

УДК 001.891:63(092)

В.Ф. Гамалій, проф., д-р ф.-м. наук, М.В. Якорєва, асист.

Кіровоградський національний технічний університет

ПЕРШІ КРОКИ РОЗВИТКУ ВИСОКОЧУТЛИВОЇ ОПТИЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ – ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАТОРНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

У статті представлено результати дослідження перших кроків (1970 р.) розвитку нового напрямлення високочутливої внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії. Доведено, що перші наукові праці належать співробітникам лауреата Нобелівської премії в області фізики (1964 р.), академіка СРСР М. Г. Басова.

спектроскопія, високочутлива внутрішньорезонаторна лазерна спектроскопія, резонатор лазера, концентраційна чутливість, наукова школа

Історія науки і техніки з великими труднощами проникає у громадянську історію. Природодослідник та історик науки В. І. Вернадський писав, що наукове вивчення минулого, у тому числі і наукові думки, завжди приводить до введення в людську свідомість нового, виступає знаряддям його дослідження.

Спектроскопія – розділ фізики, який вивчає спектри електромагнітного випромінювання і її складова – спектральний аналіз – фізичні методи якісного та кількісного визначення складу речовин. Спектральний аналіз визначає складові сполук за допомогою інтенсивностей ліній або смуг у спектрах в залежності від джерела випромінювання може бути і лазерною спектроскопією.

Лазер – джерело монохроматичного когерентного світла з високою

спрямованістю світлової хвилі. Це слово створено з початкових букв фрази англійською мовою, що дослівно означає в перекладі «посилення світла за допомогою примусового випромінювання». Незважаючи на порівняно просту будову лазера, процеси, покладені в основу його роботи, надзвичайно складні й не піддаються поясненню з точки зору класичної фізики.

У 1939 р. вчений В.О. Фабрикант повернувся до введеного А. Ейнштейном у фізику (у 1917 р.) поняття примусового випромінювання. Його дослідження заклали міцний фундамент для створення лазера, проте лише у 1950-ті рр. він був створений завдяки працям радянських вчених О. М. Прохорова, М. Г. Басова і американського вченого Ч. Таунса. У 1964 р. вони стали лауреатами Нобелівської премії за фундаментальні дослідження в галузі квантової електроніки, що привело до створення мазерів і лазерів [1].

Фізичні основи квантової електроніки були закладені А. Ейнштейном задовго до її створення. Першу його роботу надруковано в 1905 р., присвячено квантовій теорії світла.

В цій роботі гіпотезу світлових квантів використано для аналізу фотоефекту і фотофлуоресценції. Відомо, що існує «червона» межа фотоефекту, яка не залежить від інтенсивності світла. Саме квантовий характер світла добре пояснює «червону» межу. Здавалося б: таке пояснення могло легко прийти в голову, бо ще І. Ньютон висунув гіпотезу про корпускулярний характер світла. Але тоді перемогла хвильова гіпотеза світла. Після гігантських успіхів хвильової теорії світла (багато оптичних приладів широко використовували інтерференцію та дифракцію світла, а рівняння Дж. Максвелла повністю пояснювали всі явища поширення світла в різних середовищах) повернення до квантової гіпотези світла здавалось неможливим. Разом із тим хвильова теорія світла не могла пояснити такий фундаментальний факт, як спектральний розподіл світлового випромінювання абсолютно чорного тіла. Це ввійшло до історії

фізики як ультрафіолетова катастрофа. Справа в тому, що згідно з хвильовою теорією світла, інтенсивність випромінювання в короткохвильовій області спектра не спадає, а зростає. Це знаходиться в повному протиріччі з експериментальним фактом.

Друга робота А. Ейнштейна (надрукована в 1916 р.) присвячена виведенню формули Планка. В цій роботі вперше введено поняття індукованого випромінювання збуджених атомів під впливом зовнішнього поля. Це поняття є фундаментом квантової електроніки. Ймовірність індукованого випромінювання пропорційна густині падаючого на квантову частинку (атом, молекулу) випромінювання. При цьому частота випромінювання квантової частинки рівна частоті падаючого на неї кванта; просторові направленості, поляризації збуджувального і випромінювального квантів також збігаються, тобто ці кванти тотожні.

Таким чином, якщо на систему збуджених частинок діє випромінювання, то після проходження світла через цю систему інтенсивність світла зростає, тобто має місце підсилення світла. Для підсилення світла необхідно, щоб у верхньому стані знаходилась достатня кількість квантових частинок, а для генерації – щоб частинок у верхньому стані було більше, ніж у нижньому з урахуванням виродження.

Гіпотеза А. Ейнштейна про вимушене випромінювання викликала велику зацікавленість, і, природно, фізики стали шукати експериментальну перевірку цього явища. На той час була розвинена тільки оптична спектроскопія, але для оптичних переходів верхні рівні практично не були заселені, отже, індуковане випромінювання ніякої ролі не відіграло. Тому необхідно було створити такі умови, щоб населеність верхніх рівнів стала значною і перевищувала число частинок у нижньому стані. В цьому випадку мало місце підсилення світла або зміна знаку кривої дисперсії показника заломлення, що значно простіше реалізувати. Саме таку спробу

було зроблено в газовому розряді (А. Ладенбург і Е. Конферман, 1928 р.). Для того часу, напевно, це була єдина можливість виконати експеримент подібного роду. Розвиток квантової електроніки показав, що така ситуація дійсно може виникнути в газовому розряді при визначених умовах і для певних атомних переходів.

За наявності підсилювального елемента, зворотного позитивного зв'язку і резонатора система здатна генерувати монохроматичні коливання. Все це сприяло створенню квантового генератора, де і використовується ефект індукованого випромінювання.

При створенні лазерів необхідно здолати деякі труднощі. Одні з них полягають в тому, що тоді не було вирішено проблему резонатора. До того ж, вона існувала і для класичних генераторів радіодіапазону. Для розуміння складності цієї проблеми, необхідно повернутись до історії розвитку генераторів радіодіапазону. Спочатку було освоєно довгохвильовий радіодіапазон, де як резонансні системи використовувались коливальні контури, які складаються з індуктивності та ємності.

Другою важливою проблемою є отримання інверсної заселеності. В 1955 р. М. Г. Басов і О. М. Прохоров запропонували метод отримання інверсної заселеності у трирівневій схемі під впливом зовнішнього джерела накачування. Суттєвий вклад у розвиток цього методу зробив Н. Бломберген у 1956 р. Це дозволило створити в 1957–1958 рр. квантові підсилювачі НВЧ на парамагнітних кристалах; підсилювачі мали надзвичайно малі шуми. Ця ж ідея зробила важливий вклад у появу лазерів. Перший лазер, створений Н. Т. Мейманом у 1960 р., працював за трирівневою схемою (рубін). При його створенні були використані відкриті резонатори, а для накачування – імпульсна оптична лампа.

Після створення першого лазера почався бурхливий розвиток лазерної техніки. Було розроблено інші методи одержання інверсної

заселеності, а відкриті резонатори отримали подальший розвиток.

18 червня 1951 р. було подано заявку на авторське свідоцтво №576749 (0-274)26, але надрукували її в 1959 р. (автори В. А. Фабрикант, М. М. Вудинський, Ф. А. Бутаєва). У графі «Предмет изобретения» значилось: «Спосіб підсилення електромагнітних випромінювань (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного і радіодіапазону хвиль), який відрізняється тим, що випромінювання, яке підсилюється, пропускають через середовище, в якому допоміжним випромінюванням або іншим шляхом створюють надлишкову порівняно з рівноважною концентрацій атомів, інших частинок або систем на верхніх енергетичних рівнях, які відповідають збудженим атомам». У 1964 р. ці автори отримали диплом на відкриття. Нині ці ідеї матеріалізувались у прилади, установки, комплекси.

Починаючи з 1949 р. у Фізичному інституті АН СРСР (м. Москва) (ФІАН) під керівництвом О. М. Прохорова і М. Г. Басова було розгорнуто роботи із вивчення радіоспектроскопічних методів тонкої і надтонкої структури молекулярних спектрів. Удосконалення методик досліджень привели М. Г. Басова і С. М. Прохорова в 1952 р. до створення аміачного лазера.

У 1954 р. В. Гордон, Дж. Цайгер і Ч. Таунс (Колумбійський університет) надрукували перше повідомлення про діючий молекулярний генератор аміаку. Теорію явища вперше було розроблено М. Г. Басовим і О. М. Прохоровим.

Створення лазерів відстало від мазерів на 5–6 років. У Стокгольмі, в лекції, з нагоди вручення Нобелівської премії, О. М. Прохоров пояснив це відставання великим захопленням мазерами, відсутністю пропозицій про конструкцію резонатора в оптичному діапазоні та відсутністю системи та методів отримання інверсії.

В червні 1958 р. О. М. Прохоров пропонує використати як резонатор інтерферометр Фабрі-Перо (відкритий резонатор).

Властивості активних тіл і резонатора мають вирішальний вплив на характеристики випромінювання. Цей аспект квантової електроніки широко і всебічно вивчався вченими України, де дослідження були розпочаті в 1961 р. в Інституті фізики АН України (М. С. Бродін, В. Л. Броуде, М. С. Соскін) [2].

Метод внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії (ВРЛС) базується на використанні активних середовищ, які дозволяють з високою точністю підтримувати сталим коефіцієнт посилення біля досліджуваної лінії поглинання (підсилення). Гранична теоретична чутливість методу, що досягається в безперервному режимі генерації, визначається відношенням потужності спонтанного і індукованого випромінювання в одному поздовжньому типі коливань.

Запропоновано та апробовано метод у Фізичному інституті ім. П. М. Лебедева АН СРСР (м. Москва) (ФІАН), де в подальшому були вивчені головні його особливості, залежність чутливості від параметрів резонатора, положення і розмірів активного середовища просторового розподілу поля і інверсії, обґрунтована можливість отримання кількісної інформації про коефіцієнти поглинання за ВРЛ-спектрах. Досліджено ефект «пам'яті» спектральним розподілом випромінювання лазера короткощомендагх селективних втрат. У ФІАН також було запропоновано основні підходи до вивчення фізичних явищ у газах методом ВРЛС.

Роботи Інституту фізики АН Білорусі (м. Мінськ) були спрямовані насамперед на використання методу ВРЛС для аналізу плазми та вивчення спектрів атомів. Разом з тим велика увага приділялась залежності чутливості ВР-спектрометрів від параметрів лазера і системи реєстрації.

В Інституті спектроскопії АН СРСР (м. Троїцьк) проведений цикл досліджень внутрірезонаторних лазерних спектрометрів на базі безперервно діючого лазера на барвнику, впливу багатомодового випромінювання, просторової неоднорідності інверсії і насичення поглинання на чутливість спектрометрів.

Основні дослідження в Інституті оптики атмосфери СО АН СРСР (м. Новосибірськ) були спрямовані на розробку лазерів з частотно-залежним контуром підсилення активного середовища, вивчення залежності чутливості спектрометрів від параметрів лазера і системи реєстрації, створення методів вилучення кількісної інформації з ВРЛ-спектрів. У всіх перерахованих центрах, особливо в ФІАН СРСР і ІОА СО АН СРСР, проведено велику кількість вимірювання спектрів поглинання атмосферних та забруднюючих атмосферу газів, в Інституті хімічної фізики (ІХФ АН СРСР) спектри радикалів використовувались для дослідження кінетики газофазних реакцій.

Розвиток квантової електроніки і, зокрема, вдосконалення методів управління спектральними характеристиками випромінювання лазерів виявило наявність великої залежності спектру випромінювання від селективних втрат в резонаторі. Це неодноразово використовувалося для забезпечення вузького (одномодового) випромінювання в моноімпульсних лазерах. Принципова можливість розв'язання оберненої задачі – визначення малих частотнозалежних втрат в резонаторі по спектру генерації лазера – була теоретично і експериментально показана радянськими вченими А. Ф. Сучковим і Е. О. Свіріденковим в 1970 р. Таким чином, цей рік можна вважати роком народження нового високочутливого методу – методу внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії (ВРЛС). Фундатори наукової школи надчутливого спектрального аналізу А. Ф. Сучков і Е. О. Свіріденков працювали старшими науковими співробітниками у Фізичному інституті АН СРСР (м. Москва). Директором ФІАН був Лауреат Нобелівської премії академік М. Басов.

У «класичному» широкосмуговому варіанті методу ВРЛС досліджувану речовину, яка має вузькі лінії поглинання (ЛП), розміщують в резонаторі широкосмугового лазера, тобто такого квантового генератора,

«добротність» резонатора якого не залежить від довжини хвилі генерації в області частот селективного поглинання. Наявність додаткових (внесених) частотно-залежних втрат призводить до утворення провалів в спектрі генерації: лазера, які реєструється, як правило, звичайною спектральною апаратурою.

В повітрі можна реєструвати речовину, кількість якої в мільйон мільярдів раз менше концентрації оточуючих газів. Згідно із сучасними уявленнями висока чутливість методу ВРЛС обумовлена багаторазовим проходженням випромінювання по резонатору (і тим самим через досліджуване середовище) протягом генерації.

У роботі [4] експериментально і теоретично досліджуються можливості збільшення чутливості методу внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії (ВРЛС). Причинами, що обмежують чутливість, є селектуючі властивості резонатора, обмеженість часу безперервної генерації в області досліджуваної лінії, спонтанне випромінювання активного середовища, просторова неоднорідність вигорання інверсії активного середовища. Селектуючі властивості резонатора поліпшуються з його спрощенням і зменшенням поверхонь всередині резонатора. Оптимальним є резонатор з однією поверхнею, яка відділяє досліджуване середовище від активного. На відміну від більшості робіт, присвячених методу ВРЛС, показано, що вплив просторових неоднорідностей вигорання інверсії в реальних лазерах дуже малий у порівнянні з впливом спонтанного випромінювання.

Джерела та література

1. Бесов Л. М. Наука і техніка в історії суспільства: Навч. посіб./ Л. М. Бесов.– Х.: Золоті сторінки, 2011. – 464с.

2. Григоруk В. І. Лазерна фізика / В. І. Григоруk, П. А. Коротков, А. І. Хижняк. – К.: «МП Леся», 1999. – 528 с.
3. Лук'яненко С. Ф. Внутриврезонаторная лазерная спектроскопия. Основы метода и применения / С. Ф. Лукьяненко, М. М. Макогон, Л. Н. Синицин.– Новосибирск: Наука, 1985. – С. 15.
4. Баев В. М. Внутриврезонаторная спектроскопия с использованием лазеров непрерывного и квазинепрерывного действия / В. М. Баев, Т. П. Беликова, Э. А. Свириденков, А. Ф. Сучков // Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ).–Т. 74, 1978. – С. 43 – 56.

В. Гамалий, М. Якорева

Первые шаги развития высокочувствительной оптической спектроскопии – внутрирезонаторной лазерной спектроскопии

В статье представлены результаты исследования первых шагов (1970 г.) развития нового направления высокочувствительной внутриврезонаторной лазерной спектроскопии. Доказано, что первые научные работы принадлежат сотрудникам лауреата Нобелевской премии в области физики (1964 г.), академика СССР М. Г. Басова.

спектроскопия, высокочувствительная внутриврезонаторная лазерная спектроскопия, резонатор лазера, концентрационная чувствительность, научная школа

V. Gamaliy, M. Yakoreva

The first steps of development of highly sensitive optical spectroscopy – intracavity laser spectroscopy

The paper presents the results of the first steps (1970r.) developing a new direction of the highly sensitive intracavity laser spectroscopy. It is proved that the first scientific works developed employees Nobel Prize in Physics (1964), academician of the USSR M. Basov.

spectroscopy, sensitive intracavity laser spectroscopy, laser resonator, concentration sensitivity, the scientific school