

ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА АТОМОМ. НЕПЕРЕРВНИЙ І ЛІНІЙЧАТИЙ СПЕКТРИ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ. ФЕМТОСЕКУНДИ ЛАЗЕРИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У ході проведеного дослідження розглянуто, що таке лазер, описано його утворення, перші згадки про нього й час створення першого лазера та розглянемо фемтосекунди лазери і як їх використовують.

Ключові слова: лазер, рубіновий лазер, спектральний аналіз, випромінювання, мазер, явища вимушеного (індукованого) випромінювання.

Abstract

The research examined what a laser is, described its formation, the first mentions of it and the time of the creation of the first laser, and considered femtosecond lasers and how they are used.

Keywords: laser, ruby laser, spectral analysis, radiation, maser, phenomena of stimulated (induced) radiation.

Вступ

Виходячи з постулатів Бора, можна пояснити процес поглинання і випромінювання енергії атомами. Якщо атом поглинає енергію, то при цьому він переходить у збуджений стан. Його електрон може підніматися на вищу орбіту. Якщо існують вакансії для електрона ближче до ядра, то з часом електрон займає їх, переходячи на більш низький енергетичний рівень. Енергія, яка при цьому вивільняється, випромінюється атомом у вигляді кванта світла.

Якщо світло випромінюють розріджені гази, то атоми газу знаходяться так далеко один від одного, що не чинять ніякого впливу на випромінювання сусідніх атомів, і у спектрі такого джерела будуть спостерігатись лише певні лінії. Цей спектр називають лінійчастим спектром.

Якщо світло випромінюють тверді тіла, рідини чи дуже сильно стиснені гази, то на випромінювання кожного з атомів суттєво впливають сусідні атоми. Унаслідок цього можна спостерігати розмивання ліній в спектрі випромінювання і плавний перехід від одного кольору до іншого. Так виглядає суцільний спектр.

Лінійчастий спектр кожного хімічного елемента є індивідуальним. Цю властивість використовують для спектрального аналізу сполук, оскільки кожний атом цього елемента в його складі випромінює свої

лінії, які не зливаються з лініями інших елементів. Цю речовину обов'язково потрібно перевести в газоподібний стан і дуже нагріти, щоб вона світилась. Прилади, які використовують для спектрального аналізу, називають спектрографами.

Переваги спектрального аналізу

Спектральний аналіз має низку переваг і є одним із найбільш чутливих методів дослідження речовин:

- 1) сама речовина не потрібна, потрібне лише випромінювання від неї.
- 2) для проведення дослідів потребує дуже мало часу;
- 3) для дослідів потрібна дуже мала маса речовини.

У реальних джерелах лінійчастий спектр ніколи не складається з ідеально «тонких» ліній. Розширення ліній виникає через кілька фізичних ефектів: доплерівське (внаслідок теплового руху атомів), тиск (через зіткнення частинок) та природне (зумовлене квантовомеханічною невизначеністю часу життя збудженого стану). Аналіз форми та ширини ліній дозволяє визначати температуру, тиск та густину середовища в спектроскопічних експериментах.

Передбачення появи лазера та створення першого лазера

1917 року Ейнштейн передбачив можливість індукованого випромінювання, суть якого така. Якби значну частину атомів речовини можна було перевести в збуджений стан, а потім якимось чином повернути в початковий стан, то можна отримати потужний спалах світла.

Перший лазер був створений у 1960 році американським фізиком Теодором Мейманом на основі теоретичних розробок Чарльза Таунса і Артура Шавлова. Таунс і Шавлов раніше розробили мазер – пристрій, що працював у мікрохвильовому діапазоні, та заклали принципи лазерної технології.

Поняття лазера

Лазер - це одне з найбільших досягнень сучасної фізики. Він випромінює впорядковане світло, всі фотони якого мають однакову напруженість E ; і не виникає різниці фаз між коливаннями. Це призводить до того, що результуюче значення напруженості поля $\vec{E}$ у світлі лазера є настільки велике, що можна відірвати електрон від атома, нагріти середовище до температури випаровування. Властивості лазерного випромінювання принципово відрізняється від властивостей оптичного випромінювання. Основними властивостями лазерного випромінювання є:

- 1) Монохроматичність – випромінювання лазера має вузький спектр частот, тобто світло майже однієї довжини хвилі;
- 2) Корегентність – лазерне випромінювання має високу фазову узгодженість хвиль, що забезпечує їхню інтерференцію;

- 3) Направленість— це здатність лазерного випромінювання поширюватися у вигляді вузького, майже паралельного променя з мінімальним розходженням;
- 4) Потужність—це кількість енергії, яку лазер випромінює за одиницю часу. Вона вимірюється у ватах (Вт) або, для імпульсних лазерів, у джоулях (Дж) на імпульс;
- 5) Яскравість— це характеристика, що визначає інтенсивність світлового випромінювання в одиничному тілесному куті та площі джерела. Вона вимірюється у ватах на квадратний сантиметр на стеррадіан (Вт/(см²·ср)).

Історія створення першого лазера та принцип його роботи

Теодором Мейманом використав кристал рубіна як активне середовище таксенонову лампу для його накачування. Рубіновий лазер складався з циліндричного кристалу рубіну (Al₂O₃ з домішками хрому), розташованого між двома дзеркалами. Навколо кристалу була розміщена ксенонова лампа, яка випромінювала сильні світлові імпульси. Під дією цього випромінювання атоми хрому в рубіні поглинали енергію, і їхні електрони переходили на вищі енергетичні рівні. Через деякий час збуджені електрони починали повертатися на нижчі енергетичні рівні, випромінюючи фотони. Деякі з цих фотонів стимулювали випромінювання інших атомів рубіну, створюючи лавиноподібний процес підсиленого випромінювання. Дві дзеркальні поверхні на кінцях рубінового кристалу (одне повністю відбиваюче, інше – напівпрозоре) дозволяли фотонам багаторазово відбиватися, посилюючи процес генерації світла. Коли інтенсивність світла досягала певного рівня, частина випромінювання виходила через напівпрозоре дзеркало у вигляді вузького, інтенсивного червоного лазерного променя (довжина хвилі ~694 нм).

Основний принцип роботи лазера

Лазер працює за принципом, аналогічним принципів роботи мазера. Лазери використовуються: для зв'язку (лазерний промінь може переносити набагато більше інформації, ніж радіохвилі), різання, пропалювання отворів, зварювання, спостереження за супутниками, медичних і біологічних досліджень і в хірургії, як лазерна зброя (зокрема у ППО).

Фізичною основою роботи лазера служить квантовомеханічне явище вимушеного (індукованого) випромінювання. Випромінювання лазера може бути безперервним, з постійною потужністю, або імпульсним, що досягає гранично великих пікових потужностей. У деяких схемах робочий елемент лазера використовується як оптичний підсилювач для випромінювання від іншого джерела. Лазери можна поділити на велику кількість видів за речовиною, з якої складається їх робоче середовище, для якого використовують різні речовини всіх агрегатних станів. Деякі типи лазерів, наприклад лазери на розчинах барвників або поліхроматичні твердотільні лазери, можуть генерувати цілий набір частот (мод оптичного резонатора) в широкому спектральному діапазоні. Габарити лазерів різняться від мікроскопічних для ряду напівпровідникових лазерів до розмірів футбольного поля для деяких лазерів на неодимовому склі. Унікальні властивості випромінювання лазерів дозволили використовувати їх в різних галузях науки і техніки, а також в побуті, починаючи з читання та запису компакт-дисків і закінчуючи дослідженнями в галузі керованого термоядерного синтезу.

Приклади деяких основних формул теми

$E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda$ — Енергія фотона.

$\Delta E = E_2 - E_1 = (h \times c) / \lambda$ — Перехід між енергетичними рівнями (випромінювання/поглинання).

$\nu = c / \lambda$ — частота через довжину хвилі.

$\tau \sim 10^{-15} \text{с}$ — тривалість імпульсу.

$P_{\text{peak}} = E_{\text{imp}} / \tau$ — пікова потужність імпульсу.

$\Delta \nu \times \tau \geq 1 / 4\pi$ — спектральна ширина імпульсу (час-частотна невизначеність) або в термінах довжини хвилі: $\Delta \lambda \times \tau \geq (c \times \lambda^2) / c$.

$f = 1 / T$ — частота повторення імпульсів.

Застосування лазерів

Лазери широко використовуються в різних сферах науки, техніки, медицини та побуту.

Завдяки своїм унікальним властивостям – високій когерентності, монохроматичності, направленості та великій потужності – вони знайшли застосування в таких галузях:

- 1) Промисловість (лазерне різання та зварювання, гравіювання та маркування, 3D-друк та лазерна обробка матеріалів).
- 2) Медицина (лазерна хірургія, лазерна корекція зору, лазерна терапія, стоматологія).
- 3) Комунікації та інформаційні технології (оптоволоконний зв'язок, лазерна пам'ять і зчитування інформації, лазерні принтери).
- 4) Військова сфера та безпека (лазерна зброя, лазерні радары, протидія дронам).
- 5) Побутові пристрої (лазерні рівні, лазерні указки, косметологія).

Фемтосекундні лазери

Фемтосекундні лазери – це лазери з надкороткими імпульсами, які випромінюють світлові імпульси за фемтосекунди ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ секунд}$). Так зване імпульсне світло випромінює світло лише на мить. Час випромінювання світла від спалаху фотоапарата становить приблизно 1 мікросекунду, тому фемтосекундне ультракороткоімпульсне світло має лише близько однієї мільярдної частини свого часу для випромінювання світла. Як ми всі знаємо, світло рухається із незрівнянною швидкістю 300 000 кілометрів на секунду (обігаючи навколо Землі сім з половиною разів за одну секунду). Однак за одну фемтосекунду світло просувається лише на 0,3 мікрона. Зазвичай ми використовуємо фотографію зі спалахом, щоб зафіксувати миттєвий стан рухомих об'єктів. Подібним чином, якщо ви використовуєте фемтосекундний лазер для спалаху, можна побачити кожен фрагмент хімічної реакції, яка відбувається з шаленою швидкістю. Для цього можна використовувати фемтосекундні лазери для вивчення таємниць хімічних реакцій. Загальні хімічні реакції протікають після проходження проміжного стану з високою енергією, так званого «активованого стану». Існування активованого стану було теоретично передбачено хіміком Арреніусом ще в 1889 році, але оскільки воно існувало дуже короткий момент, його не можна було

безпосередньо спостерігати. Але його існування було прямо продемонстровано наприкінці 1980-х фемтосекундними лазерами, прикладом використання фемтосекундних лазерів для точного визначення хімічних реакцій. Наприклад, молекула циклопентанону в активованому стані розпадається на оксид вуглецю і 2 молекули етилену. На рисунку 1 зображено фемтосекундний лазер.

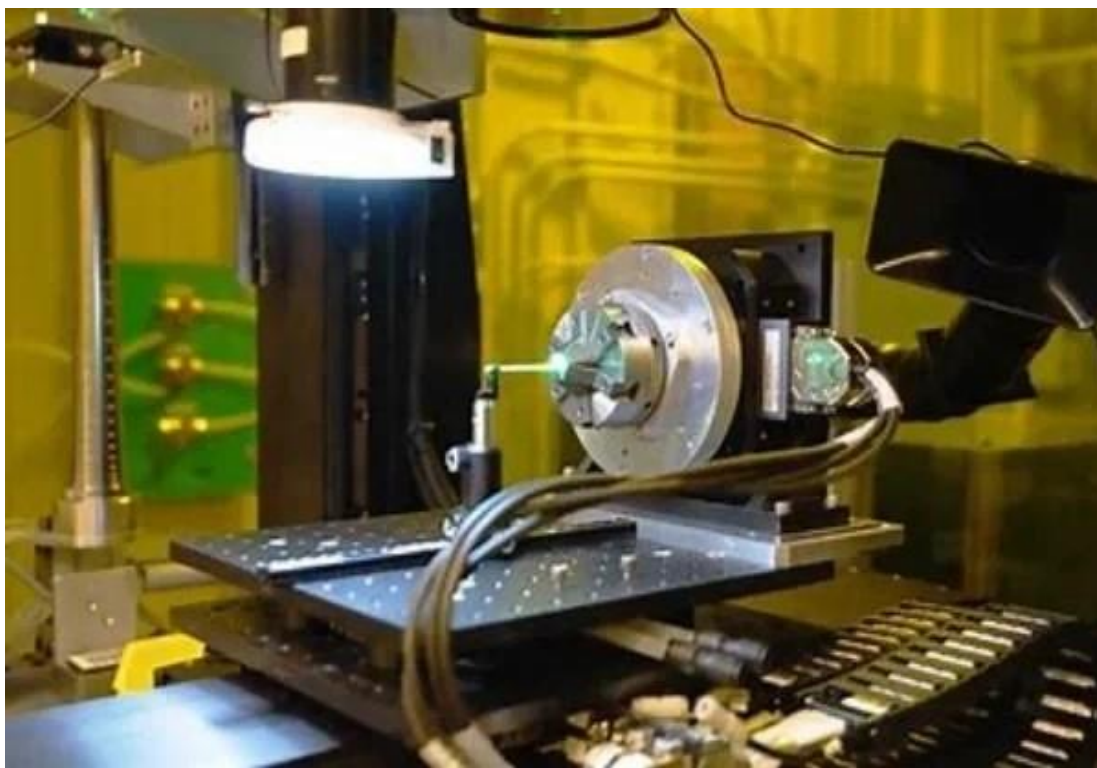


Рис. 1. Фемтосекундний лазер

Також ці лазери відомі своєю точністю, низьким термічним пошкодженням та високою піковою інтенсивністю, що робить їх ідеальними для мікрообробки, медичних операцій та наукових досліджень. Ще вони відносяться до лазерів з шириною імпульсу в фемтосекундному діапазоні, які є надшвидкими лазерами з точки зору роздільної здатності часу. На відміну від лазерів безперервної хвилі, оскільки цей тип лазера охоплює не лише лазерне світло однієї довжини хвилі, центральна довжина хвилі використовується для опису його частоти лазерного світла. Фемтосекундні імпульсні лазери зазвичай створюються за допомогою технології синхронізації мод, у якій найчастіше використовуваним середовищем підсилення є кристал титанового сапфіру з дуже широкою спектральною лінією, як, наприклад, лазери на титановому сапфірі.

Як згадувалося вище, у світі протягом фемтосекунд навіть світло застигає і не може рухатися дуже далеко, але навіть на цьому часовому масштабі атоми та молекули речовини та електрони всередині комп'ютерних мікросхем все ще рухаються в ланцюзі. Якщо ви використовуєте фемтосекундний імпульс, ви можете миттєво зупинити його та дослідити, що відбувається. Окрім спалаху для зупинки часу, фемтосекундні лазери також можуть свердлити мікроотвори в металі діаметром до 200 нанометрів (дві десятитисячні міліметра). Це означає, що ультракороткий імпульс світла, який стискається та замикається всередині за короткий проміжок часу, досягає неймовірного ефекту надвисокої потужності, не завдаючи додаткової шкоди оточенню. Крім того, імпульсне світло фемтосекундних лазерів може отримувати тривимірні зображення об'єктів із надзвичайно дрібними

деталлями. Стереоскопічна фотозйомка дуже корисна в медичній діагностиці, відкриваючи таким чином нову область досліджень під назвою оптична інтерференційна томографія. Це тривимірне зображення живої тканини та живих клітин, отримане за допомогою фемтосекундного лазера. Наприклад, дуже короткий імпульс світла спрямований на шкіру.

Висновок

Лазер — це один із найважливіших науково-технічних винаходів XX століття, що відкрив нові можливості для досліджень та практичного застосування, він є джерелом когерентного, монохроматичного і вузькоспрямованого електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, яке характеризується великою густиною енергії. Його розробка базується на принципі стимульованого випромінювання, передбаченому Альбертом Ейнштейном у 1917 році, а перший робочий лазер був створений Теодором Мейманом у 1960 році. Завдяки унікальним властивостям – монохроматичності, когерентності та низькій розбіжності променя – лазери знайшли широке застосування у медицині, промисловості, телекомунікаціях, науці, військовій сфері та побуті.

Фемтосекундні лазери – це лазери з надкороткими імпульсами, які випромінюють світлові імпульси за фемтосекунди ($1 \text{ фс} = 10^{-15}$ секунд). Вони є ідеальними для мікрообробки, медичних операцій та наукових досліджень. Ще вони відносяться до лазерів з шириною імпульсу в фемтосекундному діапазоні, які є надшвидкими лазерами з точки зору роздільної здатності часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Studfile.net "Властивості лазерного випромінювання. Потужність і яскравість" [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/9284228/page:13/>.
2. Кейс-урок "Фрактали та їх застосування" [Електронний ресурс]. URL: <https://vseosvita.ua/lesson/vyprominiuvannia-ta-pohlynannia-svitla-atomamy-atomni-i-molekuliarni-spektry-neperervnyi-spektr-svitla-618749.html>.
3. Vseosvita "Випромінювання та поглинання світла атомами. Атомні і молекулярні спектри. Неперервний спектр світла" [Електронний ресурс]. URL: https://vseosvita.ua/lesson/porivniannia-i-vyznachennia-moliuskiv-za-budovoju-mushli-61651.html?utm_source=chatgpt.com.
4. Naurok.com [Електронний ресурс]. URL: <https://naurok.com.ua/viprominyuvannya-ta-poglinannya-svitla-atomom-neperervniy-i-liniychatiy-spektri-spektralniy-analiz-lazer-166028.html>.
5. All-smt.com [Електронний ресурс]. URL: <https://www.all-smt.com/ukr/laser/femtosecond-laser/>
6. Loshield.com. URL: <https://ua.loshield.com/news/femtosecond-laser-applications-in-medicine-72409566.html>.
7. Meta-laser.com [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.meta-laser.com/news/ultrafast-lasers-principles-and-applications-73700165.html>.

<https://ua.meta-laser.com/news/ultrafast-lasers-principles-and-applications-73700165.html>

Топольський Олександр Олександрович — студент групи 2КН-246, факультет Комп'ютерні науки, Вінницький національний технічний університет, oleksandrtopolsky@gmail.com.

Педін Андрій Володимирович — студент групи 2 КН-24 б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, e-mail: pedinandriy@gmail.com.

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир** Валерійович — д.пед.н., доцент, професор кафедри фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, e-mail: gyravl6@gmail.com.

Topolsky Oleksandr Oleksandrovych— student of group 2KH-246, Faculty of Computer Science, Vinnytsia National Technical University, oleksandrtopolsky@gmail.com.

Pedin Andriy Volodymyrovych — student of group 4KN-24b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Vinnytsia, Khmelnytske shose, 95, e-mail: pedinandriy@gmail.com.

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych** — Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Khmelnytske Shosse, 95, e-mail: gyravl6@gmail.com.