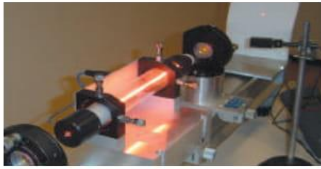


§ 38. КВАНТОВО-ОПТИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ (ЛАЗЕРИ)



Наприкінці 50-х — на початку 60-х рр. ХХ ст. фахівці з квантової фізики здійснили низку відкриттів, які згодом значно змінили життя людства. Гідне місце серед цих відкриттів належить винайденню *квантових генераторів*. Що приховане під цією назвою, яка мовби зійшла зі сторінок науково-фантастичних романів?

1 Спонтанне і вимушене випромінювання

Якщо атом якимось чином перевести у збуджений стан, то, повертаючись в основний стан, він випромінює квант світла. «Стандартним» способом збудження світлового випромінювання є зіткнення атомів за високих температур, проте існують й інші (нетеплові) способи збудження атомів. Атоми речовини можуть перейти у збуджений стан під час хімічних реакцій, унаслідок обробки речовини звуком високої частоти, опромінення рентгенівськими та γ -променями, внаслідок розтирання, розколювання речовини тощо.

Люмінесценція і люмінофори

Явище нетеплового світіння речовини, яке відбувається після поглинання речовиною енергії збудження, називають **люмінесценцією**, а речовини, які здатні перетворювати поглинуту нетеплову енергію на світлове випромінювання, — **люмінофорами**.



Прикладом застосування люмінесценції є так звані лампи денного світла. Ці лампи являють собою трубки, заповнені випарами ртуті за низького тиску. Внутрішню поверхню трубок вкрито люмінофором. Ультрафіолетове випромінювання, яке утворюється внаслідок газового розряду у випарах ртуті, потрапляє на люмінофор, і він починає випромінювати світло, близьке до денного. Деякі люмінофори використовують як індикатори радіації. Органічні люмінофори — *люмогени* — застосовують для виготовлення яскравих флуоресцентних фарб, люмінесцентних матеріалів, наприклад матеріалів для дорожніх знаків тощо.

Час життя атома у збудженому стані зазвичай є дуже нетривалим і становить 10^{-9} – 10^{-10} с, після чого атом «самостійно» (спонтанно) повертається в основний стан із випромінюванням фотонів (або фотона) чітко визначених частот.

Випромінювання, що виникає внаслідок спонтанного переходу атомів у стан із нижчим рівнем енергії, називають **спонтанним випромінюванням**.

Спонтанне випромінювання некогерентне, адже кожен атом починає і закінчує випромінювати незалежно від інших. Проте в деяких випадках перехід атома зі збудженого стану в основний може відбуватися вимушено.

Випромінювання, яке виникає під впливом зовнішньої електромагнітної хвилі, називають **індукованим (вимушеним) випромінюванням**.

Природно, що індуковане випромінювання ініціюється не будь-якою електромагнітною хвилею, а лише хвилею, яка має частоту, що дорівнює *власній частоті переходу*.

Власна частота переходу — частота фотона, унаслідок поглинання якого атом переходить з основного стану в збуджений.

Уже зазначалося, що атом перебуває у збудженому стані дуже короткий час. Однак є речовини, атоми яких мають збуджені стани, в яких вони можуть перебувати протягом доволі тривалого часу, порядку 10^{-3} с. Такі збуджені стани атомів називають **метастабільними**. Індуковане випромінювання таких атомів спричинило появу принципово нового типу генераторів світла — **квантових генераторів**. *Особливостями індукованого випромінювання є його монохроматичність і когерентність*.

? Згадайте, яке випромінювання називають монохроматичним? когерентним?

2 Як працює квантовий генератор

Власне назва «квантовий генератор» має означати, що цей пристрій «виробляє» кванти електромагнітного випромінювання. Але ж якщо керуватися такою логікою, то звичайна лампа теж є квантовим генератором, проте це не так.

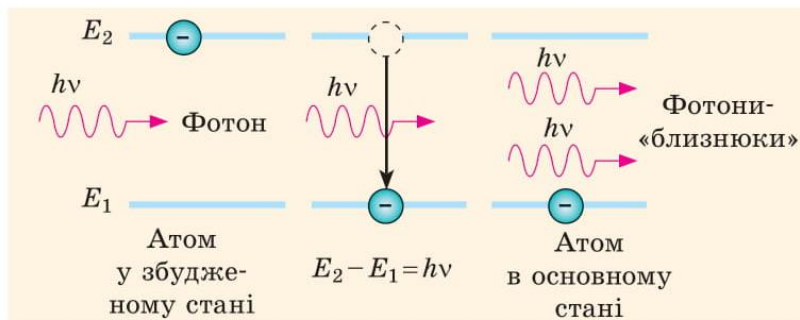


Рис. 38.1. Схема вимушеного випромінювання

Квантовий генератор — це джерело електромагнітних хвиль, дія якого будується на явищі вимушеного випромінювання.

Перший квантовий генератор був створений у 1954 р. двома незалежними одна від одної групами радіофізиків — радянськими фізиками *Миколою Геннадійовичем Басовим* (1922–2001), *Олександром Михайловичем Прохоровим* (1916–2002) і групою американських учених під керівництвом *Чарлза Гарда Таунса* (1915–2015). Винайдений квантовий генератор випромінював електромагнітні хвилі радіодіапазону.

У 1960 р. були створені перші **лазери** — *квантові генератори, які працюють в оптичному діапазоні*. Принцип роботи лазерів такий. Якщо на збуджений атом падає фотон, енергія якого дорівнює енергії збудження, то взаємодія цього фотона зі збудженим атомом спричиняє повернення атома в основний стан із випромінюванням вторинного фотона. Напрямок руху та енергія вторинного фотона такі самі, як у фотона, що спричинив випромінювання, тобто виникають два фотони-«близнюки» (рис. 38.1). Якщо в речовині буде багато збуджених атомів, то кожний із фотонів-«близнюків» спричинить появу двох нових «близнюків» і т. д. Урешті-решт виникне «лавина» фотонів з однаковими характеристиками.

Розглянемо, як відбуваються посилення та генерація електромагнітного випромінювання в рубінових лазерах. Активним середовищем таких лазерів є кристал рубіну. Рубін — це кристал алюміній оксиду (Al_2O_3), у якому невелика кількість атомів Алюмінію (~0,05%) заміщена атомами Хрому (атоми Хрому мають метастабільний стан). Кристалу надають форми циліндра (рис. 38.2), на два торці якого наносять відбивний шар (дзеркало). Одна із дзеркальних поверхонь повністю відбиває світло, друга є частково прозорою: 92% світлового потоку відбивається від неї, а близько 8% пропускається. Рубіновий стрижень поміщений усередину імпульсної спіральної лампи, яка є джерелом збуджувального випромінювання. Під час спалаху лампи атоми Хрому, поглинаючи випромінювання певної частоти, переходять із основного стану з енергією E_1 у збуджені стани з енергіями E_3 , E_4 (рис. 38.3).

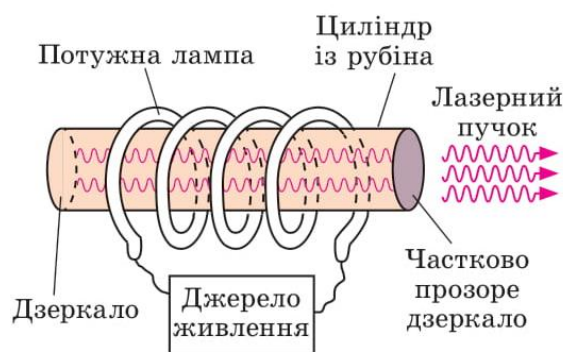


Рис. 38.2. Схематична будова рубінового лазера

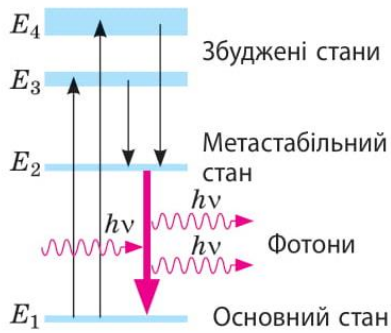


Рис. 38.3. Схема переходів атомів Хрому у збуджений, метастабільний та основний стани

Різні види квантових генераторів

Квантові генератори мають різні назви залежно від того, яку довжину хвилі випромінює генератор, і всі ці назви походять від абревіатури англійського словосполучення *amplification by stimulated emission of radiation* (посилення шляхом стимулюючого випромінювання).

- Першим квантовим генератором був **мазер** — пристрій, який випромінював когерентні електромагнітні хвилі в міліметровому радіодіапазоні (англ. *microwave* — мікрохвильовий).
- Квантові генератори іншого типу — **лазери** — працюють в оптичному діапазоні шкали електромагнітних хвиль (англ. *light* — світло).
- **Разер** — квантовий генератор, який випромінює рентгенівські хвилі.
- **Газер** — квантовий генератор, який...

? Сподіваємось, що вам нескладно відповісти, в якому діапазоні шкали електромагнітних хвиль працюють газери.

Процес переведення атомів з основного стану в збуджений називають **накачуванням**, а лампу, яку використовують для цього, — **лампю накачування**.

Час перебування атомів Хрому в збудженому стані (на рівнях з енергіями E_3 , E_4) є малим, і тому майже миттєво більша частина атомів переходить у метастабільний стан з енергією E_2 (рис. 38.3).

Варто одному атому Хрому здійснити спонтанний перехід із метастабільного стану в основний із випромінюванням фотона, як виникає лавина фотонів, спричинена індукованим випромінюванням атомів Хрому, що перебувають у метастабільному стані. Якщо напрямок руху первинного фотона є чітко перпендикулярним до торців рубінового циліндра (а такі фотони є завжди), то первинні та вторинні фотони відбиваються від одного торця й летять крізь кристал до другого торця. На своєму шляху фотони спричиняють вимушене випромінювання в інших атомах Хрому і т. д. Процес завершується за 10^{-8} – 10^{-10} с. Потужність світлового випромінювання лазера може сягати 10^9 Вт, що перевищує потужність електростанції.

3 Де застосовують лазери

Сучасні квантові генератори є досить різноманітними: вони працюють у різних діапазонах довжин хвиль (мазери, лазери, разери, газери), мають різну активну речовину (тверdotілі, газові, напівпровідникові, рідкі). Ми не розглядатимемо галузі застосування всіх типів квантових генераторів, зупинимось на **лазерах** — квантових генераторах, які працюють в оптичному діапазоні.

Як джерела когерентного монохроматичного світла лазери знайшли своє застосування в наукових дослідженнях.

Лазерні пучки застосовують у косметології та медицині, зокрема в хірургії, офтальмології (рис. 38.4). Під час операцій, здійснюваних за допомогою «лазерного скальпеля», краї ран не кровоточать, а можливість «приварити» лазером відшаровану сітківку до очного дна врятувала багатьох людей від сліпоти.

Потужні лазери, зокрема інфрачервоні на вуглекислому газі, використовують для *обробки матеріалів* (різання, зварювання, свердління) — за допомогою сфокусованого лазерного пучка.

Лише за допомогою лазерів удалося реалізувати новий метод отримання зображень тривимірних об'єктів — *голографію*.

Передаючи лазерні пучки за допомогою волоконно-оптичного кабелю, здійснюють *телефонний і телевізійний зв'язок*. Висока частота-носій ($\sim 10^{13} - 10^{14}$ Гц) дозволяє одним світлопроводом передати мільйони музичних і телевізійних передач.

За допомогою лазерного випромінювання визначають відстань до рухомих об'єктів та їхню швидкість. *Лазерна локація* точніша за радіолокацію: світлові хвилі значно коротші, ніж радіохвилі, тому лазерні пучки менше розширюються і майже не обгинають перешкоди.

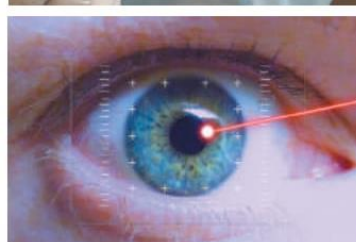


Рис. 38.4. Застосування лазерів у медицині: *а* — лазерне лікування шкіри; *б* — лазерний скальпель; *в* — лазерна корекція зору



Підбиваємо підсумки

- Атом випромінює світло під час переходу з одного енергетичного стану в інший.
- Якщо збуджений атом переходить у стан із нижчим рівнем енергії самовільно, таке випромінювання називають спонтанним. Спонтанне випромінювання є некогерентним і поліхроматичним.
- Випромінювання, яке виникає під впливом зовнішньої електромагнітної хвилі, називають індукованим (вимушеним). Таке випромінювання є когерентним і монохроматичним.
- Джерела когерентного монохроматичного електромагнітного випромінювання називають квантовими генераторами. Квантові генератори, які працюють в оптичному діапазоні довжин електромагнітних хвиль, називають лазерами. Лазери застосовують у медицині, для передачі інформації тощо.



Контрольні запитання

1. Яке випромінювання називають спонтанним? індукованим (вимушеним)? Назвіть їх властивості.
2. Яку властивість повинні мати атоми активної речовини в оптичному квантовому генераторі?
3. Як улаштований лазер?
4. Поясніть, як працює лазер.
5. Наведіть приклади застосування лазерів.



Вправа № 38

1. Наведіть приклади люмінесценції в природі.
2. Чому звичайну лампу не можна вважати квантовим генератором?
3. Максимального енергетичного рівня атоми рубінового лазера сягають у разі поглинання світлових хвиль довжиною 560 нм, при цьому лазер генерує хвилі довжиною 694 нм. Яку енергію випромінює атом під час переходу зі стану з найбільшим рівнем енергії у метастабільний стан?

4. Лазерна указка — це портативний квантово-оптичний генератор. Скільки фотонів за секунду випромінює такий генератор, якщо він працює на довжині хвилі 532 нм, а потужність його випромінювання становить 5 мВт? Світло якого кольору випромінює ця лазерна указка?
5. Оберіть певну галузь застосування лазерів і підготуйте коротке повідомлення про розвиток і перспективи розвитку цієї галузі.
6. Одну з груп дослідників, що займаються вивченням лазерів і розробляють високоінтенсивні лазерні системи, очолює канадійка *Донна Стрикланд* (народ. 1959 р.), лауреатка Нобелівської премії з фізики (2018 р.). Дізнайтеся, за що вона отримала цю почесну нагороду.



Експериментальне завдання

Підготуйте низку цікавих дослідів із використанням лазерної указки. Методику проведення дослідів можете придумати самі або пошукати необхідну інформацію в Інтернеті.



Фізика в цифрах

Яку лазерну указку вибрати

Існують різні лазери. За однакової потужності зелені лазери сприймаються людським оком яскравішими, ніж червоні, у 4–15 разів, ніж синьо-фіолетові — у 20 разів, ніж фіолетові — у 190 разів.

Навіть малопотужні лазери можуть бути небезпечними для зору. Кожен пристрій має інформацію щодо класу його безпеки. У таблиці наведено інформацію про те, якої потужності зелені лазери доцільно використовувати за різних умов.

Подія	Потужність зеленого лазера, мВт
Презентація в закритому приміщенні	5
«Експерсія» зоряним небом за містом	5
«Експерсія» зоряним небом у місті	20–50
Експерсія, пов'язана з показом пам'яток архітектури	50–100 (хмарний день); 200–300 (сонячний день)