

§ 52. НЕТЕПЛОВЕ ЗБУДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ



«Стандартним» способом збудження світлового випромінювання є зіткнення атомів за високих температур. Пізніше виявилось, що, крім теплового збудження, випромінювання може ініціюватися іншими причинами. Так, у повсякденному житті ми дуже часто зустрічаємося з різними прикладами люмінесценції, але в багатьох випадках навіть не здогадуємось про це. Практичне застосування іншого відкриття — лазерних генераторів — теж відоме більшості з вас. Це звичайна лазерна указка. У цьому параграфі ми розглянемо механізми явищ, пов'язаних із нетепловим збудженням випромінювання, та їх застосування в техніці.



Як застосовують люмінесценцію

Люмінесценція — це явище нетеплового світіння речовини, яке відбувається після поглинання нею енергії збудження. Загальна назва речовин, здатних перетворювати поглинуту енергію на світлове випромінювання, — **люмінофори**.

Найпоширенішим прикладом застосування люмінесценції є так звані лампи «денного світла». Ці лампи мають форму трубок, заповнених ртутною парою низького тиску, внутрішня поверхня яких вкрита люмінофорами. Газовий розряд у парі спричиняє ультрафіолетове випромінювання, яке «перетворюється» в люмінофорі на світло, близьке до денного. Лампи денного світла приблизно в 3–4 рази економніші за звичайні лампи розжарювання.

Екрани телевізорів, радіолокаторів та ЕОМ вкриті люмінофорами, які світяться внаслідок бомбардування їх електронами. Деякі люмінофори використовують як індикатори радіації.

Органічні люмінофори — *люмогени* — застосовують для виготовлення яскравих флуоресцентних фарб, люмінесцентних матеріалів, наприклад, для фарбування дорожніх знаків тощо.

Люмінесцентне світіння також допомагає здійснювати якісний і кількісний *люмінесцентний аналіз складу речовини*. За інтенсивністю спектральних ліній люмінесценції визначають незначні домішки (приблизно 10^{-11} г у 1 г досліджуваної речовини). Люмінесцентний аналіз широко застосовують у різних галузях промисловості, у медицині, біології, хімії, криміналістиці тощо.



Які бувають різновиди люмінесцентних явищ

Причиною всіх люмінесцентних явищ є перехід джерел люмінесцентного світіння у збуджений стан.

Явище, коли збуджений стан центрів люмінесценції зберігається протягом доволі нетривалого часу (близько 10^{-8} с), називають **флуоресценцією**.

Явище, коли збуджений стан центрів люмінесценції зберігається порівняно довго (від 10^{-4} с до десятків хвилин), називають **фосфоресценцією**.

Фосфоресценція спостерігається у випадках опромінення світлом деяких рідин і газів. Наприклад, газ під дією денного світла дає слабке блакитнувате фотолюмінесцентне світіння. Розчини багатьох барвників під дією ультрафіолетового випромінювання, створюваного ртутною лампою, випромінюють видиме світло.

Люмінесцентне світіння тіл прийнято поділяти на види, які визначаються за типом зовнішнього впливу на речовину. Наприклад, *хемілюмінесценція* — це світіння, яке виникає під час деяких хімічних реакцій. Іншими типами впливу на речовину є такі: опромінення швидкими електронами (катодними променями); обробка звуком високої частоти; опромінення рентгенівськими променями; опромінення γ -променями; розтирання, роздавлювання або розколювання люмінофорів; пропускання електричного струму через певні типи люмінофорів тощо.

★ 3 Спонтанне та вимушене випромінювання

Час життя атома в збудженому стані здебільшого є дуже нетривалим і становить $10^{-9} \dots 10^{-10}$ с. Після цього електрон обов'язково «самостійно» повертається до основного стану з випромінюванням фотона. *Випромінювання, що випускається внаслідок спонтанного переходу атома з одного стану в інший, називають спонтанним.* Спонтанне випромінювання некогерентне, бо кожен атом починає й закінчує випромінювати незалежно від інших.

У деяких випадках перехід електрона з верхнього енергетичного рівня на нижній із випромінюванням фотона може відбуватися не тільки спонтанно, але й вимушено — під впливом зовнішнього електромагнітного поля. Таке «спеціальне» випромінювання дістало назву *вимушеного, або індукованого, випромінювання*. Природно, що такий перехід ініціюється не будь-яким електромагнітним полем, а лише полем із частотою, яка дорівнює власній частоті переходу. *Власною частотою переходу* називають частоту фотона, унаслідок поглинання якого атом переходить з основного стану в збуджений.

Ініціювати та зафіксувати індуковане випромінювання вдається тільки в деяких спеціальних випадках, оскільки термін перебування електрона у збудженому стані дуже короткий. Однак деякі атоми мають збуджені стани, в яких вони можуть перебувати протягом доволі тривалого часу, наприклад 10^{-3} с. Такі стани називають *метастабільними*. Саме в таких атомів було зафіксовано індуковане випромінювання, і це, в свою чергу, спричинило появу принципово нового типу генераторів — *квантових генераторів*. *Особливостями індукованого випромінювання є його монохроматичність і когерентність.* ★

4 Що таке квантові генератори (лазери) і де їх застосовують

Наприкінці 50-х — на початку 60-х рр. XX ст. фахівці з квантової фізики здійснили низку відкриттів. Згодом ці відкриття значно змінили життя людства. Ідеться передусім про мобільні телефони та персональні комп'ютери. Гідне місце серед цих відкриттів належить винайденню квантових генераторів. Розберемося, що приховане під цією назвою, яка неначе зійшла зі сторінок науково-фантастичних романів. Із точки зору здорового глузду, назва «квантовий генератор» має означати, що цей прилад «виробляє» значну кількість квантів електромагнітного випромінювання. Але, якщо керуватися такою логікою, то звичайна лампа розжарювання — також квантовий генератор?

Насправді квантовий генератор — це прилад, який генерує дуже специфічний тип випромінювання — *монохроматичне і когерентне*. Пам'ятаєте, як учені-оптики XIX ст. «вирізали» з повного світлового потоку «вузьку смужку» потрібного їм випромінювання для вивчення оптичних явищ? Сьогодні потужне джерело, яке генерує виключно монохроматичне когерентне випромінювання, може придбати кожен охочий у найближчому кіоску. Здогадалися, про що йдеться? Так, прикладом квантового генератора, який працює в діапазоні видимого світла, є лазерна указка («лазер» — таку назву одержали квантові генератори, що працюють у діапазоні видимого світла).

Попередній пункт параграфа підказав перший напрямок практичного застосування лазерів. Це — якісні джерела когерентного монохроматичного світла для наукових досліджень. Але сфера застосування лазерів — не лише наукові дослідження.

Потужні лазери, зокрема інфрачервоні на вуглекислому газі, використовуються для обробки матеріалів (різання, зварювання, свердління) за допомогою сфокусованого лазерного пучка. Такі самі пучки застосовуються в хірургії замість скальпеля; під час операцій, здійснюваних за їхньою допомогою, краї ран майже не кровоточать.

Лазерні пучки широко застосовують в офтальмології. За їхньою допомогою проводять операції на кришталику й сітківці ока. Можливість «приварювати» відшаровану сітківку до очного дна врятувала багатьох хворих від неминучої сліпоти.

Уже йшлося про те, що лише за допомогою лазерів удалося реалізувати новий метод одержування зображень — голографію (див. § 49).

На монохроматичному когерентному лазерному пучку за допомогою волоконної оптики здійснюють кабельний, телефонний, радіо- й телевізійний зв'язок. Висока частота-носії (приблизно $10^{13} \dots 10^{14}$ Гц) дозволить по одному світлопроводу передати до мільярда музичних передач або до мільйона телевізійних передач.

За допомогою лазерного випромінювання визначають відстань до рухомих об'єктів і швидкість їхнього руху. Лазерна локація точніша за радіолокацію, оскільки світлові хвилі значно коротші, ніж радіохвилі.

Зараз дослідники займаються проблемами використання лазерів у термоядерному синтезі, поділі ізотопів, вивчають застосування лазерного опромінення для стимуляції хімічних реакцій і т. ін. У міру вдосконалювання конструкцій лазерів, використання різних активних середовищ — напівпровідників, рідких барвників, нових сортів скла тощо — можливості застосування лазерів із різними властивостями дедалі розширюватимуться.

5 Яким чином працюють квантові генератори

Розглянемо таку модельну ситуацію. На збуджений атом падає фотон, енергія якого дорівнює енергії збудження (частоті переходу). Взаємодія первинного фотона зі збудженим електроном спричиняє повернення електрона на основний рівень із випромінюванням вторинного фотона. Напрямок руху та енергія другого фотона збігатимуться з напрямком руху й енергією фотона, що спричинив випромінювання, тобто виникають два «фотони-близнюки» (рис. 52.1). Якщо в речовині буде багато збуджених атомів, то фотони-близнюки зумовлять появу чотирьох нових близнюків, потім — восьми і так далі. Наприкінці з'явиться «лавина» фотонів з однаковими характеристиками. Отже, розглянута вище модельна речовина стає генератором когерентного монохроматичного випромінювання. Саме цю властивість речовини покладено в основу будови лазерів.

Розглянемо принцип посилення та генерації електромагнітного випромінювання в лазерах, який був запропонований радянськими російськими фізиками Миколою Геннадійовичем Басовим (1922–2001), Олександром Михайловичем Прохоровим (1916–2002) і американським ученим Чарлзом Таунсом (народ. у 1915 р.). У цих лазерах активним середовищем став кристал рубіну (Al_2O_3) з домішкою близько 0,05 % хрому. Зараз цей основний (активний) елемент лазера зазвичай має форму циліндра (рис. 52.2). Торці циліндра паралельні, й на кожний нанесено відбивний шар (дзеркало). Одна із дзеркальних поверхонь частково прозора: 92 % світлового потоку відбивається від неї, а близько 8 % пропускається.

Рубіновий стрижень поміщений усередину імпульсної спіральної лампи, що є джерелом випромінювання-збудника. Атом Хрому, поглинаючи випромінювання з довжиною хвилі 560 нм, що міститься в спектрі випромінювання лампи, переходить з основного рівня

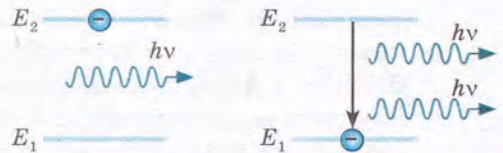


Рис. 52.1. Схема вимушеного випромінювання

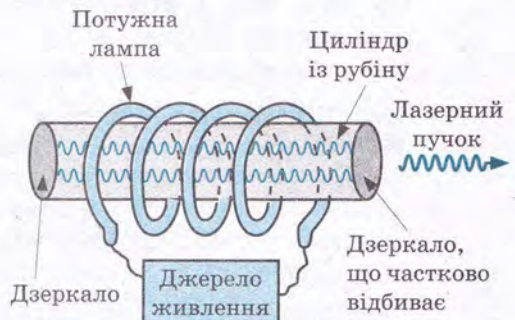


Рис. 52.2. Схематична будова рубінового лазера

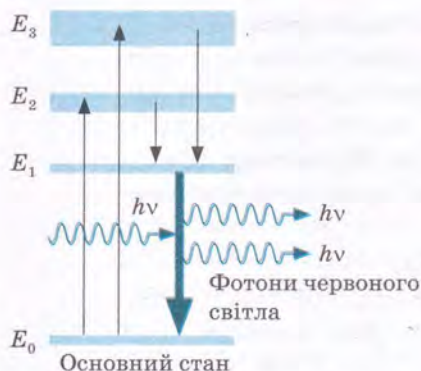


Рис. 52.3. Схема переходів збуджених електронів атома Хрому

з енергією E_1 на збуджений рівень з енергією E_3 . Процес переведення атомів з основного у збуджений стан називають *накачуванням*; відповідно лампу, яку використовують для цього, називають *лампою накачування*. Час життя атомів Хрому на збудженому рівні є малим. Тому більша частина атомів робить переходи із цього рівня на метастабільний рівень з енергією E_1 (рис. 52.3).

Варто одному атому Хрому здійснити спонтанний перехід із метастабільного рівня на основний рівень із випускненням фотона, як виникає лавина фотонів, спричинена індукованим випромінюванням атомів Хрому, що перебувають у метастабільному стані. Якщо

напрямок руху первинного фотона є чітко перпендикулярним до площини дзеркала на торці рубінового циліндра, то первинні та вторинні фотони відбиваються від першого дзеркала й летять крізь кристал до другого дзеркала. На своєму шляху вони спричиняють вимушене випромінювання в нових атомів Хрому і т. д. Процес висвічування всіх збуджених атомів Хрому завершується за $10^{-8} \dots 10^{-10}$ с. Потужність світлового випромінювання лазера при цьому може бути більшою за 10^9 Вт, тобто перевищувати потужність великої електростанції.



6 Лазери та мазери

Першим квантовим генератором був прилад, який випромінював когерентні електромагнітні хвилі в міліметровому діапазоні (радіохвилі). Він був створений у 1954 р. Ч. Таунсом і дістав назву *мазер*. Ця назва — аббревіатура від англійського словосполучення — **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Сьогодні мазери використовуються в техніці (зокрема в космічному зв'язку), у фізичних дослідженнях, а також як квантові генератори стандартної частоти.

Квантові генератори іншого типу, про які йшлося вище, працюють у діапазоні видимого світла. Вони, як ви вже знаєте, звуться лазерами. Назва «лазер» — теж аббревіатура від англійських слів **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.★



Підбиваємо підсумки

Люмінесценція — нетеплове світіння речовини, що відбувається після поглинання нею енергії збудження. Люмінофори — речовини, здатні випромінювати поглинену енергію у вигляді світлової хвилі.

Види люмінесценції розрізняють за типом джерела збудження люмінофорів.

Застосування люмінесценції дуже широке — від люмінесцентного одягу до вузлів найскладнішої наукової та побутової техніки.

★ Спонтанним випромінюванням називають випромінювання, що випускається внаслідок спонтанного переходу атома з одного

стану в інший. Воно є некогерентним і немонахроматичним. Випромінювання, яке виникає внаслідок вимушеного переходу електрона зі збудженого верхнього енергетичного рівня на основний, одержало назву вимушеного, або індукованого.★

Прилади, які є джерелом когерентного монахроматичного випромінювання світла, називають квантовими генераторами або лазерами. Лазери застосовують у наукових дослідженнях, медицині, для передавання інформації, локації об'єктів тощо.

★ Мазер — це мікрохвильовий квантовий генератор, що генерує електромагнітне випромінювання в діапазоні радіохвиль.★



Контрольні запитання

1. Дайте визначення люмінесценції.
2. Які існують види люмінесценції? ★
3. Яке випромінювання називають спонтанним? Чи є воно когерентним? ★
4. Яке випромінювання називають вимушеним? Чи є воно когерентним? ★
5. Чи є вимушене випромінювання монахроматичним? ★
6. Які ви знаєте приклади застосування лазерів? ★
7. Як улаштований оптичний квантовий генератор — лазер? ★
8. Що таке мазер? ★