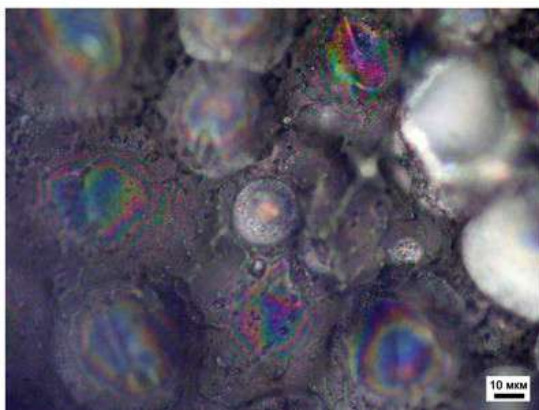
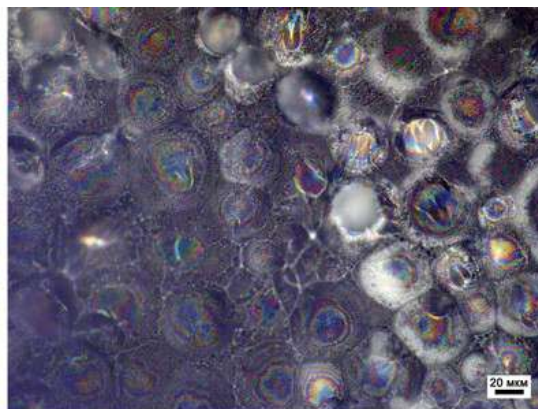
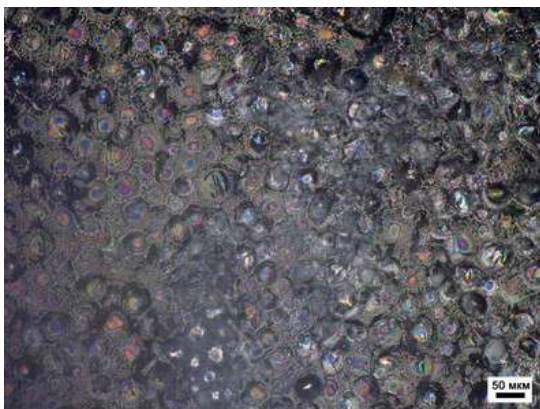


*Image not drawn to scale - for illustration purposes only.*



Активна матриця - колбочки (кульки) з двома типами частинок: негативно зарядженими чорними і позитивно зарядженими білими. Зображення формується подачею певної різниці потенціалів, яка ініціює перерозподіл частинок всередині таких кульок

# E-Ink дисплей



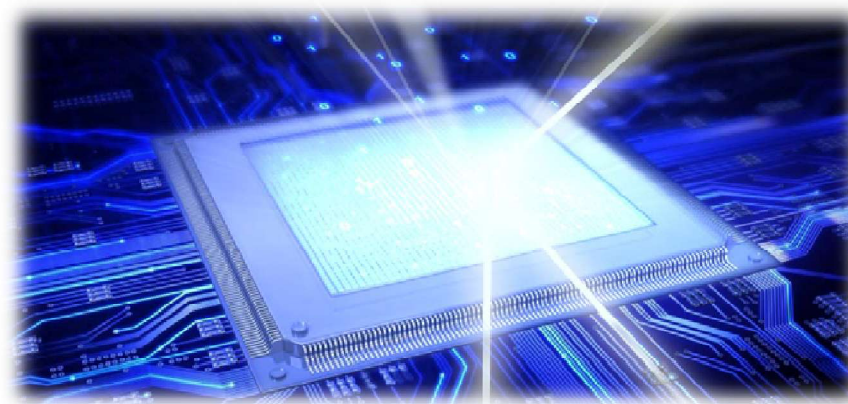


## Лекція 8

---

### Оптичний комп'ютер. Голографія

1. Типи оптичних елементів обробки інформації
2. Оптичний ввід інформації
3. Електрооптичні транспаранти на рідких кристалах
4. Електрооптичні транспаранти на акустооптичних ефектах
5. Оптично керовані транспаранти
6. Хвилеводні логічні елементи
7. Оптичний транзистор (трансфазор)
8. Нелінійна оптика
9. Резонатор Фабрі-Перо
10. Голографія
11. Інтерференція
12. Дифракція світла
13. Дифракція Френеля
14. Дифракція Френеля на отворі
15. Голограма точки
16. Схема Габора
17. Схема Лейта-Упатнієкса
18. Схема Денисюка
19. Властивості голограм
20. Голографічна пам'ять
21. Гібридні процесори



**Оптичні процесори** Аналоговий оптичний процесор

Цифровий оптичний процесор

Повністю оптичний процесор

Оптичний нейропроцесор

**Транспаранти**

служать для просторової модуляції світлового пучка по амплітуді, фазі або поляризації і застосовуються в системах введення-виведення даних.

За способом управління модуляцією світлового пучка розрізняють **електрично** і **оптично** керовані транспаранти. Обидва типи можуть здійснювати дискретну або аналогову модуляцію світлового пучка. У першому випадку транспарант повинен володіти нелінійною характеристикою, в другому, навпаки, повинен мати лінійну залежність оптичних властивостей елемента від керуючого сигналу.

В основі роботи керованих транспарантів можуть лежати різні фізичні явища: електрооптичні, акустооптичні, магнітооптичні.

**Транспаранти можна розділити на типи:**

**1) Електрично керовані транспаранти**

а) З адресацією електронним пучком

б) З адресацією електричною напругою:

рідкокристалічні

на феромагнітних матеріалах

на монокристалічних сегнетоелектриках

Акустооптичні пристрої

**2) Оптично керовані транспаранти**

---

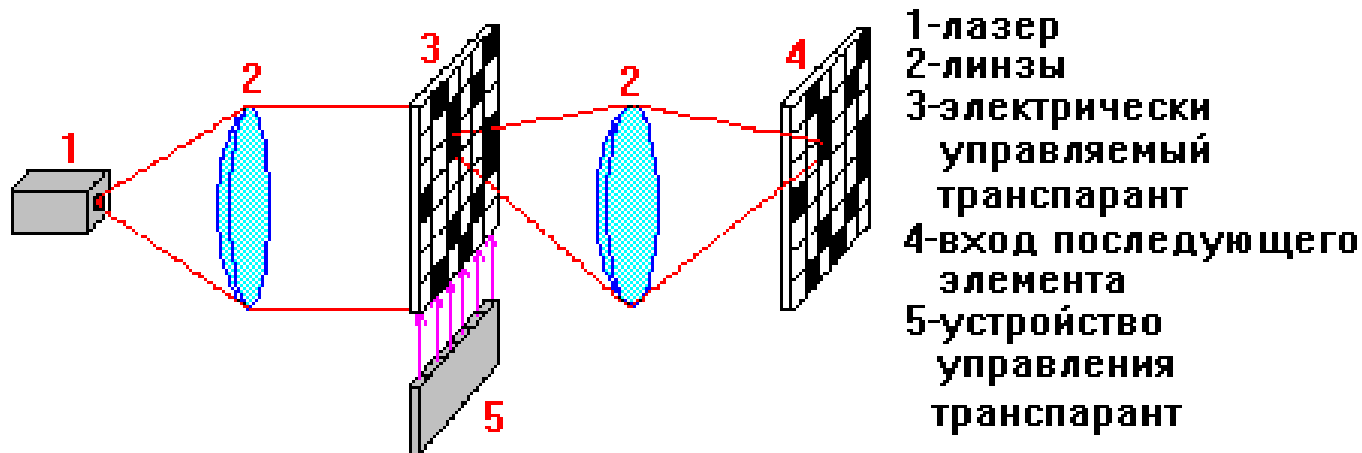
Існують два способи утворень зображення і вводу їх в канал оптичної обробки,

**Перший** - призначений для введення інформації у вигляді послідовності електричних або оптичних сигналів відразу за кількома вхідних каналах.

Реалізується за допомогою керованого матричного транспаранту (ЧМС - просторово - часовий модулятор світла), який формує зображення по рядках та запам'ятовує інформацію до моменту зчитування.

Розрізняють **електрично** і оптично **керовані** транспаранти.

### Ввод информации в устройство оптической обработки информации с помощью электрически управляемого транспаранта

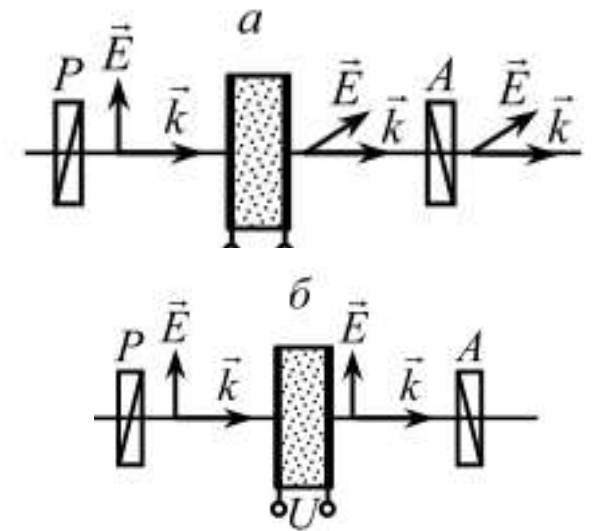


## Електрооптичні транспаранти на рідких кристалах

Для просторової модуляції світла використовують два електрично керованих ефекту, що спостерігаються в рідких кристалах: наведене двулучепреломление і динамічне розсіювання світла.

*Комірка транспаранта – сендвіч - плівка рідкого кристала між двома електродами*

1. **Ефект динамічного розсіювання** застосовують для амплітудної модуляції обумовлений переносом заряду через шар рідкого кристала (нематик з негативною анізотропією) і виникненням в ньому гідродинамічних неоднорідностей в електричному полі. Переміщення в електричному полі призводить до значного ослаблення інтенсивності проходить через осередок світла. Після закінчення дії електричного поля шар набуває вихідну структуру і стає прозорим.



2. **Твіст-ефект** (нематик з позитивною анізотропією),

Час електрооптичного перемикавання в тонких шарах рідких кристалів – близько 10 мкс.

Схема спостереження твіст - ефекту:  
а - просвітлений стан РК-комірки (U = 0);  
б - затемнений стан РК-комірки (U ≠ 0)

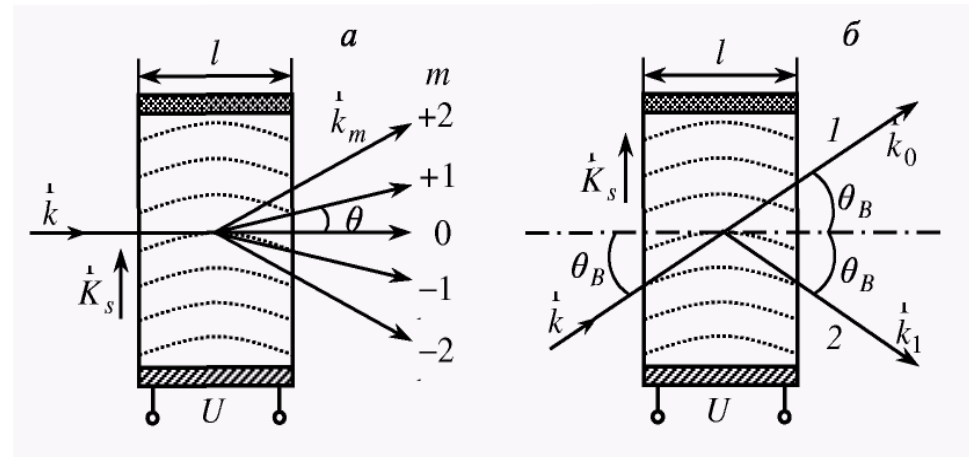
## Електрооптичні транспаранти на акустооптичних ефектах

Акустооптичні пристрої – одномірні перетворювачі, використовують дифракцію світла на акустичних хвилях, що поширюються в середовищі; використовуються як ефект Брегга, так і ефект Рамана-Ната.

Багатоканальні модулятори- формують двомірні масиви даних за допомогою великого числа індивідуально адресованих комірок.

Часова послідовність  $m$  електричних імпульсів по  $n$  каналах перетворюється в модуляторі в зображення з числом елементів  $m * n$ .

Тривалість імпульсу зчитування – 10 нс.



Дифракция света на ультразвуковых волнах в режимах Рамана - Ната (а) и Брегга (б)

## Оптично керовані транспаранти

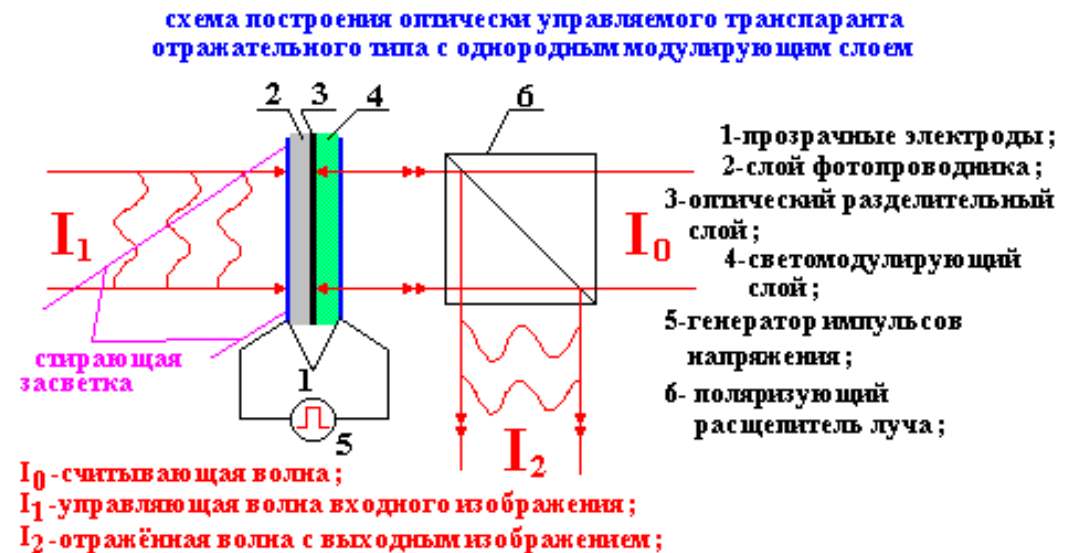
Використовується зміна фотопровідності в шарі напівпровідника в результаті освітлення(2). Додатково присутній шар електрооптичного матеріалу.

Ввід інформації – модульований пучок (хвиля  $I_1$ ) подається на фотопровідник з одночасною подачею постійної напруги на керуючі електроди. Модульований пучок створює в фотопровіднику заряджені носії, що дрейфують до поверхні фотопровідник-електрооптичний матеріал.

Прикладене до обкладок електричне поле послаблюється полем створеним фотоносіями пропорційно інтенсивності падаючого світла. Це призводить до зміни оптичних властивостей електрооптичного матеріалу відповідно до властивостей керуючої хвилі.

Для неруйнівного зчитування записаних даних використовується світло з іншою довжиною хвилі. Хвиля  $I_0$ , що пройшла через електрооптичний шар, зазнає амплитудної або фазової модуляції.

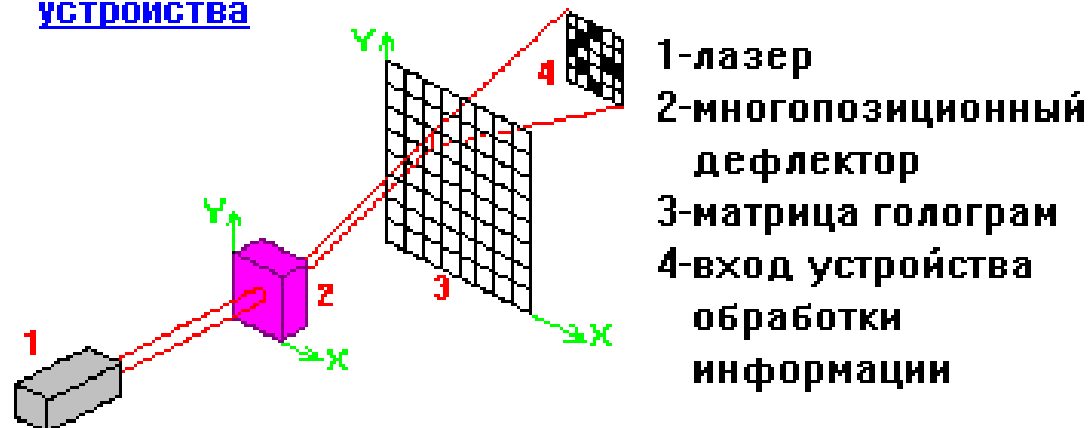
Застосовується поздовжній ефект Поккельса на кристалах та електропоглинання внаслідок ефекту Франца-Келдиша в широкозонних напівпровідниках типу GaAs, CdS, GaP;



**Другий** - призначений для введення алгоритмів розв'язання задач, інструкцій, постійних величин (дані зберігаються в постійній оптичній пам'яті).

Інформація в оптичній пам'яті зберігається в окремих комірках плоскої матриці у вигляді голограм. Для зчитування застосовується пристрій адресації лазерного випромінювання, що направляє промінь в комірку із заданим номером. Адресний пристрій являє собою багатопозиційний дефлектор лазерного променя з довільною адресацією. Двомірне зображення, отримане з голограми, подається на транспарант з оптичним входом і модулює його функцію пропускання або відбивання. Вхід в транспарант здійснюється одночасно по всіх оптичних каналах.

### Ввод информации в устройство оптической обработки информации с помощью голографического запоминающего устройства



## Хвилеводні логічні елементи

**Хвилеводний модулятор** - інтерференційний прилад, який здійснює амплітудну модуляцію вхідного оптичного сигналу, що представляє собою лінійно поляризоване світлове випромінювання лазера.

**Вхідний хвилевід** модулятора розгалужується на два паралельних канали, які потім знову зливаються, утворюючи вихідний хвилевід.

Хвилевід виготовляється з матеріалу, що володіє електрооптичним ефектом.

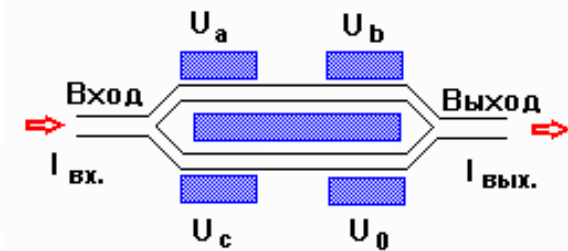
Обидві гілки хвилеводу симетричні, тому вхідний світловий сигнал при розгалуженні ділиться на дві рівні за амплітудою хвилі, які далі поширюються по паралельних каналах з відносним зсувом фаз.

Різниця фаз цих хвиль визначається електричною напругою, прикладеною до керуючих електродів.

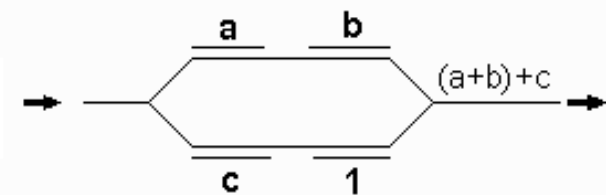
Логічна "1" - відповідає напрузі  $U_0$ , а "0 двійковий" - відповідає нульовому потенціалу.

Якщо напруга  $U_0$  прикладена до парного числа керуючих електродів, то хвилі, що сходяться в вихідному розгалуженні підсилюють одна одну, утворюючи вихідний оптичний сигнал з амплітудою, що практично дорівнює амплітуді вхідного сигналу, який приймається за одиничний сигнал. В іншому випадку хвилі практично повністю гасять одна одну, утворюючи нульовий вихідний сигнал.

Волноводный модулятор:



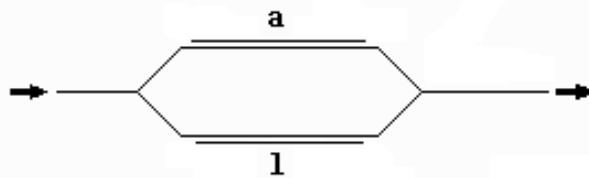
условное обозначение:



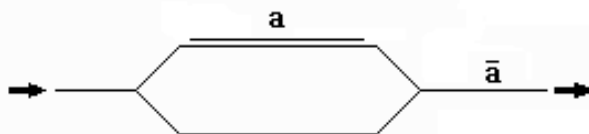


## Умовні позначення хвилеводних логічних пристроїв

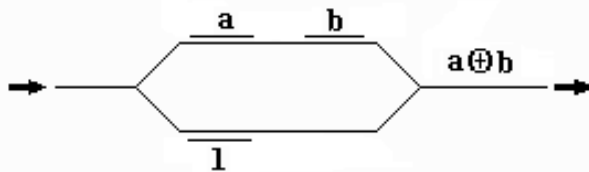
повторитель :



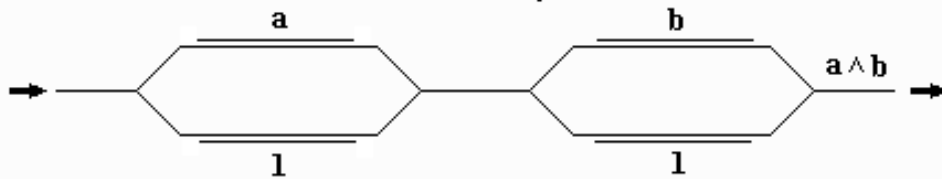
инвертор :



сложение по модулю два :



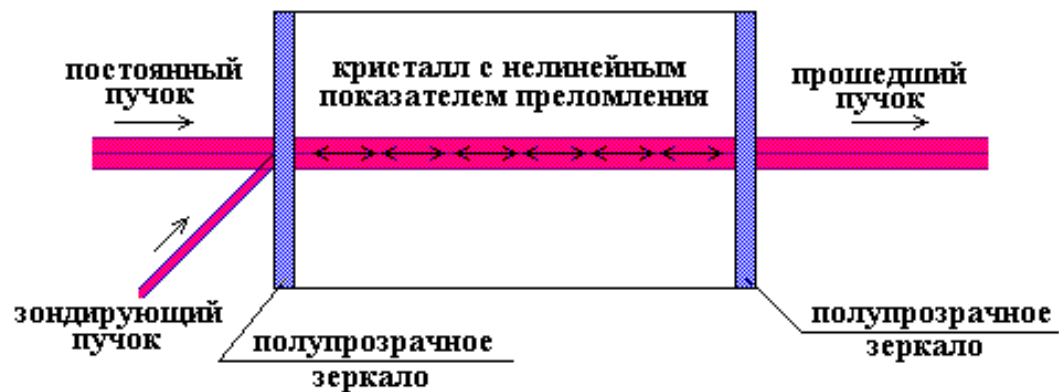
конъюнктор :



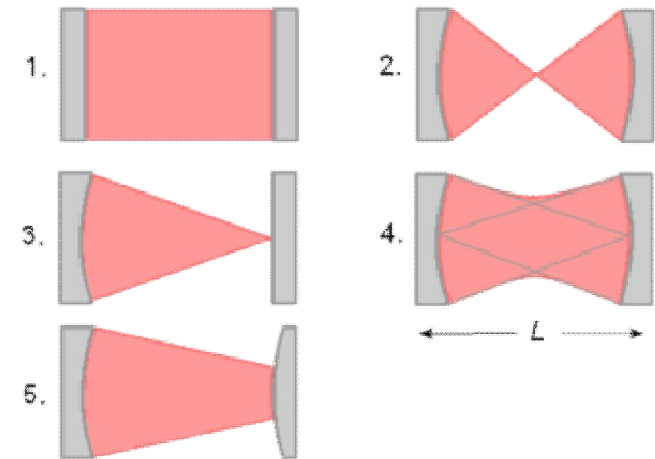
## Оптический транзистор (трансфазор)

Для формування логічних елементів І, АБО і НЕ в оптичних комп'ютерах використовують резонатор Фабрі-Перо, заповнений нелінійною речовиною (антимонід індію – InSb), показник заломлення якої залежить від інтенсивності падаючого пучка  
Результат - на виході можна отримати два стабільних стани, один з яких умовно приймається за "0", а інший за "1".

### Интерферометр Фабри-Перо



Стояча волна



Види оптичних резонаторів Фабрі-Перо:

1. плоско-паралельний;
2. концентричний (сферичний);
3. напівсферичний;
4. конфокальний;
5. опукло-увігнутий

## Оптичний транзистор (трансфазор)

**Трансфазор**- оптичний аналог транзистора - оптично бістабільний прилад, здатний переключатися в один з двох станів за час близько пікосекунд (потужність 10 мВт, енергія перемикавання 10 фемтоДж).

*На основі трансфазора реалізується функціонально повна система логічних елементів, з яких можна будувати будь-які логічні схеми і функціональні вузли обчислювальних машин.*

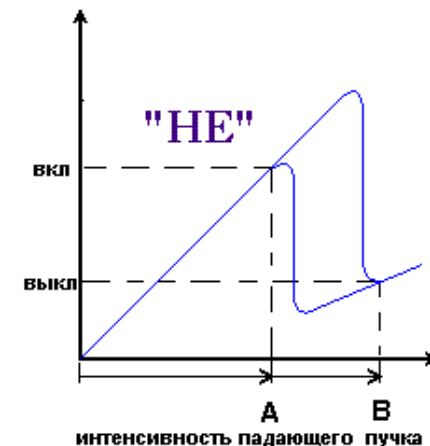
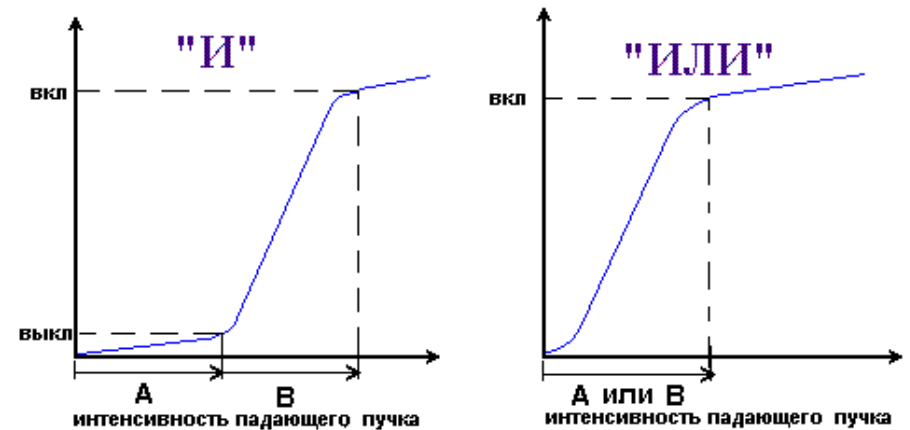
Один і той же трансфазор може служити як елементом І, так і елементом АБО, в залежності від підведених до нього пучків.

*Якщо два падаючих пучки підбрані так, що жоден з них сам по собі не здатний переключити трансфазор, а обидва разом володіють достатньою інтенсивністю для його перемикавання, то утворюється оптичний елемент І.*

*Якщо ж падаючі пучки підбрані так, що будь-який з них здатний переключити трансфазор, утворюється оптичний елемент АБО.*

*Елемент НЕ можна створити, використовуючи в якості вихідного сигналу відбитий пучок.*

*Оскільки він є інверсією падаючого пучка, то підвищення інтенсивності падаючого пучка призводить до зниження інтенсивності на виході і навпаки*



**Нелінійна оптика** — це розділ оптики, який включає коло явищ, що виникають *при взаємодії інтенсивного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону спектру з середовищем*.

*При взаємодії інтенсивного оптичного випромінювання з середовищем втрачається лінійна залежність поляризації середовища з напруженістю електричного поля електромагнітної хвилі, що приводить до появи нелінійних оптичних ефектів.*

*До явищ нелінійної оптики відносяться* — генерація оптичних гармонік (подвоєння, потроєння і т. д. частоти оптичного випромінювання), оптичне детектування, параметрична генерація світла, вимушене комбінаційне розсіяння світла, розсіяння Мандельштама-Бріллюена, багатофотонні процеси, самофокусування, самодифракція.

Нелінійна оптика, як наукова галузь сформувалась після виникнення лазерів — джерел інтенсивного, когерентного, монохроматичного оптичного випромінювання.

Вперше експерименти з виявлення нелінійно оптичних явищ - генерації другої гармоніки – були проведені з використанням кристалів кварцу і, як джерела випромінювання — рубінового лазера з довжиною хвилі випромінювання 694,2 нм. При цьому спостерігалось зсув частоти оптичного випромінювання в ультрафіолетову область спектру (347,1 нм). Частотні зміни передбачають наявність електричного поля (магнітного поля, механічних напруг).

*До явищ нелінійної оптики відносяться ефекти, які виникають в статичних або квазістатичних полях при оптичному випромінюванні малої інтенсивності* (електрооптичні ефекти (ефект Покельса і Керра), п'єзооптичні ефекти (чи фотопружний ефект), акустооптична дифракція світла, магнітооптичні ефекти (ефект Фарадея, ефект Коттона-Мутона)).



## Резонатор Фабрі-Перо

Як **бістабільний оптичний елемент** застосовується резонатор Фабрі-Перо, заповнений нелінійним середовищем, показник заломлення якої  $n$  залежить від інтенсивності світла  $I$

згідно із законом:  $n = n_0 + n_2 I$

Прозорість резонатора  $T$  залежить від фазового набігу між дзеркалами:  $T = \frac{I_{\text{ввх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{T_0}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)}$

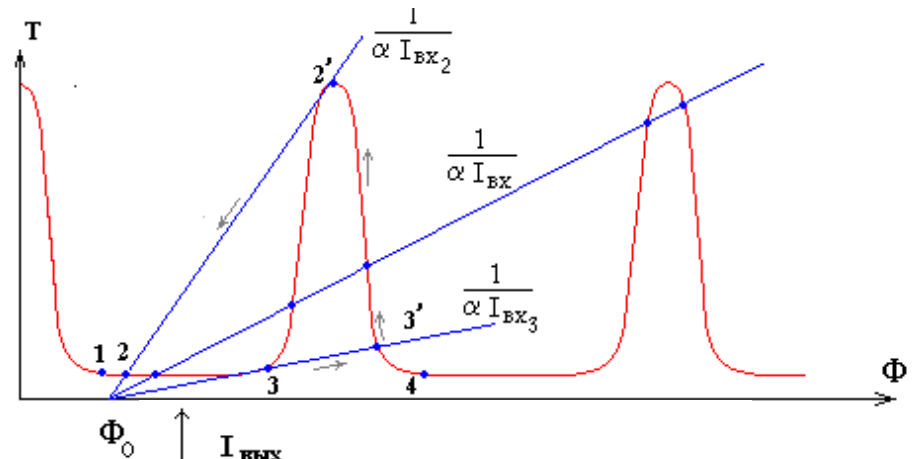
В резонаторі, заповненому нелінійною речовиною, повний фазовий набіг залежить від інтенсивності

$$\Phi = \Phi_0 + \alpha I_{\text{вх}} T$$

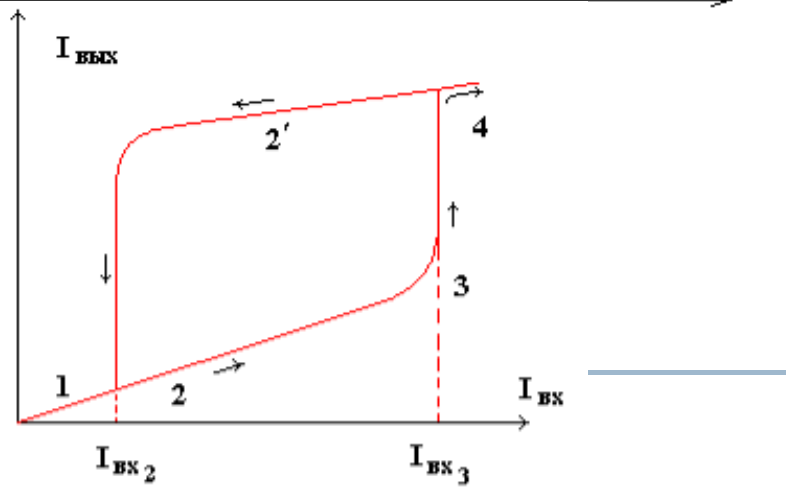
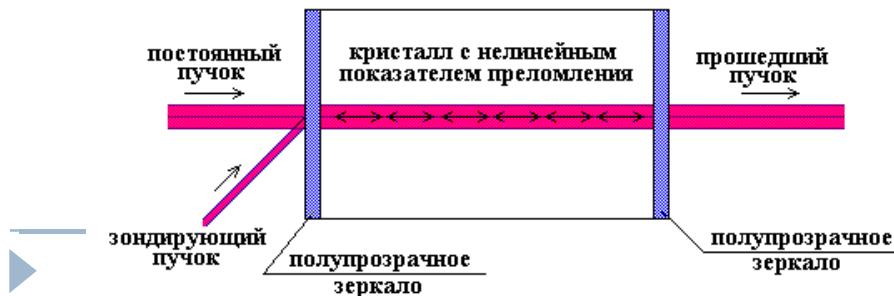
↙ фаза

Перетин прямої з нахилом обернено пропорційним вхідній інтенсивності з кривою пропускання резонатора дає положення робочої точки - результат спільного розв'язку рівнянь (1) і (2).

Простежуючи за положенням робочої точки при зміні  $I_{\text{вх}}$ , будується залежність вихідної інтенсивності від вхідної

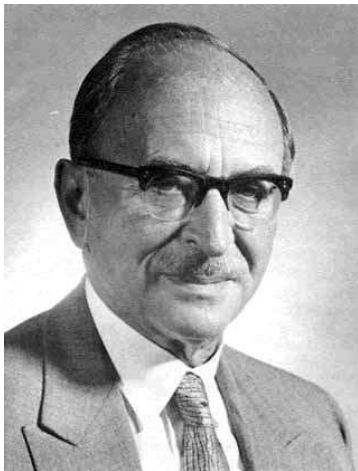
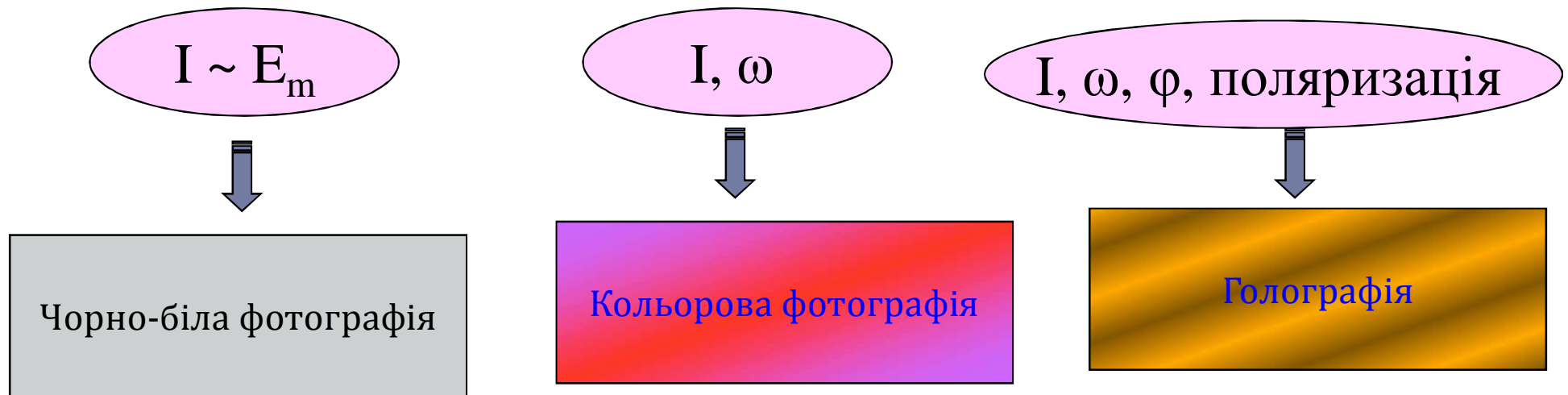


Интерферометр Фабри-Перо



Розсіяні об'єктом хвилі характеризуються амплітудою і фазою.

*Реєстрація амплітуди* проста - фотоплівка реєструє амплітуду, перетворюючи її значення у почорніння емульсії. Реєстрація фази відбувається з застосуванням інтерференції при перетворенні фазових співвідношень у відповідні амплітудні. *Інтерференція виникає, коли в деякій області простору додаються декілька електромагнітних хвиль, частоти яких з близькі.*



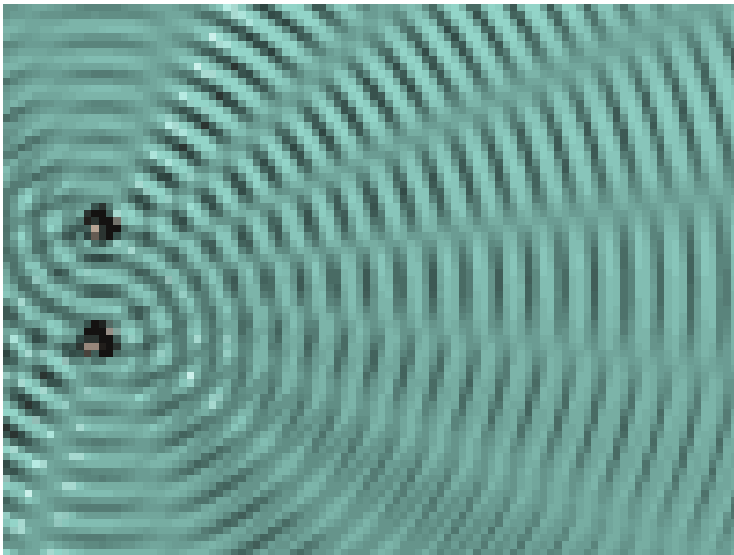
**Габор Денніс.** В 1948-51 створив теорію голографії і отримав перші голограми.

Лауреат Нобелівської премії по фізиці 1971 р.

## Інтерференція

---

**Інтерференція коливань** – просторове додавання (накладання) двох або декількох когерентних коливань, при якому відбувається просторовий перерозподіл енергії  
*(в одних точках простору відбувається підсилення інтенсивності результуючої хвилі, в інших – зменшення інтенсивності).*



**Інтерференція світла** – просторове додавання (накладання) двох або декількох когерентних світлових хвиль, при якому відбувається просторовий перерозподіл енергії (в одних точках простору відбувається підсилення інтенсивності результуючої хвилі, в інших – зменшення інтенсивності).

$$x = A \cos(\omega t)$$

Нехай в даній точці М дві монохроматичні хвилі з циклічною частотою  $\omega$  збуджують два коливання, причому до точки М одна хвиля пройшла в середовищі з показником заломлення  $n_1$  шлях  $s_1$  з швидкістю  $v_1$ , а друга – в середовищі з  $n_2$  шлях  $s_2$  з швидкістю  $v_2$ :

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{s_1}{v_1} \right), \quad x_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$

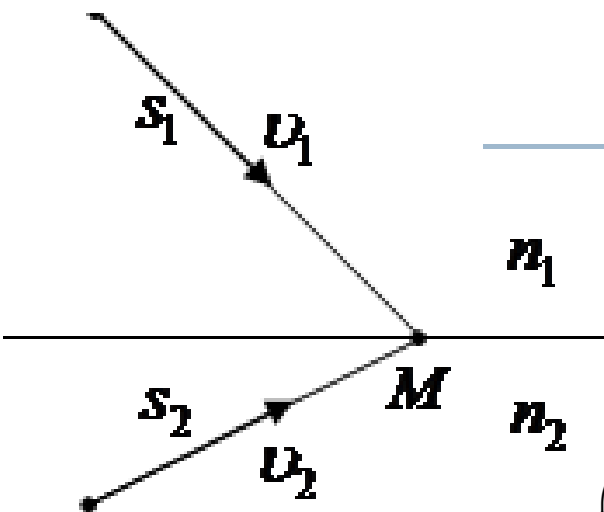
**Амплітуда результуючого коливання:**

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \delta$$

**Різниця фаз  $\delta$  коливань, збуджених в точці М:**

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

( $v=c/n$ ;  $\omega=2\pi\nu$ ,  $\lambda_0$ – довжина хвилі у вакуумі)





$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

**Оптична довжина шляху  $L$**  - добуток геометричної довжини шляху  $S$  світлової хвилі в даному середовищі на показник заломлення  $n$  цього середовища:  $L = S \cdot n$ .

**Оптична різниця ходу  $\Delta$**  - різниця оптичних довжин шляхів, що проходяться хвилями.

$$\Delta = L_2 - L_1 = s_2 n_2 - s_1 n_1$$

**Умова виникнення інтерференційного максимуму:**

Якщо оптична різниця ходу  $\Delta$  рівна цілому числу довжин хвиль у вакуумі (парному числу півхвиль), то в цій точці спостерігатиметься підсилення інтенсивності світла

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\delta = \pm 2m\pi \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

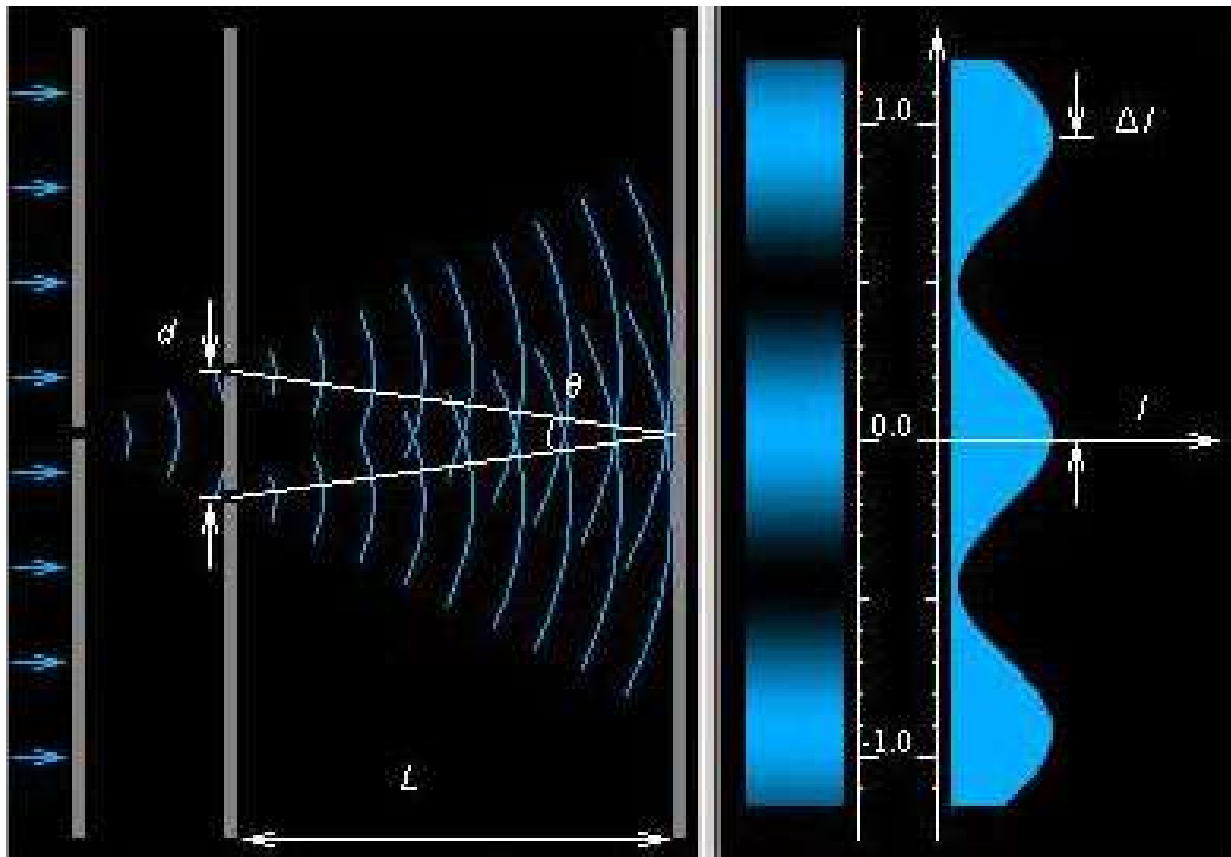
**Умова виникнення інтерференційного мінімуму:**

Якщо оптична різниця ходу  $\Delta$  рівна непарному числу половин довжин виль у вакуумі, то в цій точці спостерігатиметься послаблення інтенсивності світла

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}$$

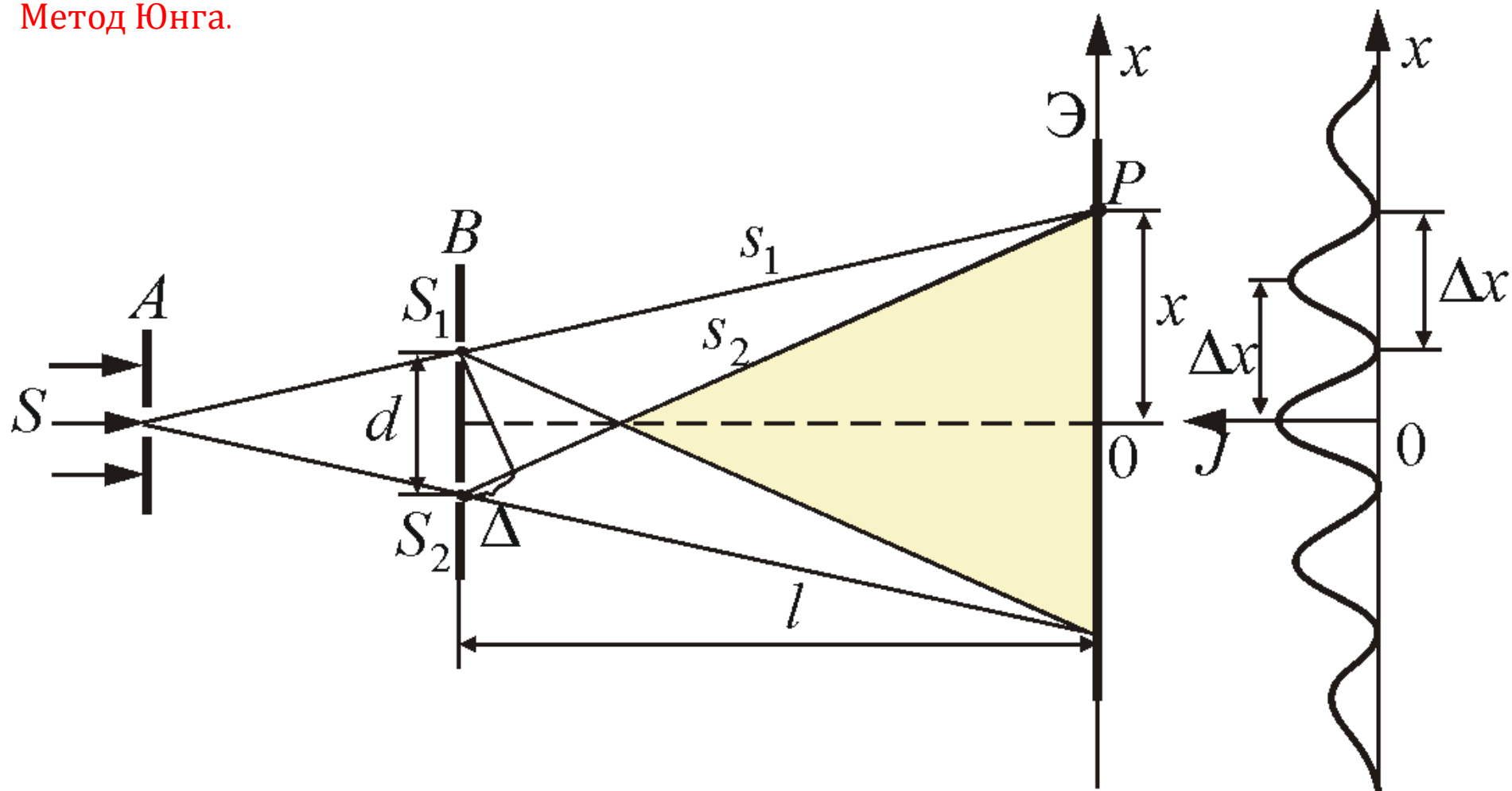
$$\delta = \pm (2m + 1)\pi \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

**Метод Юнга.** Світло від освітленої щілини  $S$  падає на дві щілини  $S_1$  і  $S_2$ , які виконують роль когерентних джерел. Інтерференційна картина спостерігається на екрані.



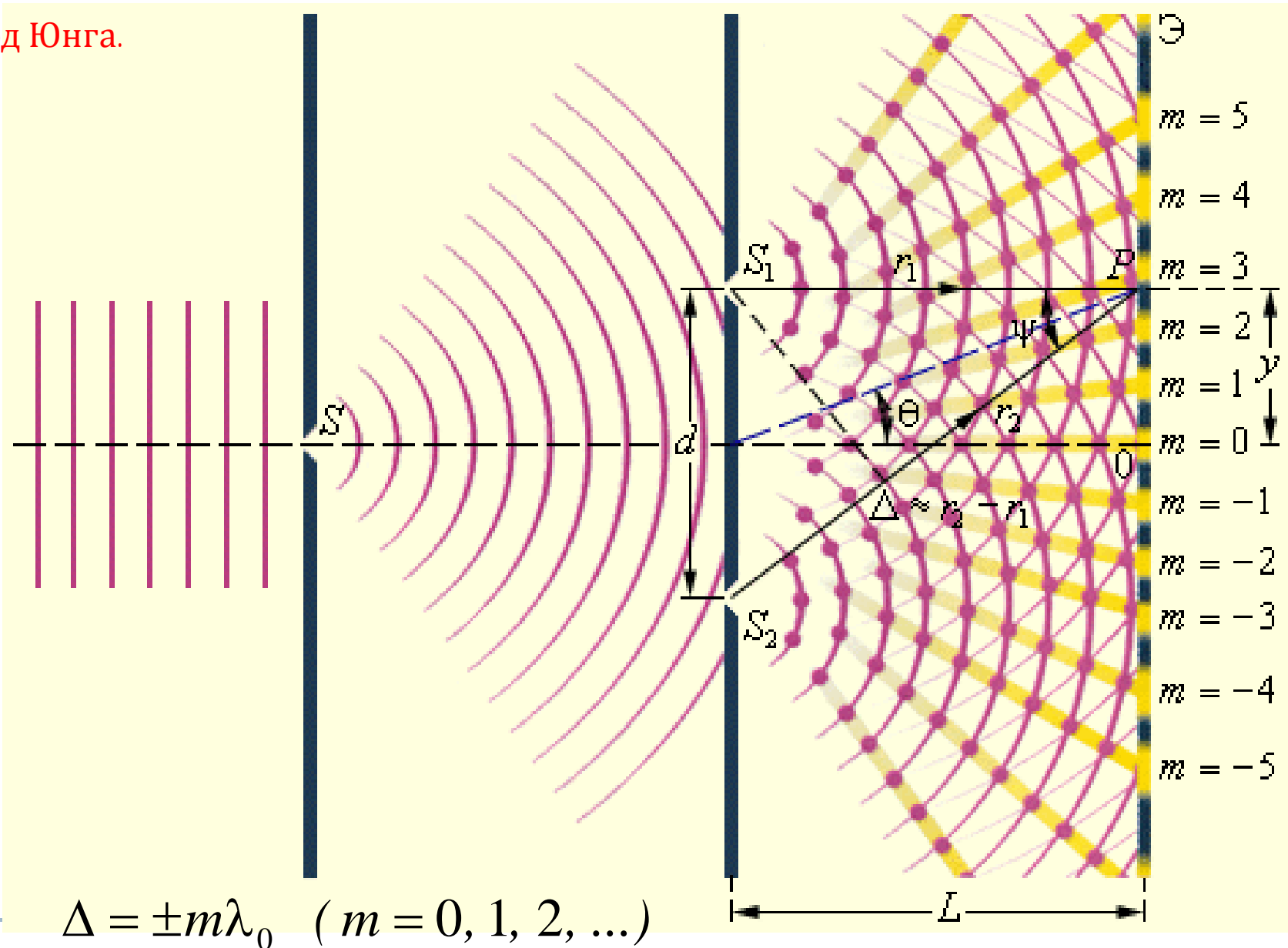
$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Метод Юнга.



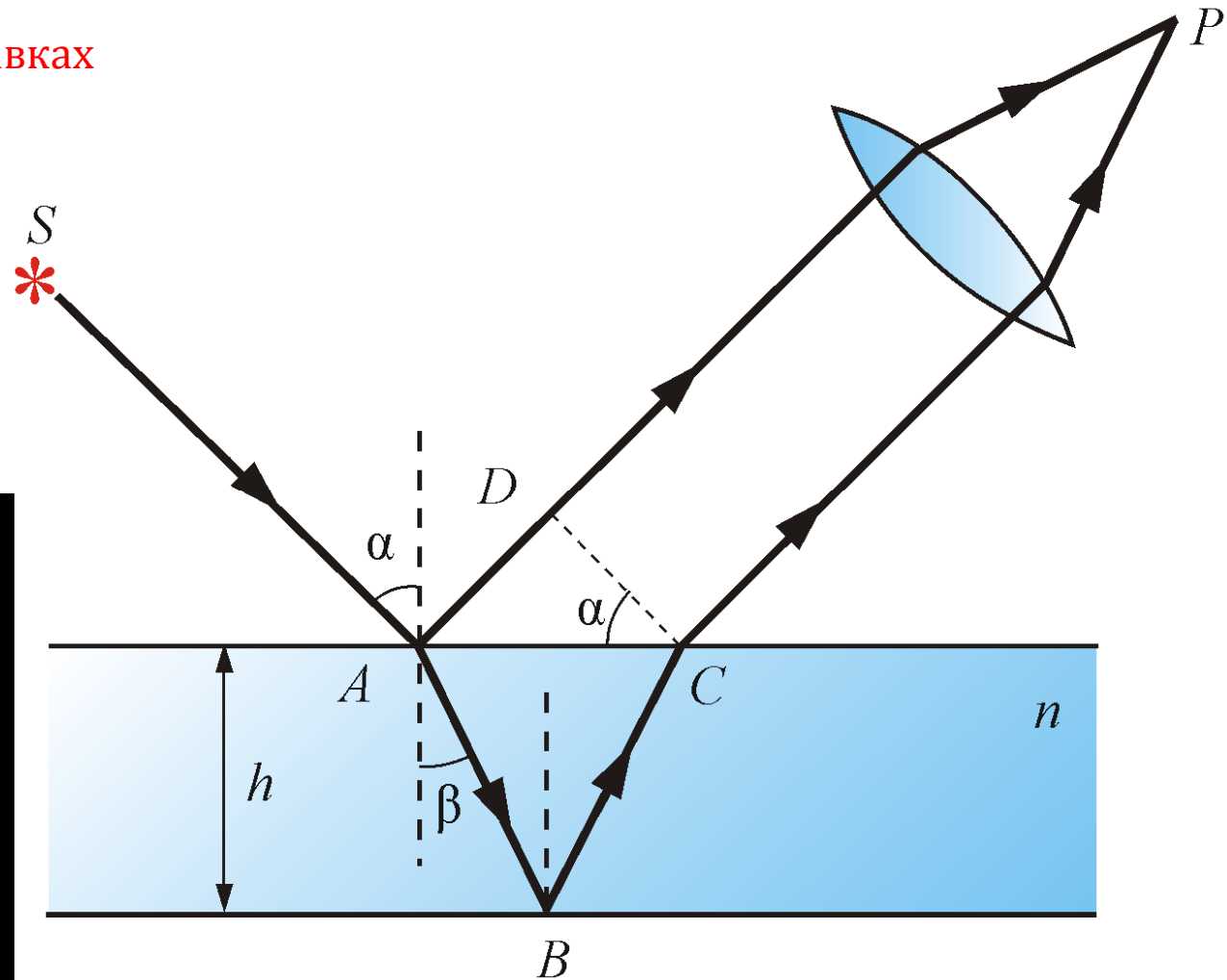
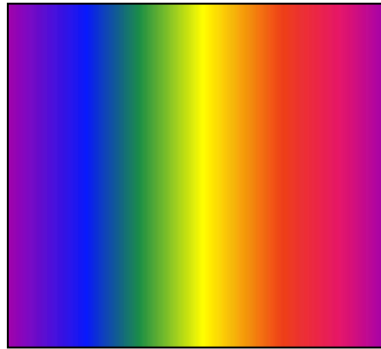
$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Метод Юнга.



$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Інтерференція в тонких плівках



$$\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$



## Дифракція світла



*Ж. Френель*

**Дифракція** - огинання хвилями перешкод, що зустрічаються на їх шляху, Дифракція пояснюється за допомогою **принципу Гюйгенса** – *вторинні хвилі огинають перешкоди на шляху поширення первинних хвиль.*

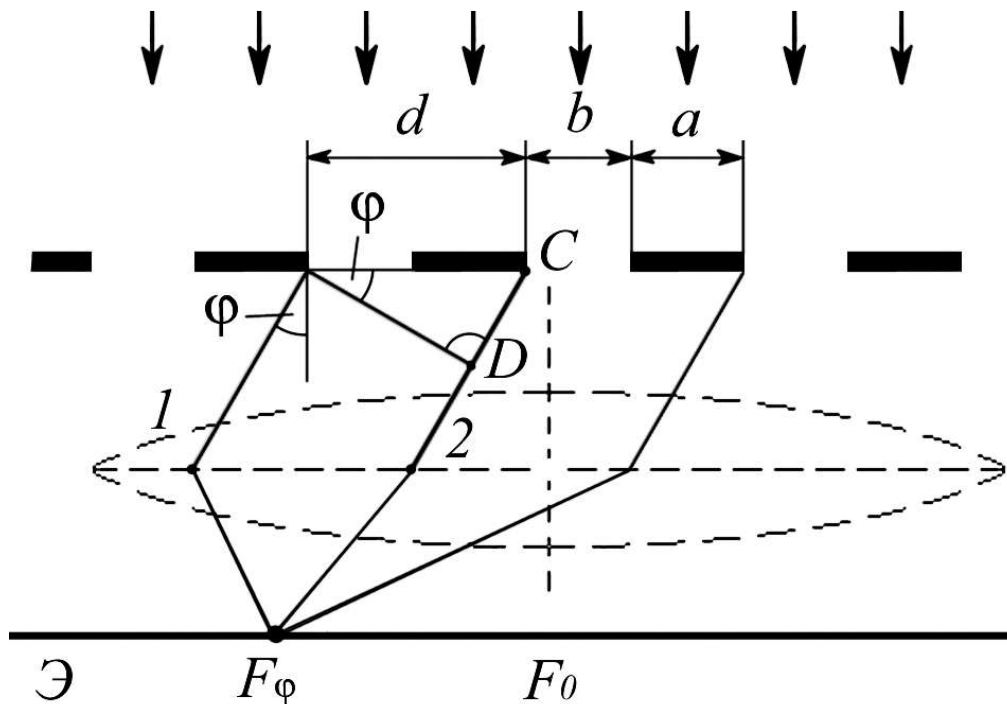
**Доповнення Френель** – вторинні хвилі когерентні і інтерферують між собою.

Згідно принципу Гюйгенса-Френеля, світлова хвиля, створена джерелом  $S$  може бути представлена як результат суперпозиції (додавання) когерентних вторинних хвиль, що випромінюються **вторинними (уявними) джерелами** – *нескінченно малими елементами будь-якої замкнутої поверхні, що охоплює джерело  $S$ .*



## Дифракційна решітка

**Дифракційна решітка** – система паралельних щілин рівної ширини, що лежать в одній площині і розділені рівними по ширині непрозорими проміжками.



$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{b}$$

світло з більшою довжиною хвилі (червоний) відхиляється на більший кут



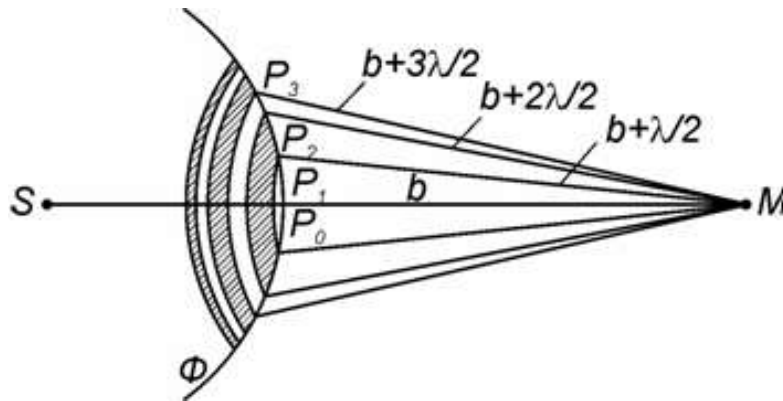
780 нм

380 нм

$b$  - ширина щілини решітки;  
 $a$  - відстань між щілинами;  
 $a+b=d$  постійна решітки;  
 $\varphi$  - кут дифракції.

## Дифракція Френеля

Світлова хвиля, яка збуджується джерелом  $S$ , може бути представлена як результат суперпозиції когерентних вторинних хвиль, які «випромінюються» фіктивними джерелами – нескінченно малими елементами світлової поверхні. Всі фіктивні джерела діють синфазно. Для визначення у деякій точці простору результуючої інтенсивності треба врахувати інтерференцію усіх вторинних хвиль, що дійшли до неї.

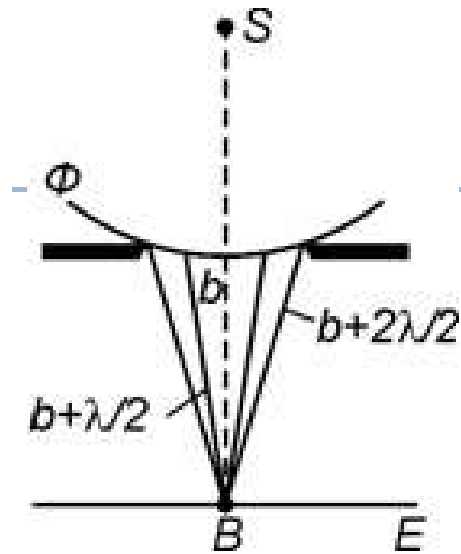


$$A = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2}$$

Амплітуда результуючих коливань у довільній точці визначається дією тільки половини центральної зони



## Дифракція Френеля на отворі



$$A = A_1 / 2 \pm A_m / 2$$

Нехай монохроматична сферична хвиля поширюється від точкового джерела S. На її шляху розташований екран з круглим отвором. Дифракційна картина спостерігається у точці екрана, яка лежить на лінії, що з'єднує S з центром отвору.

Результат дифракції (вигляд дифракційної картини) залежить від числа зон Френеля, які вкладаються на відкритій частині хвильової поверхні у площині отвору. Кількість діючих у точці зон Френеля буде парною або непарною в залежності від розміру отвору і довжини хвилі

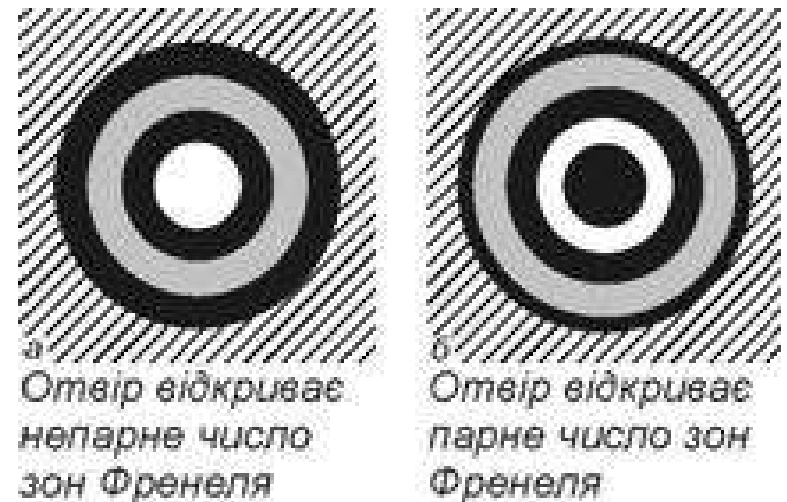
Якщо отвір відкриває **непарне** число зон Френеля, то у точці B буде **максимальна інтенсивність** світла.

Якщо отвір відкриває **парне** число зон Френеля, то **амплітуда** коливань (інтенсивність світла пропорційна  $A_2$ ) буде **дорівнювати нулю**.

Якщо отвір, наприклад, відкриває одну зону Френеля, то у точці B амплітуда дорівнює  $A_1$ , тобто вдвічі більша, ніж за відсутності непрозорого екрану з отвором.

Якщо отвір відкриває дві зони Френеля, то у точці B амплітуда коливань (інтенсивність світла) буде дорівнювати нулю, адже сферичні монохроматичні хвилі у цьому випадку знищують одна одну через інтерференцію.

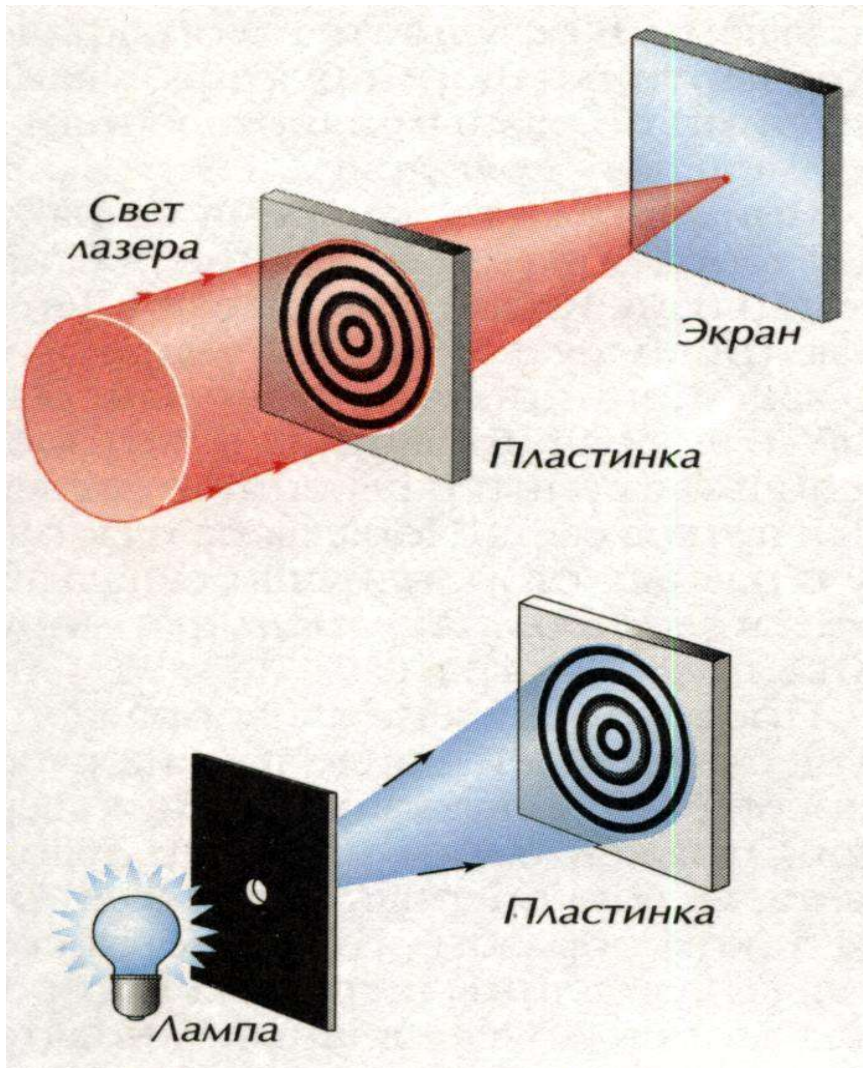
**Дифракційна картина від круглого отвору буде мати вигляд темних і світлих кілець, що чергуються, з центрами у точці**



а) Отвір відкриває непарне число зон Френеля

б) Отвір відкриває парне число зон Френеля

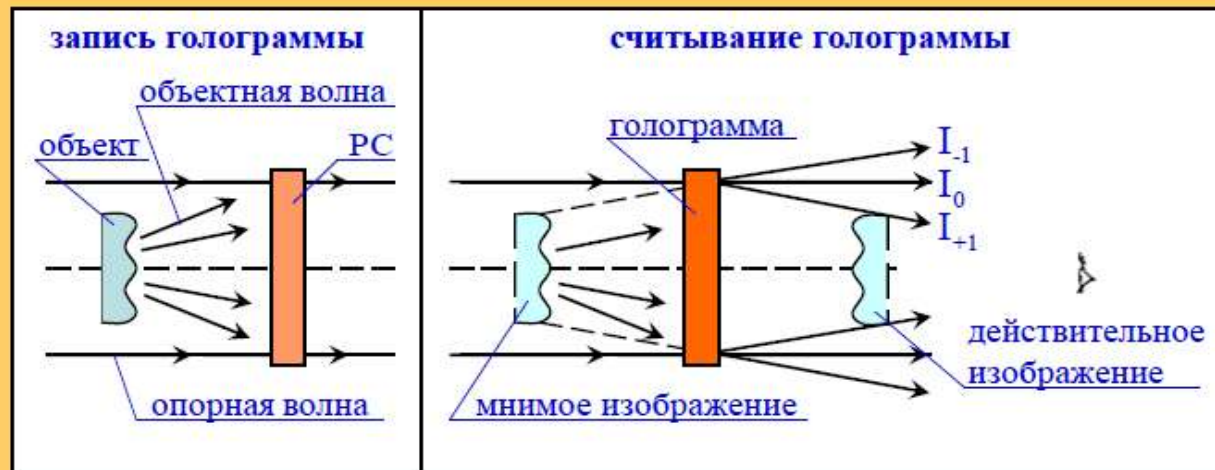
## Голограма точки



Світловий промінь, проходячи крізь отвір, дифрагує - результат система концентричних кілець - **голограма точки**.

Світловий пучок, пропущений крізь голограму, буде сфокусований в точку - відтворене зображення отвору.

## Схема Габора



## Схема Габора

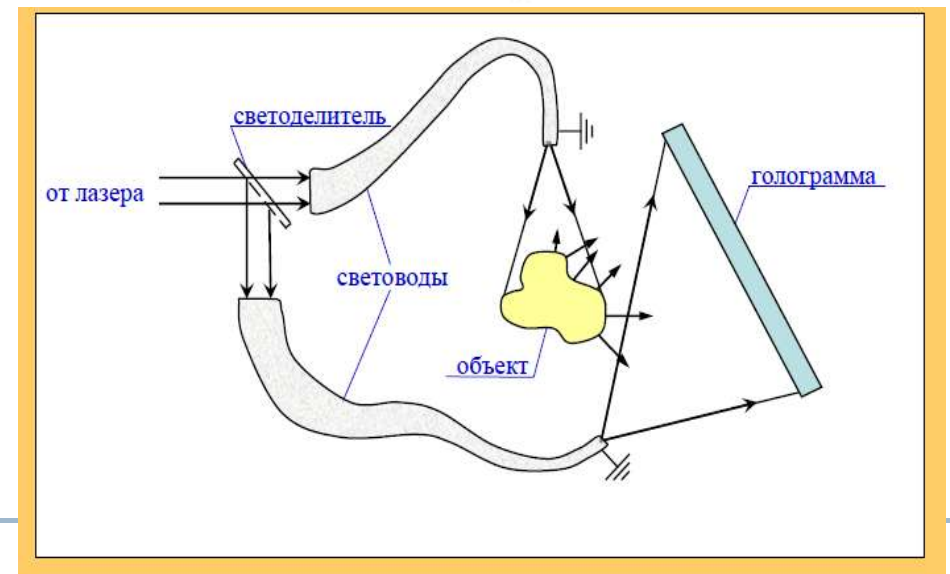
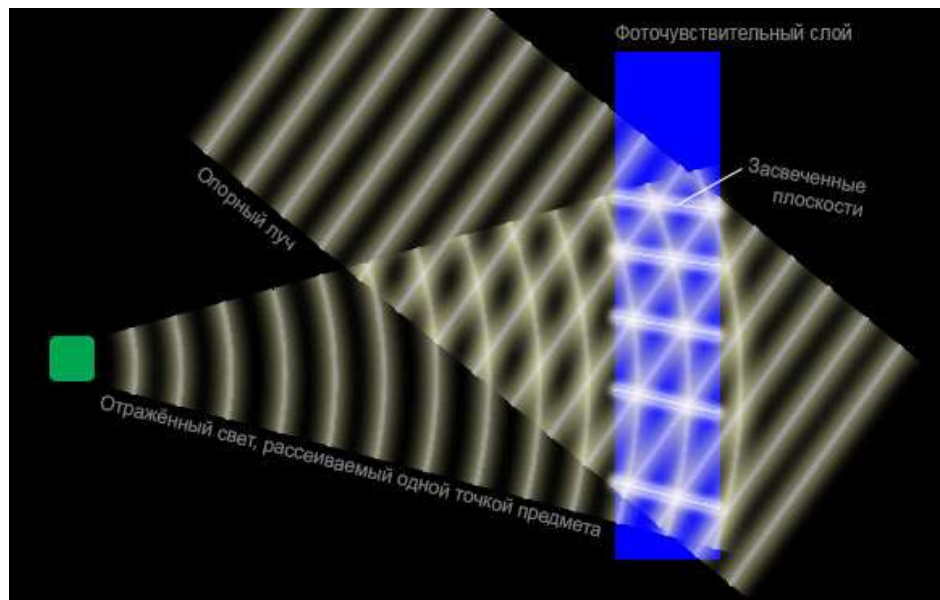
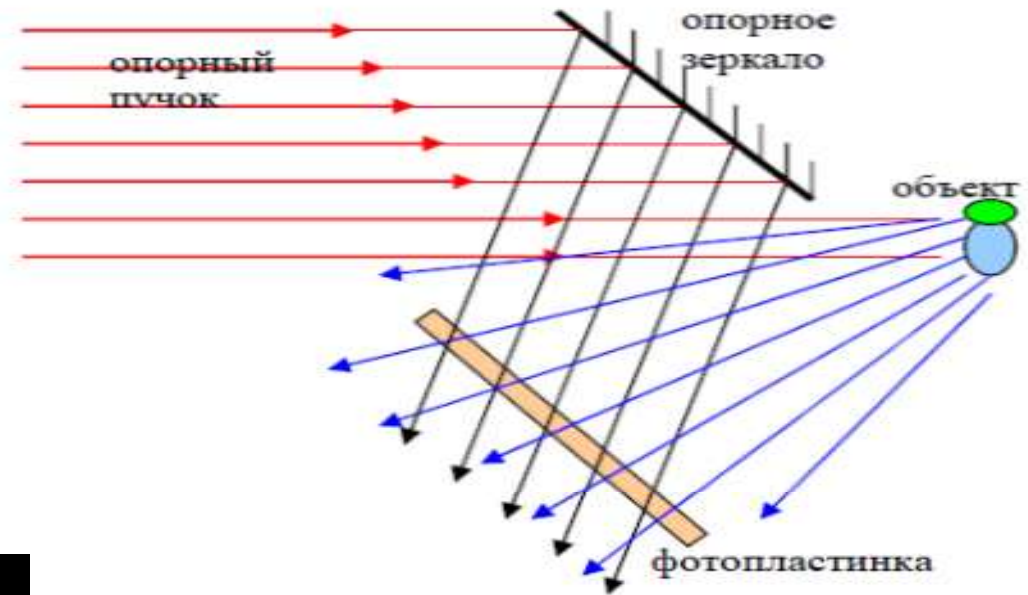
### Особенности схемы:

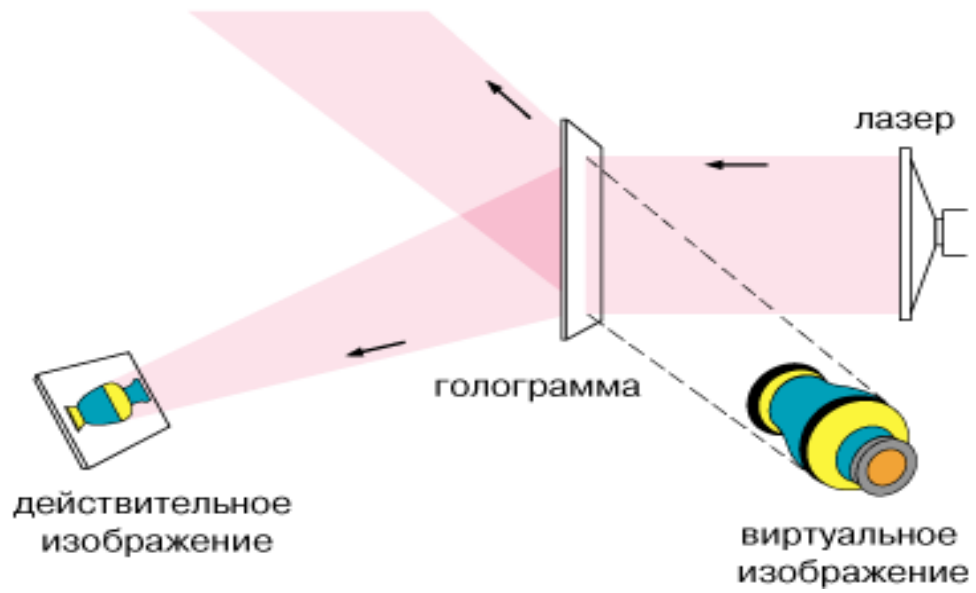
- ☺ впервые реализована идея «восстановления волн»;
- ☺ низкая пространственная частота регистрируемой интерференционной картины;
- ☹ при освещении голограммы наблюдаются два изображения, накладываемые друг на друга;
- ☹ возможна регистрация только прозрачных объектов;
- ☹ использование монохромных источников излучения при считывании.

Коли записують голограму, в певній області простору складають дві хвилі: одна з них йде безпосередньо від джерела (**опорна хвиля**), а інша відбивається від об'єкта запису (**об'єктна хвиля**). У цій же області розміщують фотопластинку (або інший реєструючий матеріал), в результаті на цій пластинці виникає складна картина смуг потемніння, які відповідають розподілу електромагнітної енергії (картині інтерференції) у цій області простору. Якщо тепер цю пластинку освітити хвилею, близької по частоті до опорної, то вона перетворює цю хвилю в хвилю, близьку до об'єктної. Таким чином, ми будемо бачити таке ж світло, що відбивалося б від об'єкта запису.

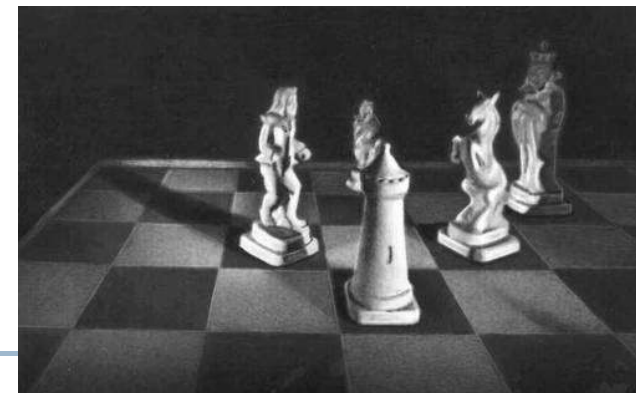
## Схема Лейта-Упатнієкса

Промінь лазера ділиться спеціальним пристроєм, дільником (в ролі дільника може виступати будь-який шматок скла) на два. Промені за допомогою лінз розширюються і за допомогою дзеркал направляються на об'єкт і реєструючу середовище (наприклад, фотопластинку). Обидві хвилі (об'єктна і опорна) падають на пластинку з одного боку. За такої схеми запису формується пропускна голограма, що вимагає для свого відновлення джерела світла з тією ж довжиною хвилі, на якій проводився запис.





## Відновлення зображення



Портрет Денисюка

## Схема Денисюка

Промінь лазера розширюється лінзою і спрямовується дзеркалом на фотопластинку.

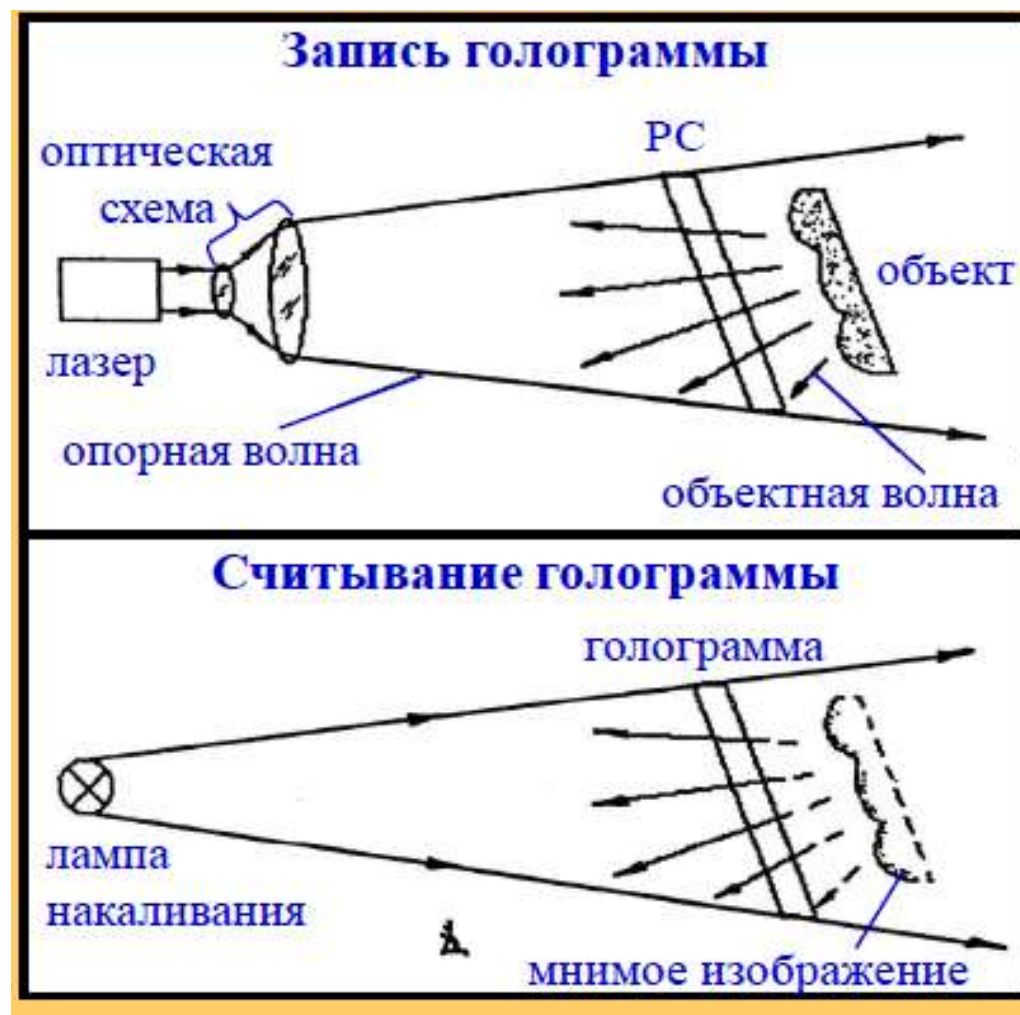
Частина променя, що пройшла через неї, освітлює об'єкт. Відбите від об'єкта світло формує **об'єктну хвилю**.

Об'єктна і опорна хвилі падають на пластинку з різних сторін (**Схема на зустрічних пучках**).

Записується голограма, яка самостійно вирізає з суцільного спектру вузьку ділянку (ділянки) і відображає тільки його (таким чином виконуючи роль світлофільтру).

Завдяки цьому, зображення голограми видно в звичайному білому світлі сонця або лампи.

Спочатку голограма вирізає ту довжину хвилі, на якій її записували (проте в процесі обробки і при зберіганні голограми емульсія може змінювати свою товщину, при цьому змінюється і довжина хвилі), що дозволяє записати на одну пластинку три голограми одного об'єкта червоним, зеленим і синім лазерами, і отримати одну кольорову голограму, яку практично неможливо відрізнити від самого об'єкта.



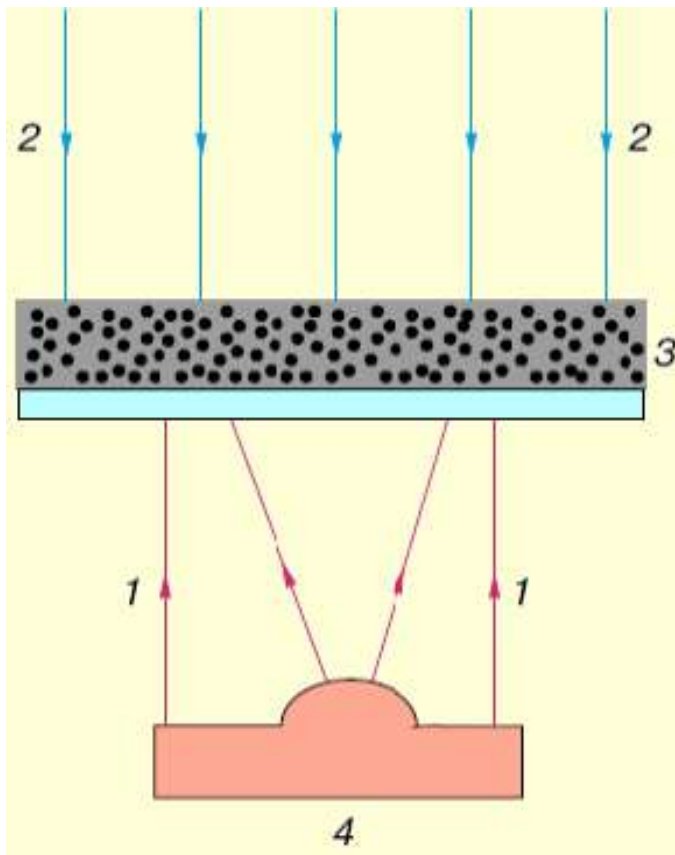


Схема запису

*1,2 – предметна і опорна хвилі  
3 – фоточутливий шар, 4 - предмет*

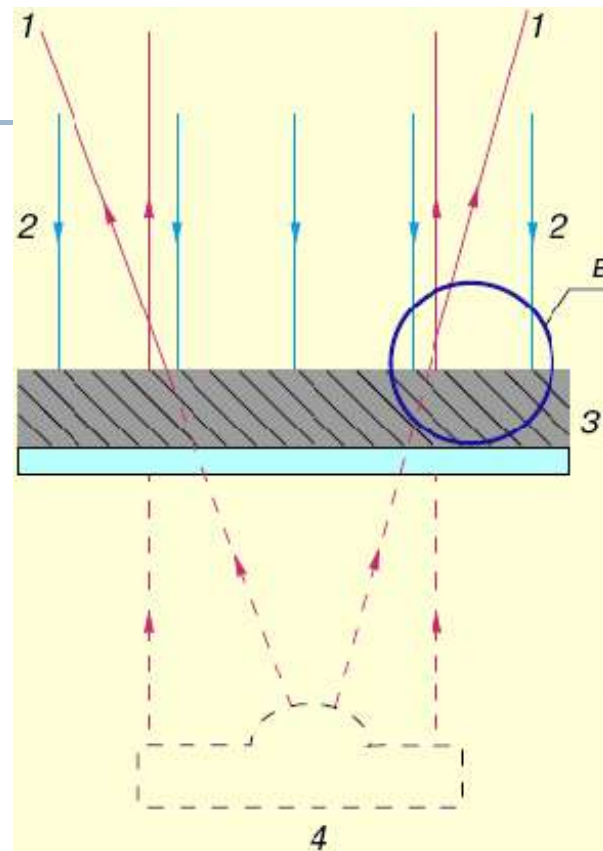


Схема зчитування

## Схема Денисюка

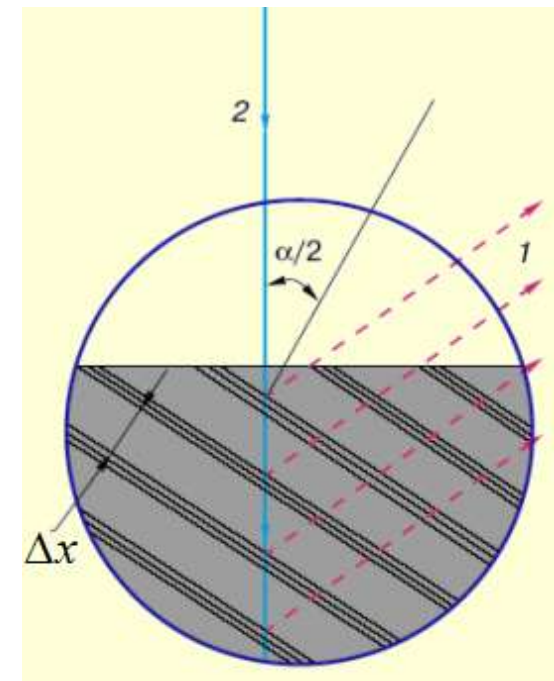


Схема інтерференції  
при зчитуванні

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha / 2)}$$

## Властивості голограм

---

*Кожна ділянка голограми містить інформацію про весь об'єкт і тому дозволяє відновити повне зображення об'єкта.*

Наслідок - висока надійність зберігання інформації, записаної у вигляді голограми.

*При зменшенні розміру голограми  $D$  погіршується лише роздільна здатність зображення.*

При просвічуванні голограм можна змінити довжину опорної хвилі  $\lambda$ .

У цьому випадку спостерігаються 2 зображення, але на іншій відстані  $H'$  від голограми:  $H' = H \lambda_1 / \lambda_2$ .

$H$  - відстань між об'єктом і голограмою при зйомці,

$\lambda_1$  - довжина опорної хвилі при зйомці, а  $\lambda_2$  - при перегляді голограми.

Таким способом можна зробити видимими зображення об'єктів, отриманих за допомогою радіохвиль або інфрачервоного, ультрафіолетового та рентгенівського випромінювань.

*При перегляді голограм можна міняти форму хвильового фронту опорної хвилі.*

Освітлюючи голограму розходитьсся сферичної хвилею, можна спостерігати збільшене зображення предмета – принцип голографічного мікроскопа.

Замінивши розбіжні хвилі на плоскі можна зменшити і наблизити зображення.

*Якість голографічних зображень залежить від монохроматичності випромінювання лазерів, роздільної здатності фотоматеріалів, умов зйомки.*

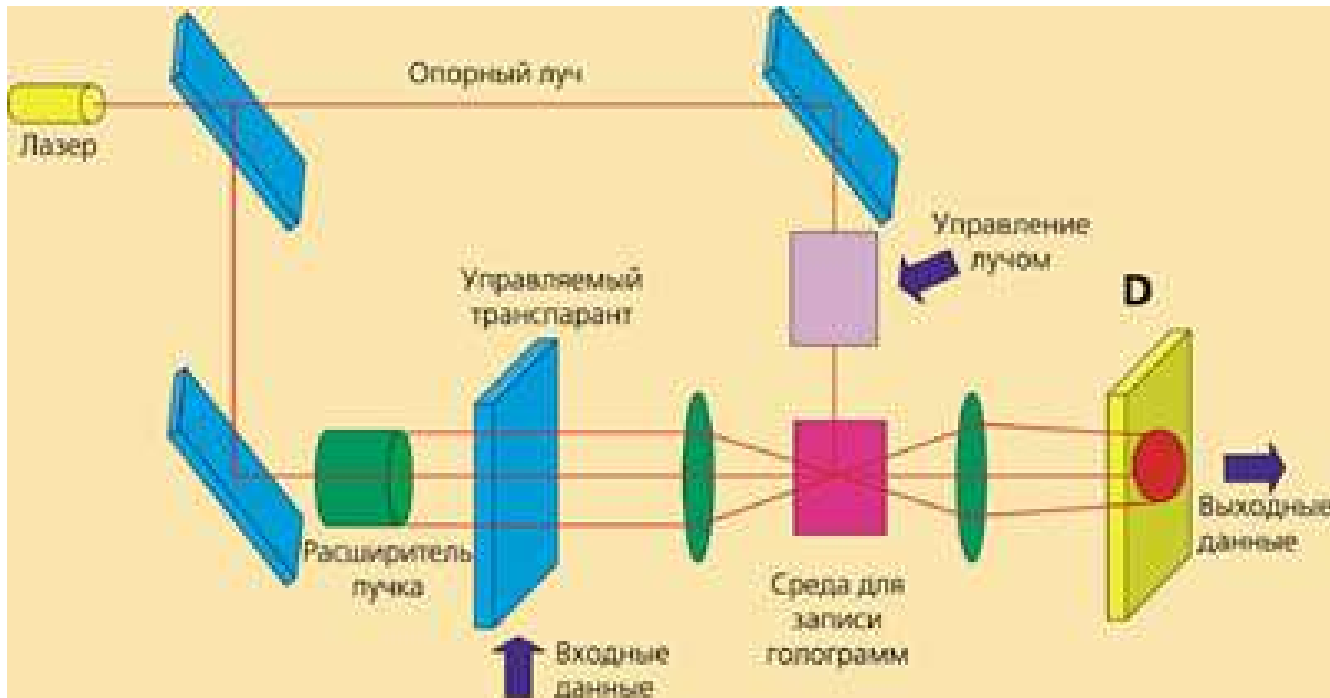
При використанні потужних імпульсних лазерів (до  $10^{-9}$  сек) можна отримувати голограми об'єктів, що рухаються зі високими швидкостями.

---





## Голографічна пам'ять



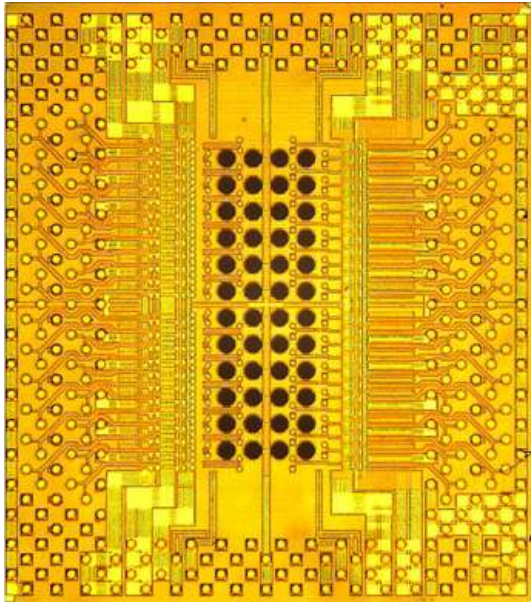
Голограма зберігаючи інформацію про інтенсивність і фазу світлової хвилі дозволяє підвищити об'єм записуваної інформації.

Інформацію можна записувати в одному і тому ж місці з затсоуванням різних довжин хвиль, використовуючи весь носій, а не тонкий шар поверхні (як у випадку звичайної оптичної або магнітної пам'яті).

**Об'ємна щільність запису інформації** може перевищувати величину  $10^{12}$  біт/см<sup>3</sup>,

**Швидкість отримання інформації** з голограм - кілька гігабіт на секунду.

Голограма може використовуватися в якості вузла оптичного процесора, виступаючи одночасно в ролі буферної пам'яті і обробного елемента. Інформація в таких голограмах записується шляхом зміни показника заломлення по всьому об'єму носія (використовуються прозорі матеріали з яскраво вираженими нелінійними оптичними характеристиками, наприклад, кристали ніобата літію).



Прототип оптичного процесора з поєднанням кремнієвої та оптичної технологій

Частота робоча – 1 терагерц

Більш швидкий і економічний, ніж сучасні процесори в комп'ютерах і серверах. Реалізована технологія (IBM Holey Optochip)

Одна з переваг технології – мінімізація енергоспоживання

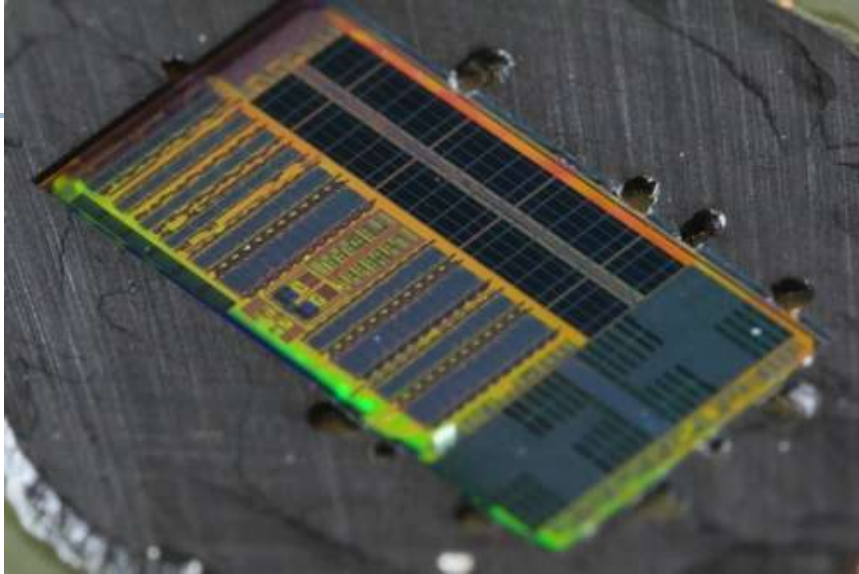
За прогнозом IBM, через 10 років найпотужніший суперкомп'ютер того часу

**Ключові переваги –**

1. надширока смуга пропускання – обробка великих потоків даних без збільшення розміру процесора і без зростання споживання енергії.
2. можливість створювати системи з дуже високою паралелізацією завдань.

Holey Optochip споживає всього 4,7 вата (приблизно як процесор в смартфоні або планшеті), але при цьому здатний обробити близько 1 трильйона біт в секунду, тобто передати приблизно 500 HD-фільмів. Розміри чіпа 5,2x5,8 мм.





## Комерційні гібридні процесори (2016)

### Архітектура RISC-V

Розмір 3 x 6 мм

Два обчислювальних ядра з 70 млн транзисторами і 850 елементів для передачі світла.

Перший процесор, який використовує фотони для вводу-виводу інформації зв'язку із зовнішнім світом. Оптичні канали дозволяють вищу пропускну здатність передачі даних з меншими втратами.

Швидкість передачі даних - 300 гігабіт на секунду на квадратний міліметр - в 10-50 разів вище в порівнянні з сучасними комерційними процесорами, які взаємодіють з іншими компонентами

обчислювальної системи по металевим провідникам.

Процесор з фотонною системою введення / виводу -

1,3 пікоджоулів на біт переданої інформації, що еквівалентно 1,3 вата в розрахунку на передачу 1 терабіта даних в секунду.

Недоліки - складність

## Літэратура

---

1. Игнатов А.Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учебное пособие. – М.: Эко – Трендз, 2010
2. Верещагин И.К. и др. Введение в оптоэлектронику. М.: «Высшая Школа», 1987.
3. Суэмацу Я. и др. Основы оптоэлектроники. Пер. с японского. - М.: Мир, 1988.
4. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. «Методы модуляции и сканирования света». - М.: «Наука», 1970.
5. Иванов А.Б. Волоконная оптика. - М.: «Syrgus», 1999.
6. Чео П.К. Волоконная оптика. - М.: «Энергоатомиздат», 1988.
7. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры. Минск: Изд. «Университетское», 1988.
8. Ермаков О. Прикладная оптоэлектроника. – М.: «Техносфера», 2004.
9. Н.А. Аваев, Ю.С. Наумов, В.Т. Фролкин. Изд. Основы микроэлектроники. "Радио и связь", 1991, 288 с.
10. Ф.А.В. Пихтин изические основы квантовой электроники и оптоэлектроники.– "Высшая Школа", М: 1983, 304 с.
11. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. -"Радио и связь", 1989, 315 с.
12. Т. Мосс, Г. Баррел, В. Эллис Полупроводниковая оптоэлектроника. –"Мир", М., 1976, 431 с.

