

**Міністерство освіти і науки України**  
**Запорізька державна інженерна академія**



**Л.Б. ДМИТРИЄВА**

**В.С. ДМИТРИЄВ**

***ОПТОЕЛЕКТРОНІКА***

***КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ***

*для студентів ЗДІА, що навчаються за напрямком*

***«Мікро- та наноелектроніка»***

*денної та заочної форм навчання*

Запоріжжя, 2019

Оптоелектроніка. Конспект лекцій для студентів ЗДІА, що навчаються за напрямком «Мікро- та наноелектроніка» денної та заочної форм навчання / Укл: Л.Б.Дмитрієва, В.С.Дмитрієв. – Запоріжжя, 2019 . – 51 с.

Укладачі: Л.Б.Дмитрієва, доцент

В.С.Дмитрієв, аспірант

Відповідальний за випуск : **зав. кафедрою ФБМЕ,**

**професор Є.Я.Швець**

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 5  |
| 1 Властивості і характеристики оптичного випромінювання .....  | 5  |
| 2 Джерела випромінювання.....  | 8  |
| 2.1 Світлодіоди.....   | 9  |
| 2.2 Лазери.....  | 10 |
| 2.2.1 Розподіл частинок по енергетичних рівнях.....  | 11 |
| 2.2.2 Метод енергетичного накачування .....  | 15 |
| 2.2.3 Ширина і форма спектральних ліній випромінювання.....  | 16 |
| 2.3 Резонатори.....  | 18 |
| 2.3.1 Конфокальні резонатори.....  | 23 |
| 2.3.2 Стійкість резонатора .....   | 24 |
| 2.3.3 Властивості лазерних пучків.....   | 25 |
| 2.4 Режими роботи лазерів.....   | 26 |
| 2.5 Основні параметри лазерів.....   | 27 |
| 2.6 Класифікація лазерів .....   | 27 |
| 2.6.1 Газові лазери.....   | 28 |
| 2.6.1.1.Процес інвертування населеності в газових середовищах .....  | 28 |
| 2.6.1.2 Газовий лазер на суміші He-Ne (група атомних лазерів).....   | 30 |
| 2.6.1.3 CO <sub>2</sub> – лазери (група молекулярних лазерів).....   | 31 |
| 2.6.2 Твердотільні ОКГ з активними речовинами на основі рідкоземельних елементів.....                          | 34 |
| 2.6.3 Ексимерний лазер.....  | 34 |
| 3 Прилади керування лазерним випромінюванням.....  | 35 |
| 4 Приймачі випромінювання.....   | 37 |
| 5 Оптрони.....   | 39 |
| 6 Індикатори.....  | 42 |
| 7 Основи волоконної оптики .....   | 45 |
| 7.1 Світлопроводи.....   | 45 |
| 7.2 Технічна реалізація ВОЛЗ.....  | 48 |
| 7.2.1 Різновиди оптичних волокон.....  | 48 |
| 7.2.2 Основні конструкції волоконно-оптичних кабелів.....  | 49 |
| 7.2.3 Передавальні і приймальні модулі.....  | 50 |
| 7.2.4 Принципові особливості волоконно-оптичних ліній зв'язку ( ВОЛЗ) та області практичного застосування..... | 52 |
| Список рекомендуємої літератури.....   |    |

## ВСТУП

Оптоелектроніка синтезує досягнення ряду областей науки і техніки: напівпровідникової електроніки, квантової електроніки, фізики фотоелектронних приладів, електрооптики, нелінійної оптики, волоконної оптики, голографії, ІЧ техніки і світлотехніки

**Оптоелектроніка** – напрям електроніки, що охоплює питання використання оптичних і електричних методів обробки, зберігання і передачі інформації.

**Оптичний діапазон** відповідно до визначення Міжнародної комісії з освітлення (МКО) включає електромагнітні випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  від 1мм до 1 нм (довгохвильова його частина – 0,1-1мм перекривається з субміліметровими радіохвилями, короткохвильова частина – 1-10 нм включає м'яке рентгенівське випромінювання). Оптичне випромінювання підрозділяється на видиме, інфрачервоне (ІЧ) і ультрафіолетове (УФ). Інфрачервоне випромінювання іноді розділяють на ближню ( $\lambda < 3$  мкм) і дальню ( $\lambda > 3$  мкм) область.

До основних елементів оптоелектронних пристроїв відносяться джерела випромінювання (некогерентного або когерентного), оптичні середовища і приймачі випромінювання.

Джерела – основа будь-якої оптоелектронної системи, вони визначають її функціональні можливості, експлуатаційні і вартісні характеристики, властивості решти елементів – фотоприймачів, пасивних оптоелектронних елементів.

## 1 ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### Основні параметри джерел випромінювання

Система параметрів джерел випромінювання [1-6] логічно виходить з функціонального призначення і фізичних принципів роботи випромінюючих діодів і лазерів.

**Інтенсивність випромінювання** характеризує потужність випромінювання  $P_{\text{випр}}$  (мВт) (для лазерів і інфрачервоних випромінюючих діодів);

**сила світла**  $J_v$  (мккд, мкд) (для світловипромінюючих діодів).

Обидва параметри вимірюються при заданому номінальному або робочому струмі збудження  $J_{\text{раб}}$  лазерів і прямому струмі  $J_{\text{пр}}$  випромінюючих діодів.

У зв'язку з сильною залежністю  $P_{\text{випр}}$  ( $J_{\text{раб}}$ ) при вимірюванні лазерів щоб уникнути виводу їх з ладу встановлюється необхідна потужність і вимірюється струм накачування.

**Спектральні властивості джерел** випромінювання визначаються довжиною хвилі відповідній максимальній інтенсивності спектру випромінювання  $\lambda_{\text{max}}$  (мкм, нм); шириною спектральної смуги  $\Delta\lambda$ , (нм), визначуваною по 50%-ному рівню спаду інтенсивності., для деяких застосувань потрібно задавати **спектральний розподіл**  $P_{\text{випр}}(\lambda)$  або координати кольоровості  $x, y$ .

Для характеристики спрямованості вимірюють **кут випромінювання**  $\alpha$ , визначуваний по 50% рівню спаду інтенсивності або **діаграму спрямованості**  $P_{\text{випр}}(\varphi)$  - залежність потужності випромінювання від кута огляду.

**Швидкодія** визначається імпульсними параметрами:

**-часом наростання (спаду) імпульсу** випромінювання при стрибкоподібному включенні (виключенні) імпульсу збудження  $t_{\text{нар(сп)}}$  (нс)

**-часом затримки імпульсу випромінювання**  $t_{\text{зад}}$  (нс). Ці параметри вимірюються по рівню 0,1 і 0,9 фронту і спаду імпульсу випромінювання.

**Постійна часу релаксації (спаду) свічення**  $\tau_{\text{рел}}$ , визначається як час зміни інтенсивності в  $e$  разів (при експоненційному спаді).

Як елемент електричного ланцюга джерело випромінювання характеризується падінням прямої напруги (або напругою збудження)  $V_{\text{пр}}$  при заданому струмі  $J_{\text{пр}}$ , а так само максимально допустимими режимами (безперервним і імпульсним) по струму, зворотної напруги, потужності розсіювання.

**Основні конструктивні параметри:** розміри випромінюючого вікна, тепловий опір  $R_T$  (К/Вт).

**Основні експлуатаційні показники:** максимальна і мінімальна робоча температура ( $T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$ ), гарантована довговічність  $t_d$  (визначається по 10, 30 або 50%-му спаду інтенсивності випромінювання).

У табл. 1.[6,7] приведені основні енергетичні і відповідні їм фотометричні одиниці.

Таблиця 1. 1- Енергетичні і фотометричні одиниці

| Энергетическая величина     | Обозначение | Единицы           | Фотометрическая величина | Обозначение | Единицы           |
|-----------------------------|-------------|-------------------|--------------------------|-------------|-------------------|
| Энергия излучения           | $Q_e$       | Дж                | Световая энергия         | $Q_\phi$    | лм*с              |
| Поток излучения (мощность)  | $\Phi_e, P$ | Вт                | Световой поток           | $\Phi_\phi$ | лм                |
| Энергетическая светимость   | $R_e$       | Вт/м <sup>2</sup> | Светимость               | $R_\phi$    | лм/м <sup>2</sup> |
| Энергетическая освещенность | $E_e$       | Вт/м <sup>2</sup> | Освещенность             | $E_\phi$    | лк                |
| Сила излучения              | $I_e$       | Вт/ср             | Сила света               | $I_\phi$    | кд                |
| Энергетическая яркость      | $V_e$       | Вт/м <sup>2</sup> | Яркость                  | $V_\phi$    | кд/м <sup>2</sup> |

У табл. 1.2[7,8]. представлені умовні межі частин оптичного діапазону.

Таблиця 1.2. Умовні межі областей оптичного спектрального діапазону

|                 |           |           |           |            |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Диапазон        | УФ-С      | УФ-В      | УФ-А      | Фиолетовый | Синий     | Зеленый   |
| $\lambda$ (мкм) | <0,28     | 0,28-0,32 | 0,32-0,40 | 0,40-0,44  | 0,44-0,49 | 0,49-0,55 |
| Диапазон        | Желтый    | Оранжевый | Красный   | ИК-А       | ИК-В      | ИК-С      |
| $\lambda$ (мкм) | 0,55-0,59 | 0,59-0,63 | 0,63-0,80 | 0,80-1,30  | 1,30-1,50 | >1,50     |

## 2 ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Джерелами випромінювання називають** прилади, що перетворюють електричну енергію збудження в оптичне випромінювання заданого спектрального складу і просторового розподілу.

Джерела – основа будь-якої оптоелектронної системи, вони визначають її функціональні можливості, експлуатаційні і вартісні характеристики, властивості решти елементів – фотоприймачів, пасивних оптоелектронних елементів.

## Основні параметри джерел випромінювання

**Інтенсивність випромінювання** характеризує потужність випромінювання  $P_{\text{випр}}$  (мВт) (для лазерів і інфрачервоних випромінюючих діодів); **сила світла**  $J_v$  (мккд, мкд) (для світловипромінюючих діодів).

Спектральні властивості джерел випромінювання визначаються **довжиною хвилі** (мкм, нм); шириною спектральної смуги (нм), визначуваною по 50%-ному рівню спаду інтенсивності.

Для характеристики спрямованості вимірюють **кут випромінювання**, визначуваний по 50% рівню спаду інтенсивності або **діаграму спрямованості** - залежність потужності випромінювання від кута огляду.

**Швидкодія** визначається імпульсними параметрами:

- **часом наростання** (спаду) імпульсу випромінювання при стрибкоподібному включенні (виключенні) імпульсу збудження  $t_{\text{нар(сп)}}$  (нс) - і **часом затримки імпульсу** випромінювання  $t_{\text{зад}}$  (нс). Ці параметри вимірюються по рівню 0,1 і 0,9 фронту і спаду імпульсу випромінювання.

## 2.1 Світлодіоди

**Світловипромінюючий діод (СВД)** має р-n перехід, контакт метал-напівпровідник, МДН або іншу діодну структуру, проходження струму через яку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням.

Якщо генерація світла відбувається в результаті інжекції неосновних носіїв заряду з їх подальшою рекомбінацією, то СВД називається **інжекційним**.

**Оптичний вихід випромінювання** показує, яка частина повного випромінювання, що генерується в активній області випромінюючого діода, виходить в зовнішнє середовище. Його величина визначається **втратами, пов'язаними з поглинанням в напівпровіднику і віддзеркаленням від зовнішньої межі**.

**1. Втрати на поглинання.**

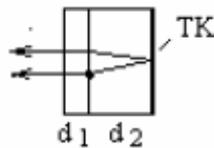


Рисунок 2.1- Схеми проходження світлових променів в плоскому світлодіоді[8,9]

**2. Втрати на віддзеркалення від поверхні напівпровідника ( Френельовські втрати).** Нормально падаючі промені частково відбиваються від межі розділу напівпровідник – зовнішнє середовище. Зниження френельовських втрат забезпечується нанесенням на поверхню випромінюючого діода прояснюючого шару.

**3. Втрати, пов'язані з повним внутрішнім віддзеркаленням.**

Випромінювання, що генерується в р-n переході, розповсюджується під різними кутами до зовнішньої поверхні напівпровідника. Досягши деякого кута падіння світлових променів відбувається повне внутрішнє віддзеркалення світла від межі напівпровідника із зовнішнім середовищем.



Рисунок 2.2 - Конструкции излучающих диодов [9]

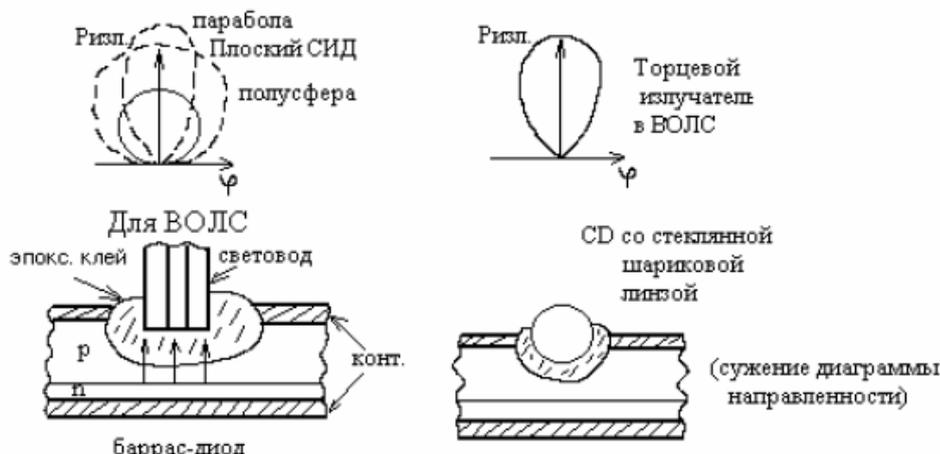


Рисунок 2.3 - Диаграммы спрямованості випромінювання світлодіодів і приклади конструкцій випромінюючих діодів, вживаних у ВОЛС[9,10]

Для застосування у волоконно-оптичних лініях зв'язку, оптронах і волоконно-оптичних датчиках потрібні випромінюючі діоди, що мають вузьку діаграму спрямованості випромінювання. З цією метою використовують діоди спеціальної конструкції, наприклад, з параболічною або сферичною зовнішньою поверхнею, рефлектори, торцеві випромінювачі, а також фокусуючі пристрої (лінзи).

## 2.2 Лазери

Лазер - прилад (пристрій), що генерує оптичне когерентне випромінювання на основі ефекту вимушеного, стимулюючого випромінювання. Термін утворений по перших буквах фрази Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

### Основні поняття квантової теорії

Відомо (з квантової механіки), що енергія елементарних частинок в ансамблі може приймати лише цілком певні дискретні значення, тобто займати певні енергетичні рівні або енергетичні стани.

Перехід частинки з одного енергетичного рівня на інший можливий лише за умови, що цей перехід дозволений законами квантової механіки.

Дозволений перехід з низького рівня  $E_1$  на вищий рівень  $E_2$  частинка може зробити лише отримавши ззовні необхідну енергію  $\Delta E$ . Зворотний перехід з рівня  $E_2$  на рівень  $E_1$  супроводжується виділенням кванта енергії  $\Delta E$ .

Ця енергія може виділитися у вигляді фонона (безвипромінювальний перехід), що сприймається, наприклад кристалічною решіткою твердого тіла, або у вигляді фотона (випромінювальний перехід).

Частота електромагнітних коливань, що випромінюють, однозначно пов'язана з енергетичним зазором **умовою Бору** [3] :

$$\nu_{2-1} = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (2.1)$$

де  $h$ -постійна Планка.

Сукупність енергетичних рівнів ансамблю частинок (атома, молекули, твердого тіла і ін.) називають **енергетичним спектром** цього **ансамблю**.

Енергію в квантових системах прийнято виражати в електрон-вольтах (1eВ=1.602•10<sup>-19</sup> Дж) або в хвильових числах, що характеризують кількість довжин хвиль випромінювання, що укладаються в одному сантиметрі. Хвильове число має розмірність 1/см (зворотні сантиметри).

Число зворотних сантиметрів виходить із співвідношення:[3]

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{E_i - E_j}{hc}, \quad (2.2)$$

де:  $\lambda$  - довжина хвилі

$c$ - швидкість світла

$h$  - постійна Планка ( $h=1.05 \cdot 10^{-34}$  Дж•с)

$E_i, E_j$  - енергії рівнів  $i$  і  $j$ .

Різниця енергій в 1eВ приблизно відповідає частоті  $2.4 \cdot 10^{14}$  Гц, помноженій на  $h$ .

### 2.2.1 Розподіл частинок по енергетичних рівнях

Розподіл частинок по енергетичних рівнях підкоряється законам квантової статистики, що носить стосовно частинок з напівцілим спином (ферміони) назву статистики Фермі-Дираку і стосовно частинок з цілочисельним спином, в т.ч. і нульовим (бозони) - статистики Бозе-Ейнштейна.  $S=0, h, 2h...$  (до бозонів відносять фони і фотони, а до ферміонів -електрони, протони, нейтрони.

Згідно статистиці Максвела-Больцмана вірогідне число частинок на рівні з енергією  $E_n$  визначається виразом [4]:

$$F(E) = C \cdot e^{\frac{-E_n}{KT}}, \quad (2.3)$$

$$\text{де } C = \frac{N_0 h^3}{2(2\pi mKT)^{\frac{3}{2}}}$$

$N_0$  - концентрація частинок

$m$  - маса частинок

$h = 6, 625 \cdot 10^{-34}$  Дж•с      постійна Планка

$K = 1, 38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к      постійна Больцмана.

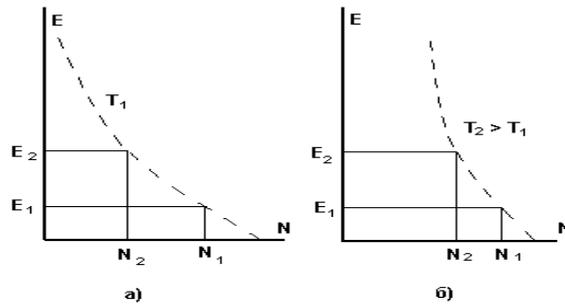


Рисунок 2.4 - Розподіл кількості частинок на різних енергетичних рівнях при різних температурах.

Т.ч., при деякій температурі  $T_1$  (рис.2.4а) вірогідне число частинок на рівні з енергією  $E_1$  рівне [6]:

$$N_1 = Ce^{\frac{-E_1}{KT}}, \quad (2.4)$$

а на рівні з енергією  $E_2$

$$N_2 = Ce^{\frac{-E_2}{KT}}. \quad (2.5)$$

При підвищенні температури ( $T_2 > T_1$ ) системи (рис. 2.4б) функція розподілу  $F(E)$  описується крутішою експонентою: частина частинок, отримавши додаткову теплову енергію, переходить на вищі енергетичні рівні. Якщо температура  $T_2$  не змінюється, то система залишається в новому стаціонарному стані.

Зміна функції розподілу частинок по енергетичних станах може відбутися і в результаті короткочасної дії збудливого чинника (додаткової енергії ззовні).

Після припинення дії збудливого чинника система прагне повернутися в початковий стан, якщо тільки переходи частинок на нижчі рівні не заборонені законами квантової фізики.

Через короткий інтервал часу  $\tau$ , званий середнім часом життя частинки на даному енергетичному рівні, частинки здійснюють перехід на нижчий рівень. Такий мимовільний перехід називають **спонтанним**. Для більшості систем середній час життя вельми мало  $\tau = 10^{-8}$  с.[2.]

Швидкість спонтанного переходу  $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{cn}$  пропорційна кількості атомів  $N_2$  в одиниці об'єму, що знаходяться на верхньому рівні, тобто [3]:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{cn} = -AN_2,$$

де  $A$  – вірогідність спонтанного випромінювання, називається коефіцієнтом Ейнштейна.

Спонтанний час життя [3]

$$\tau_{cn} = \frac{1}{A}.$$

Таким чином збуджена система при припиненні зовнішньої дії через короткий інтервал часу повернеться в стаціонарний стан. Цей процес, званий у фізиці **релаксацією**, протікає відповідно до експоненціального закону.

Час, протягом якого який-небудь параметр збудженої системи (наприклад, число збуджених частинок) зменшується в  $e$  разів, називається **часом релаксації**.

В результаті збудження частинка в системі може зайняти такий рівень, переходи з якого заборонені квантовими законами. Такі рівні називаються **метастабільними**. Теоретично частинка на метастабільному рівні може знаходитися нескінченно довго, проте реальні системи повертаються в незбуджений стан за рахунок безвипромінювальних переходів частинок.

Випромінювання, супроводжує спонтанний перехід частинки, називають **спонтанним випромінюванням**. Через випадковість спонтанних переходів окремих частинок *спонтанне випромінювання характеризується випадковими величинами параметрів: фази, поляризації, напрями розповсюдження*.

Переходи частинок в системі з одного енергетичного рівня на іншій можуть відбуватися під дією зовнішнього електромагнітного поля, якщо частота його коливань відповідає квантовій умові Бору (2.1). Частинка в системі, наприклад електрон в атомі, подібна до гармонійного осцилятора, фаза коливань якого випадкова. Якщо фази електромагнітної хвилі і осцилятора відрізняються на  $\pi$ , то енергія, якою обмінюються хвиля і частинка, негативна. Це означає, що енергія частинки - осцилятора зменшується, а енергія хвилі зростає. Інакше кажучи, частинка переходить на нижчий енергетичний рівень, випромінюючи при цьому квант енергії.

Таке **випромінювання** називається **індукованим** (вимушеним за рахунок дії зовнішнього електромагнітного поля). Індуковане випромінювання когерентне випромінюванню що його викликав.

Швидкість переходу з верхнього рівня 2 на нижній рівень 1 за рахунок вимушеного випромінювання [5]:

$$\left( \frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{вын}} = -W_{21}N_2,$$

де  $-W_{21}$  вірогідність вимушеного переходу.

Для плоскої електромагнітної хвилі [3]:

$$W_{21} = \sigma_{21}F,$$

де  $F$  – щільність потоку фотонів в падаючій хвилі

$\sigma$ - перетин вимушеного випромінювання, має розмірність площі.

Якщо ж коливання зовнішнього електромагнітного поля і частинки - осцилятора синфазні, то частинка поглинає квант енергії і переходить на вищий енергетичний рівень. Енергія зовнішнього поля при цьому зменшується на величину поглиненого кванта; спостерігається **індуковане поглинання**.

Вірогідність поглинання  $W_{12}$ , визначають з формули [3]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1,$$

де  $W_{12} = \sigma_{12}F$

$N_1$ - число атомів в одиниці об'єму що знаходяться на рівні 1

$\sigma_{12}$  - перетин поглинання  $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$  тобто вірогідність вимушеного випромінювання і поглинання рівна один одному.

Оскільки випадки протифазних і синфазних коливань зовнішнього поля і частинки-осцилятора рівноімовірні, те переважання одного з процесів в системі індукованого випромінювання або індукованого поглинання визначається лише числом частинок, що знаходяться на нижньому і верхньому ( $E_1$  і  $E_2$ ) енергетичних рівнях.

Як впливає із співвідношення (2.3) і (2.4) і рис 2.4, в системі, що знаходиться у нормальному стані, завжди  $N_1 > N_2$ , і отже, система частинок поглинає енергію зовнішнього поля.

Очевидно, що переважання процесу індукованого випромінювання можливе лише в тому випадку, якщо число частинок на верхньому рівні буде більше числа частинок на нижньому рівні ( $N_1 < N_2$ ). Такий розподіл частинок по енергетичних рівнях називають

**інверсною населеністю**, а саму систему з інверсною населеністю частинок - **активним середовищем**.

При опромінюванні активного середовища зовнішнім електромагнітним полем спостерігатиметься збільшення енергії цього поля за рахунок квантів, що випромінюють, когерентних з ним, або, як то кажуть, спостерігатиметься **квантове посилення**.

Для того, щоб підсилювач перетворився на генератор, необхідно ввести відповідний позитивний зворотний зв'язок. У НВЧ діапазоні це досягається тим, що активне середовище поміщають в об'ємний резонатор, що має резонанс на частоті  $\nu$ . У лазері зворотний зв'язок зазвичай отримують розміщенням активного середовища між двома дзеркалами з високим коефіцієнтом віддзеркалення. Така система дзеркал називається **резонатором Фабри-Перо, оптичним резонатором** або просто **резонатором**.

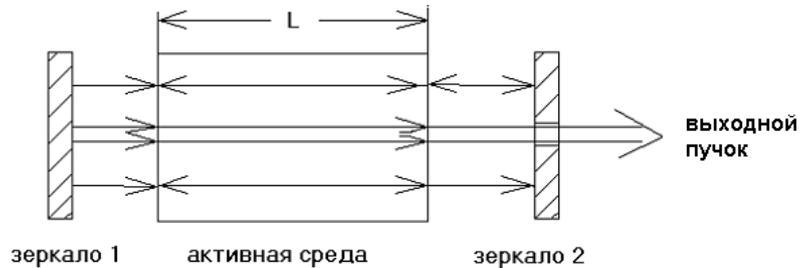


Рисунок 2.5 – Схема пристрою лазера

В цьому випадку плоска електромагнітна хвиля, що розповсюджується в напрямі, перпендикулярному дзеркалам, по черзі відбиватиметься від них, підсилюючись при кожному проходженні через активне середовище. Якщо одне з двох дзеркал зробити частково прозорим, то на виході системи можна виділити пучок корисного випромінювання.

Генерація в мазерах і лазерах можлива лише за умови, що посилення активного середовища компенсує втрати, обумовлені, наприклад, частковим виходом випромінювання з резонатора через дзеркало.

**Поріг генерації** буде досягнутий при виконанні умови [2]:

$$R_1 R_2 \exp[2\sigma(N_2 - N_1)L] = 1,$$

де  $R_1, R_2$  – коефіцієнти віддзеркалення дзеркал по інтенсивності

$L$  – довжина активного середовища

$\sigma$  – перетин переходу

$N_2, N_1$  – населеності відповідно верхнього і нижнього лазерних рівнів.

Ця формула справедлива тільки у тому випадку, коли втрати в резонаторі визначаються тільки пропусканням дзеркал.

Таким чином, поріг генерації досягається тоді, коли інверсія населеностей наближається до деякого критичного значення  $(N_2 - N_1)_{кр}$ , званому **критичною інверсією**

$$(N_2 - N_1)_{кр} = -\frac{\ln(R_1 R_2)}{2\sigma L}.$$

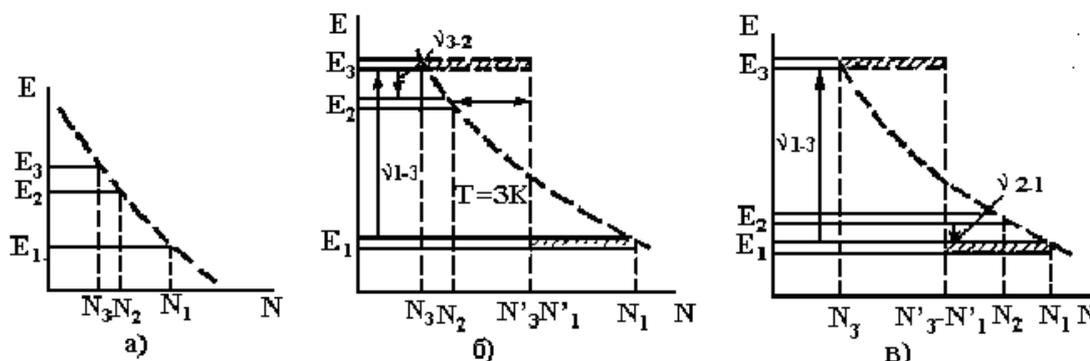
Досягши критичної інверсії генерація розвивається із спонтанного випромінювання. Цей механізм лежить в основі лазерного генератора або иначе-лазера.

### 2.2.2. Метод енергетичного накачування

Добитися інверсної населеності системи, використовуючи лише два енергетичні рівні, неможливо. При опромінюванні такої системи зовнішнім полем достатньої інтенсивності переважатимуть переходи частинок з рівня  $E_1$  на рівень  $E_2$  до тих пір, поки число частинок на цих двох рівнях не стане однаковим. Після цього відбудеться

насичення переходу між рівнями  $E_1$  і  $E_2$ , і система перестане поглинати енергію поля, оскільки число переходів вгору і вниз буде одним і тим же.

Для отримання інверсної населеності системи в квантовій електроніці використовується ряд методів. Один з них заснований на використанні в системі трьох енергетичних рівнів (рис.2.6). [6]



- а) - в рівноважному стані;
- б) - при наявності накачування підсилення можливе на частоті  $\nu_{3-2}$  ( $N_3 > N_2$ );
- в) - підсилення можливо на частоті  $\nu_{2-1}$ ;

Рисунок 2.6 - Розподіл частинок в тривірневій системі

Якщо таку систему опромінити електромагнітним полем з частотою  $\nu_{1-3}$ , то почнеться перехід частинок з рівня  $E_1$  на рівень  $E_3$ . Цей процес протікатиме до насичення переходу 1-3, коли число частинок на рівнях  $E_1$  і  $E_3$  виявиться однаковим. При цьому на переході 2-1 (рис.2.6, в) або 3-2 (2.6, б), залежно від розташування рівнів, виникне інверсія населеності. При опромінюванні такої системи електромагнітним полем з частотою  $\nu_{3-2}$  або ж з частотою  $\nu_{2-1}$  спостерігатиметься індуковане випромінювання. Цей метод отримав назву **методу енергетичного накачування**.

В деяких випадках зручно використовувати 4 енергетичних рівня, що дозволяє отримати велику інверсію населеності, або використовувати допоміжний генератор з меншою частотою накачування.

У квантових приладах використовуються і інші методи накачування. Історично першим був використаний метод просторового розділення (сортування) збуджених і незбуджених (тобто що знаходяться на нижчому енергетичному рівні) атомів і молекул. Сортування частинок може проводитися за допомогою постійного в часі, але неоднорідного в просторі електричного або магнітного поля. Такий метод створення інверсії використовується головним чином в квантових стандартах частоти.

В результаті процесу порушення рівноважного стану квантової системи, що забезпечує негативну різницю населеностей, виникає стан, званий **інверсією населеностей рівнів**.

### 2.2.3 Ширина і форма спектральних ліній випромінювання

До цих пір, розглядаючи оптичні квантові переходи, ми говоримо про два енергетичні рівні  $E_1$  і  $E_2$ , зображаючи їх у вигляді тонких горизонтальних ліній і приписуючи їм строго певні значення енергій. Переходи між такими рівнями приводять до випромінювання нескінченно вузької спектральної лінії.

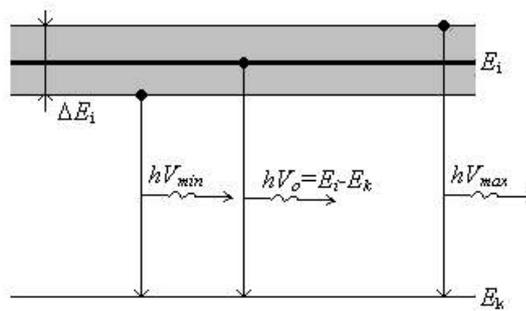


Рисунок 2.7 - Розширення спектральних ліній

Насправді подібна ситуація неможлива хоч би з тієї причини, що час життя мікрочасток  $\tau$  у збудженому стані кінцевий, тобто  $\tau \neq 0$ ,  $\tau \neq \infty$ .

Невизначеність енергії стану відповідно до співвідношення невизначеностей [1]

$$\Delta E \Delta \tau \geq \hbar \quad (2.5)$$

приводить до невизначеності частоти переходу, рівної

$$\Delta \nu_{ect} = \frac{\Delta E}{h} = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

Постійна часу  $\tau$  є мірою часу, необхідною для того, щоб збуджена система віддала свою енергію. Значення  $\tau$  визначається швидкостями спонтанного випромінювання і безвипромінювальних релаксаційних переходів.

Спостерігається розширення відповідного енергетичного рівня на величину  $\Delta E$  (див. рис. 2.7). Спектральна лінія випромінювання в цьому випадку характеризується **шириною** (або **напівшириною**) лінії  $\Delta \nu$  - інтервалом частот, в межах якого інтенсивність випромінювання зменшується удвічі щодо максимальної величини на частоті  $\nu_0$ .

Розподіл інтенсивності випромінювання по частоті в межах даної лінії описується нормованою функцією  $g(\nu)$ , яка називається **формфактором спектральної лінії** або просто формою (контуром) лінії. Функція  $g(\nu)$  нормується таким чином, що  $\int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu = 1$ .

Мінімально можлива ширина спектральної лінії називається **природною шириною лінії випромінювання**, спостерігається для системи нерухомих, не взаємодіючих один з одним мікрочасток, час життя яких у збудженому стані обумовлено процесами спонтанних переходів. Тому природна ширина лінії  $\Delta \nu_{ictb}$  визначається вірогідністю спонтанних переходів  $A_{ik}$ .

Контур лінії спонтанного випромінювання (рис.1.6) описується функцією Лоренця і має вид резонансної кривої з максимумом на частоті  $\nu_0$ , що спадає до половини пікової величини при частотах

$$\nu = \nu_0 \pm \Delta \nu_{ectm}/2.$$

Ширина такої лінії рівна [2]

$$\Delta \nu_{ectm} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{\Delta E}{h}. \quad (2.6)$$

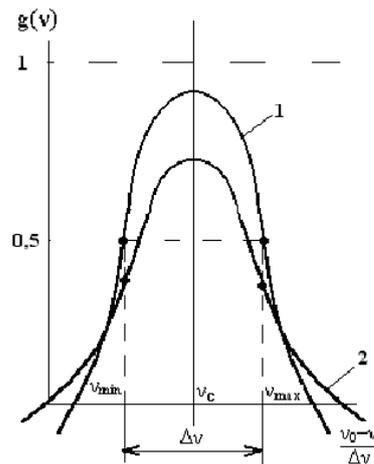


Рисунок 2.8 – Гауссова (1) і Лоренцева (2) форми ліній

Спектральні лінії, спостережувані в реальних умовах, значно ширше природних, оскільки в системах з дискретними рівнями енергії, окрім спонтанних і вимушених переходів, істотну роль грають релаксаційні безвипромінювальні процеси. Залежно від конкретної ситуації механізм таких процесів може бути пов'язаний із зіткненнями між молекулами газу або рідини, безсуттєвою взаємодією між іонами і кристалічною решіткою і ін. Зрештою відбувається збільшення швидкості обміну енергією між частинками, що еквівалентно зменшенню часу їх життя у збудженому стані і, отже, додатковому розширенню лінії випромінювання. Форма спектральної лінії, розширеної за рахунок зіткнень, описується функцією Лоренця, як і при природному розширенні, тільки замість  $\tau$  необхідно використовувати час релаксації  $\tau_p$ , визначуване процесами зіткнень.

Всі види розширення спектральної лінії, обумовлені кінцівкою часу життя збуджених станів, відносяться до **однорідного розширення**. При однорідному розширенні спектральна залежність  $g(v)$  характеризує як окремо узятую мікрочастку, так і всю їх сукупність. Іншими словами, лінії кожної мікрочастки і всього середовища в цілому розширюються однаково. Однорідно розширені лінії мають лоренцеву форму.

Розширення називають **неоднорідним**, якщо резонансні частоти  $\nu_{oi}$  окремих частинок не співпадають і розподілені в деякому частотному інтервалі, що приводить до розширення ліній системи частинок в цілому при значно меншому розширенні ліній окремих частинок. Отже, неоднорідне розширення властиво не кожній окремо узятій частинці, а виявляється як колективна властивість, обумовлена незалежною поведінкою частинок, що знаходяться в неоднакових умовах.

Класичним прикладом неоднорідного розширення є **доплеровское розширення**, характерне для газів при невисокому тиску. Як відомо, **суть ефекту Доплера [6]** полягає в тому, що частота випромінювання, що сприймається нерухомим приймачем, залежить від швидкості і напрямку руху випромінювача.

Якщо частинка, випромінююча на частоті  $\nu_0$ , рухається щодо приймача з швидкістю  $v$  то приймач залежно від напрямку руху частинки сприймає частоти в діапазоні від

$$\nu_{\max} = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad \text{до} \quad \nu_{\min} = \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right),$$

де  $\nu_0$  - частота випромінювача,  $c$  - швидкість світла,  $v$  – швидкість руху випромінювача щодо приймача

Хаотичність теплового руху частинок газу приводить до того, що замість однієї розширеної лінії з резонансною частотою  $\nu_0$  приймач сприймає сукупність таких щільно

розташованих ліній, як лінію, що її огинає, це дає контур доплеровскі розширеної лінії газу. Природно, її форма буде визначатися розподілом частинок газу за швидкостями. При максвеловському розподілі за швидкостями форма лінії описується функцією Гауса (Рисунок 2.8 [3])

Ширина спектральної лінії при доплеровском механізмі розширення рівна [1]:

$$\Delta\nu_g = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2KT \ln 2}{Mc^2}} \quad (2.7)$$

де  $M$ - маса атома (молекули газу),  $\nu_g$  - доплеровская частота.

Роль доплеровского розширення особливо значима в оптичному діапазоні при підвищених температурах.

У реальних умовах, як правило, діє одночасно декілька механізмів розширення. При переважанні одного з них спостережується спектральна лінія розширена однорідно або неоднорідний і має лоренцеву або гауссову форму. Після встановлення форми спектральної лінії  $g(\nu)$  можна визначити в явному вигляді спектральну залежність коефіцієнтів Ейнштейна [1].

### 2.3 Резонатори

Окрім енергетичних, лазерне випромінювання володіє набором спектрально-просторових характеристик і параметрів, визначених властивостями оптичного резонатора.

Будь-який *резонатор можна розглядати як коливальну систему, в якій можливе накопичення енергії електромагнітних коливань.*

Здатність резонатора зберігати накопичену енергію характеризується величиною його *добротності*  $Q$  – інтегральною характеристикою, що визначається відношенням енергії  $W_{зан}$ , що запасена резонатором, до енергії, що втрачається їм за період  $W_{ном}$ :

$$Q = 2\pi \frac{W_{зан}}{W_{ном}} \quad (2.8)$$

Наприклад, втрати енергії в коливальному контурі - простому електромагнітному резонаторі – складаються з теплових втрат в його елементах, пропорційних  $\sqrt{2\pi\nu_0}$  і втрат на випромінювання в навколишньому просторі.

Через добротність  $Q$  можна виразити інші параметри резонансної системи. Так, спектральна ширина резонансної лінії на рівні 0,5 максимальної інтенсивності рівна [4]

$$\Delta\nu_p = \frac{\nu_0}{Q} \quad (2.9)$$

Ступінь монохроматичності [4]:

$$\frac{\Delta\nu_p}{\nu_0} = Q^{-1}, \quad (2.10)$$

а постійна загасання резонатора  $\tau_p$ , що визначає час, за який щільність енергії в резонаторі зменшується в  $e$  разів, рівна

$$\tau_p = \frac{Q}{2\pi\nu_0} \quad (2.11)$$

Із збільшенням частоти коливань до 1 ГГц і вище ( $\lambda < 30$  см) коливальний контур втрачає резонансні властивості у зв'язку з різким зростанням втрат на випромінювання в навколишній простір. В цьому випадку необхідно використовувати так звані **об'ємні резонатори**, що є замкнутими металевими порожнинами з лінійними розмірами, кратними  $\lambda/2$ , усередині яких можуть збуджуватися електромагнітні коливання певних

довжин хвиль і структури. Такі коливання називаються **власними коливаннями об'ємного резонатора або модами**.

**Мода резонатора** є стаціонарною конфігурацією електромагнітного поля, яка задовольняє відповідним рівнянням Максвелла і граничним умовам.

Для об'ємного резонатора, що є прямокутним паралелепіпедом з розмірами ребер **a, b, l**, частоти мод, що утворюються, можна знайти із співвідношення [1]:

$$\nu_{mng} = \frac{1}{\lambda_{mng}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{g}{l}\right)^2}, \quad (2.12)$$

де *m, n, g* – цілі числа, звані індексами моди, указують число півхвиль, сторін резонатора, що укладаються уповдовж (тобто по осях *x, y, z* відповідно).

З (2.12) витікає, що *власні частоти незаповнених об'ємних резонаторів визначаються тільки їх геометрією*. Змінюючи розміри, можна перебудувувати його резонансні частоти.

**Число мод M**, що одночасно порушуються в частотному інтервалі  $\Delta\nu$  і об'ємі  $V=abl$ , рівне [3] :

$$M = 8\pi \frac{V}{\lambda^3} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} = 8\pi \frac{\nu_0^2}{c^3} V \Delta\nu. \quad (2.13)$$

**Спектральна ширина кожної моди**  $\Delta\nu_m = \frac{\nu_0}{Q}$  визначувана добротністю резонатора мала, оскільки в СВЧ- діапазоні  $Q \cong 10^3 - 10^4$ .

Тому нескладно підібрати таку геометрію резонатора, яка забезпечує його частотний спектр у вигляді декількох ( або єдиною) вузьких спектральних ліній, віддалених один від одного на значну відстань.

У оптичному діапазоні використовувати об'ємні резонатори не можна, оскільки довжина хвилі  $\lambda$  змінюється від одиниць до долей мкм. Якщо розміри резонатора незмінні, то  $a, b, l \gg \lambda$ ,  $V \gg \lambda^3$ . Це приведе до різкого збільшення числа одночасно збуджених мод (2.13). Одночасно з цим спостерігається розширення спектральної лінії кожної моди. В результаті резонансні лінії перекриваються, утворюючи безперервний спектр, і резонатор втрачає свої резонансні властивості.

Використання об'ємних резонаторів з розмірами *a, b, l*, приблизно рівними  $\lambda$ , також неможливо, оскільки, існують певні технічні труднощі виготовлення резонаторів такого малого розміру.

У 1958 р. Прохоровим А.М. (СРСР) і незалежно від нього Р.Дікке, А.Шавловим, Ч.Таунсом (США) була обгрунтована ідея [1-3] про можливість застосування в оптичному діапазоні відкритих резонаторів замість об'ємних. Такі резонатори називаються **відкритими оптичними** або просто оптичними.

Простим оптичним резонатором (Резонатор Фабрі – Перо) є сукупність двох плоских прямокутних дзеркал, розташованих строго паралельно один одному на відстані  $L \gg \lambda$  (див. рис. 2.9). Вважають, що коефіцієнти віддзеркалення дзеркал  $R_1$  і  $R_2$  не залежать від частоти. Пряма, що проходить через центри дзеркал перпендикулярно їх поверхні, називається **оптичною віссю резонатора**

$$\varphi \cong \frac{\lambda}{a}$$

$$L \gg \lambda.$$

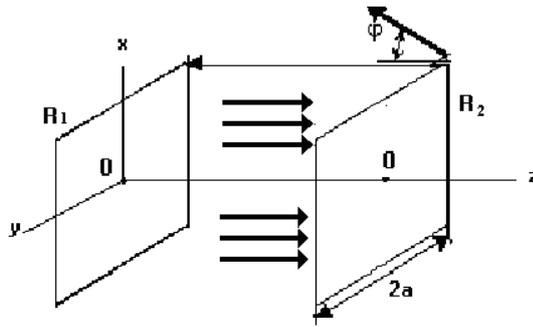


Рисунок 2.9 - Простий оптичний резонатор.

При аналізі властивостей оптичних резонаторів найбільш важливими є питання:

- модового складу збуджених коливань (частотного спектру)
- просторової структури поля цих мод
- виявлення слабкозатухаючих (високодобротних) мод і ін.

Оптичний резонатор (рис.2.9) можна розглядати як об'ємний, у якого видалено чотири бічні стінки (ця аналогія лежить в основі елементарної теорії, запропонованої в 1958 р. Шавловим і Таунсом [1]). У такому разі при кінцевих розмірах дзеркал з'являються додаткові, принципово неусувні дифракційні втрати, обумовлені дифракцією світла на краях дзеркал. В результаті плоска хвиля, направлена спочатку уздовж осі Z, після віддзеркалення від одного з дзеркал розповсюджуватиметься в конусі з кутом при вершині  $\varphi \cong \frac{\lambda}{a}$  (рис.2.9). Чим більше цей кут, тим більша частина світлової енергії не потрапить на протилежне дзеркало і вийде за межі резонатора.

Відносна частка випромінювання, що покинуло резонатор, складає  $2\sqrt{\frac{L\lambda}{a}}$ .

Квадрат даної величини характеризує дифракційні втрати енергії за один прохід:

$$A_{\text{диф}} = 4L\lambda / a^2 = 4 / N_F, \quad (214)$$

де  $N_F = a^2 / L\lambda$  - число Френеля.

**Число Френеля** є одним з основних параметрів, що характеризують добротність оптичного резонатора. Воно визначає число зон Френеля, видимих на одному з дзеркал з центру другого. Співвідношення (2.14) справедливе лише при великих  $N_F$  і для плоских хвиль.

Дифракційні втрати реальних мод виявляються істотно менше завдяки тому, що при багатократних проходах випромінювання між дзеркалами відбувається «природний» відбір тих мод, у яких максимум амплітуди поля знаходиться в центрі дзеркал. Таким чином, у відкритому резонаторі за наявності дифракційних втрат не може існувати дійсних мод, тобто стаціонарних конфігурацій електромагнітного поля типу стоячих хвиль, подібних що існує в об'ємному резонаторі. Проте є певне число типів коливань, що володіють малими дифракційними втратами (їх іноді називають **квaziмодами** або **модами відкритих резонаторів**). Поле цих коливань (мод) сконцентроване поблизу осі резонатора і практично спадає до нуля в його периферійних областях.

Такі ж виводи можна отримати і строгішим шляхом.

Відповідно до (2.12) *кожна мода об'ємного резонатора характеризується трьома позитивними числами m, n, g, що визначають число вузлів електромагнітного поля в напрямках x, y, z відповідно.*

Для відкритих резонаторів величина q дуже велика, оскільки  $L \gg \lambda$ , а m і n дуже малі із-за наявності дифракційних втрат. Тоді з обліком

$$m, n \ll g \quad \text{і} \quad a = b$$

(1.12) можна розкласти в статичний ряд :

$$v_{mng} \cong \frac{c}{2} \left( \frac{g}{L} + \frac{1}{2} \frac{(m^2 + n^2)}{q} \frac{L}{4a^2} \right). \quad (2.15)$$

Цей вираз визначає набір резонансних частот, відповідних модам, що порушуються у відкритому плоскопаралельному резонаторі.

Якщо  $m = n = \text{const}$ , то

$$v_{mng} = \frac{cg}{2L}.$$

Отриманий набір резонансних частот відноситься до так званих **подовжніх** (або **аксіальних**) мод. Аксіальними модами називають коливання, що розповсюджуються строго уздовж оптичної осі резонатора. Вони володіють найвищою добротністю.

Подовжні моди відрізняються одна від одної лише частотою і розподілом поля уздовж осі  $Z$  (тобто різниця між сусідніми частотами постійна і залежить тільки від геометрії резонатора) [1]:

$$\Delta v_g = \frac{c}{2L}.$$

Моди з різними індексами  $m$  і  $n$  розрізнятимуться розподілом поля в площині, перпендикулярній до осі резонатора, тобто в поперечному напрямі.

Тому їх називають **поперечними** (або **неаксіальними**) модами. Для поперечних мод, що відрізняються індексами  $m$  і  $n$ , структура поля буде різною у напрямі осей  $x$  і  $y$  відповідно.

Різниця частот поперечних мод з індексами  $m$  і  $n$ , що відрізняються на 1, рівна [2]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_m &= \frac{cL}{8ga^2} \left(m + \frac{1}{2}\right) = \Delta v_g \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{L^2}{4ga^2} \\ \Delta v_n &= \Delta v_g \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{L^2}{4ga^2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.16)$$

(2.16) можна представити у вигляді:

$$\Delta v_m = \Delta v_g \left(m + \frac{1}{2}\right) / (8N_F),$$

$$\Delta v_n = \Delta v_g \left(n + \frac{1}{2}\right) / (8N_F),$$

де  $N_F$ -число Френеля  $N_F = \frac{a^2}{L\lambda}$ .

Оцінімо величини  $\Delta v_g$ ,  $\Delta v_m$ ,  $\Delta v_n$  для  $TEM_{00}$

При  $\lambda = 1 \text{ мкм}$ ,  $L = 1 \text{ м}$ ,  $2a = 1 \text{ см}$ .

В цьому випадку число Френеля:

$N_F = 25 \gg 1$ , а т.к.  $m, n \ll q$ , то  $\Delta v_m, \Delta v_n \ll \Delta v_g$ ,

$$\Delta v_g = \frac{c}{2L} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1} = 1,5 \cdot 10^8 = 150 \cdot 10^6 \text{ Гц},$$

$$\Delta v_m, \Delta v_n = \frac{1,5 \cdot 10^8 \cdot (1/2)}{8 \cdot 25} = \frac{0,75 \cdot 10^8}{25} = 0,03 \cdot 10^8 = 3 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Кожній поперечній моді відповідає нескінченна кількість подовжніх, таких, що відрізняються індексом  $g$ .

Моди, що характеризуються одними і тими ж індексами  $m$  і  $n$ , але різними  $g$ , об'єднуються під загальною назвою **поперечні моди**. Коливання, відповідне певному  $g$ , називають **подовжньою модою**, що відноситься до даної поперечної моди.

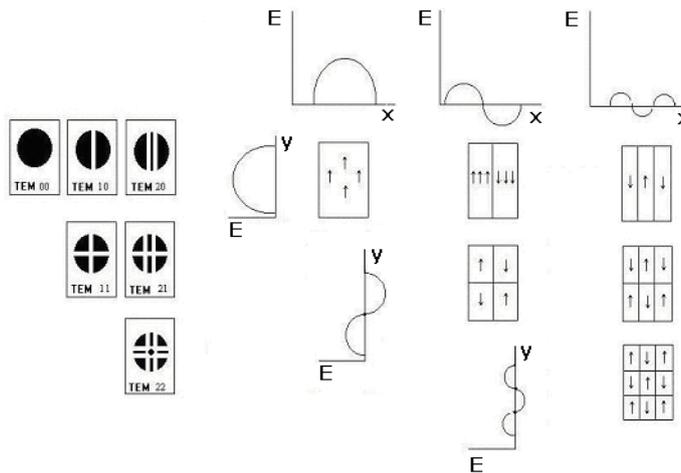


Рисунок 2.10 - Трансверсальні електромагнітні коливання

У теорії відкритих резонаторів [1-3] прийнято позначати окремі моди як  $TEM_{mnp}$ , де  $m$ ,  $n$  – поперечні індекси моди,  $g$ - подовжній індекс. Позначенню TEM відповідає англійське словосполучення Transvers Electromagnetic (Поперечні електромагнітні коливання, які мають знехтувані малі проекції векторів  $E$  і  $H$  на вісь  $Z$ ). Оскільки число  $g$  дуже велике, часто індекс  $g$  опускають і моди резонатора позначають  $TEM_{mnp}$ . Кожен тип поперечної моди  $TEM_{mnp}$  володіє певною структурою поля в поперечному перетині резонатора і утворює певну структуру світлової плями на дзеркалах резонатора (рис.2.10). На відміну від об'ємного резонатора моди відкритого можна візуально спостерігати.

**Індекси  $m$  і  $n$  характеризують число змін напрямку поля на поверхні дзеркал відповідно уздовж осей  $X$  і  $Y$  (рис 2.10).**

*Поперечна мода  $TEM_{00}$ , звана основною, характеризується найбільш простою структурою світлової плями (рис.2.10). Для неї амплітуда поля на краях дзеркал мінімальна, тобто поле найбільшою мірою сконцентроване у осі резонатора, і, отже, дифракційні втрати в цьому випадку мінімальні.*

Із збільшенням  $m$  і  $n$  дифракційні втрати збільшуватимуться, а добротність падає.

Індекси  $m$  і  $n$  характеризують напрям поля на поверхні дзеркал відповідно уздовж осей  $x$  і  $y$  (рис.2.10).

Окрім необхідних втрат на випромінювання в реальних резонаторах існують додаткові втрати:

- дифракційні втрати, пов'язані з дифракцією електромагнітної хвилі на дзеркалах резонатора, що мають кінцеві розміри
- втрати на недосконалоості дзеркал (поглинання в дзеркалах, розсіяння на шорсткостях, відхилення геометрії дзеркала від заданої)
- втрати на роз'юстировку резонатора (непаралельність дзеркал)
- втрати в активній речовині, обумовлені поглинанням і розсіянням енергії на різних дефектах в активному середовищі, що заповнює резонатор.

### 2.3.1 Конфокальні резонатори

У квантовій електроніці окрім закритого (об'ємного) резонатора і відкритого (сферичного) резонатора з плоскими дзеркалами ( $R_{1,2} = \infty$ ) дуже часто використовують **конфокальні** резонатори (різновид сферичних резонаторів).

**Конфокальним** називається відкритий резонатор, утворений однаковими сферичними дзеркалами, радіуси кривизни яких рівні довжині резонатора(рис. 1.9).

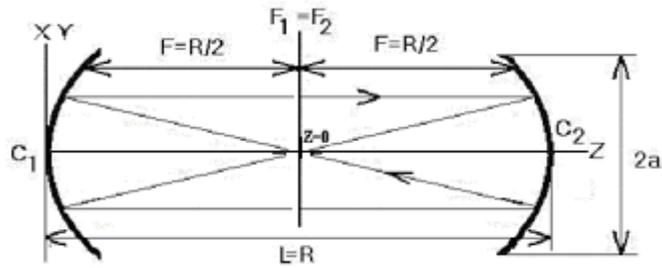


Рисунок 2.11 Схема конфокального резонатора.

Центр кривизни  $C$  одного дзеркала лежить на поверхні другого. Фокусна відстань сферичного дзеркала рівна  $\frac{1}{2}$  його радіусу кривизни. Тому фокуси відбивачів співпадають, унаслідок чого резонатор називається **конфокальним**. Цікавість до такого резонатора обумовлена зручністю його юстирування (на відміну від плоскопаралельного резонатора Фабрі – Перо), що не вимагає строгої паралельності відбивачів один одному. Необхідно лише, щоб вісь конфокального резонатора перетинала кожен відбивач достатньо далеко від його краю, щоб уникнути великих дифракційних втрат.

### Особливості конфокального резонатора:

1. Дифракційні втрати в конфокальному резонаторі значно менші, ніж в плоскому, тому поле щільніше сконцентроване у осі.
2. Розподіл фази на поверхні дзеркал однорідно.
3. Спектр власних частот резонатора визначується виразом [2]:

$$\nu_{mng} = \frac{c(2q + 1 + m + n)}{4L} \text{ у разі квадратних дзеркал}$$

і

$$\nu_{mnq} = \frac{c(2q + 1 + 2m + n)}{4L} \text{ у разі круглих дзеркал}$$

сильно вироджений, оскільки будь-який набір індексів  $q, m, n$ , що задовольняють з відношенням  $2q + m + n = \text{const}$ , дає одну і ту ж резонансну частоту.

4. Розподіл поля усередині резонатора для основної моди  $TEM_{00}$  в поперечному перетині описується функцією Гауса [1]:

$$E(x, y) = \frac{\exp(-\pi(x^2 + y^2))}{\lambda L}.$$

Радіус такого «гауссова» пучка змінюється уздовж осі  $Z$ , на поверхні дзеркал розмір плями визначається по формулі [1]:

$$r = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi(1 + 2Z/L)^2}},$$

в центрі резонатора в перетяжці, тобто при  $Z=0$  він в  $\sqrt{2}$  раз менше, ніж на поверхні

дзеркал: 
$$r_0 = \left(\frac{L\lambda}{2\pi}\right)^{1/2}.$$

Ці особливості конфокальних резонаторів мають як переваги, так і недоліки.

Завдяки «фокусуєчій» дії дзеркал поле концентрується поблизу осі резонатора, що, з **одного боку**, різко зменшує дифракційні втрати, особливо для мод нижчих порядків, а з **іншої** – не дозволяє повністю використовувати весь об'єм активного середовища для генерації лазерного випромінювання.

### 2.3.2 Стійкість резонатора

Всі резонатори, вживані в квантовій електроніці, є окремими випадками сферичного резонатора з радіусами кривизни дзеркал  $R_1$ ,  $R_2$ . Резонатори ділять на **стійких і нестійкі**.

До стійких резонаторів відносяться такі, в яких промінь після віддзеркалення від дзеркал залишається в обмеженому об'ємі поблизу осі резонатора (наприклад, (рис.2.11)). Інакше резонатори нестійкі.

**Стійкість резонатора можна охарактеризувати двома безрозмірними параметрами**, що враховують його геометрію і званими **g – параметрами** резонатора [1-3] :

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1},$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}.$$

Резонатор стійкий, якщо [2]:  $0 \leq g_1 g_2 < 1$ .

негативний  
радіус кривизни

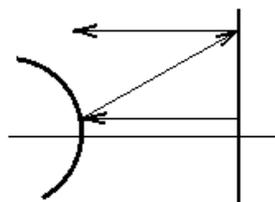


Рисунок 2.12 – Приклад нестійкого резонатора

Умову стійкості часто зображають графічно[1-3], будуючи діаграму стійкості, використовуючи координатну площину з осями, на яких відкладаються значення  $g_1$  і  $g_2$

### 2.3.3 Властивості лазерних пучків

Лазерне випромінювання характеризується надзвичайно високим ступенем монохроматичності, когерентності, спрямованості і яскравості.

**Спрямованість** визначає розходимість світлового пучка в просторі і характеризується плоским або тілесним кутом, в межах якого розповсюджується велика частина випромінювання.

Розходимість лазерного випромінювання пов'язана з дифракцією плоских хвиль на вихідній апертурі лазера  $\varphi_{\text{дифр}}$  і геометричною розходимістю, що характеризується кутом  $\varphi_{\text{геом}}$ . Повний кут розходимості для моди  $\text{TEM}_{mn}$  ( $m, n < 5$ ) рівний [2]:

$$\varphi = \varphi_{\text{дифр}} + \varphi_{\text{геом}} = 2,44 \frac{\lambda}{d} + 0,939 \sqrt{\lambda R_{\text{экв}}} \sqrt{m(m+1) + n(n+1)},$$

де :  $d$  – діаметр діафрагми

$$R_{\text{экв}} = 2L \frac{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2},$$

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1},$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}.$$

При  $Z < Z_0$  формується ближня зона лазерного променя (область Френеля), при  $Z > Z_0$  – дальня зона (зона Фраунгофера). Геометрична розходимість лазерного випромінювання невелика.

Моди з вищими поперечними індексами  $m$  і  $n$  характеризуються низькою просторовою когерентністю, вищою розходимістю випромінювання. Для основної поперечної моди  $TEM_{00}$  кут дифракційної розходимості визначається по формулі [3]:

$$\varphi_{\text{дифр}} \cong 1,27 \frac{\lambda}{d_0},$$

де  $d_0 = \sqrt{\frac{2\lambda L}{\pi}}$  – діаметр гауссова пучка в перетязці (найбільш вузькій його частині)

**Яскравість** джерела характеризується потужністю випромінювання, що випускається з одиниці поверхні в області одиничного тілесного кута в напрямі, перпендикулярному до випромінювальної поверхні. Для опису лазерного випромінювання, із-за наявності мод говорять лише про розподіл енергії в перетині цього пучка. До того ж в лазері немає реальної випромінюючої поверхні, оскільки випромінювання формується в деякому об'ємі активного середовища і потім перетвориться у вузьконаправлений пучок за допомогою резонатора.

Висока **монохроматичність** випромінювання обумовлена тим, що індукованим випромінюванням є резонансний процес.

Під **когерентністю** розуміють узгоджене протікання в часі і в просторі декількох хвильових процесів, що виявляється при їх підсумовуванні.

Для когерентних світлових хвиль з постійною або такою, що закономірно змінюється різницею фаз виникає характерна інтерференційна картина.

Розрізняють часову і просторову когерентність.

**Часова когерентність** коливань поля в крапці характеризується **функцією кореляції** [5]  $R(\tau) = \overline{E(r,t)E(r,t+\tau)}$ , що є усередненим за часом скалярним добутком двох значень поля в одній і тій же точці простору, розділених інтервалом часу  $\tau$ . Вважається, що хвилі володіють часовою когерентністю, якщо існує статистичний зв'язок (кореляція) між амплітудами хвиль в даній крапці в один момент часу і будь-який пізніший момент.

Хвилі вважаються **просторово когерентними**, якщо існують поверхні, на яких амплітуди хвиль як функції часу знаходяться в цілком певному співвідношенні. Просторова когерентність характеризується функцією кореляції [6]

$R(\Delta r) = \overline{E(r,t)E(r+\Delta r,t)}$ , що є усередненим в часі добутком двох компонент поля, узятих в один і той же момент часу, але в різних точках простору.

Просторову когерентність можна розглядати як **поперечну когерентність**, тобто когерентність в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження хвиль, а тимчасова когерентність виявляється пропорційній подовжній просторовій когерентності. Ступінь когерентності визначається інтервалом кореляції ( $\tau$  или  $\Delta r$ ), при якому огинаюча амплітуда функції кореляції  $R$  зменшується на певну величину (наприклад, в  $e$  разів або в 2 рази).

**Часова когерентність** тісно пов'язана з шириною спектру випромінювання. Якщо інтервал кореляції визначати інтервалом часу  $\tau_k$ , протягом якого кореляційній функції, що огинає, зменшується в 2 рази, то час когерентності

$$\tau_k \approx \frac{1}{\pi \Delta \nu},$$

де  $\Delta \nu$  – ширина спектру по рівню половинної потужності для імпульсу з тією, що експоненціальною огинає.

Подовжню когерентність коливань характеризує величина  $l$  - **довжина когерентності**.

$$l = c \tau_k,$$

де  $c$  – швидкість світла.

## 2.4 Режими роботи лазерів

Лазери можуть працювати в різних режимах: безперервному, імпульсному, імпульсно- періодичному, одно- і багатомодовому і одночастотному.

**Одночастотним** називають випромінювання, що має тільки одну спектральну лінію, відповідну подовжній моді резонатора (найчастіше випромінювання відбувається на поперечній моді TEM<sub>00</sub>, розходимості, що характеризується мінімумом).

**Одномодове** випромінювання має однорідний поперечний розподіл поля.

**Багатомодове випромінювання** – суперпозиція декількох поперечних мод, що генеруються одночасно (складний спектральний склад і поперечний розподіл поля), найбільша потужність випромінювання.

У **безперервному режимі** оптична енергія випромінюється безперервно протягом деякого проміжку часу (важко протягом тривалого часу підтримувати інверсну населеність в активному середовищі). Для підтримки стаціонарної інверсії, необхідної для підтримки безперервної генерації, велику роль грають механізми очищення рівнів. До недоліків відносять необхідність введення атомів або молекул для релаксації, а також труднощі при вирішенні проблеми відведення тепла, що виділяється в активному середовищі.

У **імпульсному режимі** генеруються одиночні або такі, що регулярно повторюються імпульси лазерного випромінювання.

Розрізняють:

- 1) **лазер періодичної дії** – це лазери імпульсного режиму, що працюють з частотою повторення, що задається схемою управління.
- 2) **лазери неперіодичної дії** – лазери імпульсного режиму, випромінюючі у момент часу, що задається оператором.

Як правило, імпульсна генерація може бути реалізована як при **імпульсному**, так і при **безперервному** накачуванні.

## 2.5 Основні параметри лазерів

- 1) Енергетичні параметри:
  - потужність випромінювання для безперервних лазерів
  - енергія випромінювання для імпульсних лазерів
  - середня потужність для імпульсно-періодичних лазерів
  - довготривала і короткочасна нестабільність потужності лазерного випромінювання.
- 2) Просторово – енергетичні параметри:
  - діаметр і розходимість лазерного випромінювання
  - діаграма спрямованості
  - розподіл інтенсивності в поперечному перетині.
- 3) Тимчасові:
  - тривалість імпульсу
  - частота повторення імпульсів  $f$ .

- 4) Спектральні:
  - довжина хвилі  $\lambda$  (частота  $f$ ) випромінювання
  - напівширина спектральної лінії випромінювання  $\Delta\nu$
  - модовий склад випромінювання
  - нестабільність частоти в часі.
- 5) Експлуатаційні:
  - ККД лазера
  - споживана потужність  $P_{потр}$
  - потужність системи накачування  $P_H$
  - час готовності лазера до роботи  $t_{гот}$
  - маса
  - габаритні розміри
  - термін служби
  - вартість
  - витрата газів, води.

## 2.6 Класифікація лазерів

Прийнято класифікувати лазери по наступних ознаках:

- 1) по агрегатному стану лазерної речовини:
  - газові
  - рідинні
  - твердотільні
  - напівпровідникові.
- 2) по методу накачування:
  - хімічні
  - газодинамічні
  - газорозрядні
  - інжекційні.
- 3) по часовому режиму генерації:
  - безперервні
  - імпульсні
  - імпульсно-періодичні.
- 4) по частотному режиму генерації:
  - одномодовий
  - багатомодовий
  - одночастотний.
- 5) по рівню потужності, що генерується.
- 6) по експлуатаційним параметрах.

### 2.6.1 Газові лазери

У більшості газорозрядних лазерів накачування активного середовища здійснюється за рахунок різних процесів в плазмі газового розряду, при цьому використовується імпульсний і стаціонарний (тліючий і дуговий) розряди. У плазмі існують нейтральні атоми і молекули у збудженому стані, іони (позитивні і негативні в збудженому і незбудженому стані) і електрони. Концентрації позитивних і негативних частинок однакові, і плазма в цілому електронейтральна.

Найбільш протяжна і однорідна область розряду називається **позитивним стовпом**.

Розрізняють пружні зіткнення частинок в плазмі (сумарна кінетична енергія частинок, що стикаються, не міняється) і непружні (загальна кінетична енергія міняється за рахунок їх внутрішньої енергії).

Створення збуджених станів (інверсії населеності робочих рівнів частинок) відбувається тільки в результаті непружних зіткнень. Пружні зіткнення не міняють число збуджених станів, але визначають встановлення рівноваги в плазмі, розподіл електронів і важких частинок за швидкостями.

### 2.6.1.1. Процес інвертування населеності в газових середовищах.

Важливу роль створення лазерної активності середовища грають непружні зіткнення I і II роду.

При непружних зіткненнях I роду енергія частинок, що стикаються, зменшується. Відомі три таких процесу: пряме електронне збудження, ступінчасте електронне збудження, іонізація.

**Пряме електронне збудження.** Швидкий електрон  $\bar{e}$  стикається з атомом (іоном) в основному стані А, передає йому частину кінетичної енергії і переводить його в збуджений стан. Тільки електрон з кінетичною енергією, яка більше енергії збудження атома (іона), може збудити атом. Т.ч. даний процес пороговий.  $\bar{e} + A^* \rightarrow A^{**} + e$

**Ступінчасте електронне збудження.** Електрон може зіткнутися з атомом, що знаходиться у збудженому стані, і перевести його на вищий енергетичний рівень.  $\bar{e} + A^* \rightarrow A^{**} + e$

**Іонізація.** При достатній кінетичній енергії електрона можливий відрив «атомного» електрона з утворенням позитивного іона.  $\bar{e} + A \rightarrow A^+ + 2e$

Вірогідність цього процесу відмінна від нуля, якщо енергія електрона перевищує енергію іонізації частинки А.

При **непружних зіткненнях II роду** сумарна кінетична енергія частинок, що стикаються, не зменшується або зростає. Відомі два процесу такого роду:

- резонансна передача збудження
- ударне девозбудження (релаксація).

Аналіз даної схеми (рис.2.12) і процесів збудження в двокомпонентній газовій суміші дозволяє сформулювати вимоги до основного і домішкового газів:

1) рівні  $E_3^B$  і  $E_3^A$  повинні задовольняти умові  $E_B - E_A < kT_e$

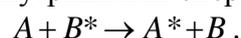
2) концентрація атомів допоміжного газу повинна значно перевищувати концентрацію атомів основного. В цьому випадку енергія збудження передаватиметься переважно від допоміжного газу до основного, а не навпаки.

Співвідношення домішкового газу (гелію) і робочого газу (неону) вибирають від 5:1 до 10:1.

Всі перераховані елементарні процеси забезпечують за заданих умов (робочій напрузі  $U_p$ , щільності струму  $J_p$ , тиском  $P$ ) підтримкою на певному рівні концентрації заряджених частинок (перш за все концентрації електронів  $n_e$ ) і їх енергій, що характеризуються температурами  $T_e$   $T_j$ . У відсутність процесів об'ємної іонізації величина електронної температури  $T_e$  визначається добутком тиску газу  $P$  на внутрішній об'єм газорозрядної трубки  $d$ . Значення  $T_e$  високе при малих значеннях твору  $p \cdot d$  і мало при великих значеннях цього добутку. Концентрація електронів  $n_e$  прямо пропорційна щільності розрядного струму  $J_p$ , тобто  $n_e = f(J_p)$ .

Таким чином, умови розряду в газі будуть незмінними, якщо підтримувати постійними значення  $p \cdot d$  і  $J_p$ .

**Резонансна передача збудження.** При зіткненні збудженої частинки  $A^*$  з незбудженою  $B$  відбувається обмін їх внутрішніми енергіями



На відміну від процесів збудження і іонізації електронним ударом даний процес носить резонансний характер і найбільш вірогідний при збігу енергій збуджених частинок.

**Ударне дезбудження (релаксація)** служить не для збудження верхніх лазерних рівнів, а для спустошення нижніх.

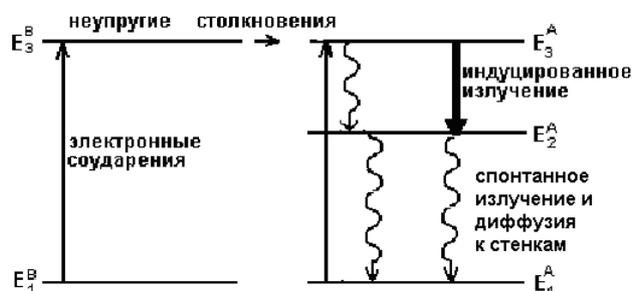
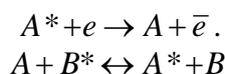


Рисунок 2.12 - Структура рівнів, що ідеалізується, і можливі переходи

При розряді в газовій суміші відбуваються всі процеси відмічені на схемі (рис. 2.12).

Коефіцієнт корисної дії газорозрядного лазера  $\eta$  можна представити у вигляді:

$$\eta = \eta_H \frac{h\nu}{E_i},$$

де  $\eta_H$  - ефективність дії накачування, тобто та частка енергії накачування, яке витрачається на збудження верхнього рівня  $E_i$  -

$\frac{h\nu}{E_i}$  - квантовий коефіцієнт корисної дії, величина якої визначається структурою

енергетичних рівнів активної речовини і характеризує максимально можливий для даного лазера к.п.д. при  $\eta_H \rightarrow 1$ .

### 2.6.1.2 Газовий лазер на суміші He-Ne (група атомних лазерів)

Перший газовий лазер був створений в кінці 1960г [1-3] на суміші гелію і неону. У He-Ne ОКГ використовують принцип резонансної передачі енергії збудження від домішкового газу (He) до основного (Ne). У цьому лазері активними частинками є атоми неону, між рівнями якого здійснюється інверсія, а атоми гелію служать для створення ефективного накачування верхнього лазерного рівня атомів неону. На рис.2.13 приведена діаграма нижніх енергетичних рівнів атомів гелію і неону.[1-3]

Рівні  $2^3S_1$  і  $2^1S_0$  гелія-метастабильны, прямий радіаційний перехід в основний стан  $1^1S_0$  заборонений. Основний стан атома Ne відповідає електронній конфігурації  $1S^22S^22p^6$  і має терм<sup>\*1</sup>  $1S_0$ . Вище (приблизно на 16, 7 эВ) за основний стан розташовано чотири підрівні, відповідні електронній конфігурації  $2S^22p^53S^1$ .

<sup>1</sup> частоти, що поглинаються або випромінюються квантовими генераторами, можуть бути представлені у вигляді різниці двох частот, які звать спектральними термами:

$$\omega_{nm} = \omega_m - \omega_n; \omega_m = \frac{E_m}{\hbar}; \omega_n = \frac{E_n}{\hbar}$$

Далі розташована група з 10 підрівнів, відповідна електронній конфігурації  $2S^2 2p^5 4S^1$  і так далі

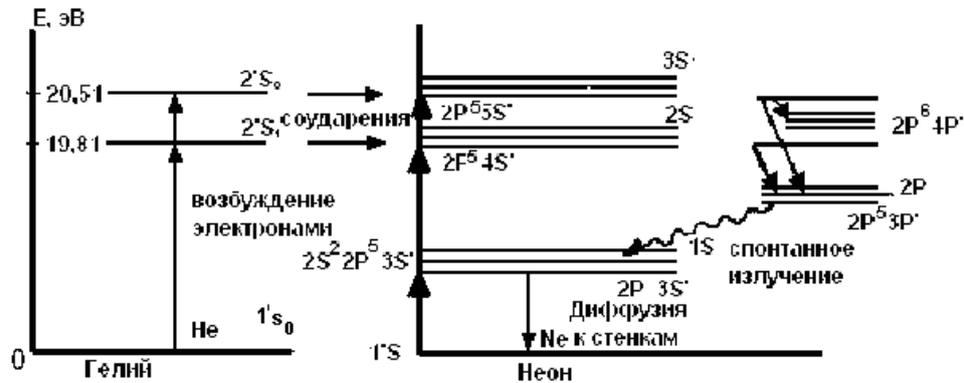


Рисунок 2.13 - Схема нижніх енергетичних рівнів He і Ne.

При зіткненні атомів гелію, що знаходяться в метастабільних станах  $2^3S_1$  і  $2^1S_0$  з атомами неону, що знаходяться в основному стані, можлива передача енергії збудження неону. При цьому, оскільки вірогідність обміну енергій збудження між атомами тим більше, чим ближче один до одного розташовані їх рівні, атом неону перейде на один з підрівнів  $2p^5 4s^1$  або  $2p^5 5s^1$ , а атом гелію повернеться в основний стан. Т.ч., процес передачі енергії збудженого стану атома гелію незбудженому атому неону протікатиме по схемі (см.рис.2.13). Отже рівні  $2p^5 4s^1$  і  $2p^5 5s^1$  неону населятимуться не тільки за рахунок електронних ударів, але, головним чином, за рахунок зіткнення атомів неону із збудженими атомами гелію.

Число зіткнень, при яких відбувається процес резонансної передачі енергії, пропорційно концентрації частинок, що стикаються, в початкових станах, тобто швидкість заселення верхніх лазерних рівнів неону пропорційно концентрації незбуджених атомів неону і заселеності метастабільних станів  $2^1S_0$  і  $2^3S_1$  атом гелію. Великий час життя атомів гелію в цих станах обумовлює високу заселеність цих станів, і зрештою, достатньо високу швидкість заселення верхніх лазерних рівнів неону  $2s^2 2p^5 5s^1$  і  $2s^2 2p^5 4s^1$ . Система верхніх лазерних рівнів неону має загальні нижні рівні  $2s^2 2p^5 3p^1$ , що мають достатньо велику можливість переходу на нижчі  $2s^2 2p^5 3s^1$  рівень і, отже, малий час життя. Все це забезпечує виконання умови інверсної населеності.

Описаний механізм заселення рівнів неону забезпечує отримання інверсної населеності між парами підрівнів  $2p^5 5s^1 \rightarrow 2p^5 3p^1$  (що дають випромінювання з довжиною хвилі 6328 А),  $2p^5 4s^1 \rightarrow 2p^5 3p^1$  (довжина хвилі 11523А) і  $2p^5 5s^1 \rightarrow 2p^5 4p^1$  (довжина хвилі 33900 А), допускаючи можливість генерації на трьох переходах. Оскільки збуджені рівні 3s, 2s, 3p, 2p неону є складними мультиплетами\*\*, то між компонентами багато з них можливі переходи, тобто генерація.

Т.ч. ОКГ на суміші гелію і неону працює за чотирьохрівневою енергетичною схемою, що дає можливість здійснення стаціонарної генерації випромінювання.

**Основні чинники, що визначають вихідну потужність випромінювання гелій-неонового лазера:**

**1. Струм розряду.** Збільшення струму розряду приводить до підвищення концентрації електронів в плазмі розряду, отже, до інтенсифікації заселення рівнів, у тому числі і робочих, тобто до збільшення потужності генерації. При подальшому збільшенні

струму розряду починає позначатися ступінчасте збудження рівня  $2p\ 3s'$ , що приводить до зменшення вихідної потужності аж до зриву генерації.

**2. Загальний тиск суміші в газорозрядній трубці.** При малому тиску (1-2мм рт.ст.) збільшення тиску приводить до зростання потужності генерації в наслідок збільшення концентрації атомів гелію і неону. Надалі істотним виявляється зниження електронної температури, що приводить до падіння вихідної потужності аж до зриву.

**3. Співвідношення компонентів суміші.** Оскільки процес передачі збудження при зіткненні атомів йде не тільки від гелію до неону, але і навпаки, для створення інверсії необхідно, щоб збуджених атомів гелію було більше, ніж атомів неону. Надмірне перевищення змісту гелію приводить до підвищення загального тиску, отже, до зменшення потужності (см.п.2). Оптимальні співвідношення тиску неону і гелію знаходяться в діапазоні від 5:1 до 15:1.

**4. Діаметр розрядної трубки.** Збільшення діаметру веде до збільшення об'єму активного середовища, отже, зростанню потужності. Проте у міру збільшення діаметру падає вірогідність дезактивації нижнього лазерного рівня неону при зіткненнях його із стінками, що приводить до зменшення інверсії. Оптимальний діаметр залежить від довжини трубки: для трубки завдовжки 1м оптимальний діаметр 7-9мм.

### 2.6.1.3 CO<sub>2</sub> – лазери (група молекулярних лазерів)

У приладах, що випускаються, як активне середовище в основному використовується CO<sub>2</sub> з різними добавками (N<sub>2</sub>, He), що забезпечують підвищення потужності випромінювання і ККД цих приладів.

Енергетичний спектр молекули CO<sub>2</sub> визначається:

- Енергією руху електронів щодо ядер
- Енергією коливань атомних ядер
- Енергією обертання молекули

Повна енергія молекули визначається сумою електронної, коливальної і обертальної енергій.

Зміна енергії між електронними рівнями при випромінювальному квантовому переході збудженої частинки, складає 1.2 еВ, між тими, що коливають 0,1,0,01 еВ і між обертальними 0,001,0,0001 еВ. Це, у свою чергу, визначає  $\lambda_{\text{излуч}}$ . Використання коливальних рівнів в молекулах лазерного генератора, лежачих порівняно невисоко над основним, дозволяє істотно збільшити ефективність накачування, тобто підвищити ККД в порівнянні з атомними і іонними. Збудження газової суміші в молекулярному лазері проводиться в основному постійним струмом (рис.2.6).

Молекула CO<sub>2</sub> є трьохатомною. Тут існує три невироджені моди, що коливають (рис. 2.15):

Відповідний рівень позначається цими трьома квантовими числами, записуваними в послідовності  $n_1, n_2, n_3$ . Наприклад, рівень  $01^10$  відповідає коливанню, деформаційна мода (мода 2) якого має один коливальний квант.

Деформаційне коливання є певною комбінацією двох коливань, що відбуваються у взаємноперпендикулярних площинах, що і описує верхній індекс, що стоїть при квантовому числі який є кутовим моментом  $\ell\hbar$  цих коливань щодо осі молекули CO<sub>2</sub>. Наприклад, в стані  $02^00$  ( $\ell = 0$ ) два вироджені коливання комбінуються таким чином, що кутовий момент  $\ell\hbar = 0$  [1].

Як верхній лазерний рівень зручно використовувати метастабільний рівень  $00^01$  з енергією 0,29 еВ, легко збуджуваний низькоенергетичними електронами плазми (для прикладу в He-Ne лазері для накачування необхідно використовувати електрони з енергією 20 еВ).

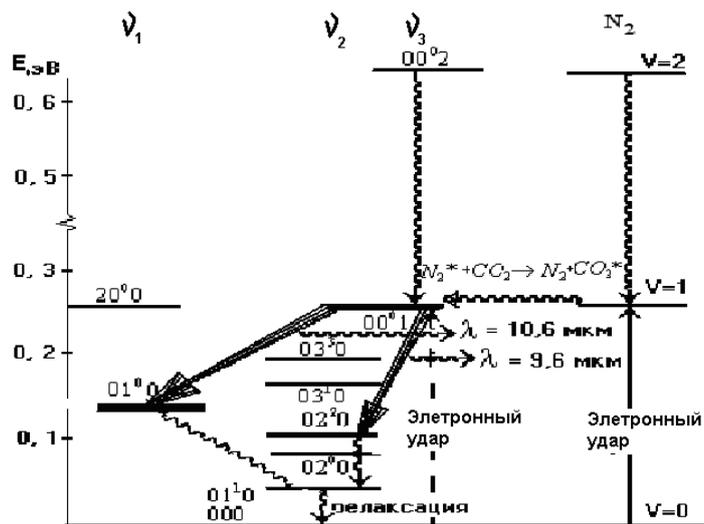
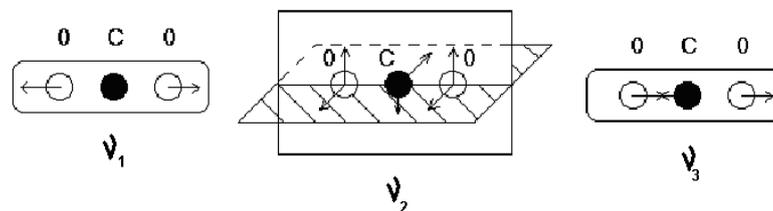


Рисунок 2.14 – Енергетичний спектр молекул CO<sub>2</sub>

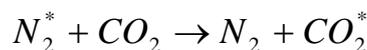


- $\nu_1$  – симетрична валентна мода
- $\nu_2$  – деформаційна мода
- $\nu_3$  - асиметрична валентна мода

Рисунок 2.15– Три фундаментальні моди коливань CO<sub>2</sub>

Як нижні енергетичні рівні можна застосовувати короткоживучі рівні 100 і 020 з енергією -0,16 eВ.

Ефективність роботи CO<sub>2</sub> лазера підвищується при додаванні молекул азоту N<sub>2</sub>, у яких енергія одного з коливальних рівнів практично співпадає з енергією 00<sup>0</sup>1 молекула CO<sub>2</sub>. Тому процес резонансної передачі збудження по схемі

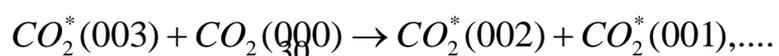
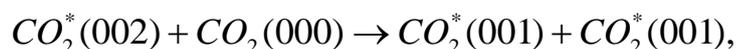


протікає вельми ефективно.

Структура коливальних рівнів симетричних двох атомних молекул N<sub>2</sub> має простий вигляд і характеризується тільки одним квантовим числом V. Рівні з V<sub>1</sub>=1 - метастабильні, випромінювальний перехід заборонений правилом відбору. Час життя частинок  $\tau_{жизни}$  складає декілька секунд. Тому до 30% всіх молекул N<sub>2</sub> знаходяться на цьому рівні.

Накачування верхнього лазерного рівня 00<sup>0</sup> 1 відбувається як за рахунок прямого електронного удару, так і процесу резонансної передачі збудження.

Крім рівня 00<sup>0</sup>1, електрони можуть порушувати і вищерозміщені стани 00<sup>0</sup>2, 00<sup>0</sup>3 і так далі В результаті непружних зіткнень збуджених молекул, що знаходяться в цих станах з молекулами, що знаходяться в основному стані (000), енергія збуджених молекул зменшується рівно па одну сходинку з відповідним збудженням молекул (000) на верхній лазерний рівень. Схематично це виглядає так:



Таким чином, більшість збуджених молекул  $\text{CO}_2$  виявляється на рівні 001, бере участь в процесі створення інверсії і лазерної генерації.

**He** - третя компоненту, присутня в суміші. Гелій має високий потенціал іонізації, тобто підвищує  $T_i$  до оптимальної величини (1,5-2 эВ) і сприяє розпаду нижніх рівнів 100 і 010 в результаті непружних зіткнень

Із-за високої теплопровідності He знижує температуру газової суміші. Це дуже важливо, оскільки відстань між основним (000) і нижніми лазерними рівнями 100 і 020 невелико (~ 0,16 eВ). Із зростанням температури газової суміші відповідно до розподілу Стефана-Больцмана населеність нижніх рівнів збільшується швидше, ніж верхніх, час життя верхнього лазерного рівня із-за зіткнення збуджених молекул зменшується, і інверсія падає. Нагрів більше 200°C небажаний.

Конструкції  $\text{CO}_2$ -лазерів можна розділити на шість типів:

1. Лазери з подовжнім прокачуванням газу.
2. Відпаяні лазери.
3. Хвилеводні лазери.
4. Лазери з поперечним прокачуванням газу (ТЕ-лазери).
5. Лазери атмосферного тиску з поперечним збудженням (ТЕА-лазери)
6. Газодинамічні лазери.

### 2.6.2 Твердотільні ОКГ з активними речовинами на основі рідкоземельних елементів

Перевагою подібних ОКГ є те, що майже всі вони працюють за чотирьохрівневою схемою і тому вимагають меншої потужності накачування. У 4-х рівневих системах легко здійснити генерацію при кімнатній температурі в безперервному режимі. Найбільш широке розповсюдження у якості активної речовини отримало скло, активоване іонами неодима.[1-3]

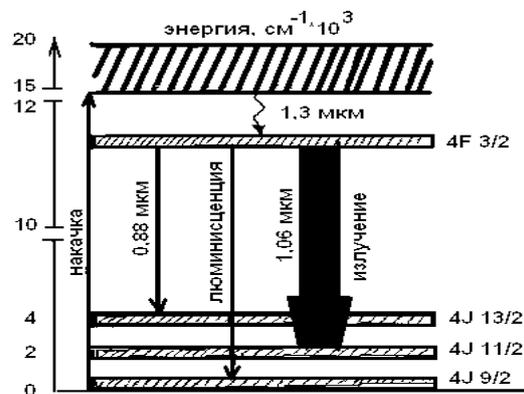


Рисунок 2.16. Діаграма енергетичних рівнів неодима [6]

Рівень  $4F^{3/2}$  є метастабільним (рис 2.16). Нижній робочий рівень  $4J^{11/2}$  розташований значно вище за основний стан і тому майже не населений. Цю обставину полегшує створення інверсії населеності для переходу  $4F^{3/2} \rightarrow 4J^{11/2}$  при кімнатній температурі.

### 2.6.3 Ексимерний лазер

Ексимерний лазер є газовим лазером випромінюючим в УФ області спектру в діапазоні довжин хвиль 157-351 нм. Як активне середовище використовується інертний газ (аргон, криптон, або ксенон), галоген (хлор або фтор) і буферний газ (гелій або неон)

На рис.2.17а зображена схема ексимерного лазера з накачуванням поперечним розрядом з УФ передіонізацією паралельно лазерному променю.

На рис. 2.17б зображена схема типової потенційної кривої молекули галогеніду інертного газу в збудженому і основному стані. Верхній лазерний рівень з часом життя декілька наносекунд належить збудженому електронами галогеніду інертного газу. Емісія лазерного випромінювання відбувається при переході з верхнього лазерного рівня, який відповідає збудженому галогеніду інертного газу.

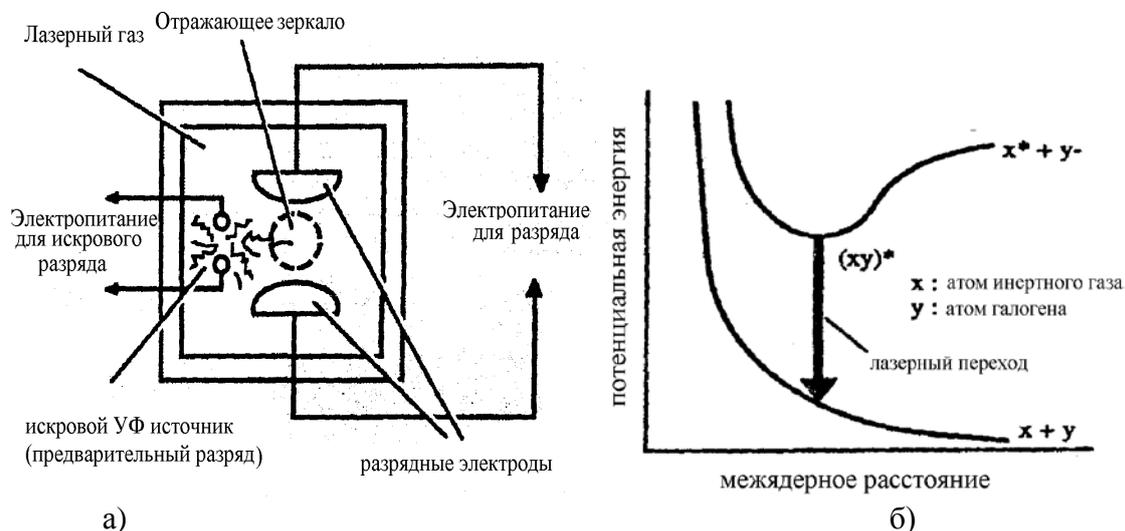


Рисунок 2.17 - Поперечний перетин ексимерного лазера (а) і типова потенційна крива галогеніду інертного газу

На нижньому лазерному рівні галогенід інертного газу більш не є стабільним і має час життя в декілька пікосекунд, тобто розпадається дуже швидко після лазерної генерації на окремі атоми (інертний газ і галоген)  
У збудженому стані час життя ексимерної молекули в 1000 разів більший, ніж в незбудженому стані.

### 3 ПРИЛАДИ УПРАВЛІННЯ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ (ПУЇ)

**Під управлінням** розуміють процес, в результаті якого відбувається зміна одного або декількох параметрів, що характеризують випромінювання.

ПУЇ по функціональному призначенню ділять на **модулятори** і **дефлектори**.

**Модулятори** дозволяють змінювати амплітуду, фазу, частоту, поляризацію або параметри імпульсів випромінювання ОКГ.

**Дефлектори** змінюють напрям розповсюдження випромінювання відповідно до вибраного закону. **Дефлектори** підрозділяються на **безперервних (сканери – з довільним положенням відхилюваного променя в просторі)** і **дискретних, таких, що здійснюють перехід випромінювання в одне з N можливих положень.** У дефлекторах використовуються різні електрооптичні і акустооптичні ефекти.

ПУЇ можуть бути сконструйовані у вигляді **зовнішніх** і **внутрішніх** пристроїв ОКГ.

**Зовнішні** пристрої здійснюють зміну параметрів випромінювання після виходу випромінювання з ОКГ.

**Внутрішні** забезпечують перетворення параметрів випромінювання в процесі його формування безпосередньо в генераторі ( тобто шляхом зміни накачування лазера, зміни параметрів резонатора ОКГ (оптичної довжини, добротності, введенням в резонатор додаткових елементів).

При використанні зовнішніх пристроїв зміна параметрів відбувається за рахунок проходження випромінювання ОКГ через спеціальне середовище (тверде, рідке, газоподібне), параметри якого змінюються під дією модулюючого сигналу. Модуляція здійснюється шляхом зміни якого-небудь параметра середовища, наприклад, довжини шляху випромінювання  $L$ , коефіцієнта поглинання  $\chi$  або коефіцієнта заломлення  $n$ .

Існує ряд фізичних явищ, які використовують для управління коефіцієнтом заломлення середовища. Найбільше значення мають такі ефекти:

### **1. Електрооптичні ефекти.**

*Лінійний електрооптичний ефект (ефект Погкельса):* коефіцієнт заломлення лінійно залежить від електричного поля. Спостерігається для кристалів, що не мають центру симетрії.

*Квадратичний ефект (ефект Керра):* виникнення подвійного променезаломлення в оптично ізотропних речовинах( центросиметричних кристалах, рідинах або газах), поміщених в електричне поле. Газ або рідина в електричному полі набуває властивостей одноосного кристала з оптичною віссю уздовж поля.

### **2. Магнітооптичний ефект.**

*Магнітооптичний ефект (ефект Фарадея)* полягає в залежності коефіцієнта заломлення  $n$  від напруженості магнітного поля  $H$ .

**3.Акустооптичний ефект** для модуляції випромінювання використовують штучно викликане ультразвукове акустичне поле, що створює пружну напругу в акустооптичних матеріалах.

Розрізняють модуляцію:

- амплітудну
- фазову
- частотну
- поляризаційну.

Реєстрація випромінювання, що модулюється по частоті, фазі або поляризації зв'язана з певними технічними труднощами, тому на практиці всі види модуляції перетворюють в амплітудну або безпосередньо в модуляторі, або за допомогою спеціальних пристроїв.

Можливі **два режими модуляції:**

- 1) без піднесущої (модулюються безпосередньо параметри світлової хвилі);
- 2) з піднесущою (спочатку модулюють проміжне коливання СВЧ, потім використовують для модуляції світлової хвилі).

Простий амплітудний модулятор представляє пристрій, що забезпечує періодичне переривання світлового потоку за допомогою заслінок, що коливаються або обертаються, дзеркал, призм, дисків з отворами і так далі Застосування обмежене із-за значної інерційності і недостатньої надійності.

### **Основні параметри, що характеризують модулятори світла**

- 1. Півхвильова напруга  $M_C$**  – мінімальна напруга, необхідна для зміни коефіцієнта пропускання модулятора від мінімального до максимального значення, тобто напруга, що забезпечує фазове зрушення випромінювання, що виходить, на  $180$ .
- 2. Коефіцієнт пропускання-** визначається відношенням інтенсивності світлового потоку на виході  $M_C$  до світлового потоку на його вході, в %.
- 3. Смуга пропускання,** не вище  $100$  МГц(смуга модульованих частот) – це різниця верхньою і нижньої граничних частот.(нижня може бути  $= 0$ , а верхня частота визначається умовою, що фаза хвилі при проходженні через кристал змінюється не більше, ніж на  $\pi$ .
- 4. Смуга прозорості** – діапазон довжин хвиль лазерного випромінювання, що проходить через прилад без помітного ослаблення ( до  $3дб$  )

5. **Коефіцієнт контрастності** – відношення коефіцієнта пропускання приладу при повному проясненні ( $I/I_{0max}$ ) до коефіцієнта пропускання при повному затемненні ( $I/I_{0min}$ ), зазвичай від 30:1 до 200:1. Тут  $I$ -інтенсивність світлового потоку на виході,  $I_0$ - інтенсивність світлового потоку на вході.
6. **Питома потужність(q), що управляє**, – визначає витрати потужності сигналу при 100% глибині модуляції в одиничній смузі частот і вимірюється у Вт/мгц. –(для оцінки ефективності МС)

#### Найбільш важливі параметри дефлектора:

- 1) **роздільна здатність (N)** – кількість вирішуваних елементів в межах кута сканування, дорівнює відношенню повного кута сканування  $\theta$  до кутової расходимости пучка  $\Delta\varphi$  [4]:

$$N = \theta / \Delta\varphi,$$

$N = \max$ , коли розходимість є дифракційною і відсутні аберації оптичної системи (тобто спотворення, викликані неідеальністю оптичної системи);

- 2) **швидкість сканування** визначається часом, необхідним для відхилення випромінювання з одного крайнього кутового положення в інше
- 3) **ефективність відхилення**  $\eta_{откл}$  – параметр характеризує якість дефлектора.  $\eta_{откл}$  пов'язана з втратами світла в дефлекторі і визначається відношенням інтенсивності  $I_{ввых}$  відхиленого променя до інтенсивності світла  $I_{вх}$ , що поступило на вхід дефлектора.

$$\eta_{откл} = I_{ввых} / I_{вх}.$$

Найбільш простий метод відхилення лазерного променя – механічний, заснований на використанні поворотних або таких, що обертаються, дзеркал(дзеркальних барабанів). Проте наявність елементів, що переміщуються, накладає обмеження на швидкодію і надійність пристроїв.

В даний час розробляються методи управління лазерним променем в просторі на основі електрооптичного і акустичного ефектів.

## 4 ПРИЙМАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Фотоприймач** – приймач оптичного випромінювання – прилад, в якому під дією оптичного випромінювання відбуваються зміни, що дозволяють виявити і зміряти характеристики випромінювання. В основному в основі роботи напівпровідникових фотоприймачів лежить використання **внутрішнього фотоефекту**, але можуть бути використані і інші ефекти.

При проходженні світла через речовину його інтенсивність знижується. Взаємодія світла з речовиною може відбуватися без зміни енергії фотонів і із зміною. Процеси взаємодії без зміни енергії фотонів включають віддзеркалення, заломлення, розсіяння, пропускання світла, обертання площини поляризації і ін. Процеси взаємодії із зміною енергії фотонів включають різні види поглинання. Частина енергії випромінювання поглинається в речовині, отже, збільшується енергія електронів в ній.

У загальному випадку необхідно враховувати **7 механізмів поглинання оптичного випромінювання** [11-15]

- 1 – фотогенерація електронно-діркових пар (власне поглинання)
- 2,3 – домішкове поглинання
- 4 – внутрішньоцентрове поглинання
- 5 – поглинання екситона
- 6 - електронне поглинання, що викликає збільшення енергії електронів без збільшення їх концентрації

7 – фононне поглинання, тобто поглинання кристалічною решіткою.

Чутливість фотоприймача визначається тим, на скільки сильно змінюються його електричні характеристики при опромінюванні світлом, тобто залежить від квантового виходу і коефіцієнта посилення.

### **.Болометри**

Прилади для вимірювання енергії випромінювання, засновані на зміні опору термочутливого елемента при нагріванні унаслідок поглинання вимірюваного потоку випромінювання. Використовується для вимірювання потужності інтегрального (сумарного) випромінювання. Даний вид приймачів оптичного випромінювання є одним з перших, «дооптоелектронних», але що використовуються до цих пір.

Термочутливий елемент в болометрах є тонким шаром (0,1-1 мкм) металу (Ni, Au, Ві і ін.), поверхня якого покрита шаром черні, що має великий коефіцієнт поглинання в широкій області спектру, або напівпровідник з великим температурним коефіцієнтом опору  $\sim 0,04-0,06 \text{ K}^{-1}$ . Розмір і форма термочутливого елемента визначається природою джерела. Зазвичай він є двома однаковою смужкою, друга використовується для компенсації в основному температурних перешкод. Різниця температур  $\Delta T_{12}$  перетвориться в різницю опорів  $\Delta R$ , що проявляються в різниці струмів  $\Delta J$  і різниці напруги  $\Delta V$  на опорі навантаження.

### **Піроелектричні приймачі**

У цьому виді приймачів оптичного випромінювання використовується **піроелектричний ефект**, що використовує температурну залежність спонтанної поляризації сегнетоелектричних матеріалів, тобто вони є також тепловими приймачами. Теплові приймачі випромінювання на основі піроелектриків можна розглядати як генератори напруги, внутрішній опір якої носить ємкісний характер, тому вони придатні для реєстрації потоків випромінювання змінної інтенсивності. Чутливий елемент в піроелектричних приймачах є тонкою пластиною піроелектрика

Піроелектричні приймачі застосовуються для реєстрації випромінювання від інфрачервоного до  $\gamma$ -випромінювання, діапазон реєстрованої потужності  $10^{-9}-10^9 \text{ Вт}$ . Вони можуть використовуватися при вимірюванні швидко змінних теплових процесів: у теплобаченні, лазерній техніці, в медичних і космічних приладах, перетворювачах енергії, зокрема, в піроконах, що перетворюють розподіл температури нерівномірно нагрітих поверхонь в світлові образи.

### **Сканістори**

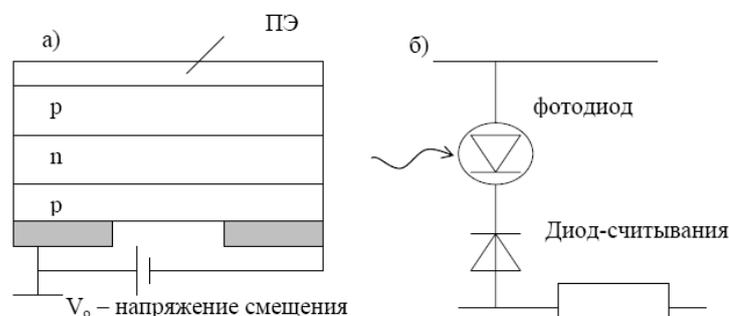


Рисунок 4.1 - Структура (а) і еквівалентна схема (б) сканістора[15].

Сканістори є лінійним фотоприймачем на основі кремнієвої підкладки з двома p-n переходами. На верхній електрод подається негативна напруга, щоб перший перехід

знаходився при зворотному, а нижній при прямому зсуві. Цей електрод повинен бути прозорим. Верхній р-n перехід є дрібним, тобто товщина низькоомного р-слоя мала, так що випромінювання поглинається в ній і в області просторового заряду.

### Кремнікони

Кремнікони є приймачами світлових образів на основі напівпровідникових пристроїв, в яких при прочитуванні інформації використовується електронний промінь, що швидко оббігає мініатюрні фотодетектори. Фотоприймальним пристроєм є кремнієва фотодіодна матриця з нанесеними на неї резистивною плівкою, що має зменшену товщину поблизу р+-областей, і суцільним металевим електродом. На р+-області подається позитивна напруга  $V = 5-10$  В, так що фотодіоди є назад-зміщеними, відбувається зарядка їх ємкостей. При дії освітлення відбувається їх розрядка. Сканування електронним променем приводить до дозарядки ємкостей р-n переходів, при цьому струм через послідовно включений резистор  $R_H$  формує відеосигнал.

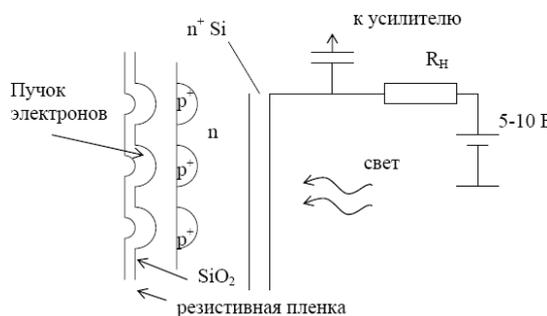


Рисунок 4.2 - Схема пристрою кремнікона[15]

### Сонячні батареї

Сонячні перетворювачі (сонячні елементи) - фотодіоди, оптимізовані для прямого перетворення випромінювання сонця в електричну енергію, – працюють тільки у фотовентильному режимі.

Найбільш поширені сонячні елементи на основі монокристалічного кремнію є p+-n (р+-n) фотодіодами з максимальною площею фоточутливого вікна і з оптимальними значеннями товщини і опору базовій області, що забезпечують поглинання фотонів і збирання фотоносіїв. ККД сонячних елементів залежить від величини ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу  $E_g$ . Якщо  $E_g$  велика – частина спектру не поглинається, якщо  $E_g$  мала – мале значення ФОТОЕДС ( $V_{XX} \leq E_g$ ). Максимальне значення ККД спостерігається для напівпровідників з шириною забороненої зони  $\sim 1.4$  eV (GaAs). Максимальне значення ККД досягає 22-24% для Si, InP, GaAs, і ін.

## 5 ОПТРОНИ

Оптроном є прилад, що містить джерело і приймач випромінювання, які оптично і конструктивно зв'язані.

Джерелами випромінювання можуть бути лампи розжарювання, неонові лампи, електролюмінесцентні випромінювачі, але найчастіше використовуються світлодіоди.

Приймачі – фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри.

Середовище оптичного каналу – повітря, скло, пластмаса або інша прозора речовина.

Елементарний оптрон містить 1 джерело і 1 приймач, тому носить назву оптопара, складніші оптрони, об'єднані в ІМС з одним або декількома пристроями, що погоджують або підсилюють, називають оптоелектронними ІМС.

Особливість оптронів полягає в подвійному перетворенні енергії, зазвичай електричної в оптичну і назад з електричним входом і виходом.

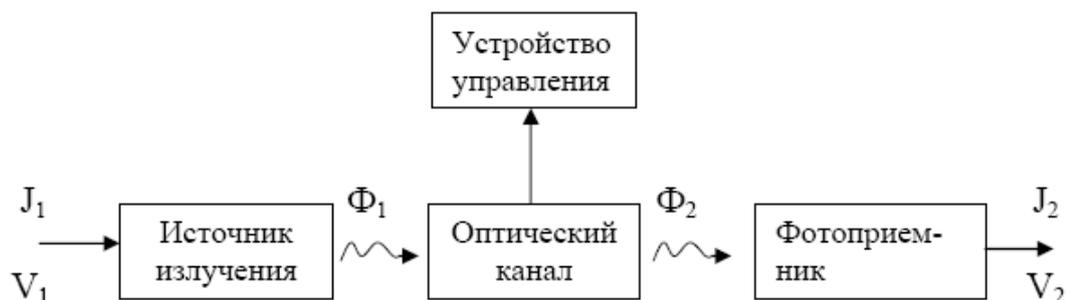


Рисунок 5.1 - . Схема оптрона з електричним входом і виходом[2,15]

Для узгодження параметрів оптронів з іншими елементами електронних схем використовуються додаткові вхідні і вихідні пристрої.

Якщо джерело і приймач електрично не сполучені, то реалізується гальванічна розв'язка входу і виходу. Введення електричного і (або) оптичного зворотного зв'язку істотно розширює можливості генерування, посилення оптичних і електричних сигналів, ЗУ і ін.

Достоїнствами оптронів є: висока перешкодозахисна і однонаправленість передачі сигналів; широка частотна смуга пропускання (можливість передачі як імпульсних, так і постійних сигналів); сумісність з іншими виробами мікроелектроніки.

До недоліків приладів відносяться: низький ККД, пов'язаний з подвійним перетворенням енергії; чутливість параметрів до зміни температури; високий рівень власних шумів; гібридна технологія.

Основними елементами оптопар є джерела і приймачі оптичного випромінювання, а також середовища оптичних каналів. Елементи оптопар повинні бути узгоджені по спектральних характеристиках, швидкодії, температурних властивостях, габаритах.

Джерелами зазвичай є інжекційні діоди, випромінюючі в інфрачервоному діапазоні. Вимоги до них включають: високий ККД, необхідна швидкодія, вузька спрямованість випромінювання для зниження втрат енергії, малі вхідні струми для узгодження з мікроелектронними схемами управління, постійність квантового виходу в широкому діапазоні вхідних струмів. Для деяких пристроїв як джерела можна використовувати лазери, які можуть мати великі струми управління і вищу вартість.

Використовується 3 варіанти оптичних середовищ: 1 - полімерні оптичні клеї, лаки, в'язкі речовини (незасихаючі силіконові склади), деякі марки скла (наприклад, халькогенідні).

Як елемент електричної схеми *оптрон характеризується не випромінювачем, а типом використовуваного фотоприймача*, відповідно, розрізняють оптопари резисторного, діодного, транзисторного і тиристорного типів. Швидкодія оптопари обмежується параметрами фотоприймача.

*Елементарним оптроном є чотирьохполюсний прилад, тому має 3 основних характеристики – вхідну, передавальну і вихідну.*

Вхідна характеристика є ВАХ випромінювача.

Вихідна – соответствующая характеристика фотоприймача (при заданому струмі на вході оптрона).

Передавальна характеристика – залежність струму на виході  $J_2$  від струму на вході  $J_1$  (у загальному випадку нелінійна).

На рис. 5.2 показані найбільш типові конструкції оптопар.

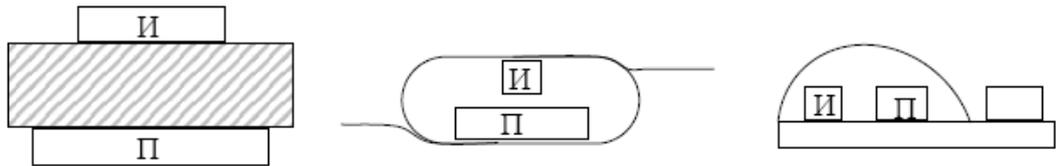


Рисунок 5.2- Прикладів типових конструкцій оптопар[12]

Для збільшення ефективності передачі світлового потоку від джерела до приймача використовують складніші конструкції оптронів.



Рисунок 5.3 -. Конструкции оптопар с более эффективной передачи излучения[13]

Оптоелектронні мікросхеми можуть включати безкорпусні випромінюючі діоди, безкорпусні оптрони і ІМС.

Вживані в даний час оптрони є гібридними пристроями, що відноситься до конструктивних недоліків. Розробляються також монолітні оптопари, які є інтегрованими твердотільними випромінюючими і приймальними структурами, що виготовляються в одному технологічному процесі. На рис. 5.4 показані варіанти монолітних пристроїв.

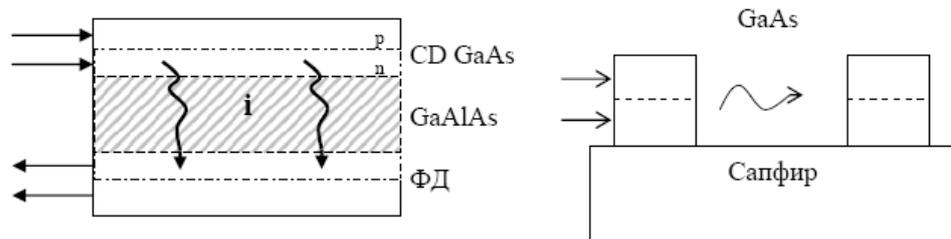


Рисунок 5.4 - Приклади конструкцій оптронів на основі монолітних пристроїв[15]

Позначення оптронів: 1-а буква або цифра - матеріал випромінювача (А або 3 – GaAs або GaAlAs); 2-я буква - О – оптрони; 3-я буква - тип фотоприймача: Д - фотодіод, Т – фототранзистор, У – фототиристор; Цифри – місце у відповідній групі (по параметрах).

Відносно обмеженого поширення набули прилади, що використовують перетворення по схемі: випромінювання – електричний сигнал – випромінювання, тобто оптрони з оптичним входом і виходом. Приклад такого перетворювача представлений на рис. 5.5.

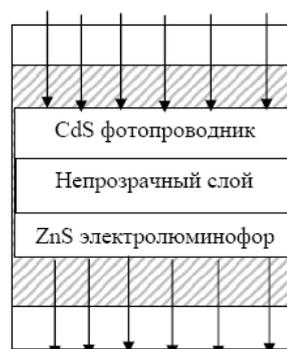


Рисунок 5.5 - Пристрій оптрона з оптичним входом і виходом[15]

Шари фотопровідника, непрозорого діелектрика або провідника і електролюмінофора тут розміщуються між двома прозорими електродами, на які подається висока напруга. Фотопровідник має високий темновий опір, тому у відсутність падаючого випромінювання на нього доводиться велика частина падіння напруги. При освітленні опір фотопровідника значно зменшується і відбувається перерозподіл напруги, поле в електролюмінофорі зростає, що приводить до генерації випромінювання.

Оптрони з оптичним входом і виходом доцільно використовувати для створення підсилювачів і перетворювачів зображення (наприклад, ІЧ у видиме, когерентне в некогерентне).

## 6 ІНДИКАТОРИ

Індикатори є складовими частинами **засобів відображення інформації** (ЗВІ). Відповідно до ГОСТу засіб відображення інформації – пристрій, що забезпечує відображення інформації у вигляді, придатному для зорового сприйняття.

*До складу засобів відображення інформації входять дві функціонально різні частини.*

1. Світлоконтрастний растр, який безпосередньо впливає на спостерігача.
2. Схема управління - комплекс засобів електронного обрамлення, що здійснюють необхідну обробку інформації, що поступає в електричній формі, і ефективно управління світлоконтрастним растром.

Світлоконтрастний растр входить до складу індикатора, який є приладом, що відображає хід процесу або стан об'єкту спостереження у формі, зручній для зорового сприйняття людиною.

Відповідно до ГОСТу **індикатор** – *крайовий пристрій засобу відображення інформації, що здійснює перетворення електричних сигналів у видиме зображення.*

*По роду інформації, що відображається, всі індикатори діляться на дві групи.*

1. Знакосинтезуючі індикатори (ЗСІ) для відтворення одиничних крапок, цифр, букв, шкал вимірювальних приладів, графіків, мнемосхем.
2. Екрани для відтворення як перерахованої вище інформації, так і рухомих картин телевізійного типу.

Простий елемент знаковосинтезуючого індикатора або екрану називають **знакомісцем**. Екрани містять істотно більше число знакомісць, чим знаковосинтезуючі індикатори.

Для отримання зображення в знаковосинтезуючих індикаторах використовують декілька способів:

- безпосереднє створення на поверхні растру необхідного символу;
- набір цифр або букв з окремих елементів;
- набір необхідної інформації з окремих крапок, розміщених на поверхні растру у вигляді прямокутної матриці;
- у індикаторі без фіксованих знакомісць (наприклад, в електроннопроменевих трубках) символи «малюються» при скануванні растру збудливою дією (електронним променем).

Кольори починають розрізнятися з освітленості  $E \approx 1$ лк. Крайні значення яскравості -  $10-30$  кд/м<sup>2</sup> в напівтемряві кімнати і  $(2-5) \cdot 10^5$  кд/м<sup>2</sup> при прямому сонячному засвіченні індикатора. Динамічний діапазон сприйняття оком яскравостей дуже широкий  $10^{-7}-10^5$  кд/м<sup>2</sup> (до  $1$  кд/м<sup>2</sup> працює смерковий механізм зору без колірної сприйняття). Практично чоловік розрізняє не більше 8-10 градацій яскравості (півтонів), надійно  $< 4-5$ , мінімально 2 (чорне - біле).

Просторові характеристики джерела визначає роздільна здатність ока (кутова)  $> 1'$ , що відповідає можливості розрізнення на відстані 10м двох штрихів, розділених проміжком в 3 мм. Повна точка зору близька до  $120^\circ$  по горизонталі,  $90^\circ$  по вертикалі.

Огляд для зони максимального дозволу, відповідно, 20° і 15°, тому стандартний формат екрану 4:3.

Відповідно до закону Тальбота фізіологічно сприймання (що здається) яскравість відчувається оком як усереднена яскравість за період зміни: Вказані закономірності інерційності зору повинні враховуватися при побудові схем управління індикаторами, зокрема, при виборі режимів мультиплексного управління.

Опис сприйняття кольору є складнішим.

### **Оптоелектронні індикатори**

Оптоелектронними індикаторами є прилади, відповідні функціональному призначенню індикатора і що задовольняють концепціям оптоелектроніки в частині інтегрованості, технологічності, сумісності з мікроелектронікою

*За фізичним принципом відображення інформації виділяють індикатори з активним і пасивним растром.*

**Індикатори з активним растром** використовують светогенерационный ефект - перетворення електричної енергії в світлове випромінювання (різні види люмінесценції і теплове випромінювання).

**У індикаторах з пасивним растром** електричні сигнали, що управляють, модулюють зовнішній світловий потік (електрооптичні ефекти – зміна коефіцієнта поглинання або віддзеркалення ділянок растру, обертання площини поляризації світла, що проходить, зміна кольору поверхні і ін.).

*Індикатори з активним растром включають* вакуумні накальні, газорозрядні, вакуумні люмінесцентні, напівпровідникові і електролюмінесцентні.

*До індикаторів з пасивним растром відносяться* рідкокристалічні, електрохромні, електрофоретичні, електролітичні, магнітомеханічні, дипольні і ін.

Яскравість лицьової поверхні світлодіода набагато менше яскравості кристала. Але при щодо малих розмірах елементів індикатора, що світяться, для зорового сприйняття важлива не яскравість, а сила світла - основний фотометричний параметр світлодіодів (0,02-100 кд). Ці способи дозволяють забезпечити збільшення розмірів знаку до 10 мм і зниження втрат на повне внутрішнє віддзеркалення. Великоформатні напівпровідникові індикатори групового використання (розміри знаків до 100 мм) набирають з дискретних світлодіодів із збільшеною площею свічення кожного.

Світлодіоди іноді використовуються для створення великоформатних багатоелементних екранів. У цих індикаторах необхідно вирішувати проблеми забезпечення ідентичності параметрів всіх елементів екрану, пов'язані з високою крутизною ВАХ діодів і сильною залежністю яскравості від температури. Особливе місце в розробках займають багатоколірні світлодіоди з електричним управлінням кольором свічення.

### **Рідкокристалічні індикатори**

Рідкокристалічні індикатори відносяться до оптоелектронних індикаторів з пасивним растром, в яких використовуються електрооптичні і термооптичні ефекти. Використовуваними в індикаторах рідкими кристалами є суміші складних органічних сполук з дуже високим питомим опором (до  $10^{16}$  Ом·см).

Конструкції і технологія виготовлення рідкокристалічних індикаторів досить прості і відпрацьовані. *Випускаються два різновиди конструкцій індикаторів, що працюють на віддзеркалення і на провіт.* Вони відрізняються розташуванням джерела світла щодо користувача.

### **Екрани**

Екранами є багатоелементні індикатори, що відображають світлові образи - кольорове, рухоме зображення. **Екрани і схеми електронного обрамлення об'єднують поняттям дисплеї.** Фізичні принципи роботи екранів аналогічні відповідним знаковисинтезуючим індикаторам.

Як екрани в даний час використовуються електронно-променеві трубки, газорозрядні, рідкокристалічні і електролюмінесцентні панелі.

Найважливішою особливістю різних видів екранів є спосіб формування зображення.

У електронно-променевих трубках застосовуються два основні способи формування зображення: функціональний (векторний) і растровий (ТБ).

Векторний спосіб використовувався для створення зображення в графічних дисплеях. Основний недолік - неможливість створення суцільних областей, перевага - менший необхідний об'єм пам'яті.

Телевізійний (рядково-кадровий) спосіб є основним вживаним в кінескопах і дисплеях.

Плоскі екрани мають свої особливості управління. Комутація елементів екрану здійснюється шляхом зміни потенціалів на окремих смужках електродів, що управляють, об'єднаних в матричну систему з рядків і стовпців, що дозволяє створювати плоскі екрани великої площі. Дискретна матрична адресація на вибрані електроди екрану забезпечує отримання зображення. *Адресація може проводитися в статичному і мультиплексному режимі.*

У *статичному режимі* на вибрані рядки і стовпці одночасно подається постійна напруга, перемикає при зміні зображення. Статичний режим не дозволяє забезпечити відображення замкнених фігур ("О").

В *мультиплексному режимі* імпульси напруги  $V$  необхідної тривалості подаються по черзі на всі рядки екрану. Протягом кожного імпульсу по черзі на всі вибрані стовпці подаються імпульси напруги  $V$  меншої тривалості, на перетині рядків і стовпців напруга підсумовується  $2V$  і відбувається висвічення вибраного осередку. Оскільки напруга  $V$  подається на всі осередки уздовж електроду, вони також висвічуються, але не так яскраво, що призводить до зниження контрасту. Отримане розмиття зображення носить назву - *ефект «хреста»*. Уникнути його можна, використовуючи як світловипромінюючі або світлооконтрастні осередки елементів з різко нелінійною залежністю яскравості свічення або контрасту від прикладеної напруги.

#### ***Рідкокристалічні екрани***

Рідкокристалічні екрани є одними з перших, які склали реальну конкуренцію електронно-променевим трубкам в системах відображення інформації.

Пристрій найбільш *поширеного матричного рідкокристалічного екрану на основі твіст-ефекта* виглядає таким чином: шар рідкого кристала, ув'язнений між двома скляними пластинами з взаємно перпендикулярними смужками електродів, підсвічується розташованими ззаду (у деяких моделях – збоку, з торця екрану) люмінесцентними джерелами білого світла. Скляні пластини одночасно є поляризаторами; міняючи напругу на окремому елементі, можна регулювати яскравість світла, що пройшло крізь нього. На лицьовій скляній пластині розташовують тріади кольорових світлофільтрів, розміри яких близькі до розмірів люмінофорних тріад на екрані кінескопа. Ширина смужок електродів подібного екрану може бути зменшена до 5 мкм, число осередків може досягати декількох мільйонів.

#### ***Проекційні системи***

Основний прийом, використовуваний при створенні проекційних систем відображення інформації, - пряма проекція зображення на звичайний екран. У якості джерел випромінювання можуть використовуватися лазери трьох основних кольорів свічення (зазвичай газові – аргонові і криптонові) або могутні дугові лампи зі світлофільтрами. Модуляція інтенсивності і відхилення променів на задані кути здійснюється модуляторами і дефлекторами, що використовують акусто- і електрооптичні ефекти. Для модуляції і розгортки некогерентного випромінювання застосовують рідкокристалічні світлоклапанні пристрої і достатньо складні механічні системи.

Перевагами сучасних лазерних проекційних систем є відтворення зображень на екрані великої (декілька квадратних метрів) площі при значній ( $100 \text{ кд/м}^2$ ) яскравості, добрий контраст (до 1:100) і висока роздільна здатність.

До недоліків систем цього типу слід віднести в першу чергу низький ККД газових лазерів, що не перевищує десятих долей відсотка, що приводить до значного споживання енергії (декілька кіловат для висвічення  $1 \text{ м}^2$  зображення). В сукупності з пристроями модуляції і відхилення вартість лазерних проекційних систем виявляється поки досить високою.

## 7 ОСНОВИ ВОЛОКОННОЇ ОПТИКИ

У волоконно-оптичних лініях (ВОЛЗ) передача інформації здійснюється за допомогою оптичних сигналів по волоконних оптичних хвилеводах з малими втратами.

До складу ліній входять також джерело випромінювання, що перетворює електричні сигнали в оптичні, і фотоприймач, що здійснює зворотне перетворення. Вони (ВОЛЗ) знаходять широке застосування в системах зв'язку і передачі інформації, а також у волоконно-оптичних датчиках.

### 7.1 Світлопроводи

Основним елементом волоконно-оптичної системи є *світлопровід* (волоконний оптичний хвилевід) – тонка гнучка нитка, виготовлена з прозорого матеріалу таким чином, що її центральна частина оптично щільніша, ніж периферійні області. Тому світловий промінь, що вводиться з торця волокна, може розповсюджуватися уздовж його осі і пройти з малим загасанням значну відстань. У простому випадку оптичне волокно є тонкою ниткою круглого перетину з прозорого в заданій спектральній області матеріалу (скло, кварц, різні полімери). Каналування оптичного випромінювання в нім ґрунтується на явищі повного внутрішнього віддзеркалення

#### *Розповсюдження світла в світлопроводі*

Класичним вважається двошаровий ступінчастий світлопровід – циліндрове волокно, що складається з серцевини з показником заломлення  $n_c$  і оболонки з декілька меншим показником заломлення  $n_o$ . Оптичне випромінювання вводиться в світлопровід через торцеву поверхню із зовнішнього середовища з показником заломлення  $n$  (для повітря  $n = 1$ ).

Розглянемо розповсюдження світлових променів, падаючих на торець світлопровода під різними кутами до нормалі  $\varphi$

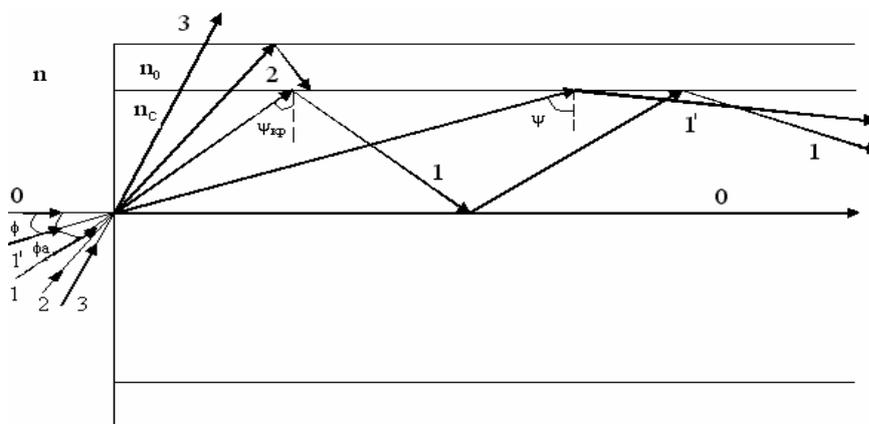


Рисунок 7.1 - Розповсюдження світлових променів в світлопроводі[15]

Частина світлової енергії відбивається від торцевої поверхні, заломлені промені розповсюджуються в сердцевині. Промені, падаючі на торець під малими кутами  $\varphi \geq \varphi_a$  приходять на межу розділу сердцевина-оболонка під великими кутами до нормалі  $\psi < \psi_{кр}$  і випробовують повне внутрішнє віддзеркалення.

Вони багато разів відбиваються від межі розділу, каналируються в сердцевині і утворюють хвильоводні (каналіруємі, направлені) моди – 0,1,1'..

Промені, що входять в світлопровід під великими кутами  $\varphi > \varphi_a$ , заломлюються на межі сердцевина-оболонка, виходять в оболонку і утворюють витікаючі або оболонкові моди, достатньо швидко затухаючі.

Промені, що входять в торець під ще більшими кутами виходять і з оболонки, – випромінювані (радіаційні) моди.

Критичний кут падіння променя на межу розділу сердцевини і оболонки  $\psi_{кр}$ , більше якого відбувається повне внутрішнє віддзеркалення, залежить від співвідношення показників заломлення матеріалів  $n_c$  і  $n_o$ :  $\psi_{кр} = \arcsin(n_o/n_c)$ .

Відмінність між значеннями показників заломлення сердцевини і оболонки зазвичай дуже мало –  $n_c - n_o = \Delta n = 10^{-2} - 10^{-4}$ . Таким чином, утримання випромінювання усередині оптично щільнішої центральній частині світлопровода, забезпечується лише для тієї частини променів, які падають на торець під кутом, меншим деякого критичного значення  $\varphi_a$ , пов'язаного із значенням кута  $\psi_{кр}$ . По волокну розповсюджується випромінювання, поміщене усередині конуса з кутом при вершині  $\varphi_a$ . Величина  $N_A = \sin \varphi_a$  називається **числовою апертурою** і є важливою характеристикою світлопровода, саме цей параметр входить в багато розрахункових формул. Величина числової апертури залежить від показників заломлення середовищ таким чином:  $N_A = \sin \varphi_a = [(n_{c2})^2 - (n_{o2})^2]^{1/2}/n_c$ . Якщо випромінювання потрапляє в світлопровід з повітря ( $n = 1$ ), тоді  $N_A = (2n_c \Delta n)^{1/2} = \Delta n/n_c$

**Вигин світлопровода** приводить до того, що кут між променем і межею розділу сердцевина-оболонка зростає і кутова апертура зменшується. Використовуючи закони заломлення і віддзеркалення і враховуючи, що радіус вигину  $r_{изг\ min}$  багато більше діаметру сердцевини  $d_c$ , отримуємо, що зниження числової апертури до 90% від свого первинного значення відбудеться при  $r_{изг\ min} = 2,5d_c n_c / \Delta n = 5d_c (n_c)^2 / (N_A)^2$ .

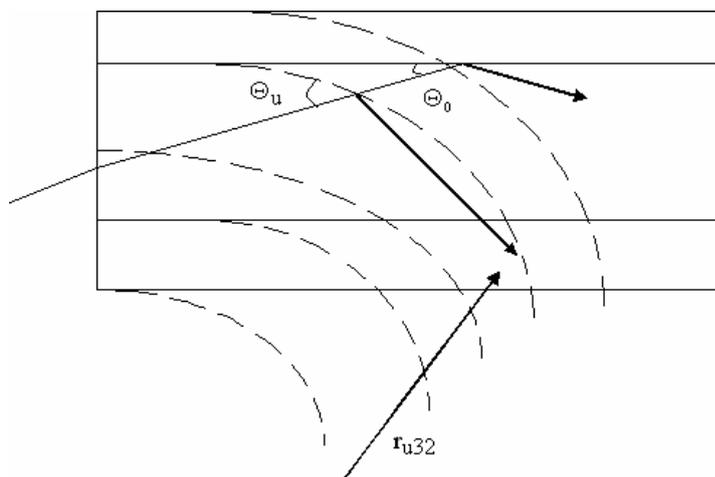


Рисунок 7.2 - Хід світлових променів в зігнутому світлопроводі[14,15]

Аналіз рішень хвильового рівняння для різних хвильоводних мод показує, що вони описуються функціями, що монотонно спадають (зазвичай експоненціально) до периферії сердечника, але що в той же час не обриваються на межі сердцевина-оболонка. Моди, що направляються, частково просочуються в оболонку, тобто віддзеркалення відбувається не на геометричній поверхні розділу, а в деякій приповерхневій області оболонки. **Це явище**

називається порушенням повним внутрішнім віддзеркаленням. Таким чином відбувається збільшення ефективної товщини хвилеводного шару (*ефект Гуса-Хенхена*). Поле деяких мод може проникати в оболонку на глибину порядку  $dC$ . Звідси слідує важливість частоти не тільки сердечника, але і оболонки  $\Gamma_{\text{изг}} \Psi_{\text{изг}} \Psi_0$ .

#### **Дисперсія світлопроводів**

Дисперсія передачі світлового сигналу в світлопроводах визначається відмінністю швидкостей складових оптичного випромінювання, обумовленого механізмом розповсюдження світла.

Цей *ефект викликається двома причинами*; по-перше, промені з різними кутами падіння проходять в світлопроводі різні відстані і, по-друге, властивості матеріалу залежать від довжини хвилі випромінювання, а будь-яке реальне джерело не строго монохроматично. Дисперсія волокна залежить не тільки від ступеня когерентності випромінювання, але і від геометричних характеристик волокна.

#### **Виділяють три дисперсії, що становлять:**

-межмодову (або хвилеводну), обумовлену відмінністю групових швидкостей різних мод;

-внутрішньомодову, обумовлену нелінійною залежністю постійною розповсюдження даної моди від довжини хвилі;

-матеріальну (дисперсію матеріалу), таку, що виражається в залежності показника заломлення середовища від довжини хвилі.

#### **Загасання випромінювання в світлопроводі**

Причинами втрат оптичної потужності, при розповсюдженні сигналу по волокну, є різні види поглинання, а також обумовлена розсіянням деформація кутового розподілу променевого потоку і витікання виникаючих внеапертурних променів з сердцевини.

Розглянемо найбільш істотні з цих механізмів.

#### **1. Фундаментальні втрати, властиві матеріалу і принципово неусунні.**

Виділяють два види фундаментальних втрат.

– власне поглинання в матеріалі світлопровода

– релеевское розсіяння на різного роду нерегулярностях

2. **Домішкове поглинання**, обумовлене наявністю домішок. Проте при сучасних методах очищення роль домішок в кварці опиняється неістотною.

3. **Технологічні розкиди** визначальних параметрів світлопровода :

еліпсна сердцевини, статистичні флуктуації її діаметру, порушення вибраного закону розподілу показника заломлення по перетину сердцевини . Все це приводить до і перекачуванню частини енергії випромінювання, що розповсюджується, у витікаючі моди.

4. **Явища, пов'язані з дефектами експлуатації**, що виявляються вже після виготовлення волокна. Це втрати, обумовлені мікрОВИГИНАМИ, що виникають в місцях контакту волокна із захисними оболонками і зміцнюючими елементами кабелю. Практично після укладання волокна в кабель його загасання може на 20-50% перевищити початкове значення. Додаткова механічна напруга і мікрОВИГИНИ виникають також при зміні температури навколишнього середовища, причому вони тим значніше, чим ширше діапазон робочих температур

#### **5. Втрати, обумовлені дією проникаючої радіації і принципово не усунені.**

Встановлено, що при малих дозах, що не перевищують 107 радий, різні види радіації (електрони, протони, нейтрони, альфа-, гамма- і рентгенівське випромінювання) надають на світлопроводи практично однакову дію. При слабких діях додаткове поглинання спочатку лінійно залежить від дози, а потім спостерігається насичення. Наведене поглинання складається з двох компонентів: стабільного і нестабільного, зникаючого при відпалі або інтенсивному засвіченні.

6. **Втрати пов'язані з витягуванням**, внаслідок чого на їх поверхні утворюються мікротріщини, які з часом можуть збільшуватися і викликати появу додаткових втрат.

Процес істотно прискорюється за наявності механічних деформацій і хімічній дії тих або інших реагентів, головним чином води і кисню, усунути вплив яких практично неможливо.

## 7.2 Технічна реалізація ВОЛЗ

Елементну базу волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) складають волоконно-оптичні кабелі, передавальні і приймальні крайові пристрої (модулі), оптичні з'єднувачі, розгалужувачі, комутатори. Саме з цих апаратурних засобів створюються системи оптичного зв'язку. Але кожен з названих елементів є складним пристроєм, що у свою чергу складається з декількох комплектуючих елементів, властивості і характеристики яких кінцем кінцем визначають можливості ВОЛЗ. Ці оптичні, опто-, мікроелектронні, оптико-механічні елементи (вироби, матеріали) також входять в елементну базу ВОЛЗ.

### 7.2.1 Різновиди оптичних волокон

Визначають в техніці ВОЛЗ є кварцеві двошарові волокна трьох основних різновидів: багатомодові ступінчасті і градієнтні, а також одномодові (рис. 7.3 а - в).

У одномодових волокнах закон зміни показника заломлення усередині серцевини неважливий, тому ці волокна, як правило, близькі до ступінчастих. Показаний на рисунку третій зовнішній шар в механізмі світлопередачі участі не приймає. Двошарові кварцеві світлопроводи виготовляються способом парофазного осадження, який набув загального поширення.

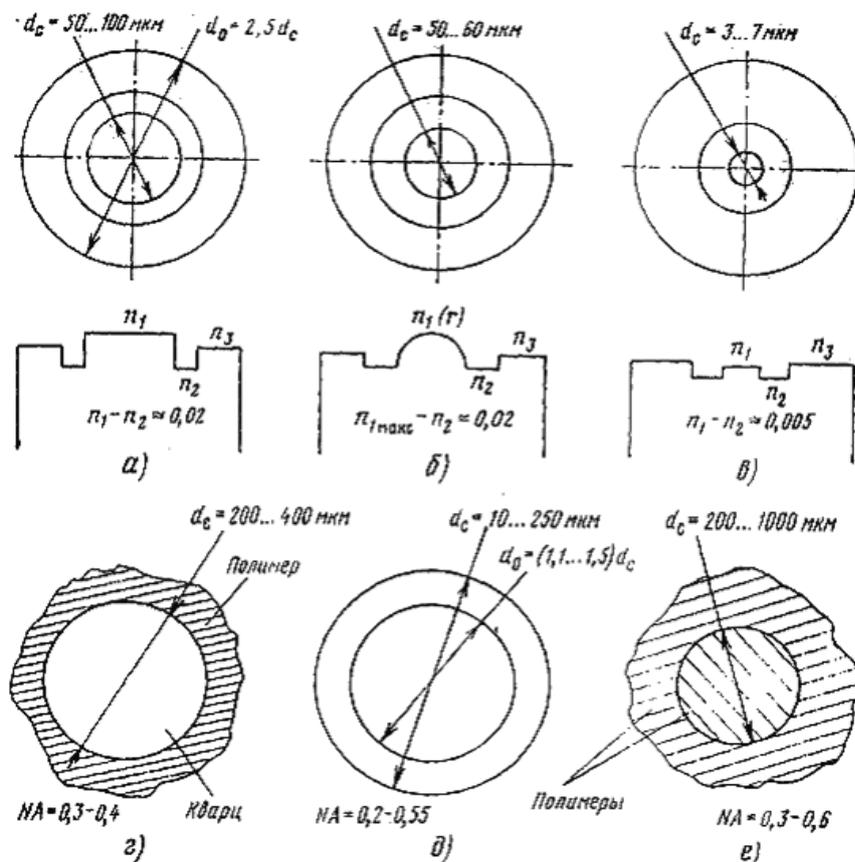


Рисунок 7.3 - Геометрія і профіль зміни показника заломлення кварцевих двошарових багатомодових ступінчастих (а), градієнтних (б), одномодових (в) волокон. Геометрія серцевини і числові апертури кварц-полімерних (г), з багатокомпонентних стеклол (д) і полімерних (е) світлопроводів [15]

Після отримання шарів необхідної товщини трубку нагрівають сильніше і обжимають до «зхлопування» - таким чином виходить початкова заготовка (рис. 7.2а).

Розтягуючи розігріту заготовку і міняючи швидкість витяжки, отримують волокно необхідних геометричних розмірів.

Одночасно з крайовим етапом протяжки волокно пропускають через екструзер з фільтрою і покривають захисним полімерним покриттям, іноді також багатошаровим. Призначення цього покриття - «залік» мікротріщин в кварці, захист волокна від вологи і пом'якшення механічних дій елементів майбутнього кабелю. Таким чином, в промислових умовах результатом витяжки є не волокно, а структура, звана **волоконним модулем** (діаметр модуля 0,2-0,8 мм) і що є заготовкою для подальшого оформлення в кабель.

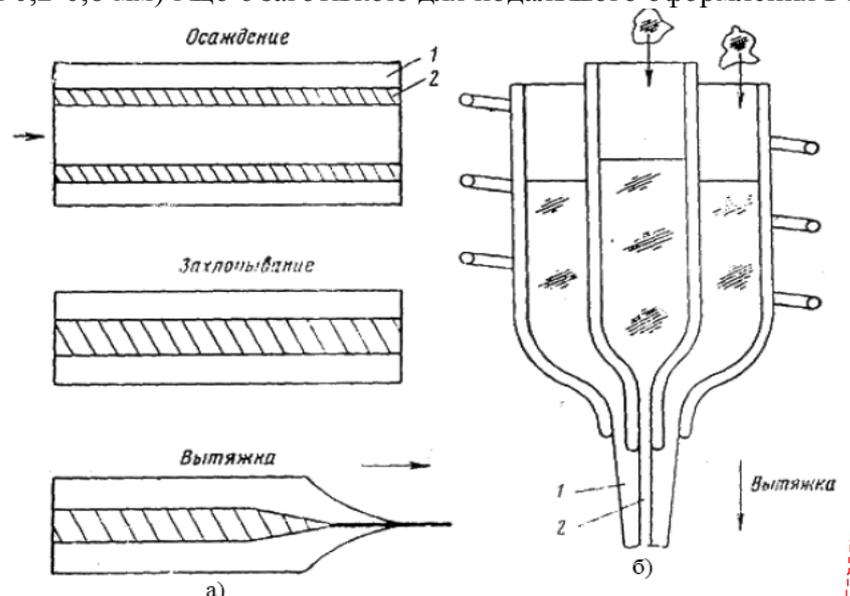


Рисунок 7.4 - Схема виготовлення заготовок для кварцевих двошарових волокон (а) і виготовлення волокон з багатокомпонентного скла (б): 1 – оболонка, 2 – серцевина[15]

### 7.2.2 Основні конструкції волоконно-оптичних кабелів

Найбільш широкого поширення набули чотири основні конструкції ВОК (рич. 7.5): **повивная**, в якій волоконні модулі обвиваються навколо центрального зміцнюючого елемента;

**кабелі пучкового скручування**, в яких навивке піддаються групи (пучки) модулів, заздалегідь укладені в трубки;

**кабелі з профільним зміцнюючим елементом**, в яких волоконні модулі вільно укладаються в гвинтоподібні пази зміцнюючого елемента;

**стрічкові кабелі**, в яких скручуванню піддаються стрічки, декілька волокон, що містять, і набрані стопою. Перші дві конструкції є класичними, запозиченими з електротехнічної практики.

Незалежно від конкретної конструкції **основними елементами кабелю** (окрім волоконних модулів) є

**зміцнюючі елементи**, зазвичай полімерні, іноді металеві, що служать для додання кабелю необхідної розривної міцності і розвантаження волокон від розтягування;

**зовнішні захисні покриття**, нерідко багатошарові, оберігаюча від проникнення волога, пари шкідливих речовин і від зовнішніх механічних дій;

**армуючі елементи**, що підвищують опірність кабелю радіальним механічним діям;

ізолювані металеві дроти, що вмонтовуються в кабелі разом з оптичними волокнами і що забезпечують електроживлення ретрансляторів на лінії зв'язку;  
**внутрішні розділові шари і стрічки**, що скріплюють окремі групи елементів і що зменшують тиск різних елементів конструкції один на одного;  
**гідрофобний заповнювач**, що ослабляє шкідливу дію вологи на оптичні волокна.

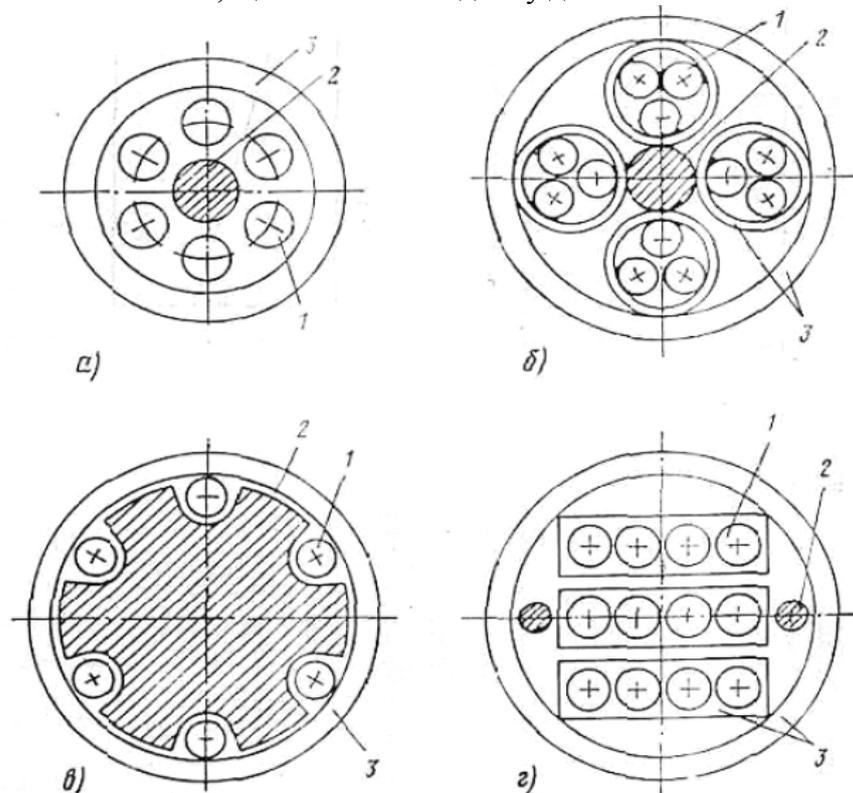


Рисунок 7.5 - Основні різновиди волоконно-оптичних кабелів: повивная конструкція (а), кабелі пучкового скручування (б), з тим, що профільним зміцнює елементом (в), стрічковий (г): 1 - волоконно-оптичний модуль; 2 - упрочняючий елемент; 3 - захисна оболонка[15]

Поява мікровигинів волокна у складі кабелю, терморасогласування волокна і кабельних матеріалів, гарантований захист від дії вологи на волокно - ці проблеми як і раніше далекі від повного вирішення.

### 7.2.3 Передавальні і приймальні модулі

Призначення **передавального модуля** полягає в перетворенні вхідної інформації у вигляді електричних сигналів в оптичні сигнали, узгоджені з каналом передачі (волоконним світлопроводом); при цьому модуль повинен надійно функціонувати при всіх можливих змінах зовнішніх впливаючих чинників (температури, вологості, вібрації, коливань напруги живлення і тому подібне).

У **пристрої збудження** сигнал, що поступає через вхідний електричний роз'єм, перетвориться в могутні імпульси накачування, що перевищують поріг генерації лазера. Цей пристрій може здійснювати і деякі додаткові функції:

завдання постійного зсуву (передпорогове підживлення);

додання імпульсу накачування спеціальної форми, що забезпечує форсування почала і обриву генерації;

зміна тривалості імпульсу збудження в порівнянні з імпульсом (наприклад, для поліпшення теплового режиму роботи лазера), що поступає, і тому подібне

У пристрій збудження можуть бути введені і блоки, що виконують абсолютно інші функції: аналого-цифрове перетворення сигналу, кодування, мультиплексування і ін. . Пристрій збудження виконується у вигляді інтегральної монолітної або гібридної мікросхеми.

«Центром» передавального модуля є випромінювач - саме в нім відбувається оптоелектронне перетворення. Основні випромінювачі ВОЛЗ - напівпровідникові інжекційні гетеролазери на основі з'єднань GaAlAs і InGaAsP, смугові лазери, лазери із зарощеною структурою, з розподіленим зворотним зв'язком і здвоєні лазери зі сколото-зв'язаними резонаторами. Модуль може містити одночасно декілька лазерів, випромінюючих на різних довжинах хвиль (для цілей спектрального мультиплексування), в цьому випадку структурна схема відповідно видозмінюється і ускладнюється.

Випромінювання лазера поступає на вихідний оптичний пристрій, що включає елементи узгодження (селективні фільтри або змішувачі мод; елементи, що перетворюють діаграму спрямованості випромінювання до оптимального для введення у волокно вигляду) і оптичний з'єднувач. Частина світлового потоку лазера за допомогою світлоділника (або шляхом використання внеапертурного випромінювання) прямує на фотоприймач зворотного зв'язку, який через мікроелектронний пристрій управління так впливає на пристрій збудження і на лазер, щоб здійснювалася компенсація температурних, деградаційних і інших змін потужності на виході модуля. Для ослаблення температурних ефектів в модуль вводиться термоелектричний охолоджувач, що включає вимірника і схему автоматичного регулювання температури. Найважливішою частиною модуля є корпус, що виконується зазвичай у вигляді плоскої прямокутної металевої коробочки з електричним і оптичним з'єднувачами на протилежних торцях

Для коротких ВОЛЗ з невисокими швидкостями передачі інформації зручно замість лазера використовувати світлодіоди: це підвищує надійність і довговічність передавального модуля, знижує його вартість, різко спрощує структурну схему. В цьому випадку термоелектричні охолоджувачі не потрібні, виключається також ланцюг фоточутливого зворотного зв'язку.

Передавальні модулі на основі напівпровідникових інжекційних випромінювачів (лазерів і світлодіодів) характеризуються всіма перевагами, властивими цим приладам: малими габаритними розмірами, довговічністю і надійністю, економічністю, малою живлячою напругою, простотою модуляції.

**Приймальний модуль** призначений для зворотного перетворення оптичного сигналу, що поступає з каналу передачі (світлопровода), в електричний і його відновлення до початкового вигляду; через оптичний елемент (зазвичай оптичний з'єднувач, а іноді і фокусуюча лінза), що погоджує, випромінювання поступає на чутливий майданчик фотоприймача, для якого практично повсюдно використовуються фотодіоди: лавинні і з р-і-п- структурою.

Призначення подальших каскадів полягає в забезпеченні оптимального (або квазіоптимального) прийому, тобто в реалізації такого алгоритму, який дозволяє отримати якнайкращі характеристики (поріг чутливості, смуга частот і ін.) при неминучій дії шумів і спотвореннях. Конкретне виконання цих каскадів залежить від типу використовуваного фотоприймача і виду інформаційних сигналів, що поступають (їх амплітуди, частоти проходження, коди і ін.).

Попередні підсилювачі зазвичай виконуються в одному з двох варіантів: високоімпедансний (інтегруючий) підсилювач струму або трансімпедансний підсилювач - перетворювач струму в напругу, охоплений глибоким негативним зворотним зв'язком.

Схема обробки сигналу є спеціальним електронним фільтром, призначеним для зменшення міжсимвольної інтерференції, тобто часткового накладення імпульсів на виході підсилювача унаслідок дисперсійних явищ в світлопроводі і динамічних спотворень в приймально-передавальних модулях.

У схемі ухвалення рішення (як правило, компараторі) сигнал порівнюється із заданим зсувом (порогом) і ухвалюється рішення про істинність інформації, що поступила. даним алгоритмом розподілу світлових сигналів в цій системі.

Комутаційні елементи містять декілька груп виробів.

Оптичні з'єднувачі призначені для багатократного зчленування-розчленування кінців двох відрізків кабелю (з'єднувачі типу кабель-кабель) або кінця кабелю з передавальним або приймальним модулем (блокові з'єднувачі).

Оптичними розгалужувачами є пристрої, в яких випромінювання, що подається на вхід (або входи), розподіляється по заданому закону між його виходами.

Оптичні комутатори – пристрої, що функціонально реалізують повнодоступну схему з  $m$  входами і  $n$  виходами, тобто з  $m \times n$  полюсами. У окремому випадку при  $m = 1$  пристрій називають оптичним перемикачем. Елементи введення-виводу випромінювання виконують функцію оптичного узгодження кутових апертур активних елементів (в першу чергу випромінювача) і волокна.

#### **7.2.4 Принципові особливості волоконно-оптичні лінії зв'язку ( ВОЛЗ) та області практичного застосування**

Створення світлопроводів з малими втратами, швидкодіючих і джерел когерентного випромінювання і фотоприймачів зробило можливим практичне застосування волоконно-оптичних ліній зв'язку, що швидко розвиваються унаслідок наступних *принципових особливостей*.

**1. Мале лінійне загасання і спотворення сигналу.** Волокна упевнено забезпечують довжину міжретрансляційної ділянки в 30-50 км. (що на порядок перевищує той же показник для коаксіальних металевих кабелів), в окремих випадках - до 200 км. і в перспективі - понад 1000 км.

**2. Надвисока пропускна спроможність.** Це пояснюється, перш за все, широкосмуговістю всіх елементів ВОЛЗ (випромінювач - волоконний тракт-фотоприймач), використанням принципу оптичного мультиплексування і можливістю розміщення в кабелі великого числа волокон. Представляється досяжною швидкість передачі інформації  $10^{12}$ - $10^{13}$  бит/с по одному кабелю

Найважливішим шляхом підвищення пропускної спроможності ВОЛЗ є використання принципу мультиплексування у всіх його можливих аспектів. Мова йде про технологічне, часове, спектральне, просторове ущільнення каналів передачі. Перші два аспекти - використання в одному кабелі великого числа невзаємодіючих волокон і часове мультиплексування .

Спектральне ущільнення засноване на тому, що поодинокі і тому ж світлопроводу можуть одночасно і не змішуючись передаватися сигнали, відповідні оптичному випромінюванню різних довжин хвиль.

У простому варіанті на вхід волокна через систему інтерференційних фільтрів подаються сигнали від декількох лазерів (наприклад, три). На виході волокна інтерференційна система, зворотна вхідній, розділяє різні спектральні потоки, направляючи їх на три фотоприймачі - у результаті пропускна спроможність лінії потроюється. Оцінки показують, що на існуючій елементній базі число інформаційних каналів що реалізуються, в одиночному волокні одночасно на різних оптичних несущих може досягати 10; теоретично граничне число для діапазону  $\lambda = 0,8$ - $1,6$  мкм перевищує 102 каналів.

Просторове ущільнення здійснюється двома способами: при передачі різно поляризованих мод по волокну, що зберігає напрям поляризації, і передачі декількох мод з різними кутами падіння. На виході всі ці потоки просторово розділяються, і кожен сприймається своїм фотоприймачем.

Другий спосіб - «азимутне» ущільнення - змикається з проблемою передачі двомірних зображень по одиночному волокну. Реальні досягнення тут поки невеликі: передача трьох променів на відстань до 250 м з придушенням перехресних перешкод на рівні 40 дБ. .

3. *«Електрогерметичність»*. Волоконний світлопровід не чутливий до зовнішніх електромагнітних дій і сам практично не випромінює в навколишній простір. Цим забезпечується перешкодозахисна ВОЛС і скритність передачі інформації. .

4. *Малі габарити і маса*. Характерними в зв'язку з цим є три моменти.

По-перше, діаметр типового волоконного модуля складає всього 0,3-0,5 мм, а площа поперечного перетину світлоканаліруємої області (з урахуванням необхідних оболонок, що відображають і захисної) може бути менше  $10^{-5}$  см<sup>2</sup>.

По-друге, питома маса; використовувані матеріалів (кварц) у декілька разів менше, ніж у металів (мідь, свинець); у багатьох випадках волоконний кабель не має захисного металевого екрану або цей екран легший.

По-третє, використовувані в крайових пристроях і в ретрансляторах оптоелектронні елементи мініатюрні, економічні і легкі. У результаті порівняння з дротяними лініями зв'язку ВОЛЗ дають вигаш по масі у в 2-5 разів, а в окремих випадках і в 30-100 разів. Мала вага світлодіодів обумовлена дуже малим їх діаметром, до того ж питома вага кварцевого скла (2,3 г/см<sup>3</sup>). Вага одного світлопровода довжиною 1 км. (без пластмасової оболонки) складає 27 г, для порівняння - вага однієї мідної жили такої ж довжини і діаметром 1мм рівний приблизно 7 кг. Граничне натягнення нитки світлопровода діаметром 125 мкм складає 68,77 Н ((7 кГ), приблизно в 2 рази більше, ніж для фортепіанної струни тієї ж товщини.

5. *Експлуатаційні переваги*. Оптоелектронні принципи перетворень і передачі інформації у ВОЛЗ, використання кварцу як передавальне середовище обумовлюють наявність електричної розв'язки між входом і виходом лінії; однонаправленість потоку інформації, відсутність зворотної реакції приймача на передавач; пожаро- і вибухобезпечність (виключення іскріння і самозагорання); стійкість волокон до корозії; високі міцність волоконних світлопроводів і граничну температуру волокон (до 1000° С); простоту прокладки волоконно-оптичного кабелю.

6. *Низька вартість*. Відзначимо перш за все необмежений сировинний ресурс для виробництва кварцевих волокон, тоді як запаси міді і свинцю безперервно виснажуються. Велика довжина міжретрансляційного прольоту і висока інформаційна ємкість оптичних каналів різко скорочують апаратні витрати в порівнянні з дротяними зв'язними системами. Нарешті, значний економічний ефект обумовлюється простотою прокладки і експлуатації ВОЛЗ.

**Області практичного застосування ВОЛЗ** надзвичайно широкі. Залежно від протяжності вони умовно діляться на об'єктові, міські (міжміські, зонові) і магістральні, аж до міжконтинентальних. Внутрішньооб'єктові ВОЛЗ – це відносно короткі (1-100 м) бортові лінії на кораблях, літаках, ракетах і космічних апаратах, усередині установ і підприємств, в апаратурі контролю і управління (що працює в умовах сильних перешкод, з високовольтними і сильноточними ланцюгами), для передачі світлових імпульсів великій потужності в лазерній технології, медицині і тому подібне. Для внутрішньооб'єктові лінії зв'язку оптичні втрати, модова і хроматична дисперсія - не дуже критичні характеристики. Виділяють також так звані монтажні волоконно-оптичні кабелі (завдовжки до 10-30 м), призначені для внутрішньоблокових і міжблочних з'єднань в апаратурі.

Міські ВОЛЗ мають середню протяжність до 50-100 км., міжміські (зонові) - до 200-300 км. і призначені для зв'язку ЕОМ з віддаленими терміналами, пристроями збору даних, телефонному, телеграфному і відеотелефонному зв'язку. Слід обговорити використання ВОЛЗ для багатопрограмного телебачення, що важливе як з погляду підвищення якості і надійності передачі в умовах сильних перешкод, екранування

висотними забудовами, рельєфом місцевості, так і радикальної перебудови інформаційної служби, з'єднання абонентів з крупними бібліотеками, банками даних, інформаційно-обчислювальними центрами і ін.

Призначення магістральних ВОЛС - передача інформації на великі відстані (сотні і тисячі кілометрів). При мінімальних оптичних втратах вони повинні бути стійкими до багаторічних дій несприятливих зовнішніх чинників (наприклад, при укладанні під землею, під водою). У магістральних ВОЛС використовують дорогі оптичні кабелі, що містять гідроізолюючу оболонку, армують елементи і тому подібне.

Передачу сигналів у ВОЛС здійснюють як в аналоговій, так і в цифровій формі. Широкосмугість світловолокон робить переважною передачу інформації в цифровій формі, як точнішою і надійнішою, менш чутливішою до шумів і спотворень.

### *Перелік літературних джерел*

1. Колесник Ю. І. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. / Ю. І. Колесник, А. В. Кіпєнський. – Харків : НТУ «ХП», 2016. 318 с.
2. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. / В. О. Чадюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. Кн. 1. 376 с.
3. Черняков Е. І. Оптоелектроніка : навч. посіб / Е. І. Черняков, Ю. П. Мачехін, М. П. Кухтін, С. М. Кухтін Харків : ХНУРЕ, 2016. 292 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/8917>
4. Кривець О. С. Квантова електроніка : навч. посіб / О. С. Кривець, О. О. Шматько, О. В. Ющенко. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 340 с.
5. Птащенко О. О. Основи квантової електроніки : навчальний посібник Одеса : Астропринт, 2010. 392 с
6. Мінакова К. О. Квантова електроніка : підручник / К. О. Мінакова, Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Дніпро : Середняк Т. К., 2023. 187.
7. Шмирьова Л. М. Квантова електроніка : Навчальний посібник Частина 1. Для студентів факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського усіх форм навчання / Л. М. Шмирьова, О. М. Бєвза, Н. В. Слободян. Київ :: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 98 с.
8. Вакарчук І. О. Квантова механіка : підручник / І. О. Вакарчук. 4-те вид., доп. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с. : 78 іл.
9. Венгер Є. Ф., Грибань В. М., Мельничук О. В. Основи квантової механіки : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2002. 286 с.
10. Григорук В. І., Коротков П. А., Хижняк А. І. Лазерна фізика : підручник. 2-е вид. Київ : Леся, 1999. 528 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi74/0054957.pdf>.
11. Косяченко Л. А. Основи інтегральної та волоконної оптики. Навчальний посібник. Чернівці : Рута, 2008. 347с.
12. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки : навч. посіб. 2-е вид., перероб. й допов. Київ : Либідь, 2002. 392 с.
13. Навчальний посібник для студентів вищих технічних і педагогічних закладів освіти / Кучерук І. М., Горбачук І. Т.; за ред. Кучерука І. М. – Київ : Техніка, 1999. Том 3: Оптика. Квантова фізика. 520 с.
14. Nenchev M., Deneva M., Yasser A., Suat T., Chassagne L., Himbert M., Quantum electronics and optical techniques and devices for applications in biology, atmosphere monitoring, optical communications and sciences // Journal of the Technical University Sofia Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications" Vol. 19, 2013. 7 – 22.
15. Deneva M., M. Nenchev, Development of original, simple quantum electronics device with emission passively frequency locked at atomic absorption line, // Proc. Intern. Confer. "Laser technology and Lasers", Bulg., 2005, 37-45.