

УДК 373.5.016:535.1

Ткаченко В.М., Невєрова Ю.А.¹ кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»e-mail: tkachenkovn2@gmail.com,

ORCID 0000-0003-1042-2656

² студентка 4 курсу фізико-математичного факультету, ДВНЗ «ДДПУ»e-mail: neverovaulia008@gmail.com,

ORCID 0000-0002-3762-0052

ЛАЗЕРИ ЯК ЕТАП СТАНОВЛЕННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті розглянуто взаємозв'язок теоретичної й експериментальної (прикладної) фізики при вивченні лазерів як етапу становлення квантової теорії випромінювання.

Ключові слова: квантова теорія випромінювання, інверсна населеність, індуковане випромінювання, лазер, активне середовище, система накачки.

Вступ

Постановка проблеми. Розвиток фізики, як однієї з природничих наук, відбувається в діалектичній єдності її експериментальної й теоретичної складових. Історія становлення квантової теорії випромінювання дає змогу наочно це продемонструвати при вивченні відповідної теми в освітніх закладах.

Метою статті є показати як квантова теорія випромінювання посприяла створенню лазера, а різні прикладні задачі спонукали до їх запровадження в залежності від робочого тіла.

Основна частина:

Наприкінці XIX на початку XX століть у світі з'явилися експериментальні результати, пояснити які існуюча на той час класична теорія була неспроможна. Це стосувалося, зокрема, рівноважного теплового випромінювання. На недосконалість класичних уявлень фізики, що встановилися на той час вказують і результати дослідів Майкельсона-Морлі по спробі експериментально виявити існування світлового ефіру. Все це спонукало до перегляду основних уявлень класичної теорії.

1. Нове розуміння прийшло в фізику (теорію випромінювання) завдяки гіпотезі Планка про існування фотонів – квантів випромінювання, як найменшої неподільної порції енергії:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

де константа $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с названа сталою Планка.

Згідно з даною гіпотезою світло випромінюється не неперервно, а дискретно. Керуючись цим Планк отримав формулу для спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, яка носить його ім'я:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \quad (2)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; e – основа натуральних логарифмів.

При цьому розподіл енергії в спектрі рівноважного теплового випромінювання отриманий теоретично за формулою Планка повністю співпадає з експериментальним.

Отже квантова теорія випромінювання Планка пояснює всі закони рівноважного теплового випромінювання.

2. Пояснити закономірності зовнішнього фотоефекту, отримані експериментально, існуюча на той час класична теорія також була неспроможна.

Для їх пояснення Альберт Ейнштейн скористався квантовою гіпотезою Планка і припустив, що і поглинання світла відбувається окремими дискретними порціями енергії – фотонами.

Ейнштейн застосував закон збереження енергії до системи «падаючий фотон – електрон речовини».

Електрони поверхневого шару металу поглинають енергію цих фотонів, при цьому один електрон поглинає цілком енергію одного або декількох фотонів.

При умові, що енергія фотона рівна або більше за значенням роботи виходу, то електрон буде вилітати з металу. Тоді частина енергії фотона буде витратитися на виконання роботи виходу A_g , а її решта буде переходити в кінетичну енергію фотоелектрона:

$$h\nu = A_g + \frac{m\nu_{\max}^2}{2} \quad (3)$$

Даний вираз називається рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту. Це рівняння записане для однофотонного фотоефекту, коли йдеться про виривання електрона, не пов'язаного з атомом (молекулою). Власне воно є узагальненим законом збереження енергії. На основі квантових уявлень про світло можна пояснити закони фотоефекту. Зрозуміло, що число електронів N_e , вирваних з речовини, пропорційне числу фотонів, падаючих на речовину, тобто $N_e \sim T$. Таким чином, ми пояснили перший закон фотоефекту.

З рівняння Ейнштейна виходить, що

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = h\nu - A_g \text{ та } A_g = h\nu_0. \quad (4)$$

З цього рівняння ми бачимо, що максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти падаючого світла, а червона межа фотоелектру – від роду речовини катода (другий і третій закони фотоелектру).

Тож квантова теорія фотоелектру Ейнштейна пояснює всі закономірності зовнішнього фотоелектру.

Але гіпотези переходять в наукову теорію коли вони здатні не лише пояснити результати існуючих експериментальних результатів, а й спроможні передбачати наступні.

3. Стосовно поширення світла Ейнштейн припустив, що воно також відбувається дискретно. Дослід Боте і став експериментальним підтвердженням цьому.

При випромінюванні фотона атомом відбувається зменшення енергії останнього на величину енергії фотона. А при поглинанні фотона атомом – збільшення енергії останнього на таку ж величину. Таким чином можна стверджувати, що квантова теорія світла пояснює дискретність енергетичних рівнів електрона в атомі.

4. Ще одним припущенням Ейнштейна стало існування вимушеного (індукованого) випромінювання. Це таке випромінювання, яке виникає у збудженому атомі при його переході в менш збуджений або нормальний стан під дією зовнішніх факторів. Наприклад, під впливом фотона (див. рис. 1).

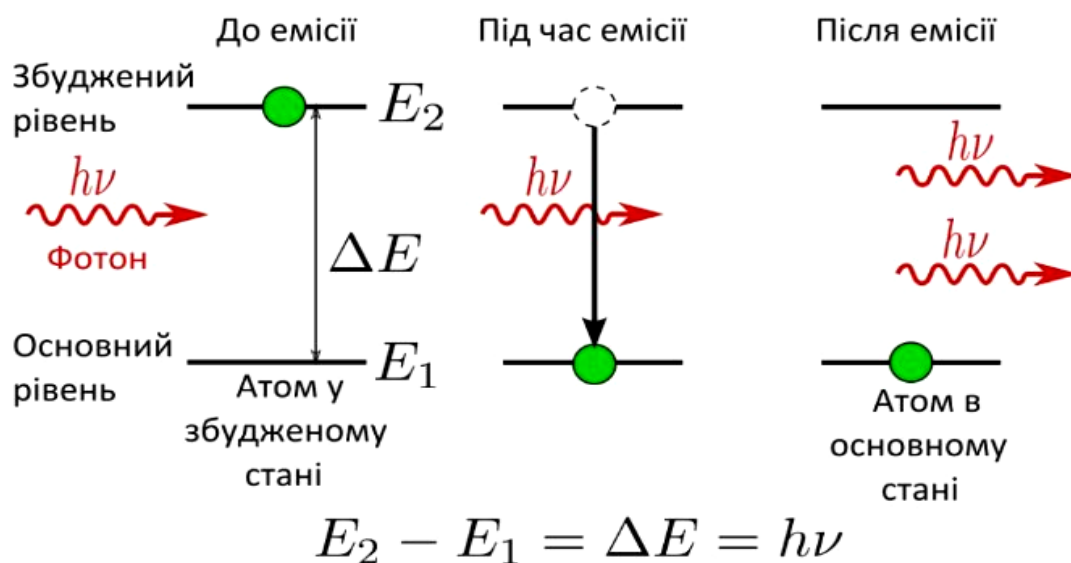


Рис. 1. Енергетична діаграма індукованого випромінювання, що виникає в атомі під дією фотона, на прикладі дворівневої квантово-механічної системи.

При проходженні фотона повз атому, що знаходиться в збудженому стані, останній переходить на нижчий енергетичний рівень з висвітленням «фотона-близнюка». Тобто падаючий і індукований фотони мають однакові частоти, напрямки поширення і поляризації. Крім того, ці фотони когерентні.

Експериментальне відкриття індукованого випромінювання надало поштовх до створення спочатку лазера, а потім і лазерної індустрії.

Термін «laser» походить від абрєвіатури англійської назви «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», що в перекладі означає посилення світла за допомогою вимушеного (індукованого) випромінювання.

Лазер зазвичай складається з трьох основних компонентів: робоче тіло, джерело енергії (система накачки), система дзеркал або «оптичний резонатор».

Основним елементом лазера, відповідальним за довжину хвилі випромінювання є робоче тіло.

В залежності від робочого тіла лазери поділяють на:

- ✓ газові;
- ✓ рідинні;
- ✓ твердотільні;
- ✓ напівпровідникові.

Для створення інверсної населеності в робочому тілі, до нього необхідно підводити енергію. Для цього використовують систему накачки. Тип використаної системи накачки повністю залежить від робочого тіла, яке застосовують, а також визначає спосіб підведення енергії до системи. Основним джерелом накачки:

- газових лазерів є електричний розряд;
- рідинних – інший лазер або імпульсна лампа;
- твердотільних – імпульсна лампа;
- напівпровідникових – електричний струм або оптична накачка.

Найпростіший оптичний резонатор складається з двох паралельних дзеркал (одне з яких напівпрозоре), розташованих навколо робочого тіла. У твердотільних лазерах роль таких дзеркал можуть відігравати відполіровані грані робочого тіла.

Широкої популярності останнім часом набули лазери на барвниках. Це пов'язано з їх здатністю роботи як в неперервному, так і в імпульсному режимах та можливістю переналаштування випромінювання в широкому інтервалі довжин хвиль. Що, в свою чергу, дозволяє вибірково впливати на біологічні клітини. Це використовують, зокрема, в різних напрямках і областях медицини.

Можливість використання потужних імпульсних лазерів лежить в основі одного з напрямків дослідження однієї з глобальних проблем людства – керованої реакції термоядерного синтезу.

Сучасні технології дозволяють виготовляти лазери з вихідною енергією близько 5 кДж і потужністю $\sim 20 \cdot 10^9$ Вт. А завдяки оптичним квантовим підсилювачам прогнозована потужність лазерного випромінювання в імпульсі може досягати $\sim 10^{13}$ Вт [3].

Висновки

Час вивчення дисципліни фізика в закладах освіти поділяється пропорційно на теоретичну й експериментальну її частини. При цьому експеримент використовують для закріплення теорії й придбання відповідних умінь та навичок.

Вивчення лазерів у контексті становлення квантової теорії випромінювання дозволяє формувати такі ключові компетенції як системне мислення й усвідомленість. Адже не достатньо знати функціональну схему лазера. Необхідно переходити до мислення, як зміни окремих її елементів впливають на характер випромінювання в цілому. Усвідомленість же дозволяє розвивати навик рефлексії, концентруючись на сучасному передбачати майбутнє.

Література

1. Білий М. У., Охріменко Б. А. Атомна фізика. – Київ: Знання, 2009. – 559 с.
2. Індуковане (вимушене) вимірювання. URL: <https://bit.ly/2rx6dbd> (дата звернення 26.05.2022).
3. Колесник Ю. І., Кіпенський А. В. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 318 с. (Серія «Фізична та біомедична електроніка»).
4. Особливості вимірювання і поглинання енергії атомами і молекулами. URL: <https://bit.ly/2IaDIX1> (дата звернення 26.05.2022).
5. Посудін Ю. І. Фізика з основами біофізики: підручник. – Київ: Світ, 2003. – 400 с.

Volodymyr M. Tkachenko, Yuliia A. Nievierova

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine.

Lasers as a stage in the formation of the quantum theory of radiation

The article considers the relationship between theoretical and experimental (applied) physics in the study of lasers as a stage in the formation of the quantum theory of radiation.

Keywords: *quantum theory of radiation, inverse population, stimulated emission, laser, active medium, pumping system.*
