

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

ГАМАЛІЙ Володимир Федорович

АМпліТУДНА МОДУЛЯЦІЙНА
ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАТОРНА ЛАЗЕРНА
СПЕКТРОСКОПІЯ

Спеціальність 01.04.03 - радіофізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1996



Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі квантової радіофізики радіофізичного факультету Київського університету ім. Тараса Шевченка та у відділі квантової електроніки Наукового та інженерно-технологічного центру "Сонар" Національної Академії Наук України.

Науковий консультант доктор фізико-математичних наук,
професор Данилов Вадим Васильович.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Коротков Павло Андрійович
доктор фізико-математичних наук
Павлик Борис Дмитрович
доктор фізико-математичних наук
Тесьолкін Володимир Вітамінінович

Провідна організація: Харківський державний університет

Захист дисертації відбудеться "21" 04 1997 року
о 15.00 на засіданні спеціалізованої ради Д 01.01.17 при
Київському університеті ім. Тараса Шевченка (252127, м. Київ,
пр. Академіка Глушкова, 6, радіофізичний факультет, ауд. № 46.)

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці
Київського університету ім. Тараса Шевченка (м. Київ, вул.
Володимирська, 62).

Автореферат розісланий "19" 03 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат фіз.-мат. наук,
доцент

Шкавро А.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Біля тридцяти років тому було створено перший лазер. Досягнуті блискучі успіхи у розумінні фізичних процесів, які відбуваються в лазерах. Створені нові напрями дослідження властивостей речовин і керування фізико-хімічними параметрами різних середовищ. Розроблені методи лінійної та нелінійної лазерної спектроскопії: нелінійна спектроскопія надвисокого розділення /вільна від доплеровського розширення спектральних ліній/, спектроскопія гігантського комбінаційного розсіяння, спектроскопія когерентного антистоксового розсіяння, лазерна атомно-флуоресцентна спектроскопія, лазерна фотоіонізаційна спектроскопія, лазерна десорбційна мас-спектроскопія та інші.

В наш час важливим методом залишається класичний метод спектрального аналізу - спектроскопія поглинання.

В процесі вивчення фізики лазерів суттєві зміни відбулися і в методі спектроскопії поглинання. Був розроблений та застосований для вирішення багатьох проблем метод високочутливого спектрального абсорбційного аналізу - внутрішньорезонаторна лазерна спектроскопія /ВРЛС/ [1, 2]. Основна ідея методу - розміщення досліджуваної речовини всередині резонатора широкопсмугового лазера з великою однорідною шириною контуру підсилення, причому, з шириною значно більшою за ширину лінії поглинання. В тих повздовжніх модах, частоти яких співпадають з лініями поглинання досліджуваної речовини, інтенсивність генерації поступово згасає. При цьому в спектрі генерації з'являються провали, які повторюють спектр поглинання досліджуваної речовини.

Важливими методами керування спектральним складом випромінювання в радіофізиці є різні типи модуляції /амплітудна, фазова та ін./. Використання модуляційної техніки шляхом модуляції якогось-небудь параметру /зовнішнього електричного поля, довжини хвилі, тиску, температури та ін./ при вивченні оптичних спектрів твердих тіл, дозволяє на декілька порядків збільшити чутливість і точність вимірів у порівнянні із звичайними методами [3].

Особливо цікавими для експериментальної спектроскопії є методи, які дозволяють збільшити чутливість і точність вимірів, а також якісно змінити методику кількісних вимірювань.

ДЛЯ ВЛ. В. СТОРЖИКА
АН Укр. АН

Таким чином, без-умовно цікавим і важливим є синтез високочутливих методів спектрального аналізу - внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії і модуляційної спектроскопії та вивчення впливу модуляції внутрішньорезонаторних параметрів широкосмугового лазера досліджуваню речовиню всередині резонатора на спектр його генерації, а також встановлення зв'язку між спектральним розподілом випромінювання і спектроскопічними характеристиками досліджуваної речовини.

Для проведення таких досліджень необхідно розробити новий метод - амплітудну модуляційну внутрішньорезонаторну лазерну спектроскопії. Встановлені закономірності дозволять розробити нові методики реєстрації та дослідження ефектів аномального збільшення спектральної інтенсивності генерації широкосмугового лазера в крилах ліній поглинання, нелінійних процесів двофотонного поглинання, процесів вимушеного комбінаційного розсіяння рідких домішок малої концентрації, а також методики кількісних вимірювань спектроскопічних характеристик речовин /перерізів поглинання, перерізів розсіяння, сил осциляторів/.

Таким чином, актуальність теми полягає в тому, що розробляються нові шляхи розвитку високочутливого методу спектрального аналізу - амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії.

Мета роботи:

1. Дослідження спектрів генерації імпульсного широкосмугового лазера на розчині органічного барвника з досліджуваню речовиню всередині резонатора при амплітудній модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища, коефіцієнта поглинання та нелінійного підсилення досліджуваню середовища.
2. Розробка метода амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії та методик вимірювання спектроскопічних констант досліджуваної речовини.

В процесі досліджень за темю роботи вирішувались такі задачі:

1. Розробка систем і методів амплітудної модуляції параметрів широкосмугових лазерів з поглиначем всередині резонатора та реєстрації спектрів їх генерації.

2. Визначення методів та способів проведення відносних та абсолютних кількісних вимірювань.
3. Визначення перерізів одно- та двофотонного поглинання атомарних речовин, перерізів комбінаційного розсіяння, сил осциляторів електронних переходів в атомах та інших спектроскопічних характеристик речовин в різних агрегатних станах.

Вирішення цих проблем і складає основний зміст дисертації.

Наукова новизна роботи.

У сукупності досліджень, представлених в дисертації:

1. Вперше систематично досліджено вплив амплітудної модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища імпульсного лазера на розчині органічного барвника при наявності у резонаторі речовини з вузькими сильними лініями поглинання на спектр генерації ширококутового лазера.
2. Запропоновано механізм виникнення зміни форми сильної лінії поглинання /ефект спектральної "конденсації"/ в спектрі випромінювання ширококутового лазера за умовами часової модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища, в основі якого лежить явище часткової синхронізації групи мод в крилах ліній поглинання, спектральна відстань між якими співпадає з частотою зовнішньої модуляції.
3. Створено новий метод вимірювання перерізів поглинання та сил осциляторів електронних переходів, в основі якого лежить вимірювання спектральної відстані між піками конденсації в крилах досліджуваної лінії поглинання речовини, що розміщена всередині резонатора багатомодового лазера.
4. Досліджено вплив амплітудної модуляції потужним вузькосмуговим лазером внутрішньорезонаторного поля ширококутового лазера з досліджуваною атомарною речовиною всередині резонатора. Одержано спектр двофотонного поглинання в атомарному каліві електронних переходів $4^2S_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$, $4^2D_{3/2}$ і $4^2D_{5/2}$.
5. Запропоновано новий спосіб вимірювання сил осциляторів дипольних ^{перерізів} збудженими електронними рівнями атома, в основі якого лежить реєстрація внутрішньорезонаторним методом ліній двофотонного поглинання та вимірювання повного поглинання в лініях. Експериментально визначені відносні /з точністю 10 %/ та абсолютні вели-

чини /з точністю 40 %/ сил осциляторів електродипольних переходів у атомарному калії $4^2P_{3/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$, $4^2P_{1/2} \rightarrow 4^2D_{3/2}$ і $4^2P_{3/2} \rightarrow 4^2D_{5/2}$.

6. Досліджено вплив подвійної модуляції - коефіцієнта підсилення активного середовища та коефіцієнта нелінійного поглинання - на спектр генерації багатомодового лазера з сильним вузькосмуговим поглиначем всередині резонатора. Вперше зареєстровано ефект спектральної конденсації в крилі лінії двофотонного переходу в атомарному калії

$6^2S_{1/2}$.

$4^2S_{1/2} \leftarrow$

7. Запропоновано методику ресстрації малих концентрацій домішок / біля $10^{-3}M/l$ / у рідинах, які знаходяться всередині резонатора широкосмугового лазера, по спектрам вимушеного комбінаційного розсіяння.

Практична цінність та значення роботи.

Виконані в роботі дослідження, результати і висновки сприяють розширенню уявлень про методи внутрішньорезонаторної спектроскопії, про мехі зміни параметрів широкосмугового лазера, які впливають на спектр його генерації. Встановлені закономірності мають загальний характер. Запропоновано два нових методи вимірювання перерізів поглинання та сил осциляторів електродипольних переходів, які можуть бути використані в наукових організаціях.

Достовірність отриманих результатів обумовлена використанням сучасних методик спектральних досліджень, відтворенням результатів експерименту, відповідністю отриманих експериментально значень фізичних величин з результатами робіт інших авторів. Про достовірність результатів, викладених в дисертації, та обґрунтованість зроблених висновків свідчать також підсумки їх обговорення на семінарах і конференціях різного рівня.

Висновок, що виносяться на захист.

I. Механізм виникнення ефекту аномального збільшення спектральної інтенсивності генерації широкосмугового лазера в крилах сильних ліній поглинання на спектральних відстанях біля десятків доплерівських ширин від центрів при розміщенні досліджуваної газо -

подібної речовини всередині резонатора та амплітудної модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища, в основі якого лежить явище активної синхронізації групи мод, спектральна відстань між якими співпадає з частотою модуляції.

2. Новий метод вимірювання перерізів поглинання і сил осциляторів електронних переходів внутрішньорезонаторного газоподібного досліджуваного середовища, в основі якого лежить цілеспрямоване створення ефекту спектрального збільшення інтенсивності генерації ширококутового лазера в крилах ліній поглинання та вимірювання спектрального положення піків інтенсивності. Результати вимірювань.

3. Ефекти двофотонного поглинання газоподібної досліджуваної речовини при амплітудній модуляції нелінійного коефіцієнта поглинання зовнішнім вузькосмуговим потужним випромінюванням, коли для підвищення чутливості речовина розміщується всередині резонатора ширококутового лазера.

4. Новий метод вимірювання сил осциляторів дипольних переходів між збудженими електронними рівнями атома, який заснований на вимірюванні величини двофотонного поглинання з основного рівня атома. Результати вимірювань.

5. Принципи дослідження за допомогою методу амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії рідкофазних середовищ, які знаходяться всередині резонатора ширококутового лазера.

6. Методика реєстрації та кількісних вимірювань малих концентрацій рідких домішок за ефектом вимушеного комбінаційного розсіяння /ВКР/, коли для збільшення чутливості досліджувана речовина розміщується всередині резонатора ширококутового лазера та її нелінійний коефіцієнт підсилення модулюється зовнішнім вузькосмуговим потужним випромінюванням.

7. Ефекти спектральної концентрації випромінювання ширококутового лазера біля ліній двофотонного внутрішньорезонаторного газоподібного поглинача, коли одночасно модулюється коефіцієнт підсилення активного середовища та нелінійного двофотонного поглинання середовища.

В дисертації сформульовані та обґрунтовані наукові положення і висновки, сукупність яких складає експериментальну і теоретичну

базу для розвитку перспективного напрямку лазерної спектроскопії - методу амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії / АМВЛС /.

Апробація роботи.

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на наступних конференціях, нарадах та семінарах:

XII Всесоюзній конференції з когерентної і нелінійної оптики /Москва-1985/; XI Всесоюзному з'їзді з спектроскопії /Київ-1988/; I-я Всесоюзній нараді "Нелінійні та когерентні ефекти в методі ВРЛС" /Кіровоград-1988/; 2-я Всесоюзній нараді з нелінійних та когерентних ефектів у ВРЛС /Ленінград-1991/; XIV Міжнародній конференції з когерентної і нелінійної оптики /Ленінград-1991/; Міжнародній Пульківській науковій конференції /Львів-1995/; науковій конференції радіофізичного факультету Київського університету ім. Тараса Шевченка /Київ-1995/; засіданнях кафедри квантової радіофізики Київського університету ім. Тараса Шевченка /1993, 1994, 1995, 1996/; семінарах відділу квантової електроніки НІТЦ "Сонар" НАН України /Київ-1993, 1994, 1995, 1996/; науково-практичній конференції педагогічного інституту ім. В.К. Винниченка /Кіровоград-1995/; XXII European Conference on Molecular Spectroscopy (EUCMOS XXII, Essen, Germany - 1995); XXIII European Congress on Molecular Spectroscopy (Hungary, 1966).

Публікації.

Основні результати дисертації опубліковані у 21-й роботі, включаючи три авторських свідчення. Список основних робіт наведений в кінці автореферату.

Особистий внесок автора дисертації полягає в тому, що основні наукові результати одержані ним безпосередньо або з його активної участю, як на етапах постановки задач, розробці експериментальних методик і проведенні експериментальних та теоретичних досліджень, так і на етапах обробки та інтерпретації результатів, написанні статей.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та списку цитованої літератури. Об'єм роботи 260 сторінок. В роботі 51 малюнок та 2 таблиці. Список літератури включає 232 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, сформульовано мету, основні положення, що виносяться на захист, обгрунтовано новизну, наукове та практичне значення роботи, наведено короткий зміст роботи.

В першому розділі "Амплітудна модуляція коефіцієнта підсилення ширококугового лазера з внутрішньорезонаторним поглиначем" розроблені основи нового методу спектроскопії - амплітудна модуляційна внутрішньорезонаторна лазерна спектроскопія /АМВЛС/. Досліджено його різновид: часова модуляція коефіцієнта підсилення активного середовища ширококугового лазера з внутрішньорезонаторним досліджуванним газоподібним поглиначем з сильними лініями поглинання.

Метод АМВЛС є логічним продовженням методу внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії /ВРЛС/, тому в розділі викладені фізичні основи методу ВРЛС. В основі цього методу лежить висока чутливість спектра генерації ширококугового лазера до частотно-залежних втрат в його резонаторі, коли спектральна ширина ліній поглинання досліджуваної речовини значно менше ніж однорідна ширина контуру коефіцієнта підсилення активного середовища. При виконанні зазначених умов в спектрі генерації ширококугового лазера на частотах, співпадаючих з лініями поглинання досліджуваного середовища, інтенсивність генерації поступово спадає. При цьому в спектрі генерації з'являються провали, які повторюють спектр поглинання досліджуваної речовини. Мінімальний коефіцієнт поглинання K_{min} , що реєструється, зв'язаний з тривалістю t неперервної генерації поблизу досліджуваної лінії і визначається співвідношенням $K_{min} = L_p / (L_{погл} \cdot C \cdot t)$, де L_p - довжина резонатора, $L_{погл}$ - товщина поглинаючого шару всередині резонатора, C - швидкість світла. Теоретичні оцінки дають для коефіцієнтів поглинання, які можна реєструвати, величину приблизно 10^{-12} см^{-1} . Метод ВРЛС має високу чутливість до коефіцієнта поглинання, а також гранично високу швидкість.

Спектральну інтенсивність генерації ширококугового лазера можна представити у вигляді

$$J(\omega, t) = J_0(\omega, t) \cdot e^{-K_n(\omega) \cdot L \cdot t} \quad (I)$$

де $J_0(\omega t)$ - спектральна інтенсивність генерації лазера при відсутності поглинаючої речовини всередині резонатора, $K_n(\omega)$ - коефіцієнт поглинання на частоті ω .

У випадку застосування лінійного фотоприймача спостерігаємо величину ϵ інтеграл спектральної інтенсивності за тривалість імпульсу

$$H(\omega) = \int_0^{T_{\text{імпульс}}} Y(\omega, t) dt \quad (2)$$

Якщо припустити, що за період дії імпульсу не залежить від часу, тоді

$$H(\omega) = H_0(\omega) \frac{1 - e^{-K_n(\omega) \cdot \epsilon \cdot T_{\text{імпульс}}}}{K_n(\omega) \cdot \epsilon \cdot T_{\text{імпульс}}} \quad (3)$$

Після експериментального вимірювання експозиції H , можна визначити коефіцієнт поглинання в центрі лінії $K_n(\omega_0)$.

Зроблено огляд робіт, в яких повідомлено про різні застосування методу.

Експериментально в неселективному резонаторі за допомогою методу ВРІС одержано спектр поглинання атмосферного повітря в межах 0,9 - 0,98 мкм / активне середовище - луно-галюїдний кристал LiF з F_2^+ - центрами забарвлення / . Чутливість визначалась тривалістю імпульсів накачки $T_{\text{імпульс}} = 1 \mu\text{с}$ / і складала $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$. В цій же спектральній області отримані спектри поглинання C_2H_2 , CH_3OH , CH_4 . Особливо підкреслюється, що методика не змінювала контурів слабких ліній поглинання. Вони залишались симетричними відносно центрів ліній поглинання.

В науковій літературі деякі автори повідомляють про спостереження ефекту значної зміни / деформації / контурів сильних ліній поглинання внутрішньорезонаторних досліджуваних середовищ, і, навіть, появи в ряді експериментів аномального збільшення спектральної інтенсивності генерації широкопального лазера в крилах сильних ліній поглинання / так званого ефекту спектральної конденсації випромінювання широкопального лазера до лінії поглинання /.

Для пояснення ефекту були запропоновані різні механізми: появлення дисперсійної лінзи як наслідок насичення поглинання на вісі гаусового пучка, когерентні ефекти поляризації поглинаючих атомів, утворення решітки поглинання як наслідок насичення, зменшення дифракційних втрат всередині резонатора під впливом лінзо-

подібних властивостей поглинаючого середовища, лінійподібність внутрішньорезонаторного середовища та інші.

Вивчаючи роботи багатьох авторів з цієї проблеми, можна виділити основні загальні риси ефекту: 1/. Конденсація випромінювання з'являється тільки поблизу сильних ліній поглинання, причому, збільшенні густини поглинаючих атомів вище деякої визначеної величини; 2/. Інтенсивність лінії конденсації залежить від перевищення інтенсивності накачки над порогом; 3/. Спектральна відстань між центрами лінії конденсації та центрами ліній поглинання в десятки разів перевищує доплерівську спектральну ширину лінії поглинання; 4/. При підвищенні тиску буферного газу, який розширює контур лінії поглинання, інтенсивність в лінії конденсації зменшується, і при підвищенні тиску до деякого значення ефект повністю зникає; 5/. Сильне поєздовжнє магнітне поле зменшує інтенсивність лінії конденсації.

В дисертаційній роботі запропоновано механізм, який може приводити до появи ефекту спектральної конденсації.

При математичному описі фізичної моделі був розглянутий випадок кільцевого однонаправленого резонатора з тонким активним середовищем, яке зосереджено в одному місці. Координата Z відраховується від тонкого активного середовища у напрямку розповсюдження випромінювання. Поле випромінювання всередині резонатора можна вважати плоскою хвилею $E(t, z)$. Взаємодія випромінювання з тонким активним середовищем можна описати коефіцієнтом підсилення $A(t)$ інтенсивності за один прохід

$$E(t, 0) \cdot E^*(t, 0) = A(t) \cdot E(t, L) \cdot E^*(t, L) \quad (4)$$

Якщо ввести коефіцієнт підсилення інтенсивності $a(t) = \sqrt{A(t)}$, то

$$E(t, 0) = a(t) \cdot E(t, L) \quad (5)$$

Вважалось, що часова залежність $a(t)$ обумовлена періодичною модуляцією накачки активного середовища з періодом $2\pi/\Omega$

$$a(t) = \sum_n a_n \cdot \exp(-in\Omega t), \quad a_n = a_n^* \quad (6)$$

Поле випромінювання розкладали по поєздовжнім модам резонатора

$$E(t, z) = \sum_q \xi_q(t, z) \cdot \exp[i(\kappa_q z - \omega_q t)] \quad (7)$$

де q - номер поєздовжньої моди, κ_q і ω_q - її хвильовий вектор і

частота, $E_q(t)$ - повільно змінювані комплексні амплітуди окремих мод випромінювання. Вважалось, що досліджувана речовина, яка має закон дисперсії $K(\omega) = \text{Re} K(\omega) + i \text{Im} K(\omega)$ рівномірно заповнює весь резонатор.

В межах запропонованої моделі можливо отримати рівняння руху для повільних комплексних амплітуд

$$\frac{\partial E_q(t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial K(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_q} \right)^{-1} \left\{ \left(\frac{q_0 - 1}{L} - \text{Im} K_q \right) \cdot E_q(t) + \sum_{n \neq 0} \frac{a_n}{L} \cdot E_{q-n}(t) \cdot \exp[i(\omega_q - \omega_{q-n} - n\Omega)t] \right\}, \quad (8)$$

де L - довжина резонатора. Модуляцію вважали синусоїдальною.

Якісно ефект спектральної конденсації можна описати таким чином. При наявності всередині резонатора поглинаючої речовини, яка створює дисперсію, міжмодова відстань $\Delta\omega$ в різних частинах спектра генерації відрізняється. Може виявитись, що існує така область, в якій міжмодова відстань наближається до частоти зовнішньої модуляції Ω . Якщо ця область містить достатньо велике число мод, то ці моди можна вважати квазіеквідистантними, і вони синхронізуються завдяки зовнішній модуляції. Їх інтенсивність зростає, що приводить до зриву інверсії населеності, а завдяки цьому генерація в іншій частині спектра повинна згасати. При спектральній конденсації випромінювання відбувається тільки перерозподіл інтенсивностей за спектрами без істотного змінення сумарної інтенсивності.

В другому розділі "Експериментальне дослідження впливу часової модуляції коефіцієнта підсилення на спектр генерації широкопозвогового лазера з внутрішньорезонаторним поглиначем" розглянуті наслідки експериментальних досліджень.

Для проведення досліджень, які дозволяють підтвердити модель механізму виникнення аномального збільшення спектральної інтенсивності генерації широкопозвогового лазера в крилах сильних ліній поглинання внутрішньорезонаторного досліджуваного середовища була запропонована методика реєстрації генерації як інтегральна за часом, так і з високим /субнаносекундним/ часовим розділенням.

Досліджуванним об'єктом був ширококутовий імпульсний лазер на розчині органічного барвника ДОТС / 3', 3' - дітилоксатрикарбоцианін / у диметилсульфоксиді, який накачували імпульсом генерації рубінового лазера. Всередині резонатора ширококутового лазера розташовувалась квіета з парами атомарного калію, яку нагрівали. В спектр генерації лазера на барвнику / 755 - 775 нм / попадали сильні резонансні лінії поглинання дублету калію D_1 і D_2 / 769,9 і 766,49 нм /.

Лазер на барвнику накачували рубіновим лазером, який працював або в режимі гігантського імпульсу, або в режимі часткової синхронізації мод. Як пасивний затвір використовувалась розчин кріптоцианіну в диметилсульфоксиді. Тривалість імпульсу генерації рубінового лазера близько 40 нс. Це випромінювання за допомогою лінзи фокусувалось на квіету з розчином органічного барвника ДОТС в диметилсульфоксиді. Інтенсивність накачування приблизно 40 МВт/см². Квіета /під спеціальної конструкції / з парами калію розташовувалась в резонаторі лазера на барвнику, утвореному плоскими дзеркалами з коефіцієнтом відбиття 95 %. Повна геометрична довжина резонатора приблизно 40 см.

Інтегральний за часом спектр випромінювання лазера на барвнику реєстрували за допомогою спектрографа, зібраного на базі автоколімаційної камери УФ-90 /фокусна відстань 1,3 м / з роздільною силою 150000. Одночасно можна було реєструвати кінетику спектра генерації за допомогою електронно-оптичної камери /ЕОК/, яка запускала від ФЕК-09, розгортка спектра з часовим розділенням приблизно 50 пс була отримана на виході спектрографа СТЕ-1, який має роздільну силу 30000.

Калібровка концентрації калію в квіеті в залежності від температури стінок здійснювалась за класичною спектроскопічною методикою.

Ефект конденсації виникає в широких межах зміни інтенсивності випромінювання лазера на барвнику в парах калію і концентрації атомів калію. Ефект виникає починаючи з концентрації калію близько $3 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Спектральна відстань між центрами ліній "конденсації" і ліній поглинання складає від 10 до 100 доплерівських ширин / $\Delta \nu_D = 1$ ГГц, а ударна ширина $\Delta \nu_L = 0,2$ ГГц /.

В експерименті змінювали концентрацію парів калів в межах $10^{10} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при тиску буферного газу гелію близько 10 торр.

Згідно моделі механізму утворення ефекту спектральної конденсації для його виникнення необхідна амплітудна модуляція коефіцієнту підсилення активного середовища з визначеним періодом.

Був поставлений експеримент, в якому коефіцієнт підсилення барвника примусово модулювали з періодом близьким до часу обходу резонатора. Для досягнення такої модуляції створювались умови, при яких рубіновий лазер випромінював в режимі часткової синхронізації мод. Змінював параметрів рубінового лазера і пасивного затвору можна було змінювати ступінь синхронізації мод рубінового лазера, тобто амплітуду модуляції інтенсивності випромінювання.

Експериментально доведено, що "конденсація" випромінювання поблизу лінії поглинання відбувається тільки при амплітудній модуляції імпульсу накачування. Спектри, отримані при оптичній довжині резонатора лазера на барвнику, яка дорівнює 0,87 від довжини резонатора лазера на рубіні. Концентрація парів калів біля 10^{12} см^{-3} . При зменшенні концентрації калів до $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ефект "конденсації" випромінювання зникав. Невеликі зміни концентрації калів або співвідношення довжин резонаторів приводили до зміни інтенсивності і спектрального положення ліній "конденсації" випромінювання. Найбільш сильний ефект "конденсації" спостерігався при співвідношенні оптичної довжини резонатора лазера на барвнику l_k до оптичної довжини резонатора рубінового лазера l_p дещо меншим за одиницю. Коли співвідношення $l_k/l_p \geq 1$, ефект не спостерігався. При співвідношенні l_k/l_p рівному 0,8 і менше ефект також не спостерігався.

Описаний експеримент підтверджує вплив синхронізації мод на спектральний розподіл випромінювання ширококутового лазера. Поблизу сильної лінії поглинання існує дисперсія показника заломлення, яка приводить до нееквідистантності частот повздовжних мод резонатора ω_q . Синхронізація мод можлива тільки в тих спектральних межах, де міжмодова відстань $\omega_{q+1} - \omega_q$ близька до частоти модуляції коефіцієнта підсилення $\omega = 2\pi C/2l_p$. Імпульс випромінювання, який формується з тих мод, фази яких синхронізовані, приходить в активне середовище завжди в той момент часу, коли підсилення мінімальне, що приводить до швидкого зростання спектральної інтен-

сивності в межах де $\omega_{\text{дв}} - \omega_{\text{р}} = \Omega$.

При наближенні до лінії поглинання міжмодова відстань зменшується / як ліворуч, так і праворуч від лінії поглинання/. Якщо величина $\Delta\omega$ дещо менше $\Delta\omega_{\text{р}}$, то поблизу лінії поглинання може існувати область, де можлива синхронізація мод. Якщо відмінність $\Delta\omega$ і $\Delta\omega_{\text{р}}$ велика, то область, де $\omega_{\text{дв}} - \omega_{\text{р}} = \Omega$ буде знаходитись поблизу центра лінії поглинання і вираз в підсиленні буде знижений сильним поглинанням.

Для експериментального підтвердження моделі ефекту спектральної конденсації також була досліджена кінетика явища з субнаносекундним розділенням.

Розгортка електронно-оптичної камери була не зовсім лінійною, однак поблизу лінії чітко видно збільшення спектральної інтенсивності випромінювання лазера на барвнику / ефект " конденсації"/. Фаза модуляції випромінювання в лінії спектральної конденсації відстає за часом від фази модуляції випромінювання в спектральних областях, які знаходяться далеко від центра лінії поглинання.

В роботі показано перспективи використання ефекту спектральної конденсації випромінювання широкопсмугового лазера поблизу лінії поглинання внутрішньорезонаторних газоподібних поглиначів для вимірювання з високим ступенем точності інтегральних перерізів поглинання електронних переходів.

Пік конденсації повинен виникнути на тих частотах, де викладана умова $\Delta\omega_{\text{дв}} = \Omega$, тобто

$$\omega_{\text{конд}} = \omega_0 \pm \sqrt{\frac{CN^2}{2} \cdot \frac{\Omega}{\Delta\omega_{\text{р}} - \Omega}} \quad (9)$$

Останньому виразу можна надати інший вигляд

$$\Sigma = \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega = \frac{2\pi}{CN} \left(\frac{T_{\text{мод}}}{T_{\text{обх}}} - 1 \right) \left(\frac{\Delta\omega}{2} \right)^2, \quad (10)$$

де Σ - інтегральний переріз поглинання, $T_{\text{мод}}$ - період модуляції підсилення, $T_{\text{обх}}$ - час обходу випромінюванням порожнього резонатора, $\Delta\omega$ - спектральна відстань між піками інтенсивності з обох сторін від лінії поглинання.

Отже, по суті, інтегральний переріз поглинання електронного переходу Σ пов'язаний з спектральною відстанню між піками конденсації в крилах лінії поглинання.

Суттєво, що спектральне положення піків конденсації не залежить від величини і характеру розширення спектральної лінії. Це дає можливість визначити інтегральний переріз Σ для ліній поглинання з невідомим профілем, не виконувачи операції інтегрування по контуру. Останнє особливо суттєво для вузьких спектральних ліній, ширина яких менше ніж спектральне розділення апаратури, яка використовується.

В роботі з високою точністю вимірювалась спектральна відстань між піками "конденсації" випромінювання на фотоплівці. Після введення в формулу (10) необхідних значень фізичних величин, були визначені значення інтегральних перерізів поглинання Σ для D_1 і D_2 ліній поглинання калію.

Зв'язок величини Σ з силами осциляторів добре відомий. Тому не виникає труднощів виразити відношення сил осциляторів одночасно спостережуваних ліній через спектральні відстані між піками конденсації, які вимірювались експериментально,

$$(f_1/f_2) = (\Delta\omega_1/\Delta\omega_2)^2 \quad (II)$$

Запропонована методика використана для вимірювання відношення сил осциляторів резонансних електродипольних переходів атомарного калію $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2P_{3/2}$ / 766,49 нм / і $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2P_{1/2}$ / 769,9 нм /.

Зазначене відношення, усереднене за отриманими спектрами, дорівнює 2,1. Точність вимірювань біля 5%. Це ж саме відношення, але отримане іншим методом, дорівнює 2,03. Таким чином, виміряне за новою методикою відношення сил осциляторів знаходиться в доброму узгодженні з результатами інших авторів.

З дещо меншою точністю визначені абсолютні значення зазначених сил осциляторів. Найбільший внесок в помилку дає процес вимірювання концентрації парів калію. Сила осцилятора переходу $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2P_{1/2}$ $f_1 = (0,35 \pm 0,07)$ і відповідно для переходу $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2P_{3/2}$ $f_2 = (0,74 \pm 0,15)$.

Розміщення досліджуваної речовини всередині резонатора багатомодового лазера має принципово важливе значення, а також значно підвищує чутливість вимірювань.

Зміна форми спектральних ліній, яка викликається зіткненнями випромінюючого або поглинаючого атома з іншими атомами і проявляється в розширенні, асиметрії, а іноді, в появленні дифузних смуг,

відкриває нові можливості для вивчення збурення термів. Дослідження за допомогою цих ефектів міжмолекулярних сил становить інтерес не тільки для фізиків, теоретиків та експериментаторів, а також для тих, хто працює над деякими основними проблемами хімії, генетики і астрофізики.

Ефект "конденсації" залежить від тиску буферного газу, який розширює ліній поглинання. Спектральне положення центру лінії "конденсації" від ударного розширення не залежить. В міру того, як тиск буферного газу зростає, ростуть втрати на частоті ліній "конденсації" через збільшення коефіцієнта поглинання на даній частоті. Починаючи з деякого значення тиску буферного газу, втрати на один прохід на частоті, яка відповідає ефекту, виявляються більшими, ніж підсилення в активному середовищі, і в спектрі генератору лазера на барвнику замість лінії спектральної "конденсації" утворюється звичайний провал.

При підвищенні тиску буферного газу гелію пік "конденсації" зникає спочатку з однієї сторони, а при подальшому підвищенні тиску - з обох сторін від лінії поглинання. Неодночасність зникнення піків говорить про асиметрію ударного розширення ліній атомарного калію гелієм.

В третьому розділі "Модуляція коефіцієнта поглинання внутрішньорезонаторного досліджуваного середовища" розробляються основи нового методу амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії /АМВДС/. Розглядається методика, пов'язана з модуляцією коефіцієнта поглинання - нелінійного поглинання досліджуваного газофазного внутрішньорезонаторного середовища.

Розвинута методика реєстрації двофотонного поглинання та проведення кількісних вимірювань. Враховані фактори, які впливають на точність вимірювань. Значна частина сучасних знань про будову атомів та молекул була одержана за допомогою лінійної спектроскопії, коли коефіцієнт поглинання і показник заломлення не залежить від інтенсивності світла. В цьому лінійному наближенні атоми поведуть себе як гармонійні згасавчі осцилятори, які здійснюють вимушені коливання. Однак, при збільшенні інтенсивності світла це наближення не виконується. З локвов дзеркал потужного лазерного випромінювання було зареєстровано багато цікавих нелінійних явищ, одним з них є двофотонне поглинання.

При великих інтенсивностях світла атом може здійснювати переходи з основного квантового стану в збуджений стан тієї же парності, поглинаючи два фотони, сумарна енергія яких дає необхідну енергію переходу. Такі процеси є важливими для спектроскопії тому, що дозволяють досягати високорозташованих станів за допомогою фотонів малих енергій та вивчати переходи, які заборонені в електродипольному наближенні звичайними правилами відбору.

Для отримання кількісних величин перерізів двофотонного поглинання запропоновано використовувати метод АМВЛС, який крім високої чутливості до селективних вузькосмугових втрат, дозволяє реєструвати спектр двофотонного поглинання одночасно в широких спектральних межах. Далі під терміном "спектр двофотонного поглинання" будемо розуміти спектр внутрішньорезонаторного поглинання в смузі генерації широкосмугового лазера при одночасній участі фотона вузькосмугового лазера. Випромінювання вузькосмугового лазера модулює коефіцієнт нелінійного поглинання внутрішньорезонаторної досліджуваної речовини / газоподібної /. Приведені спектри повністю відповідають спектрам ймовірностей двофотонного поглинання.

Чутливість внутрішньорезонаторного спектрометра з використанням імпульсних лазерів може бути оцінена в межах слідувочої моделі: зміни спектрального розподілу інтенсивностей генерації з часом описується наступним виразом

$$I(\omega, t) = I(\omega, 0) \cdot \exp[K_{ус}(\omega) - K_{пот}(\omega)] \cdot C \cdot t, \quad (12)$$

де $I(\omega, t)$ - інтенсивність генерації на частоті ω в момент часу t , $K_{ус}(\omega)$ і $K_{пот}(\omega)$ - спектральний розподіл підсилення і втрат, які усереднені по довжині резонатора, C - швидкість світла, t - час від початку генерації.

Перерізи двофотонного поглинання вимірюються методом АМВЛС по слабким лініям поглинання речовини в резонаторі широкосмугового лазера при дії на досліджувану речовину концентрації N додаткового потужного вузькосмугового випромінювання. Коефіцієнт поглинання $K_2(\omega)$ в цьому випадку є пропорційним густині потужності I додаткового випромінювання та перерізу двофотонного процесу $\sigma_2(\omega)$. Показник експоненти (12) в цьому випадку набуває вигляд

$$I \cdot N \cdot \sigma_2(\omega) \cdot C \cdot t = F \cdot N \cdot \sigma_2(\omega) \cdot C, \quad (13)$$

де F - енергія випромінювання вузькосмугового лазера, яка пройшла через одиницю поверхні поглинаючого середовища за імпульс генерації вузькосмугового лазера. Тобто, чутливість внутрішньорезонаторного спектрометра до двофотонного поглинання визначається енергією випромінювання вузькосмугового лазера. Тому для дослідження двофотонних процесів можливо використати лазери, які працюють в режимі модуляції добротності, з часом випромінювання $10^{-8} - 10^{-7}$ с. В таких умовах зменшується вплив інтерференційної структури на елементах резонатора на спектр лінійного поглинання.

Наведені міркування і є основою методики реєстрації та дослідження процесів нелінійного поглинання в атомарному калії. Вибір потужного вузькосмугового рубінового лазера, який модулює внутрішньорезонаторне поле, а також тип органічного барвника для активного середовища широкосмугового лазера був визначений будовою енергетичних рівнів атомарного калію. В умовах експерименту було можливо реєструвати три двофотонних переходи з основного стану $4^2S_{1/2}$ на рівні тієї ж парності $6^2S_{1/2}$, $4^2D_{3/2}$ та $4^2D_{5/2}$. Ямсвірності цих переходів відрізняються на декілька порядків.

Інтегральний переріз двофотонного поглинання є найбільш об'єктивною характеристикою переходів тому, що практично відсутні дані про розширення високозбуджених рівнів атому.

Повне поглинання двофотонної лінії / еквівалентна ширина / дорівнює

$$A = \gamma \cdot C \cdot D \cdot N \cdot F(t) \cdot \ell / L, \quad (14)$$

де ℓ - довжина стовба поглинаючого середовища, L - довжина резонатора, N - концентрація поглинаючої речовини, D - інтегральний переріз двофотонного поглинання, C - швидкість світла, $F(t)$ - енергія вузькосмугового лазера на одиницю площі, яка пройшла за час випромінювання, γ - числовий множник.

Формула (14) дає можливість вимірювати інтегральні перерізи двофотонного поглинання по повному поглинанню в лінії A , яке визначають експериментально.

Розроблена методика дає можливість проводити кількісні вимірювання з високою якістю і тоді, коли ширина апаратної функції

каналу реєстрації перевищує ширину лінії двофотонного поглинання.

Ймовірності двофотонних переходів, розраховані за теорією збурень:

$$W_{if}(z) = \frac{\hbar}{8\hbar^4} g_0(\omega_p + \omega_k, \omega_{if}) |\vec{E}_k|^2 |\vec{E}_p|^2 \left(\frac{3}{8} \frac{\hbar e^2}{m} z\right)^2 \times$$

$$\left[\sum_{j_g} \left(\frac{1}{\omega_k - \omega_{j_g}} + \frac{1}{\omega_p - \omega_{j_g}} \right) \cdot \sqrt{\frac{f_{j_g} f_{if}}{\omega_{j_g} \omega_{if}}} \cdot \sqrt{\theta_{j_g} \theta_{j_f}} \right]^2 \quad (15)$$

де $\theta_{j_g} = 1/3$, коли $j_g = 1/2$; $\theta_{j_f} = 4/3$, коли $j_f = 1/2$, $j_f = 1/2$;
 $\theta_{j_g} = 4/3$, коли $j_g = 3/2$; $\theta_{j_f} = 4/3$, коли $j_f = 1/2$, $j_f = 3/2$;
 $\theta_{j_f} = 8/3$, коли $j_f = 3/2$, $j_f = 1/2$
 $\theta_{j_f} = 4/5$, коли $j_f = 3/2$, $j_f = 3/2$
 $\theta_{j_f} = 8/5$, коли $j_f = 3/2$, $j_f = 5/2$.

Переріз поглинання

$$b = P/N \cdot I \quad (16)$$

де $P = N \cdot \hbar \omega_k \cdot W_{if}(z)$ - потужність випромінювання барвника, яку поглинають атоми калів при двофотонних переходах,

$I = \frac{nc\epsilon_0}{2} |\vec{E}_k|^2$ - інтенсивність випромінювання барвника у спектральній межі $\omega_k = \omega_{if} - \omega_p$.

Переріз поглинання за рахунок двофотонних переходів, який вимірюють за спектром генерації барвника

$$b_{\omega} = \frac{2\hbar\omega_k}{c\epsilon_0 |\vec{E}_k|^2} \cdot W_{if}(z) \quad (17)$$

Тому існує коефіцієнт поглинання $K = b_{\omega} \cdot N$ на деяких частотах. Наявність цих селективних втрат всередині резонатора веде до виникнення ліній поглинання в спектрі генерації широкосмугового лазера на частоті ω_k , тобто до спектру двофотонного поглинання. Тоді переріз двофотонного поглинання

$$b_{\omega}(z) = \frac{b_{\omega}}{|\vec{E}_p|^2} = \frac{2\hbar\omega_k}{c\epsilon_0 |\vec{E}_k|^2 |\vec{E}_p|^2} \cdot W_{if}(z) \quad (18)$$

Використовуючи всі вирази та умову, що випромінювання рубінового лазера і лазера на розчині органічного барвника лінійно поляризовані, а вектори поляризації паралельні, запишемо вираз для інтегрального перерізу двофотонного поглинання:

$$D = \int_0^{\infty} G_{\omega}(z) \cdot d\omega = \frac{9\pi \cdot e^4 \omega_k}{64 \cdot \hbar^2 m^2 c \epsilon_0} \left[\sum_{j_1} \left(\frac{1}{\omega_k - \omega_{j_1}} + \frac{1}{\omega_p - \omega_{j_1}} \right) \sqrt{\frac{f_{j_1} f_{j_2}}{\omega_{j_1} \omega_{j_2}}} \cdot \sqrt{\theta_{j_1} \theta_{j_2}} \right]^2 \quad (19)$$

Активним середовищем широкосмугового лазера був розчин барвіника ДТС у диметилсульфоксиді, який накачували випромінюванням рубінового лазера. Випромінювання рубінового лазера розповсюджувалось через пари калію і потім потрапляло в квету з барвіником. Пари калію розташовували всередині резонатора лазера на барвінику. Квету з калієм можна було підігрівати, контролюючи температуру стінок. Довжина резонатора 40 см.

Рубіновий лазер працював в режимі гігантського імпульсу 60 нс, 0,14 Дж. Реєстрацію спектрів генерації лазера на барвінику здійснювали за допомогою спектрографа на базі автоколімаційної камери УФ-90 з фокальною відстанню 1,3 м і дифракційної решітки 300 шт/мм, яка працювала в 7-у порядку. Калібровку довжин хвиль виконували по лініях неону.

За експериментальними даними були обчислені інтегральні перерізи двофотонного поглинання атомарного калію, які дорівнюють

$$\begin{aligned} D_{4^2S_{1/2} - 4^2S_{1/2}} &= (1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-21} \text{ м}^2 \text{с} \\ D_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{3/2}} &= (8,4 \pm 2) \cdot 10^{-25} \text{ м}^2 \text{с} \\ D_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{5/2}} &= (2,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-24} \text{ м}^2 \text{с} \end{aligned} \quad \text{і} \quad \frac{1}{\text{м}^2 \text{с}^2}$$

За допомогою нової методики можна визначити сили осциляторів переходів між збудженими станами електрона в атомі калію. Співвідношення, яке при цьому використовували

$$f_{23} = \frac{32\pi A \cdot \hbar^2 m^2 \epsilon_0 (\omega_{j_1} - \omega_{j_2}) \omega_{j_3} \omega_{j_2}}{E_{NF} e^4 \omega_{j_1} \omega_{j_2} \theta_{j_1} \theta_{j_2}} \quad (20)$$

Сила осцилятора $f_{4^2S_{1/2} - 4^2S_{1/2}} = 0,014$ визначена з точністю 40% і добре погоджується з даними інших авторів. З цієї ж точністю виміряно сили осциляторів $f_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{3/2}} = 0,27 \cdot 10^{-3}$ і $f_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{5/2}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$. Точність вимірів в основному залежить від точності визначення концентрації атомів калію.

Для підвищення точності вимірів досліджено вплив високочастотного ефекту Штарка. Розроблено рекомендації.

В четвертому розділі "Модуляція нелінійного підсилення внутрішньорезонаторного досліджуваного середовища" розвинута методика дослідження рідких середовищ, які розташовані всередині резонатора широкосмугового лазера для підвищення чутливості досліджень.

Спектр генерації широкосмугового лазера має високу чутливість не тільки до вузькосмугового коефіцієнта поглинання, а також і до

вузькосмугового додаткового коефіцієнта підсилення. В останньому випадку в спектрі генерації повинні з'являтися вузькі лінії підсилення на фоні широкої смуги генерації. Це так і буде, коли виконуться умови, що ширина лінії додаткового підсилення значно вужча ніж однорідна ширина коефіцієнту підсилення активного середовища.

Завжди є багато експериментальних задач, в яких треба дослідити рідкі речовини або їх розчини різної концентрації. Але це не можливо здійснити за допомогою внутрішньрезонаторної лазерної спектроскопії по лініях поглинання досліджуваної речовини. За рахунок сильної міжмолекулярної взаємодії лінії поглинання рідких речовин значно розширені. Ширина цих ліній стає однаковою з шириною однорідного контура підсилення активного середовища.

Достатньо вузькими є лінії вимушеного комбінаційного розсіяння / ВКР /. В цих процесах беруть участь коливальні рівні.

Коли речовина, що досліджується, і в якій виникає вузькосмуговий коефіцієнт підсилення $\alpha(\omega_c)$, розташована всередині резонатора з широкою однорідною смугою підсилення до якої потрапляє і частота ω_c , то при багаторазовому розповсюдженні світла всередині резонатора в спектрі генерації широкосмугового лазера з'явиться вузька лінія підсилення на частоті ω_c .

Зміна спектральної інтенсивності буде проходити по експоненційному закону

$$I(\omega, t) = I_0(\omega) \cdot \exp(\alpha(\omega_c) \cdot c \cdot \frac{L}{2} \cdot t), \quad (21)$$

де $I(\omega_c, t)$ - інтенсивність випромінювання у центрі досліджуваної лінії, $I_0(\omega_c)$ - обвідна контура спектрального розподілу випромінювання лазера.

Якщо імпульс генерації можна вважати прямокутним, то відношення експозицій приймача випромінювання для інтегральних за часом спектрів генерації, яке вимірюється в експерименті, можна представити у вигляді

$$\frac{H(\omega_c)}{H_0(\omega_c)} = \frac{\int_0^T I(\omega_c, t) dt}{\int_0^T I_0(\omega_c) dt} = \frac{\exp(\alpha(\omega_c) \cdot c \cdot \frac{L}{2} \cdot T) - 1}{\alpha(\omega_c) \cdot c \cdot \frac{L}{2} \cdot T}, \quad (22)$$

де $H(\omega_c)$ - експозиція у центрі вузької лінії підсилення, $H_0(\omega_c)$ - експозиція при відсутності лінії / в межах лінії /, T - тривалість імпульсу генерації.

Використовуючи (22), можна визначити величину додаткового посилення α .

В умовах опромінювання внутрішньорезонаторного досліджуваного середовища зовнішнім потужним вузькосмутовим випромінюванням / модуляція нелінійного коефіцієнта підсилення / здійснюється процесом змусованого комбінаційного розсіяння/.

З теорії ВКР випливає, що на частоті стоксової лінії КР $\omega_c = \omega_0 - \Omega$ / де Ω - частота власних коливань молекул/, збудженої монохроматичним випромінюванням частоти ω_0 , існує підсилення, пропорційне інтенсивності зовнішнього випромінювання

$$\alpha(\omega_c) = \frac{3\lambda_c^3}{2^5\pi^5} \cdot \frac{N \cdot \mathcal{B}(\omega_c)}{\hbar \Delta\omega_c} \cdot |e_0|^2, \quad (23)$$

де λ_c - довжина хвилі лінії КР, $\mathcal{B}(\omega_c)$ - переріз КР на одну молекулу, N - концентрація молекул, $\Delta\omega_c$ - ширина лінії КР, $|e_0|^2$ - квадрат напруженості поля на частоті збудження.

Для визначення достовірності кількісних вимірювань за допомогою метода АМВІС, виконано вимірювання повного перерізу КР для коливально-обертового розсіяння у Q-вітці газоподібного азоту. Цей переріз вже вимірювали інші автори з точністю до 2 %.

Для збудження процесів ВКР використовували випромінювання потужного рубінового лазера. Це випромінювання також збуджувало активне середовище / розчин барвірка ДТС у диметилсульфоксиді/. Спектральні межі генерації 820 - 835 нм. Інтегральний за часом спектр генерації реєстрували за допомогою фотоплівки И-810. Центр лінії КР знаходився на довжині хвилі 8282,8 Å, що відповідає частоті коливального кванта 2331 см⁻¹.

Знайдене значення перерізу КР $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-30}$ см² співпадає з даними інших авторів.

Далі було досліджено спектр ВКР розчинів пірідина у воді. Концентраційна чутливість методики 80 мг/л.

Одночасно реєстрували дві лінії КР з коливальними квантами 991 і 1030 см⁻¹. Величини коефіцієнтів підсилення були $8 \cdot 10^{-4}$ та $7,3 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹, відповідно / концентрація 25 % /.

Зареєстровано зміну величини коливальних квантів при зменшенні кількості молекул пірідина у водному розчині до 1004 см⁻¹ і відповідно 1035,4 см⁻¹ / 0,5 % пірідина /.

У п'ятому розділі "Подвійна модуляція. Зміна довжини резонатора" досліджено та запропоновано інші методи модуляції параметрів резонатора.

В умовах одночасної амплітудної модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища та нелінійного коефіцієнта поглинання досліджуваної внутрішньорезонаторної речовини, зареєстровано ефект спектральної конденсації випромінювання ширококутового лазера біля ліній двофотонного поглинання.

Коли в атомах калію відбуваються процеси двофотонного поглинання на частотах що відповідають крилам ліній, існує дисперсія нелінійної сприйнятливості, а тому моди лазера на барвнику стають нееквідистантними / стають густішими з двох сторін від центра лінії двофотонного поглинання/. Якщо частота модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища, яка визначається довжиною резонатора рубінового лазера, співпадає з міжмодовою відстанню групи мод в крилі лінії двофотонного поглинання, то ці моди синхронізуються і умови їх підсилення стають значно кращі. Інтенсивність генерації багатомодового лазера на частотах цієї групи мод значно зростає за рахунок всіх інших мод. Для значної зміни міжмодової відстані потрібно збільшити концентрацію поглинаючих атомів калію, що і фіксували експериментально.

З метою зростання спектрального розділення даного методу запропоновано новий спосіб досліджень надто вузьких ліній поглинання внутрішньорезонаторних досліджуваних середовищ. Модують довжину резонатора ширококутового лазера та реєструють співвідношення інтенсивностей генерації на одній моді та інтегральної на всіх модах.

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи такі:

1. Експериментально з субнаносекундним розділенням досліджена кінетика генерації ширококутового імпульсного лазера на барвнику з лазерним накачуванням. З'ясовано, що при амплітудній модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища з періодом дещо більшим ніж час обходу / приблизно на 15 % / випромінюванням порожнього резонатора, в крилах сильних ліній поглинання внутрішньорезонаторної досліджуваної газоподібної речовини аномально зростає

спектральна інтенсивність генерації / ефект спектральної "конденсації" випромінювання /. Зарєстровано, що випромінювання на час - тотях піка конденсації пульсує з частотою модуляції і під кінець імпульсу накачування, за рахунок конкуренції в процесі зняття інверсії активного середовища, в генерації залишаються тільки моди, які потрапили в крила лінії поглинання.

2. Виявлено механізм виникнення ефекту спектральної конденсації випромінювання, який базується на моделі активної синхронізації групи мод, які потрапили в крило лінії поглинання внутрішньорезонаторного досліджуваного середовища, частота міжмодових биттів, яких співпадає з частоток амплітудної модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища ширококутового лазера.

3. Запропонована і апробована методика кількісних вимірювань сил осциляторів електродипольних переходів, яка використовує ефект спектральної конденсації випромінювання і яка дає можливість проводити вимірювання без визначення коефіцієнтів поглинання. З точністю 5 % проведено вимірювання відношення сил осциляторів резонансних переходів атомарного калію $f_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{3/2}} / f_{4^2S_{1/2} - 4^2D_{5/2}} = 2,1$.

4. Показана можливість дослідження асиметрії контурів ліній поглинання внутрішньорезонаторних досліджуваних газофазних середовищ, коли використовується ефект спектральної конденсації. Зарєстровано зростання асиметрії резонансної лінії поглинання $D_2(766,49 \text{ нм})$ атомарного калію концентрації 10^{12} см^{-3} при зростанні тиску буферного газу гелію від 7 до 130 торр.

5. Розроблена і зібрана установка для дослідження спектрів генерації імпульсного ширококутового лазера на розчині органічного барвника при амплітудній модуляції коефіцієнта нелінійного поглинання внутрішньорезонаторного атомарного калію зовнішнім випромінюванням рубінового лазера. Зарєстровані спектри двофотонного поглинання атомарного калію на переходах $4^2S_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$, $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2D_{3/2}$, і $4^2S_{1/2} \rightarrow 4^2D_{5/2}$.

6. Розвинута методика кількісних вимірювань перерізів двофотонного поглинання по лініях двофотонного поглинання. Виміряні перерізи двофотонного поглинання калію при переході електрона з основного стану $4^2S_{1/2}$ в збуджені стани тієї ж парності $6^2S_{1/2}$, $4^2D_{3/2}$ і $4^2D_{5/2}$, які відповідно дорівнюють $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-24}$, $(2,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-24}$ та $(8,4 \pm 2) \cdot 10^{-25} \text{ м}^2/\text{В}^2$. Досліджена залеж-

ність перерізу переходу $4^2S_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$ від частоти генерації рубінового лазера, коли її змінювали в межах 20 см^{-1} при обдуванні рубінового кристала паром рідкого азоту.

7. Запропонована нова методика вимірювання сил осциляторів дипольних переходів електронів між збудженими рівнями атомів за повним поглинанням в лінії двофотонного переходу. Вимірні сили осциляторів $f_{4^2P_{3/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}}$, $f_{4^2P_{3/2} \rightarrow 4^2D_{3/2}}$ і $f_{4^2P_{3/2} \rightarrow 4^2D_{5/2}}$ методом амплітудної модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії, які дорівнюють відповідно $(0,014 \pm 0,006)$, $(0,27 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$ і $(0,25 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$.

8. Розвинута методика дослідження рідких середовищ, які для підвищення чутливості розміщують всередині резонатора ширококутового імпульсного лазера. При амплітудній модуляції внутрішньорезонаторного поля потужним вузькосмуговим зовнішнім оптичним полем відбуваються процеси вимушеного комбінаційного розсіяння в досліджуваній речовині, що призводить до виникнення додаткового вузькосмугового коефіцієнту підсилення, який реєструється і вимірюється методом АМВЛС. На експериментальній установці досягнуто концентраційну чутливість домішок пірідину у воді 80 мг/л .

9. Методика кількісних вимірювань по спектрах ВКР перевірена при реєстрації перерізу КР Q-вітки газоподібного азоту / частота коливань 2331 см^{-1} . Отримані експериментально значення перерізу $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ знаходяться в доброму узгодженні з даними інших авторів.

10. Зареєстровано ефект зміни коливальних частот молекул пірідину у воді завдяки міжмолекулярній взаємодії. Частота пульсаційних коливань кільця пірідина (C_5H_5N), яка дорівнює в чистій речовині 991 см^{-1} , зростає до 1004 см^{-1} в $0,6\%$ водному розчині, а частота коливання 1030 см^{-1} зростає до величини $1035,4 \text{ см}^{-1}$.

11. Зареєстровано зміщення ліній поглинання резонансного дублету атомарного калію під дією ефекту Штарка. Зафіксовано зсув лінії двофотонного поглинання переходу $4S \rightarrow 6S$ в полі потужного випромінювання рубінового лазера на величину до $0,5 \text{ см}^{-1}$ внаслідок ефекту Штарка.

12. Досліджені ефекти, які виникають при одночасній амплітудній модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища та коефіцієнта нелінійного поглинання досліджуваної речовини, яка розта-

шовується всередині резонатора широкопалосового лазера на розчині органічного барвника. Зареєстровано ефект спектральної конденсації випромінювання широкопалосового лазера в крижі лінії двофотонного поглинання на переході $4^2S_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$ атомарного калію. Запропонована якісна модель ефекту, яка базується на явищі вимушеної синхронізації групи мод широкопалосового лазера, що стають густішими в крижах ліній двофотонного поглинання внаслідок дисперсії показника заломлення при амплітудній модуляції. Коли частота модуляції коефіцієнта підсилення активного середовища співпадає з міжмодовою відстанню групи мод в крижі лінії двофотонного поглинання, то ці моди синхронізуються і умови їх підсилення стають значно кращі.

13. Запропонована нова методика досліджування з великим спектральним розділенням вузьких контурів ліній поглинання / або підсилення / речовин, які для підвищення чутливості розміщують всередині резонатора широкопалосового лазера. В основі методики лежить модуляція довжини резонатора багатомодового лазера.

Основні результати опубліковані в наступних роботах:

1. Баєв В.М., Гамалій В.Ф., Лобанов В.Д., Свириденков З.А., Сучков А.Ф., Хулугуров В.М. Применение лазеров на центрах окраски в щелочно-галогенных кристаллах для внутррезонаторной спектроскопии. // Квантовая электроника. - 1979. - т. 6, № 1. - С. 92-97.
2. Баєв В.М., Великова Т.П., Гамалій В.Ф., Свириденков З.А., Сучков А.Ф. Прямое измерение сечения двухфотонного поглощения методом внутррезонаторной лазерной спектроскопии. // Квантовая электроника. - 1984. - т. 11, № 12. - С. 2413-2416.
3. Баєв В.М., Гамалій В.Ф., Свириденков З.А., Топтыгин Д.Д. Влияние временной модуляции коэффициента усиления на спектр генерации широкополосного лазера с внутррезонаторным поглощением. // Краткие сообщения по физике. МИАН. - 1986. - № 6. - С. 6-8.
4. Баєв В.М., Великова Т.П., Барнавіський О.П., Гамалій В.Ф., Коваленко С.А., Свириденков З.А. Автомодаляция интенсивности излучения широкополосного лазера при наличии в резонаторе сильных линий поглощения. // Письма в ЖЭТФ. - 1985. - т. 42, в. 10. - С. 416-418.
5. Гамалій В.Ф., Свириденков З.А., Топтыгин Д.Д. Спектр генерации лазера с узкополосным внутррезонаторным поглощением и временной модуляцией коэффициента усиления. // Квантовая электроника. - 1986.

т. 15, №12. - С. 2457-2466.

6. Гамалий В. Ф., Топтыгин Д. Д. Об измерении сечений поглощения газообразных сред. // Оптика и спектроскопия. - 1995. - т. 78, в. 2. - С. 196-198.

7. Гамалий В. Ф. Експериментальні основи модуляційної внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії. // Укр. фізичн. журн. - 1996. - т. 40, №9. - С. 987-990.

8. Баев В. М., Гамалий В. Ф., Свириденков Э. А., Топтыгин Д. Д. Исследование резонансных эффектов в двухфотонном поглощении методом внутриврезонаторной лазерной спектроскопии. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. - 1986. - №8. - С. 3-5.

9. Баев В. М., Гамалий В. Ф., Свириденков Э. А., Топтыгин Д. Д., Млук О. И., Методика количественных измерений спектров одно- и двухфотонного поглощения, полученных методом ВРИС. // ЖПС. - 1987. - т. 46, №4. - С. 573-578.

10. Гамалий В. Ф. Вимірювання інтегральних перерізів двофотонного поглинання атомарного калію. // Укр. фізичн. журн. - 1995. - т. 40, №10. - С. 1076-1078.

11. Гамалий В. Ф. Измерение отношения сил осцилляторов переходов $4^2P_{1/2} \rightarrow 4^2D_{3/2}$ и $4^2P_{3/2} \rightarrow 4^2D_{5/2}$ атомарного калия. // ЖПС. - 1996. - т. 63, №2. - С. 332-336.

12. Гамалий В. Ф. Измерение сечений комбинационного рассеяния внутриврезонаторными методами. // ЖПС. - 1995. - т. 62, №6. - С. 22-25.

13. Бойко С. Н., Гамалий В. Ф. Применение метода модуляционной внутриврезонаторной лазерной спектроскопии для анализа воды. // Успехи и технология воды. - 1995. - т. 17, №5-6. - С. 469-474.

14. Гамалий В. Ф. Измерение отношения сил осцилляторов резонансных переходов атомарного калия методом модуляционной внутриврезонаторной лазерной спектроскопии. // Оптика и спектроскопия. - 1996. - т. 81, №6.

15. Гамалий В. Ф. Конденсация излучения импульсного лазера на красителе в крыле двухфотонной линии поглощения. // Оптика и спектроскопия. - 1996. - т. 81, №6.

16. Баев В. М., Гамалий В. Ф., Коваленко С. А., Свириденков Э. А., Сучков А. Ф., Топтыгин Д. Д. Способ внутриврезонаторной лазерной спектроскопии. А. с. СССР № 1345775 от 15.06.87 г. Кл. G 01 J3/287.

17. Гамалий В. Ф., Топтыгин Д. Д. Способ измерений интегральных се-

чений поглощения электронных переходов. А.с. СССР № 1656418 от 15.02.91 г. Кл. G01N21/31.

18. Баев В.М., Гамалий В.Ф., Свириденков Э.А., Топтыгин Д.Д. Способ измерения сил осцилляторов. А.с. СССР № 1332197 от 22.04.87 г. Кл. G01N21/31.

19. Gashaliy V.F. New method - modulation intracavity laser spectrosc. //Тези доповідей міжнародної наукової конференції.-Львів.-1995.-С.72-73.

20. Gashaliy V.F. Modulation intracavity laser spectroscopy : a new approach.//Book of Abstracts the EUMOS XXII. -Essen (Germany).-1994.-P.370.

21. Gashaliy V. Registration of liquid pollution by the method of Modulation intracavity laser spectroscopy.//Book of abstracts EUMOS XXIII (European Congress on Molecular Spectroscopy, -Balatonfured, Hungary. 25-30 August, 1996).-Hungary.-1996.-P.441.

Цитована література:

1. Сучков А.Ф. Линейчатая структура спектров генерации ОКГ с неоднородно уширенной полосой усиления.//Препринт ФМАН.-1970.-№ 126.-С.1-13.

2. Беликов Т.Л., Баев В.М., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. Внутрирезонаторная спектроскопия с использованием лазеров непрерывного и квазинепрерывного действия.//ЖЭТФ.-1978.-т.74, №1.-С.43-56.

3. Кардона М. Модуляционная спектроскопия.-М.: Мир.-1972.-416 с.

Гамалий В.Ф. "Амплитудная модуляционная внутрирезонаторная лазерная спектроскопия".

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиобезопасность. Киевский университет им. Тараса Шевченко, Киев, 1996.

Защищается 18 научных работ и 3 авторских свидетельства. Диссертация содержит результаты экспериментального и теоретического исследования амплитудной модуляции параметров широкополосного лазера, при наличии в его резонаторе исследуемого вещества, на спектр его генерации. Предложены два новых метода измерения сил осцилляторов электродипольных переходов. Развита методика регистрации малых жидкофазных примесей по эффекту вынужденного комбинационного рассеяния, когда исследуемая жидкость для повышения концентрационной чувствительности помещается внутрь резонатора широкополосного лазера.

Разработаны основы метода амплитудной модуляционной внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (АМВЛС).

Gamaliy V.F. Amplitude modulation intracavity laser spectroscopy.

The dissertation advanced for a degree of Doctor of Science (Physics and Mathematics) in the speciality of 01.04.03 - Radiophysics, Kyiv University after Taras Shevchenko, Kyiv, 1996.

There are 18 scientific papers and 3 certificates of the authorship on inventions represented. Dissertation includes the results of experimental and theoretical investigation of influence of the amplitude modulation of multimode laser parameters on generation spectrum, when investigated medium is situated intracavity of laser. The two methods of measurement of the oscillator strength of the electro-dipole transition is suggested. The method for registration of small intracavity liquid pollutants by the effect stimulated Raman scattering has been developed.

To put forward method of amplitude modulation intracavity laser spectroscopy (AMILS).

Ключові слова: модуляція, внутрішньорезонаторна спектроскопія, ширококутовий лазер, конденсація випромінювання, двофотонне поглинання, сила осцилятора, переріз, комбінаційне розсіяння.

AB 37.216