

**ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

СЛІПУХІНА Ірина Андріївна

УДК 535.343.2

**ЛАЗЕРНА СПЕКТРОСКОПІЯ
КРИСТАЛІВ CdP_2 ТЕТРАГОНАЛЬНОЇ
МОДИФІКАЦІЇ**

01.04.10 — фізика напівпровідників і діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ЛУЦЬК-1998

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі експериментальної і теоретичної фізики та астрономії фізико-математичного факультету Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, **Пацкун Іван Іванович**, НПУ ім. М.П. Драгоманова, доцент кафедри ЕТФА

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Фекешгазі Іштван Вінцейович**, завідувач відділу нелінійних оптичних систем Інституту фізики напівпровідників УНАН

кандидат фізико-математичних наук, доцент **Богданюк Микола Сергійович**, декан фізичного факультету Волинського державного університету ім. Лесі Українки

Провідна установа: Київський університет ім. Тараса Шевченка, кафедра оптики, Міністерство освіти України, м. Київ.

Захист відбудеться "14" жовтня 1998 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 32.051.01 Волинського державного університету ім. Лесі Українки (263000, м. Луцьк, вул. Потапова, 9).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Волинського державного університету ім. Лесі Українки (263000, м. Луцьк, вул. Винниченка, 30).

Автореферат розісланий "11" вересня 1998 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

(підпис)

Божко В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Маловивчений напівпровідник CdP_2 тетрагональної модифікації (β) оцінюється як матеріал, перспективний в області прикладної нелінійної оптики, квантової електроніки і оптоелектроніки. Але будь-яка можливість практичного застосування напівпровідника вимагає детального дослідження його фізико-хімічних і фізичних властивостей. Фізичні властивості зумовлюються зонною структурою кристалу та наявністю домішок в його об'ємі. Тому їх вивчення є однією з найбільш актуальних задач спектроскопічних досліджень як в теоретичному, так і в практичному плані. Останні, в свою чергу, вимагають нових ефективних методів. В цьому відношенні особливий інтерес являє собою амплітудна і поляризаційна лазерно-модуляційна спектроскопія напівпровідників. Суттєвою перевагою цієї спектроскопії є те, що вона дозволяє вивчати як вимушені когерентні двофотонні, так і однофотонні переходи електронів в напівпровідниках. Причому відкриваються унікальні можливості дослідження однофотонних явищ, що пов'язані з існуванням переходів в стани з керованою заселеністю, в порівнянні з традиційними широкозастосовуваними спектроскопічними методами стаціонарного поглинання, відбивання, люмінесценції і фотопровідності. Зокрема, ця перевага полягає в її: 1) диференціальності, в результаті чого досягається незалежність спектра індукованої лазерним імпульсом зміни коефіцієнта поглинання зондувальної хвилі $\propto K \propto I_2$ від інтенсивного фону стаціонарного розсіювання світлової енергії в кристалі; 2) чутливості до зміни знаку заповнення досліджуваних центрів при перезарядці їх лазерним світлом; 3) можливості вимірювати релаксацію заповнення; 4) можливості вимірювати інтенсивні залежності $\propto K \propto I_2$ в широкій області значень інтенсивності лазерного випромінювання її; 5) високій чутливості та інше.

Одним із найбільш цікавих і найменш вивчених нелінійних оптичних явищ в напівпровідниках є резонансне двофотонне поглинання (РДФП), в теорії якого проміжними віртуальними станами є реальні стани. Але дослідження РДФП значно ускладнюється тим, що через такі стани може відбуватись і двоступеневе поглинання (ДСП). Тому важливою являється розробка методу чіткого розділення цих процесів.

Легування кристалів вносить в більшості випадків значні зміни в оптичні властивості напівпровідників. Тому дослідження впливу легування на нелінійні і нерівноважні властивості CdP_2 дасть змогу задовольнити значний інтерес до цього питання як фізичних наук, так і матеріалознавства і приладобудування.

Актуальність теми. Оптичні властивості напівпровідника CdP_2 досліджені ще зовсім мало і заслуговують далеко більшої уваги. Тим більше, що вже відома перспективність його

практичного застосування, яка підтверджується реальним використанням цього матеріалу для створення широкого спектра різноманітних електронних приладів: діодних структур з елементами перемикання, фотоприймачів лазерного випромінювання, приладів для ізоформного подовження тривалості лазерних імпульсів і обмеження потужності лазерного випромінювання. Тому вивчення нелінійних когерентних оптичних властивостей, характеристик електронних станів в зонах і властивостей домішкових центрів маловивченого і перспективного в нелінійній оптиці, квантовій і оптоелектроніках кристалів $\square$ -CdP₂ з використанням легування і сучасної лазерної спектроскопії являється **актуальною задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась згідно з Планом науково-дослідницької роботи Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова за напрямком: "Проблеми природничо-математичних наук" і темі "Вплив ростових і стимульованих дефектів на нелінійно-адсорбційні властивості фосфідів і ZnSe".

Мета і задачі дослідження полягали в наступному: провести комплекс спектральних, інтенсивносних, кутових, поляризаційних і релаксаційних лазерно-модуляційних спектроскопічних досліджень зонних і домішкових характеристик спеціально не легованих і легованих ізоелектронними Bi і Zn та донорною Se домішками напівпровідникових кристалів CdP₂ тетрагональної модифікації, зокрема дослідити як власні, так і резонансні когерентні двофотонні переходи (ДФП) електронів та характерні особливості густини і симетрії квантових станів електронів у зоні провідності і в валентній зоні, а також оптичні властивості цього матеріалу, що обумовлені наявністю домішок.

Наукова новизна. Вперше проведено комплекс спектральних, інтенсивносних, поляризаційних, кутових і релаксаційних досліджень нелінійного поглинання світла в нелегованих і легованих Bi, Zn і Se монокристалах CdP₂ тетрагональної модифікації методами лазерно-модуляційної спектроскопії.

Вперше дослідженнями резонансного двофотонного поглинання в CdP₂ виявлено спектральну лінію РДФП при енергії квантів зондувальної хвилі $h\nu_2 = 1.43$ еВ і неодимового лазера $h\nu_1 = 1.17$ еВ. Теоретичний аналіз РДФП показав, що РДФП відбувається через домішкові рівні d_3 з глибиною залягання $E_c - 0.85$ еВ, значення коефіцієнта РДФП становить 0.028 см/мВт, а час поперечної релаксації електронів при РДФП дорівнює $4.3 \cdot 10^{-14}$ с.

Вперше дослідженнями кутових залежностей власного ДФП в CdP₂ виявлено, що в області енергії двох квантів $h\nu_2 + h\nu_1 = (2.5-3.11)$ еВ ДФП відбувається між зонами $\Gamma_7(\Gamma_4) \rightarrow \Gamma_7(\Gamma_3)$, $\Gamma_7(\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_7(\Gamma_3)$, $\Gamma_6(\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_6(\Gamma_1)$. Визначено тип симетрії дна зони провідності і вершини валентної зони: Γ_6 і Γ_7 відповідно. В С-зоні на глибині 0.46 еВ виявлено Γ_7 -точку і у валентній зоні на

глибинах 0.02 eV і 0.35 eV Γ_6 і Γ_7 точки відповідно. Показано, що всі двофотонні переходи власного ДФП є дозволено-забороненого (д-з) типу.

Виявлено донорно-акцепторні комплекси, які складаються з донорів і акцепторів, що займають найближчі вузли решітки. Для них визначено енергію перекриття для найбільш близьких пар, проведено пояснення поля ризаційних залежностей смуг поглинання і розраховано інтенсивності за лежності зміни коефіцієнта поглинання зондувальної хвилі $\square_2 \square K \square \square_2 \square$, наведеної хвилею накачування $\square_1$ на переходах між донором і акцептором. Зроблено припущення про природу цих комплексів.

Проведено дослідження особливостей густини станів електронів в С— і V-зонах і локальних рівнів в забороненій зоні. Виявлено, що в нелегованих зразках існують три типи донорних центрів з рівнями енергії d_1 , d_2 , d_3 , які залягають на глибинах $E_c-0.43$ eV, $E_c-0.61$ eV, $E_c-0.85$ eV і центри з локальними рівнями $E_v+0.45$ і $E_v+0.84$ eV. Локальні рівні d_1 , d_2 , d_3 , проявляються також і у всіх спектрах легованих кристалів. Крім цього, в зразках, легованих Ві, виявлено ще рівні a_1 , I a'_1 які залягають відповідно на глибині 1.72 і 1.86 eV від дна зони провідності. Обґрунтовано припускається належність рівнів a_1 і a'_1 одним і тим же тризарядним центрам, якими є комплекси, що складаються з двозарядних вакансій Cd і ізоелектронних домішок Zn, атоми якого заміщують кадмій у вузлах кристалічної ґратки. Встановлено, що з цими комплексами також пов'язані вузькі симетричні лінії 1.27 і 1.30 eV, причому перша з них належить ДФП через віртуальні стани Z^v з участю фотона з енергією 1.27 eV і LA-фонона з енергією 0.30 meV. Виявлено, що оптичні переходи між С-зоною і центрами $E_v+0.45$ eV і $E_v+0.84$ eV є забороненими. Приводиться пояснення, згідно якого рівень $E_v+0.45$ eV, очевидно, належить вакансіям кадмію, а рівень $E_v+0.84$ eV - домішковим атомам, які займають вузли Cd і створюють глибокі акцепторні центри, якими можуть бути атоми Си, а не Zn, як було припущено в ряді робіт з цієї проблеми. На спектрах зразків, легованих Se, встановлено три нові спектральні лінії з максимумами при $h\nu_2 = 1.63$; 1.67; 1.71 eV. Показано вірогідність того, що лінія 1.67 eV належить переходам між основними станами комплексів, які складаються з донорних центрів Se, що займає вузли фосфору і неконтрольованих акцепторних центрів, а лінії 1.63 і 1.71 eV є фононними повтореннями лінії 1.67 eV.

Практичне значення роботи. Експериментально реалізовано на $\square$ -CdP₂ новий метод неруйнівної діагностики особливостей зонної структури і локальних центрів в забороненій зоні напівпровідників, що ґрунтується на дослідженні модуляції лазерним імпульсом стаціонарного поглинання зондувального випромінювання. Визначено природу і параметри глибоких локальних центрів в $\square$ -CdP₂ і їх залежності від легування.

Розвиток методів розділення когерентних і некогерентних нелінійних процесів поглинання і їх дослідження в широкозонних напівпровідниках має практичне значення для підвищення

точності, достовірності і розширення можливостей спектроскопії нелінійних оптичних властивостей, зонної структури, глибоких локальних станів, генераційно-рекомбінаційних процесів в напівпровідниках.

Одержані результати можуть бути використані як для більш глибокого розкриття фізичних принципів роботи і вдосконалення уже виготовлених на основі $\square$ -CdP2 електронних елементів і приладів (дифузійних р-п-переходів, коректорів просторово-часового розподілу лазерних пучків, датчиків сильних магнітних полів, діодних структур з елементами перемикачів, фотоприймачів лазерного випромінювання, приладів для ізоформного подовження тривалості лазерних імпульсів і обмеження потужності лазерного випромінювання) так і при розробці різноманітного обладнання в області нелінійної оптики, квантової та оптоелектроніки. Зокрема, результати роботи по дослідженню резонансних ефектів ДФП можуть бути використані при підборі селективних по спектру нелінійних матеріалів з підвищеною оптичною нелінійністю для цілей квантової електроніки.

Одержані експериментальні результати і їх інтерпретація можуть мати також важливе значення для розвитку теорії всього класу сполук $A^2B^S_2$

На захист виноситься наступне:

1. Виявлення в кристалах $\square$ -CdP2 наявності РДФП при сумарній енергії двох фотонів 2.60 еВ, яке здійснюється через реальний проміжний рівень d3, що залягає в забороненій зоні на глибині $\epsilon_c - 0.86$ еВ; визначення часу поперечної релаксації РДФП, поперечного перерізу домішкового поглинання лазерного випромінювання, константи РДФП, рівноважної заселеності d-центрів; резонансні двофотонні переходи в Р-CdP2 є дозволено-дозволеного (д-д) типу.
2. Визначення методами амплітудної лазерно-модуляційної спектроскопії системи критичних точок зони Вріллюена першого роду і характеристики глибоких локальних центрів в забороненій зоні Р-CdP2. Встановлення в кристалах Р-CdP2 наявності донорно-акцепторних комплексів.
3. Визначення енергетичної структури і симетрії електронних станів у валентній зоні і в зоні провідності Р-CdP2 за спектральними і кутовими залежностями власного ДФП.
4. Встановлення суттєвої зміни оптичних характеристик кристалів р-CdP2 при легуванні їх ізоелектронними домішками Ві і Zn і донорною домішкою Se, що сприяє більш виразному проявленню на спектральних, інтенсивносних і релаксаційних залежностях $DK(\lambda_2)$ зонної і домішкової структури.

Особистий внесок автора. Автору належить: 1) участь в створенні експериментальної установки амплітудної лазерно-модуляційної спектроскопії; 2) участь в отриманні всіх експериментальних результатів; 3) участь в інтерпретації і обґрунтуванні експериментальних

даних, визначенні їх місця серед результатів, отриманих іншими авторами; 4) оформлення результатів у вигляді наукових праць.

Ступінь достовірності та обґрунтування отриманих результатів. Достовірність та ступінь обґрунтування одержаних результатів за безпечується: поелементною атестованістю експериментальної амплітудної лазерно-модуляційної установки; статистичними методами обробки експериментальних величин; виключенням промахів і поправок шляхом коректування експериментальних параметрів за результатами систематичних калібровочних вимірювань на легованих міддю еталонних кристалах ZnSe (Байду-лаева А., Мозоль П.Е., Пацкун К.И., Сальков Е.А., Фекешгази И.В. "Способ неразрушающего контроля концентрации глубоких примесей в твердых телах". Авторское свидетельство № 990026. Зарегистрировано в Государст-венном реестре изобретений СССР 14 сентября 1982 года), параметри яких були вивірені різними методами і в різних лабораторіях; доброю відтворюваністю одержаних результатів; узгодженістю експериментальних даних з теоретичними розрахунками і сучасними уявленнями фізики широкозонних напівпровідників; неальтернативністю і несуперечливістю побудованих інтерпретаційних моделей експериментальних результатів; апробованістю методики, яка проводилась шляхом співставлення результатів вимірювань добре вивчених кристалів (ZnSe, GaP та ін.) з відповідними, відомими з літератури даними, які були одержані іншими методами (фотопровідності, фотокатодолюмінесценції, рентгенолюмінесценції, спектрів пропускання і відбивання); узгодженістю між собою результатів проведених комплексних вимірювань, зокрема, інтенсивносних, поляризаційних, кутових, релаксаційних і спектральних. Відлік проводився по двоканальній схемі, за якою один канал з прямим відліком використовується як вимірювальний, а другий як канал порівняння, який дозволяє усунути нестабільність результатів. Переважна більшість результатів оброблялась на ЕОМ. Численні експерименти показали, що випадкові похибки вимірювань узгоджуються з законом розподілу Гаусса, для якого середнє арифметичне є найбільш імовірним значенням. Проведені розрахунки і зображені на експериментальних графіках довірчі інтервали відповідають довірчим імовірностям 0.8. Висновки, сформульовані в дисертації, всебічно обґрунтовані і не суперечать один одному.

Апробація роботи. Основні результати доповідались і обговорювались на Всесоюзній науковій конференції "Оптика и спектроскопия и их применение в народном хозяйстве" (Кам'янець-Подільський, червень 1992 р.); Науковій конференції "Фосфор України - 93" (Львів, вересень 1993 р.); на Міжнародній осінній школі-конференції "Solid State Physics: Fundamentals & Applications" (Ужгород, вересень-жовтень 1994 р.); на Міжнародній конференції "Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro- and Quantum Electronics" (Київ, травень 1997

р.); на щорічних звітних науково-практичних конференціях в Національному педагогічному університеті ім. М.П. Драгоманова (1992-1997 рр.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в п'яти статтях і п'яти тезах перерахованих вище конференцій. Перелік основних робіт приведений в кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, основних результатів і висновків, списку використаних джерел. Вона складає 151 сторінку, з них 121 сторінка машинописного тексту, 28 малюнків, 4 таблиці. Список використаних джерел налічує 130 найменувань.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить в собі загальну характеристику роботи. В ньому обґрунтовано актуальність теми, визначено мету роботи, вказано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні положення, що винесені на захист.

В **розділі 1** проведено огляд теорії, що лежить в основі результатів досліджень. Коротко викладено зміст загальної хвильової теорії ДФП і аналізуються наближені вирази, що одержуються з врахуванням частини про міжних зон і ексітонних ефектів для д-д і д-з переходів, а також розглядаються правила відбору для оптичних переходів. Особлива увага приділяється теоретичним дослідженням лінійно-циркулярного дихроїзму (ЛПД) в напів провідниках. Розглядається питання про вплив домішкових станів на когерентне і некогерентне нелінійне поглинання світла в напівпровідниках. Приведено основні відомості про ряд фізичних, в тому числі і нелінійних оптичних властивостей кристалів дифосфіду кадмію, що були отримані із літературних даних і мають відношення до проведених досліджень. Розглянуто принципи нелінійної спектроскопії ДФП.

В **розділі 2** описана оригінальна установка, що дозволяє вивчати нелінійні властивості широкозонних напівпровідників, розкриваються переваги двопроменевої методики над однопроменевою. Виводиться робоча формула для визначення $K_{\square_2}$. Аналізуються практичні засади амплітудної і поляризаційної лазерно-модуляційної спектроскопії. Звертається увага на фактори, що ускладнюють вивчення ДФП і оцінюється їх можливий вклад в отримані результати. Викладено також методи статистичної обробки одержаних експериментальних результатів.

Розділ 3 присвячено результатам дослідження констант і типу ДФП в кристалах CdP_2 методами амплітудної лазерно-модуляційної спектроскопії. Показано, що існуюча в літературі велика розбіжність констант ДФП для CdP_2 зумовлена недосконалістю однопроменевої методики,

яка, на відміну від двопрменевої, не дозволяє однозначно проводити розділення нелінійних некогерентних і когерентних процесів поглинання. Виконано комплекс спектральних, інтенсивносних, поляризаційних, кутових і кінетичних досліджень $\square K \square_2 \square$, оцінюються внески в $\square K \square_2 \square$ когерентного ДФП і супутніх йому некогерентних процесів, що дозволило визначити коефіцієнт власного ДФП в CdP₂. Результати корелюють з розвинутою в літературі теорією для д-з типів ДФП в напівпровідниках з урахуванням континуальних ексітонних станів.

Вперше досліджено резонансне ДФП в CdP₂. Вимірювання проводились на нелегованих і легуваних Ві зразках. Аналіз ітенсивносних, спектральних, кутових залежностей показав, що когерентна частина коефіцієнта поглинання зонduючого випромінювання $K_j^{[2]} \square_2 \square$ складається із коефіцієнта власного ДФП (j=1) і РДФП (j=2). Була виявлена спектральна смуга РДФП з максимумом при енергії квантів зонduючої хвилі $h \square_2 = 1.43$ еВ.

Приділено увагу теоретичному аналізу РДФП. Показано, що при розповсюдженні світла вздовж оптичної осі кристалу некогерентне поглинання не залежить від типу поляризації пучків і кута між площинами коливання їх електричних векторів, тоді як $K_j^{(2)}(\square_2)$ суттєво залежить від того, чи є пучки лінійно чи циркулярно поляризованими. Причому коефіцієнти резонансного ДФП $K_{2l}^{[2]} \square_2 \square$ через домішкові рівні 1 відрізняються від коефіцієнтів власного ДФП $K_j^{[2]} \square_2 \square$ спектральними, інтенсивносними, кутовими і поляризаційними залежностями. Показано, що РДФП пов'язане з д-д двофотонними переходами, тоді як власне ДФП - з д-з переходами. Інтенсивносні залежності власного ДФП є пропорційними, тоді як для РДФП через домішкові реальні стани I зазнають насичення, що пов'язане з насиченням заселеності рівня 1. Спектри власного ДФП є широкими смугами, а спектр РДФП являє собою вузьку лоренцеву криву.

Одержані експериментальні результати в смузі 1.43 еВ, які добре узгоджуються з результатами теоретичного аналізу. Визначено час поперечної релаксації електронів при РДФП: $T_2 = 1/\Gamma_{cv} = 4.3 \cdot 10^{-14}$ с.

При розповсюдженні випромінювання вздовж оптичної вісі є значення коефіцієнта РДФП для кристалів СаР₂ пропорційне косинусу кута між векторами площин лінійних поляризацій пучків; при кругових поляризаціях протилежно направлених спіральностей коефіцієнт РДФП досягає максимального значення, а для кругових поляризацій однаково направлених спіральностей рівний нулю.

Показано, що при легуванні зразка Ві РДФП зростає в 1.5 рази і відбувається на неконтрольованих домішкових рівнях d₃, концентрація яких при легуванні зростає. Глибина їх залягання E_c-0.85 еВ. Розраховано значення коефіцієнта РДФП, яке становить 0.028 см/МВт.

Проведено дослідження залежності ДФП в кристалах CdP_2 тетрагональної модифікації від взаємної орієнтації векторів лінійно-поляризованих пучків світла і кристалографічних осей, звідки отримана інформація про особливості зонної структури CdP_2 . При розповсюдженні пучків вздовж вісі c було виявлено, що залежність ДФП від кута між векторами поляризацій лазерного і зондуємого пучків e_1 і e_2 і від обертання кристала навколо його оптичної осі відсутня. У випадку розповсюдження пучків перпендикулярно вісі c спостерігається чітка кутова залежність ДФП від кута між e_1 і e_2 і залежність від кута між векторами $e_1 \parallel e_2$ і c . Для міжзонних та екситонних переходів в кристалах кутова залежність визначається симетрією станів, між якими відбувається ДФП. Зроблено висновок, що ДФП в дифосфіді кадмію в області енергії двох квантів $h\nu_1 h\nu_2 = (2.543.11)$ еВ відбувається між зонами $\Gamma_7 (\Gamma_4) \rightarrow \Gamma_7 (\Gamma_4)$, $\Gamma_7 (\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_7 (\Gamma_3)$, $\Gamma_6 (\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_6 (\Gamma_1, \Gamma_2)$. Обґрунтовано допущення про відсутність в спектральній області, в якій проводились вимірювання, переходів між станами $\Gamma_6 (\Gamma_1, \Gamma_2) \rightarrow \Gamma_6 (\Gamma_1, \Gamma_2)$. Той факт, що ДФП в дифосфіді кадмію відбуваються між тими ж станами, між якими за правилами відбору для точкової групи D_4 дозволені однофотонні переходи, пояснюється відсутністю в дифосфіді кадмію центра інверсії. У цьому випадку можуть бути відмінними від нуля матричні елементи оператора дипольного моменту і можливі дипольні переходи між усіма станами. Було виявлено розщеплення V-зони на підзони V_1, V_2, V_3 з симетрією $\Gamma_7, \Gamma_6, \Gamma_7$ відповідно, яке становить 0.35 еВ ($V_3 - V_1$) і 0.33 еВ ($V_3 - V_2$). В C-зоні виявлено розщеплення на підзони C_1, C_2 поблизу точки Γ зони Бріллюена, яке становить 0.46 еВ. Симетрія C_1 -підзони Γ_6 , а C_2 -підзони Γ_7 . Причому до забороненої зони прилягають V_1 і Q-підзони.

В даному розділі проведено подальше теоретичне і експериментальне вивчення акцепторних центрів CdP_2 сучасними оптичними методами лазерної спектроскопії. З цією метою досліджувались нелеговані і леговані цинком і вісмутом зразки дифосфиду кадмію. Виявлено смуги з максимумами при $h\nu_2 = 1.77; 1.69; 1.50$ і 1.60 еВ, які пояснюються на основі моделі донорно-акцепторних комплексів. Вони всі проявляються при взаємній орієнтації векторів e_1 і e_2 під кутами 45° до c і розповсюдженні пучків перпендикулярно c . Окремо досліджено для нелегованого зразка залежності величини цих смуг від кута між ними і площиною, в якій лежать вектори e_1 і e_2 , і віссю c при розповсюдженні пучків перпендикулярно c .

Із спектрів $k \nu_2$ виділено спектри, які пов'язані з переходами в донорно-акцепторних комплексах $K^{AD} \nu_2$, на основі аналізу яких була побудована модель комплексів, що складаються з донорів і акцепторів, які займають найближчі вузли ґратки. При такому близькому розміщенні заряджених центрів комплекс діє як нейтральний диполь. Такий комплекс має дзеркально-поворотну симетрію третього порядку навколо вісі $[111]$.

Розраховано енергію іонізації акцепторів, яка дорівнює 0.82 eV, і експериментально виявлено домішкові центри на такій глибині. Отримано енергію перекриття для найбільш близьких пар $E_i = 0.06$ eV, що підтверджує модель комплексів в найближчих вузлах ґратки і добре узгоджується з отриманими результатами для CdP₂. Досліди, проведені з легованими Zn кристалами CdP₂, підтвердили допущення про те, що глибокими акцепторами в донорно-акцепторній парі є двозарядні вакансії кадмію. Домішки цинку заміщують кадмій у вузлах кристалічної ґратки і легування приводило до зменшення інтенсивності смуг 1.77; 1.69; 1.50 і 1.60 eV. Мілками донорами можуть бути неконтрольовані домішки сірки, яка займає у ґратці положення фосфору. В роботі приведена схема структури донорно-акцепторних комплексів $A_{V_{cd}} - D_{S_p}$ і оптичних переходів, що здійснюються під дією лазерного і зондуючого випромінювання і зумовлюють появу вище вказаних смуг.

Експериментально було знайдено, що: інтенсивність смуги 1.77 eV пропорційна $\cos \varphi_1 \sin \varphi_2$, де φ_1 і φ_2 - кути між осями e_1 , c і e_2 , c відповідно; інтенсивність смуги 1.69 eV пропорційна $\cos \varphi_1 [|\cos(\varphi_2 + 60^\circ)| + |\cos(\varphi_2 - 60^\circ)|]$; інтенсивність смуги 1.60 eV пропорційна $\sin \varphi_1 |\cos(\varphi_2 + 25^\circ)| + |\cos(\varphi_2 - 25^\circ)|$; інтенсивність смуги 1.50 eV пропорційна $\sin \varphi_1 \sin \varphi_2$.

Проводиться пояснення поляризаційних залежностей смуг 1.77; 1.69; 1.60; 1.50 eV шляхом співставляння кожному переходу між двома станами a і b класичного диполя з власною частотою $\omega_{ab} = (E_a - E_b)/\hbar$ і амплітудою дипольного моменту, рівною матричному елементу переходу $D_{ab} = \langle a | D | b \rangle$, де D - оператор дипольного моменту. Кутова залежність смуги 1.77 eV пояснюється наявністю для першої координатної сфери одного диполя D_1 і одного диполя D_2 , які орієнтовані паралельно вісі c . Диполь D_1 відповідає переходу між валентною зоною і акцептором a_1 , а диполь D_2 відповідає переходу між a_1 і донором, який знаходиться в першій координатній сфері d_1 .

Кутова залежність смуги 1.69 eV пояснюється наявністю для другої координатної сфери двох типів диполів D_2 і одного диполя D_1 . Причому $D_1 \parallel c$, диполі D_2 розташовані під кутами приблизно $+60^\circ$ і -60° до c . Смуга 1.60 eV описується одним диполем $D_1 \perp c$ і двома диполями D_2 , розташованими приблизно під кутами $\pm 25^\circ$ до c . Смуга 1.50 eV описується одним диполем $D_1 \perp c$ і одним диполем $D_2 \perp c$.

Проведено розрахунки інтенсивносних залежностей індукованого лазерним імпульсом коефіцієнта поглинання зондуючого світла на переходах між акцептором, який являє собою двозарядну вакансію кадмію, що утримує на орбіті електрон і дирку, і донором донорно-акцепторного комплексу. Одержані залежності добре узгоджуються з інтенсивносними залежностями смуг 1.77; 1.69; 1.60; 1.50 eV. Визначено поперечний переріз поглинання квантів лазерного випромінювання для смуги 1.60 eV, який складає $4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

Виконано експериментальні дослідження особливостей густини станів електронів в зоні провідності і у валентній зоні CdP_2 . Для таких досліджень використовувалась модуляція лазерним імпульсом домішкового поглинання зондуєчого світла. Глибокі домішкові рівні енергії Γ використовувались в ролі опорних при визначенні зонної структури кристалу. Показано, що структура домішкового поглинання $K_{\Gamma}^{\Gamma} \square \square \square_2 \square$ зумовлена спектральною структурою поперечних перерізів поглинання зондуєчої хвилі на переходах між валентною зоною і домішковим рівнем та домішковим рівнем і зоною провідності. Структура цих поперечних перерізів визначається зонною структурою кристалу. Особливий точці M_0 -типу зонної структури відповідає початок сходінки в короткохвильову область, а M_3 — початок сходінки в довгохвильову область спектру. Ці особливості спектрів були використані для виявлення M_0 і M_3 -точок CdP_2 . Отримувані глибини залягання M_0 і M_3 -точок корегувались шляхом співставлення спектрів, які належать різним глибоким домішковим рівням.

При аналізі спектрів було взято до уваги, що на глибині 0.35 eV у V-зоні вже відома точка M_0 -типу і на спектрах домішкового поглинання в зразках CdP_2 n-типу були виявлені локальні рівні $E_c-0.45$ eV і $E_c-0.88$ eV, а ширина забороненої зони $E_g=2.02$ eV. З урахуванням вище сказаного зроблено висновок, що домішковими центрами I' , I''' , I'' є донорні центри, які мають в забороненій зоні електронні рівні енергії d_1 , d_2 , d_3 , а смуга 1.72 eV пов'язана з акцепторними центрами, які створюють в забороненій зоні рівень a_1 на глибині $E_v+0.29$ eV. В цьому випадку смуги 1.37, 1.55 і 1.79 eV пояснюються наявністю на глибині в зоні провідності 0.94 eV особливої точки M_0 -типу, від стань якої від d_1 , d_2 , d_3 приблизно дорівнює 1.37, 1.55, 1.78 eV відповідно. Смуги 1.46, 1.64, 1.88 eV можна пояснити наявністю в зоні провідності на глибині 1.03 eV особливої точки M_0 -типу, а смуги 1.53, 1.78, 1.94 eV — наявністю на глибині в цій зоні 1.09 eV особливої точки M_3 -типу. Смуга 1.31 eV узгоджується з наявністю на глибині в C-зоні 0.46 eV M_0 -точки, яка також добре проявляється на спектрах ДФП.

Аналіз особливостей смуги 1.72 eV (зокрема відповідних їй складових кінетики), зв'язаної з рівнем a_1 , дає можливість стверджувати про великий переріз захоплення на рівень a_1 вільних дірок. Причому до дії лазерного випромінювання, спостерігається значне спустошення a_1 -центрів безпосередньо світлом зондування і підсвічування. Обґрунтовано також відсутність проявлення в нелегованих зразках a_1 -центрів.

На основі розглянутих результатів досліджень побудовано схему оптичних переходів і домішкової та зонної структури для $\beta\text{-CdP}_2$.

В розділі 4 проведено вивчення впливу легування на нелінійні і не-рівноважні оптичні властивості CdP_2 . Проводились дослідження кристалів дифосфіду кадмію легуваних вісмутом, цинком і селеном, причому з різним рівнем легування в кожному випадку. Монокристали CdP_2

були одержані із парової фази в двозонній печі. Легування проводилось в процесі росту шляхом додавання легуючої домішки у вихідні компоненти, які брались в стехіо-метричному співвідношенні. Тип провідності зразків визначався за знаком холлівської ЕРС. Нелеговані і леговані Zn і Se зразки мали р-тип провідності. Леговані 0.5 ваг.% Ві і 1 ваг. % Ві — п-тип провідності.

Одержані на легованих 0.5 ваг.% Ві і 1 ваг.% Ві спектри $\square k \square_2 \square$ які відповідають значенням кінетики $\square I \square_2 \square$ в моменти $t=30-40, 200, 10-15$ нс. Спектри вимірювались при різних орієнтаціях хвильових векторів q_1, q_2 і e_1, e_2 , с. Одержані спектри суттєво відрізняються від спектрів для нелегованих кристалів. Показано, що це зумовлено, зокрема, зміною типу провідності при легуванні кристалів вісмутом з р-типу на п-тип. Для п-типу кристалів лазерний імпульс спустошує глибокі домішкові рівні, які створюються не-контрольованими локальними центрами у верхній половині забороненої зони, тоді як в нелегованих кристалах вплив лазерного імпульсу на заселеність цих центрів відсутній.

На легованих 1 ваг % Ві зразках добре проявляються в забороненій зоні чотири домішкових рівня енергії: донорні - d_1, d_2, d_3 і акцепторний - c_1 глибини залягання яких становлять 0.43; 0.61; 0.85 eV від дна зони провідності і 0.29 eV від вершини валентної зони відповідно.

Виявлено суттєву залежність структури спектрів $\square k \square_2 \square$ від рівня легування зразків вісмутом. На спектрах зразків легованих 0.5 ваг. % Ві виявлений домішковий рівень d , який залягає на глибині 0.55 eV від дна зони провідності, тоді як на спектрах зразків, легованих 1 ваг.% Ві, він слабо помітний. Дослідження зразків з різним рівнем легування дало змогу виявити два типи акцепто-рних рівнів a_1 і a_1' , які залягають на глибині від дна зони провідності 1.72 , 1.86 eV відповідно. В результаті аналізу спектральних, інтенсивносних і релаксацій них особливостей, пов'язаних з цими смугами $K_I \square_2 \square$, було доведено, що рівні a_1 і a_1' належать одним і тим же центрам, якими можуть бути комплекси, що складаються з власних дефектів (двозарядних вакансій кадмію) і неконтрольованих ізоелектронних домішок Zn, атоми якого заміщують кадмій у вузлах кристалічної ґратки. Побудована відповідна схема електронних переходів.

На легованих 1 ваг.% Ві зразках проявляються інтенсивні вузькі симетричні смуги з максимумами 1.27 і 1.30 eV. їх прояв на зразках легованих 0.5 ваг.% Ві значно слабше, а на нелегованих і легованих Zn і Se зразках вони зовсім відсутні. Проведено експериментальні вимірювання інтенсивносних залежностей смуг 1.27 і 1.30 eV, а також виконано розрахунки інтенсивно сних залежностей $\square K_I \square_2 \square$ Для індукованого лазерним випромінюванням міждомішкового поглинання зондуєного світла в системі нейтральний комплекс-заряджений донор, якщо комплекс являється тризарядним. Для таких тризарядних комплексів характер

інтенсивносних функцій залежить від рівня легування зразка домішками, які міняють його тип провідності. Одержані експериментальні і теоретичні інтенсивносні залежності якісно узгоджуються. Встановлено, що тризарядні комплекси, з якими пов'язані вузькі симетричні смуги 1.27 і 1.30 eV, є тими ж комплексами, з якими пов'язані дві асиметричні смуги з довгохвильовими краями 1.72, і 1.86 eV.

Показано, що локальний рівень d_2 ($E_c - 0.61$ eV) належить атомам Ві, що заміщають Cd, а домішковий рівень d ($E_c - 0.55$ eV) — вакансіям фосфору.

Результатом аналізу експериментальних залежностей смуг 1.27 і 1.30 eV є висновок, що спектральна лінія 1.27 eV є фононним повторенням лінії 1.30 eV. Основним аргументом на користь цього є подібність інтенсивносних залежностей цих ліній. Відповідні фонони з енергією 30 меВ були виявлені на спектрах КРС CdP_2 в поляризованому світлі при $e \parallel c$. Показано, що лінія фононного повторення 1.27 eV зумовлена двоквантовим поглинанням через віртуальні стани за участю фотона з енергією 1.27 eV і LA-фонона з енергією 0.30 меВ в точці Z_b^v . Для цих ліній побудована відповідна схема оптичних переходів.

Проведено дослідження впливу домішок ізоелектронного цинку на оптичні властивості CdP_2 . Одержані спектральні, інтенсивносні і релаксаційні залежності $\square K_I^{\square} \square_2 \square$ на зразках CdP_2 , легуваних 1 ваг.% Zn і 5 ваг.% Zn. На всіх отриманих спектрах добре проявляються смуги у вигляді сходинок з довгохвильовими краями при $\hbar\omega_2 = 1.26$ і 1.65 eV. За вже відомими точками Ван-Хова Мо-типу визначено відповідні цим смугам глибини залягання домішкових рівнів: 0.45 і 0.84 eV над вершиною валентної зони. Показано, що ці рівні можуть бути пов'язані з неконтрольованими домішками міді. Домішкові центри в забороненій зоні на глибині 0.85 eV проідентифіковані як такі, що належать домішкам кисню, якого неможливо позбутись при вирощуванні кристалів, особливо при наявності низького вакууму. Виявлено звуження енергетичної щільності між валентною зоною і рівнем d_3 при високих рівнях легування CdP_2 цинком і дано пояснення спостережуваного явища.

В роботі проводились дослідження впливу домішок Se на оптичні властивості CdP_2 . Одержані спектральні, інтенсивносні і релаксаційні залежності $\square K_I^{\square} \square_2 \square$ на зразках легуваних 0.5 ваг.% Se. В легуваних кристалах проявились три нові спектральні лінії з максимумами при $\hbar\omega_2 = 1.63$, 1.67 і 1.71 eV, а смуга з максимумом при $\hbar\omega_2 = 1.84$ eV, яка добре проявлялась на нелегованих і легуваних Ві і Zn кристалах, стала при легуванні Se слабо помітною. Показано, що найбільш ймовірною причиною виникнення лінії 1.67 eV є утворення донорними центрами Se, які займають вузли фосфору, з неконтрольованими акцепторними центрами комплексів, що мають в забороненій зоні збуджені електронні стани. Лінії 1.63 eV і 1.71 eV ідентифіковані як фононні повторення лінії 1.67 eV. Причому лінія 1.63 eV зв'язана з емісією

фононів, а лінія 1.71 eV — з поглинанням фононів. Симетричність цих ліній відносно лінії 1.67 eV в точці Z зони Бріллюена говорить про їх можливий зв'язок з емісією і поглинанням одного і того ж LO-фонона, енергія якого дорівнює приблизно 40 меВ. На користь цього припущення є і той факт, що в спектрах КРС CdP₂ також виявлені ці фонони при 4.2 К.

Неконтрольованими акцепторними центрами можуть бути вакансії кадмію або залишкові неконтрольовані домішки, наприклад, мідь. Характер отрима них інтенсивносних залежностей якісно узгоджено з проведеними в роботі роз рахунками інтенсивносних залежностей $K_I^{1C} \square \square \square$ для модульованого лазерним імпульсом всередині центрального поглинання зондуєчого світла на переходах між основними 11 і збудженими $11'$ станами електронів в комплексах $Cu_{Cd}Se_p$ ($V_{Cd}Se_p$). Побудовано схему оптичних переходів, яка пояснює характер одержа них на легованих селеном CdP_2 спектрів і їх інтенсивносні залежності.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ РОБОТИ

1. Комплексними дослідженнями спектральних, інтенсивносних, поляризаційних, кутових і релаксаційних залежностей проведено розділення некогерентних і когерентних нелінійних процесів і одержані характеристики нелінійних оптичних властивостей, особливостей зонної структури, глибоких локальних центрів і генераційно-рекомбінаційних процесів в кристалах P-CdP_2 .

2. Виявлено РДФП при енергії двох фотонів 2.60 еВ. Показано, що РДФП здійснюється через реальний проміжний рівень (із, що залягає в забороненій зоні на глибині $E_c - 0.85$ еВ). Визначено час поперечної релаксації електронів при РДФП, поперечний переріз поглинання квантів лазерного випромінювання на переходах d_z — зона провідності, рівноважна заселеність (із-центрів легованих вісмутом зразків і константа РДФП, які становлять $4.3 \cdot 10^{-14}$ сек, $1.25 \cdot 10^{-17}$ см², 0.95 і 0.028 см/МВт відповідно. Встановлено, що резонансні двофотонні переходи в (3-CdP₂) є д-д типу.

3. На нелегованих і легованих зразках р- і n-типів виявлено вузькі симетричні смуги поглинання з енергіями максимуму при 1.77; 1.69; 1.60 та 1.50 еВ, які суттєво залежать від взаємної орієнтації електричних векторів хвилі накачування, зондуючої хвилі і оптичної вісі кристалу с. Ці експериментальні результати добре пояснюються в рамках комплексів, які складаються із глибоких акцепторів — двозарядних вакансій кадмію, що утримують на орбіті електрон і дирку, і мілких донорів — неконтрольованих домішок сірки, які займають положення вузлів фосфору в 1-й, 2-й, 3-й і 4-й координатних сферах відносно вакансій кадмію. Для найбільш близьких пар визначено енергію перекриття, яка становить 0.06 еВ. Проведено пояснення поляризаційних залежностей смуг індукованого поглинання в донорно-акцепторних

парах на основі принципу відповідності між інтенсивністю і поляризацією випромінювання і поглинання світла при квантових переходах електронів і інтенсивністю і поляризацією випромінювання класичним диполем.

4. Виявлено, що в області енергій двох фотонів $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = (2.5 + 3.11)$ eV власне ДФП відбувається між зонами $\Gamma_7(\Gamma_4) \rightarrow \Gamma_7(\Gamma_3)$, $\Gamma_7(\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_7(\Gamma_3)$, $\Gamma_6(\Gamma_5) \rightarrow \Gamma_6(\Gamma_1)$. Визначено, що дно зони провідності має симетрію Γ_6 , а вершина валентної зони Γ_7 . В зоні провідності на глибині 0.46 eV виявлено особливу точку густини станів Мо-типу, що має Γ_7 симетрію, а у валентній зоні на глибинах 0.02 і 0.35 eV особливі точки M_0 -типу з симетрією Γ_6 і Γ_7 відповідно. Підтверджено, що всі власні ДФП являються д-з типу.

5. Проведено дослідження особливих точок густини станів першого роду в С- і V-зонах $P\text{-CdP}_2$. Для таких досліджень використовувалась модуляція лазерним імпульсом стаціонарного поглинання зондуєчого світла на глибоких локальних центрах в забороненій зоні. В Озоні на глибині 0.46; 0.94; 1.03 і 1.18 eV виявлено особливі точки Мо-типу, а на глибині 1.09 eV особливу точку M_3 -типу. У валентній зоні виявлено особливі точки M_0 -типу на глибині 0.35; 0.68 і 0.81 eV.

6. Виявлено локальні центри, які належать неконтрольованим дефектам кристалічної ґратки і створюють в забороненій зоні енергетичні рівні $E_c - 0.43$ eV (d_1), $E_c - 0.61$ eV (d_2), $E_c - 0.85$ eV (d_3) і $E_v + 0.29$ eV (сц), $E_v + 0.45$ eV, $E_v + 0.84$ eV. Проведена ідентифікація цих локальних рівнів. Зокрема встановлено, що центри d_1 є міжвузловим кадмієм, а d_2 - вакансіями фосфору; релаксація нерівноважної заселеності центрів d_1 дуже швидка, центрів d_3 повільніша, а d_2 значно повільна.

7. Легування ізоелектронними домішками Bi і Zn приводить до суттєвої зміни оптичних і релаксаційних характеристик $\beta\text{-CdP}_2$, сприяє покращанню прояву зонної і домішкової структури кристалів. Локальні рівні d_1, d_2, d_3 проявляються у всіх легованих кристалах. В зразках з високим рівнем легування вісмутом виявлені також акцепторні рівні a_1 і a'_1 , які залягають на глибині 1.72 і 1.86 eV від дна зони провідності. На основі аналізу інтенсивносних залежностей спектральних смуг з довгохвильовими краями 1.72 і 1.86 eV, встановлюється належність рівнів a_1 і a'_1 одним і тим же центром, якими є комплекси, що складаються з двозарядних вакансій Cd і ізоелектронних домішок неконтрольованого Zn , атоми якого заміщають кадмій у вузлах кристалічної решітки. Встановлено, що з цими комплексами також пов'язані вузькі симетричні спектральні лінії 1.27 і 1.30 eV. Причому лінія 1.30 eV належить міждомішковим переходам між комплексами в стані a''_2 і донорними центрами, які являються атомами Bi , що заміщають атоми кадмію в кристалічній ґратці і створюють енергетичні рівні в забороненій зоні на глибині 0.55 eV від дна зони провідності; а лінія 1.27 eV належить двоквантовим переходам через віртуальні стани в точці Z_5^V за участю фотона з енергією 1.27 eV і LA-фонона з енергією 0.30 meV. Виявлено, що оптичні переходи між локальними центрами $E_v + 0.45$ eV і $E_v + 0.84$ eV і зоною провідності є забороненими.

На основі проведеного аналізу встановлено, що рівень $E_v + 0.45$ eV належить вакансіям кадмію, а рівень $E_v + 0.84$ eV — не контрольованим домішкам, що займають вузли кадмію і створюють глибокі акцепторні центри, якими можуть бути атоми Си. На спектрах зразків, легованих Ві, проявляються також на глибині приблизно $E_c - 0.11$ eV домішкові центри, якими можуть бути ізоелектронні по фосфору атоми Ві.

8. Легування Se приводить також до суттєвої зміни оптичних і релаксаційних характеристик кристалів. Спостерігається залежність цих змін від рівня легування. Але на всіх спектрах легованих Se зразків спостерігаються три нові спектральні лінії з максимумами при $\hbar\omega_2 = 1.63, 1.67$ і 1.71 eV, а також спектральна смуга з довгохвильовим краєм при $\hbar\omega_2 = 1.68$ eV. Встановлюється, що лінія 1.67 eV належить переходам між основним і збудженим станами комплексів, які складаються з донорних домішок Se, що займають вузли фосфору в кристалічній ґратці і неконтрольованих акцепторних центрів, а лінії 1.63 і 1.71 eV є фононними повтореннями лінії 1.67 eV. Смуга 1.68 eV належить переходам між основними станами цих комплексів і зоною провідності.

Основні результати роботи опубліковані в наступних статтях і тезах конференцій:

1. Пацкун И.И., Тичина И.И., Колесник И.А. Резонансное двухфо-тонное поглощение в р- CdP_2 // ФТТ. - 1998. - № 7. - С. 1252-1256.
2. Пацкун П., Тичина И.И., Колесник И.А. Лазерна спектроскопія донорно-акцепторних комплексів Р- CdP_2 // УФЖ. - 1997. - № 9. - С. 1105-1109.
3. Пацкун П., Тичина И.И., Колесник И.А. Особенности зонной структуры CdP_2 тетрагональной модификации // УФЖ. - 1997. - № 9. - С. 1110-1115.
4. Пацкун И.И., Тичина И.И., Колесник И.А. Особенности зонной структуры CdP_2 тетрагональной модификации // Известия вузов. Физика. - 1998. - № 4. - С. 64-68.
5. Пацкун И.И., Тичина И.И., Колесник И.А. Лазерная спектроскопия донорно-акцепторных комплексов в CdP_2 тетрагональной модификации // Известия вузов. Физика. - 1998. - № 7. - С. 83-88.
6. Колесник И.А., Корець М.С., Пацкун П. Кутові і поляризаційні залежності резонансного нелінійного поглинання в CdP_2 // Всесоюзна наукова конф. "Оптика и спектроскопия и их применение в народном хозяйстве". - Кам'янець-Подільський, 1992. - С.
7. Колесник И.А., Пацкун П., Тичина И.И. Амплітудна лазерно-модульована спектроскопія нелінійного поглинання в CdP_2 // Наукова конф. "Фосфор України - 93". - Львів, 1993. - С.
8. Колесник И.А., Пацкун П., Тичина И.И. Дослідження локальних центрів і особливостей зонної структури Р- CdP_2 // Наукова конф. "Фосфор України - 93". - Львів, 1993. - С.

9. Kolesnick L.A., Patskun I.I., Tychina I.I. Resonant twophoton absorption in (3-CdP₂ // Proc. Intern. School-Conf. "Solid State Physics: Fundamentals & Applications" (SSPFA'94). - Uzhgorod (Ukraine), 1994. - P. 49.

10. Patskun I.I., Tychina I.I., Kolesnick I.A. Laser spectroscopy of P-CdP₂ // Intern. Conf. "Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro- and Quantum Electronics" (OPTDIM'97). - Kiev (Ukraine), 1997. - P. 58.

Сліпухіна І.А. Лазерна спектроскопія CdP₂ тетрагональної модифікації. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10. - фізика напівпровідників та діелектриків. -Волинський державний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, 1998.

В дисертації проведено експериментальне і теоретичне дослідження нелінійних оптичних властивостей, зонної структури, глибоких локальних центрів і комплексів та генераційно-рекомбінаційних процесів у мало вивченому нелегованому і легованому Bi, Zn і Se CdP₂ тетрагональної модифікації. Розвиваються методи лазерної спектроскопії напівпровідників. Вперше цими методами виявлено і досліджено резонансне двофотонне поглинання, вісім особливих точок густини станів електронів першого роду в С- і V-зонах, 9 типів локальних центрів в забороненій зоні, три типи домішкових комплексів, двоквантові переходи електронів за участю фотонів і фононів. Проводиться ідентифікація домішкових центрів і комплексів.

Ключові слова: нелінійні оптичні властивості, зонна структура, лазерна спектроскопія, резонансне двофотонне поглинання, фонон.

Слипухина И.А. Лазерная спектроскопия CdP₂ тетрагональной! модификации. —
Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10. - физика полупроводников и диэлектриков. -Волынский государственный университет им. Леси Украинки, Луцк, 1998.

В диссертации проведены экспериментальные и теоретические исследования нелинейных оптических свойств, зонной структуры, глубоких локальных центров и комплексов, а также генерационно-рекомбинационных процессов в малоизученном нелегированном и легированном Bi, Zn и Se CdP₂ тетрагональной модификации. Развиваются методы лазерной спектроскопии полупроводников. Впервые этими методами выявлено и исследовано резонансное двухфотонное

поглощение, восемь особенных точек плотности состояний электронов первого рода в С- и V-зонах, девять типов локальных центров в запрещенной зоне, три типа примесных комплексов, двухквантовые переходы электронов с участием фотонов и фононов. Проводится идентификация примесных центров и комплексов.

Ключевые слова: нелинейные оптические свойства, зонная структура, лазерная спектроскопия, резонансное двухфотонное поглощение, фонон.

Slipuhina LA. Laser spectroscopy of CdP₂ of tetragonal modification. — Manuscript.

Thesis on adjudges research degree of candidate of physical and mathematical sciences on specialty 01.04.10 - physics of semiconductors and dielectrics. -Lesi Ukrainki Volynsk State University. Lutsk, 1998.

Three research works are defended. This thesis is dedicated to experimental and theoretical studies of nonlinear optical properties, band structure, deep defects as well as their complexes, and generation-recombination processes in poorly investigated undoped and doped with Bi, Zn, Se cadmium diphosphide. The methods of laser spectroscopy of semiconductors are developed. For the first time resonant two-photon absorption, eight specific points of the first order of the density of electron states in the conduction and valence bands, nine types of the local states in the gap, three types of doping complexes and two-stage electron transitions which involve photon and phonon are detected and investigated using these methods. Identification of deep defect centers is performed.

Key words: nonlinear optical properties, band structure, laser spectroscopy, resonant twophoton absorption, phonon.

Підписано до друку 10.09.98р. Наклад 100 прим. Зам. № 183 Замовне. Віддруковано на "RISO"
МП "ЦБС" Луцьк, Дубнівська 23, т.(03322) 4-00-97