

# КВАНТОВА ТА АТОМНА ФІЗИКА

## 14. ВИМУШЕНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЛАЗЕРИ

### Зміст

#### 1. Імовірність переходу між енергетичними рівнями

#### Вимушене випромінювання

Атоми в збудженому стані згодом переходять в стан з нижчим рівнем енергії, випромінюючи квант, енергія якого рівна зміні енергії атома. Такі переходи можуть відбуватися вільно, без зовнішнього впливу та в результаті зовнішнього стимулювання. За обставинами таких переходів розрізняють самодовільне (спонтанне) та вимушене (індуковане) випромінювання.

Природне випромінювання (теплове чи люмінесцентне) є **самодовільним – спонтанним випромінюванням**, і відбувається без зовнішньої дії, в результаті хаотичних переходів електронів, які знаходяться на рівнях, що відповідають збудженому стану, на рівні з нижчою енергією. Таке випромінювання складається з квантів різної енергії, частоти, поляризації та напрямку, значення яких є імовірнісним.

Можна оцінити поведінку електронів при знаходженні в збудженому стані.

Розумно допустити, що в речовині, яка знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, імовірність  $I_n$  знаходження електрона на певному енергетичному рівні збудження, пропорційна кількості електронів  $N_n$ , що заселяють цей рівень (тобто мають відповідне значення енергії).

$$I_n \sim N_n$$

При імовірнісному розподілі кількість електронів  $N_i$  на певному енергетичному рівні (з певним значенням енергії)  $E_i$  визначається формулою Больцмана

$$N_i = ce^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

Відношення числа електронів на двох рівнях енергії

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{ce^{-\frac{E_n}{k_B T}}}{ce^{-\frac{E_m}{k_B T}}} = \frac{1}{e^{\frac{E_n - E_m}{k_B T}}} \quad (1)$$

Якщо  $E_m < E_n$ , то при  $T > 0$  відношення менше одиниці, що означає

$$N_n < N_m,$$

тобто, при рівноважному заселенні рівнів, більшу енергію збудження має менше число частинок.

Відповідно, імовірність  $V_{mn}$  переходів з рівня  $m$  на рівень  $n$  за спонтанного випромінювання менша імовірності  $V_{nm}$  зворотного переходу  $V_{mn} < V_{nm}$  і визначається відношення числа електронів на цих рівнях.

Виявилось, що збільшити імовірність таких переходів можна за допомогою зовнішнього впливу. Таким чином отримують **вимушене, або індуковане випромінювання**, яке здійснюється внаслідок електронних переходів, стимульованих зовнішньою дією, наприклад електромагнітним полем. Принцип індукованого випромінювання був описаний А. Айнштейном ще у 1917 р. Теоретичне обґрунтування можливості створення квантової системи з таким випромінюванням було здійснене радянським фізиком В.О. Фабрикантом у 1939 р. Експериментальне підтвердження цієї можливості було здійснене



у 1950 р. американськими вченими Е. Перселлом і Р. Паундом.

Наведений малюнок ілюструє перехід електрона на нижчий енергетичний рівень, індукований пролітанням фотона з енергією близькою різниці енергій рівнів переходу

$$h\nu_{mn} = E_n - E_m .$$

Розгляд особливостей індукованого випромінювання привів до виникнення ідеї його використання для генерації і підсилення електромагнітних хвиль. Ідея полягала у здійсненні в атомах речовини перенаселеності певного рівня збудження з наступною стимуляцією освітленням масових синхронних електронних переходів.

Перенаселеність рівня приводить до нерівноважності, нестабільності стану, для якого

$$N_n > N_m ,$$

що згідно формулі (1) означає від'ємність температури

$$T < 0 .$$

Цей результат не протирічить третьому закону термодинаміки, оскільки температура пов'язана з кінетичною енергією частинок тіла, а зі співвідношення невизначеностей для енергії та часу, впливає можливість коливань значення температури, у відповідності до проміжку часу такого коливання

$$(\Delta E \Delta t \sim \hbar; \Delta E_k \sim \Delta T) \rightarrow \Delta T \Delta t \sim \hbar .$$

Роком народження квантових генераторів електромагнітного випромінювання можна вважати 1954 р., коли радянські фізики В.Г. Басов і А.М. Прохоров створили свій варіант молекулярного генератора. В тому ж році була опублікована робота американського фізика Ч. Таунса та його співробітників, в якій був описаний квантовий генератор електромагнітного випромінювання на молекулах аміаку, який працював на хвилі з довжиною близькою 1,27 см.

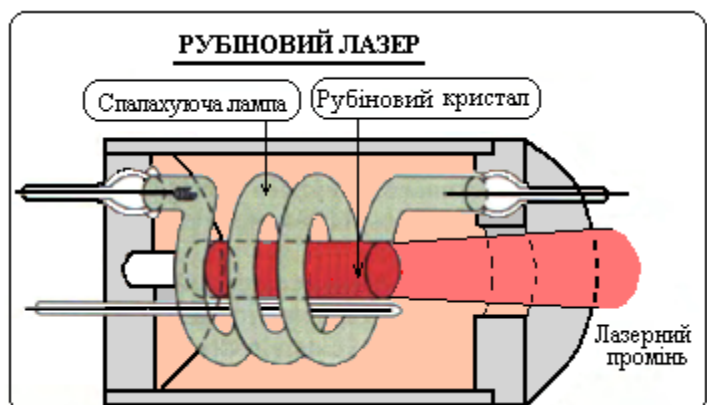
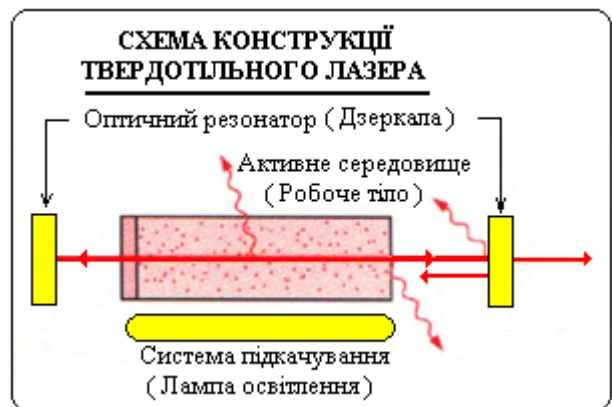
У 1968 р. американці А. Шавлов і Ч.Таунс дослідили можливість створення генераторів в діапазоні видимого світла і у 1960 р. Т. Мейман створив перший генератор світла на рубіні.

У 1961 р. А. Джаван у США створив перший газовий генератор на суміші неона і гелія. Квантові генератори світла називаються *лазерами (laser)*, що є аббревіатурою англійської назви пристрою – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, що в перекладі означає підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання.

У 1961 р. Н.Г. Басов, О.Н. Крохін, Ю.М.Попов запропонували створити напівпровідниковий лазер, і вже у 1962 -1963 рр. з'явилися повідомлення про створення таких генераторів в СРСР та США.

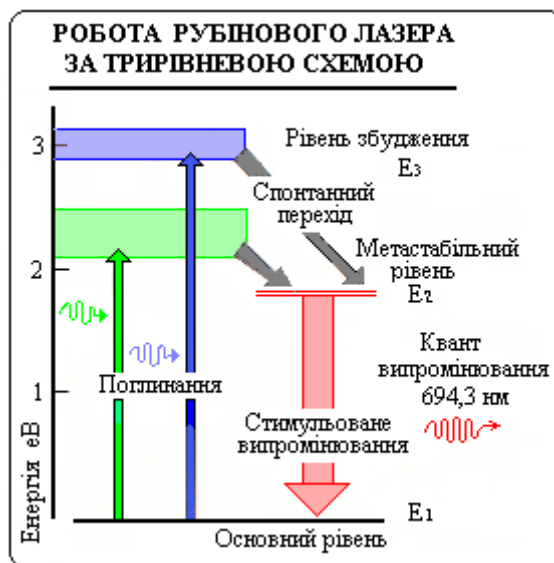
За створення молекулярного генератора Н.Г. Басову та А.М. Прохорову разом з Ч. Таунсом у 1964 р. була присуджена Нобелівська премія.

Принцип роботи квантового генератора може бути проілюстрований на прикладі лазера на кристалі. Принципова схема конструкції містить лампу освітлення, спалах якої переводить атоми робочого тіла (кристалу) в збуджений стан. Ця лампа є основою *системи підкачування* енергії і освітлює циліндричний кристал, який знаходиться між двома дзеркалами, що грають роль *оптичного резонатора*. Після спалаху лампи електрони збуджених атомів перенаселяють один з вищих енергетичних рівнів. Наступний немінучий перехід електрона на нижчий рівень супроводжується випромінюванням кванта, який, пролітаючи в кристалі, збуджує однотипні переходи інших електронів. Той квант, який



випромінюється в напрямку дзеркал, індукує випромінювання квантів з таким же напрямком руху. Ці кванти на шляху багатократного відбивання від дзеркал збуджують випромінювання потужної лавини квантів, які утворюють випромінювання високої інтенсивності та монохроматичності, при надзвичайно малому куті розходження променів. Вихід променя здійснюється через напівпрозоре дзеркало.

Перший твердотільний лазер був побудований на рубіні. Це кристал мінералу  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – різновиду корунда (сапфіру), в якому 5% Al заміщені атомами Cr (що надає червоного забарвлення). Цей лазер працює за трирівневою схемою. При освітленні кристала рубіна іони  $\text{Cr}^{3+}$  переходять в



збуджений стан, потім в основний у два етапи, минаючи проміжний, метастабільний стан. Час життя на найвищому рівні збудження становить біля  $10^{-8}$  с, в проміжному значно більший  $10^{-3}$  с. Саме тому проміжний стан називається є близьким до стабільного – метастабільним. Індукований лавиноподібний перехід в основний стан дає червоне випромінювання довжиною хвилі 0,6943 мкм.