

Вивчення будови та принципу дії газових квантових генераторів

Сергій Поліщук

Мета роботи: Вивчення будови та принципу дії газових квантових генераторів

Прилади і матеріали: оптична лава, гелій-неоновий лазер, дифракційна ґратка, міліметровий папір, рулетка, поляроїд, екран з короткофокусною лінзою, скляна плоскопаралельна пластинка.

Завдання:

1 при домашній підготовці:

- ознайомитись з фізичними основами будови та принципу дії оптичних квантових генераторів;
- згідно з рекомендаціями до роботи виготовити комп'ютерним способом на прозорій плівці декілька дифракційних решіток з різним періодом;

2 при виконанні роботи:

- дослідити лазерне випромінювання на поляризованість;
- визначити сталу досліджуваної решітки;
- визначити час когерентності лазерного випромінювання;
- визначити плоский кут розходження лазерного випромінювання.

Правила техніки безпеки:

- не вмикати і не вимикати лазер самостійно – висока напруга;
- ні в якому разі не дивитися назустріч лазерному променю – можете пошкодити очі.

Теоретичні відомості та опис установки: Оптичний квантовий генератор (лазер) - прилад, у якому здійснюється генерація монохроматичних електромагнітних хвиль оптичного діапазону в результаті індукованого випромінювання. Слово «лазер» складено із початкових літер англійських слів Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Оптичні квантові генератори – це унікальні, штучно створені, принципово нові джерела світла, які володіють високою когерентністю і монохроматичністю. Крім того, випромінювання лазера поляризоване. Ще однією важливою характеристикою цих приладів є вузька спрямованість їх випромінювання. Із-за дифракції кут розходження променів не може бути меншим $\frac{\lambda}{d}$, де d - ширина пучка. У лазерах ця гранична межа майже досягнута.

Перші квантові генератори були створені М. Г. Басовим і О. М. Прохоровим та незалежно від них Ч. Таунсом у 1955 році (Нобелівська премія 1964 р.). Фізичні принципи їх роботи ґрунтуються на квантових закономірностях. Із них слідує, що кожному стану системи відповідає певна енергія. Якщо квантова система не піддається зовнішньому впливу, то вона інаходиться у стаціонарному стані з найменшою енергією E_1 . За рахунок певних зовнішніх чинників систему можна перевести у збуджений стан з енергією E_2 . Такий стан є нестійким, його тривалість не перевищує 10^{-9} с, без будь-якого зовнішнього впливу система здійснить перехід у стан з меншою енергією E_1 , випромінюючи при цьому фотон з частотою ν : $h\nu = E_2 - E_1$.

Такий самодовільний (спонтанний) перехід, а, отже, і випромінювання, має випадковий, ймовірнісний характер, передбачити, коли він відбудеться, принципово неможливо. Це означає, що атоми випромінюють незалежно і неодноразово,

фази випромінюваних ними електромагнітних хвиль не утворюють між собою. Випадковими є не лише моменти випромінювання фотонів, а й напрямки їх поширення і поляризації. Так випромінюють звичайні джерела світла, таке випромінювання неполяризоване, некогерентне і неспрямоване.

У 1916 році А. Ейнштейн теоретично показав, що за певних умов процесом переходу атома з рівня E_2 , на рівень E_1 , все ж таки можна керувати. Такий керований (індукований) перехід можна здійснити за допомогою електромагнітної хвилі, частота якої рівна, або достатньо близька до частоти $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$. У цьому випадку зовнішній фотон, який стимулює збуджену систему до випромінювання, і фотони, що цією системою випромінюються, будуть абсолютно тотожні – вони матимуть однакову частоту і фазу коливань, той же напрям поширення і ту ж поляризацію.

Для реалізації такого механізму підсилення світла необхідно, щоб число індукованих переходів з випромінюванням фотонів було більшим числа переходів з поглинанням фотонів тієї ж частоти, а для цього потрібно, щоб число атомів у збудженому стані, у стані з більшою енергією було б більшим числа атомів з меншою енергією. Таке положення системи не є природним, воно одержало назву інверсного (лат. inversio - перестановка), термодинамічно такий стан нестабільний (стан з від'ємною температурою). Проте за певних умов система у такому стані може перебувати достатньо довго, значно довше, ніж 10^{-8} с. Середовище з інверсним заселенням енергетичних рівнів називають активним. Одержати активне середовище можна кількома способами: у твердотільних лазерах - це оптичне підкачування, у газових - електричний розряд, у напівпровідникових - інжекція носіїв тощо.

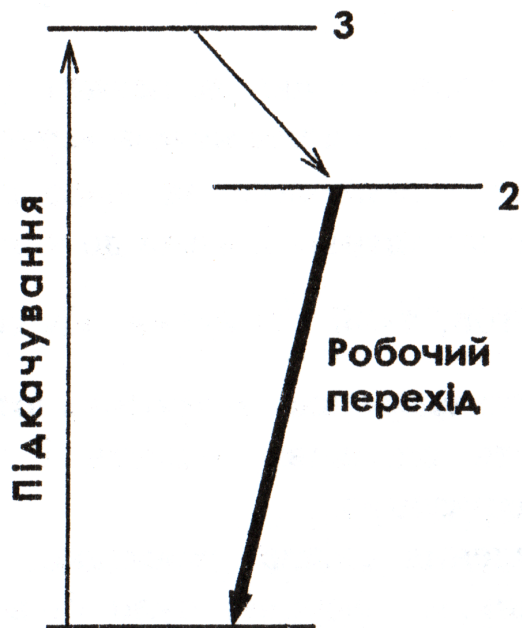


Рис. 1.

Активною квантова система буде лише тоді, коли вона матиме метастабільний рівень – рівень, на якому електрони можуть перебувати значний час. Цей час у 10^5 разів більший, ніж час перебування електронів на інших рівнях збудженого атома. Утворюється метастабільний рівень за рихунок введення в основну робочу речовину спеціально

підібраних домішок. У рубіновому лазері – це атоми хрому, у гелій-неоновому – атоми гелію. Важливою умовою добору пари основа-домішка є розміщення метастабільного рівня дещо нижче енергетичних рівнів збуджених атомів основи. У результаті такого розташування утворюється система, спрощений вигляд якої зображений на рис.1. У цій схемі метастабільним є рівень 2. За рахунок підкачування частину електронів переводять з нижнього енергетичного рівня 1 на рівень 3. При цьому, поряд з оберненим переходом $3 \rightarrow 1$, без випромінювання відбувається перехід $3 \rightarrow 2$. Оскільки час життя електронів на рівні 2 значний (до 10^{-3} с), то підкачуванням можна домогтися такого стану, коли заселення енергетичного рівня 2 перевищуватиме заселення енергетичного рівня 1 - станеться інверсія заселеності рівня 2 по відношенню до рівня 1. Незначна зовнішня дія (фотон з частотою $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$) спричинить значну кількість вимушених (з випромінюванням) переходів $2 \rightarrow 1$ - відбудеться підсилення світла.

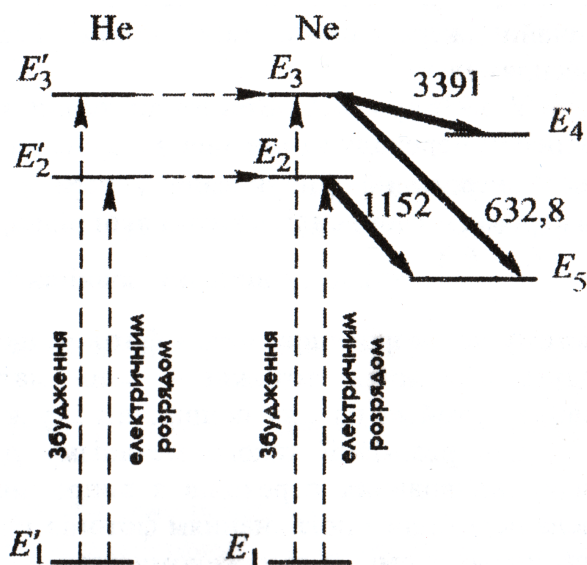


Рис. 2.

У реальних оптичних генераторах кількість рівнів, зазвичай, більша, ніж три, проте суть процесів, що мають при цьому місце, однакова - метод трьох рівнів універсальний. Розглянемо, наприклад, принцип дії гелій-неонового лазера. Схема енергетичних рівнів для нього зображена на рис.2. Гелій має два метастабільні рівні E_2^1 і E_3^1 , на яких електрони перебувають значний час – 10^{-3} с, тому концентрація збуджених атомів гелію у електричному розряді дуже велика. Принциповою особливістю енергетичних рівнів атомів гелію і неону є дуже близьке розташування метастабільних рівнів E_2^1 і E_3^1 ; гелію та відповідно рівні E_2 і E_3 , атомів неону. Тому при зіткненні таких атомів відбувається резонансна передача енергії від гелію до неону. У результаті число атомів неону на рівнях E_2 і E_3 , різко збільшується, що призводить до інверсної заселеності рівнів E_2 і E_3 , по відношенню до рівнів E_4 і E_5 . Індуковані переходи $E_3 \rightarrow E_4$, $E_3 \rightarrow E_5$ і $E_2 \rightarrow E_5$ дають випромінювання з довжиною хвилі відповідно 3391 нм, 632,8 нм та 1152 нм. Підбираючи склад нанесеного на дзеркала відбиваючого шару, одержують лазерне випромінювання однієї з перелічених довжин хвиль, зазвичай, це 632,8 нм. Дзеркала виготовляють з багатошаровим діелектричним покриттям, що має коефіцієнт відбивання 99

Значення дзеркал не обмежується виділенням однієї з трьох довжин хвиль. Вони виконують ще одну важливу функцію –

служать оптичним резонатором, який забезпечує позитивний обернений зв'язок. Завдання резонатора – спрямувати частину одержаного випромінювання знову у систему, щоб воно викликало появу нових фотонів, тобто привело до додаткового збільшення інтенсивності світла. З цією метою газорозрядну трубку з сумішшю гелію і неону розміщують між дзеркалами (рис.3). Одне дзеркало виготовляють сферичним, друге – плоским. Прозорість одного близько 296, іншого менше 196. За допомогою спеціальних пристроїв дзеркала встановлюють так, щоб оптична вісь сферичного дзеркала була строго перпендикулярна плоскому дзеркалу.

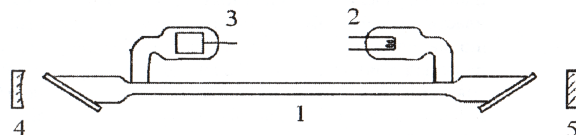


Рис. 3.

Окрім забезпечення оберненого зв'язку, дзеркала ще роблять випромінювання направленим, оскільки фотони, які не рухаються вздовж вісі дзеркала, виходять з активного середовища через бокову поверхню, практично без підсилення.

Торці газорозрядної трубки скошені під кутом Брюстера і закриті окляними чи кварцовими вікнами, що забезпечує поляризацію лазерного випромінювання.

У кварцовій газорозрядній трубці 1 знаходиться суміш газів: гелій під тиском 1мм рт.ст. та неон, який створює тиск 0,1 мм рт.ст. Трубка має підігрівний катод 2 та анод 3, між якими прикладається напруга 1-2,5 кВ. Потужність гелій-неонових лазерів не перевищує десятків мВт. Розходження пучка біля 20".

Перший лазер безперервної дії на суміші газів гелію і неону був розроблений у 1961 році. У цьому лазері неон є робочою речовиною, а гелій слугує резервуаром збуджень, які резонансно передаються атомам неону.

Послідовність виконання роботи:

- 1 На оптичній лаві послідовно розташувати лазер, поляроїд і екран. Обертаючи поляроїд, переконались у зміні освітленості на екрані. Це свідчить про лінійну поляризацію випромінюваного лазером світла.
- 2 На оптичній лаві замість поляроїда встановити саморобну дифракційну решітку. Екран із закріпленням на ньому міліметровим папером розмістити якомога далі від решітки. Користуючись формулою $d \sin \phi = m\lambda$ та маючи на увазі, що при малих ϕ $\sin \phi \approx \tan \phi = \frac{a}{l}$, визначити сталу решітки

$$d = m \cdot \frac{l}{a} \cdot \lambda \quad (1)$$

де l – відстань від решітки до екрану, a – відстань між центральним і m -ним максимумами.

Вимірювання виконати декілька разів для різних m , виконати обробку та аналіз результатів.

- 3 Встановити на оптичній лаві екран, у центрі якого закріпити короткофокусну лінзу від об'єктива мікроскопа. Одержаний розбіжний пучок спрямувати на розміщену по інший бік екрану, паралельно до нього, товсту (близько 10 мм) скляну плоскопаралельну пластинку. На екрані, у відбитому від пластинки світлі, будуть спостерігатися інтерференційні кільця, що свідчить про можливість спостереження інтерференції не лише від тонких плівок. Наявність інтерференційної картини у товстому склі вказує на значний час когерентності лазерного випромінювання. У даному випадку його слід оцінити за різницею ходу променів, що інтерферують. Це промені, які відбиваються від задньої і передньої поверхні скла. Їх різниця ходу $\Delta \approx 2dn$, де d і n – відповідно товщина і показник заломлення скла. Тоді час когерентності $r \geq \frac{\Delta}{c} = \frac{2dn}{c}$ (c – швидкість світла)
- 4 Спрямувати лазерний промінь спочатку на розташований на оптичній лаві екран, а потім на віддалену стіну. За допомогою міліметрового паперу визначити діаметри плям та виміряти рулеткою відстані від них до лазера. Виходячи з рис.4, за формулою $\phi = \frac{(D-d)}{(L-l)}$ визначити кут розходження пучка.

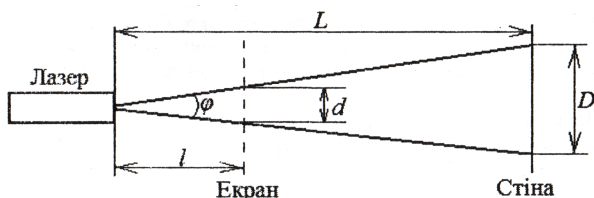


Рис. 4.

- 5 Експерименти повторити при різних L , і l . Визначити середнє значення кута ϕ .

References

- 1 Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. -К.: Техніка, 2006. - 518с., ст. 330 - 337.
- 2 Кучерук І.М, Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. - К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 342 - 347.
- 3 Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. - К.: Вища школа, 1992.- 512 с., ст. 442 - 447.
- 4 Дущенко В.П. Фізичний практикум. - К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 145 - 146.
- 5 Методична розробка до роботи.

Завдання для самоконтролю:

- 1 У чому суть спонтанного та індуктивного випромінювання?
- 2 Яка будова та принцип дії газового лазера?
- 3 Яка будова оптичного резонатора?
- 4 Яку роль відіграють домішки гелію?
- 5 Яка роль атомів неону?
- 6 При яких умовах відбувається генерація світла в активному середовищі?
- 7 Зарахунок чого лазерне випромінювання поляризоване?
- 8 Який механізм дії трирівневої системи?
- 9 Які типи оптичних квантових генераторів Вам відомі?
- 10 Що таке довжина та час когерентності?

Тестові завдання для вхідного контролю:

1 Які з нижче перелічених властивостей випромінювання притаманні лазеру: 1) монохроматичність, 2) когерентність, 3) поляризованість, 4) вузька спрямованість, 5) висока проникна здатність, 6) дуже добре поглинання речовинами?

- (a) перша, четверта і п'ята;
- (b) друга, третя і шоста;
- (c) всі шість;
- (d) перші чотири.

2 Час перебування атома у збудженому стані має порядок:

- (a) $10^{-3}c$;
- (b) $10^{-4}c$;
- (c) $10^{-6}c$;
- (d) $10^{-8}c$.

3 Метастабільні рівні:

- (a) існують у будь-якій речовині;
- (b) утворюються лише в очищених речовинах;
- (c) з'являються за рахунок введення в речовину певних домішок;
- (d) утворюються при наявності власних дефектів у речовині.

4 У гелій-неоновому лазері концентрації гелію і неону:

- (a) приблизно однакові;
- (b) гелію значно більше;
- (c) неону на порядок більше;
- (d) співвідношення концентрацій може бути будь-яким.

5 Активним називають середовище:

- (a) атоми якого знаходяться у збудженому стані;
- (b) яке випромінює світло;
- (c) у якому існують енергетичні рівні з інверсним заселенням;
- (d) яке здатне збудити інше середовище.

6 Лазери бувають: 1) твердотільні, 2) рідинні, 3) напівпровідникові, 4) газові. Чи всі ці твердження вірні?

- (a) вірні 1 і 4 твердження;
- (b) рідинні лазери не існують;
- (c) вірні 1, 2 і 4 твердження;
- (d) існують всі перелічені типи лазерів.

7 Гелій-неоновий лазер випромінює світло з довжиною хвилі:

- (a) 589нм;
- (b) 623,2нм;
- (c) 632,8нм;
- (d) 6563нм.

8 Потужність випромінювання гелій-неонових лазерів складає порядок:

- (a) 10^3Вт ;
- (b) 10Вт ;
- (c) 10^{-2}Вт ;
- (d) 10^{-5}Вт .

9 Лазерне випромінювання: 1) когерентне, 2) синфазне, 3) монохроматичне, 4) лінійно поляризоване, 5) вузько спрямоване. Для одержання якої (яких) з цих ознак лазерний генератор повинен мати, крім основних, ще додаткові конструктивні елементи?

- (a) другої та п'ятої;
- (b) лише четвертої;
- (c) лише третьої;
- (d) першої та третьої.

10 У сучасних газових лазерах час когерентності може досягати:

- (a) $10^{-8}c$;
- (b) $10^{-6}c$;
- (c) $10^{-4}c$;
- (d) $10^{-2}c$.

Тестові завдання для підсумкового контролю:

1 Лазерне випромінювання: спонтанне, індуковане, вимушене, наведене. Яке (-і) з цих тверджень хибне (-і)?

- (a) перше;
- (b) четверте;
- (c) перше і четверте;
- (d) всі твердження вірні.

2 Час життя електрона на метастабільному рівні складає близько:

- (a) $10^{-3}c$;
- (b) $10^{-1}c$;
- (c) 10^2c ;
- (d) 10^3c .

3 У гелій-неоновому лазері метастабільні рівні утворюються за рахунок:

- (a) атомів гелію;
- (b) атомів неону;
- (c) атомів хрому;
- (d) незначної кількості атомів повітря.

4 Для утворення інверсної заселеності енергетичних рівнів необхідно, щоб:

- (a) метастабільні рівні розташовувалися дещо вище рівнів робочої речовини;
- (b) метастабільні рівні знаходилися значно вище рівнів робочої речовини;
- (c) ті рівні, переходи з яких відбуваються з нив вчена знаходилися вище метастабільних рівнів;
- (d) кількість рівнів, переходи з яких дають випродуцтніюними перевищувала кількість метастабільних рівнів.

5 Для здійснення індукованого випромінювання необхідно задіяти наступну кількість енергетичних рівнів:

- (a) достатньо двох;
- (b) не менше трьох;
- (c) як мінімум чотири;
- (d) будь-яку.

6 Збудження активного середовища можна здійснити за рахунок:

- (a) оптичного підкачування;
- (b) електричного розряду;
- (c) інжекції носіїв заряду;
- (d) нагрівання.

7 Яке з цих тверджень хибне? Найхарактернішою відмінністю лазерного випромінювання від випромінювань інших джерел є його:

- (a) монохроматичність;
- (b) поляризованість;
- (c) когерентність;
- (d) синфазність.

8 Під часом когерентності розуміють:

- (a) час випромінювання атомом пугу хвиль;
- (b) час перебування атома у збудженому стані;
- (c) час переходу атома із збудженого стану в стаціонарний;
- (d) час, необхідний для інтерференції світлових хвиль.

