

## **Тема 1. Вступ.**

### **Лекція 1.**

*Короткі історичні відомості про виникнення та розвиток квантової електроніки. Основні тенденції у розвитку сучасної квантової електроніки. Типи та схеми дії лазерів. Перспективи квантової електроніки та квантових приладів. Предмет та зміст курсу.*

Квантова електроніка – підсилення та генерації електромагнітного випромінювання на основі індукованих переходів квантової системи – видатне досягнення другої половини XX століття.

### ***Короткі історичні відомості про виникнення та розвиток квантової електроніки.***

Створення квантових генераторів було підготовлено попереднім розвитком фізики. В доповіді Планка 14 грудня 1900 року вперше з'явилась формула  $E = h\nu$ . Це співвідношення показує взаємозв'язок двох областей фізики: хвильової ( $\nu$  - частота) і корпускулярної (енергія  $E$ ). Фізичні основи квантової електроніки були закладені А.Ейнштейном починаючи з роботи 1905 року, що була присвячена квантовій теорії світла (для аналізу фотоефекту і фотофлуоресценції). М.Планк отримав формулу для опису спектрального розподілу випромінювання абсолютно чорного тіла і при виведенні цієї формули він встановив, що тіла випромінюють світло квантами. Коефіцієнт пропорційності отримав назву сталої Планка ( $h = 6.626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ). Робота Ейнштейна, яка була надрукована у 1916 році, була присвячена виведенню формули Планка. В цій роботі вперше введено поняття індукованого випромінювання атомів під впливом зовнішнього поля. Імовірність індукованого випромінювання пропорційна густині падаючого на квантову частинку (атому, молекулу) випромінювання. При цьому частота випромінювання квантової частинки рівна частоті падаючого на неї кванта; просторові направленості, поляризації збуджувального і випромінювального квантів також співпадають, тобто ці кванти тотожні.

Таким чином, якщо на систему збуджених частинок діє випромінювання, то після проходження світла через цю систему інтенсивність світла зростає, тобто має місце підсилення світла.

Для підсилення світла необхідно, щоби у верхньому стані знаходилась достатня кількість квантових частинок, а для генерації – щоб частинок у верхньому стані було більше, ніж у нижньому з урахуванням виродження.

Гіпотеза А.Ейнштейна про вимушене випромінювання викликала велику зацікавленість, і природно фізики стали шукати експериментальну перевірку цього явища з метою довести існування індукованого випромінювання. Ідея створення монохроматичних генераторів світла на основі індукованого випромінювання з'явилася після початку робіт по квантових генераторах радіодіапазону – мазерах (мазери були створені в 1954-55рр.) При наявності підсилювального елемента, позитивного зворотного зв'язку і резонатора система здатна генерувати монохроматичні коливання. Труднощі зв'язані із створенням для оптичного діапазону резонаторів були вирішені в 1958 році, коли О.М.Прохоров запропонував відкриті резонатори (інтерферометр Фабрі-Перо), розміри яких набагато більші, ніж довжина хвилі. Другою важливою проблемою є отримання інверсної заселеності. В 1955 р. Н.Г.Басов і О.М.Прохоров запропонували метод отримання інверсної заселеності в трирівневій схемі під впливом зовнішнього джерела накачування. Перший лазер, створений Н.Т.Мейманом в 1960 р. працював за трирівневою схемою (рубін). При його створенні були використані відкриті резонатори, а в якості накачування – імпульсна оптична лампа.

Нині лазери працюють в широкому діапазоні довжин хвиль, причому значний розвиток отримали лазери на барвниках і твердих тілах з плавною перебудовою довжини хвилі випромінювання. Тепер можна отримати дуже короткі імпульси світла в фемтосекундному діапазоні (фемтосекунди –  $10^{-15}$  с = 1 фс), які містять невелике число оптичних коливань. Потужне лазерне випромінювання дозволяє спостерігати різні нелінійні явища.

### ***Типи та схеми дії лазерів.***

Лазери класифікуються за схемами функціонування (2-, 3-, 4-рівневі, див. **рис. 1**), за агрегатним станом робочого тіла (газові, рідинні і твердотільні), за методом отримання інверсного стану (електронний, оптичний, хімічний, теплове накачування), за фізичними особливостями активних центрів, чим частіше всього і користуються.

Прийнята класифікація лазерів:

1. Твердотільні
2. Напівпровідникові
3. Рідинні
4. Газові на атомних переходах
5. На іонних переходах
6. Молекулярні
7. Фотодисоціаційні
8. Електроіонізаційні
9. Газодинамічні
10. Хімічні
11. Плазменні
12. Ексімерні
13. Лазери на вільних електронах
14. Рентгенівські лазери
15. Гамма-лазери
16. Лазери з перебудовою довжини хвилі генерації
17. Комбінаційні лазери
18. Лазери на вільних електронах

### **Твердотільні лазери.**

Найбільше практичне використання отримали лазери на твердих тілах – активованими атомарними іонами діелектричних кристалах і склі. Більше половини обсягу продажу твердотільних лазерів припадає на лазери на основі граната ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) і алюміната ( $YAlO_4$ ), активованих  $Nd^{3+}$ . Причиною розповсюдження твердотільних лазерів полягає в тому що по сукупності найважливіших параметрів (середня потужність випромінювання, ККД і т.п.) вони є лідерами. Твердотільні лазери поєднують високі енергетичні параметри генерації (енергія в імпульсі до  $10^4$  Дж, середня потужність генерації до 700 Вт) зі здатністю дії в різноманітних режимах – від ультракоротких імпульсів пікосекундної (пс) тривалості і до режиму неперервної генерації великої потужності, виняткова надійність і довговічність, компактність. Найбільший їх недолік – низький ККД. Відомі лазери на гранаті з неодимом мають ККД 1-2%, як для імпульсного, так і для неперервного режиму генерації. Основна причина цього недоліку – недостатнє узгодження спектра випромінювання лампи накачування із смугами поглинання неодиму.

Принципові шляхи підвищення ККД твердотільних лазерів відомі. Потрібно або різко підвищити концентрацію неодиму, або виконати сенсibilізацію, тобто ввести додаткову домішку в матрицю, яка має сильне поглинання в області випромінювання лампи накачування, що ефективно передає збудження  $Nd^{3+}$ . Але на шляху виконання цих рішень є принципові труднощі. Так, просте підвищення концентрації активної домішки ( $Nd^{3+}$ ) в більшості випадків не привело до позитивного результату внаслідок добре відомого явища – концентраційного гасіння. І тільки розкриття цього механізму дозволило розробити кристали і скло, активовані  $Nd^{3+}$ , з аномально слабким концентраційним гасінням люмінесценції. Найбільш відоме з них фосфатне скло КНФС. Ф-100, LHG-8, ЛГС-56 і інші. ККД лазерів на основі цього скла в 2-3 рази вищий.

Перша спроба використати сенсibilізацію для підвищення ККД неодимових лазерів була зроблена в 1964 р. на кристалі  $Y_3Al_5O_{12} \div Cr^{3+} \div Nd^{3+}$ . Сенсibilізатор  $-Cr^{3+}$ . ККД було підвищено вдвічі. В 1978 р. синтезовано складний кристал – хром-неодим-амоноборат, в якому час передачі збудження  $Cr^{3+} \rightarrow Nd^{3+}$  проходив менше, ніж за 100 нс.

Особливо швидка (тобто, швидше порівняно з швидкістю дезактивації верхнього робочого рівня  $^4F_{3/2}Nd^{3+}$ ) передача енергії  $Cr^{3+}$  була досягнута в галієвому гранаті (ГСГГ- $Cr^{3+} - Nd^{3+}$ ), до складу якого входять крім галію, гадоліній, скандій, хром і неодим  $Gd_{1-x}Nd_x[(SeGa)_{1-y}Cr_y]_2Ga_3O_{12}$  – гадоліній-скандій-галієвий гранат.

При накачуваннях в 1-3 Дж активного елемента (ГСГГ- $Cr^{3+} - Nd^{3+}$ ), розміром  $3 \cdot 50 \text{ мм}^2$  (концентрація  $Cr^{3+}$  -  $2 \cdot 10^{20}$  і  $Nd^{3+}$  -  $3.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) отримали ККД 4%. При цьому середня вихідна потужність 5 Вт при накачуванні 145 Вт, а при модуляції добротності за допомогою електрооптичного затвору на  $LiNbO_3$  отримали середню потужність 2.9 Вт і ККД 3%.

Твердотільні лазери працюють при оптичному накачуванні.

### Газові лазери.

До газових лазерів (ГЛ) відноситься широкий клас приладів, де як активне середовище використовуються різні гази, їх суміші і

пари металів. Ці лазери за способом накачування для отримання вимушеного випромінювання поділяються на газорозрядні, газодинамічні і хімічні.

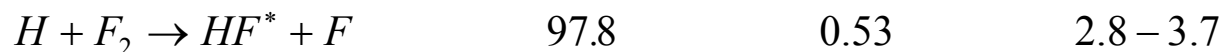
В газорозрядних лазерах збудження відбувається електричним розрядом в газах. Вони додатково підрозділяються на атомарні, іонні і молекулярні. До газорозрядних ГЛ відносяться і такі, в яких накачування виконується в результаті швидкого охолодження газової суміші (теплові лазери) або під дією нагріву (ударних хвиль).

В хімічних ГЛ збудження активного середовища відбувається за рахунок енергії, яка звільняється при хімічних реакціях компонентами активного середовища.

Хімічні лазери (ХЛ) підрозділяються на два типи ГЛ: з ініціюванням хімреакції і „чистого хімічного” (без ініціювання). В першому випадку для забезпечення умов, необхідних для виконання і проходження хімреакцій, потрібне попереднє збудження тих чи інших реагентів, які вступають в реакцію (дисоціація, фото дисоціація, іонізація і т.п.), що викликає необхідність використання спеціальних додаткових пристроїв таких як: електророзрядники, нагрівальні камери, ударні труби, сопла і ін. В другому випадку хімічна реакція виникає довільно при змішуванні компонентів ( $F_2 + H_2 \rightarrow HF^* + H$ ). У хімічних лазерів ККД  $\sim 10\div 15\%$  і велике значення енергії, що знімається з одиниці об'єму. Недоліками хімлазерів є токсичність більшості активних речовин і необхідність їх прокачування. Більшість ХЛ працює на коливальних переходах двоатомних молекул. В цьому випадку збудження відбувається в результаті екзотермічної реакції заміщення:



При цьому значна частина  $\Delta E$  (величина  $\delta$ ) іде на збудження коливальних рівнів молекули  $AB^*$ :



|                                    |      |     |         |
|------------------------------------|------|-----|---------|
| $O_2 + CS \rightarrow CO^* + SO$   | 90.0 | 0.7 | 5.0–5.7 |
| $F + CH_4 \rightarrow HF^* + CH_3$ | 34.5 | 0.6 | 2.8–3.0 |

Основний параметр, який характеризує ефективність ХЛ, є його хімічний ККД ( $\eta_X$ ) – відношення енергії лазерного випромінювання до величини енергії, що виділяється в результаті хімічної реакції або енергетичний ККД ( $\eta_E$ ) – відношення енергії лазерного випромінювання до енергії, яка витрачається на ініціювання хімреакції. Енергія ініціювання багатьох екзотермічних реакцій менша енергії, що виділяється в результаті таких реакцій. Внаслідок цього  $\eta_E$  не має принципових обмежень зверху і може перевищувати 100%. Так для  $F + H_2$  і  $H + F_2$   $\eta > 90$ .

Максимальна енергія випромінювання  $HF$ - лазера (в імпульсному режимі) більше 2 кДж при тривалості імпульсу 30 нс (потужність  $10^3$  ГВт). Найбільш потужні  $HF$ - лазери неперервної дії працюють при прокачуванні і мають вихідну потужність в кілька кВт при  $\eta_E \sim 2 \div 4\%$ .

Спектральний діапазон генерації ГЛ значно перевищує діапазон випромінювання всіх інших класів лазерів: лежить в межах від 0.1 до 700 мкм. Внаслідок слабкої взаємодії частинок газу ширина лінії генерації близька до природної і в спеціально сконструйованому ГЛ може досягати кількох герц. Ця особливість активного газового середовища дозволяє отримати випромінювання з більш високою монохроматичністю і когерентністю в порівнянні з випромінюванням інших лазерів. В ГЛ при вжитті спеціальних заходів можуть бути досягнуті стабільність і відновлюваність частоти  $\sim 10^{-15} \div 10^{-17}$ .

Висока оптична однорідність газового середовища, мале розсіювання і оптимальний вибір геометричних розмірів резонатора дозволяють отримати випромінювання ГЛ з розбіжністю близькою до дифракційної (реальна розбіжність  $1 - 10'$ ) і високий ступінь поляризації.

Унікальні параметри ГЛ відносно легко реалізуються в лазерах малої потужності, а за необхідності отримання таких же параметрів з підвищеною потужністю використовуються методи каскадного підсилення. Звичайно  $He - Ne$  лазери мають потужність

0.1-100 мВт, для  $Ar^+$  - 0.1-500 Вт (ККД -  $10^{-3} - 10^{-1}\%$ ), в  $CO_2$  - 0.01-50 кВт з ККД 10-30%.

Молекулярні газорозрядні, іонізаційні, газодинамічні і хімічні лазери генерують високі потужності в неперервному режимі – десятки і сотні кіловат. Підвищення потужності випромінювання досягається, в основному за рахунок застосування більш швидкого прокачування і підвищення тиску газу.

### Ексимерні лазери (ЕЛ).

Особливе місце відводиться потужним ЕЛ, які генерують переважно в УФ-області. Активне середовище в них – квазімолекули або ексимерні комплекси атомів, які виникають і існують тільки в збудженому стані:  $ArO^*$  (558 нм);  $XeF^*$  (351 нм);  $XeCl^*$  (308 нм). Лазерне випромінювання виникає при переході ексимерних комплексів зі збудженого електронного стану в „не збуджене”, після цього вони розпадаються на складові атоми (рис. 2). Нижній рівень лазерного переходу є „відштовхувальним” (не збуджені атоми відштовхуються один від одного і не утворюють молекули). Швидке спустошення нижнього рівня, точніше відсутність нижнього рівня, зумовлює аномально велику ширину лінії підсилення 40-250 А ( $10^{-2} - 10^{-1}$  еВ). Час життя  $\sim 10^{-8}$  с. Такі лазери ще називають розлітними. Ексимерні збуджені комплекси виникають в певних газових сумішах при досить високому рівні збудження останніх і високому тиску  $\sim 0.1-1$  ГПа ( $\sim 10^4$  ат.). ККД при цьому становить  $\sim 1-5\%$  і енергія – до 40-50 Дж/л. Частота повторення імпульсів  $10^4$  Гц при середній потужності кілька десятків ват. Область генерації від 126.1 нм ( $Ar_2^+$ ) до 558.0 ( $ArO^+$ ). Кут розбіжності при спец конструкції резонатора (нестійкий резонатор) може досягати дифракційного – кількох кутових секунд.

Найкращі результати отримані на квазімолекулах хлориду ксенона ( $XeCl^*$  - довжина хвилі генерації  $\lambda_r = 308$  нм). При довжині резонатора  $L = 100$  см і імпульсній робочій напрузі 40-50 кВ отримана середня потужність 1 Вт при частоті 100 Гц, ККД – 0.2%. При тривалостях імпульсу  $1 \div 20$  нс потужність досягає сотні кіловат.

### Напівпровідникові лазери (НЛ).

НЛ застосовуються найбільш широко. Безпосереднє живлення від низьковольтних джерел струму, високий ККД, простота і компактність пристрою, особливо інжекційних лазерів, висока швидкодія визначають переваги їх використання в волоконно-оптичному зв'язку, оптичних системах пам'яті (видопошукова апаратура), в знакодрукуванні, спектроскопічній діагностиці різних середовищ та матеріалів (вологометрія, моніторинг оточуючого середовища і т.п.), а також в наукових дослідженнях і промислових випробуваннях (спектроскопія високої роздільної здатності, атестація фотоприймачів, стандарти інтенсивності джерел випромінювання, різні види метрологічного калібрування і т.і.).

Випускається цілий ряд НЛ, а також спеціалізованих модулів, які включають такі лазери. Найбільша частина серійного випуску припадає на інжекційні лазери на основі двох типів лазерних гетеро структур: *GaAlAs/GaAs* і *InGaAsP/InP*, які перекривають діапазон довжин хвиль 0.67-0.91 і 1.06-1.67 мкм, відповідно. Діапазон пропускання кварцових оптичних волокон (0.4÷2.0 мкм) добре вписується в спектральний діапазон НЛ.

НЛ характеризуються як наймініатюрніші, надійні і довговічні вироби квантової електроніки. НЛ мають чудові динамічні і спектральні властивості.

В залежності від методів створення інверсної заселеності проведена класифікація НЛ:

*інжекційні*, в яких інверсний стан утворюється шляхом зустрічної дифузії електронів і дірок при прямій напрузі;

*з електронним або оптичним накачуванням*, коли інверсія створюється швидкими електронами або фотонами, відповідно;

*стримерні*, коли сильне електричне поле за рахунок лавіни носіїв створює у вузькому каналі (стримері) інверсну заселеність.

Можливі і інші методи отримання інверсії. Фізичні закономірності ті ж, що і при електронному збудженні.

НЛ мають високий коефіцієнт підсилення (*GaAs* –  $\alpha \sim 10^2 \text{ см}^{-1}$  при  $T=300\text{K}$  і  $\alpha \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$  при  $T=77\text{K}$ ). Це дозволяє реалізувати лазерний ефект при дуже малих розмірах – частки мкм і, відповідно, мати НЛ малих розмірів, однак це обмежує потужність. При розмірах  $(0.2-1) \times (3-20) \text{ мкм}^2$  потужність в імпульсі 10÷20 Вт. Звичайно, їх можна зібрати в матрицю і тоді потужність можна довести до кількох кВт. З іншого боку – малі розміри випромінюючої поверхні і нерівномірність їх світіння зумовлюють

велику розбіжність випромінювання НЛ – в площині  $p-n$  переходу  $6-12^\circ$  і в перпендикулярній –  $20-40^\circ$ . Довжина хвилі генерації НЛ визначається шириною забороненої зони використаного матеріалу, оскільки лазерний ефект в напівпровідникових матеріалах зумовлений переходом електронів із зони провідності до валентної зони. Основна маса рекомбінуючи електронів і дірок знаходиться біля дна зони провідності і стелі валентної зони. Тому енергія кванта, який випромінюється,  $\Delta E = h\nu$ , де  $\Delta E$  - ширина забороненої зони, тобто  $\lambda_T \sim c/\nu = ch/\Delta E$ . Діапазон генерації НЛ  $\sim 0.32 \times (ZnS) - 8.5 (PbSe)$  мкм. Квантоскоп (лазерна телевізійна трубка) дозволяє отримувати зображення на екрані площею  $6\text{м}^2$  і більше.

### **Рідинні лазери на основі розчинів барвників (ЛБ).**

ЛБ характеризуються широким спектром випромінювання. Для накачування ЛБ застосовуються лазери на склі, активованому  $Nd^{3+}$ ,  $IAГ : Nd^{3+}$ , рубіні, аргоні та ін., а також лампи накачування. ЛБ працюють в імпульсному і неперервному режимах. Найбільш ефективно ЛБ працюють в режимі генерації коротких імпульсів (10-20 нс). така специфіка зумовлена тим, що збуджені частинки, які знаходяться на стартовому рівні, можуть перейти в основний стан по двох каналах – з випромінюванням (сиглет-синглетний перехід  $S_1 \rightarrow S_2$  - корисний канал) і без випромінювання (триплет-синглетний канал  $-T \rightarrow S$  шкідливі втрати) **рис. 3**.

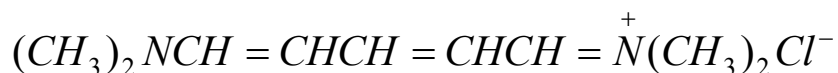
При збудженні одного електрона, якщо його спіні залишається антипаралельним спіну частини молекули, яка залишилась, то говорять про синглетні електронні стани ( $S_1, S_2, S_0$ ). Якщо при збудженні спіні електрона перевертається і виявляється антипаралельним спіну частини молекули, то говорять про триплетні стани ( $T_1, T_2$ ). Синглет-триплетні переходи пов'язані з перевертанням спіну і з порушенням в дипольному наближенні правила відбору  $\Delta S = 0$ , а тому менш імовірні, ніж синглет-синглетні чи триплет-триплетні.

Для хімічної будови барвників характерне поєднання бензольних, пиридінових, азінних і ін. кілець, розташованих в одній площині. Органічні лазерно-активні барвники поділяються на всім класів: ксантени, поліметіни, оксазіни, кумарини, антрацени,

азіни, фталоціаніни. Вони перелічені в міру зменшення квантового виходу. Найбільш широко використовується родамін 6G (ксантен).

1. Ксантенові барвники (арілметанові барвники; похідні 9-фенілксантена). Родамін 6G - **рис. 4**.

2. Поліметанові барвники складаються з непарного числа метанових груп ( $-CH=$ ) з електродонорними і електроакцепторними заступниками на кінцях. Найпростіший представник – хлорид тетраметилдііміда глутаконового альдегіда.



основний барвник жовтого кольору.

Зі збільшенням ланцюга на одну групу  $-CH=CH-$   $\lambda_{\max}$  зміщується на 90-144 нм в сторону більш довгих хвиль.

3. Оксазінові барвники (від червоного до синього кольору) – **рис. 5**.

4. Кумарин (найчастіше використовується кумарин-120) – **рис. 6**.

5. Антрацен (сцинтиляційні лічильники) – подразнюють шкіру, очі, шляхт дихання, слизову (**рис. 7**).

6. Акридінові барвники (жовтий) (**рис. 8**).

7. Азінові барвники (від червоного до чорного) похідні від феназіна (**рис. 9**).

Фталоціанінові барвники (від червоного до зеленого)  $M(Pt, Fe, Bi, Co, Ni, Cu, Al, Sr, Mg)$ . Висока стійкість фарбування.

Оскільки стала часу переходу збуджених частинок на триплетний рівень (30-50) нс, то протягом дії імпульсів накачування  $\sim$  (10-20) нс лише невелика частина збуджених частинок перейде на триплетний рівень і не зробить внесок в процес генерації. Основна частина збуджених частинок в цей час буде переходити на нижній рівень з випромінюванням по каналу вимушеного процесу.

ЛБ генерують в діапазоні від УФ до ІЧ області (0.2-1.3 мкм) (від 1000 нм – ТРС- перхлорат до 420 нм – карбостирил-165). Число барвників перевищило 200 і їх продовжують створювати. Ширина смуг люмінесценції у барвників велики – 100 нм; ширина лінії генерації 0.01 нм і менше. В межах смуги люмінесценції можна плавно змінювати лінію генерації. ККД ЛБ  $\sim$  1%.

### **Лазери, які перебудовуються (ЛП).**

ЛП називають квантові генератори, у яких тим чи іншим методом можна плавно змінювати довжину хвилі генерації. У певному розумінні ЛП можна класифікувати за трьома типами.

*До першого типу* відносяться лазери, довжину хвилі випромінювання яких змінюють за допомогою таких факторів як температура, тиск, зовнішнє електричне поле. До цього типу відносяться НЛ.

*Другий тип лазерів* – лазери з широкою смугою робочого переходу і перебудова довжини хвилі випромінювання відбувається в межах цієї смуги за допомогою внутрішньо-резонаторних дисперсійних елементів. До цього типу відносяться лазери на основі органічних барвників, лазери на центрах фарбування, лазери на стиснутих газах і деякі твердотільні лазери і ін.

*Третій тип* – параметричні генератори світла. Тут перебудова довжини хвилі генерації зумовлена нелінійно-оптичними ефектами. Свіп-лазери змінюють довжину хвилі в самому процесі генерації.

### **Комбінаційні лазери (КЛ).**

КЛ називаються лазери з когерентним (лазерним) накачуванням, заснованим на використанні явищ вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) і вимушеного розсіювання Мандельштама-Брілюєна (ВРМБ).

### **Лазери на вільних електронах (ЛВЕ).**

Принципи дії ЛВЕ полягають у тому, що пучок електронів з певною швидкістю і енергією має інверсну заселеність по відношенню до електронів з меншою швидкістю руху. Таким чином, якщо змінити швидкість або траєкторію руху електрона, то можна отримати когерентне випромінювання на будь-якій довжині хвилі. Але з технічних причин реалізувати таку ідею дуже складно. Лише в 1972 році це було зроблено на основі використання релятивістського електронного пучка з просторово-періодичним магнітним і електричним полем.

Розглянемо принцип дії ЛВЕ з системою періодично розташованих магнітів – рис. 10. Вільний електрон, як відомо, при русі з прискоренням випромінює електромагнітну хвилю. Якщо створити систему, скажімо, просторово змінного магнітного поля,

перпендикулярно вектору напруженості якого рухається електрон, то внаслідок дії сили Лоренца напрям руху пучка електронів буде змінюватись. Напрямок дії сили Лоренца буде змінюватись з періодом реверсування магнітного поля  $l$ , в результаті чого електрон рухатиметься по криволінійній траєкторії зі знакозмінним прискоренням. У відповідності з цим він випромінюватиме електромагнітні коливання з частотою, пропорційною частоті зміни знаку. Довжина хвилі цього випромінювання визначається:

$$\lambda = \frac{l}{2\gamma^2}; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E_{\text{рух}}}{E_{\text{спок.}}}$$

де  $\gamma$  - релятивістський коефіцієнт, чисельно рівний відношенню енергії електрона, який рухається, до енергії електрона в стані спокою (0.5 MeV);  $l$  - просторовий період зміни напрямку магнітного поля. Отже, змінюючи енергію електрона, який рухається, можна змінювати довжину хвилі випромінювання, тобто отримати лазер з перебудовою. Якщо в ЛВЕ період магнітного ондулятора (система знакозмінних магнітних полів) практично не може бути меншою 3 см, то це означає, що для перебудови від міліметрової до ультрафіолетової області спектра треба змінювати енергію електронів від 2 до 150 MeV. На прискорювачах, де енергія електронів доходить до 20 GeV ( $\gamma = 4 \cdot 10^4$ ), можна отримати випромінювання на  $2 \cdot 10^{-3}$  нм, тобто в області жорсткого ультрафіолету.

Складність і прецизійність системи випромінювання зумовлює обмеженість експериментальних робіт. Разом з тим кількість теоретичних робіт зростає дуже швидко. Системи на вільних електронах сьогодні працюють на  $\lambda = 3.4$  мкм (енергія електронів 24 MeV, імпульс тривалістю 4 нс і потужністю 7 кВт (середня потужність 0.36 кВт);  $\lambda = 1.5$  мкм, потужність імпульсу 8 МВт (енергія електронів 150 MeV);  $\lambda = 5$  см, потужність  $\sim 15$  МВт (енергія електронів 150 MeV). ККД цих систем  $10^{-2}\%$  внаслідок високих вимог до монохроматичності (однорідності по швидкості) пучка електронів.

Технічна складність реалізації лазерів на вільних електронах зумовила їх кількість. Параметри їх далекі від теоретично можливих.

### Деякі питання термінології.

Випромінювання лазера відбувається при переходах між певними енергетичними рівнями активних центрів, які називаються робочими рівнями – стартовим і фінішним. Віднесені до одиниці об'єму активного середовища заселеності робочих рівнів (густина заселеності) позначимо через  $n_k$  (нижній) і  $n_i$  (верхній) робочий рівень. Різниця їх  $\Delta n$  рівна:

$$\Delta n = n_i - \frac{q_i}{q_k} \cdot n_k \left[ \text{см}^{-3} \right].$$

Тут  $q_i$  і  $q_k$  - кратність виродження відповідних рівнів (вона також часто позначається літерою  $g_{i,k}$ ).

Якщо  $\Delta n > 0$ , то має місце інверсія активного середовища. Оскільки  $\Delta n$  є в загальному випадку функцією часу і простору  $n = f(\bar{r}, t)$ , то поняття інверсії може відноситись до певних проміжків часу і певних областей активного середовища.

При термодинамічній рівновазі справедливий розподіл Больцмана:

$$n_i = \frac{q_i}{q_k} n_k e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

Отже, при термодинамічній рівновазі  $\Delta n < 0$ , а для інверсії необхідно перевести активне середовище в нерівноважний стан. Створення інверсії в активному середовищі є необхідною умовою для реалізації генерації лазера.

Коефіцієнтом підсилення  $\alpha$  називається величина:

$$\alpha = -\sigma n \cdot \left[ \text{см}^{-1} \right]$$

де  $\sigma \cdot \left[ \text{см}^{-2} \right]$  - поперечний переріз вимушених переходів між робочими рівнями. Таким чином, для підсилення необхідно  $n > 0$  і

$\alpha < 0$ , оскільки, згідно з законом Бугера  $I = I_0 e^{-\alpha d}$  ( $d$  – [см] товщина шару середовища).

Для створення і підтримання інверсії використовуються різноманітні методи збудження середовища.

Вибір методу накачування для даного активного центру суттєво впливає на величину ККД лазера. В ідеальному випадку енергетичний ККД лазера буде максимальним і рівним відношенню енергії  $h\nu_{\text{випр.}}$  фотона, який випромінюється, до енергії  $h\nu_{\text{збуд.}}$ , що потрібно для збудження одного активного центру:

$$\eta_{\text{кв.}} = \frac{h\nu_{\text{випр.}}}{h\nu_{\text{збуд.}}}$$

Величину  $\eta$  частіше називають квантовим виходом лазерного переходу. Реально далеко не вся потужність накачування поглинається активним центром, а частина її просто втрачається. Це враховується коефіцієнтом втрат  $\gamma$ , який враховує всі втрати енергії накачування, і тоді:

$$\eta = \gamma \frac{h\nu_{\text{випр.}}}{h\nu_{\text{збуд.}}}$$

Отже, чим ближче  $\nu_{\text{збуд.}}$  до  $\nu_{\text{випр.}}$ , тим вищий, при інших рівних умовах, буде ККД, що добре видно з **рис. 11**.

Звичайно, в газових лазерах на атомних переходах  $h\nu_{\text{збуд.}} \sim 10 \div 20$  еВ ( $80000-160000$  см<sup>-1</sup>) і величина  $\eta \sim 0.1$ . Штрихові рівні є додатковими (паразитними), оскільки вони можуть в процесі накачування збуджуватись, забираючи частину енергії, а також слугувати каналами релаксації активних центрів. Все це зменшує ККД лазера, типове значення якого  $10^{-3} \div 10\%$ .

В цьому плані переваги має схема **б рис. 11**. Але у випадку **б** зменшується швидкість релаксації по очищенню нижнього рівня, в зв'язку з чим вводять додаткові гази, які забезпечують непружні зіткнення, за рахунок яких прискорюється очищення рівня 2. В такому випадку говорять про лазери із зіткненням Лазери на  $\text{CO}_2$  відносяться до цього типу.

Механізми збудження можуть бути оптичними, за рахунок непружних зіткнень з допоміжними атомами і молекулами. При цьому допускається, що має місце резонансний механізм передачі енергії. Можливе рекомбінаційне накачування – збудження рівнів в

результаті рекомбінації електронів і іонів, електронів і дірок в спеціально підготовленій плазмі; можливе хімічне накачування – збудження рівнів виникає в процесі спеціально підібраних екзотермічних хімічних реакцій; теплове накачування – збудження рівнів за рахунок нагріву чи охолодження активного середовища.

Очищення (релаксація) рівнів, в першу чергу фінішного, відбувається внаслідок різних фізичних ефектів. Можливе радіаційне очищення за рахунок спонтанного випромінювання. Реалізація цього механізму визначається правилами відбору і енергетичною відстанню  $h\nu$  між рівнями (стартовим  $i$  та фінішним  $K$ ) – **рис. 12**. Чим більша величина  $h\nu$  між фінішним і основним рівнями, тим вища імовірність радіаційного очищення і тим ефективніше буде працювати лазер. Непружні зіткнення з вільними електронами, при яких кінетична енергія вільного електрона зростає (електронне де збудження) покращують очищення нижнього рівня.

При непружних зіткненнях з допоміжними атомами і молекулами відбувається передача енергії від активного центру до атома (молекули). При цьому може мати місце резонансний чи газо кінетичний механізм. В першому випадку відбувається збудження певних рівнів атомів (молекул), а в другому – зростає кінетична енергія атомів (молекул).

Зняття збудження можливе при адіабатичному розширенні газового середовища, тобто, коли енергія збудження активних центрів переходить в кінетичну енергію частинок газу, який розширюється.

Хімічне дезбудження відбувається за рахунок використання ендотермічних реакцій.

Відмітимо, що в іонних лазерах важливе швидке радіаційне очищення нижніх робочих рівнів; в молекулярних і електроіонізаційних – важлива релаксація нижніх робочих рівнів за рахунок непружних зіткнень, а в газодинамічних – за рахунок адіабатичного розширення газу. Треба також зауважити, що для лазерів, які працюють в режимі неперервної генерації, очищення нижніх рівнів має першорядне значення, а в імпульсних лазерах важливе значення має заселення робочих рівнів. В ексимерних лазерах фінішний рівень відсутній і тому автоматично знімається проблема його очищення.