

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

З Е Н К О В А
К л а в д і я Ю р і в н а

УДК 535:539.21+621.382

**ДИНАМІКА МІЖКВАЗІЧАСТИНКОВИХ ВЗАЄМОДІЙ
В ОБЛАСТІ ЕКСИТОННИХ РЕЗОНАНСІВ**

01.04.05. - Оптика, лазерна фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці - 1997

535 +
535.37



00737965 (.)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Чернівецькому державному університеті ім. Ю. Федьковича на кафедрі оптики і спектроскопії

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор НІЦОВИЧ Богдан Михайлович,
ЧДУ, зав. кафедрою оптики і спектроскопії

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор МЕЛЬНИЧУК Степан Васильович,
ЧДУ, професор кафедри теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук,
професор БОРЩ Анатолій Олександрович,
ІФ НАН України, провідний науковий
співробітник відділу нелінійної оптики

Провідна організація: Інститут фізичної оптики Міністерства освіти
України, м. Львів

Захист відбудеться 31 жовтня 1997 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої ради Д76.051.01 при Чернівецькому державному університеті ім. Ю.Федьковича за адресою: 274012, м.Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Чернівецького державного університету ім. Ю.Федьковича за адресою: м. Чернівці, вул. Л.Українки, 23.

Автореферат розісланий " 29 " жовтня 1997р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Курганецький М.В.

7В - 30.6.00 -1-

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найбільш бурхливою і широкомасштабною областю розвитку фізики за останнє десятиріччя стала лазерна технологія. Власне, до одного із найцікавіших і перспективних її напрямків треба віднести можливість створення оптичних комп'ютерних мереж. Перспектива ж створення оптичного логічного елемента пов'язана з використанням оптичних бістабільних пристроїв. В основі явища оптичної бістабільності (ОБ) лежить гістерезисна залежність інтенсивності вихідного сигналу від інтенсивності лазерної хвилі, що падає на речовину.

Виникнення ОБ можливе лише при наявності нелінійного середовища і оберненого зв'язку в системі. Останнє може бути забезпечено як накладанням зовнішніх умов (розміщення нелінійного елемента в резонаторі Фабрі-Перо), так і специфічним характером внутрішніх властивостей речовини. Безрезонаторна ОБ виникає без зовнішнього оберненого зв'язку в результаті збільшення поглинаючої здатності середовища при зростанні інтенсивності вхідного сигналу. В цьому підході здійснюється внутрішній обернений зв'язок, який впливає з умови балансу для квазічастинок, котрі зумовлюють поглинання світла в даній частотній області. Отже, проблема виникнення ОБ та проблема з'ясування як фізичної природи поглинання світла кристалом (електрон, дірка, екситон, біекситон і т.п.), так і механізмів релаксації, що зумовлюють розширення та зсув смуги поглинання, об'єднуються в єдину задачу.

Проблемі дослідження екситонних спектрів у напівпровідниках вже досить давно приділяється значна увага. В оптичних спектрах екситона проявляється взаємодія трьох систем квазічастинок - фотонної, екситонної та фононної, яка може бути як лінійною так і нелінійною. Можна стверджувати, що в наближенні малої густини екситонної накачки задача дослідження форми смуги екситонного поглинання та її температурного генезису розв'язана практично повністю. Проте при високих рівнях оптичної накачки ситуація значно ускладнюється і фактично слабо ще вивчена. Тепер поглинаюча здатність кристала буде залежити ще й від густини екситонних станів, котрі в свою чергу залежать від інтенсивності лазерної хвилі, якою опромінюється напівпровідник. Окрім того, з'являються нові канали релаксації екситонного збудження кристала саме: екситон-екситонна взаємодія та її фононні похідні. Як змінюється поглинаюча здатність напівпровідника, які реальні ефекти виникають



при цьому, як дисипативні процеси впливають на перебіг бістабільних явищ? Всі ці запитання потребують відповіді, оскільки для практики важливим є не лише встановлення механізму виникнення ОБ, але й пошук шляхів впливу на розвиток і динаміку гістерезисного процесу, бо саме на цьому напрямку знаходиться можливість створення оптичного логічного елемента із заданими параметрами.

З іншого боку, більш перспективними в плані технологічного застосування при конструюванні оптичних елементів пам'яті є кристали, в яких реалізуються дві і більше гістерезисні петлі в пропусканні світла. Можливість же отримання мультістабільної оптичної пам'яті (аналого-цифрове перетворення) для моделі зростаючого поглинання викликало певні сумніви, оскільки не видно було навіть теоретичного механізму її отримання. Річ у тім, що при аналізі екситонного поглинання світла кристалом розглядалися в основному лише прямі переходи енергії фотона, що падає на кристал, в енергію екситона. Після чого вже вмикались релаксаційні механізми, при яких екситон розсіює свою енергію на коливаннях атомів ґратки кристала, що й приводить до кінцевого життя екситонного збудження та виникнення смуги поглинання. Проте, у напівпровідниках з різкою анізотропією їхніх кристалічних і електронних властивостей, які й розглядаються в даній роботі, можлива реалізація непрямих вертикальних фотопереходів (НВФ), при яких збудження екситона супроводжується народженням (знищенням) фонона. Особливостями цих переходів є їхня поляризаційна чутливість та участь у них реальних, а не віртуальних, низькоенергетичних фононів. Це спричинює, по-перше, можливість появи в спектрах екситонного поглинання додаткових фононних компонентів і, в перспективі, мультістабільних станів, а по-друге, дає нам у руки додатковий важіль впливу (зміною поляризації зовнішнього світла) на формування пропускну здатності кристала. Тому існує необхідність детального дослідження спектрів екситонного поглинання світла напівпровідниками, в яких реалізуються непрямі фотопереходи.

Отже, проведені в даній роботі дослідження різних типів міжквaziчастинкових взаємодій у напівпровідниках, з різкою анізотропією їхніх кристалічних і електронних властивостей та можливості отримання двох і більше оптичних стабільних станів кристала, слід вважати актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась в межах координаційної програми Міністерства Освіти України "Взаємодія світла з розсіючими середовищами, кристалічними тілами, плівками та біооб'єктами".

Мета роботи полягає в пошуку нових механізмів взаємодії випромінювання із середовищем (НВФ) та нових шляхів релаксації енергії збудження (нелінійна екситон-екситон-фононна взаємодія) і дослідженню їхньої ролі при формуванні поглинаючої здатності кристала та отриманні двох, трьох і більше стабільних станів напівпровідника.

Досягнення мети вимагало розв'язання наступних завдань:

- проведення детального аналізу ролі такої специфічної особливості екситона як існування дипольного моменту екситонного переходу, який, власне, і є причиною виникнення непрямого фотопереходу;
- отримання за допомогою апарату функції Гріна в аналітичному вигляді спектрального розподілу смуги екситонного поглинання і алгоритмічної та програмної реалізації, за допомогою рівнянь енергетичного балансу, обчислень функціональної залежності коефіцієнта поглинання від інтенсивності лазерної хвилі;
- дослідження впливу зовнішніх факторів (поляризації світла, інтенсивності лазерного випромінювання, температури кристала) на генезис екситонних оптичних спектрів та динаміку нелінійного пропускання світла різкоанізотропними напівпровідниками;
- розрахунок оптичних бістабільних та мультистабільних характеристик напівпровідника і визначення концептуальних умов отримання багатостабільних станів кристала.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- вперше проведено всебічний аналіз ролі лібраційних коливань дипольного моменту екситонів у процесі поглинання світла напівпровідниками з різкою анізотропією механічних та електронних властивостей;
- вперше вказано на можливість реалізації двох типів непрямих фотопереходів, які спричинюють температурні аномалії спектральних характеристик екситона (монополяризаційний НВФ) і деформацію спектральної кривої поглинання зі зміною поляризації зовнішньої електромагнітної хвилі (деполяризаційний НВФ);

- вперше на основі детальних обчислень залежності форми спектра екситонного поглинання від інтенсивності лазерного випромінювання запропоновано поляризаційний механізм отримання багатостабільних стаціонарних станів кристала з різноманітною динамікою їх функціональної дії;
- вперше враховано вплив фононних похідних екситон-екситонної взаємодії на характер нелінійного поглинання кристала; розраховано бістабільні характеристики кристала при врахуванні нелінійної екситон-екситон-фононної взаємодії.

Практичне значення одержаних результатів

-Результати роботи дають однозначне пояснення цілої низки експериментальних досліджень при залученні механізму НВФ для пояснення температурної поведінки спектральних параметрів екситонної смуги поглинання; розширюють межі дослідження динамічної нелінійності середовища, яке опромінюється, за рахунок використання додаткової моделі взаємодії фотону з екситон-фононною підсистемою кристала й нових механізмів дисипації енергії світлової хвилі в кристалі.

-Результати дослідження температурної поведінки максимуму екситонного поглинання можуть бути використані для розробки методів цілеспрямованої селекції напівпровідникових кристалів з НВФ.

-Результати роботи по дослідженню мультистабільних оптичних станів кристалу можна використати при конструюванні поляризаційних систем оптичної обробки інформації.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Реалізація в кристалах НВФ, пов'язаного з лібраційними коливаннями диполя екситона, має два канали прояву: аномальне зростання висоти піка поглинання із збільшенням температури і структурування смуги екситонного поглинання зі зміною кута поляризації зовнішньої електромагнітної хвилі.
2. Існування двох каналів дисипації енергії лазерної хвилі - непрямого фотопереходу (збудження лібраційних фононів) та екситонної релаксації (збудження граткових фононів) - веде до виникнення мультистабільних станів у напівпровідниковому кристалі з різноманітною поляризаційною динамікою їх прояву.
3. Реалізація в кристалі нелінійного механізму екситон-екситон-фононної взаємодії спричинюється до температурних змін ширини забороненої зони

напівпровідника та появи нестандартного зсуву екситонного піку в короткохвильову область спектру. Зі зростанням температури це приводить до актуалізації сил відштовхування між екситонами і зумовлює розширення частотних меж існування бістабільних станів у такому кристалі.

Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях:

Міжнародна конференція "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників" (Чернівці, 1994); Міжнародна конференція до 150-річчя народження І. Пулюя (Львів, 1995); Міжнародна конференція "Photonics-95" (Прага, Чехія, 1995); Міжнародна конференція "Голографія та кореляційна оптика" (Чернівці, 1995); Наукова конференція до 120-річчя заснування Чернівецького університету (Чернівці, 1995); Міжнародна конференція "Поляриметрія і Еліпсометрія" (Польща, 1996); Міжнародна конференція "Кореляційна оптика" (Чернівці, 1997).

Публікації і особистий внесок дисертанта.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових робіт, перелік яких наведено в кінці автореферату. У процесі виконання роботи дисертант брав участь у постановці задач досліджень [5,6,10]; провів розрахунки функції Гріна та обчислення масового оператора екситон-фононої системи для різних механізмів релаксації [6,7]; розробив відповідні алгоритмічні програми та виконав усі числові розрахунки на ЕОМ [1-10].

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з передмови, вступу, трьох оригінальних розділів, висновків та списку літератури. Робота виконана на 152 сторінках, включає 14 рисунків, які займають 14 сторінок й список літератури, що містить 117 джерел і розташований на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Обґрунтування актуальності теми досліджень, висвітлення мети, наукової новизни і практичного значення роботи, основних положень, які виносяться на захист, надаються на початку представленої дисертації.

Далі пропонується огляд літератури по темі дисертації. Зроблено короткий аналіз як теоретичних, так і експериментальних робіт.

присвячених вивченню екситонних спектрів напівпровідників та механізмів релаксації екситонного збудження в ізотропних та анізотропних кристалах. Стисло розглянуто взаємодію лазерного випромінювання з напівпровідником та особливості міжчастинкових взаємодій. Зазначено основні внески провідних науковців у дослідження багаточастинкових систем.

Оригінальна частина дисертації починається з дослідження динаміки екситонної смуги поглинання при врахуванні непрямих вертикальних фотопереходів (НВФ). Показано, що основною причиною їх виникнення є наявність дипольного моменту екситонного переходу, який дозволяє отримати оператор екситон-фотонної взаємодії, що залежить від кутів орієнтації α вектора поляризації падаючого електромагнітного випромінювання відносно дипольного моменту екситона. Це приводить до ускладнення оператора енергії взаємодії світла з кристалом,

$$w = \sum_Q D_Q c_Q (\cos \alpha) [a_Q^+ + \sum_q (\operatorname{tg} \alpha) f(q) a_{Q+q}^+ \tilde{\varphi}_q + \sum_{q_1, q_2} \Pi(q_1, q_2) a_{Q+q_1+q_2}^+ \tilde{\varphi}_{q_1} \tilde{\varphi}_{q_2}], \quad (1)$$

який вже складається з трьох доданків, два з яких безпосередньо пов'язані з непрямим фотопереходом. Якщо перший описує традиційний прямий фотоперехід, то другий вже здійснює перерозподіл смуги поглинання, фізична природа якого пов'язана з народженням (або знищенням) низькочастотного лібраційного фонона і носить назву деполаризаційного НВФ, а третій доданок описує внесок непрямого фотопереходу у строго поляризовану смугу поглинання - монополаризаційний НВФ. У виразі (1) D_Q - функція фотон-екситонного зв'язку, c_Q - оператор знищення фотона з квазіімпульсом Q та частотою ω , (a_Q^+, a_Q) - оператори народження (знищення) екситона, $\tilde{\varphi}_q = B_q + B_{-q}^+$; (B_q^+, B_q) - оператори народження (знищення) лібраційних фононів з енергією W та квазіімпульсом q . Тут $f(q)$ та $\Pi(q_1, q_2)$ - безрозмірні функції, які характеризують відповідно деполаризаційну та монополаризаційну потрійну фотон-екситон-фононну взаємодію.

З іншого боку, сам кристал представимо у вигляді слабозвзаємодіючого газу екситонів і граткових фононів. Застосування традиційного методу розрахунків дозволило визначити смугу поглинання світла кристалом. Використовується апарат функцій Гріна, який дає

можливість розрахувати масовий оператор системи, дійсна Δ та уявна частина Γ якого визначають функцію форми екситонного поглинання. Вплив НВФ полягає в ускладненні масового оператору, який тепер складається з трьох частин, пов'язаних не тільки з прямими механізмами перетворення енергії фотона в екситон, але й з додатковим проявом лібраційних фононів. Отримано вираз для функції форми екситонного поглинання і у відносних одиницях він набуде вигляду:

$$S(x) = (\cos^2 \alpha) \frac{\Gamma(x) + [1 + 2\Pi(1 + 2\nu)]}{[x - \Delta(x)]^2 + \Gamma^2(x)} +$$

$$+(\sin^2 \alpha) f^2 \int_0^1 dy \left\{ \frac{\Gamma(x+W)\nu}{[x-y^2+W-\Delta(x+W)]^2 + \Gamma^2(x+W)} + \right.$$

$$\left. \frac{\Gamma(x-W)(1+\nu)}{[x-y^2-W-\Delta(x-W)]^2 + \Gamma^2(x-W)} \right\}, \quad (2)$$

який дозволяє провести аналіз впливу зовнішніх факторів на поведінку екситонних спектрів. Величина ν , що фігурує в останньому виразі визначає числа заповнень лібраційних фононів, а x - безрозмірна частота. До речі, другий доданок виразу (2) пов'язаний з народженням лібраційних фононів і описує антистоксовий НВФ, а третій відповідає за знищення лібраційних фононів і є стоксовою компонентою НВФ.

На основі зроблених розрахунків, проведено аналіз впливу зовнішніх факторів, таких як температура, частота і поляризація падаючого світла на формування спектрів поглинання.

Показано, що монополяризаційний НВФ відповідає за температурні аномалії спектру екситонного поглинання. Спостерігається нетипове для класичної теорії відгука зростання інтенсивності максимуму смуги поглинання зі збільшенням температури, при цьому напівширина смуги залишається незмінною. Досягнувши певного критичного значення, поглинання починає спадати з одночасним розширенням самої кривої. Слід відмітити, що значення критичної температури визначає як зміну поведінки максимуму поглинання, так і температурну зміну півширини смуги поглинання. Описана поведінка пов'язана з тим, що в області низьких температур основний внесок у коефіцієнт поглинання робить НВФ, який пов'язаний зі збудженням низькоенергетичних лібраційних

фононів. Для високих температур переважаючими вже будуть прямі фотопереходи та процеси розсіювання екситонів на ґраткових фонах. Крім температурних перетворень спектру поглинання монополяризаційний НВФ також змінює поглинаючу здатність середовища. Він значно посилює поглинання вздовж усього частотного діапазону екситонної смуги. Загальна площа під кривою збільшується порівнянно з чисто прямим фотопереходом, відповідно до внесків густини лібраційних фононів ν та величини монополяризаційної потрійної фотон-екситон-фононної функції зв'язку Π .

Роль деполаризаційного НВФ полягає у структуризації смуги поглинання при кутах поляризації α , відмінних від 0° , що проявляється в перекачці поглинання з основного максимуму в сателітні. Розташування їх по частотній шкалі визначається значенням енергії лібраційних фононів, які і обумовлюють появу цих додаткових максимумів поглинання. Температура кристалу впливає на висоту і швидкість росту сателітних компонент. Появляються три смуги поглинання, висота й півширина яких змінюється зі зміною температури. Величина сателітних піків при низьких температурах істотно різна, оскільки максимум антистоксової компоненти поглинання пропорційний числу заповнення лібраційних фононів ν , а величина піка стоксової компоненти величиною $(1 + \nu)$. Цим же і пояснюється прискорений ріст ширини смуги антистоксової компоненти зі зміною температури, оскільки зростання останньої стимулюється процесами розсіювання екситонів, які супроводжуються народженням лібраційних фононів. В області високих температур відбувається вирівнювання висоти сателітних піків, утворюється широка й слабоструктурована смуга екситонного поглинання.

З іншого боку, збільшення поляризаційного кута сприяє активізації додаткових сателітів поглинання. Спостерігається повільне зменшення головного максимуму і підсилення на крилах смуги поглинання стоксової та антистоксової лібраційних компонент. При істотних кутах поляризації отримується майже однакова інтенсивність трьох піків поглинання. В залежності від кількості використаної зовнішньої енергії висота піків буде модулюватися, а тому буде модулюватися і спектр поглинання.

Результати розрахунків повністю підтверджуються експериментальними даними, порівнянням і аналізом яких закінчується даний напрямок досліджень.

Але на екситонні спектри напівпровідників істотно впливають екситонні взаємодії, значні густини яких можливі при використанні потужних лазерних джерел. Тепер вже поглинаюча здатність середовища буде формуватися не тільки процесами фононної релаксації екситонного збудження, а й процесами екситон-екситонних зіткнень.

Оператор енергії нашого кристалу в області екситонних частот в цьому випадку має вигляд

$$H = \sum_k E_k a_k^+ a_k + \sum_q \Omega_q b_q^+ b_q + \sum_q W_q B_q^+ B_q + \frac{1}{N_a} \sum_{k,q} V(k,q) a_{k+q}^+ a_k (b_q + b_{-q}^+) + \frac{1}{2N_a} \sum_{\substack{k_1, k_2 \\ k_1', k_2'}} \Phi(k_1 - k_1') \delta(k_1 + k_2, k_1' + k_2') a_{k_2}^+ a_{k_1}^+ a_{k_2'} a_{k_1'}, \quad (3)$$

де δ - символ Кронекера, N_a - кількість атомів у кристалічній ґратці; $V(k,q)$, $\Phi(k_1 - k_1')$ - відповідно функції екситон-фононної та екситон-екситонної взаємодії; k - квазіімпульс екситона, E_k - його енергія; (b_q, b_q^+) - оператори ґраткових фононів з енергією Ω_q .

Ускладнення гамільтоніану кристалу ускладнює і масовий оператор системи, який вже буде залежати від густини екситонних станів N_k і складатиметься з двох частин: перша описує екситон-фононні процеси релаксації енергії, друга стосується екситон-екситонної релаксації енергії екситонного збудження:

$$M(\omega, \pm W) = \frac{1}{N_a} \sum_{k,q} |V(k,q)|^2 \left\{ \frac{1 + n_q + N_{k+q}}{\omega - E_{k+q} - \Omega_q \{\pm W\} - \Phi(0)N_{ex} - \frac{1}{N_a} \sum_{k_1} \Phi(k_1 + k) N_{k_1}} + \frac{n_q - N_{k+q}}{\omega - E_{k+q} + \Omega_q \{\pm W\} - \Phi(0)N_{ex} - \frac{1}{N_a} \sum_{k_1} \Phi(k_1 + k) N_{k_1}} \right\} + \Phi(0)N_{ex} + \frac{1}{N_a} \sum_{k_1} \Phi(k_1 + k) N_{k_1} + \frac{4}{N_a} \sum_{k_1, k_2} \Phi(k_1) \left\{ \frac{[\Phi^2(k_1) + \Phi(k_1)\Phi(k_1 - k_2)] [N_{k_1} N_{k_2} - N_{k_2 - k_1} (N_{k_1 + k} - N_{k_2}) + N_{k_2}]}{\omega - E_{k_2 - k_1} - E_{k_1 + k} + E_{k_2} - 2\Phi(0)N_{ex} - \frac{2}{N_a} \sum_{k_3} 2\Phi(k_3 - k_1 - k) N_{k_3}} \right\}. \quad (4)$$

Величини $\{\pm W\}$, які фігурують у виразі (4), підкреслюють той факт, що

процеси взаємодії екситонів з ґратковими фонами, будуть ускладнені наявністю додаткової релаксаційної підсистеми кристала - лібраційних фононів. Останні, як було показано у попередньому розділі, перерозподіляють поглинання в системі, а отже і спричинюють ускладнення відгуку кристала на зовнішній вплив.

Поглинання системи стає функцією як чисел заповнення ґраткових фононів n_q , так і густини екситонних станів N_k кристала. Отже, поглинаюча здатність середовища формується зараз не тільки процесами фононної релаксації екситонного збудження, але й підвищується роль екситон-екситонних зіткнень. Відповідно змінюється і пропускання системою лазерного випромінювання. Вигляд його буде визначатися реперною (вбраною) частотою спостереження максимального поглинання в системі. Так, для лазерної хвилі, частота якої знаходиться в області нижче максимуму стокової компоненти, крива поглинання, як функція густини екситонів, має три горби. Для частоти вище стокової компоненти, але під головним піком, з'являються два максимуми у смузі поглинання $K(N)$. Якщо ж частота лазерного збудження знаходиться між головним екситонним піком та його антистоковою компонентою, то можливий лише один екстремум.

Для дослідження густини екситонних станів напівпровідника, необхідно було розв'язати рівняння енергетичного балансу, яке у стаціонарному випадку може бути записано як

$$IK(\omega, \alpha, N) = N. \quad (5)$$

Це рівняння дозволяє теоретично описати внутрішній зворотній зв'язок і визначити функціональну залежність густини екситонів N від інтенсивності падаючої хвилі I - $N(I)$, а, отже, повністю визначити властивості оптичного середовища і знайти його реакцію на зовнішню дію. Необхідність такого дослідження випливає з того, що сам напівпровідник здатний забезпечити в системі зворотній зв'язок і виконувати роль резонатора. Опромінююче світло так впливає на кристал, що викликає немонотонну зміну густини екситонів з послідовним збільшенням інтенсивності чи поляризації вхідного сигналу. Таким чином, для системи характерний внутрішній гістерезис, і необхідність у зовнішньому зворотньому зв'язку відпадає.

Відповідно до кутів між дипольним моментом та вектором поляризації падаючого світла, вибраної частоти, а також функцій монополяризаційної, деполаризаційної потріпної фотон-екситон-фононної взаємодії і екситон-екситонного зв'язку, отримано різноманітні вихідні стани опроміненого напівпровідника, що включають як явище звичайної оптичної бістабільності так і оптичної мультистабільності.

Характер відгуку кристала на зовнішнє випромінювання визначається формою залежності кривої поглинання $K(N)$, на яку істотно впливає вибір частоти лазерного пучка. Для випадку частоти між основним екситонним максимумом та його антистоксовою компонентою, коли в спектрі поглинання реалізується тільки одна чисто екситонна компонента, у випадку строго поляризованого випромінювання, рівняння (5) має тільки три розв'язки. Тоді в кристалі існує лише одна область оптичної бістабільності, для якої можливі два стаціонарні стани з різною інтенсивністю вихідного сигналу. Аналіз світла, що виходить з кристала, був проведений з використанням закону Бугера-Бера

$$I_0 = I \exp[-K(I)d], \quad (6)$$

де I_0 інтенсивність вихідного сигналу; d - товщина кристала. Залежність $K(I)$ виникає у зв'язку з тим, що густина екситонів N стає функцією вхідної інтенсивності.

Повільне збільшення кута поляризації приводить до виникнення ще однієї компоненти у смугі поглинання, а саме - антистоксової компоненти. Тоді, у пропусканні кристала реалізуються дві гістерезисні петлі, що дає дві різні області значень вхідної інтенсивності, де рівняння (5) буде мати три розв'язки. Подальше зростання поляризаційного кута здійснює зближення двох ділянок оптичної бістабільності при одночасній зміні розмірів гістерезисних петель (зменшення екситонної та збільшення антистоксової коливної ОБ).

Зменшення частоти зовнішнього випромінювання приводить до ускладнення динаміки нелінійних явищ у напівпровіднику. А збільшення кута поляризації допускає можливість існування трьох ділянок інтенсивностей вхідного сигналу, які б могли потрапити в область внутрішнього гістерезиса системи та реалізувати внутрішній зворотній зв'язок. Виникає можливість утворення в кристалі мультистабільних станів. При зміні кута α від 0^0 до 30^0 отримується смуга поглинання $K(N)$,

що має складний трипіковий характер. Це спричинює ускладнення вихідної інтенсивності і дозволяє одночасно працювати або в стані перемикання або у тристабільному вихідному режимі. Такий складний характер вихідних характеристик зі зміною кута поляризації підтверджено експериментальними роботами по дослідженню нелінійного пропускання кристалів типу CdS.

Ангармонізм фононів в екситонній підсистемі кристала, який також можливий при значних потужностях зовнішньої накачки, істотно впливає на спектр поглинання. Тому для вивчення цих процесів необхідно врахувати доданки, які виникають при розкладі матричних елементів в ряд по зміщеннях атомів з положення рівноваги і пов'язані з лінійним й квадратичним по фонах оператором енергії екситон-екситонної взаємодії. Але лінійний оператор не викликає частотного перерозподілу поглинання в області екситонного резонансу і не змінює відгук кристала зі зміною зовнішніх факторів, як-от: температура або частота.

Отже, показано, що лише нелінійні по фонах компоненти оператора екситон-екситонної взаємодії істотно впливають на спектри поглинання в області екситонних резонансів, і тому у виразі (3) враховується ще один доданок:

$$H_{ex}^{(2)} = \frac{1}{2N_a} \sum_{\substack{k_1, k_2 \\ k'_1, k'_2, q}} P(k_2 - k'_2) \delta(k_1 + k_2 + q, k'_1 + k'_2) a_{k_1+q}^+ a_{k_2+q}^+ a_{k_1} a_{k_2} \Phi_q \Phi_q. \quad (7)$$

Тепер оператор енергії нашої системи в термінах вторинного квантування буде складатися з п'яти доданків: оператора енергії вільних екситонів та фононів, оператора екситон-фононної та екситон-екситонної взаємодії, а також з квадратичного по фонах оператора енергії екситон-екситонної взаємодії. Тут $P(k)$ - функція нелінійного екситон-екситон-фононного зв'язку, $\Phi_q = b_q + b_{-q}^+$. Так, кінцевий вигляд гамільтоніану кристала може бути записаний як:

$$H = \sum_k E_k a_k^+ a_k + \sum_q \Omega_q b_q^+ b_q + \frac{1}{\sqrt{N_a}} \sum_{k, q} V(k, q) a_{k+q}^+ a_k (b_q + b_{-q}^+) + \frac{1}{2N_a} \sum_{k, k_1, k_2} \Phi(k) a_{k_1}^+ a_{k_2}^+ a_{k_1+k_2} a_{k_2-k} + \frac{1}{2N_a} \sum_{k, k_1, k_2, q} P(k) a_{k_1+q}^+ a_{k_2+q}^+ a_{k_1+k_2} a_{k_2-k} \hat{\Phi}_q \Phi_q. \quad (8)$$

Наявність в ньому фононних операторів спричинює появу додаткових членів в масовому операторі, а це серйозно впливає на величину зсува екситонного рівня Δ та півширину спектральної лінії Γ :

$$\Delta(\omega, k) = \frac{1}{N_a} \sum_{k, q} |V(k, q)|^2 \left\{ \frac{n_q - N_{k+q}}{\omega - E_{k+q} + \Omega_q - 2N_a(0)N_{ex} - \frac{1}{N_a} (3 + 4n_q) \sum_{k_2} P(k_2)} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{1}{(N_{k_2} + N_{k_2+q}) + \frac{1}{N_a} \sum_{k_2} P(k_1) [2N_{k_1} + 2N_{k_2} + 4N_{k_2} N_{k_1} + 2N_{k_2} N_{k_1+q}]} \right\} + \\ 2\Phi(0)N_{ex} + 2P(0)(1 + 2n_q)N_{ex}; \\ \Gamma(\omega, k) = \frac{1}{N_a} \sum_{k, q} |V(k, q)|^2 \{ (n_q - N_{k+q}) \times \\ \delta(\omega - E_{k+q} + \Omega_q - 2\Phi(0)N_{ex} - \frac{1}{N_a} (3 + 4n_q) \sum_{k_2} P(k_2) (N_{k_2} + N_{k_2+q}) + \\ \frac{1}{N_a} \sum_{k_2} P(k_1) [2N_{k_1} + 2N_{k_2} + 4N_{k_2} N_{k_1} + 2N_{k_2} N_{k_1+q}] + \\ (n_q + 1 + N_{k+q}) \times \\ \delta(\omega - E_{k+q} - \Omega_q - 2\Phi(0)N_{ex} - \frac{1}{N_a} (1 + 4n_q) \sum_{k_2} P(k_2) (N_{k_2} + N_{k_2+q}) - \\ \frac{1}{N_a} \sum_{k_2} P(k_1) [2N_{k_1} + 2N_{k_2} + 4N_{k_2} N_{k_1} + 2N_{k_2} N_{k_1+q}]) \}. \quad (9)$$

• Величина N_{ex} виразів (4), (9) визначається як $\frac{1}{N_a} \sum_k N_k$.

Температурна залежність густини екситонів зумовлює температурну залежність величин Δ та Γ , а це, в свою чергу, викликає температурні аномалії і коефіцієнта поглинання системи. Врахування нелінійності екситонів та фононів у напівпровіднику сприяє створенню додаткових рухів вздовж частотної шкали, посилюючи або послаблюючи вплив екситон-екситонної взаємодії. Напрямок руху визначається знаком функції нелінійного екситон-екситон-фононного зв'язку $P(0)$, яка присутня у виразі для Δ у (9). Показано, що додатний знак $P(0)$ (відштовхування між екситонами) викликає відхилення від традиційної поведінки спектрів

поглинання зі зміною температури. В цьому випадку можливим є існування критичної температури кристалу, відносно якої відбувається інверсія руху максимума екситонного поглинання. З'являється деяка гранична частота, яка істотно залежить від співвідношення функції нелінійного екситон-фононного та екситон-екситонного зв'язків, а також визначається температурою кристала. Це приводить до зміни характеру трансформації екситонної смуги поглинання, що проявляється у поступовому зміщенні останньої в область менших частот при низьких температурах, коли в системі превалюють сили міжекситонного притягування. При значних температурах, які перевищують критичну, відбувається зсув спектра у височастотну область. Пов'язано це з переважаючим впливом при високих температурах нелінійних екситон-екситон-фононних взаємодій на формування спектра поглинання. Невелике збільшення величини нелінійності взаємодії екситонів та фононів зсуває граничну частоту в бік більших значень і сприяє зменшенню температури, для якої ця частота досягається. Зміною функції нелінійного екситон-екситон-фононного зв'язку, можна отримати граничну частоту в різних частотних діапазонах, а отже, і модулювати температуру її спостереження. Проведено розрахунок бістабільних станів кристалу і вказано на протилежний характер частотної динаміки гістерезисної кривої ОБ для низько- та високотемпературних областей. Показано, що температури, при яких реалізується граничне значення частоти у спектрах поглинання, характеризуються ще і найменшою інтенсивністю вхідного сигналу для стабільних вихідних станів. Підвищення константи зв'язку істотно зменшує температурну область реалізації оптичної бістабільності. За рахунок переважаючого впливу нелінійного екситон-екситон-фононного зв'язку над екситон-екситонним інтенсивність росту густини екситонів не досягає того критичного значення, яке дало б можливість здійснити стрибок у їх кількості для отримання оптичної бістабільності у дуже високій температурній області. Проведено співставлення експериментальних результатів з теоретичними висновками.

Окрім того, кожний розділ містить висновки та основні результати з проведених досліджень.

Основні результати та висновки.

1. Використовуючи метод запізнюючих функцій Гріна, отримано аналітичний вираз для спектрального розподілу смуги екситонного поглинання у випадку, коли на фоні прямого фотопереходу відбувається збудження й непрямих фотопереходів. Проведено детальний аналіз трансформації екситонних спектрів зі зміною поляризації зовнішньої хвилі та температури кристала.
2. Непрямий вертикальний фотоперехід (НВФ) має дві складові-монополяризаційну та деполяризаційну, суттєво різні за своїм впливом на спектр екситонного поглинання. Монополяризаційна компонента НВФ зумовлює температурне зростання поглинаючої здатності строго поляризованих екситонних смуг, внаслідок участі в процесі поглинання світла екситоном реального, а не віртуального лібраційного фону. Можливість народження і знищення коливного кванта під безпосередньою дією зовнішньої електромагнітної хвилі веде до того, що деполяризаційна компонента НВФ спричинює появу на хвостах кривої поглинання сателітних піків, положення яких визначається енергією лібраційних фоновів.
3. Наявність двох каналів дисипації енергії світлової хвилі пояснює аномальну поведінку екситонних спектрів поглинання зі зміною температури, яка проявляється в зростанні висоти піка поглинання до певної критичної температури (працює НВФ та лібраційні фонові) і подальшому його спаданні із збільшенням температури (внаслідок екситон-фоновної взаємодії з участю ґраткових фоновів).
4. Зміна кута поляризації зовнішньої електромагнітної хвилі та збільшення температури кристала ведуть до перекачки енергії з головного піка в стоксові компоненти і значного структурування екситонного спектру поглинання.
5. Алгоритмізовано та реалізовано задачу визначення спектральних і поляризаційних параметрів екситонного поглинання системи на шляху самоузгодженого розв'язання рівняння руху для екситонів. Показано, що густина екситонів, які збуджуються лазерною хвилею, стає різко немонотонною (S -подібною) функцією інтенсивності останньої, що й забезпечує внутрішній обернений зв'язок в екситон-фоновній системі.
6. У напівпровідниках з НВФ густина екситонів як функція інтенсивності може мати від однієї до трьох S -подібних гілок, в залежності від

розташування по відношенню до максимуму поглинання опромінюючої частоти вхідного сигналу на дисперсійній шкалі екситонного поглинання. Для енергії падаючого фотону меншої енергії екситонного рівня збудження, заселеність останнього має складну і нестандартну поведінку зі зміною інтенсивності лазерної хвилі, що зумовлено накладанням процесів стокового і антистокового розсіювання енергії екситона на лібраційних фонах.

7. Врахування екситон-екситонної взаємодії (сил притягання) в кристалах з НВФ дозволяє модуляцією частоти, інтенсивності й поляризації вхідного сигналу отримати цілу низку можливих змін на виході кристала, а саме
 - звичайну бістабільність;
 - дві області оптичної бістабільності, які отримуються для різних інтенсивностей вхідного сигналу;
 - переведення системи з процесу перемикавання у двостабільний вихідний режим зі зміною інтенсивності;
 - область тристабільного оптичного режиму на виході;
 - мультистабільний - двостабільний режим (або навпаки), що визначається величиною вхідної інтенсивності.
8. Нелінійна екситон-екситон-фононна взаємодія приводить до зміни характеру міжекситонного зв'язку та додаткового зміщення екситонних смуг поглинання, напрямком якого визначається знаком константи взаємодії.
9. Для додатного знаку функції екситон-екситон-фононної взаємодії (відштовхування між екситонами) в напівпровіднику існує критична температура, при якій відбувається інверсія напрямку температурного зсуву екситонної смуги поглинання.
10. Збільшення густини екситонного газу в кристалі актуалізує сили відштовхування в екситонній підсистемі та істотно змінює динаміку оптичної бістабільності: зростання частоти лазерного випромінювання супроводжується зменшенням гістерезисної петлі в пропусканні світла кристалом для області низьких температур і приводить до значного розширення меж реалізації бістабільних станів при високих температурах (переважають сили відштовхування між екситонами).

Список публікацій по темі дисертаційної роботи:

1. Ницович Б.М., Зенкова К.Ю., Григоращук И.М. Поляризационная нелинейность полупроводников/ The First International Conference on Material Science of Chalcogenide and Diamond-Structure Semiconductors. - Chernivtsy. - 1994.- Abstract Booklet. Vol.1.- P.230.
2. Зенкова К.Ю., Ницович Б.М., Павлуш О.М. Особливості екситонних спектрів для непрямих вертикальних фотопереходів/ В. кн.: Матеріали наукової конференції викладачів, співробітників та студентів, присвяченої 120-річчю заснування Чернівецького університету. Том2. Фізико-математичні науки. - Чернівці: Рута. - 1995. - Т.2. - С.65.
3. Ницович Б.М., Зенкова К.Ю. Оптическая бистабильность экситонів// Збірник доповідей Міжнародної наукової конференції, присвяченої 150-річчю від дня народження І.Пулюя. - Львів.- 1995 - С. 221.
4. Nitsovich B.M., Zenkova C.Yu. Dynamical Nonlinearity of Semiconductors at Exciton Frequencies// International conference "Photonics-95". - Prague, (Czech Republic).- EOS annual meeting digest series: - Vol.B. - 1995. - P. 630-633.
5. Nitsovich B.M., Zenkova C.Yu. The Theory of Optical Bistability in the Region of Exciton Resonances// Optical Engineering. - 1995. - V.34, №4. - P. 1072-1078.
6. Nitsovich B.M., Zenkova C.Yu. Optical Multistability of Exciton States in Semiconductors// Proc. SPIE. - 1995. - V.2647.-P. 441-451.
7. Kolosyuk V.M., Nitsovich B.M., Zenkova C.Yu. The Libration Anomalies of Exciton Spectra// Proc. SPIE. - 1995. - V.2647.-P.513-520.
8. Nitsovich B.M., Zenkova C.Yu. Optical Multistability of Layered Semiconductors//International School-Conference Physical Problems in Material Science of Semiconductors. Chernivtsy, Ukraine. - 1995. Abstract Booklet. - P.275.
9. Ницович Б.М., Зенкова К.Ю. Поляризационные аномалии экситонных спектров// Физика твердого тела. - 1996. - Т.38, №3. - С. 761-763.
10. Nitsovich Z.B., Zenkova C.Yu., Nitsovich B.M. Polarimetry of Semiconductor Exciton Spectra// Proc. SPIE. - 1996. - V.3094. - P.184-187.

Зенкова К.Ю. Динаміка міжквазічастинкових взаємодій в області екситонних резонансів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 - оптика, лазерна фізика. - Чернівецький державний університет, Чернівці, 1997.

Захищається 10 наукових праць, що містять результати по дослідженню екситонних спектрів і впливу останніх на формування оптичного відгука кристала. Вивчено роль різних механізмів поглинання світла у формуванні поглинаючої здатності кристала. Подається аналіз динаміки екситонів при впливі додаткової нелінійної взаємодії квазічастинок у випадку високого рівня накачки кристала. Визначено вплив основних характеристик лазерного випромінювання (інтенсивності, частоти, поляризації), а також температури кристала на функцію форми смуги екситонного поглинання. Явища оптичної бістабільності та мультистабільності вивчаються в рамках запропонованих теоретичних моделей збудження напівпровідникового кристала.

Ключові слова: екситон, міжквазічастинкова взаємодія, екситонний резонанс, динаміка екситонів, форма смуги екситонного поглинання, оптичний відгук, оптична бістабільність, мультистабільність.

Зенкова К.Ю. Динамика межквазичастичных взаимодействий в области экситонных резонансов. - Рукопись.

Дисертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - оптика, лазерная физика. - Черновицкий государственный университет, Черновцы, 1997.

Защищается 10 научных работ, содержащих исследования экситонных спектров поглощения и влияния последних на формирование оптического отклика кристалла. Изучено роль различных механизмов поглощения света в формировании поглощательной способности кристалла. Дается анализ динамики экситонов при учете дополнительного нелинейного взаимодействия квазичастиц в случае высокого уровня накачки кристалла. Определено влияние основных характеристик лазерного излучения (интенсивности, частоты, поляризации), а также температуры кристалла на функцию формы полосы экситонного поглощения. Явления оптической бистабильности и мультистабильности исследуются в рамках предложенных теоретических моделей возбуждений полупроводникового кристалла.

Ключевые слова: экситон, межквазичастичное взаимодействие, экситонный резонанс, динамика экситонов, форма полосы экситонного

поглощения, оптический отклик, оптическая бистабильность, мультистабильность.

Zenkova S.Yu. The Dynamics of Interquasi - Particle Interactions in the Region of Exciton Resonances. -Manuscript.

Thesis applied for CandSci degree in Physics and Mathematics on speciality 01.04.05 - Optics, Laser Physics. - Chernivtsy State University, Chernivtsy, 1997.

Defends 10 scientific papers containing the results of exciton absorption spectra investigations and their effects on the crystal optical response formation. The role of different light absorption mechanisms in creating the crystal absorption power is studied. An analysis of exciton dynamics, including additional nonlinear quasi-particle interactions at a high crystal excitation level, is presented. The influence of the basic features of laser radiation (intensity, frequency, polarization) as well as crystal temperature on the form function of the exciton absorption band is defined. The phenomena of optical bistability and multistability are considered in the framework of the suggested theoretical models of semiconductor crystal excitation.

Key words: *exciton, interquasi - particle interactions, exciton resonances, exciton dynamics, the exciton absorption band form, optical response, optical bistability, multistability.*

M/1222

Підписано до друку 22.09.97.
Формат 60x84/16.Папір друкарський.
Друк офсетний. Ум.друк.арк. 1,0.
Обл.-вид. арк. 1,1. Тираж 100 прим.
Зам. 302.

Друкарня видавництва "Рута" Чернівецького держуніверситету
274012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

AB 38.633