



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних
технологій

Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії
та електротехніки

Конспект лекцій
з дисципліни
«ЛАЗЕРИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В МЕДИЦИНІ ТА
БІОЛОГІЇ»

Для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форми навчання, спеціальностей:
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Харків
2024

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних
технологій
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії
та електротехніки

Конспект лекцій
з дисципліни
«Лазери та їх застосування в медицині та біології»

**Для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форми навчання, спеціальностей:
163 Біомедична інженерія**

Затверджено рішенням Науково-методичної ради
Факультету ФЕРКТ
Протокол № 1
від 31.10.2023 р.

Харків
2024

УДК 621.3

Е11

Схвалено
на засіданні кафедри
електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки

Протокол № 2
Від 25.09.2023

Конспект лекцій з дисципліни “Лазери та їх застосування в медицині та біології” для здобувачів першого (бакалаврського) РВО, денної та заочної форми навчання спец. 163 Біомедична інженерія. / Держ. біотехнол. у-т; упоряд.: М.Л. Лисиченко, Д.М. Міленін. - Харків, 2024. - 54 с.

Конспект лекцій з дисципліни “Лазери та їх застосування в медицині та біології” складені у відповідності до навчального плану. Видання включає рекомендації призначені для отримання практичних навичок в вирішенні теоретичних питань з дисципліни.

Рецензенти:

О.О. Мірошник, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету;

М.Ю. Середин, консультант з обслуговування та ремонту електронного обладнання бурового верстату, бурового управління “УКРБУРГАЗ”.

Відповідальний за випуск : С.І. Литвиненко, завідувачка лабораторією .

© М.Л. Лисиченко, Д.М. Міленін упорядкування, 2024

© ДБТУ, 2024

Вступ

1. Класифікація лазерів:

- за типом активного середовища:
 - *твердотільні;*
 - *газові;*
 - *рідинні;*
 - *напівпровідникові;*
 - *плазмові.*

- за типом накачування:
види накачування:
 - оптична;
 - електричний розряд у газах;
 - електроіонізаційна;
 - теплова (газодинамічна);
 - хімічна.

2. Твердотільні лазери.

Твердотільні лазери – це лазери, які використовують кристалічний чи аморфний діелектрик.

Основні особливості твердотільних лазерів:

- висока концентрація частинок: до 10^{19} і навіть до 10^{21} см^{-3} ;
- високий питомий енергознімання;
- генерація при малих довжинах;
- оптична однорідність (поступається газовим лазерам);
- ширина лінії люмінесценції (одиниці Å° - десятки Å°),
- Основний тип накачування – оптичне накачування.

Активне середовище твердотільних лазерів:

Матриця (основа) + активатор (домішка).

Активатор зазвичай від часток до кількох відсотків по відношенню до матриці.

Принцип дії твердотільних лазерів.

У 2-х рівневій системі оптичним накачуванням інверсію не створити.

Насправді використовують 3-х чи 4-х рівневі системи.

Як рівень 3 в 3-х рівневої схеми, і рівня 4 в 4-х рівневій схемі можуть використовуватися кілька рівнів.

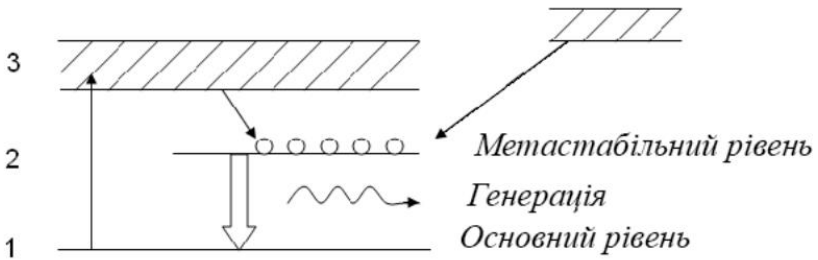


Рисунок 1 – Трьох рівнева система

Нижчим порогом генерації має 4-х рівнева схема.

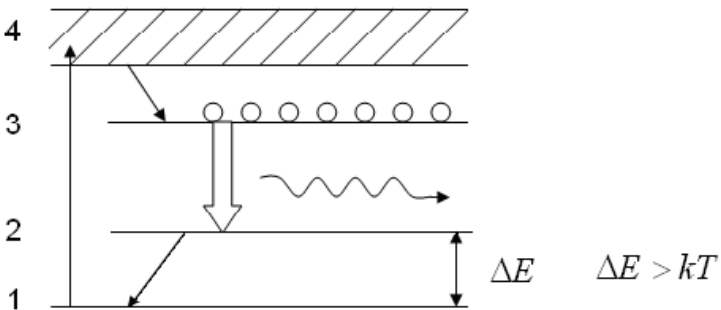


Рисунок 2 – Чотирьох рівнева система

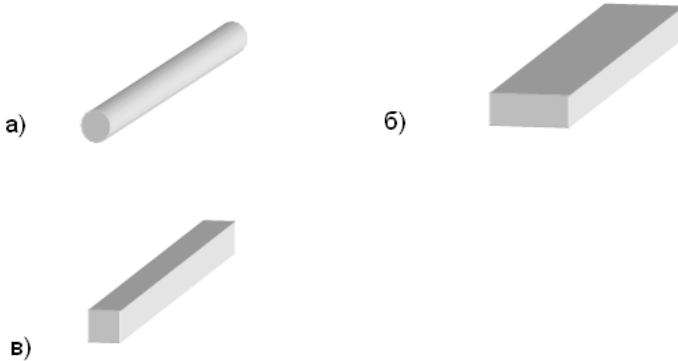
Як *матриці* використовується широкий клас речовин, зокрема, солі вольфрамової, молібденової та плавикової кислот (H_2WO_4 , H_2MoO_4 , HF), корунд Al_2O_3 , ітрієві гранати $\text{Y}_3\text{Me}_5\text{O}_{12}$ (де $\text{Me} - \text{Al}, \text{Cu}, \text{Fe}$), наприклад $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ - ІАГ, скла різних складів.

Як *активатор* – хром, кобальт, нікель, титан, а також багато рідкісноземельних елементів.

Приклади ефективних лазерних середовищ:

Al_2O_3 : Cr^{3+} ; $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Nd^{3+} ; CaF_2 : Nd^{3+} ; скло: Nd^{3+} і т.д. (Див. довідник).

Активні елементи твердотільних лазерів мають різні форми:



Найчастіше використовується форма а).

Системи оптичного накачування твердотільних лазерів.

Система оптичного накачування призначена для створення інверсії в активних середовищах.

Використовується як когерентне (лазерне) накачування, так і некогерентне (лампове).

У разі некогерентного (лампового) накачування, система оптичного накачування складається з *джерела оптичного випромінювання* (спеціальної лампи), *освітлювача* (відбивача) та *електричного блоку живлення*, що живить джерело оптичного випромінювання.

Наприклад, система оптичного накачування може включати такі елементи:

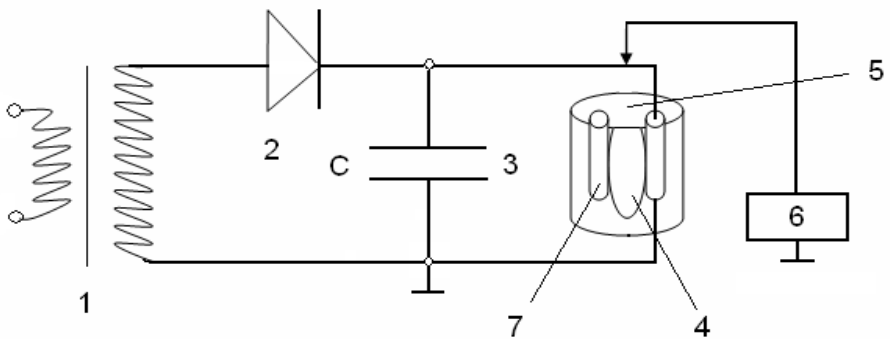


Рисунок 3 – Система оптичного накачування

1. підвищує транзистор;
2. випрямляч;
3. ємність (ємнісний накопичувач);
4. лампа накачування;
5. освітлювач;
6. система запалювання імпульсної лампи;
7. активний елемент.

Використовуються спеціальні імпульсні лампи та лампи безперервного світіння.

Енергія накачування $E_n = \frac{CU_c^2}{2}$ не повинна бути більшою за

граничну енергію для лампи.

$U_c < U_{пр}$, де $U_{пр}$ - напруга самопробою лампи.

Система запалювання (б) управляє моментом початку накачування (розряду в лампі).

Лампи накачування найчастіше мають форму циліндра з електродами (рисунок 4). Так як лампа випромінює на всі боки, дуже мала частка її випромінювання потрапляє на активний елемент (рисунок 5). Тому необхідний відбивач (освітлювач), який направив по можливості велику частку випромінювання на активний елемент. Прикладами таких освітлювачів є еліптичний циліндр (рисунок 6) та круговий циліндр (рисунок 7), внутрішні поверхні яких мають високі коефіцієнти відбиття.



Рис. 4



Рис. 5

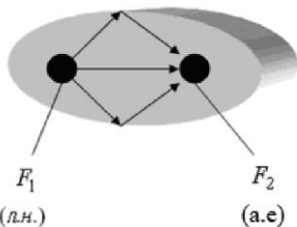


Рисунок 6 – Еліптичний циліндр, вздовж фокальних ліній якого розташовуються лампи накачування (л.н.) та активний елемент F_1, F_2 – фокальні точки

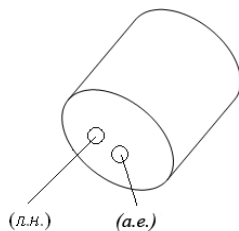


Рисунок 7 – Кварцовий циліндр, уздовж осі якого розташовують лампа накачування (л.н.) та активний елемент (а.е.)

У разі потужних лазерів потрібно багатолампове накачування та елемент великого діаметру. На рисунок 8 схематично показаний прикмет такої системи, вздовж центральної осі якої розташований активний елемент (а.е.), а вздовж фокальних ліній напівеліпсів - лампи накачування (л.н.):

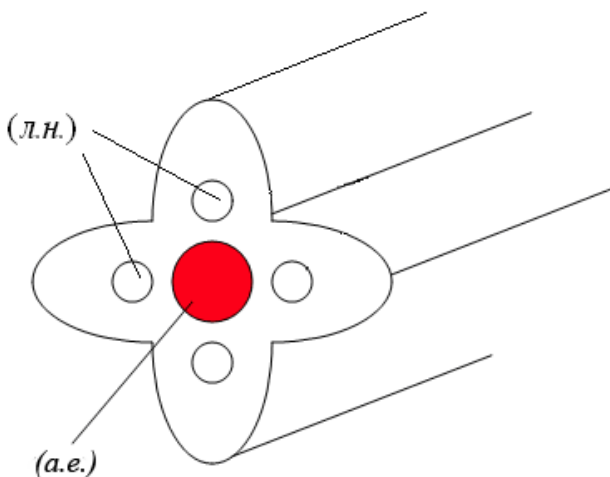


Рисунок 8 – Приклад багатолампового накачування активного елемента (а.е.)

Система накачування має забезпечувати:

- високу ефективність передачі випромінювання від лампи накачування до активного елемента;
- високу однорідність (рівномірність) накачування обсягом активного елемента (як у довжині, і у поперечному перерізі).

Нерівномірність оптичного накачування активного елемента (особливо у поперечному перерізі), призводить до термооптичних спотворень внаслідок нерівномірності його нагрівання, і сильно впливає на характеристики випромінювання лазерів (поріг генерації, кутову розбіжність, енергію випромінювання) і навіть може призводити до зриву генерації. Термооптичні спотворення виникають через залежність коефіцієнта заломлення від теплопередачі та нерівномірності її в активному елементі.

Поява термооптичних спотворень, еквівалентно зміни конфігурації резонатора, так як оптична довжина резонатора дорівнює $L_0 = L \cdot n(T)$.

У твердотільних лазерах сильно проявляються термооптичні ефекти, оскільки показник заломлення n сильно залежить від температури T . На *рисунок 9* показаний випадок, коли центральна область активного елемента має більш високу температуру (заштрихована) порівняно з периферійною областю.

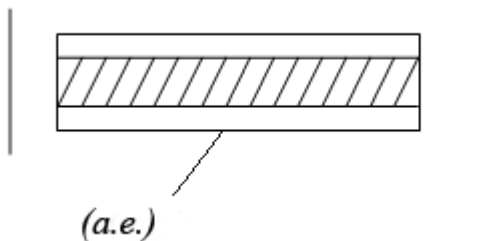


Рисунок 9 – Приклад нерівномірного нагріву активного елемента (а.е.)

На *рисунок 10* показаний можливий випадок нерівномірного накачування (а, отже, температури) активного елемента при

ізо­троп­но­му освітленні його циліндричної бічної поверхні. Циліндричний активний елемент веде себе як циліндрична лінза.

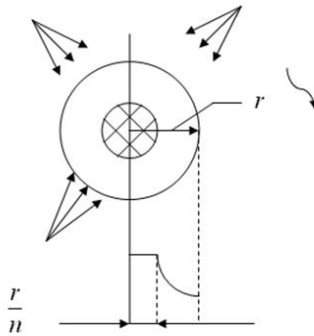


Рисунок 10 – Приклад нерівномірного накачування циліндричного активного елемента при ізо­троп­но­му освітленні його бокової поверхні

До появи термооптичних спотворень твердотільних лазерів призводить, окрім нерівномірності накачування, охолодження бічної поверхні, оскільки теплопровідність обмежена, і центральна частина активного елемента матиме більшу температуру, ніж бічна поверхня.

Для збільшення рівномірності накачування використовується, зокрема, так звана імерсійна оболонка.

$$r_{a.c.} = \frac{r_{u.o.}}{n}$$

Вона збільшує і щільність енергії накачування в активному елементі, оскільки зростає розмір поперечного перерізу, «захоплюючого» випромінювання накачування.

Одним з недоліків твердотільних активних елементів з полірованою бічною поверхнею є утворення в них паразитних типів коливальних мод, що «шепотять», приклади яких показані на *рисунок 12*. Ці моди можуть виникати за рахунок повного відображення поверхонь активного елемента і призводять до значного погіршення характеристик випромінювання.

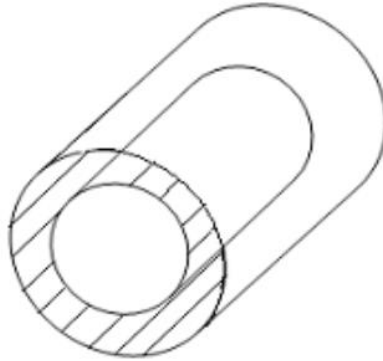
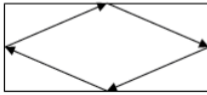


Рисунок 11 – Імерсійна оболонка (і.о.)



Кільцеві поперечні «шепчуння моди»



Поздовжні «шепотіння моди»

Рисунок 12 – Приклади «шепчучи мод»

Це шкідливе явище «з'їдає» інверсію та зменшує енергію генерації у напрямку основного випромінювання, тобто погіршує характеристики випромінювання.

Для боротьби з ним використовують імерсійні оболонки, а так само роблять шорсткою бічну поверхню (повністю або частково – смужка та кільця) активного елемента.

Недолік лампової накачування – її спектр значно ширший за смуги поглинання (*рисунок 13*).

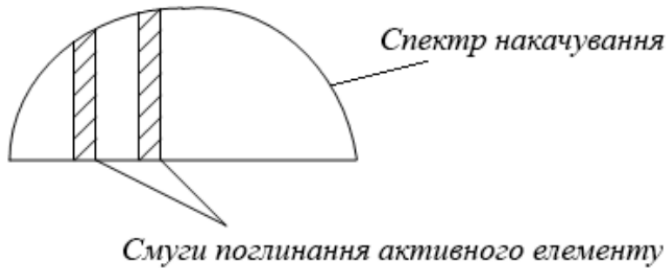


Рисунок 13 – Співвідношення спекту випромінювання ламп накачування та смуг поглинання активного елемента

При когерентному (лазерному) накачуванні можна ідеально узгодити випромінювання накачування зі смугами поглинання.

Когерентне накачування є найефективнішим з погляду узгодження спектрів. Для когерентного накачування твердотільних лазерів найбільш широко використовуються напівпровідникові лазери. Приклад такого накачування показаний на *рисунок 14*.

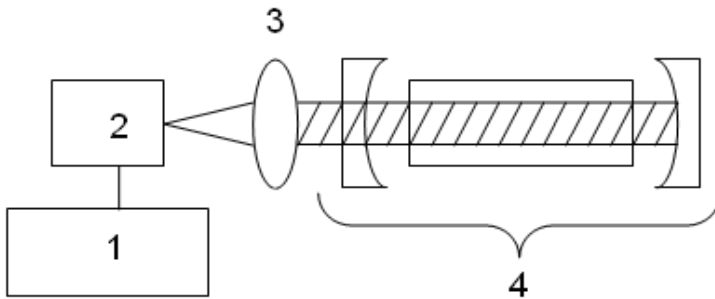


Рисунок 14 – Приклад когерентного накачування твердо тільних лазерів

1. блок живлення напівпровідникового лазера;
2. напівпровідниковий лазер;
3. узгоджувальна оптика;
4. накачуваний т.т. лазер.

Розглянемо як приклад робочі схеми деяких твердотільних лазерів.

Лазер на рубіні.

Активним середовищем лазера є $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ - рубін, де як активні центри використовуються іони хрому Cr^{3+} , введеного в якості активатора в матрицю Al_2O_3 . Лазер працює за трирівневою схемою, показаною на рисунку 15.

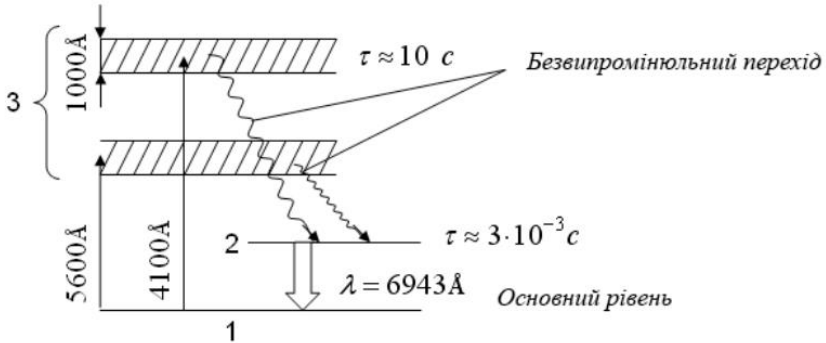


Рисунок 15 – Схема робочих рівнів рубинового лазера (Схема рівнів Cr^{3+} в решітці Al_2O_3)

Енергія генерації в імпульсі – до 100 Дж.

Лазер на неодимовому склі.

Активним середовищем лазера є скла різних складів, де як активні центри використовуються іони неодиму Nd^{3+} , введеного в якості активатора в скляну матрицю, лазер якої працює за чотирирівневою схемою, показаною на рисунку 16.

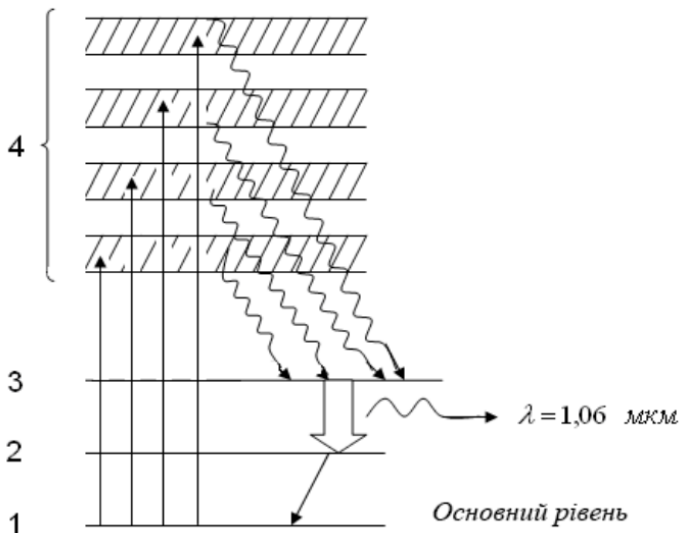


Рисунок 16 – Схема робочих рівнів лазера неодимовому склі
(Схема рівнів Nd^{3+} в скляній матриці)

Лазер на ІАГ.

Активним середовищем лазера є $Y_3 Al_5 O_{12} : Nd$ - ітрій - алюмінієвий гранат, де як активатор використовуються іони неодиму (Nd^{3+}), введеного в ІАГ як активатор. Робота лазера аналогічна лазеру на неодимовому склі. Лазер працює за чотирирівневою схемою.

Можлива генерація у безперервному режимі (до 500 Вт-1кВт).

Твердотільні мікролазери.

Мініатюрні лазери на твердому тілі можуть бути реалізовані при великій концентрації частинок - до 10^{21} см^{-3} (десятки - сотні разів більше, ніж в ІАГ та склі). Накачування здійснюється світлодіодами або напівпровідниковими лазерами (когерентне накачування).

Матеріали, що дозволяють вводити високу концентрацію активатора:

- петнофосфат неодиму $NdP_5 O_{14}$;
 - тетрофосфат неодиму калію $KNdP_4 O_{12}$;
 - борат неодима-алюмінію $NdAl_3 (BO_3)_4$;
 - тетрофосфат літію неодиму $LiNdP_4 O_{12}$;
- Потужність у імпульсі – кілька Вт, $\tau \approx 40 - 80 \text{ нс}$.

Можуть забезпечувати одномодовий режим генерації, конкурують із напівпровідниковими лазерами. Можуть працювати у стабільному одночастотному режимі, забезпечують високу когерентність та монохроматичність випромінювання, мала залежність від температури.

- гадоліній-скандій-галієві гранати (ГСГГ) та ін.

В області скла найперспективнішими вважаються скла КНФС (літій-неодим-лантан-фосфатне скло). Концентрація Nd до 10^{21} см^{-3} .

Твердотільні лазери, що перебудовуються.

Твердотільні лазери, що перебудовуються, поділяють на 3 групи:

1. Кристали активовані іонами перехідних елементів.

Приклади:

- Олександрит $BeAl_2O_4: Cr^{3+}$ (0.70-0.82 мкм);
- $Al_2O_3: Ti^{3+}$ (0.68-0.93 мкм);
- $KZn_3: Cr^{3+}$ (0.78-0.86 мкм);
- $ZnWO_4: Cr^{3+}$ (0.9-1.1 мкм).

2. Лазери на центрах фарбування (ЛЦО).

Центрами забарвлення (ЦО) називаються дефекти кристалічних ґрат, що поглинають світло в спектральній області, де власне поглинання кристала відсутня (*рисунок 17*).

Дефекти кристалічних ґрат:

- вакансії (віддалені з вузлів кристалічних ґрат іони);
- міжвузельні іони;
- домішкові атоми;
- іони.

Центри фарбування мають різні позначення, що відповідають типу дефекту. Так, наприклад, центри, зумовлені аніонними вакансіями, що захоплюють електрони, називають центрами f .

Працюють за 4-х рівневою схемою, мають низький порог збудження, широкосмуговий спектр поглинання і люмінесценції.

На *рисунок 17* показано можливу структуру енергетичних рівнів твердотільного лазера на центрах фарбування.

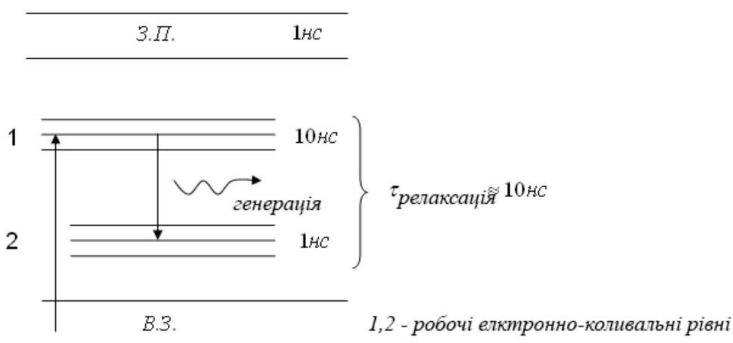


Рисунок 17 – Спрощена схема рівнів твердотільного лазера на центрах фарбування

Безперервні лазери використовують лазерне накачування. Лазери на ЦО можуть генерувати субнаносекундні імпульси.

Розбудова 0.7-3.3мкм.

- LiF (0.62-1.25мкм);
- NaF (0.99-1.4мкм);
- RbCl:Li (2.55-3.28 мкм)

В даний час вдосконалюються лазери на дорогоцінному та напівдорогоцінному камінні (алмаз, сапфір, олександрит)

3. Твердотельно-рідинні лазери .

Твердотільні лазери отримали широке застосування у багатьох галузях науки і техніки, зокрема, й у медицині.

Широко використовуються (зокрема) у медицині імпульсні лазери на ІАГ:

- з гольмієм *Ho* ($\lambda = 2.1$ мкм);
- з ербієм *Er* ($\lambda = 2.79-2.9$ мкм) -найкраще поглинання у воді;
- з тулією *Tm* ($\lambda = 1.96-2.01$ мкм).

У хірургії, крім того:

- ІАГ: ($\lambda = 1.06$ мкм);
- ІАГ: ($\lambda = 1.32$ мкм);
- КДР-532 ($\lambda = 0.532$ мкм).

Основою для створення широкого спектру медичних лазерів можуть служити кристали хромовмісних скандієвих гранатів:

- ІСГГ: Cr - Nd (ітрій-скандій-галієвий гранат).

Мініатюрні лазери на основі ербієвого скла (хром-ітербій-ербієве скло)

ЛГС-Х $\lambda = 1.54 \mu\text{мкм}$.

Газові лазери.

Газовими лазерами називаються лазери, активне середовище яких у газоподібному стані. Це можуть бути власне гази або пари рідких або твердих речовин.

Основні особливості:

- висока однорідність активного середовища;
- високий ступінь монохроматичності та когерентності випромінювання як наслідок меншого взаємовпливу частинок.

Через лінійчасті спектри (вузьких смуг) поглинання оптичне накачування використовується рідко.

Найбільшого поширення набула накачування з допомогою електричного розряду (як самостійного, і несамостійного), і навіть хімічна накачування і теплова (газодинамическая).

Конструкція активного середовища є кюветою (наприклад, трубкою), в якій є газове середовище, а вікна кювети часто нахилені під кутом Брюстера до осі кювети для зменшення френелівських втрат на вікнах (див. *рисунок 18*).

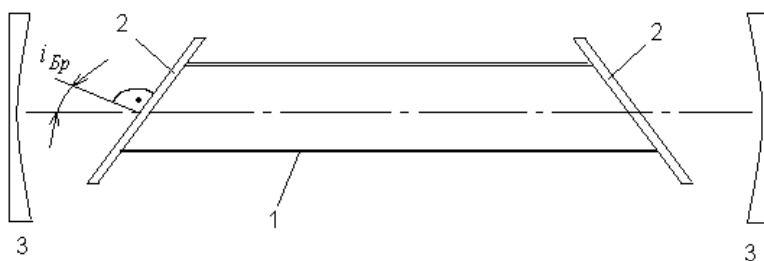


Рисунок 18 – Конструктивна схема газового лазера

1. кювета заповнена газом.
2. Вікна Брюстера (встановлені під кутом Брюстера i_{Br}).
 $i_{Br} = \arctg n$
3. де n - відносний показник заломлення матеріалу вікон.

При цьому випромінювання, поляризоване в площині падіння, не зазнаватиме френелівського відображення на вікнах і для нього в резонаторі будуть найменші втрати. Саме на цій поляризації генеруватиметься випромінювання, тобто випромінювання при цьому буде *лінійно поляризоване*.

Газові лазери поділяються на:

- атомарні (використовуються нейтральні атоми);
- молекулярні (використовуються нейтральні молекули);
- іонні (використовуються іони).

Залежно від виду накачування газові лазери поділяються на:

- Газоелектро розрядні (самостійний електричний розряд)
- Електроіонізаційні (несамостійний електричний розряд)
- Газодинамічні (теплове накачування)
- Хімічні (хімічне накачування)

Механізми створення інверсії у газорозрядних лазерах.

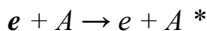
Газовим розрядом називається сукупність процесів, пов'язаних із проходженням електричного струму через газоподібне середовище.

У разі розряду утворюється газорозрядна плазма (особлива середовище), котрій характерна значна концентрація заряджених і збуджених частинок.

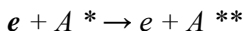
У газових лазерах використовується розряд, що тліє, і дуговий. Використовується накачування за допомогою постійного струму як безперервного, так і імпульсного, а також високочастотне збудження.

До порушення частинок та утворення інверсії наводять такі процеси:

- Пряме електронне збудження (непружні зіткнення електронів з частинками)



- ступінчасте електронне збудження



Крім цих процесів у разі використання допоміжних (домішних) газів зазначені процеси можуть доповнюватися збудженням основного

газу за рахунок зіткнень та резонансного обміну енергією між частинками допоміжного та основного газів:

$$e + B = e + B^*$$
$$B^* + A = B + A^*$$

де A - Частки основного газу.

B – частки допоміжного газу (домішного газу).

Цей механізм значно збільшує ефективність створення інверсії у газорозрядних лазерах, оскільки дозволяє селективно заселяти верхні робочі (лазерні) рівні.

Крім того, домішкові гази використовуються для більш ефективного охолодження, розвантаження нижніх лазерних рівнів (наприклад, He в лазері на CO_2).

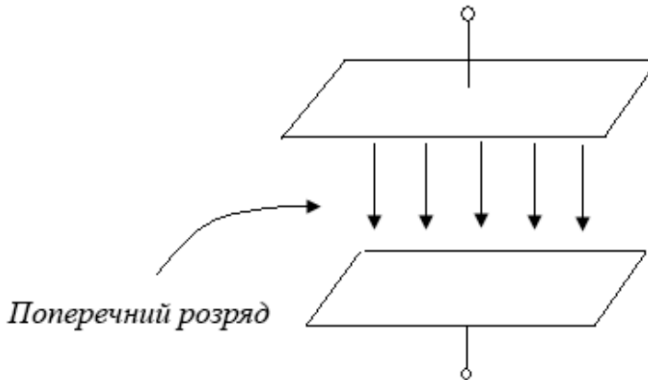


Рисунок 19 – Схема електродів із поперечним розрядом

Газові лазери використовують як поздовжній, і поперечний електричний розряд.

Лазери з підвищеним тиском (до атмосферного та більшого) використовують *поперечний електричний розряд*, а низького тиску (одиниці, десятки тор), як правило, *поздовжній розряд*.

Для охолодження робочої суміші газові лазери використовують як *поздовжній*, так і *поперечний* продув газу, причому *поперечний продув* є більш ефективним, оскільки зміна суміші відбувається швидше, ніж при продувці вздовж кювети (див. рисунок), так як ширина кювети значно менша за її довжину. : $h \ll l$.

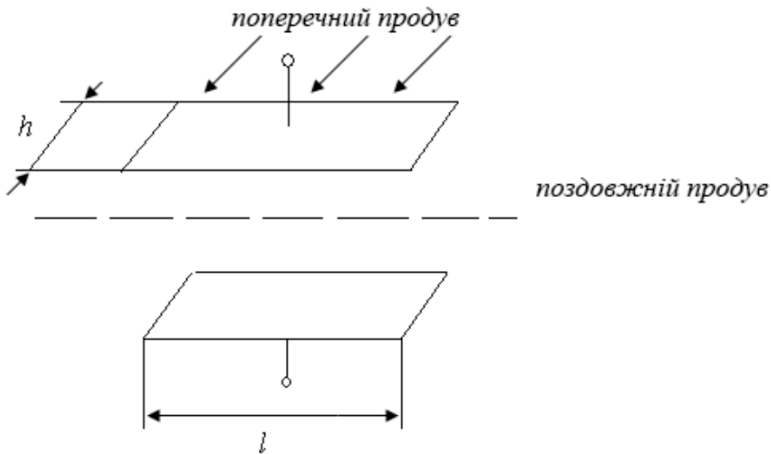


Рисунок 19 – Поздовжній та поперечний продув

Газові лазери *підвищеного тиску* використовують *поперечний електричний розряд* і *поперечний продув* і позначаються як ТЕА лазери.

Для забезпечення рівномірного електричного розряду у всьому об'ємі робочої суміші ТЕА лазерів використовується *система передіонізації*, що створює в робочому об'ємі газу достатню кількість заряджених частинок (електронів та іонів) перед поданням основної напруги між електродами.

Для преіонізації ТЕА лазерів використовуються електронні гармати, УФ-випромінювання, ковзний розряд.

Чим більший тиск газу, тим більша концентрація активних частинок в одиниці об'єму і, відповідно, більший питомий енергознімання.

У лазерах *низького тиску* розширення лінії випромінювання визначається, в основному, ефектом Доплера і носить неоднорідний характер, а при значних тисках превалюють процеси зіткнення, що визначають однорідне розширення.

Таким чином, *характер розширення лінії випромінювання залежить від тиску газу.*

У *атомарних* лазерах використовуються *електронні переходи* (переходи між електронними рівнями), а *молекулярних*, переважно – переходи між *коливальними і обертальними рівнями*.

Молекулярні лазери дають найбільш довгохвильове випромінювання, оскільки використовують переходи між коливальними та обертальними рівнями: енергія переходів між якими

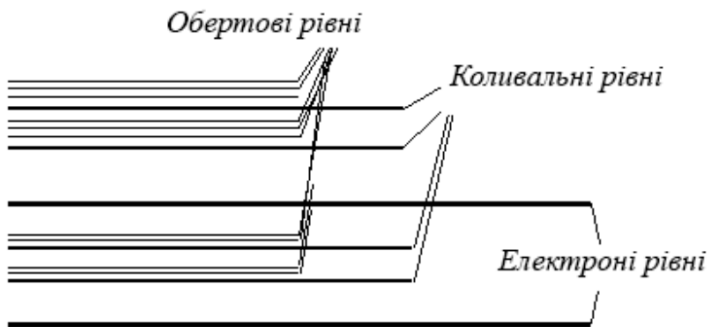


Рисунок 21 – Структура енергетичних рівнів молекул

значно менша, ніж між електронними рівнями: $\Delta E_{el} \ll \Delta E_{do} \ll \Delta E_{вр}$.

Характеристики випромінювання газових лазерів залежать як від загального тиску газу, так і від парціальних тисків компонентів суміші (їх співвідношення) – основного та допоміжного газу.

У іонних лазерах необхідно використовувати *високі густини струму*, т.к. крім збудження іонів необхідно створити їхню високу концентрацію з нейтральних атомів.

Особливістю електроіонізаційних лазерів є можливість забезпечення оптимальних значень енергій електронів для порушення необхідних рівнів енергії, що неможливо реалізувати у лазерах із самостійним електричним розрядом. Пояснимо це.

У газорозрядних лазерах енергія електронів витрачається як створення провідної плазми, і на збудження активних частинок. При цьому оптимуми енергії цих двох функцій різні. Поділ цих функцій здійснюється в електроіонізаційних лазерах, які використовують несамостійний заряд.

Розглянемо як приклад деякі типи газорозрядних лазерів.

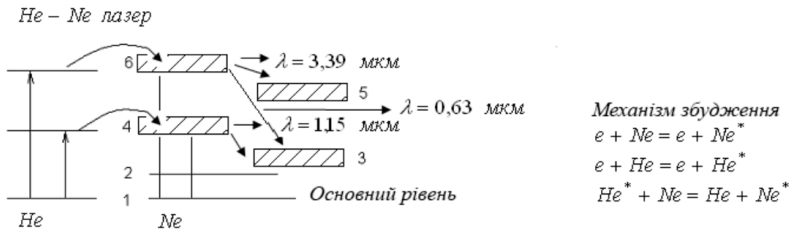


Рисунок 22 – Схема рівнів He – Ne лазера

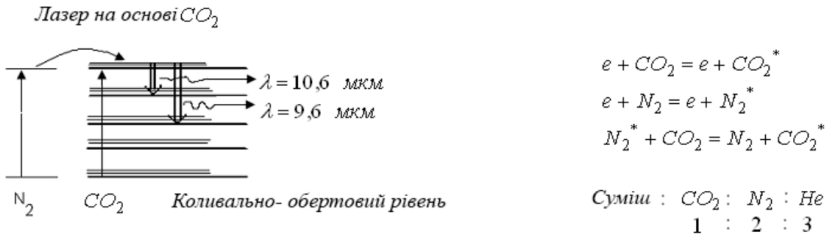


Рисунок 23 – Схема рівнів лазера на основі CO₂

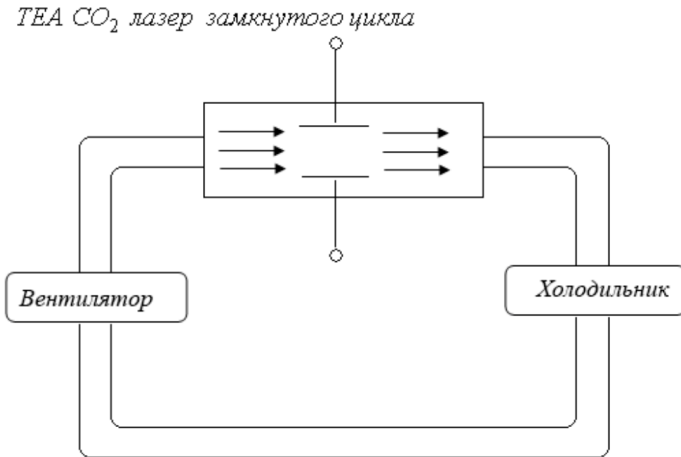


Рисунок 24 – Конструктивна ТЕА лазери замкнутого циклу

Іонні лазери.

Лазер на Ar^+

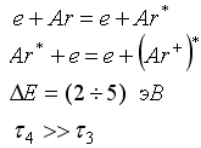
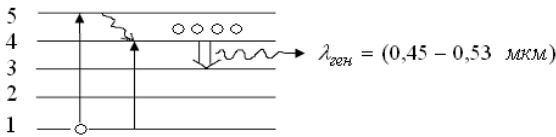


Рисунок 25 – Схема рівнів Ar^+

Кювета - капіляр (для отримання більших щільностей струму при невеликих його значеннях).

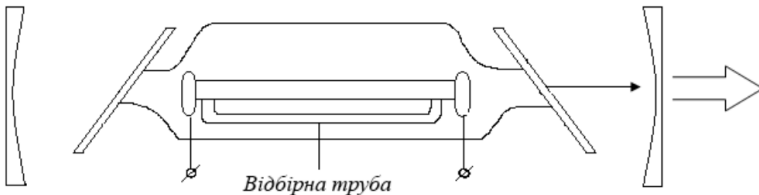


Рисунок 26 – Конструктивна схема аргонного лазера

Як активне середовище в газових лазерах широко використовуються CO_2 , N_2 , CO , H_2 , HF , HCl , NO_2 та багато інших молекул.

Ексімерні лазери

(Лазери на розлітних молекулах).

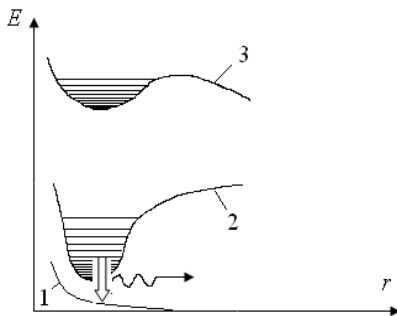
Особливістю ексімерних лазерів є *генерація в області УФ і видимій ділянці спектра*.

Як *активне середовище* в них використовуються *квасимолекули* або *ексімерні комплекси атомів*, що з'являються і існують тільки в збудженому стані.

Лазерне випромінювання виникає під час переходу ексімерного комплексу зі збудженого стану (2) в незбуджене (1), після чого вони розпадаються на атоми.

Працюють ексимерні лазери на електронно-коливальних переходах таким чином, коли молекула потрапляє на рівень (1), де немає потенційної ями, вона розпадається на атоми.

Активне середовище на розлітних молекулах – середовище з нижнім робочим рівнем, що постійно пустує.



1,2,3 – електронні стани розлітної молекули

Рисунок 27 – Схема електронно-коливальних рівнів ексимерних комплексів

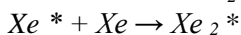
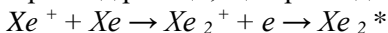
До ексимерних молекул відносяться такі молекули, як:

Ar_2^* , Xe_2^* , Kr_2^* , ArO^* , KrO^* , XeO^* , XeF^* та ін.

Працюють ексимерні лазери при підвищеному тиску (до 10 атм.) підвищення ймовірності утворення молекул.

Порушення проводиться пучком високоенергетичних електронів (сотні кеВ - 1МеВ), електричним розрядом, швидким поперечним розрядом та оптичним збудженням.

Приклад реакції, що призводить до утворення молекул:



Тривалість імпульсу збудження – кілька десятків нс.

Газодинамічні лазери

Такими лазерами називаються лазери, інверсія населення яких створюється шляхом швидкого розширення попередньо нагрітої газової суміші.

Джерелом енергії служать коливально збуджувані молекули сильно нагрітому газі, а посилення виникає рахунок відмінності у швидкостях процесів релаксації нижнього і верхнього лазерних рівнів під час закінчення газу через надзвукове сопло. Цей унікальний тип

лазера є прямим перетворювачем теплової енергії на енергію когерентного випромінювання.

Таким чином, *інверсія населення в газорозрядному лазері забезпечується нагріванням та швидким розширенням робочого газу.*

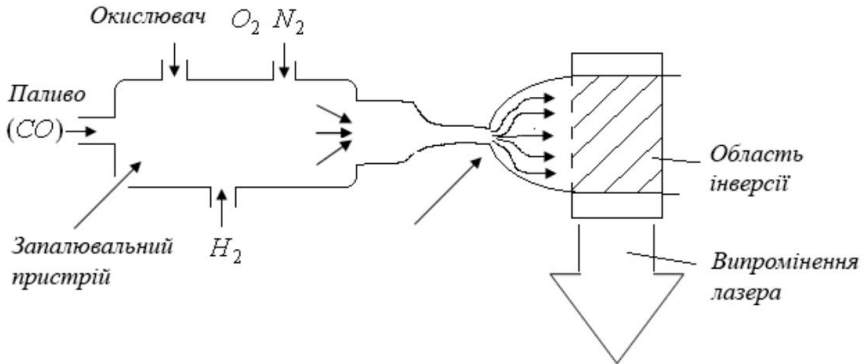


Рисунок 28 – Конструктивна схема газодинамічного лазера

$N_2 : CO_2 : H_2O$
91,3% 7,5% 1,2%

Активні центри - молекули CO_2 ; t до $1500\text{ }^\circ\text{C}$.

До сопла:

<u>Верхній лазерний рівень</u>		<u>Довгоживучі рівень</u>
9%		9%
<u>Нижній лазерний рівень</u>		
17%		
<u>Основний рівень</u>		<u>Основний рівень</u>
74%		91%
CO_2		N_2

Рисунок 29 – Розподіл населеностей рівнів до сопла

За соплом внаслідок різкого розширення газів та падіння температури розподіл атомів за рівнями має релаксувати до нового рівноважного стану, що відповідає нижчій температурі (близько 300°C).

При новій температурі (за соплом):

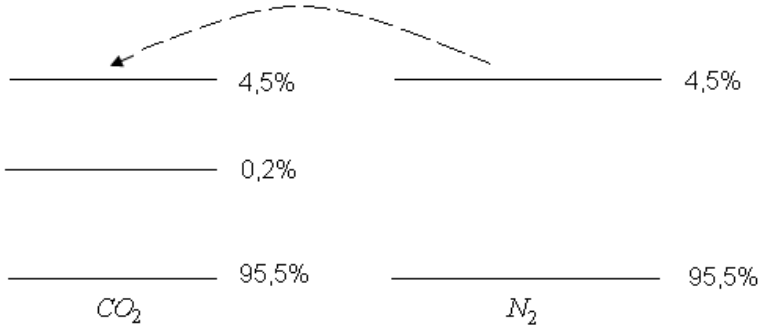


Рисунок 30 – Розподіл населеності рівнів за соплом

Потужність такого лазера визначається витратою газу.

Попереднє збудження (нагрів) може забезпечуватись і хімічними реакціями, і електричним розрядом.

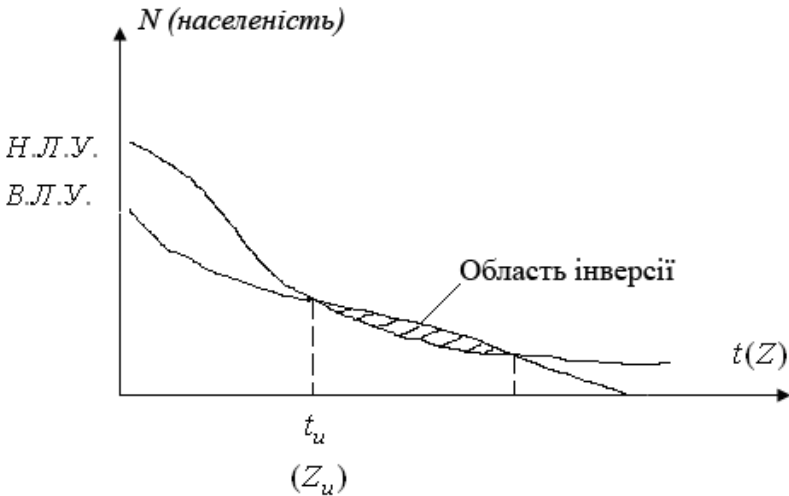


Рисунок 31 – Динаміка зміни населеності верхнього та нижнього лазерних рівнів молекул CO_2 після виходу з сопла

t_u - Момент появи інверсії.

$Z_i = t_i \cdot V_{газу}$ - Відстань від сопла, де починається область інверсії.

$V_{газа}$ - швидкість закінчення газу.

Хімічні лазери.

Хімічні лазери - це лазери, у яких збудження та інверсія населення досягається рахунок здійснення хімічних реакцій. Зв'язки перебудовуються таким чином, що компоненти опиняються у збудженому стані.

Розрізняють 2 види хімічних лазерів:

- з ініціюванням хімічної реакції, коли для забезпечення умов, необхідних для протікання хімічної реакції потрібно попереднє збудження реагентів, що вступають у реакцію (дисоціація, фотодисоціація, нагрівання). Це призводить до необхідності спеціальних пристроїв, що ініціюють;
- хімічна реакція виникає мимоволі при змішуванні компонентів (без ініціювання). Генерація хімічних лазерів обумовлена появою інверсії між коливально-обертальними або обертальними рівнями двоатомних молекул, що утворюється в результаті хімічної взаємодії.

Приклад хімічного лазера без ініціювання хімічної реакції:

$H_2 + F = HF^* + HF$ - атомарний фтор .

$(D_2)(DF^*)$

$F_2 + NO \rightarrow ONF + F$ - так одержують атомарний фтор в результаті хімічної реакції.

HF^* - коливальна збуджена молекула.

$V = 1 \dots 6$

$\lambda = (3,5 \div 5,0)$ мкм

Існує велика кількість хімічних лазерів (див. Літературу).

Рідинні лазери

Рідинні лазери - це лазери, де як активне середовище використовуються рідкі середовища.

У зв'язку з цим вони мають низку особливостей:

- не обмежений обсяг активного середовища;

- більш висока оптична однорідність, порівняно з твердими тілами;
- можливість більш високої концентрації активних центрів, порівняно з газами, що дозволяє генерувати високі потужності;
- легко вирішується проблема тепловідведення, тому що рідину можна прокачувати через робочий об'єм;
- Форма активного елемента визначається формою кювети, що заповнюється рідиною.

Наприклад:

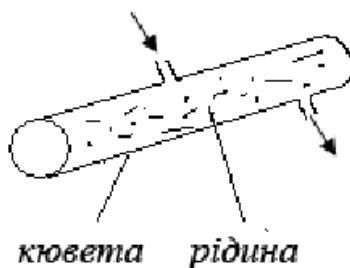


Рисунок 31 – Форма активного елемента рідинного лазера

Залежно від типу активного середовища рідинні лазери поділяються на 3 типи:

1. *Лазери на розчинах рідкоземельних хелатів* (складні органічні комплекси, в яких іони рідкісноземельних елементів знаходяться в оточенні атомів кисню, що належать органічній молекулі);
2. *Лазери на розчинах неорганічних сполук рідкісноземельних елементів* (Типові іонні системи). Відрізняються високою ефективністю та фотохімічною стійкістю (наприклад, розчин окису неодиму в оксихлорид селену $\text{Nd}(\text{SeOCl}_2)$). Робота аналогічна твердотільному лазеру на неодимовому склі.
3. *Розчини органічних фарбників*. Ці лазери найбільш широко поширені та дають можливість перебудови довжини хвилі в широкому діапазоні довжин хвиль (від УФ до ІЧ).

Активне середовище рідинних лазерів складається з розчинника та розчиненої в ньому активної речовини.

Як розчинник використовуються різні речовини, наприклад, такі як:

- дистильована вода;
- спирти;
- кислоти;
- гліцерин;
- ацетон.

У лазерах на розчинах органічних барвників використовуються органічні барвники, які становлять великий клас складних органічних сполук, який на відміну інших лазерних матеріалів характеризується широкою смугою люмінесценції (до 0,2 мкм) і має нестійкий верхній лазерний рівень (тривалість збудженого стану $10^{-8} \div 10^{-9}$ с).

Лазерне випромінювання отримано на барвниках, що належать до 3 груп:

1. Ксантонові барвники;
2. Поліметинові барвники;
3. Похідні кумарину.

В даний час широко використовуються, зокрема, такі барвники:

Родамін 6 G (λ - 0,55 мкм) I

Родамін G (λ - 0,585 мкм) I Розчинник -

Родамін В (λ - 0,608 мкм) I етиловий спирт.

Акрідон (λ - 0,437 мкм) I

та ін. (Див. довідкові матеріали).

Основні фізичні ставлення до механізмі генерації розчинів барвників.

На початку, при створенні рідинних лазерів намагалися отримати генерацію як у твердих тілах. Вводили домішкові іони, шукали вузькі енергетичні рівні (метастабільні), вводили елементи рідкісних земель, залізо тощо. Генерація була дуже неефективною.

Потім зрозуміли, що якщо рівні досить широкі, можна отримати генерацію і в дворівневій системі, що неможливо, якщо рівні вузькі, так як при цьому неможливо здійснити інверсію.

Отже, основна особливість лазерів на барвниках – використання двох рівнів значної ширини.

Молекули барвника дуже складні і мають широкі енергетичні рівні (смуги). Смуга - це широкий рівень, що складається з величезної

кількості підрівнів. На наведеній нижче схемі зображено нижні електронно-коливальні рівні молекули барвника.

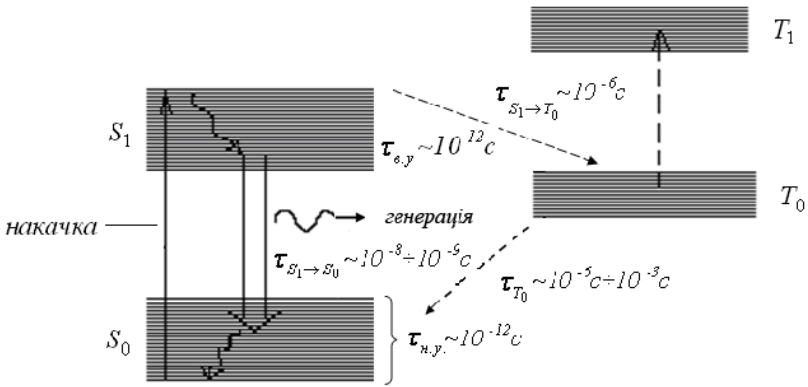


Рисунок 33 – Нижні електронно-коливальні рівні молекули-барвника

$\tau_{в.у.}, \tau_{н.у.}$ – час внутрішньої релаксації;

S – синглетні рівні (мають скомпенсовані спини);

T – триплетні рівні (мають некомпенсований спин).

Найімовірніші переходи синглет-синглет, ніж синглет-триплет, оскільки останні пов'язані з переорієнтацією спина. Переорієнтація спина пов'язана із зіткненнями частинок.

S_0 : $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow$ скомпенсований

S_1 : $\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow$ спин

T_0 : $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow$ некомпенсований спин

Накачування роблять з нижньої частини смуги S_0 у верхню частину смуги S_1 . При цьому порушується тепла рівновага (розподіл Больцмана) як між рівнями $S_1 - S_0$ так і між підрівнями всередині кожної зі смуг S_1 і S_0 . Час релаксації між рівнями S_1 і S_0 становить $\sim 10^{-8} \div 10^{-9} c$ (час міжрівневої релаксації) і значно більше, ніж час релаксації між підрівнями смуги S_0 та смуги S_1 , яка становить $\sim 10^{-12} c$ (час внутрішньорівневої релаксації).

Таким чином, час міжрівневої релаксації $S_1 S_0$ значно більше часу внутрішньорівневої релаксації в смугах S_1 і S_0 .

Ця обставина дозволяє отримувати інверсію населення між нижньою частиною смуги S_1 і верхньою частиною смуги S_0 при впливі накачки, описаної вище. При цьому генерація можлива в широкому

діапазоні довжин хвиль, відповідних переходів між різними підрівнями нижньої частини смуги S_1 і верхній частині смуги S_0 і можлива перебудова довжин хвиль, що генеруються, в широкому діапазоні!

Звернемо увагу на те, що тривалість імпульсу накачування повинна бути короткою і не перевищувати час релаксації $S_1 \rightarrow T_1$, тому що в іншому випадку молекули почнуть переходити на рівень T_0 потім піднімаються на рівень T_1 і генерація припиниться, оскільки молекули не повернуться у вихідний стан S_0 .

Таким чином, хоча в даному випадку використовуються 2 рівні (але широкі), генерація відбувається як у чотирирівневій схемі з усіма її перевагами.

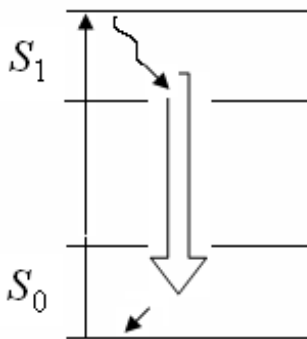


Рисунок 34 – Аналог 4х рівневої схеми

Додаткове пояснення:

На *рисунок 35* пунктирною лінією показано розподіл частинок до початку накачування (рівноважний розподіл Больцмана), а суцільними лініями, то розподіл, який встановлюється всередині смуг S_1 ; S_0 після накачування за час внутрішньорівневої релаксації і свідчить про факт виникнення інверсії між частиною поду S_0 .

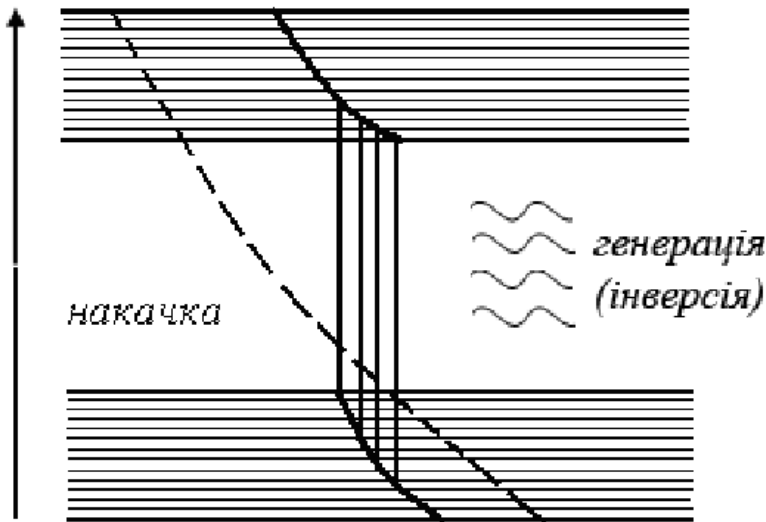


Рисунок 35 – Розподіл часточок до та після накачки

Способи збудження (накачування) рідинних лазерів .

Лазери на розчинах барвників працюють з оптичним накачуванням .

Важливою особливістю є те, що імпульс не повинен перевищувати час міжрівневої релаксації. $S_1 \rightarrow T_0$, тобто не більше 10^{-6} з . При короткому імпульсі переходи $S_1 \rightarrow T_0$ не встигають проявитися. Для накачування використовують як лазери (лазерне накачування), що зазвичай працюють в режимі модуляції добротності (генерації $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с), так і спеціальні лампи накачування (зокрема, коаксіальної конструкції, що мають малу індуктивність), що випромінюють короткі імпульси .

При лазерному накачуванні (наприклад, за допомогою рубінового лазера) з модуляцією добротності (особливо, для фталоціанінових барвників), неодимового лазера з модуляцією добротності (для поліметинових барвників), азотного лазера ($\lambda \sim 3000\text{Å}$) розрізняють 2 варіанти:

1. Поздовжнє накачування :

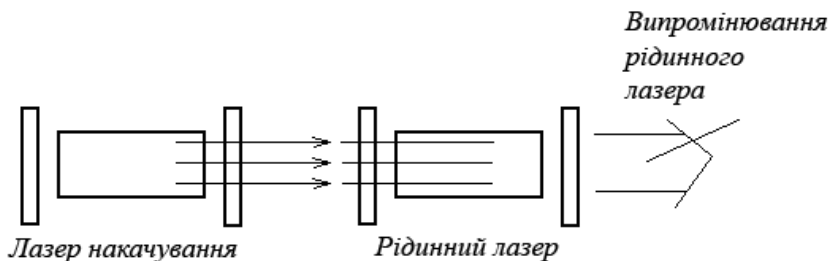


Рисунок 36 – Поздовжнє лазерне накачування

2. Поперечне накачування :

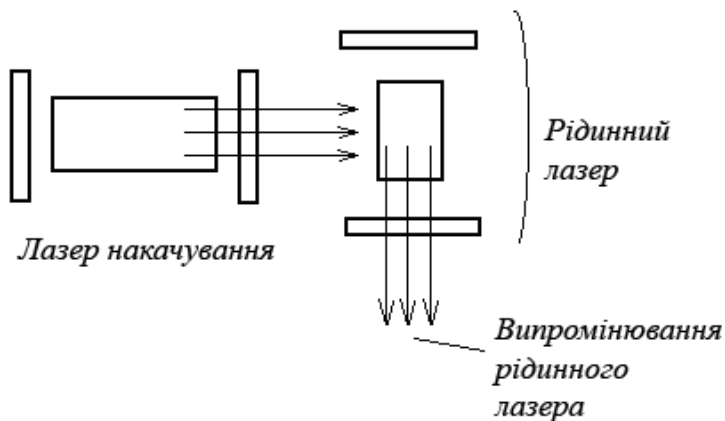


Рисунок 37 – Поперечне лазерне накачування

При ламповому накачуванні використовують, зокрема, коаксіальні лампи:

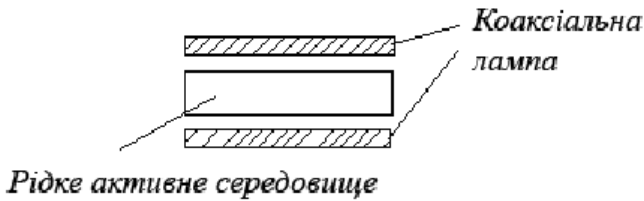


Рисунок 38 – Лампа накачування

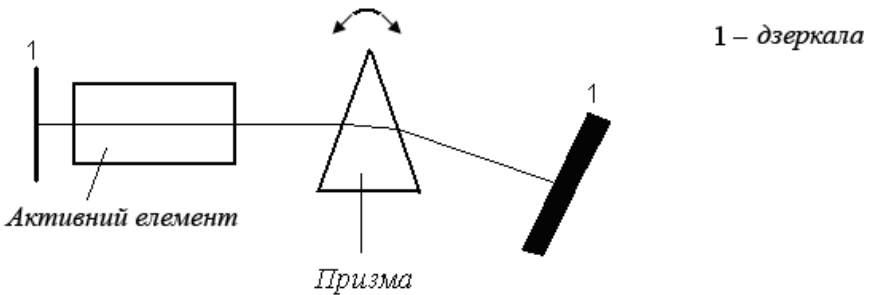


Рисунок 39 – Рідкісний лазер з використанням призми

Основною перевагою рідинних лазерів на розчинах барвників є легкість управління частотою випромінювання та перебудова їх у широкому діапазоні. Найбільш ефективний метод – використання дифракційної ґрат або призми.

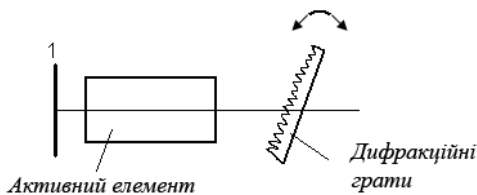


Рисунок 40 – Рідинний лазер з використанням дифракційної решітка

При цьому вдається отримати випромінювання з $\lambda \sim 1\mu$ з діапазоном перебудови сотні (навіть до 1000). За допомогою двох змінних кюветів можна перекрити весь спектр від УФ до ІЧ.

З цього погляду ці лазери – неперевершені джерела. Ці лазери характеризуються високим коефіцієнтом підсилення та невеликим порогом накачування.

Недоліки – високе значення термооптичного коефіцієнта.

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЛАЗЕРИ.

Напівпровідникові лазери називають такі лазери, в яких як активне середовище використовуються напівпровідники. Напівпровідники займають проміжне положення між металами та діелектриками з електропровідності.

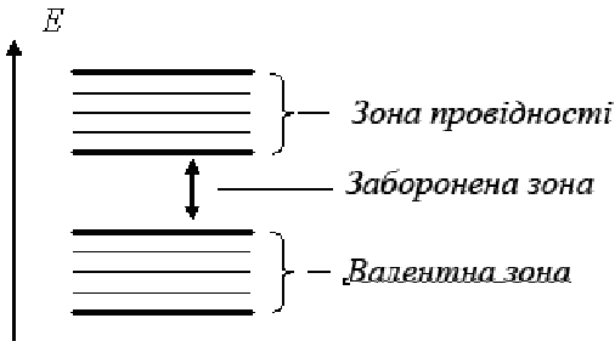
$$\rho = 10^{-4} - 10^9 \text{ КІМ/див.}$$

Перевагою напівпровідникових лазерів є малі розміри (найменшбаритні лазери), механічна міцність, високий ККД, можливість високочастотної модуляції, прийнятна потужність генерації, порівняно невисока вартість.

Діапазон довжин хвиль від УФ до ІЧ (від 0.32 до 33 мкм). Коефіцієнт посилення дуже високий: від 10^2 см^{-1} до $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$ що дозволяє отримувати генерацію при малих розмірах. Енергетичні рівні напівпровідників є широкими смугами через сильну взаємодію частинок. У кожній смузі – енергетичній зоні міститься стільки енергетичних рівнів, скільки атомів у кристалі напівпровідника.

Т.к. ширина зони 10 еВ, а число атомів $\sim 10^{22} - 10^{23}$ відстань між рівнями в зонах становить $10^{-21} - 10^{-22}$ еВ.

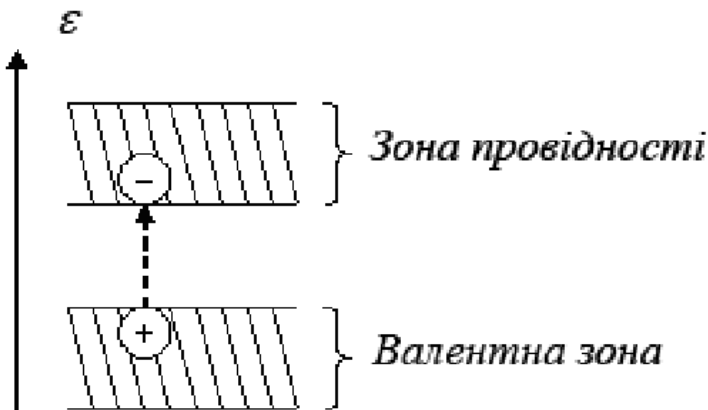
Найбільш важливими для напівпровідника є валентна зона (утворена рівнями енергії валентних електронів) і зона провідності, між якими розташована заборонена зона.



Електричні та оптичні властивості напівпровідників переважно визначаються цими зонами.

При $T=0$ всі електрони перебувають у валентній зоні, а зона провідності порожня.

При $T>0$ частина електронів переходить із валентної зони до зони провідності, але в їх місці утворюються вакансії (дірки).



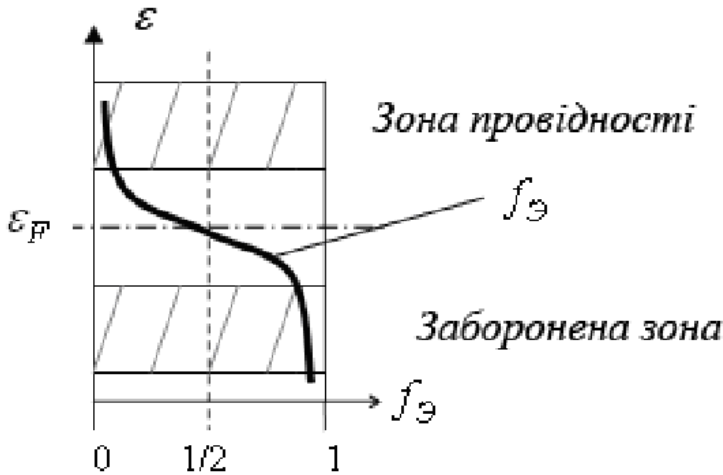
Розподіл електронів та дірок за енергетичними рівнями у рівноважному стані описується розподілом Фермі – Дірака:

$$f_{\vartheta}(\varepsilon) = \left[1 + e^{(\varepsilon - \varepsilon_F)/kT} \right]^{-1} \text{ – для електронів;}$$

$$f_{\delta}(\varepsilon) = \left[1 + e^{(\varepsilon_F - \varepsilon)/kT} \right]^{-1} \text{ – для дірок;}$$

тут ε_F – рівень Фермі, ймовірність заповнення якого дорівнює $1/2$. $f_e + f_{\delta} = 1$.

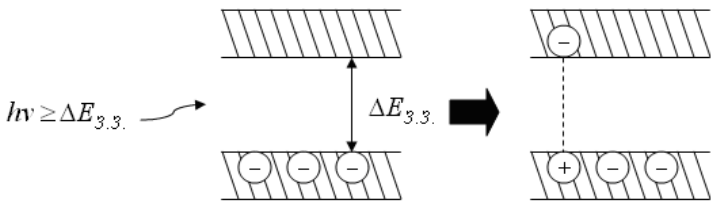
У чистому напівпровіднику рівень Фермі знаходиться посередині забороненої зони,



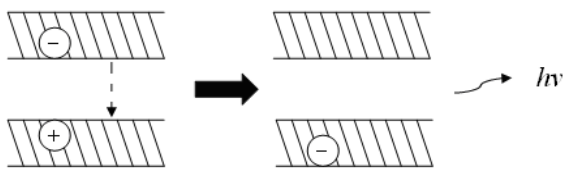
тобто, ймовірність знаходження електрона в зоні провідності менше $1/2$, так само як і дірок у валентній зоні, через що такий напівпровідник може лише поглинати оптичне випромінювання.

У напівпровідниках можливі такі оптичні процеси:

1. Поглинання випромінювання з утворенням пар електрон – дірка (якщо $h\nu \geq \Delta E_{з.з.}$, де $\Delta E_{з.з.}$ – ширина забороненої зони) (оптична генерація пар електрон-дірка).

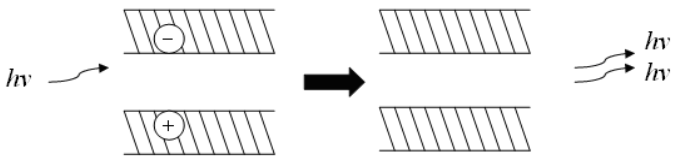


3. Рекомбінація пар електрон-дірка з утворенням оптичних квантів (фотонів) (спонтанна випромінювальна рекомбінація).



Зауважимо, що рекомбінація пар електрон-дірка може бути безвипромінною .

4. Вимушена випромінювальна рекомбінація.

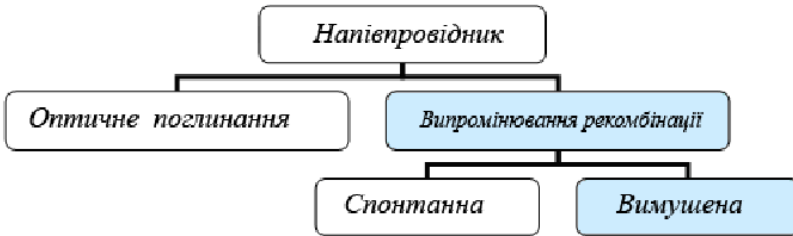


Для цього процесу необхідно, щоб енергія фотона дорівнювала енергії рекомбінації. В результаті отримуємо два кванти (вихідний і виділений), невідмінні один від одного.

Зі сказаного вище ясно, що для посилення і генерації оптичного випромінювання може бути використаний тільки цей процес.

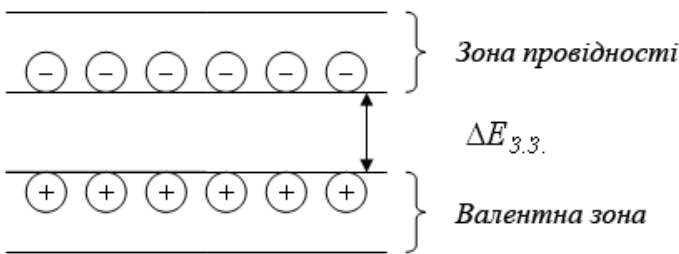
Таким чином, в основі принципу дії напівпровідникових лазерів лежить вимушена випромінювальна рекомбінація пар електрон-дірка.

Отже, у напівпровідниках мають місце 3 оптичні процеси:

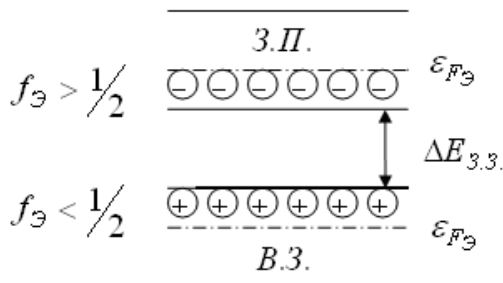


Для того щоб процес вимушеної випромінювальної рекомбінації переважав над процесом поглинання, необхідно забезпечити досить велику кількість пар електрон-дірка перед пропусканням випромінювання, що посилюється.

Це може бути досягнуто, якщо перед посиленням забезпечити велику кількість електронів у зоні провідності (поблизу її дна), та велика кількість дірок у валентній зоні (у верхній її частині):



Достатньо велика кількість означає ймовірність заповнення електронами дна зони провідності більше $\frac{1}{2}$ і ймовірність заповнення дірками верхньої частини валентної зони більше $\frac{1}{2}$, тому що тільки в цьому випадку вимушене випромінювання буде превалювати над поглинанням випромінювання, що проходить.



При цьому, якщо через такий напівпровідник пропустити випромінювання з енергією фотона $h\nu$ в межах від $\Delta E_{з.з.}$ до $\varepsilon_{F_э}$ -

$\varepsilon_{F_д}$ воно буде когерентно посилюватися за рахунок вимушеної рекомбінації, так як її ймовірність буде перевищувати ймовірність поглинання.

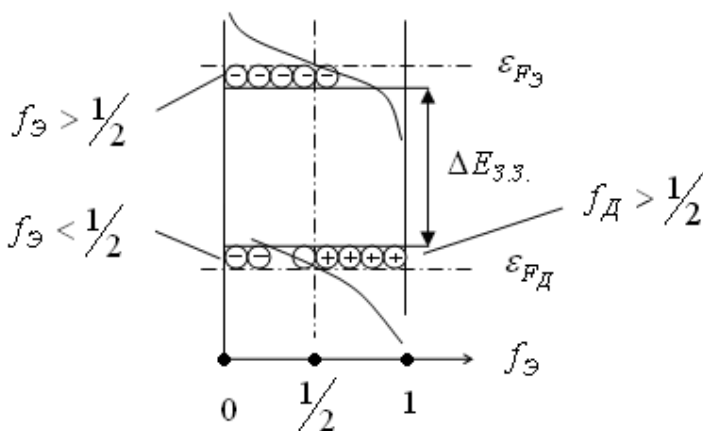
Такий стан напівпровідника називається виродженням (рівень Фермі при цьому в зоні провідності для електронів та у валентній зоні для дірок).

Отже, для отримання інверсії в чистому напівпровіднику необхідно досягти виродження електронів та дірок .

$$\varepsilon_{F_э} - \varepsilon_{F_д} > \Delta E_{з.з.}, \text{ - умова інверсії у напівпровіднику} \quad (1)$$

Напівпровідникові лазери відрізняються один від одного за способом створення інверсії населення (умова (1)) і діляться на 4 класи:

1. лазери з електронним збудженням;
2. оптичним накачуванням;
3. прямим електричним збудженням (лавинний пробій);
4. інжекційні.



Останні – інжекційні – (інжекція носіїв струму через $p - n$ перехід) найпоширеніші. У лазерах із електронним збудженням використовується накачування електронним пучком. У лазерах з оптичним накачуванням використовується накачування оптичним випромінюванням з $h\nu > \Delta E_{33}$ (див. літературу). У вказаних лазерах використовується весь обсяг напівпровідника.

Розглянемо принцип дії найпоширеніших – інжекційних лазерів.

Інжекційні лазери.

Якщо в чистий напівпровідник ввести домішки у високій концентрації (до $10^{18}-10^{19}$), можна домогтися виродження електронів і дірок. Для отримання виродженого стану електронів напівпровідник вводять донорну домішок високої концентрації, так що рівні донорної домішки розширюються і зливаються із зоною провідності, що відповідає нагоді виродження.

При великій концентрації домішок рівні донорної домішки розширюються та зливаються із зоною провідністю (З.П.). При цьому квазірівень Фермі для електронів виявиться всередині зони провідності і в нижній частині зони ймовірність заповнення електронами буде більшою $\frac{1}{2}$.

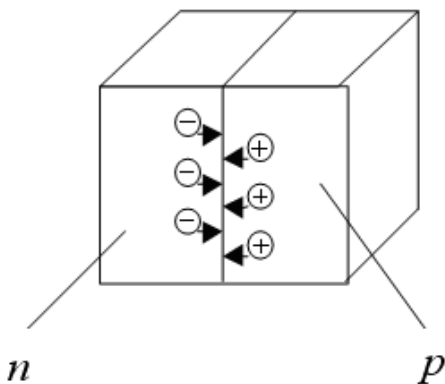
Аналогічна ситуація може бути реалізована і для дірок, якщо запровадити високу концентрацію акцепторної домішки. При цьому рівень Фермі ε_F може опинитися у валентній зоні, і ймовірність заповнення дірками верхньої частини валентної зони перевищуватиме $\frac{1}{2}$.

Однак одночасне виродження електронів і дірок, необхідне створення інверсії, в чистому напівпровіднику отримати важко.

Тому для здійснення напівпровідникового лазера надходять у такий спосіб. Приводять у контакт напівпровідник з донорною домішкою (з електронною провідністю n - напівпровідник) та напівпровідник з акцепторною домішкою (з дірковою провідністю p - напівпровідник).

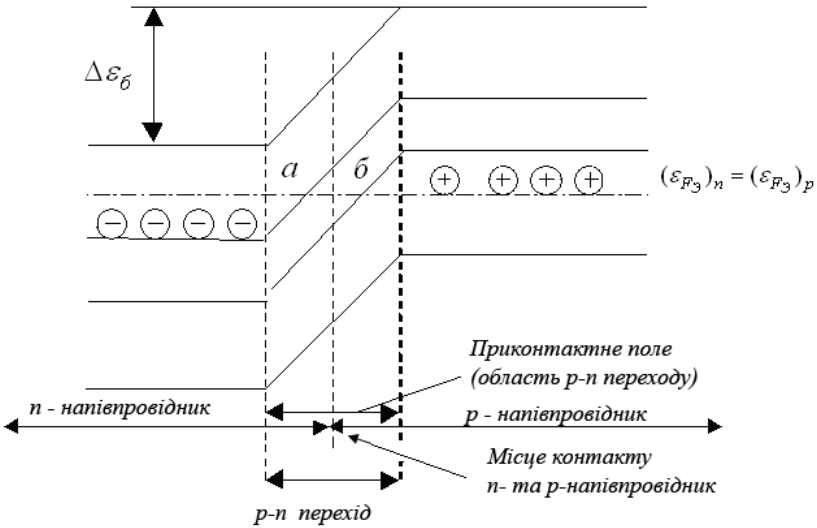
При цьому, так як концентрація електронів в n - напівпровіднику більше, ніж у p -напівпровіднику, а концентрація дірок у p - напівпровіднику більше ніж у n -напівпровіднику, електрони почнуть переходити (дифузувати) в p -область, а дірки - в n - область.

При цьому, так як до області n - і p -провідники були нейтральні, вони набуватимуть відповідного електричного заряду: область n набуватиме позитивного заряду за рахунок догляду електронів і приходу дірок, а область p -негативний заряд за рахунок відходу дірок і приходу електронів .



У місці контакту напівпровідників n - і p -типу утворюється заірне поле, що перешкоджає дальньої дифузії електронів та дірок.

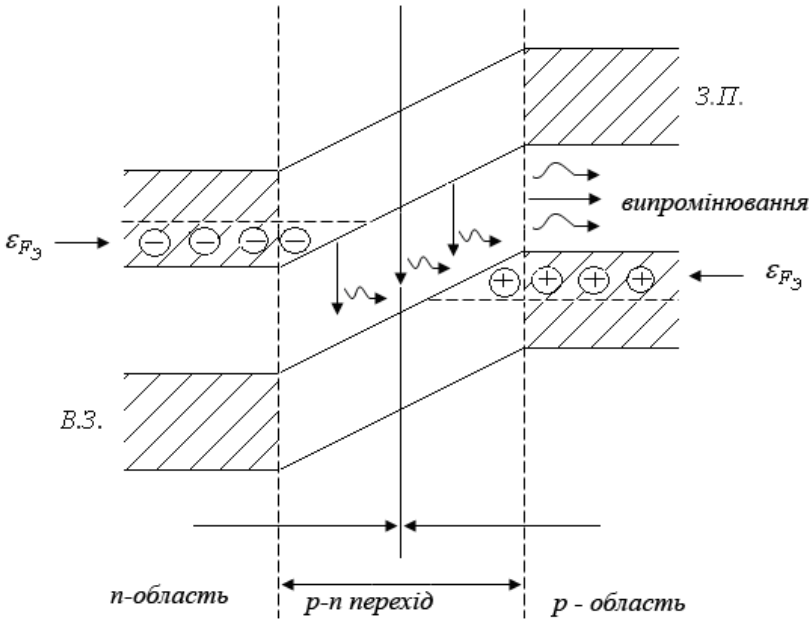
Область контакту n і p напівпровідників називається $p - n$ переходом . При контакті $n - і p -$ напівпровідників рівень Фермі буде однаковий, через що енергетичну діаграму можна зобразити так:



Як видно, в області $p - n$ переходу утворюється потенційний бар'єр $\Delta \varepsilon_\phi$, що утворює перешкоду переходу електронів з n п напівпровідник і дірок з p в n напівпровідник .

Звернемо увагу також на те, що тут немає області, де електрони та дірки були б одночасно вироджені (ці області поділяє область $p - n$ переходу, або, як мінімум, відстань між точками a і b і тому випромінювальна рекомбінація неможлива). Ситуація може якісно змінитись, якщо до $p - n$ переходу докласти пряму напругу, яка практично знімає потенційний бар'єр $\Delta \varepsilon_\phi$.

Відобразимо цю ситуацію у вигляді енергетичної діаграми при застосуванні прямої напруги



Тепер рівень Фермі для електронів ε_{Fe} в p - n області лежить вище дна зони провідності, а рівень Фермі для дірок у тій же області лежить нижче від стелі валентної зони.

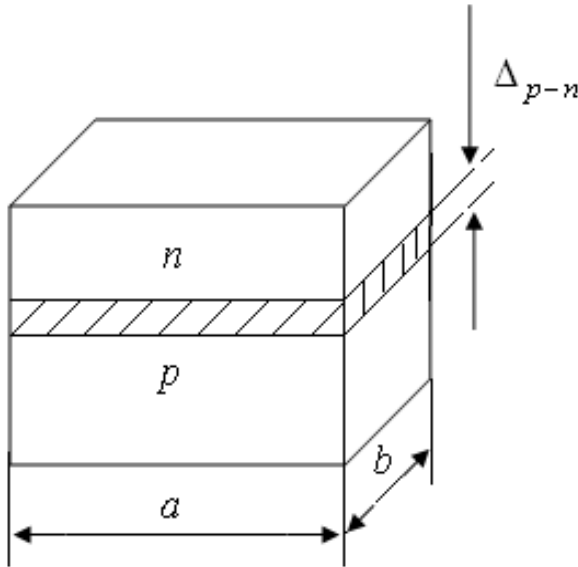
Є одночасне (в одній і тій же області (p - n перехід) виродження електронів і дірок, тобто виконується умова $(\varepsilon_F)_n - (\varepsilon_F)_p > \Delta\varepsilon_{3.3}$. де $\Delta\varepsilon_{3.3}$ - ширина забороненої зони), необхідне для посилення випромінювання (переважання вимушеної випромінювальної рекомбінації над поглинанням).

Випромінювальні переходи відбуваються у своїй лише області p - n переходу, що у рисунок показано стрілками

Під дією прикладеного поля на місце електронів і дірок, що рекомбінували, приходять нові і процес випромінювання триває, поки прикладено зовнішнє поле.

Нагадаємо, що оскільки область pn має товщину від одного до декількох мікрометрів, випромінююча область являє собою тонкий шар між n і p напівпровідниками, і випромінюючий об'єм невеликий:

$$V = \Delta_{p-n} \cdot a \cdot b.$$



Однак завдяки високій концентрації частинок i , відповідно, високому показнику посилення (до 10^5 см^{-1}) потужність генерації може виявитися досить великою, а генерація виникає при малих розмірах активного елемента ($a, b \sim 1 \text{ мм}$).

Описані механізми пояснюють принципи дії напівпровідникових випромінюючих світлодіодів, де використовується спонтанна випромінювальна рекомбінація (спонтанне випромінювання).

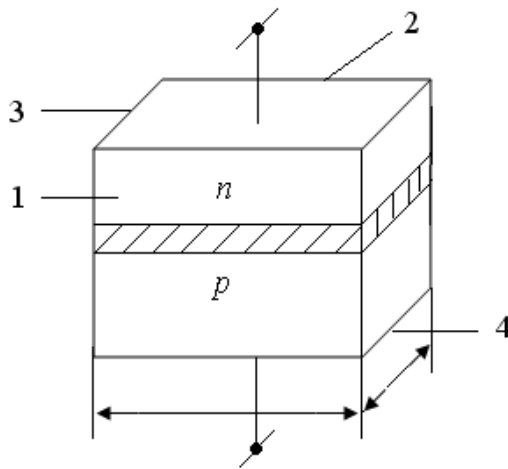
Для отримання лазерного ефекту необхідно, щоб ймовірність вимушеного випромінювання (вимушеної рекомбінації випромінювання) значно перевищувала ймовірність спонтанного випромінювання (спонтанної випромінювальної рекомбінації).

Як відомо, для того, щоб підвищити ймовірність вимушеного випромінювання, необхідно підвищити щільність поля, що викликає вимушені переходи, що досягається застосуванням резонатора.

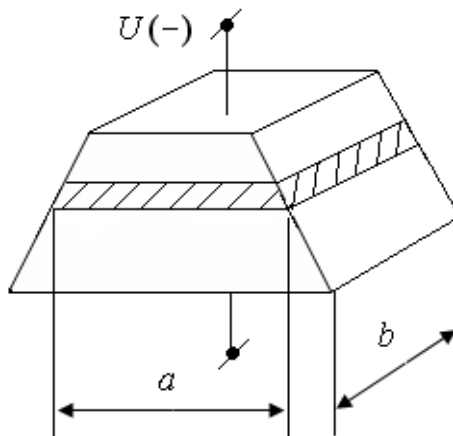
Такий резонатор може бути реалізований для напівпровідникових лазерів, наприклад, нанесенням покриттів, що відбивають, на протилежні грані напівпровідникового кристала:

Часто, через високий показник заломлення, такий резонатор утворюється за рахунок відбиття Френелівського від граней

напівпровідника, паралельних один одному і розташованих нормально до площини $p - n$ переходу.



1, 2-паралельні плоскі грані напівпровідника. Для того, щоб генерація не відбувалася між гранями 3 і 4, вони не повинні бути паралельними.



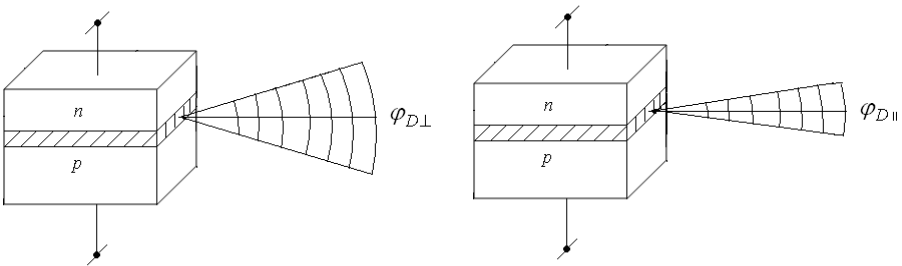
При цьому генерація відбуватиметься у напрямку, нормальному до передньої та задньої грані, вказаної на малюнку, в межах області $p - n$ переходу.

Так як розміри випромінюючої області малі (одиниці міліметрів і одиниці мікрон) будуть сильно проявлятися дифракційні явища, що призводять до збільшення розбіжності випромінювання, що виходить:

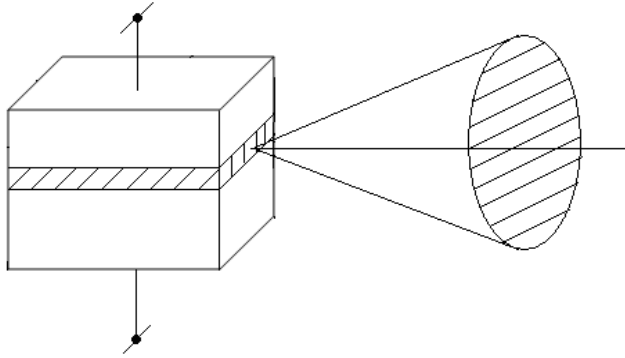
$$\varphi_{D\perp} \approx \frac{\lambda}{\Delta_{p-n}} - \text{у напрямі, перпендикулярному площині } p - n$$

переходу. Так як, $\Delta_{p-n} \ll a, \varphi_{D\perp} > \varphi_{D\parallel}$

Тобто розбіжність випромінювання, що виходить у площині, перпендикулярній $p - n$ переходу буде помітно більше, ніж у площині $p - n$ переходу (десятки куткових градусів і одиниці градусів відповідно), дивіться малюнки нижче:



При цьому пляма випромінювання є еліпсом, велика вісь якого перпендикулярна площині $p - n$ переходу:



Розглянуті напівпровідникові лазери називаються **гомогенними**.

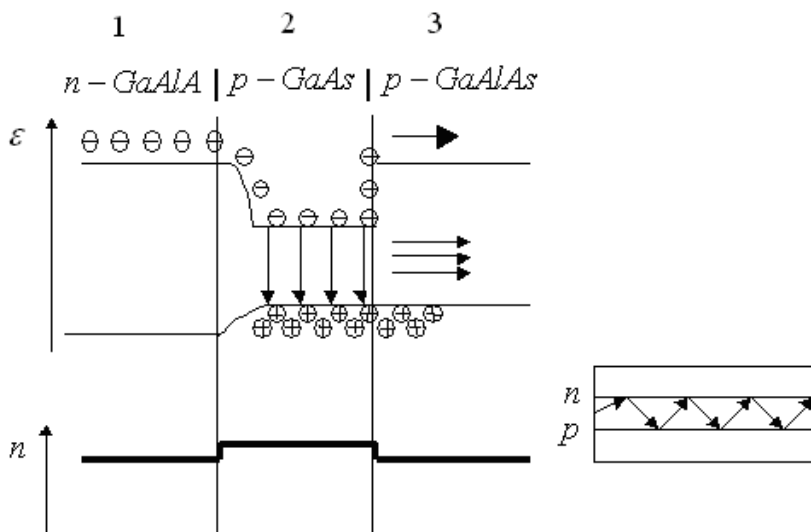
До **недоліків** таких лазерів належать такі:

- 1) у зустрічних потоках електронів і дірок, що зустрічаються в області $p - n$ переходу, встигають рекомбінувати не всі електронно-діркові пари, оскільки час їх знаходження в області $p - n$ мало;
- 2) частина випромінювання, що розповсюджується в області $p - n$ переходу, йде за його межі, в області, де посилення відсутнє.

Це значно погіршує енергетичні параметри, К.П.Д., та підвищує порогові струми генерації.

Для усунення цих недоліків були запропоновані так звані гетероструктурні напівпровідникові лазери, де ймовірність рекомбінації пар електрон-дірка значно підвищується за рахунок створення потенційних бар'єрів або ям, що збільшують час знаходження електронів в області $p - n$ переходу (за рахунок відбиття від бар'єрів), а також забезпечення хвилеводного ефекту (використання явища повного внутрішнього відбиття), що досягається тим, що області, прилеглі до $p - n$ переходу, мають показник заломлення, більший, ніж область $p - n$ переходу (тобто за рахунок відповідного профілю показника заломлення).

Це досягається в гетероструктурних лазерах, один із прикладів яких показаний на малюнку (матеріали, енергетична діаграма та розподіл показника заломлення):



Гетероструктура з двостороннім обмеженням

Такі лазери мають низькі пороги генерації, високий ККД та значні потужності випромінювання, які можуть бути значно збільшені за рахунок використання лазерних лінійок та ґрат.

Зважаючи на малість довжини резонатора може бути забезпечений одномодовий режим генерації. $\Delta\lambda_{ген}$ зазвичай одиниці - десятки \AA . При використанні дифракційної решітки в резонаторі $\Delta\lambda$ може становити до 0.04нм.

Зауважимо, що довжина хвилі випромінювання λ сильно залежить від температури, т.к. при зміні її змінюється ширина забороненої зони $\Delta\varepsilon_{3.3}$, а $\frac{h\nu}{\lambda} \geq \Delta\varepsilon_{3.3}$.

Незважаючи на велику кутову розбіжність випромінювання, що виходить, вона може бути легко скомпенсована за допомогою оптики (наприклад, лінзи), т.к. розміри випромінюючої поверхні малі (модель точкового джерела).

Потужність випромінювання гетероструктурних лазерів може становити багато десятків мВт при струмах накачування 200-300 мА.

В даний час вдалося збільшити випромінюючий об'єм (область p - n переходу) за рахунок збільшення його ширини (від часток мм до 1

см), що дозволило отримувати потужність випромінювання одного напівпровідникового лазера до одиниць Вт в безперервному режимі.

Як зазначалося, одиночні напівпровідникові лазери застосовуються для накачування твердотільних лазерів. Використання лазерних матриць, що з декількох (до 25) лазерних лінійок, кожна з яких містить до 50 лазерів, дозволяє отримувати потужність безперервного режиму до кількох кВт.

Такі системи-лінійки та матриці можуть використовуватися, зокрема, для накачування потужних твердотільних лазерів – один із перспективних сучасних напрямків лазерної техніки.

При цьому можна отримати висококогерентне випромінювання твердотільного лазера до кількох кВт. Його легко сфокусувати у пляму до 1 мкм і можна вводити у світловод.

Доповнення.

Як зазначалося, для накачування п/п лазерів може використовуватися оптична накачування, у своїй використовується чистий напівпровідник (без домішки):

$$\varepsilon_{\text{фотона накачки}} > \Delta\varepsilon_{3,3}.$$

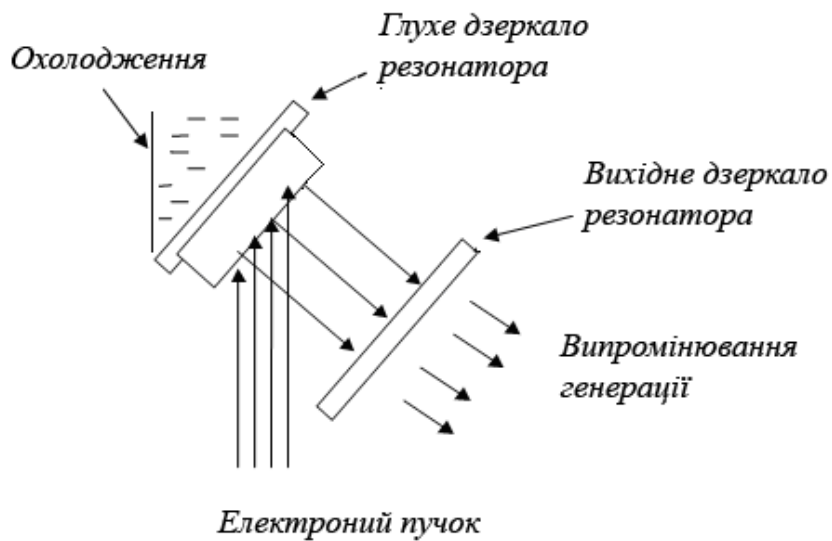
При цьому завдяки сильному поглинанню інверсія утворюється при товщині близько 1 мкм (що дуже мало). Застосовуються рідко.

У лазерах із накачуванням електронним пучком також використовуються чисті напівпровідники. Електронно-діркові пари при цьому утворюються за рахунок енергії пучка електронів, що бомбардують атоми напівпровідника (непружні зіткнення). Один електрон пучка може утворити десятки-сотні електронно-діркових пар.

При цьому товщина інверсії може досягати сотень мкм (перевага), значить і більша випромінювана потужність, але дуже складний пристрій, тому потрібний вакуум і охолодження.

Але можна використовувати багато різних напівпровідників, тобто. $p - n$ перехід з одночасним виродженням електронів і дірок може бути реалізований у дуже обмеженому класі напівпровідників.

На малюнку показана схема одного з варіантів використання напівпровідникового лазера з збудженням електронним пучком:



Конспект лекцій
з дисципліни
«Лазери та їх застосування в медицині та біології»

для здобувачів першої (бакалаврський) РВО, денної та заочної форми
навчання спец. 163 Біомедична інженерія .

Упорядники:

ЛИСИЧЕНКО Микола Леонідович

МІЛЕНІН Дмитро Миколайович

Формат 60x84 1/16. Гарнітура Times New Roman

Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 2,5

Наклад 30 пр.

Державний біотехнологічний університет