

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЛАЗЕРНІ МІКРО- І НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ**

Магістрант гр. ЕП.м-92

О. С. Босенко

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, доцент

І. М. Пазуха

Зав. кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми – 2020



## РЕФЕРАТ

Метою даної кваліфікаційної роботи було опис принципів роботи лазерів як систем квантової електроніки та їх застосування у процесах лазерної мікрообробки у галузі електроніки.

Зазначена мета досягається шляхом аналізу літературних джерел щодо основ генерації лазерного випромінювання, режимів роботи різних видів лазерів, фізичних основ поглинання лазерного випромінювання та подальшим описанням варіантів застосування лазерів в технологічних процесах виготовлення деталей електроніки.

В рамках роботи встановлено, що лазер є джерелом оптичного випромінювання генераторного типу. При генерації лазерного випромінювання відбувається поглинання, спонтанне та стимульоване випромінювання. Різні види лазерів відрізняються природою активного середовища. На сьогодні найбільш перспективними виявляються волоконні лазери, які мають широкий діапазон потужності та характеристик променя, гнучке перемикання, розщеплення та сканування променів. Визначено основні режими роботи лазерів та наведено декілька класифікацій лазерів. Показано, що сучасне виробництво мікроелектроніки неможливе без застосування високоточного лазерного інструментарію.

Робота викладена на 37 сторінках, зокрема, містить 15 рисунків та список використаних джерел із 27 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЛАЗЕР, ГАЗОВИЙ ЛАЗЕР, НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ЛАЗЕР, ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ЛАЗЕР, ВОЛОКОННИЙ ЛАЗЕР, РЕЗИСТОР, СКРАЙБУВАННЯ, МІКРОЕЛЕКТРОНІКА

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1</b> .....	6
<b>ЛАЗЕРИ ЯК СИСТЕМИ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ</b> .....	6
1.1 Основи генерації лазерного випромінювання.....	6
1.2 Основні параметри та режими роботи лазерів.....	12
1.3 Основні фізичні явища при поглинанні лазерного випромінювання у матеріалах електроніки.....	15
<b>РОЗДІЛ 2 КЛАСИФІКАЦІЯ ЛАЗЕРІВ</b> .....	19
2.1 Загальна класифікація лазерів.....	19
2.2 Класифікація лазерів за агрегатним станом активного середовища.....	20
2.2.1 Газові лазери .....	20
2.2.2 Напівпровідникові лазери.....	22
2.2.3 Твердотільні лазери.....	24
2.2.4 Волоконні лазери.....	26
<b>РОЗДІЛ 3 ЗАСТУВАННЯ ЛАЗЕРІВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ</b> .....	28
3.1 Основні технологічні процеси виготовлення елементної бази електроніки, що проводяться з використанням лазерних технологій.....	28
3.2 Лазерна підгонка номіналів резисторів.....	30
3.3 Лазерне скрайбування напівпровідникових пластин .....	32
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	34
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	35

## ВСТУП

Квантова електроніка – це галузь сучасної електроніки, що вивчає у теорії та на практиці принципи виготовлення приладів і пристроїв посилення та генерації електромагнітних коливань, в основі яких лежить ефект вимушеного випромінювання у нерівноважних квантових системах. До одного з сучасних шляхів розвитку квантової електроніки відносяться лазерні технології. Основні задачі лазерних технологій полягають у вивченні властивостей лазерного випромінювання та у створенні оптичних квантових генераторів (лазерів) з метою реалізації прикладних задач.

До основних особливостей лазерного випромінювання, що роблять його унікальним технологічним інструментом відносяться: монохроматичність (лазерне випромінювання представляє собою світло фактично однієї довжини хвилі); направленість (кут розходження променя не перевищує долей кутової хвилини, що дозволяє передавати енергію по променю на великі відстані та у відповідності до законів геометричної оптики фокусуватися на площі розміром 10-100 мкм); когерентність (узгодженість хвильових процесів у просторі і часі, що теоретично дозволяє сфокусувати лазерне випромінювання у пляму діаметром, що дорівнює довжині хвилі та отримати високу густину енергії). Всі три особливості лазерного випромінювання знайшли практичне застосування в різних галузях. Наприклад, у метрології, в технології обробки матеріалів, інтегральній і волоконній оптиці, інформаційних системах та навіть медицині. До основних переваг лазерних технологій слід віднести високу продуктивність процесів та якість виробів, економічність та екологічність. Крім того, вони можуть бути використані при роботі як з металами і напівпровідниковими, так і діелектриками (кераміки, пластмаси тощо), а також біоматеріалами.

Мета даної роботи полягає у вивченні основних фізичних процесів, що виникають при взаємодії лазерного променя з матеріалом; основних параметрів технологічних лазерів та лазерного випромінювання; а також аналіз можливості їх застосування у мікроелектроніці.

# РОЗДІЛ 1

## ЛАЗЕРИ ЯК СИСТЕМИ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

### 1.1 Основи генерації лазерного випромінювання

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.

При опромінюванні активного середовища зовнішнім електромагнітним полем спостерігатиметься збільшення енергії цього поля за рахунок випромінюваних квантів, когерентних з ним, тобто спостерігатиметься квантове посилення.

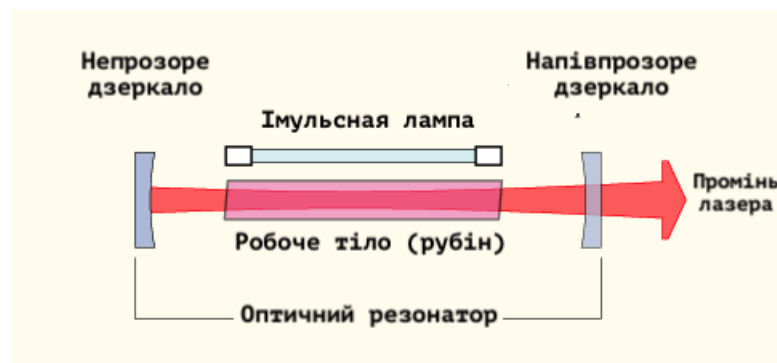


Рис. 1.1. Схема пристрою лазера [1]

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, який 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 [1].

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:

$$R_1 R_2 \exp[2\sigma(N_1 - N_2)L] = 1, \quad (1.1)$$

де  $R_1$ ,  $R_2$  - коефіцієнта 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

$$(N_1 - N_2)_{кр} = -\frac{\ln(R_1 R_2)}{2\sigma L}. \quad (1.2)$$

Досягнувши критичної інверсії генерація розвивається із спонтанного випромінювання. Цей механізм лежить в основі лазерного генератора [1].

Рисунок 1.2 ілюструє розподіл рівноваги для загального випадку. Закон Больцмана виконується для умов теплової рівноваги, ( $N_2$  завжди буде меншим за  $N_1$  в умовах рівноваги). Це означає, що число атомів з електронними конфігураціями, що відповідають збудженому або вищому енергетичному рівню, буде менше, ніж ті, що відповідають нижчому енергетичному рівню [2].

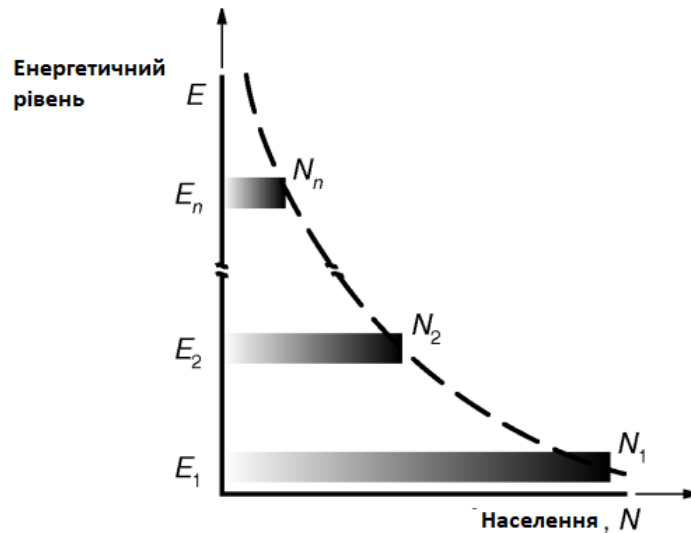


Рис. 1.2. Схема закону Больцмана для багаторівневої системи [2]

Розглянемо різні переходи, пов'язані з генерацією лазера:

1) Поглинання. Коли збуджуються атоми нижчого енергетичного рівня  $E_1$  (основний стан), вони піддаються деякому зовнішньому випромінюванню або фотону з тією ж енергією, що і різниця енергій між нижчим рівнем і вищим рівнем  $E_2$ , атоми змінюватимуть свій енергетичний рівень на  $E_2$  (рис. 1.3а) і поглинуть енергію випромінювання.

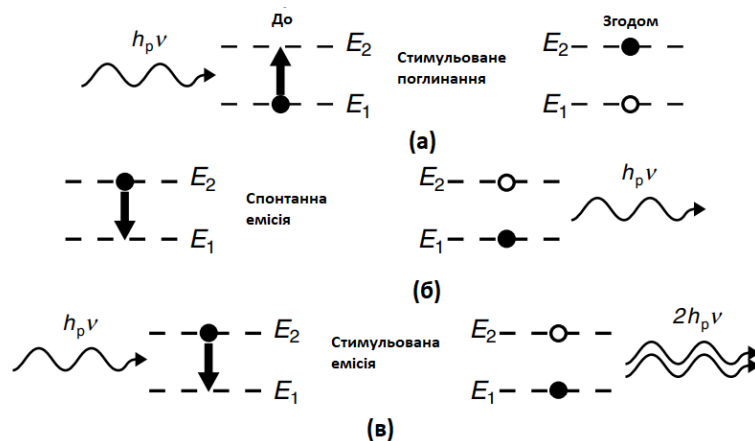


Рис. 1.3. Схема (а) поглинання, (б) спонтанного випромінювання та (в) стимульованого випромінювання [2]

2) Спонтанне випромінювання відбувається, коли перехід від збудженого стану до нижчого енергетичного рівня не стимулюється будь-яким падаючим



випромінюванням, але відбувається більш-менш природно (рис. 1.3, б). Це відбувається тому, що збуджені атоми хочуть повернутися до основного стану, і лише питання часу, коли вони це зроблять. Якщо атом був повністю стабільним у своєму збудженому стані, не було б спонтанного випромінювання.

3) Стимульоване випромінювання. Якщо атом на енергетичному рівні 2 піддається електромагнітному випромінюванню або фотону з частотою  $\nu$ , що відповідає різниці енергій  $E = E_2 - E_1$  між рівнями 1 і 2, фотон стимулюватиме атом до переходу на нижчий енергетичний рівень. Енергія, що випромінюється в результаті цього переходу, що має форму електромагнітної хвилі або фотона, така ж, як стимулюючий фотон, і накладається на падаючий фотон, посилюючи тим самим випромінюване світло (рис. 1.3, в).

Це призводить до стимульованого випромінювання, коли падаючі та випромінювані фотони мають однакові характеристики і перебувають у фазі, що призводить до високого ступеня когерентності, а наприклад, частота та стан поляризації випромінюваного фотона по суті такі ж, як і інцидентний фотон. Два фотони можуть генерувати ще один набір, що спричиняє лавину фотонів. Це схематично показано на рис. 1.4. Норма викидів на одиницю об'єму, у разі стимульованих викидів також пропорційна чисельності на рівні 2, а також щільності енергії.

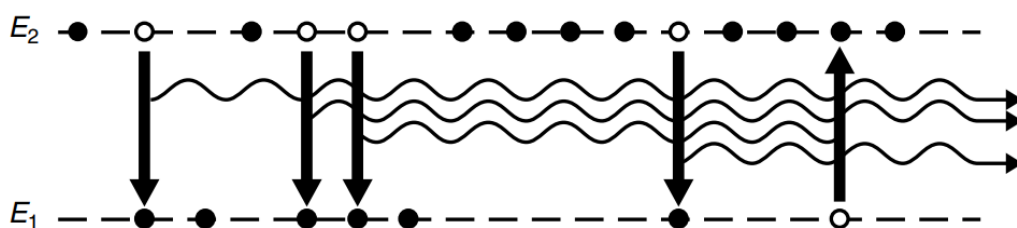


Рис. 1.4. Ілюстрація процесу стимульованого викиду [2]

Резонансний елемент 1, який виділяє зі всієї сукупності можливих частот оптичного діапазону задані частоти; підсилюючий елемент 2, який компенсує втрати енергії електромагнітного випромінювання в резонаторному елементі;

Лазер є джерелом оптичного випромінювання генераторного типу і як будь-який генератор має три основні елементи.

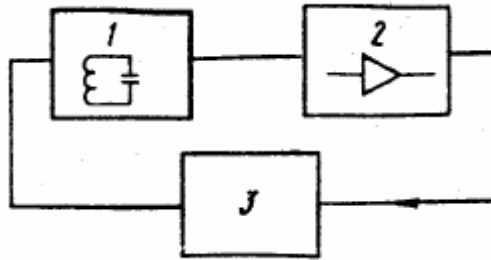


Рис. 1.5. Схема лазера [3]

і елемент зворотного зв'язку 3, який забезпечує зв'язок між випромінюванням, що потрапляє на вхід підсилюючого елемента і виходить з нього. Функції резонансного елемента і елемента зворотного зв'язку в лазерах виконує відкритий резонатор, який забезпечує разом з високою добротністю резонансних мод добре розрідження їх спектра. У вигляді підсилюючого елемента виступає квантова система з потрібною структурою енергетичних рівнів [2].

Для опису роботи лазера необхідні рівняння квантової електродинаміки. Але оскільки лазер є системою з переважаючим індукційованим випромінюванням в моду, електромагнітне поле можна описати класичними рівняннями Максвелла:

$$\begin{aligned}
 \text{а) } \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\
 \text{б) } \operatorname{rot} \bar{H} &= \frac{4\pi}{c} \bar{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \\
 \text{в) } \operatorname{div} \bar{H} &= 0, \\
 \text{г) } \operatorname{div} \bar{B} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Якщо ж простір зайнятий полем, заповнений середовищем, то до рівнянь (1) необхідно додавати матеріальні рівняння, які описують взаємодію поля з

середовищем, зумовлену скінченою провідністю середовища  $\gamma_0$ , намагніченістю  $M$  і поляризацією  $P$ :

$$\begin{aligned} \text{а) } \bar{j} &= \gamma_0 \bar{E}, \\ \text{б) } \bar{B} &= \bar{H} + 4\pi \bar{M}, \\ \text{в) } \bar{D} &= \bar{E} + 4\pi \bar{P}. \end{aligned} \tag{1.4}$$

Лазерні пучки з добрим наближенням можна вважати параксіальними, тобто комплексна амплітуда повільно змінюється в просторі і часі у порівнянні з довжиною хвилі і періодом коливань.

У реальному лазері активне середовище зазвичай розміщується між двома дзеркалами, і вони разом складають резонатор (рис. 1.6а). Спочатку в результаті спонтанного випромінювання генеруються фотони в усіх напрямках (рис. 1.6б). Однак, коли стимульоване випромінювання стає значним, електромагнітна хвиля, що рухається вздовж осі резонатора, коливається між двома дзеркалами (рис. 1.6в). Випромінювання посилюється при кожному проходженні через середовище, що призводить до накопичення інтенсивності сигналу (рис. 1.6г). Корисний вихідний промінь виходить, якщо зробити одне з дзеркал частково прозорим.

Цей вихідний промінь є лазером, який виходить із системи. Таке зчеплення на виході, поряд з поглинанням та розсіюванням активним середовищем, поглинанням дзеркалами тощо, призводить до втрат інтенсивності випромінювання.

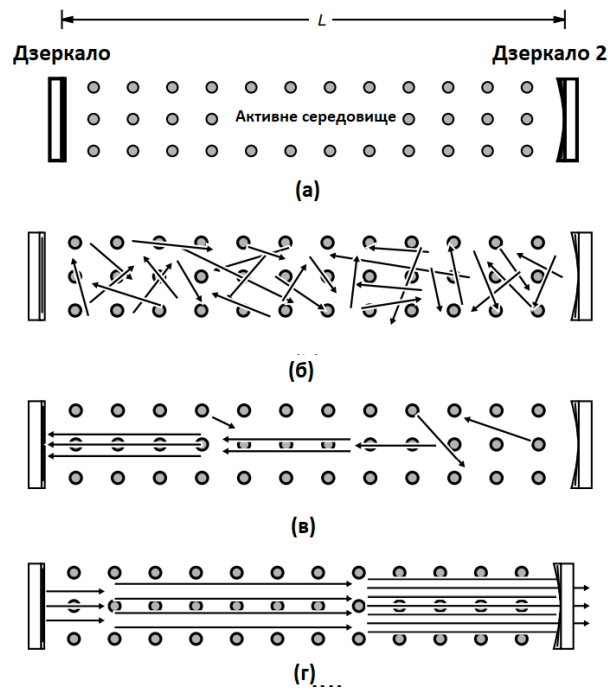


Рис. 1.6. Ілюстрація лазерного підсилення [2]

Якщо втрати, з якими стикається випромінювання під час кожного проходження, більші, ніж підсилення або посилення лазера, то коливання не можуть продовжуватися, і інтенсивність випромінювання в решті-решт зменшиться. Таким чином, щоб підтримувати коливання, коефіцієнт підсилення системи повинен бути принаймні рівним втратам у системі. Це досягається, коли досягається пороговий коефіцієнт посилення [2].

## 1.2 Основні параметри та режими роботи лазерів

Лазери - це інструменти, у яких інтенсивне світло фокусується над крихітною точкою матеріалу, у якому в процесі нагрівання або внаслідок інтенсивного енергетичного збудження поверхні відбувається розрив міжмолекулярних зв'язків. Цей процес є незрівнянно простим і швидким, оскільки не потрібен видимий інструмент, крім потоку сильно сфокусованого та когерентного світла. Мікроелектромеханічні системи - одна з найбільш швидкозростаючих тем у галузі технічних та наукових досліджень завдяки надзвичайно універсальним можливостям. Лазери мають переваги перед іншими

методами мікровиробництва з точки зору простоти, вартості, зменшення механічних напружень, меншого часу виготовлення тощо [4].

Лазери можуть працювати в різних режимах: безперервному, імпульсному, імпульсно- періодичному, одно- і багатомодовому і одночастотному [5, 6].

Одночастотним називають випромінювання, що має тільки одну спектральну лінію, відповідну подовжній моді резонатора (найчастіше випромінювання відбувається на поперечній моді 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 [4, 7].

У CW-лазерах (волоконні лазери безперервної генерації) ширина імпульсу зазвичай перевищує 1 мс. Ці типи лазерів особливо корисні при лазерному зварюванні, згинанні, формуванні, облицюванні та легуванні. Більшість промислових CO<sub>2</sub>-лазерів працюють у безперервному режимі. Часто CW-лазери застосовують із керованим суперімпульсом замість безперервного режиму з керованим включенням/вимкненням. Суперімпульсна сигналізація забезпечує більшу імпульсну потужність на початку кожного імпульсу на короткий проміжок часу. Однак максимальна вихідна потужність залишається такою ж, як і номінальний режим CW із зменшеним робочим циклом [4].

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, випромінюючи у момент часу, що задається оператором.

Стационарний режим генерації лазера є одним з найпростіших, що дозволяє використати отримані вище рівняння для дослідження впливу на характеристики випромінювання лазера схеми енергетичних рівнів активного елемента, неоднорідного характеру поля в резонаторі і неоднорідного спектрального уширення активного середовища.

Потужність випромінювання лазера залежить від схеми енергетичних рівнів активного середовища. У випадку трирівневого активного середовища величина інверсної населеності:

$$N_a = N \frac{f_{13} T_1 - 1}{f_{13} T_1 + 1} \quad (1.5)$$

де  $f_{ij} = B_{ij} \rho_{ij}$  - імовірність переходів з рівня  $i$  на рівень  $j$  під дією випромінювання з густиною  $\rho_{ij}$ . Отже, порогова величина  $f_{13}$  визначається з умови [3]:

$$N_a B_{13} = \frac{1}{T_p} \text{ або } f_{13}^n T_1 = \frac{B_{13} N T_p + 1}{B_{13} N T_p - 1} \quad (1.6)$$

Енергетичні параметри лазерів: потужність випромінювання для безперервних лазерів; енергія випромінювання для імпульсних лазерів; середня потужність для імпульсно-періодичних лазерів; довготривала і короткочасна нестабільність потужності лазерного випромінювання.

Просторово - енергетичні параметри лазерів: діаметр і розходимість лазерного випромінювання; діаграма спрямованості; розподіл інтенсивності в поперечному перетині.

Тимчасові параметри лазерів: тривалість імпульсу; частота повторення імпульсів  $f$ .

Спектральні параметри лазерів: довжина хвилі  $\lambda$  (частота  $f$ ) випромінювання; напівширина спектральної лінії випромінювання  $\Delta\nu$ ; модовий склад випромінювання; нестабільність частоти в часі.

Експлуатаційні параметри лазерів: ККД лазера; споживана потужність  $P_{\text{потр}}$ ; потужність системи накачування  $P_{\text{н}}$ ; час готовності лазера до роботи  $t_{\text{гот}}$ ; маса; габаритні розміри; термін служби; вартість; витрата газів, води [1].

### **1.3 Основні фізичні явища при поглинанні лазерного випромінювання у матеріалах електроніки**

У літературі описано процеси, що відбуваються при поглинанні лазерного випромінювання порошковими матеріалами [8], металами [9, 10], прозорими [11] та непрозорими [12] матеріалами, напівпровідниками [13].

Основне застосування лазерів в обробці матеріалів і електронної технології полягає в поглинанні зфокусованого лазерного випромінювання різними непрозорими матеріалами [12]. Глибина проникнення випромінювання не перевищує  $10^{-5}$  см. Початкова фаза поглинання полягає у впливі лазерного випромінювання на вільні або зв'язані електрони, що викликає збільшення їх енергії. Вплив цих електронів на кристалічну решітку й інші електрони викликає збільшення температури матеріалу. Час передачі енергії електронами, що співударяються, становить  $10^{-12}$  –  $10^{-14}$  см, а час передачі енергії електрону кристалічної решітки - 10-11 сек. Збільшення енергії, що поглинається, лазерного випромінювання в теплову енергію матеріалу відбувається майже миттєво, тому температура поверхні матеріалу в області впливу швидко зростає [12].

Щоб застосувати лазерну обробку металу, електромагнітну енергію лазерного світла потрібно трансформувати в теплову енергію всередині металу. Кількість перетвореної енергії визначається механізмами поглинання світла в металі. Саме цей «вторинний» вид енергії, поглинена енергія, а не сам лазерний промінь, доступний для нагрівання металу та отримання бажаного ефекту [9].

Термічна дія поглиненого лазерного випромінювання поверхні металу веде

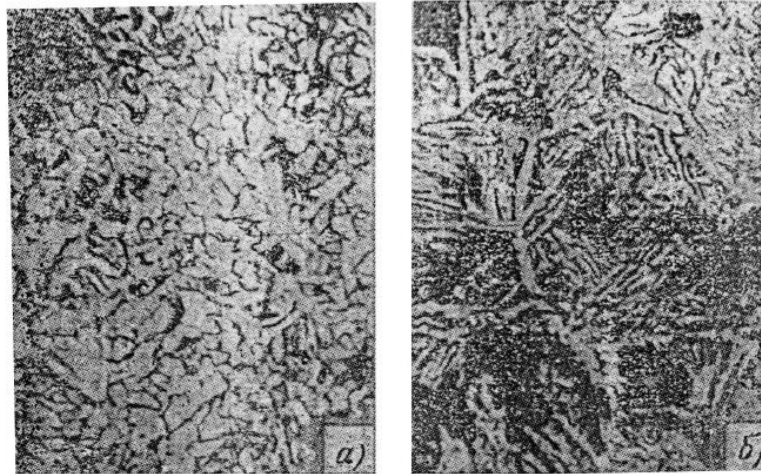


Рис. 1.7. Зміна структури низьковуглецевої сталі (0.2 % C) у результаті плавлення, викликаного поглинанням випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера безперервної дії (а - перед плавленням, б – після плавлення) [14]

не тільки до нагрівання, плавлення й випаровування матеріалу, але й часто викликає зміну структури й властивостей матеріалу в місці обробки й у зонах, що прилягають до місця впливу лазерного пучка.

Характер змін залежить від властивостей оброблюваного матеріалу й від величини енергії й потужності поглиненого випромінювання. У результаті досліджень виявили появу, що раніше не зустрічалися дрібнозернистих, грубозернистих і дендритних структур, світлин яких показані вище на рис. 1.7.

Основною відмінністю між процесом поглинання лазерного випромінювання прозорих і непрозорих матеріалів є об'ємний, а не поверхневий характер поглинання. Інші характерні риси поглинання лазерного випромінювання прозорих матеріалів наступні:

1) більша гранична щільність потужності поглиненого випромінювання, що викликає руйнування матеріалу;

2) поява крім змін і ушкоджень термічного походження (лунки, тріщини, напруги, структурні дислокації) оптичних явищ: самофокусування лазерного пучка, змушеного розсіювання Бриллюена, змушеної подвійної



променезаломлюваності, акустичних явищ (ультразвукова хвиля, фотопружність) і інших, наприклад, електричного пробую в повітрі в місці входу й виходу лазерного пучка, або пробую усередині поглинаючого матеріалу.

До прозорих матеріалів, у яких відбуваються складні процеси поглинання лазерного випромінювання, належать нітрогліцерин, нітробензол, бензол. Їх застосовують у конструкціях оптичних затворів, оптичних дефлекторів, модуляторів, у лазерних технологічних установках і різних лазерних оптикоелектронних інформаційно вимірювальних системах. Тверді прозорі матеріали:

- матеріали, оброблювані пучком сфальцьованого лазерного випромінювання;
- матеріали оптичних елементів лазерів, що зазнають руйнуванню під час проходження через них лазерного випромінювання, наприклад, скло, кварц, оптичні кристали, тонкі оптичні плівки, германій, арсеніт галію.

Руйнування матеріалу, викликане поглинанням лазерного випромінювання, з'являється після перевищення граничної величини в області потужності випромінювання. Поріг руйнування для поверхні нижче й становить від 25% - до 100% величини порога руйнування усередині матеріалу відповідно для полірованих поверхонь і дуже гладких, оброблених, наприклад, іонним пучком.

До моменту досягнення порога руйнування поглинання лазерного випромінювання в прозорому матеріалі носить об'ємний характер. Температура локальних поглинаючих центрів може досягати декількох тисяч градусів; наприклад, для оптичного скла ПК-7 вона становить 3000-4000°C; а для полістиролу 2000-3200°C.

Наступний етап появи ушкоджень матеріалу - це лазерний електричний пробій поглинаючих центрах, що відбувається в результаті локального збільшення температури й щільності потужності поглиненого випромінювання.

Лазерне різання й свердлення отворів прозорих і непрозорих матеріалів, полягає, як і у випадку непрозорих матеріалів у плавленні, випаровуванні й викиді матеріалу із зони обробки. Основні труднощі полягає у великій різниці величин

коефіцієнта відбиття й поглинання для матеріалів до, і після перевищення порога руйнування [9].

Поглинання лазерного випромінювання в напівпровідниках протікає різним способом залежно від довжини хвилі випромінювання, щільності енергії й потужності випромінювання, виду напівпровідника, домішок, орієнтації кристалографічних осей і стану поверхні напівпровідника. Механізм поглинання випромінювання напівпровідником пов'язаний з певними видами поглинання:

- внутрішнє й міжзонне поглинання з утворенням пар носіїв електрон-дірка, безвипромінювальна рекомбінація яких, пов'язана з передачею поглиненої енергії кристалічній решітці зі збільшенням температури напівпровідника;
- поглинання в кристалічній решітці з утворенням іонів, які можуть викликати напруження й утворювати мікротріщини в напівпровіднику [13].

Лазерне випромінювання використовується як робочий інструмент для структурування речовини шляхом термічного випаровування з чітко визначеними обсягами та високою поперечною точністю. Для цього, залежно від типу лазера та технології обробки, лазерне випромінювання фокусується або проектується на поверхню. Залежно від інтенсивності, умов поглинання матеріалів та часу взаємодії слід враховувати декілька аспектів, які визначають геометрію абляції та точність процесу абляції. Точність отриманих структур залежить не тільки від діаметра фокусу та стадії позиціонування, але також від точності процесу, що виникає в результаті реакцій речовини під час та після опромінення. Таким чином, діаметр обробки залежить не тільки від радіуса пучка  $w_0$ , але і від фізичних властивостей матеріалу, таких як відбивна здатність, поглинання, плавлення та ентальпія випаровування [10].

Як правило, взаємодія фотонів і речовини заснована на поглинанні електромагнітної енергії на вільних та зв'язаних електронах матеріалу. Електрони нагріваються і передають свою енергію через характерний час у решітку матеріалу [11].

## РОЗДІЛ 2

### КЛАСИФІКАЦІЯ ЛАЗЕРІВ

#### 2.1 Загальна класифікація лазерів

Виходячи з принципів генерації лазерного випромінювання всі лазери можна розділити за двома основними критеріями:

- 1) за схемами функціонування: 3-рівневі; квазі-4-рівневі; 4-рівневі.
- 2) за методом отримання інверсії: з електронною накачкою; з хімічною накачкою; з оптичною накачкою; з тепловою накачкою.

Відповідно до "Санітарних норм і правил улаштування класифікації лазерів" покладена ступінь їх небезпечного випромінювання для обслуговуючого персоналу. За цією класифікацією лазери поділяються на 4 класи:

- клас I (безпечні) - вихідне випромінювання безпечно для очей;
- клас II (малонебезпечні) - небезпечно для очей пряме, дзеркальне відбиття випромінювання;
- клас III (середньо небезпечні) - небезпечно для очей пряме, дзеркальне, а також дифузно відбите випромінювання на відстані 10 см від відбиваючої поверхні і для шкіри пряме і дзеркально відбите випромінювання;
- клас IV (високо небезпечні) - небезпечно для шкіри дифузно відбите випромінювання на відстані 10 см від відбиваючої поверхні.

Класифікація визначає специфіку впливу випромінювання на орган зору і шкіру. Ведучим критерієм для оцінки ступеня небезпеки лазерного випромінювання прийнята величина потужності (енергії), довжина хвилі, тривалість імпульсу і експозиції опромінення.

Існує класифікація лазерів за фізико-технічними параметрами, при цьому враховується агрегатний стан активної робочої речовини (тверде, рідке, газоподібне), характер генерації (імпульсний, безперервний) спосіб накачки активної речовини (оптичний, електричний, хімічний і т. ін.).

За характером генерації випромінювання, лазери підрозділяються на імпульсні (тривалістю випромінювання 0,25 с) і безперервної дії (тривалість випромінювання понад 0,25 с) [15].

## **2.2 Класифікація лазерів за агрегатним станом активного середовища**

Найбільш розповсюдженою є класифікація за фізичними особливостями активного середовища:

- твердотільні - solid-state laser;
- напівпровідникові - semiconductor laser;
- волоконні - fiber laser;
- газові - gas laser;
- іонні - ion laser;
- молекулярні - molecular laser;
- рідинні - dye laser;
- газодинамічні - gasdynamic laser;
- хімічні - chemical laser;
- ексимерні - eximer laser;
- лазери на центрах забарвлення - color centers laser;
- фотодисоціаційні - photodissociation laser;
- лазери на вільних електронах - free electron laser;
- рентгенівські - x-ray laser;
- лазери з перебудовою довжини хвилі генерації - tunable laser;
- раманівські - raman laser;
- параметричні - parametric laser [16].

### **2.2.1 Газові лазери**

Газові лазери – це лазери великої потужності, монохроматичності, що мають вузьку спрямованість випромінювання із оптичним накачуванням, активним

середовищем якого є суміш газів і парів. Працюють у безперервному та імпульсному режимах. У залежності від системи накачування газові лазери поділяють на газорозрядні лазери, газові лазери з оптичним збудженням і порушенням заряджених частинок, газодинамічні та хімічні лазери. За типом лазерних переходів розрізняють газові лазери на атомних переходах, іонні лазери, молекулярні лазери принцип роботи яких будується на електронних, коливальних і обертальних переходах молекул [17].



Рис. 2.1. Схематична будова He-Ne газового лазера малої потужності. Навантажувальний резистор служить для обмеження струму після початку розряду [18]

На властивості газових лазерів впливає: величина тиску, природа газу, взаємне розташування і час життя робочого рівня, енергія і щільність вільних електронів, об'єм резервуару, де розташований газ, спосіб підведення енергії. У більшості випадків в газових лазерах накачування здійснюється за рахунок газового розряду (тліючий, дуговий). В газовому розряді виділяють прикатодну, прианодну області і область позитивного стовпа (невеликий градієнт потенціалу та відсутність об'ємного заряду) [19].

У плазмі позитивного стовпа присутні електрони, нейтральні збуджені і незбуджені атоми, молекули і позитивні та негативні іони, тому в ній в основному створюється інверсія заселеності. Частинки в плазмі позитивного стовпа знаходяться в безперервному хаотичному русі, за рахунок пружних взаємодій енергія від заряджених частинок передається нейтральним, а спрямований рух

частинок перетворюється в хаотичний. Непружні процеси взаємодії 1-го роду: пряме електронне збудження, ступеневе електронне збудження, іонізація атома. При зіткненні 2-го роду атом віддає свою внутрішню енергію і перейде в збуджений стан, також відбувається зіткнення нейтральних і збуджених атомів - додаткове заселення збуджених станів за рахунок взаємодії з атомами буферного газу. Інверсія заселеності безпосередньо зобов'язана непружним зіткненням. Пружні зіткнення визначають середню електронну температуру в газовому розряді [16].

У роботі [20] описано різні газорозрядні лазери: гелій-неоновий лазер; лазер на парах металу; іонний лазер аргону; ексимерний лазер; азотний лазер; CO<sub>2</sub>-лазер; оптичні газові лазери. Розглянуто [19] характеристики газових лазерів, які головним чином відповідають за їх ефективність як наукового та промислового інструменту. Обговорюються основні принципи роботи таких лазерів з різними механізмами накачування: електронно-ударне збудження (мідний та золотий лазери, Ar-і Kr-іонні лазери), передача збудження (He-Ne-лазер, He-Cd-лазер, CO<sub>2</sub>-лазер), реактивні лазери зіткнення ексимерний лазер (ArF, KrF, XeCl, XeF, F<sub>2</sub>), хімічні лазери (HF, COIL)) та інші лазери в дальній інфрачервоній, ультрафіолетовій та м'якій рентгенівській областях. Вибрані додатки імпульсних та безперервних газових лазерів представлені в обробці матеріалів, маркуванні та випаровуванні лазером тощо.

### **2.2.2 Напівпровідникові лазери**

Напівпровідникові лазери хоча є твердотільними, проте традиційно виділяються в окрему групу, оскільки мають інший механізм накачування, а квантові переходи відбуваються між дозволеними енергетичними зонами, а не між дискретними рівнями енергії. Напівпровідникові лазери - найбільш уживаний в побуті вид лазерів. Крім цього вони застосовуються в системах накачування інших лазерів [17, 21].

Конструкція напівпровідникового лазера представлена на рисунку 2.2.

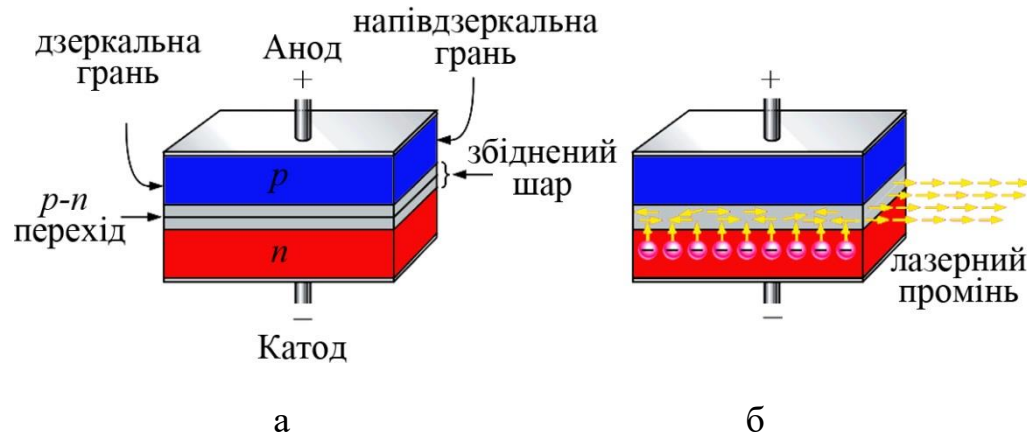


Рис. 2.2 Конструкція напівпровідникового інжекційного лазера (а) та принцип генерації лазерного випромінювання (б)

Випромінювачем є вузька частина  $p$ -області, що прилягає до  $p$ - $n$ -переходу. Функцію дзеркал виконують грані напівпровідникового кристала, який є й активною речовиною. Вимушене випромінювання відбувається паралельно  $p$ - $n$ -переходу.



Рис. 2.3 Зовнішній вигляд одного з типів напівпровідникових інжекційних лазерів на квантових точках

Гетерогенні інжекційні лазер були створені з метою зменшення порогової густини струму. Використання гетеропереходу дозволяє реалізувати

односторонню інжекцію при слабологованому емітері лазерного діода і суттєво зменшити пороговий струм.

### 2.2.3 Твердотільні лазери

За останні 60 років після першої демонстрації Мейманом рубінового лазера у журналі Nature (1960) було розроблено численні типи лазерних іонів та матеріалів-господарів із довжиною хвилі випромінювання від ультрафіолету до середнього інфрачервоного спектрального діапазону. Незважаючи на стрімкий прогрес у галузі напівпровідникових лазерних технологій, твердотільні лазери все ще відіграють важливу роль у багатьох галузях науки, промисловості та повсякденного життя.

У роботі [24] коротко описані методи виготовлення лазерних кристалів та взаємодії матеріалу-хазяїна з лазерним іоном, розглянуто сучасний стан деяких важливих твердотільних лазерних концепцій для безперервних хвиль та імпульсних режимів роботи. Найчастіше зустрічаються лазери на рубіні і неодимовому склі, які є одними з найпотужніших імпульсних лазерів.

Неодимовий лазер може мати досить великий (довжиною до 100 см і діаметром 4-5 см) і оптично однорідний стрижень з імпульсом генерації енергії 1000 Дж за час  $\sim 10^{-3}$  сек. Працюють неодимові лазери на довжині хвилі  $\ell = 1,06$  мкм (рис 2.4)

Рубін - кристал окису алюмінію ( $Al_2O_3$ ), у якому частина ( $\sim 0.05\%$ ) атомів Al заміщена іонами хрому ( $Al_2O_3:Cr^{3+}$ ) Активним елементом рубінового лазера є кристал рубіна, у якому генеруючими центрами (активними частками) є іони хрому  $Cr^{3+}$ . Число активних часток невелике й становить долі відсотка від повного числа атомів середовища. Таким чином, активні частки в рубіні практично не взаємодіють один з одним, і їх енергетичний спектр зберігає деякі риси спектра, властивого ізольованому іону. Однак кожний окремий іон хрому перебуває в полі кристалічної решітки, тобто взаємодіє з атомами ґратки. Звичайно рубін збуджується випромінюванням потужної лампи накачування.



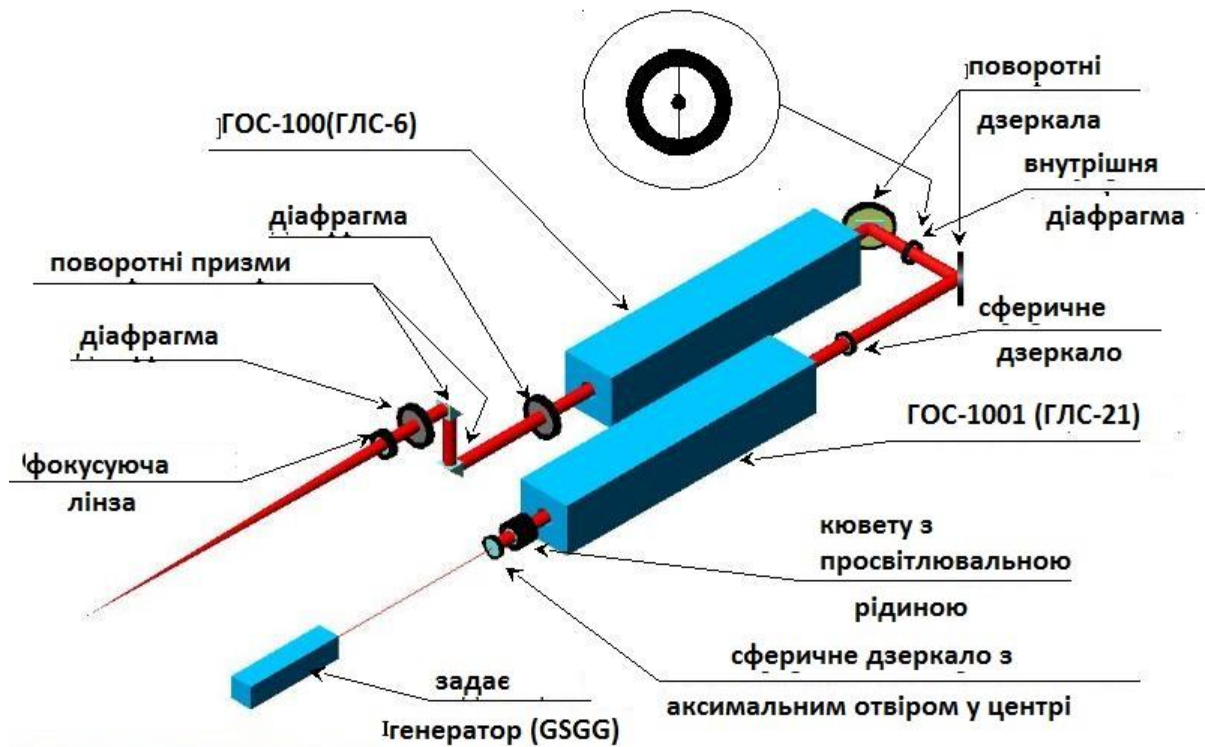


Рис. 2.4 Конструкція одимового лазера [26]

Рубіновий лазер працює по трьохрівневій енергетичній схемі. У цьому випадку при поглинанні випромінювання іони хрому з основного стану  $E_1$  переходять на енергетичні рівні, що лежать в енергетичній зоні  $E_3$ . Рівні зони  $E_3$  є допоміжними й використовуються тільки для порушення іонів хрому. Протягом малого часу частина збуджених іонів переходить на рівень  $E_2$ , а інші - на рівень  $E_1$ . Рівень  $E_2$  - метастабільний - імовірність спонтанного переходу з рівня  $E_2$  на рівень  $E_1$  мала. Завдяки цьому відбувається нагромадження великої кількості іонів хрому в стані  $E_2$ . При певній потужності лампи накачування досягається інверсна населеність рівнів  $E_1$  і  $E_2$ , і система під дією випромінювання частоти  $\nu_{1,2}$  виявляється здатною перейти в стан  $E_1$ , генеруючи при цьому потужне монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 6943 \text{ \AA}$  [25].

Твердотілим лазером безперервної дії є лазери на флюориті кальцію з домішкою диспрозія і лазери на берилієво-алюмінієвому гранаті з домішками різних рідкоземельних атомів. Одним з найбільш широко використовуваних в даний час твердотільних лазерів є лазер, в якому матрицею служить ітрій-

алюмінієвий гранат, а активатором – іони неодиму. Лазер має порівняно низький поріг збудження і високу теплопровідність, що дозволяє реалізувати генерацію при великій частоті проходження імпульсів, а також генерацію в безперервному режимі, ККД лазера порівняно високий. Велика частина твердотільних лазерів безперервної дії працюють в діапазоні хвиль довжиною  $\ell$  від 1 до 3 мкм. Потужність безперервної генерації сучасних лазерів на АГ: Nd (лазер на ітрий-алюмінієвому гранаті з неодимом) досягає 0,5 – 2,0 кВт і вище. Електрооптичний ККД твердотільних лазерів з використанням лампового накачування активних елементів 1-3%.

#### 2.2.4 Волоконні лазери

Лазерні скла витягуються в тонкі скловолокна, які підлягають переважно оптичній накачці через вихідний торець. Такі волоконні лазери генерують дифракційно-обмежене випромінювання основної моди, якщо використовується одномодове волокно. Завдяки великій площі волокна, у порівнянні з об'ємом, відбувається ефективне відведення тепла. Це дозволяє обходитися без додаткового охолодження. Волоконні одномодові лазери на активному середовищі з неодимом генерують вихідні потужності до 1 Вт в безперервному режимі [26].

Більш високі потужності (до 100 Вт) досягаються волоконними лазерами з подвійною серцевиною (активна одномодова серцевина знаходиться в оточенні другої багатомодової серцевини (серцевина накачування). Збільшення діаметра серцевини для одномодових лазерів може бути отримане шляхом використання лазерних оптокристалічних волокон з легованого кварцового скла, що містить наповнені повітрям капіляри. У волокнах процеси перетворення з підвищенням частоти дають видиме лазерне випромінювання при накачуванні за допомогою інфрачервоних лазерних діодів.

При цьому замість звичайних волокон з кварцевого скла застосовують так звані волокна ZBLAN, леговані іонами рідкоземельних елементів типу Pr, Er або

$Tm^{3+}$ . Із застосуванням легованих неодимом або тулієм волокон зі фотовмісного скла, вдається реалізувати лазерне випромінювання в ультрафіолетовій та синій областях спектра. Досить широке застосування в оптичних підсилювачах для довжини хвилі 1,55 мкм мають скловолокна, леговані ербієм [26].

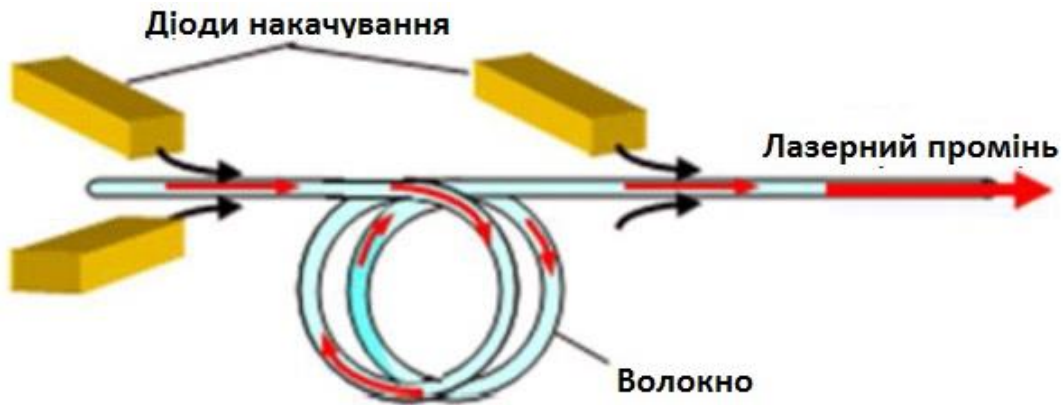


Рис. 2.5. Конструкція волоконного лазера

Сьогодні волоконні лазери є універсальними інструментами обробки для промислового виробництва. Вони є найбільш застосовності, ніж усі інші лазери, завдяки широкому діапазону потужності та характеристик променя, а також завдяки гнучкому перемикаю, розщепленню та скануванню променів. А їх ефективність, довжина хвилі та мінімальні вимоги до технічного обслуговування дозволяють проводити високоекономічні процеси у мікроелектроніці [26, 27].

## РОЗДІЛ 3

### ЗАСТУВАННЯ ЛАЗЕРІВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

Рухомий постійно зростаючим попитом на мініатюризацію, зменшення ваги та потужності та обробку потужності та швидкості, лазерна мікрообробка досягли великих успіхів у широкому діапазоні застосувань мікрівиробництва, таких як лазерне свердління наскрізних отворів для складання або нарощування друковані плати, ремонт фотомаски, розмітка, обрізка, нарізка та нанесення малюнків на плоскі панельні дисплеї та сонячні елементи. Причиною успіху лазерної мікрообробки в цих областях є здатність процесів лазерної мікрообробки досягати більш високих швидкостей, точності та надійності за меншу кількість кроків та більш екологічно стійким способом, ніж при звичайних фотолітографічних процесах [30].

#### **3.1 Основні технологічні процеси виготовлення елементної бази електроніки, що проводяться з використанням лазерних технологій**

Рушійною тенденцією в мікроелектроніці було й залишається бажання створювати в усі більшій кількості усе більш складні й більш функціональні вироби на все меншому просторі підложки, плати або корпуси. Досягалося це за рахунок: максимальної мініатюризації компонентів і укорочування міжсполучень; підвищення граничних робочих частот і розпаралелювання обчислювальних або обробних потужностей в одному приладі; переходу від плоских до «тривимірних» структур і т.д. Прикладом, що наочно демонструють сказане, є те, що в цей час топологічні розміри серійно вироблених структур впритул наблизилися до 15-20 нм (для цифрової електроніки), а для багатьох розв'язків аналогової і СВЧ-електроніки давно перевалили межу в 1 мкм. Зрозуміло, що для всього різноманіття сучасних виробів мікроелектроніки одночасно з їхньою мініатюризацією необхідне підвищення точності та надійності.

Без створення нового й гнучкого лазерного інструментарію для мікрорізання й відповідних йому технологій неможливо швидкий технологічний розвиток багатьох напрямків хай-тек-галузей.

Одним з найважливіших застосувань лазерної обробки в мікроелектроніці в цей час є використання лазерного мікрорізання в технологічних процесах виготовлення:

- підложок із кремнію й арсеніду галію з нанесеним на них покриттям товщиною 90 мкм;
- сапфірових підложок товщиною 90 мкм, використовуваних у потужних світлодіодах штук, що виготовляються мільйонами;
- підложок з нітриду алюмінію, використовуваних у якості радіаторів, і підложок з нітриду галію, використовуваних у лазерних діодах.

У найближчій перспективі можна чекати подальшого збільшення щільності розміщення електронних схем, що зажадає подальшого зменшення ширини лінії поділу. Виходячи із цього, ряд провідних фірм-виробників чипів, особливо японських, кілька років назад стали посилено розбудовувати технологію поділу підложок з різних матеріалів товщиною до 0,5 мм, що одержала назва STEALTH DICING. Суть її полягає в тому, що імпульси випромінювання короткої тривалості з довжиною хвилі  $\lambda = 1,06\text{—}1,07$  мкм фокусується усередину підложки. У результаті усередині матеріалу щодо фокальної площини утворюється зона зруйнованого матеріалу. Її наявність дозволяє провести поділ підложки від дії незначним механічним навантаженням. При цьому ширина лінії роздягнула не перевищує 10 мкм, що дозволяє віднести даний метод до прецизійної лазерної обробки [25].

Інші варіанти застосування лазерного променя в електроніці:

1. Застосування лазерної енергії для нагрівання паяних з'єднань, хоча і не є новою технікою, але все ще має потенціал у виробництві електроніки.
2. Ультратонке свердлення і різання дуже тонкого скла
3. Для формування конфігурацій провідного, резистивного і діелектричного шарів використовують лазерний метод – деякі ділянки плівки видаляють за

заданою програмою з підкладки випаровуванням під впливом променя лазера.

4. Конструювання плівкових підгінних резисторів, а саме видалення резистивної плівки електронним лазерним променем [26].

Напівпровідникова та мікроелектронічна промисловості були одними з перших розробників лазерної мікрообробки.

### 3.2 Лазерна підгонка номіналів резисторів

Розглянуто [27] питання технології лазерної підгонки параметрів плівкових елементів, які використовуються для створення прецизійних вимірювальних приладів та інтегральних схем. Технологія нанесення плівкових елементів базується на трьох основних групах процесів:

- 1) нанесення плівкових шарів;
- 2) формування топології плівкових елементів;
- 3) забезпечення заданих електрофізичних параметрів та їх точності.

Для цього використовують такі способи лазерної обробки плівок, як функціональне налаштування плівкових схем, п'єзокварцевих резонаторів, монолітних фільтрів і НВЧ-схем з розподіленими та зосередженими параметрами, корекція фотошаблонів лазерним ретушуванням, підвищення точності та стабільності резисторів і конденсаторів [28].

Наявність технологічних похибок ( $\gamma_\rho$  і  $\gamma_{K\phi}$ ) не дозволяють отримати плівкові резистори з точністю більше 10%. Для отримання більшої точності застосовують підстроювання резисторів за допомогою підгонки (adapting). Найбільше застосування отримали конструкції, що дозволяють провести підгонку по довжині ( $K\phi > 1$ ) і по ширині ( $K\phi < 1$ ). В обох випадках зміна опору відбувається в сторону збільшення. У першому випадку перерізають провідникові перемички, у другому електронним лазерним променем видаляється резистивна плівка на ділянці  $vr$  (рис. 3.1) [25].

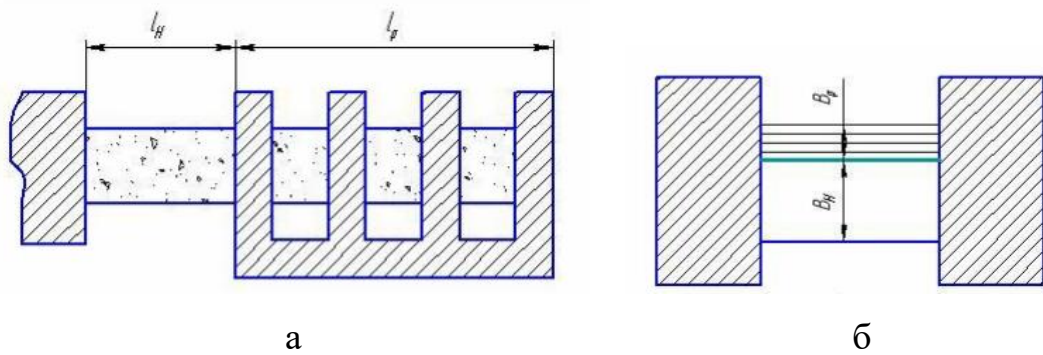


Рис. 3.1 – Конструкції резисторів: а) підганяльний резистор по довжині, б) підганяльний резистор по ширині [26]

Найбільш вживаними формами резисторів є прямокутна та трапецієвидна, а для їхньої підгонки використовують різні форми різів: X - різ вздовж ліній струму; Y - різ впоперек ліній струму, L - різ - комбінація X і Y - різів; J - різ (рис.3.2). Варіанти підгонки закладаються ще на стадії проектування топології схеми.

Точність підгонки може сягати 0.001 % і визначається стабільністю питомого опору, оскільки нагріваються також і периферійні по відношенню до розрізу області плівки, що змінює її структуру. В другому методі зміна опору резистора здійснюється без його руйнування: в сторону зменшення - шляхом лазерного відпалу дефектів (рекристалізації); в сторону збільшення - внаслідок окислення опроміненої лазером області [25].

Підгонка товстопліткових резисторів і конденсаторів принципово не відрізняється від тонкопліткових та проводиться зміною конфігурації елементів або відпалюванням. Використовується лазерна підгонка видаленням частини резистивної плівки. Точність виготовлення резисторів з підгонкою в умовах масового виробництва складає біля 2% [26].

### 3.3 Лазерне скрайбування напівпровідникових пластин

Скрайбування і розламування напівпровідникових пластин є завершальною стадією їх обробки і здійснюються після сформування на пластині всіх структур і внутрішніх виводів ІМС. Процес розділення пластин відбувається в два етапи:

1) скрайбування (на поверхню пластини наносяться із заданим кроком паралельні подряпини у взаємно перпендикулярних напрямках відповідно до рисунка на пластині, що відокремлює одну ІМС від іншої)

2) розламування пластини на окремі кристали під дією розтягуючих або стискаючих зусиль, прикладених перпендикулярно рискам (подряпинам).

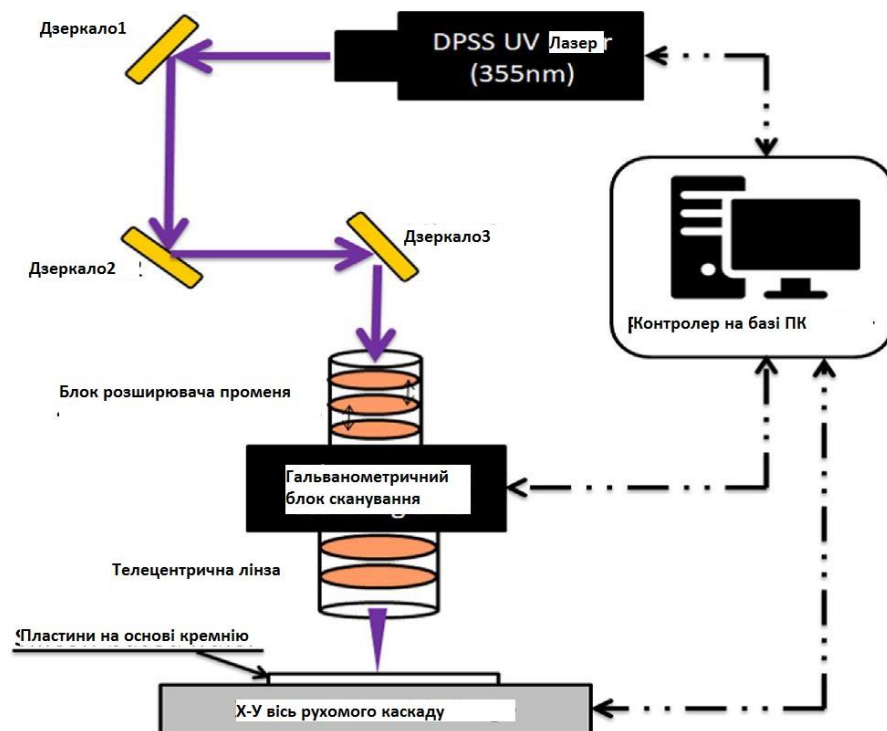


Рис. 3.2. Схема системи обробки лазерного скрайбування[27].

Скрайбування променем лазера проводиться при гострому фокусуванні променя ( $10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ см}^2$ ) достатньо високої потужності (до 108 Вт) і малому часі дії (до  $10^{-9}$  с). При більшій потужності та тривалості імпульсу до  $10^{-8}$  с на поверхні



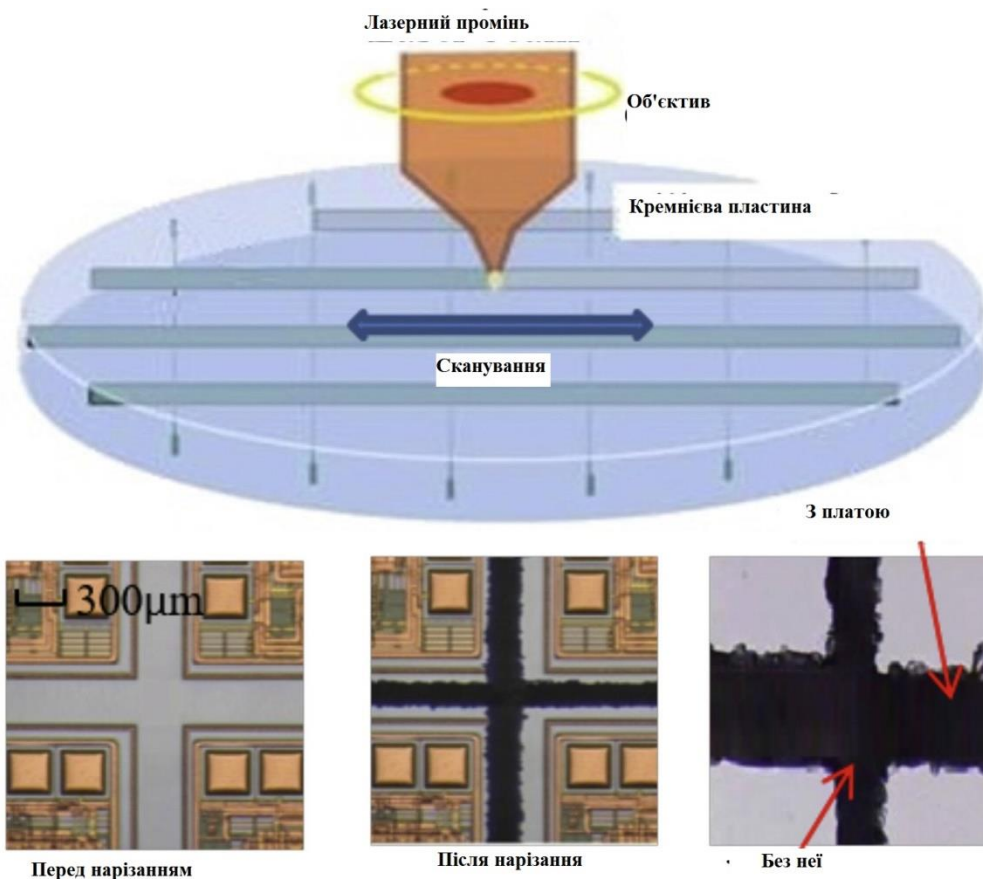


Рис 3.3. Попереднє випробування нарізки кремнієвої пластини[26].

матеріалу виникає плазмова хмара, що дає при розширенні ударну хвилю та призводить до дефектів структури в монокристалічних пластинах кремнію. Дія лазерного променя нагріває кремній із швидкістю 108 град/с, плавить і часткового випаровує, згодом охолоджує із швидкістю 105 град/с та викликає епітаксійну рекристалізацію розплавленого кремнію.

Термічні напруги генерують велике число дислокацій в напрямку розповсюдження тріщин. Скрайбування променем лазера має як переваги, так і недоліки. До переваг лазера порівняно із скрайбуванням алмазним різцем відносяться: зменшення числа і розмірів мікротріщин і сколів, можливість створення більшої глибини подряпин, вища швидкість скрайбування. Недоліками методу є: розбрикування розплавленого матеріалу, що примушує застосовувати спеціальні покриття для захисту робочої поверхні напівпровідникової пластини; висока вартість устаткування [27].

## ВИСНОВКИ

1. Принцип роботи лазера базується на використанні індукованого (вимушеного випромінювання) світла системою збуджених атомів, іонів, молекул або інших частинок речовини (активного середовища), розміщених в оптичному резонаторі.

2. Фізичні явища, що відбуваються при поглинанні сфокусованого лазерного випромінювання великої потужності досить складні. Крім того, фізичні явища при поглинанні лазерного випромінювання залежать від: природи і властивостей матеріалу; густини і потужності поглинутого випромінювання; тривалості впливу лазерного променя на матеріал.

3. Велике різноманіття лазерів пояснюється застосування різних типів активних елементів, способів накачування, різних значень вихідної потужності, довжини хвилі, а також різноманіттям технологічних задач, які реалізуються за допомогою лазера. У загальному випадку всі існуючі типи лазерів можна класифікувати за наступними ознаками: агрегатний стан активного середовища; по часовому режиму генерації; по частотному режиму генерації; по рівню потужності, що генерується; а також по експлуатаційним параметрам.

4. Найбільшого практичного застосування в електроніці знайшли твердотільні лазери, що генерують випромінювання у наступних спектральних областях: 0,3-3 мкм в імпульсному режимі та 0,69-2,6 мкм у безперевному режимі; волоконні лазери з потужністю до 30 кВт та напівпровідникові лазери з високим коефіцієнтом корисної дії (до 80 %).

5. Описано основні важливі процеси виготовлення елементної бази електроніки за допомогою лазера, а саме підгонка номіналів резисторів та лазерне скрайбування напівпровідникових пластин. Підгонку основи тонкоплівкових резисторів здійснюють лазерним променем з точністю 0.001%. Лазерне скрайбування пластин проводять твердотільним лазером при гострому фокусуванні променя, високій потужності і малому часі дії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дмитрієва Л. Б. Оптоелектроніка. Конспект лекцій для студентів ЗДІА. що навчаються за напрямком «Мікро- та наноелектроніка» денної та заочної форм навчання / Л.Б.Дмитрієва. В.С. Дмитрієв. – Запоріжжя, 2013 . - 51с.
2. Elijah Kannatey-Asibu Jr. Laser Generation. Principles of Laser Materials Processing - John Wiley & Sons, 2009. – 25 p.
3. Динаміка генерації лазера. [Електронний ресурс] - <http://apd.ipt.kpi.ua/downloads/file/167/kvantova-elektronika-lekcija-8---dinamika-generacii-lazera> (30.10.2016)
4. Prakash S., Kumar S. Microchannel fabrication via direct laser writing / Microfabrication and Precision Engineering // Research and Development. – 2017. - P. 163-187.
5. Ganeev R.A. Generation of harmonics of laser radiation in plasmas / Laser Physics Letters. - 2012. – V. 9, No 3. – P. 102-129
6. Фізичні принципи лазерів. [Електронний ресурс] - <https://studfile.net/preview/2270316/page:7/> (28.08.2018)
7. Schneider M., Berthe L., Fabbro R., Muller M. Measurement of laser absorptivity for operating parameters characteristic of laser drilling regime // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – V. 41, No 15. - P. 6
8. Alexandrov S., Usov S., Voznesenskaya A., Zhdanov A., Kochuev D., Morozov V. Research of the absorption of laser radiation by powder materials / Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – No 1164. – P. 012001.
9. Bergström D. The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces: Doctoral Thesis. - Luleå, 2008. – 226 p.
10. Gillner A., Gretzki P. Laser Micro-structuring / Micromanufacturing Engineering and Technology Micro and Nano Technologies. – 2015. - P. 107-119.
11. Поглинання лазерного випромінювання прозорими матеріалами. [Електронний ресурс] - <https://kafvp.kpi.ua/wpcontent/uploads/2017/01/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-19.pdf> (13.12.2017)

12. Поглинання лазерного випромінювання в непрозорих матеріалах. [Електронний ресурс] - <https://kafvp.kpi.ua/wpcontent/uploads/2017/01/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-17.pdf> (15.03.2015)
13. Поглинання лазерного випромінювання, напівпровідники [Електронний ресурс] - <https://kafvp.kpi.ua/wpcontent/uploads/2017/01/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-20.pdf>(15.03.2015)
14. Зміни структури і властивостей металів в результаті поглинання лазерного випромінювання. [Електронний ресурс] - <https://kafvp.kpi.ua/wpcontent/uploads/2017/01/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-18.pdf>(15.03.2015)
15. Посудін Ю. І. Фізика з основами біофізики: Підручник. – Київ: Світ, 2003. – 400 .
16. Gas Lasers. [Електронний ресурс] - <http://www.sfu.ca/~gcharman/e894/e89418h.pdf> (23.07.2019)
17. J. Gary Eden, Jürgen Eichler. Digital Encyclopedia of Applied Physics. - John Wiley and Sons, 2004.
18. Pamela L . Derry Luis Figueroa Chi-Shain Hong. Handbook of Optics, Third Edition Volume II: Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry, 2009. – P. 13.1-13.55.
19. Britt Elin Gihleengen, Lasse Thoresen, Kim Anja Grimsrud. Semiconductor Lasers. –TFY14 Functional Materials, 2007. – 2007. – 22 p.
20. Manijeh Razeghi. Semiconductor Lasers / In: Technology of Quantum Devices. Springer, Boston, MA. –2009. – P. 209-270.
21. Guenter Huber, Christian Kränkel, and Klaus Petermann. Solid-state lasers: status and future [Invited] // Journal of the Optical Society of America B. – 2010. – V. 27, №11. – P. 93-105.
22. Навчальний посібник «Квантова електроніка». Частина 2. Для студентів факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського усіх форм навчання /Шмиррова Л.М., Бевза О.М., Слободян Н.В. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 101 с.

23. Frank Becker, Corinna Brettschneider, Peter Kallage and Wolfram Rath. Fiber Lasers. A universal tool for industrial production // Laser Technik Journal. – 2014. – V. 1. – P. 34-38.

24. Stephen Norman, Mikhail N. Zervas, Andrew Appleyard, Michael K. Durkin, Ray Horley, Malcolm P. Varnham, Johan Nilsson, Yoonchan Jeong. Latest development of high-power fiber lasers in SPI // Fiber Lasers: Technology, Systems, and Applications. – 2004. – V. 5335. - P. 1-9.

25. Alberto Piqué. Laser-Based Micro–Additive Manufacturing Technologies / Three-Dimensional Microfabrication Using Two-photon Polymerization. Micro and Nano Technologies. – 2016. - P. 1-19.

26. An on-machine error calibration method for a laser micromachining tool./ ian-xiong Chena, Shu-wen Lina, Xiao-long Zhou, Yi-liu Tu// Precision Engineering. - 2016. - P. 10

27. Multilayer stack materials on silicon-based wafer dicing processes using ultraviolet laser direct dicing and milling methods/ Ching-Ching Yan, Chih-Chung Yang, Chih-Ning Hsu, Kuo-Cheng Huang, Shih-Feng Tseng, Wen-Tse Hsiao// Optics and Laser Technology. – 2018. – P. 441-449.