

**Конспект лекцій**  
**3 курсу**  
**«Застосування лазерів і пристроїв**  
**оптоелектроніки»**

## **Тема 1. Вступ. ТБ.**

Існує багато типів лазерів, доступних для дослідницьких, медичних, промислових та комерційних цілей. Лазери можна класифікувати за різними параметрами.

### **За агрегатним станом активного середовища.**

- Твердотільні
- Газові
- Рідинні (на барвниках)
- Напівпровідникові
- Лазери на вільних електронах
- Лазери на парах металів

### **За способом накачування і принципу дії.**

- Електричний розряд.
- Пучком електронів.
- Оптичне накачування широкосмуговим і вузькосмуговим випромінюванням.
- Інжекція електронів в напівпровідникових переходах.
- Рекомбінаційна - рекомбінація електронів і іонів в плазмі.
- Хімічна реакція.
- Теплове збудження. (Газодинамічні лазери).

### **За довжиною хвилі (діапазоном).**

- Субміліметрові.
- Інфрачервоні.
- Видимі.
- Ультрафіолетові.
- Рентгенівські.

### **За конструкцією.**

### **За характером випромінювання.**

- Неперервні.
- Імпульсні.

**За середньої випромінюваної потужності.**

**За енергією імпульсу.**

**За потужністю імпульсу.**

**За тривалістю імпульсу.**

**Перебудовувані або працюють на фіксованому довжині хвилі.**

**За якістю випромінювання.**

- Одномодові. (Вузькополосні).
- Багатомодові. (Широкополосні).

**За класом безпеки**

Лазерні вироби **класу I**. Немає відомих біологічних загроз. Випромінювання закрите від будь-якого можливого попадання на людину, а лазерна система має блокування, що не дозволяє включити лазер у відкритому стані. CD-червоний 780нм, DVD - 635нм, Blu-ray - 405 нм. Потужності від 0,7 мВт до 8мВт

Лазерні вироби **класу II**. Вихідна потужність до 1 мВт. Такі лазери не вважають оптично небезпечними пристроями, так як рефлексії очей попереджають будь-яке пошкодження. Лазери класу II не створюють ушкоджень очей за такий короткий час. На лазерному обладнанні повинні бути розміщені попереджувальні знаки (жовті).

Лазерні вироби **класу IIIa**. Вихідна потужність від 1 мВт до 5 мВт. Такі лазери можуть призводити до часткової сліпоти при певних умовах і до інших пошкоджень очей. Вироби, що містять лазер класу IIIa, повинні мати індикатор лазерного випромінювання, що показує, коли лазер працює. Вони також повинні мати знак «Danger» («небезпека») і знак, що показує вихідний отвір лазера, закріплені на лазері і/або обладнанні. Слід встановити вимикач живлення у вигляді замку з ключем, щоб запобігти несанкціонованому використанню.

Лазерні вироби **класу IIIb**. Вихідна потужність від 5 мВт до 500 мВт. Такі лазери вважаються безумовно загрозою для зору, особливо на великих потужностях, які ПРИВЕДУТЬ до погіршення якості зору. Такі лазери ЗОБОВ'ЯЗАНІ мати замок з ключем проти несанкціонованого використання, індикатор наявності лазерного випромінювання, затримку включення від 3 до 5 секунд після подачі живлення, щоб оператор міг встигнути відійти від шляху розповсюдження променя, і механічний затвор, що дозволяє перекривати промінь під час використання. На високих рівнях вихідної потужності може бути обпечена шкіра, а короткочасне напрямлення на деякі матеріали може призводити до займання. Червоний знак «DANGER» («НЕБЕЗПЕКА») і знак вихідного отвору ЗОБОВ'ЯЗАНІ бути розміщені на такому лазері.

Лазерні вироби **класу IV**. Вихідна потужність > 500 мВт. Такі лазери МОЖУТЬ пошкодити і травмувати органи зору. Потужності рівня IV-го класу МОЖУТЬ запалити і запалити горючі матеріали при попаданні, в тому числі обпалити шкіру і пропалити одяг. Такі лазерні вироби ЗОБОВ'ЯЗАНІ мати:

Замок з ключем для запобігання несанкціонованого використання, блокування для запобігання використанню системи зі знятими кришками, індикатори наявності випромінювання, що показують, що лазер працює, механічні затвори для блокування променя і червоні знаки «DANGER» («НЕБЕЗПЕКА») і знаки вихідного отвору, закріплені на лазері.

Відбитий промінь повинен вважатися таким же небезпечним, як первісний промінь. (1000-ватний лазер на CO<sub>2</sub>, пропалює дірку в сталі, а що він зробить з оком!) Графер для фанери, МДФ має 80 Вт.

## Тема 2. Лазери як системи квантової електроніки

- *"Основи генерації лазерного випромінювання"*

### Багатозарядні іони лазерної плазми

Утворення багатозарядних іонів у лазерній плазмі відбувається при зіткненнях з іонами швидких електронів, що отримали енергію від світлової хвилі. При цьому найбільш вірогідний процес послідовної іонізації, що багато разів повторюється. Енергія, необхідна для видалення одного електрона з нейтрального атома  $I_0$  або з іона із зарядом  $z$  (відповідно,  $I(z)$ ), називається потенціалом іонізації з точністю до розмірності заряду. З збільшенням  $z$  потенціали іонізації швидко ростуть:  $I(z) = I_0 z^\alpha$ , де  $\alpha \geq 2$ .

- *"Основні параметри та режими роботи лазерів. Класифікація лазерів"*

Якщо відомо  $q(t)$ , то неважко визначити вихідну потужність лазера через друге дзеркало резонатора:

$$P = (\gamma_2 c / 2L) h\nu q.$$

Здесь  $\gamma_2 = -\ln(1 - T_2)$ , где  $T_2$  – коефіцієнт пропускання вихідного зеркала,  $L$  – довжина резонатора.

Наближене рішення системи рівнянь дозволяє обчислити повну потужність випромінювання лазера з урахуванням коефіцієнтів відбиття  $R$  і пропускання  $T$  дзеркал резонатора:

$$P = \frac{V_a(N_t + N_0)h\nu}{2V} \left(\frac{\gamma_2}{2V}\right)(W_p / W_{cp} - 1),$$

де  $W_p$ ,  $W_{cp}$  – швидкість накачування і порогова швидкість.

### Оптична накачка

Спосіб широкопasmового оптичного накачування за допомогою ламп (некогерентне накачування) використовується в основному в твердотільних і рідинних лазерах. Тверді тіла і рідини характеризуються значним

розширенням спектральних ліній так, що їх потрібно розглядати не як лінії, а як смуги зі спектральною шириною  $\sim 100$  нм.

Отже, ККД накачування  $\eta_p$  можна записати у вигляді твору чотирьох членів

$$\eta_p = \eta_r \eta_t \eta_a \eta_{pq},$$

де  $\eta_r$  – випромінювальна ефективність лампи;  $\eta_t$  – ефективність передачі, яку можна визначити як відношення потужності накачування, дійсно надходить в АТ;  $\eta_a$  – ефективність поглинання, тобто частка світла, що потрапляє в АТ;  $\eta_{pq}$  – квантовий вихід потужності накачування, яка призводить до інверсії населеностей на верхньому рівні.

Завдяки циліндричній формі лампи накачування вдається створити економічну конструкцію лазерів. Діаметр і довжина лампи накачування близькі до відповідних параметрів АТ. Діаметр від декількох міліметрів до декількох десятків міліметрів, а довжина від декількох сантиметрів до декількох десятків сантиметрів. Досягнення високої ефективності ККД накачування  $\eta_p$  обумовлено конструктивним виконанням і взаємним розташуванням ламп накачування і АТ

### **Плоскопаралельний резонатор**

Резонансні частоти

Різниці частот між двома послідовними модами  $n$  або  $m$ , що розрізняються на одиницю, називаються поперечними модами, і визначаються виразом:

$$\Delta \nu_m = cL(m + 1/2)(1/8qa^2).$$

Для типових значень  $L \approx 1$  м величини  $\nu_q$  складають близько декількох сотень мегагерц, тоді як  $\nu_m$  – або  $N \nu_n$  – порядку декількох мегагерц

### **Сферичні резонатори**

Резонансні частоти

$$\Delta \nu_{mnq} = \frac{c[2q + (m + n + 1)]}{4L}.$$

### **Перетворення енергії накачування в лазерних резонаторах**

Одним з головних вимог, що пред'являються до лазерного резонатора, є висока ефективність перетворення енергії, запасеної у збудженій АТ, в енергію лазерного випромінювання. Для досягнення цього необхідно виконати наступні умови:

1) вибрати розміри і розташування дзеркал резонатора так, щоб весь об'єм АТ був однорідно заповнений лазерним випромінюванням;

2) оптимізувати величини коефіцієнтів поглинання  $T$  і відображення  $R$  дзеркал резонатора. Цими величинами обумовлені втрати, що виникають всередині резонатора.

Таким чином, оцінка ефективності перетворення енергії для багатомодової генерації з урахуванням всіх факторів і втрат випромінювання в резонаторі призводить до рівняння, що залежить від багатьох компонент і геометричних факторів резонатора, і має вигляд:

$$\eta = \frac{k_{yc}^0 - \sigma_0 - \ln(1/R) / 2L}{k_{yc}^0 \alpha P_{нак}} \frac{\ln(1/R)}{\ln(1/R) + 2\sigma_0 L},$$

де  $k_{yc}^0$ -коефіцієнт посилення випромінювання в середовищі;  $\sigma_0$ -коефіцієнт шкідливих втрат в резонаторі;  $\alpha = \tau / A$ -коефіцієнт нелінійності;  $\tau$  – час спонтанного розпаду збудженого стану;  $a$ -коефіцієнт пропорційності між інверсною населеністю і  $k_{yc}^0$ ;  $L$  – довжина резонатора;  $R$  – коефіцієнт відбиття вихідного дзеркала резонатора;  $P_{нак}$  - потужність накачування.

довжина когерентності світла  $l_k = 1 / \delta \nu$  обернено пропорційна спектральній ширині лазерного випромінювання, вираженій в  $см^{-1}$ . Наприклад, для білого світла, що займає весь видимий діапазон від  $\lambda_1 = 0,4$  мкм до  $\lambda_2 = 0,76$  мкм, отримуємо  $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = 1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 \approx 104$   $см^{-1}$ . Звідси довжина когерентності білого світла дорівнює  $l_k = 10^{-4}$   $см = 1$  мкм. Характерна величина довжини когерентності гелій-неонового лазера становить  $l_k = 25$   $см$ . Таким чином, когерентність лазера набагато перевищує когерентність природного світла.

**Експериментальне вимірювання розходимості лазерного пучка.** поняття далекої зони вимагає, як правило, значного видалення від

лазерного джерела. Так, при довжині хвилі  $\lambda = 1$  мкм і діаметрі 5-0 см лазерного пучка далека зона формується тільки на відстані близько декількох кілометрів. Однак неважко домогтися експериментальним виміром розходимості і в безпосередній близькості від джерела випромінювання. Для цього необхідно на виході лазера встановити квадратичний фазовий коректор. Найпростішим пристроєм такого роду є звичайна тонка лінза зі сферичними поверхнями ( $f > 0$ ).

- *"Лазерні джерела для реалізації основних процесів лазерних технологій"*

**Рубіновий лазер** Рубін являє собою кристал  $Al_2O_3$  (корунд), в якому ряд іонів  $Al^{3+}$  заміщені іонами  $Cr^{3+}$ . Кристали Рубіна, що застосовуються в лазерах в якості активного середовища, містять приблизно 0,05 вага.%  $Cr_2O_3$

Спектральна ширина переходу рубінового лазера становить  $\nu \nu = 11$  см<sup>-1</sup>, це означає, що рубіновий лазер може працювати як в безперервному так і в імпульсному режимах. При тривалості імпульсу  $\tau = 10$  нс пікова потужності досягає 50 МВт, а в режимі синхронізації мод пікова потужність в імпульсі з тривалістю 10 Пс дорівнює кільком гігаватам.

У рубінових лазерах застосовуються круглі стрижні діаметром 2-3 см і довжиною 20-30 см

**Неодимові лазери** В якості активного середовища в неодимових лазерах використані іони неодиму, леговані або в скляну матрицю (~3 Вага.%), або в кристал ітрій-алюмінієвого граната (~1 ат.%).

Лазер на склі з неодимом при кімнатній температурі має спектральну ширину, рівну  $\nu \nu = 280$  см<sup>-1</sup>, а лазер на гранаті, легований неодимом (YAG:Nd<sup>3+</sup>), всього  $\nu \nu = 6,5$  см<sup>-1</sup>.



Основные технические параметры неодимовых лазеров

Неодимовые лазеры			
№	Параметры лазера	Nd <sup>3+</sup> на стекле	YAG:Nd <sup>3+</sup>
1	Выходная мощность излучения в непрерывном многомодовом режиме	–	≤ 200 Вт
2	Средняя мощность при частоте повторения импульсов 50 Гц	–	~500 Вт
3	Пиковая импульсная мощность	До 10 <sup>12</sup> Вт	≤ 10 <sup>8</sup> Вт
4	Длительность импульса	≥ 5 пс	≥ 20 пс
5	Максимальная энергия импульса	~ 1 кДж	500 мДж
6	КПД	до 6 %	до 3,3 %
7	Максимальная частота повторения импульсов	5 Гц	2·10 <sup>4</sup> Гц
8	Спектральная ширина излучения	≥ 10 <sup>-4</sup> см <sup>-1</sup>	≥ 10 <sup>-4</sup> см <sup>-1</sup>
9	Расходимость излучения	10 <sup>-5</sup> рад	10 <sup>-5</sup> рад
10	Энергетический порог механического разрушения оптических элементов лазера	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup> Дж/см <sup>2</sup> (в св. режиме) 10–10 <sup>2</sup> Дж/см <sup>2</sup> (при дл. имп. ~ 20 нс)	10–30 Дж/см <sup>2</sup> (при дл. имп. ~ 20 нс)

**Гелій-неоновий лазер** Специфічна особливість He-Ne-лазера полягає в тому, що вихідна потужність не збільшується монотонно зі струмом розряду, а досягає максимуму і потім зменшується. Тому кожен He-Ne-лазер забезпечується строго індивідуальним джерелом живлення. Крім цього He-Ne-лазер має інші оптимальні параметри, а саме: 1) твір повного тиску газу  $p$  на діаметр трубки  $D$  має бути  $pD = 3,6-4,0$  (мм.рт. мм; 2) оптимальний внутрішній діаметр трубки ( $d = 2$  мм); 3) Вихідна потужність випромінювання на довжині хвилі  $\lambda = 632,8$  нм  $\sim 10$  мВт, і  $\sim 100$  мВт для  $\lambda = 3,39$  мкм при довжині трубки 100 см; 4) оптимальне відношення тисків He / Ne повинно бути 5 : 1 для  $\lambda = 632,8$  нм і 9: 1 для  $\lambda = 1\ 150$  нм. Верхні Лазерні рівні довжин хвиль  $\lambda_1 = 3,39$  мкм і  $\lambda_2 = 0,6328$  мкм збігаються, тому оптимальні умови розряду виявляються однаковими. Спектральний ширина лінії для  $\lambda_1 = 632,8$  нм становить  $\nu \nu \approx 1,4$  ГГц, тому генерацію в одній поздовжній моді можна здійснити, використовуючи короткий резонатор, у якого різниця частот поздовжніх мод  $c/2L$  порівнянна з  $\nu \nu$ . Фактично це означає, що довжина резонатора не повинна перевищувати  $L \leq 15-20$  см.

**Аргоновий лазер** Істотною особливістю аргонового лазера є те, що посилення аргонового лазера не залежить від діаметра газорозрядної трубки, оскільки заселення метастабільних рівнів не призводить до зменшення інверсії населення, а також те, що його вихідна потужність швидко зростає зі збільшенням струму розряду. Характерна спектральна ширина

випромінювання аргонного лазера становить кілька тисяч МГц, що дозволяє отримувати надкороткі імпульси (~150 пс)

Основні технічні параметри аргонного лазера, що випускаються промисловістю: вихідна потужність від 1 до 20 Вт, Довжина хвилі 514,5 нм або 488 нм, режим роботи: імпульсний і безперервний, ККД < 10-3, спектральна ширина випромінювання  $\leq 3$  500 МГц.

Основные технические параметры современных лазеров

№ п/п	Тип лазера	Режим работы	Длина волны (нм)	Средняя мощность (Вт)	Пиковая мощность (Вт)	Длит. им-пульса. (нс)	КПД %
1	Рубин	имп.	694,3	1	10-10 <sup>4</sup>	≤ 10	< 0,1
2	YAG:Nd <sup>3+</sup>	непр.	1 064	200	–	–	1-3
3	YAG:Nd <sup>3+</sup>	имп.	1 064	1 000	10	5 000	1-3
4	YAG:Nd <sup>3+</sup>	имп.	1 064	10	2·10 <sup>4</sup>	10-20	1-3
5	He-Ne	непр.	632,8	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup>	–	–	< 0,1
6	Cu	имп.	510,5	40	100	20-40	1-2
7	Ar <sup>+</sup>	непр.	514,5	10-150	–	–	< 0,1
8	He-Cd	непр.	325	0,1	–	–	–
9	He-Cd	непр.	441,6	0,1	–	–	–
10	CO <sub>2</sub>	непр.	10 600	(1-50)·10 <sup>3</sup>	–	–	10-20
11	CO <sub>2</sub>	имп.	10 600	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	100-500	10
12	N <sub>2</sub>	имп.	337,1	0,1	10 <sup>3</sup>	10	< 0,1
13	HF	имп.	2 600- 300	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	–	–
14	GaAs	непр.	850	1	–	–	40
15	ЛСЭ	непр.	мм – синяя область	до 100	–	–	1-10

На рис видно, що лазери можуть перекривати досить широкий діапазон довжин хвиль (від 0,1 мкм до 1 мм). Вихідна потужність випромінювання лазерів від декількох міліватт до декількох мегаватт в безперервному режимі і до 100 ТВт в імпульсних лазерах. Тривалість імпульсу лазерного випромінювання можна отримати від 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-15</sup> с. лінійні розміри резонаторів змінюються від 10<sup>-6</sup> до 10<sup>3</sup> м.

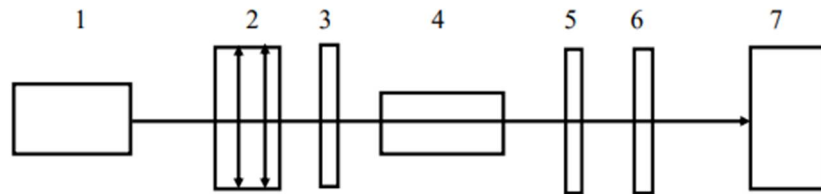
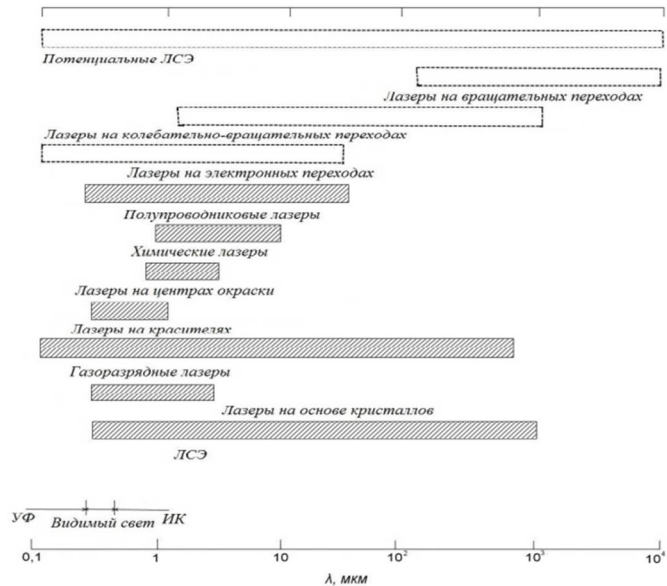
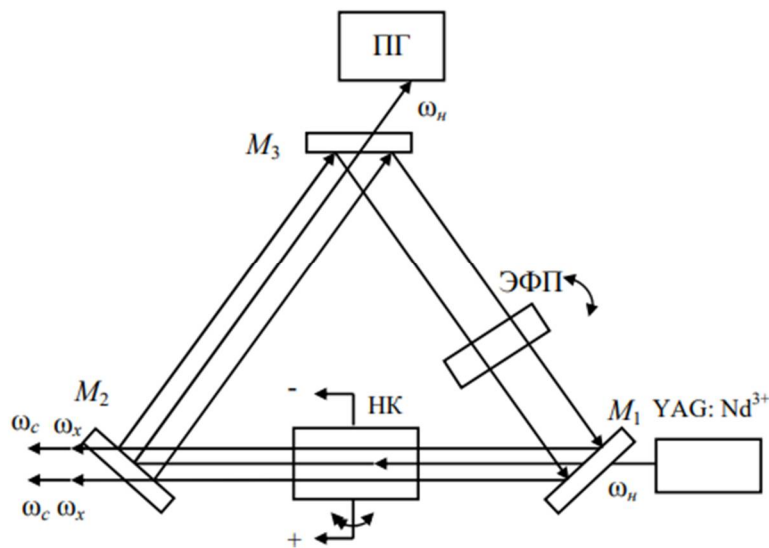


Схема експериментальної установки для отримання позарезонаторної параметричної генерації:

1-YaG: Nd<sup>3+</sup> - лазер накачування; 2-фокусуюча система; 3-дзеркало  $R_p \leq 5\%$  і  $R_s = 100\%$ ; 4-нелінійний кристал; 5-дзеркало  $R_s = 60-70\%$ ; 6-дзеркало  $R_s = 10\%$  і  $R_p = 100\%$ ; 7-контрольно-вимірювальна система



Оптичної схема кільцевого резонатора ПГС: YAG: Nd<sup>3+</sup> - лазер накачування; НК-нелінійний кристал з LiNbO<sub>3</sub>; M1, M2, M3-дзеркала; ЭФП-

еталон Фабрі-Перо; ПГ-поглинач випромінювання лазера накачування;  $\omega_s$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_n$ -сигнальна і неодружена частоти і частота лазера накачування

Для накачування параметричного генератора світла (ПГС) використовується випромінювання лазера з активним елементом YAG:Nd<sup>3+</sup> розмірами  $\varnothing 6,3 \times 100$  мм. Лазер накачування зібраний за схемою нестійкого телескопічного резонатора. Енергія випромінювання на довжині хвилі  $\lambda = 1,064$  мкм в імпульсі становить 160 мДж, тривалість імпульсу випромінювання – 10 нс, частота проходження імпульсів – 20-30 Гц. Випромінювання лінійно поляризоване в горизонтальній площині. Розподіл інтенсивності пучка в перетині має вигляд концентричних кілець. Випромінювання лазера накачування входить в резонатор через плоске дзеркало M1 з наступними параметрами: поверхня 1 – AR  $\lambda = 1,064$  мкм; поверхня 2 – AR  $\lambda = 1,064$  мкм, HR = 1,42–1,75 мкм. Параметри дзеркал резонатора ПГС M2: Поверхня 1–HR  $\lambda = 1,064$  мкм, R = 80% для  $\lambda = 1,42$ –1,75 мкм, НТ 2,9 – 4,2 мкм; поверхня 2– НТ  $\lambda = 1,42$ –1,75 мкм і 2,9-4,2 мкм. Дзеркало M3 повністю пропускає падаюче на нього випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 1,064$  мкм, поверхня 1 – HR  $\lambda = 1,42$ –1,75 мкм, поверхня 2 – AR  $\lambda = 1,064$  мкм. Активний елемент з НК LiNbO<sub>3</sub> розмірами  $10 \times 10 \times 30$  мм з орієнтований  $\theta = 47^\circ$ ,  $\phi = -90^\circ$ . Тип взаємодії-еєо. Оптичні поверхні кристала мають покриття: AR  $\lambda = 1,064$  мкм, AR  $\lambda = 1,42$ –1,75 мкм і 2,9–4,2 мкм. Діаметр пучка накачування на вході в НК - 6 мм .НК встановлений на обертальній платформі з кроковим двигуном (ШД), точність обертання і розмір кроку якого відповідають 3 arcsec і 0,03 см–1. Обертання НК навколо вертикальної осі забезпечує плавну перебудову довжини хвилі вихідного випромінювання ПГС. Дискретна зміна довжини хвилі випромінювання ПГС досягається електричним способом При подачі на бічні неробочі поверхні кристала LiNbO<sub>3</sub> постійної напруги, величина якого і визначає крок дискретної перебудови.

Максимальне значення постійної напруги для LiNbO<sub>3</sub> дорівнювало 4 500 В. зміна цієї напруги через кожні 50 в оответствует мінімального кроку дискретної перебудови довжини хвилі ПГС, Рівному 0,133 нм. Сумарний

інтервал дискретного зсуву довжини хвилі випромінювання ПГС (від імпульсу до імпульсу) регулюється від 0 до 12 нм.

### **Тема 3. Застосування оптоелектронних та лазерних пристроїв у науці.**

*Лазерні далекоміри. Адаптивна оптика та компенсація атмосферних спотворень.»*

#### **Лазерні далекоміри**

При постійній швидкості поширення електромагнітного випромінювання в шарі середовища (атмосфері, космосі, воді) дальність до об'єкта можна розрахувати за допомогою наступного виразу (при цьому враховується, що лазерне випромінювання проходить подвійну відстань):

$$L = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (1)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі;

$\Delta t$  – інтервал часу між моментами відправки і прийому випромінювання зондуючого імпульсу;  $n$  – показник заломлення середовища поширення для використаної довжини хвилі випромінювання.

Як випливає з виразу (1), для зменшення похибки вимірювання дальності до об'єкта необхідно забезпечити сталість швидкості поширення випромінювання в шарі середовища і його прямолінійність. Ці умови не завжди можуть бути здійсненні: наприклад, при розташуванні далекоміра на повітряному судні і скануванні їм об'єктів на Землі необхідно враховувати явище рефракції, що приводить до викривлення оптичного шляху лазерного випромінювання. При лазерній локації в турбулентних середовищах оптичний шлях лазерного випромінювання також спотворюється (відрізняється від прямолінійного).

Основний внесок в похибку вимірювання дальності до об'єкта вносять похибки, що виникають при вимірі тимчасового інтервалу між моментами

відправки і прийому випромінювання зондуєчого імпульсу. Серед них можна виділити:

- систематичну похибку, яка обумовлена різним часом затримки сигналу в каналах фіксації випромінюваного (старт-) і прийнятого (стоп-) імпульсів;
- похибку, яка обумовлена кінцевою дискретністю вимірювача часових інтервалів;
- похибка тимчасової фіксації імпульсів випромінювання.

Систематичну похибку, яка обумовлена різним часом затримки сигналу в каналах фіксації випромінюваного (старт) і прийнятого (стоп-) імпульсів, можна або мінімізувати, або, внаслідок систематичності її характеру, врахувати при вимірюванні тимчасового інтервалу. Мінімізація цієї похибки можлива при схемній компенсації, а при схемі суміщеного старту, коли старт і стоп-імпульси подаються на один приймач випромінювання, вона компенсується повністю. У системах без поєднаного старту цю систематичну похибку можна врахувати за допомогою багаторазового вимірювання каліброваної дистанції.

Вплив дискретності вимірювача часових інтервалів при несинхронності його внутрішньої тактової частоти з моментами випромінювання зондуєчого імпульсу можна оцінити по дисперсії пов'язаної з нею похибки:

$$D = \frac{\Delta d^2}{6}, \quad (2)$$

де  $\Delta d$  – дискретність вимірювань інтервалів в одиницях дальності.

Зважаючи на це, середнє квадратичне відхилення оцінки дальності складе  $\delta = 0,408\Delta d$ . При використанні тактового генератора для вимірювача часових інтервалів з частотою від 150 Гц до 300 МГц похибка, викликана дискретністю, складе від 0,1 м до 0,2 м.

Похибка тимчасової фіксації імпульсів випромінювання в основному пов'язана з прийомом відбитого від об'єкта лазерного імпульсу – потужність сигналу може змінюватися на кілька порядків залежно від дальності до об'єкта і його коефіцієнта відбиття, стану шару середовища поширення випромінювання. Крім того, на сигнал накладаються шуми і перешкоди

приймального каналу і каналу поширення. Все це призводить до сильних спотворень форми прийнятого сигналу і, як наслідок, до похибки фіксації моменту приходу даного імпульсу граничним пристроєм (рис. 1).

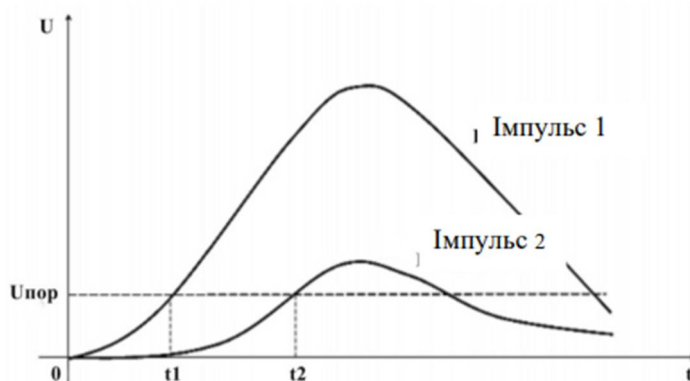


Рисунок 1.1 – Тимчасова фіксація імпульсу за часом

На рисунку:  $t_1, t_2$  – моменти фіксації відбитих імпульсів;  $U_{пор}$  – поріг спрацьовування.

- «Використання лазерів в фізиці й хімії»
- «Застосування лазерів для оптичного зв'язку»

Засобами радіозв'язку та радіолокації лазерні володіють двома основними перевагами: вузькою спрямованістю передачі та широкою смугою пропускання переданих частот. Сам лазер створює спрямований промінь, А застосування оптичної системи дозволяє сформувати ще більш паралельний промінь Один лазерний промінь дозволяє передавати сигнал в смузі частот 100Мгц. Це дає можливість одночасної передачі 200 телевізійних каналів.

Перші відомості застосування лазерної локації відносяться в 1962 р., коли була здійснена локація Місяця. Збільшення потужності, випромінюваної лазером, зробить можливим картографування поверхні Місяця з Землі з високою точністю (близько 1,5 м). Лазерна локація застосовується також у геофізиці для визначення висоти хмар, дослідження інверсійних і аерозольних шарів в атмосфері, турбулентності і т.п.

Для оптичної передачі інформації в діапазоні довжини хвиль від 0,4 до 30 мкм як джерела світла застосовують світлодіоди, лазери в усьому діапазоні довжини хвиль.

Джерела світла для оптичного зв'язку у вільному просторі:

> He-Ne-лазер,  $\lambda = 0,63$  мкм — випромінювання лежить у видимому оптичному діапазоні, що сильно полегшує юстирування лінії передачі;

> CO<sub>2</sub>-лазер,  $\lambda = 10,6$  мкм — придатний для більш довгих ліній передач, оскільки за допомогою них лазерів досягаються вищі вихідні потужності в безперервному режимі (10-15 Вт).

Недоліками обох лазерів є їх низький ККД, а також великі розміри.

> Nd-ІАГ-лазер,  $\lambda = 1,06$  мкм (його друга гармоніка,  $\lambda = 0,53$  мкм) — цей лазер використовується переважно для передачі інформації між наземними станціями й супутниками.

Джерела світла для оптичного зв'язку через світловоди:

> світлодіоди;

> напівпровідникові інжекційні лазери, що працюють у безперервному й імпульсному режимах.

Через мале затухання у світловоді на довжині хвилі  $\lambda = 1,3$  і  $1,55$  мкм розроблені спеціально для хвиль цієї довжини лазери на подвійній гетероструктурі InGaAsP/ InP, причому досягається вихідна потужність 15 мВт.

Для довгих ліній зв'язку як джерела світла використовуються лазери.

- *«Лазери в процесах вимірювання і контролю»*

Наземне лазерне сканування

Залежність показника заломлення повітря ( $n$ ) від довжини хвилі випромінювання ( $\lambda$ ) має назву «дисперсія», вона багаторазово вивчалася в лабораторних умовах при стандартних метеорологічних параметрах, якими прийнято вважати  $T_0=288,16$  К ( $t_0=+15$  °С),  $P_0=760$  мм рт. ст. (1 мм рт. ст. =133Па),  $e_0=0$  (сухе повітря), 0,03 % вмісту вуглекислого газу в повітрі

Груповий показник заломлення обчислюється за формулою:



$$N_0 = (n_0 - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4}$$

де  $N_0$  – індекс заломлення в звичайних умовах;  $\lambda$ -довжина хвилі у вакуумі;  $A, B, C$  - експериментально певні постійні, звані дисперсійними коефіцієнтами.

Найбільш точною дисперсійної формулою вважається формула, коефіцієнти якої отримані Едленом і мають такі значення:  $A=272,613$ ;  $B=1,5294$ ;  $C=0,01367$

Для визначення залежності показника заломлення від метеоелементів в умовах, що відрізняються від стандартних, використовується формула

$$N = N_0 \frac{T_0 P}{P_0 T} + \left( 17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}$$

Прийнявши для звичайних умов значення температури, тиску і вологості:  $t=15^\circ\text{C}$ ,  $P=760$  мм.рт.ст.,  $e=60\%$  - і підставивши дані значення у формулу, обчислимо значення вимірюваних відстаней:

$$S_M = \left( S_{\text{вим}} / \frac{c}{(1+N/10^6)} \right) \cdot c$$

де  $S_{\text{вим}}$  – виміряна відстань;  $S_M$  – справжня відстань.

Підставляючи в формулу значення кожного метеоелемента з кроком:  $\Delta t=10^\circ\text{C}$ ,  $\Delta P=10$ мм рт.ст.,  $\Delta e=10\%$ , обчислимо зміни вимірюваних відстаней  $\Delta S_{\text{вим}}$  за формулою

$$\Delta S_{\text{вим}} = S_{\text{вим}_i} - S_{\text{вим}_{i+1}}$$

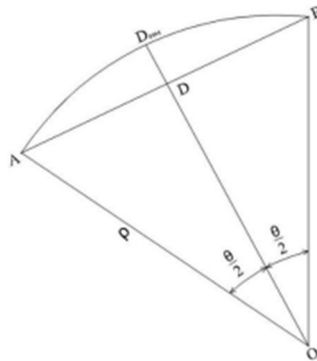
де  $S_{\text{вим}_i}$  - виміряна відстань при  $i$ -му значенні метеоелементів;  $S_{\text{вим}_{i+1}}$  - виміряна відстань при  $(i+1)$  значенні метеоелементів;

При оцінці впливу коефіцієнта заломлення на точність вимірювання відстаней НЛС встановлено, що при довжині лінії 1000 м помилка вимірювання відстаней при зміні температури на  $10^\circ\text{C}$  складе близько 10 мм; при зміні тиску на

10 мм рт. ст. складе близько 4 мм; при зміні відносної вологості на 10% складе близько 1 мм. Таким чином, у процесі обробки результатів сканерних

вимірювань такі параметри, як: температура, тиск і вологість - повинні обов'язково враховуватися

### Рефракція електромагнітних хвиль



де:  $D_{\text{вим}}$  - хорда;  $AB$  – шукана геометрична відстань  $D$ ;  $AO = OB = \rho$  – радіус кривизни;  $\theta$ -центральный кут, що відповідає дузі  $D_{\text{вим}}$ .

При обчисленні подовження траєкторії ( $ADr$ ) найбільш просто отримати формулу, вважаючи, що траєкторія хвилі - дуга кола, а при необхідності врахування дійсної форми траєкторії необхідно використовувати як радіус цього кола середній радіус кривизни.

Можна записати:

$$D_{\text{вим}} = \rho\theta; D = 2\sin\frac{\theta}{2}$$

Розклавши  $\sin(\theta/2)$  у ряд за формулою

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \dots$$

І, обмежившись двома членами розкладання, будемо мати

$$D = \rho\theta - \frac{1}{3}\rho\left(\frac{\theta}{2}\right)^3$$

Звідси отримаємо :

$$D = D_{\text{вим}} - \frac{D_{\text{вим}}^3}{24\rho^2}$$

Для світлових хвиль значення  $\rho$  можна прийняти рівним 25000 км. Підставивши це значення в формулу, отримаємо, що подовження траєкторії хвилі на відстані 1000 м складе  $6,7 \cdot 10^{-5}$  мм, і вплив цього фактора на точність вимірювання відстаней наземними лазерними сканерами є несуттєвим.

Деформації твердого покриття автодороги в плані на досліджуваній ділянці за період 1 рік не суттєві. Розбіжності TIN-моделей нерегулярної

поверхні проїжджої частини ділянки автодороги за полілініями країв і осі твердого покриття з останніх сканувань за віссю координат Х не перевищують  $\pm 0,010\text{м}$ , що є в межах точності вимірювань, за віссю координат У не перевищують  $\pm 0,010\text{м}$ , що є в межах точності вимірювань. За висотою Н виявлені деформації твердого покриття автодороги в період 1 року досліджень, які складають:

- на відрізку 1 (0 м - 180 м) в межах від  $-0,022\text{м}$  до  $+0,010\text{м}$ ;
- на відрізку 2 (180 м - 360 м) в межах від  $-0,022\text{м}$  до  $+0,000\text{м}$ ;
- на відрізку 3 (360 м - 540 м) в межах від  $-0,022\text{м}$  до  $+0,000\text{м}$ ;
- на відрізку 4 (540 м - 720 м) в межах від  $-0,058\text{м}$  до  $+0,005\text{м}$ ;
- на відрізку 5 (720 м - 900 м) в межах від  $-0,090\text{м}$  до  $-0,050\text{м}$ ;
- на відрізку 6 (900 м - 1080 м) в межах від  $-0,108\text{м}$  до  $-0,075\text{м}$ .

Найактивніше просідання твердого покриття автодороги відбувається на ділянці, яка спостерігається від 585 метрів ( $0,000\text{м}$ ) до кінцевої точки спостережень – 1080 метрів ( $-0,108\text{м}$ ).

- *«Застосування лазерів в військових цілях»*

Лазерна дальнометрія є однією з перших областей практичного застосування лазерів у закордонній військовій техніці. Перші дослідження відносяться до 1961р., а зараз лазерні далекоміри використовуються в наземній військовій техніці (артилерійські, танкові), в авіації (далекоміри, висотоміри, цілевказники), і на флоті. Ця техніка пройшла бойові випробування у В'єтнамі і на Близькому Сході. В даний час ряд далекомірів прийнятий в арміях ряду країн.

Перший лазерний далекомір ХМ-23 пройшов випробування у В'єтнамі і був прийнятий на озброєння в армії США. Він був розрахований на використання передових спостережних пунктах сухопутних військ. Джерелом випромінювання в ньому був лазер з вихідною потужністю  $2,5\text{Вт}$  і тривалістю імпульсу  $30\text{нс}$ . У конструкції далекоміра широко використовувалися інтегральні схеми. Випромінювач, приймач і оптичні елементи змонтовані в моноблоці, який має шкали точного відліку азимута і кута місця мети.

Харчування далекоміра здійснювалося від батареї нікелево-кадмієвих акумуляторів напругою 24 В, що забезпечує 100 вимірювань дальності без підзарядки.

Один з перших серійних моделей – шведський далекомір, призначений для використання в системах управління бортової корабельної і берегової артилерії. Конструкція далекоміра відрізнялася особливою міцністю, що дозволяло застосовувати його в складних умовах. Далекимір можна було сполучати при необхідності з підсилювачем зображення або телевізійним візором. Режимом роботи далекоміра передбачалося або вимірювання через кожні 2 с протягом 20 с, або через кожні 4 с протягом тривалого часу.

З початку 70-х років на зарубіжних танках встановлюються лазерні далекоміри. Установка лазерних далекомірів на танки відразу зацікавила зарубіжних розробників озброєння. Це пояснюється тим, що на танку можна ввести далекомір в систему управління вогнем танка, ніж підвищити його бойові якості. У порівнянні з оптичними вони мають ряд переваг: високу швидкодію, автоматизований процес введення вимірної дальності в прицільні пристрої, високу точність вимірювання, малі розміри, вага і т. д. Для цього в США був розроблений далекомір AN/VVS-1 для танка М60А. Він не відрізнявся за схемою від лазерного артилерійського далекоміра на рубіні, проте крім видачі даних про дальності на цифрове табло мав пристрій, що забезпечує введення дальності в обчислювальній машині системи управління вогнем танка. При цьому вимір дальності міг проводитися як навідником гармати так і командиром танка. Режим роботи далекоміра – 15 вимірювань в хвилину протягом однієї години.

Лазерні далекоміри, встановлені на сучасних танках, дозволяють вимірювати дальність до цілі в межах від 200 м до 8 000 м (на американських і французьких танках) і від 200 м до 10 000 м (на англійських і західнонімецьких танках) з **точністю** до 10 м. Більшість активних елементів лазерних далекомірів, що встановлюються в даний час на танках і БМП західного виробництва, створені на основі кристала граната з домішкою

неодиму (активний елемент - кристал іттрієво-алюмінієвого граната  $Y_3Al_5O_3$ , в який в якості активних центрів введені іони неодиму  $III^+$ ). Ці лазери генерують випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм. Є також лазерні далекоміри, в яких активним елементом служить кристал рожевого рубіна. Тут основою є кристал окису алюмінію  $Al_2O_3$ , а активними елементами іони хрому  $Cr^{3+}$ . Лазери на рубіні генерують випромінювання на довжині хвилі 0,69 мкм.

Останнім часом на зарубіжних бойових машинах почали застосовуватися лазерні далекоміри на вуглекислому газі. У  $CO_2$ -лазері в газорозрядній трубці знаходиться суміш, що складається з вуглекислого газу ( $CO_2$ ), молекулярного азоту ( $N_2$ ) і різних невеликих добавок у вигляді гелію, парів води і т. Д. Активні центри – молекули  $CO_2$ . Перевага лазера на двоокису вуглецю полягає в тому, що його випромінювання (довжина хвилі 10,6 мкм) відносно безпечно для зору і забезпечує краще проникнення через дим і туман. Крім того, лазер постійного випромінювання, що працює на цій довжині хвилі, може використовуватися для підсвічування мети при роботі з тепловізорним прицілом.

Бурхливий розвиток мікроелектроніки забезпечив зменшення масогабаритних показників лазерних далекомірів, що дозволило створити портативні далекоміри. Дуже вдалим виявився норвезький лазерний далекомір LP-4. Він мав як модулятор добротності оптико механічний затвор. Приймальна частина далекоміра є одночасно візором оператора. Діаметр оптичної системи складає 70 мм. Приймачем служить портативний фотодіод. Лічильник забезпечений схемою стробування по дальності, чинний з установки оператора від 200 м до 3000 м. У схемі оптичного візира перед окуляром поміщений захисний фільтр для запобігання очі від впливу свого лазера при прийомі відбитого імпульсу. Випромінювач і приймач змонтовані в одному корпусі. Кут місця мети визначається приблизно до  $25^\circ$ . Акумулятор забезпечував 150 вимірювань дальності без підзарядки, його маса всього 1 кг. Далекмір був закуплений Канадою, Швецією, Данією, Італією, Австралією.

Портативні лазерні далекоміри були розроблені для піхотних підрозділів і передових артилерійських спостерігачів. Один з таких далекомірів виконаний у вигляді бінокля. Джерело випромінювання і приймач змонтовані в загальному корпусі з монокулярним оптичним візором шестиразового збільшення, в поле зору якого є світлове табло з світлодіодів, добре помітних як вночі, так і вдень. У лазері в якості джерела випромінювання використовується алюмінієво-ітрієві гранат, з модулятором добротності на ніобіті літію. Це забезпечує пікову потужність в 1,5 МВт. У приймальній частині використовується здвоєний лавинний фотодетектор з широкосмуговим малощумливим підсилювачем, що дозволяє детектувати короткі імпульси з малою потужністю. Помилкові сигнали, відбиті від сусідніх предметів виключаються з допомогою схеми стробування по дальності. Джерело живлення – малогабаритна акумуляторна батарея, що забезпечує 250 вимірювань без підзарядки. Електронні блоки далекоміра виконані на інтегральних схемах, що дозволило довести масу далекоміра разом з джерелом живлення до 2 кг

#### **Тема 4. Застосування лазерів у техніці**

- *«Оптична голографія»*

Цікаве застосування голографії в якості носія інформації. Часто необхідно отримати об'ємне зображення предмета, якого ще не існує, і отже, не можна одержати голограму такого предмета оптичними методами. У цьому випадку голограма розраховується на ЕОМ (цифрова голограма) і результати розрахунку відповідним чином переносяться на фотопластинку. З отриманої таким способом машинної голограми об'ємне зображення предмета відновлюється звичайним оптичним способом. Поверхня предмета, отриманого з машинної голограмі, використовується як еталон, з яким методами голографічної інтерференції проводиться порівняння поверхні реального предмета, виготовленого відповідними інструментами. Голографічна інтерферометрія дозволяє зробити порівняння поверхні

виготовленого предмета і еталона з надзвичайно великою точністю до часток довжини хвилі. Це дає можливість виготовляти з такою ж великою **точністю** дуже складні поверхні, які було б неможливо виготовити без застосування цифрової голографії і методів голографічної інтерферометрії. Само собою зрозуміло, що для порівняння еталонної поверхні з виготовленої не обов'язково відновлювати оптичним способом машинну голограму. Можна зняти голограму предмета, перевести її на цифрову мову ЕОМ і порівняти з цифровою голограмою. Обидва ці шляхи в принципі еквівалентні.

Особливості голограм як носіїв інформації роблять дуже перспективними розробки по створенню голографічної пам'яті, яка характеризується великим обсягом, надійністю, швидкістю прочитування і т. д.

- *«Обробка матеріалів лазерним променем»*

**Розкрій і різання матеріалів.** Застосування лазера при розкрої і різанні зараз дуже поширено, тому що одночасно з високою **точністю** обробки забезпечується значна економія матеріалу за рахунок дуже малої ширини різа і раціональної системи розкрою в порівнянні з традиційними технологіями. При цьому ефективність вирізування виробів складного профілю при звичайній вирубною штампуванню листових виробів.

Лазерної розкрій матеріалів широко використовується в сучасній автомобільної, аерокосмічний, суднобудівної, електротехнічної промисловості, сільськогосподарському машинобудуванні, легкої промисловості. Останнім часом розвивається і досить специфічне застосування лазерного розкрою, наприклад, в енергетичній промисловості. Так, на атомних станціях при виконання монтажних і ремонтних робіт устаткування часто виникає потреба в дистанційній обробок (різанню) різних металевих виробів при високих рівнях радіації. Яскравим прикладом специфічних можливостей лазерного різання є розробка лазерного комплексу для проведення демонтажних робіт в об'єкті "Укриття" Чорнобильської атомної станції.

- *«Дія лазерного променя на речовину»*

## Нелінійні режими лазерного нагріву

### Нагрівання з урахуванням температурної залежності поглинальної здатності

Практично всі завдання, пов'язані з впливом потужного лазерного випромінювання на метали, є нелінійними в тому сенсі, що і теплофізичні та оптичні постійні металів залежать від температури і, отже, від інтенсивності лазерного випромінювання. Розглянемо загальний підхід до вирішення нелінійних задач теплопровідності на прикладі впливу температурної залежності оптичних постійних металу на характер його нагрівання лазерним випромінюванням. Згідно з експериментальними даними, поглинальна здатність металу  $A$  з хорошою точністю може бути представлена у вигляді

$$A = A_0 + bT_0,$$

где  $A_0$  - поглотительная способность металла при начальной температуре,  $b = \omega_p / 2\pi\sigma_0$  - параметр, определяемый статической электропроводностью металла  $\sigma_0$  и плазменной частотой  $\omega_p$ . Обычно величина  $b \approx (1 \div 5) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . При температурах  $T_0 \sim 1000 \text{ K}$  произведение  $bT_0 \sim (1 \div 5) \cdot 10^{-2}$ . Для большинства металлов  $A_0 \sim 10^{-2}$ , то есть температурную добавку  $bT$  в поглотительную способность металла надо учитывать (см. таблицу 1.3).

- «Особенности лазерных свердел»

### Поглинання лазерної енергії і фронт пара розплаву

На фронті розплаву-пара гранична умова Стефана зазвичай застосовується для опису поглинання лазерної енергії (Кар і Мазумда, 1990; Яо та ін, 2001).

$$I_{abs} + k \left( \frac{\partial T}{\partial z} + r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho_l \nu_i L_v - \rho_v \nu_v (c_p T_i + E_v) = 0 \quad (1)$$

Де  $I_{abs} = I(t)^{-\beta z}$  є поглинена інтенсивність лазера,  $\beta$  є коефіцієнт поглинання лазера в залежності від лазера довжина хвилі і цільової матеріал, і  $I(t)$  описує тимчасову вхідні інтенсивність лазера, включаючи ширину імпульсу, частоту повторення і тимчасову форму імпульсу.  $k$  це теплопровідність,  $T$  є температура,  $z$  і  $r$  є відстанями вздовж осевого і радіального напрямків,  $\rho$  є щільність,  $\nu$  швидкість,  $L_v$  прихована



теплота випаровування. Підрядкові індекси  $l$ ,  $v$  і  $i$  позначають рідку фазу, парову фазу і кордон розділу пар-рідина відповідно.

Якщо інтенсивність лазера висока, а тривалість імпульсу коротке, то так званий Передбачається, що шар Кнудсена існує на фронті розплаву-пара, де змінні стану зазнають переривчасті зміни по всьому шару. Розглядаючи розрив у шарі Кнудсена, Яо та ін. (2001) змоделювали швидкість поглиблення поверхні  $V_v$  розподіл вздовж радіального напрямку в різний час, що вказує на значну зміну швидкості видалення матеріалу по шару Кнудсена

### **Витиснення розплаву**

Після отримання тиск пари  $p_v$ , протягом шару розплаву і витиснення розплаву можуть бути змоделювані з використанням гідродинамічних рівнянь (Ганеш та ін, 1997). Витиснення розплаву відбувається, коли тиск пари прикладається до вільної від поверхні рідини, яка, в свою чергу, відштовхує розплав в радіальному напрямку. Для досягнення точного витиснення розплаву необхідно дуже точно спрогнозувати структуру потоку розплаву, особливо швидкість потоку розплаву на краю отвору. Таким чином, 2-D вісесиметричний використовується перехідна модель і, відповідно, використовуються рівняння імпульсу і безперервності.

Модель Ганеша для виштовхування розплаву є всеосяжною і може бути використана для різних стадій процесу буріння свердловин. Однак розрахунок займає дуже багато часу, і Солана та ін. (2001), представлена спрощена модель, яка залежить від часу, яка передбачає, що швидкість витиснення розплаву відбувається тільки вздовж стінки отвору і може давати результати з мінімальними обчислювальними зусиллями.

Рідина буде рухатися вгору зі швидкістю  $u$  внаслідок градієнта тиску вздовж вертикальних стінок, який, у свою чергу, визначається різницею між тиском абляції і поверхневим натягом, деленим на глибину проникнення  $x$ .

Припускаючи, що фронт буріння рухається з постійною швидкістю, наступне лінійне рівняння рух рідини по вертикальній стінці є хорошим

наближенням для моделювання витиснення розплаву після початкової стадії буріння.

$$\rho \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} = P(t) + \mu \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial r^2} \quad (2)$$

де  $\rho$ -щільність розплаву,  $\mu$ -в'язкість рідини,  $P(t)=(\Delta P(t)/x(t))$  - градієнт тиску вздовж шару рідини,  $\Delta P(t)$  - різниця між тиском пари  $P_v$  і поверхневим натягом  $\frac{2\sigma}{\delta}$

- *«Лазерне зварювання. Зварювання через скляні перегородки»*

Лазерне зварювання

Для зварювання потрібна інтенсивність променя  $10^5 - 10^7$  Вт / см<sup>2</sup>

При використанні CO<sub>2</sub>-лазера потужністю 90 кВт товщина швів, що зварюються в стик, досягає 38 мм, при цьому швидкість зварювання 30 м/хв. Для кожного матеріалу і для кожного типу лазера існує, з точки зору якості шва, оптимальна швидкість зварювання.

- *«Використання лазерів при виготовленні мікросхем»*

- *«Різання матеріалів лазерним променем»*

Допуски та обробка поверхні

Лазерні різці мають точність позиціонування 10 мікрометрів і повторюваність 5 мікрометрів.

Стандартний шорсткість Rz зростає із збільшенням товщини листа, але зменшується із силою лазера та швидкістю різання. При різанні низьковуглецевої сталі з потужністю лазера 800 Вт стандартна шорсткість Rz становить 10 мкм для товщини листа 1 мм, 20 мкм для 3 мм і 25 мкм для 6 мм.

$$Rz = \frac{12.528 \cdot S^{0.542}}{P^{0.528} \cdot V^{0.322}}$$

Де:  $S$  = товщина сталевих листа в мм;  $P$  = потужність лазера в кВт (деякі нові лазерні різачки мають потужність лазера 4 кВт);  $V$  = швидкість різання в метрах на хвилину.

Цей процес може тривати досить близько допуску, часто з точністю до 0,001 дюйма (0,025 мм). Геометрія деталей та механічна міцність машини багато в чому пов'язані з можливостями допуску. Типове покриття поверхні, отримане в результаті різання лазерним променем, може становити від 125 до 250 мікродюймів (0,003 мм до 0,006 мм).

**Лазерне різання** При інтенсивності  $10^5 - 10^7$  Вт / см<sup>2</sup> матеріал плавиться і випаровується

Лазерне різання дозволяє забезпечувати велике відношення глибини розрізу до його ширини. Для неметалів це відношення досягає 100, для металів – 20. При цьому забезпечується хороша якість кромки і висока швидкість процесу. Так як час впливу лазерного променя становить  $10^{-1} - 10^{-3}$  с, то тепловому впливу піддається надзвичайно тонкий шар кромки – 0,1 мм, тому загартовані матеріали різються без відпалу країв зі збереженням твердості. Лазерна обробка дає можливість точного різання по складному профілю при повній автоматизації процесу. Швидкість лазерного різання титанових листів в 30, а для інших – в 10 разів більше механічної.

**Лазерне свердління** Імпульсні лазери використовуються в процесі свердління при інтенсивностях випромінювання  $10^7 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> і часу впливу  $10^{-4}$  с аналогічно різанні – нагрів, розплавлення і випаровування з викидом парів.

Лазерний

свердління піддаються практично всі матеріали. При лазерному свердлінні алмазів продуктивність

збільшується в 12-15 разів в порівнянні з електрофізичним і в 200 разів – в порівнянні з механічними методами свердління. Багатоімпульсне свердління дозволяє поліпшити якість отвору і досягти великого

відношення глибини до діаметру ~50 для отворів діаметром від 4 до 100 мкм.

- *«Термообробка»*

Термообробка включає в себе такі процеси, як лазерне загартування і лазерне склеювання – створення поверхневого шару зі структурою, відмінною від структури основного матеріалу. Для лазерного гартування досить інтенсивності лазерного випромінювання  $10^{-3} - 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> і часу впливу  $10^{-1} - 10^{-2}$ с. Товщина загартованого шару може досягати 2-3 мм. Лазерне остекловування Технологічний процес здійснюється швидким скануванням променя з інтенсивністю  $10^5 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> вздовж оброблюваної поверхні. Час впливу  $10^{-7} - 10^{-4}$ с.

- *«Промисловість та техніка»*

Оптичні квантові генератори та їх випромінювання знайшли застосування в багатьох галузях промисловості. Так, наприклад, в індустрії спостерігається застосування лазерів для зварювання, обробки і розрізання металевих і діелектричних матеріалів і деталей у приладобудуванні, машинобудуванні і в текстильній промисловості.

Починаючи з 1964 року, малопродуктивне механічне свердління отворів стало замінятися лазерним свердлінням. Термін лазерне свердління не слід розуміти буквально. Лазерний промінь не з отвір: він його пробиває за рахунок інтенсивного випаровування матеріалу в точці впливу. Приклад такого способу свердління - пробивання отворів у годинникових каменях, яка зараз вже є звичайною справою. Для цієї мети застосовуються твердотільні імпульсні лазери, наприклад, лазер на склі з неодимом. Отвір у камені (при товщині заготовки близько 0,1 - 0,5 мм.) Пробивається серією з декількох лазерних імпульсів, що мають енергію близько 0,1 - 0,5 Дж. і тривалістю близько  $10^{-4}$  с. Продуктивність установки в автоматичному режимі складає 1 камінь у секунду, що в 1000 разів вище продуктивності механічного свердління.

Лазер використовується і при виготовленні надтонких дротів з міді, бронзи, вольфраму та інших металів. При виготовленні дротів застосовують технологію протягування (волочіння) дроту крізь отвори дуже малого діаметру. Ці отвори (або канали волочіння) висвердлюють у матеріалах, які

мають особливо високу твердість, наприклад, в надтвердих сплавах. Найбільш твердий, як відомо, алмаз. Тому краще всього протягувати тонкий дріт крізь отвори в алмазі (алмазні фільтри). Тільки вони дозволяють отримати дріт діаметром всього 10 мкм. Однак на механічне свердління одного отвору в алмазі потрібно 10 годин. Зате зовсім неважко пробити цей отвір серією з декількох потужних лазерних імпульсів. Як і у випадку з пробивкою отворів у годинникових каменях, для свердління алмазу використовуються твердотільні імпульсні лазери.

Лазерне свердління широко застосовується при отриманні отворів у матеріалах, які мають підвищену крихкістю. Як приклад можна навести підкладки мікросхем, виготовлені з глиноземної кераміки. Через високу крихкості кераміки механічне свердління виконується на "сирому" матеріалі. Обпалюють кераміку вже після свердління. При цьому відбувається деяка деформація виробу, спотворюється взаємне розташування висвердлених отворів. При використанні "лазерних свердел" можна спокійно працювати з керамічними підкладками, що вже пройшли випал.

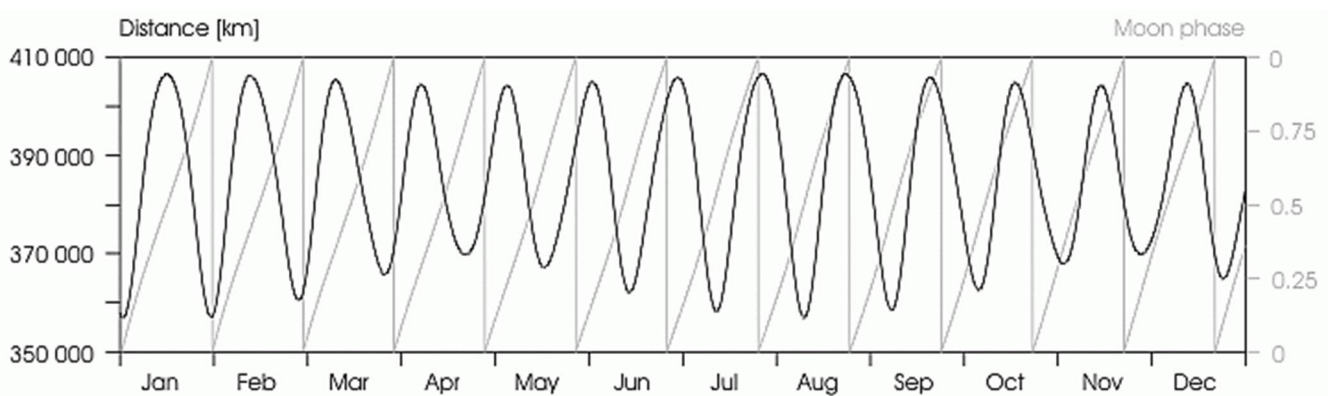
Цікаве застосування лазера і як універсального паяльника. Припустимо, що всередині електронно-променевої трубки сталася аварія - перегорів або обірвався який-небудь провід, порушився контакт. Трубка вийшла з ладу. Здавалося б, поломка не виправно, адже ЕПТ являє собою пристрій, всі внутрішні компоненти якого знаходяться у вакуумі, всередині скляного балона, і ніякому паяльника туди не проникнути. Однак, лазерний промінь дозволяє вирішувати і такі завдання. Направляючи промінь в потрібну точку і належним чином фокусуючи його, можна здійснити зварювальну роботу.

Лазери з плавною перебудовою частоти служать основою для спектральних приладів з винятково високою роздільною силою. Наприклад, нехай потрібно дослідити спектр поглинання якої-небудь речовини. Вимірявши величину лазерного потоку, що падає на об'єкт, що вивчається, і пройшов через нього, можна обчислити значення коефіцієнта поглинання. Перебудовуючи частоту лазерного випромінювання, можна, отже, визначити коефіцієнт поглинання як

функцію від довжини хвилі. Роздільна здатність цього методу збігається, очевидно, з шириною лінії лазерного випромінювання, яку можна зробити дуже малою. Ширина лінії, що дорівнює, наприклад, 10<sup>-3</sup> см забезпечує таку ж роздільну здатність, як і дифракційна решітка з робочою поверхнею 5 м., а виготовлення таких ґрат являє собою майже нездійсненне завдання.

Лазери дозволили здійснити светолокатор, за допомогою якого відстань до предметів вимірюється з точністю до декількох міліметрів. Така точність недоступна для радіолокаторів.

В даний час у світі існує кілька десятків лазерних локаційних систем. Багато з них вже мають космічне значення. Вони здійснюють локацію Місяця і геодезичних штучних супутників Землі. Як приклад можна назвати лазеро-локаційну систему Фізичного інституту імені П. М. Лебедева. Похибка вимірювання при використанні даної системи складає 40 см.



Проведення таких досліджень організовується для того, щоб точніше довідатися відстань до Місяця протягом деякого періоду часу, наприклад, протягом року. Досліджуючи графіки, що описують зміну цієї відстані з часом, вчені отримують відповіді на ряд питань, що мають наукову важливість.

Імпульсні лазерні локатори сьогодні застосовуються не тільки в космонавтиці, але і в авіації. Зокрема, вони можуть грати роль наукових вимірників висоти. Лазерний висотомір застосовувався також в космічному кораблі "Аполлон" для фотографування поверхні Місяця.

Втім, у оптичних лазерних систем є і свої слабкі сторони. Наприклад, не так просто за допомогою гостронаправленої променя лазера виявити об'єкт, тому що час огляду контрольованій області простору виявляється занадто великим.

Тому оптичні радіолокаційні системи використовуються разом з радіолокаційними. Останні забезпечують швидкий огляд простору, виявляють мета, а потім оптична система вимірює параметри мети і здійснює стеження за нею.

Великий інтерес представляють останні розробки в галузі створення телевізора на основі лазерних технологій. Згідно з очікуваннями фахівців, такий телевізор повинен відрізнятися надвисоким якістю зображення.

Варто також відзначити використання лазерів у вже давно відомих принтерах високої якості або лазерних принтерах. У цих пристроях лазерне випромінювання використовується для створення на спеціальному світлочутливому барабані прихованої копії друкованого зображення.

Основні переваги лазерних радіолокаційних систем наступні: велика дальність дії при відносно малій споживаній потужності, висока точність вимірювання дальності і кутових координат, Малі шуми в приймальних пристроях, труднощі створення перешкод, малі габарити і вага. Все це забезпечує перспективність використання оптичних радіолокаційних систем. Особливо перспективна оптична локація в космосі при стеженні за супутниками, для радіолокації планет і т. д. Радіолокаційна система для визначення відстані до цілі містить лазерний передавач, тригерний механізм, оптичний приймач з фільтром монохроматичного світла, відбитого від цілі; зчитувальний пристрій, пов'язаний з оптичним приймачем і тригерним пристроєм. Запропонована вдосконалена радіолокаційна система. Вона дозволяє виявляти рухливі об'єкти, точно вимірювати відстань до них, кутові координати і швидкість їх руху. Оптичний локатор складається з передавальної частини, в яку входить лазер і система відхилення, яка виробляє механічну або електричну переривчасту розгортку променя лазера. Вдосконалена радіолокаційна система оптичного діапазону відхилений промінь проходить через оптичну систему і здійснює огляд простору по азимуту і куту місця. Передача світлового сигналу не є безперервною, і початок випромінювання кожного імпульсу відбувається в строго певний

момент часу. З цією метою при передачі модулятор перериває світло на час, який необхідно відхилити пристрою для зміни положення променя в просторі. Це дозволяє точно виміряти момент повернення відбитого променя і, отже, відстань до мети. Електронне відхилення променя можна здійснити, наприклад, за допомогою ультразвукової комірки або іншим способом. Зворотний промінь, відбитий різними точками зони огляду, приймається оптичною системою і потім змішується в мікшері з оптичним випромінюванням лазера. Мікшер створює світловий промінь, центральна частота якого дорівнює частоті передачі і частота обвідної дорівнює різниці переданої і прийнятої приймачем частот. Сигнал биття з'являється тільки в тому випадку, якщо промінь надходить від мети, що має певну радіальну швидкість по відношенню до локатора. Частота цього сигналу пропорційна доплерівській частоті об'єкта і, отже, радіальної швидкості. Пристрій відхиляє промінь з виходу мікшера одночасно з розгорткою так, що приймальний пристрій приймає тільки один промінь, відбитий від мети. Такий пристрій усуває перешкоди, створювані сонцем, при освітленні зони огляду. Пристрій, що забезпечує при прийомі вибір корисних сигналів, що несуть інформацію, стоїть на вході фотоумножителя. Система придушення перешкод складається з фотокатода і фотоумножителя, що підсилює електронний пучок і створює на виході сигнал. Амплітуда сигналу пропорційна енергії прийнятого світлового променя. Система містить також пристрій, що викликає відхилення електронного пучка, і екран, непроникний для електронів з отвором. Відхилення електронного пучка регулюється одночасно з розгорткою, здійснюваною при прийомі так, щоб в момент, відповідний строго певному напрямку, візування, тільки частина електронного пучка, одержувана з відбитих сигналів, була відхилена до отвору і передана фотоумножителю. Пристрій, що викликає відхилення, управляється електричним шляхом, наприклад зміною напруги на електродах відхиляє системи. Фотоумножитель на виході створює електричний сигнал, частота якого дорівнює частоті биття на виході мікшера і, отже, пропорційна швидкості цілі. Цей сигнал



направляється потім до трьох спеціальних пристроїв системи. Пристрій, що здійснює грубу фільтрацію частоти сигналу, передає його на осцилограф по різних вихідних каналах, відповідно до діапазону частот в якому він знаходиться. Пристрій складається з трьох фільтрів, смуги пропускання яких суміжні і перекривають загальний діапазон частот, що виникають відповідно до діапазону швидкостей цілі. Сигнал, що надходить від мети, швидкість якої виходить за межі цього діапазону, практично пригнічується системою фільтрів. Виходи трьох фільтрів підключаються до входів, відповідним різним кольорам променя багатобарвного осцилографа, наприклад триколірного. На осцилографі отримують зображення спостережуваної зони, при цьому розгортка екрану здійснюється таким чином, що точки, що зображують спостережувані цілі, дають відносні кутові координати цих цілей. Точки різних кольорів відповідають різним швидкостям цілей. Цілі з занадто малими або занадто великими швидкостями не з'являються на екрані осцилографа. Одночасно електричний сигнал з фотоумножителя підводиться до систем, що вимірюють дальність і кутові координати цілі, запеленгової на екрані осцилографа, а також швидкість. Вимірювання дальності проводиться способом, описаним вище. Швидкість вимірюється пристроєм, який складається з фільтрів, на загальний вхід яких підводиться електричний сигнал від фотоумножителя. Фільтри мають дуже вузькі смуги пропускання і суміжні межі, при цьому сукупність смуг пропускання перекриває той же діапазон частот, що і сукупність трьох фільтрів. Ці фільтри поділяють вхідний сигнал, відповідно до його частоти, що дозволяє визначити швидкість цілі. Точність, отримана при такому вимірі швидкості, визначається шириною смуги пропускання кожного фільтра. Доплерівські частоти, отримані при використанні розглянутого оптичного локатора, досить високі навіть при відносно низьких швидкостях цілі. Наприклад, при довжині хвилі в 1 мк доплерівські частоти цілі, радіальна швидкість якої розташована в межах 3,5—110 км/год, коливаються від 2 до 60 Мгц. У радіолокаторі, що працює на довжині хвилі в 0,1 м, доплерівські частоти, отримані при таких же

швидкостях цілі, коливаються в межах 20— 600 гц. Збільшення доплерівських частот цілі покращує робочі характеристики локатора. Це одна з основних переваг такого оптичного локатора в порівнянні зі звичайними радіолокаторами.

#### **Тема 4. Спеціальні лазерні технології**

- *«Лазери в обчислювальній техніці»*

Висока швидкість перемикання уможливує застосування лазерів і комбінацій з лазерами, включаючи інтеграцію в мікроелектронних перемикальних схемах (оптоелектроніка):

— як логічні елементи (так - ні, або);

— для введення й зчитування із запам'ятовувальних пристроїв в обчислювальних машинах.

З цією метою розглядаються винятково інжекційні лазери.

Переваги таких елементів: висока швидкість перемикання й зчитування, дуже маленькі розміри елементів, інтеграція оптичних і електричних систем.

Досяжними виявляються швидкість перемикання, приблизно 10-10 с (відповідно до цього висока швидкість обчислення), ємності запам'ятовувального пристрою — 10<sup>7</sup> біт/см<sup>2</sup> і швидкості зчитування — 10<sup>9</sup> біт/с.

- *«Лазерний принтер»*

Для друку в обчислювальній техніці й в інших випадках часто застосовується лазерне випромінювання. Його перевага у вищій швидкості друку в порівнянні зі звичайними способами друкування.

Принцип дії лазерного принтеру такий: отримане від зчитувального оригіналу світло перетвориться у ФЕП на електричні сигнали, які відповідним чином обробляються в електронному пристрої разом з керуючими сигналами (для визначення висоти шрифту, складу фарби й т. д.) і слугують для модуляції лазерного випромінювання. За допомогою записуючої головки експонується розташована на валику плівка. При цьому лазерне випромінювання

розділяється па ряд рівних за інтенсивністю часткових променів (шість або більше), які за допомогою модуляції за даних умов підключаються або відключаються.

Застосовувані лазери: іонний аргонний (потужність не більше 10 мВт), інжекційний.

Лазерний спектральний аналіз – якісне і кількісне визначення елементного і молекулярного складу речовини шляхом дослідження його спектрів, які отримують за допомогою лазерного випромінювання. Використання лазерів забезпечує граничні значення найбільш важливих для спектрального аналізу характеристик: чутливість на рівні детектування одиничних атомів і молекул, вибірковість аж до реєстрації частинок з певними квантовими характеристиками в суміші частинок, гранична спектральна (до повного усунення впливу приладу) і часова (до 10 – 14 с) точність, можливість дистанційного аналізу (до дек. км). Л.с.а. використовується, як правило, в тих випадках, коли необхідні характеристики не можуть бути отримані за допомогою традиційних методів і приладів спектрального аналізу.

- *«Лазерно-оптичне зчитування і запис інформації»*

Застосування світла для передачі повідомлення відоме давно. Насамперед у першій половині минулого сторіччя були успішно застосовані інфрачервоні пристрої для передачі інформації в спеціальних системах, однак унаслідок некогерентності випромінювання й тому сильно обмеженої дальності дії (недостатня спрямованість світлового пучка) і модуляційної здатності подібні системи передачі не набули широкого розповсюдження. Лише з розробкою лазера в розпорядженні фахівців опинилося джерело світла з чудовими когерентними властивостями (більша довжина когерентності), випромінювання якого при великій частоті  $\nu$  (не більше  $10^{15}$  Гц) і, отже, великій можливій смузі модуляції й малій ширині лінії підходить для оптичної передачі інформації.

Розвиток у цій галузі в останні роки відбувався інтенсивно й призвів до того, що зараз уже існує велика кількість ліній з лазером як джерелом

світла. Оптичні системи передачі інформації працюють із носійними частотами 1013- 1015 Гц, що відповідають довжинам хвиль  $\lambda = 33 + 0,33$  мкм. Застосовувана довжина хвилі з цього діапазону для передачі інформації залежить від:

- постановки завдання з передачі інформації (необхідна смуга частот модуляції, відстань, передавальне середовище);
- джерела світла, наявного в розпорядженні (в основному напівпровідникові інжекційні лазери й світлодіоди, в окремих випадках — мініатюрні твердотільні лазери, CO<sub>2</sub>-лазери);
- модуляційної здатності;
- системи передачі (через вакуум, повітря, спеціальні гази, скловолокно);
- можливості демодуляції.

При використанні напівпровідникових лазерів як джерела світла зовнішній модулятор може бути виключений (безпосередня модуляція лазера за допомогою збуджувального струму в цьому випадку має перевагу).

Завданням оптичної передачі інформації є передача випромінювання від передавача до приймача, тому вирішального значення набуває середовище поширення сигналу. Властивості середовища в основному визначають конструкцію й розміри всієї системи передачі, включаючи вибір джерела світла її приймача.

- *«Лазерні технології в мікроелектроніці»*

Більшість з лазерів, які широко використовуються у мікротехнологіях, працюють на газових або плазмових активних середовищах, наприклад такі, як лазер на іонах аргону (~0,5 мкм), або ексимерні і ексиплексні лазери (120-354 нм).

## Характеристики лазерних джерел, що застосовуються у лазерних технологіях.

Тип лазера	Довжина хвилі, мкм	Потужність, Вт	Енергія в імпульсі, Дж	Тривалість імпульсу, нс	Діаметр променя, мм	Розбіжність, мРад
<b>НЕПЕРЕРВНІ</b>						
<b>Аргонний:</b>						
УФ	0,35-0,6	54	-	-	1,5	0,4
Видимий	0,45-0,53	20	-	-	0,5	0,6
Криптон	0,33-0,8	4	-	-	2	0,5
He-Ne	0,63	0,1	-	-	1,5	0,5
GaAs	0,82	0,2	-	-	0,1x0,001	100x350
YAG:Nd <sup>3+</sup>	1,06	400	-	-	8	15
CO <sub>2</sub>	9-12	1000	-	-	10	2
<b>ІМПУЛЬСНІ</b>						
<b>Ексимерні:</b>						
ArF	0,193	50	0,4	20	20x10	2x3
KrF	0,248	100	1	20	20x10	2x3
XeCl	0,308	50	1	20	20x10	2x3
XeF	0,351	50	0,5	20	20x10	2x3
Аргонний	0,45-0,51	5	10 <sup>-8</sup>	20	1,2	0,7
Мідний	0,51-0,58	20	0,005	20	20	5
YAG:Nd <sup>3+</sup>	1,06	100	0,2	30	10	2
Nd:Glass	1,06	100	10	50	10	4
CO <sub>2</sub>	9-11	1000	1	200	10	2

Аналіз технологічних процесів, які стимульовані лазерним випромінюванням, показує, що ці процеси реалізуються за допомогою випромінювання в діапазоні довжин хвиль 190-1060 нм при густині потужності  $10^4 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Контрольно - вимірювальні методи застосовуються в діапазоні довжин хвиль 190-760 нм, при середній густині потужності в діапазоні 0,1-10 мВт/см<sup>2</sup>, тривалості імпульсів 1,0-100,0 нс і частоті повторення імпульсів 10-1000 кГц.

- *«Трафаретний друк»*

### Тема 5. Застосування лазерів у медицині

- *«Аспекти лазерної медицини»*
- *«Лазерна діагностика»*

Метод спектрофотометрії.

Вимірювання спектрів пропускання різних біооб'єктів-класична, досить рутинна задача спектрофотометрії. Даний метод давно і успішно застосовується в біології та медицині. Він простий, надійний, універсальний, володіє непоганою чутливістю і точністю. Вимірювання спектрів пропускання засноване на реєстрації інтенсивності падаючого світла  $I_0$  і інтенсивності минулого світла  $I$  через поглинаюче середовище в напрямку  $x$  в залежності від довжини хвилі ( $\lambda$ )

$$I(\lambda, x) = I_0(\lambda) \exp[-a(\lambda)x], \quad a(\lambda) = \sigma(\lambda) N,$$

де  $a(\lambda)$  - коефіцієнт поглинання (вимірюється в  $\text{см}^{-1}$ ),  $\sigma(\lambda)$  - ефективний перетин поглинання частинок ( $\text{см}^2$ ),  $N$ -концентрація поглинаючих часток ( $\text{см}^3$ ). Даний вираз носить назву закону Бугера-Ламберта-Бера.

У нелазерних спектрофотометрах (наприклад вітчизняний прилад СФ-26, німецький "Спекорд") використовуються широкосмугові джерела випромінювання (лампи розжарювання, Ртутні лампи). Перебудова ж по довжинах хвиль здійснюється поворотом оптичної призми приладу, або його дифракційної решітки. Гранична чутливість нелазерних спектрофотометрів досягає  $(I - I_0) / I_0 \geq 10^{-4} - 10^{-5}$

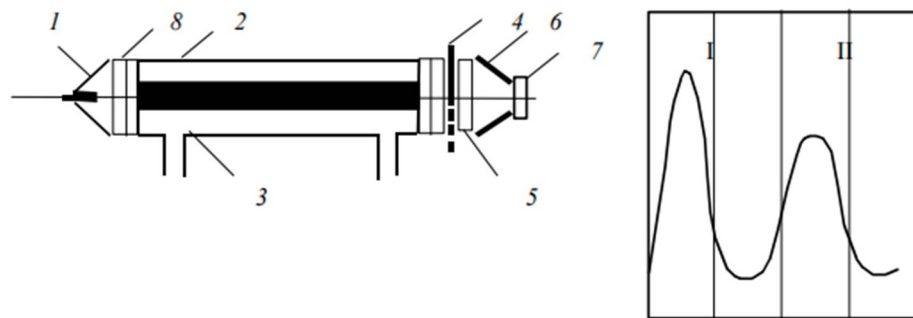
Використання лазерів в якості джерел випромінювання (бажано перебудовуються з вузькою лінією випромінювання) кардинально поліпшило, а у чомусь і спростило метод спектрофотометрії

Відпала необхідність в спектральному приладі-монохроматорі. Істотно підвищилася спектральна роздільна здатність, а отже і надійність методу, з'явилася можливість знаходити форму і тонку структуру ліній поглинання речовини (біомолекул).

Висока спектральна яскравість і спрямованість випромінювання дозволили поліпшити співвідношення сигнал / шум, а отже і чутливість приладу, використовувати багатоходові кювети, або так звані внутрішньорезонаторні методи для вимірювання гранично малих коефіцієнтів поглинання. Гранична порогова чутливість досягає величина

$a_{\text{min}} = 3 * 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ , при цьому чутливість методу зростає (по відношенню до не лазерним методом спектрофотометрії в  $10^2 - 10^5$  раз).

Типовим прикладом приладу, що використовує принцип абсорбції (поглинання) випромінювання, є капнограф-прилад для вимірювання вмісту CO<sub>2</sub> (вуглекислого газу) у видихуваному людиною повітрі [32,33]. А кількість вуглекислого газу, що видихається, частота і глибина дихання-безпосередньо пов'язані зі здоров'ям людини. В основу принципу дії цього приладу покладено поглинання вуглекислим газом ІЧ випромінювання в смузі поглинання з максимумом в області 4.3 мкм [1].



Оптична схема вимірювача концентрації CO<sub>2</sub>:

1-випромінювач, 2 - еталонна кювета, 3 - вимірювальна кювета, 4-модулятор випромінювання, 5-інтерференційний фільтр, 6 - збирає дзеркало приймача, 7 - піроелектричний приймач, 8 - сапфірові вікна. I-еталонна кювета відкрита, II-вимірювальна кювета відкрита

- «Лазерна терапія»
- «Застосування лазерів у хірургії»

Використовують лазерний "скальпель" у **нейрохірургії**, тому що патологічне вогнище можна видалити без механічного контакту з ніжними тканинами нервової системи. Сфокусований до мінімуму лазерний промінь використовують для зшивання судин мозку як на поверхні мозкової тканини, так і в глибині. Це дозволяє зшивати судини діаметром, меншим від 0,5 мм, звичайна хірургічна техніка не дає таких можливостей.