

Чернівецький державний університет
ім. Ю. Федьковича

УДК 535.333:621.315.592

Стасів Наталія Іванівна

**Вплив магнітного поля на електронні
та екситонні стани в напівпровідниках**

(01.04.10 - фізика напівпровідників і діелектриків)

АВТОРЕФЕРАТ

дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці - 1997

ДВ 39.200

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теоретичної фізики Дрогобицького державного педагогічного інституту ім.І.Франка

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Бойчук Василь Іванович, Дрогобицький педагогічний
інститут, завідувач кафедри теоретичної фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Покутній Сергій Іванович, Миколаївський морський
університет, завідувач кафедри теоретичної та
математичної фізики

доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник Савчук Андрій Йосипович, Чернівецький
університет, професор кафедри фізичної електроніки

Провідна організація: Інститут фізики НАН України, лабораторія
фотоакустики і оптики, м.Київ

Захист відбудеться 30 січня 1998 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 76.051.01 при Чернівецькому державному університеті
ім.Ю.Федьковича за адресою: 274012, м.Чернівці, вул.Коцюбинського,2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Чернівецького державного
університету ім.Ю.Федьковича (вул.Л.Українки,23).

Автореферат розісланий 23 грудня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.В.Курганецький

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00737727 (X)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Магнітне поле є одним з найпоширеніших факторів впливу на різні фізичні системи з метою вивчення тонких особливостей їх структури і міжчастинкових взаємодій.

У зв'язку з прогресом у створенні дискретних і матричних фотоприймачів для інфрачервоної області спектру на основі міжпідзонних переходів у квантоворозмірних структурах помітно зріс інтерес до вивчення електронних та екситонних станів у напівпровідника і в таких напівпровідникових гетеросистемах, як плівки і надгратки.

У багатьох теоретичних роботах досліджується основний електрон-фононний стан у магнітному полі та стани, близькі до порогу випромінювання оптичного фонона. Дана проблема розв'язується різними методами, залежно від константи електрон-фононної взаємодії. При цьому метод функцій Гріна застосовується до вивчення припорогових станів [1], але практично не використовується для визначення параметрів магнітополярона через трудність послідовного врахування діаграм з перетинами фононних ліній. Проте, отримані в останній час результати [2] дають змогу розширити область використання методу функцій Гріна і на основний магнітополяронний стан. Це дає змогу в єдиному підході досліджувати всі наявні електрон-фононні стани іонного напівпровідника, що поміщений у магнітне поле, і визначити зміну різних фізичних параметрів: енергії та ефективної маси магнітополярона, енергії циклотронного резонансу і т.д.

Не дивлячись на наявність багатьох теоретичних досліджень [3], присвячених вивченню екситонних станів в напівпровідниках та гетеросистемах на їх основі, ряд експериментальних результатів [4] не мають однозначного теоретичного пояснення. Пов'язане це з тим, що при теоретичному аналізі відповідних питань враховуються не всі фактори, які можуть впливати на енергетичні та динамічні характеристики електронних збуджень в просторовообмежених структурах. Зокрема, це стосується сил електростатичних зображень. Вимагає пояснення залежність коефіцієнту діаманітного зсуву від розмірів плівки, залежність енергії утворення екситона від напруженості магнітного поля і товщин шарів надгратки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в межах координаційної програми Міністерства освіти України: "Дослідження фізичних характеристик і просторовообмежених систем і конденсованих середовищ під дією зовнішніх полів".

Метою роботи є теоретичне дослідження впливу магнітного поля на електрон-фононні стани іонного напівпровідника та екситонні спектри в тонкій напівпровідниковій плівці і напівпровідниковій надгратці.

У дисертаційній роботі ставляться такі **завдання**:

- дослідити вплив багатофононних процесів на спектр електронів іонного напівпровідника у магнітному полі;
- провести порівняння значень величини енергії, ефективної маси основного стану магнітополярона та середнього числа фононів в цьому стані, обчислених методом функцій Гріна та варіаційним методом Лі-Лоу-Пайнса;
- методом функцій Гріна обчислити енергії циклотронного резонансу для кристалів з проміжним електрон-фононним зв'язком;
- дослідити основний стан екситона для різних товщин анізотропної тонкої напівпровідникової плівки;
- дослідити закономірності діаманітного зсуву екситонних станів в тонких напівпровідникових плівках при суттєвості ефектів розмірного квантування ;
- вивчити вплив магнітного поля на параметри екситонів у напівпровідникових надгратках I та II типів.

Наукова новизна. Вперше проведено порівняння результатів обчислення енергії, ефективної маси магнітополярона та середнього числа фононів в поляронному стані методом функцій Гріна та варіаційним методом Лі-Лоу-Пайнса.

Визначено залежність порядку наближення масового оператора від константи електрон-фононної взаємодії для коректного обчислення параметрів магнітополярона.

Вперше, використовуючи метод функцій Гріна з врахуванням багатофононних віртуальних процесів до вивчення циклотронного резонансу, уточнено значення енергій циклотронного резонансу для кристалів з проміжним електрон-фононним зв'язком.

Варіаційним методом вперше обчислено енергію, хвильову функцію та розміри екситона основного стану анізотропної плівки довільної товщини і пояснено експериментальні залежності діаманітного зсуву від товщини плівки для обох екситонних серій кристалу MoS_2 .

Розвинута теорія екситонних станів напівпровідникових надграток I та II типів при наявності магнітного поля.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання розробленої теорії для пояснення результатів експерименту по міжзонному магнітопоглинанню та циклотронному резонансу напівпровідникових систем в області порогових значень енергії.

Отримані результати сприяють кращому розумінню фізики екситонних станів у напівпровідникових тонких плівках та напівпровідникових надгратках при наявності однорідного магнітного поля і можуть знайти реальне практичне застосування при створенні принципово нових оптикоелектронних приладів із високою швидкістю і малою енергією споживання.

На захист виносяться:

1. Енергія зв'язку, ефективна маса магнітополярона та середнє число фононів у поляронному стані зростає при збільшенні напруженості магнітного поля.
2. Енергія зв'язку екситона зростає як при зменшенні товщини анізотропної напівпровідникової плівки, так і при збільшенні напруженості магнітного поля. Коефіцієнт діаманітного зсуву зростає із збільшенням товщини плівки.
3. Для заданих періодів надграток I та II типу енергія утворення зростає, а розміри екситона зменшуються при збільшенні напруженості магнітного поля.

Публікації і особистий внесок здобувача. За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових робіт, перелік яких приведено в кінці автореферату.

В [1-3,7-9, 11,12] дисертантом розв'язано рівняння Шредингера для зв'язаних електрон-діркових станів у тонких напівпровідникових плівках та надгратках. Обчислено енергії утворення та розміри екситонів при наявності однорідного магнітного поля.

У роботах [4-6, 10] дисертант приймав участь у постановці задач, обговоренні отриманих результатів та провів розрахунки масового оператора електронів в одно-, дво-, трифононному наближенні.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на: III Всесоюзній конференції з фізики і техніки тонких напівпровідникових плівок (м.Ів.-Франківськ, 1990); IV Міжнародній конференції з фізики і техніки тонких плівок (м.Ів.-Франківськ, 1990); Ювілейній конференції ІЕФ-93 (м.Ужгород, 1993); I Міжнародній науково-технічній конференції "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників" (м.Чернівці,1994); V

Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (м.Ів.-Франківськ, 1995). Доповідались і обговорювались на науковому семінарі з статистичної теорії конденсованих систем (м.Львів, 1997), семінарах Чернівецького державного університету, Дрогобицького педагогічного інституту.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і примітки. Робота викладена на 115 сторінках, включає 29 рисунків, 3 таблиці і список літератури, що містить 121 джерело, розташоване на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

На початку дисертаційної роботи визначається актуальність теми, новизна, наукова та практична цінність задач, що розв'язуються в дисертації, сформульовано положення, які виносяться на захист, коротко описано зміст роботи. У подальшому зроблено короткий огляд теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії електрона з фононами у напівпровідникових структурах. Розглянуто основні результати, досягнуті у вивченні екситонних спектрів в ТНП та квантових ямах.

В даній роботі досліджено іонний напівпровідник, який поміщено в однорідне магнітне поле напруженістю H . Вісь OZ системи координат направлена вздовж вектора \vec{H} . Кристал характеризується параболічною зоною провідності. Тоді для системи електронів, що взаємодіють з магнітним полем і оптичними поляризаційними фононами, гамільтоніан матиме вигляд:

$$\hat{H} = \hat{H}_e + \hat{H}_{ph} + \hat{H}_{int}, \quad (1)$$

де \hat{H}_e - гамільтоніан електронної підсистеми; \hat{H}_{ph} - оператор енергії оптичних поляризаційних фононів; \hat{H}_{int} - оператор електрон-фононної взаємодії.

Для обчислень використано метод функцій Гріна, масовий оператор яких враховує багатофононні віртуальні процеси і має вигляд інтегрального ланцюгового дробу:

$$M_m(k, \omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} M_m^{(n)}(k, \omega), \quad (2)$$

де $M_m^{(n)}(k, \omega)$ - масовий оператор в n -фононному наближенні. Енергія m -го рівня Ландау визначається з дисперсійного рівняння:

$$\omega - \text{Re} M_n(k, \omega) = 0, \quad (3)$$

яке розв'язано для конкретних кристалів.

Обчислення показали, що зміна магнітного поля слабо впливає на величину функцій зв'язку електрон-фононної взаємодії, тому для вибраних магнітних полів ($H=10^4 E - 10^6 E$), безрозмірна енергія основного стану магнітополярона ($\epsilon_c = |\epsilon_{mp}^{(n)}|/\Omega$, Ω — енергія оптичного фону) змінювалась в невеликих межах. Наприклад, в трифононному наближенні одержано:

$$\epsilon_c(H = 10^4 E) = 0.0351; \quad \epsilon_c(H = 10^5 E) = 0.0363; \quad \text{якщо } g=0.051;$$

$$\epsilon_c(H = 10^4 E) = 0.7465; \quad \epsilon_c(H = 10^5 E) = 0.7479; \quad \text{якщо } g=1.$$

Енергія ϵ_c суттєво залежить від константи електрон-фононної взаємодії g . З рис.1 видно (криві 2-4), що в області малих g в усіх трьох наближеннях ϵ_c пропорційна g .

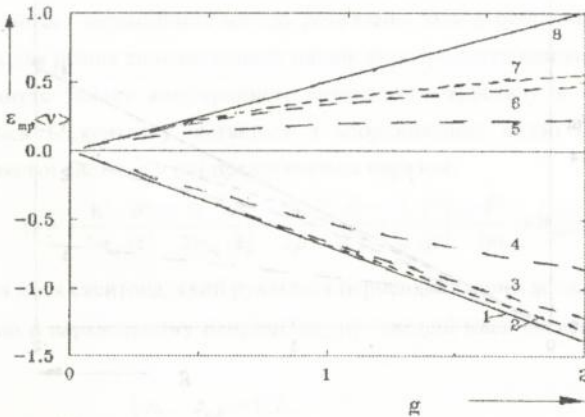


Рис.1. Залежність енергії магнітополярона (криві 1-4) і середнього числа віртуальних фонових (криві 5-8) від g , обчислених методом Лі-Лоу-Пайнса (суцільні криві 1,8) і методом функцій Гріна (штрихові криві): (4), (5) - $n=1$; (3), (6) - $n=2$; (2), (7) - $n=3$.

Уточнення масового оператора веде до зростання енергії зв'язку магнітополярона. Характерно, що в усьому інтервалі g виконується нерівність:

$$\left| \epsilon_c^{(1)} - \epsilon_c^{(2)} \right| > \left| \epsilon_c^{(2)} - \epsilon_c^{(3)} \right|, \quad (4)$$

тобто збільшення n веде до асимптотичного наближення $\epsilon_c^{(n)}$ до свого точного значення.

Збільшення константи електрон-фононного зв'язку та порядку наближення масового оператора приводить також до зростання середнього числа фононів у поляронному стані (див. рис. 1, криві 5-8).

У рамках розглядуваних наближень визначено ефективну масу магніто-полярона. Відношення ефективної маси магнітополярона, що рухається вздовж поля, до ефективної маси електрона представляється формулою:

$$\frac{m_{mp}^{(n)}}{m} = 2\rho \left[\frac{\partial^2 \epsilon^{(n)}(K)}{\partial K^2} \right]_{K=0}, \quad n=1,2,3. \quad (5)$$

Як видно з рис.2 (криві 1-3), ефективна маса полярона залежить від g для різних наближень масового оператора.

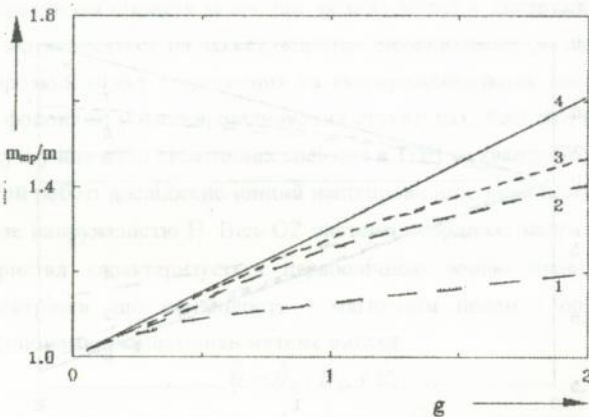


Рис.2. Залежність m_{mp}/m від g , обчислених методом Лі-Лоу-Пайнса (суцільна крива 4) і методом функцій Гріна (штрихові криві): (1) - $n=1$; (2) - $n=2$; (3) - $n=3$.

Для визначення меж застосування одно-, дво-, трифононного наближення масового оператора проведено порівняння значень енергії, ефективної маси

магнітополярона та середнього числа фононів в поляронному стані, обчислених методом функцій Гріна і варіаційним методом Лі-Лоу-Пайнса (ЛЛП) (див.рис.1,2 - суцільні прямі). У випадку слабкої електрон-фононної взаємодії ($g < 0.1$) метод ЛЛП дає ті ж результати, що і використання функцій Гріна в однофононному наближенні.

Зростання константи взаємодії веде до збільшення значень всіх трьох фізичних величин, знайдених методом Лі-Лоу-Пайнса.

Щоб використовувати в цій області метод функцій Гріна, необхідно уточнити масовий оператор. Так, для кристалів з $1 < g < 1.5$ необхідно враховувати двофононне наближення. Якщо $g > 1.5$, то треба враховувати трифононне наближення.

Результати досліджень, розглянуті вище, дозволяють уточнити теорію циклотронного резонансу в припороговій області енергетичного спектру. Для кристалів CdTe і ZnO методом функцій Гріна визначено залежність енергії циклотронного резонансу від напруженості магнітного поля. Показано, що для узгодження результатів теорії та експерименту необхідно враховувати міжрівневу взаємодію, кейнівський закон дисперсії та двофононне наближення для масового оператора. Останнє є суттєвішим для кристалу ZnO, що характеризується більшою константою електрон-фононної взаємодії.

З допомогою варіаційного методу розв'язано задачу основного стану екситона Ваньє-Мотта для різних товщин тонких плівок анізотропного напівпровідника.

Розглянуто плівку анізотропного шаруватого кристалу в області простору $0 \leq z \leq L$. Вісь С кристалу збігається з координатною віссю OZ. Гамільтоніан електрон-діркової системи в ній представиться виразом:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_{\parallel}} \frac{\partial^2}{\partial z_e^2} - \frac{\hbar^2}{2m_{\perp}} \frac{\partial^2}{\partial z_h^2} - \frac{\hbar^2}{2\mu_{\perp}} \left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{\tilde{p}^2}{2m_{\perp}} + W_{\text{int}}(\rho, z_e, z_h), \quad (6)$$

де m_{\perp} - повна маса екситона, який рухається перпендикулярно до осі OZ;

m_{\parallel} - відповідно в паралельному напрямі; μ_{\perp} , μ_{\parallel} - зведені маси екситона у відповідних напрямках, а

$$W_{\text{int}} = \begin{cases} \infty, & z_{e,h} = 0, L, \\ -e^2 [\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp} \rho^2 + \epsilon_{\perp}^2 (z_e - z_h)^2]^{-1/2}, & 0 < z_{e,h} < L. \end{cases} \quad (7)$$

В якості пробної хвильової функції 1s-стану екситона Ваньє-Мотта вибрано функцію:

$$\Psi(\rho, z_e, z_h) = \frac{A}{\sqrt{S}} e^{ikr} \sin\left(\frac{\pi}{L} z_e\right) \sin\left(\frac{\pi}{L} z_h\right) \exp[-(\alpha^2 \rho^2 + \beta^2 (z_e - z_h)^2)^{1/2}]. \quad (8)$$

Конкретні розрахунки проводяться для двох екситонних серій (A і B) плівки анізотропного кристалу MoS₂.

Анізотропність плівки кристалу MoS₂ впливає на енергію екситона. Це видно

із поданих на рис.3 залежностей безрозмірної енергії \tilde{E} від \tilde{L} для екситонних серій А і В. В області $\tilde{L} < 2$ вона різко збільшується із зменшенням товщини, а при більших \tilde{L} - слабо змінюється, асимптотично наближаючись до $|\tilde{E}|=3$ ($\tilde{E} = E_i / E_o$, $E_o = e^2 / 2\varepsilon_1 a_1$, $a_1 = \varepsilon_1 \eta^2 / \mu_1 e^2$, де E_i - енергія зв'язку екситонного стану, ε_1 , μ_1 - діелектрична проникність та зведена маса в перпендикулярному до осі OZ напрямі).

Причому $\tilde{E}^B > \tilde{E}^A$ для довільних товщин плівки.

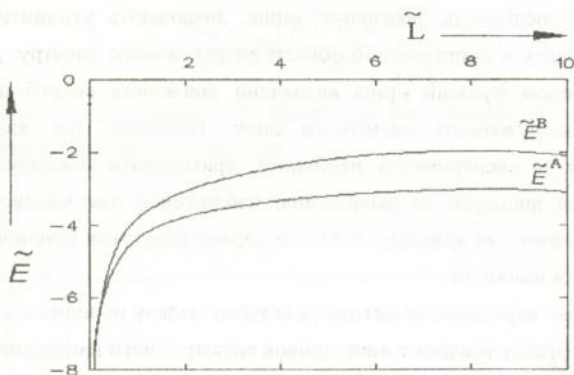


Рис.3. Залежність енергії зв'язку екситона від товщини плівки.

Проведені вище розрахунки дають можливість дослідити вплив магнітного поля на екситонний спектр плівки MoS_2 . Розглянуто випадок, коли однорідне магнітне поле паралельне осі С кристалу ($H \parallel C$). У випадку слабких полів внесок в енергію екситона можна представити виразом:

$$\Delta E = SH^2, \quad (9)$$

де S - коефіцієнт діаманітного зсуву. Теоретично ΔE визначено через поправку першого порядку теорії збурень:

$$\Delta E_{\text{теор.}} = \frac{e^2}{8\mu_1 c^2} H^2 \langle \rho^2 \rangle \quad (10)$$

Звідси,

$$S = \frac{e^2}{8\mu_1 c^2} \langle \rho^2 \rangle \quad (11)$$

і залежить від товщини плівки. Маючи залежність середніх розмірів екситона в площині, паралельній поверхням плівки від товщини \tilde{L} ($\tilde{L} = L/a_1$), легко побудувати цю залежність для S . Як видно з рис.4, де подано залежність коефіцієнта діамантного зсуву від товщини плівки для основного стану, функція $S=S(\tilde{L})$ монотонно зростає.

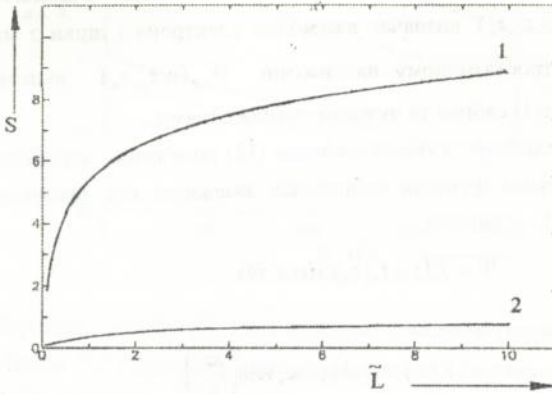


Рис.4. Залежність $S^A(\tilde{L}) \cdot 10^{-14} \text{eB}(\text{Гс})^{-2}$ (крива 1) і $S^B(\tilde{L}) \cdot 10^{-14} \text{eB}(\text{Гс})^{-2}$ (крива 2) для 1s-стану екситона.

При малих значеннях \tilde{L} коефіцієнт S приймає мінімальне значення, яке залежить від екситонної серії. Збільшення \tilde{L} веде до зростання діамантного зсуву і при $\tilde{L} > 8$ (серія А) та $\tilde{L} > 2$ (серія В) функції $S=S(\tilde{L})$ виходять на насичення і приймають значення

$$S_{1s}^A = 8.68 \cdot 10^{-14} \text{eB}(\text{Гс})^{-2}; S_{1s}^B = 7.53 \cdot 10^{-15} \text{eB}(\text{Гс})^{-2}.$$

У дисертаційній роботі також проведено дослідження впливу однорідного магнітного поля на основний стан екситонів в ізотропних та анізотропних надратках.

Розглядаються надратки обох типів при наявності однорідного магнітного поля, яке паралельне напрямку росту структури [001] (осі С кристалу). Гамільтоніан

електрон-діркової системи має вигляд:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu_{\pm}} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) - \frac{\hbar^2}{2(m_e)_1} \frac{\partial^2}{\partial z_e^2} - \frac{\hbar^2}{2m_{\pm}} \frac{\partial^2}{\partial z_h^2} - \frac{e^2}{\epsilon_0 r} + \frac{\hbar^2}{8\mu_{\pm}} \gamma^2 \rho^2 + W_{\text{int}}(\rho, z_e, z_h),$$

$$\gamma_{\pm} = \frac{ehB}{2c\mu_{\pm} R_{\pm}}, \quad R_{\pm} = \frac{e^4 \mu_{\pm}}{2\epsilon_0^2 \hbar^2}.$$

Перші три доданки визначають оператор кінетичної енергії електрон-діркової системи, наступні - відповідно кулонівську енергію взаємодії та діаманітного внеску в енергію, а $W_{\text{int}}(\rho, z_e, z_h)$ визначає взаємодію електрона і дірки з межами поділу середовищ. В електростатичному наближенні $W_{\text{int}}(\rho, z_e, z_h)$ включає взаємодію кожної квазічастинки із своїми та чужими зображеннями.

Рівняння Шредінгера з гамільтоніаном (12) розв'язано варіаційним методом Рітца. Пробна хвильова функція вибиралась залежною від чотирьох варіаційних параметрів $\alpha, \beta, \delta, \lambda$ у вигляді:

$$\Psi = f_e(z_e) f_h(z_h) G(\rho, z, \Theta), \quad (13)$$

де

$$f_e(z_e) = A \exp(-\alpha z_e) \sin\left(\frac{\pi z_e}{L_e}\right);$$

$$f_h(z_h) = B \exp(\beta z_h) \sin\left(\frac{\pi z_h}{L_h}\right);$$

$$G(\rho, z, \Theta) = C \exp(-\delta \rho - \lambda \rho^2).$$

Конкретні обчислення проведено в квантових ямах InAs/GaSb, GaAs/AlAs I та II типів при наявності магнітного поля і при його відсутності.

Визначено середні відстані між електроном і діркою в різних напрямках при геометричних параметрах вибраних структур. Магнітне поле, як виявилось, слабо впливає на залежність середньої відстані $\langle z \rangle$ між електроном і важкою діркою в перпендикулярному до площини надгратки напрямку. Тому, для прикладу, на рис.5 приведено графіки залежностей величини $\langle \rho \rangle$ від магнітного поля для екситонів з важкою (криві 1,1') та легкою (криві 2,2') дірками у випадку надграток I (штрихові криві) та II (суцільні криві) типів.

Значення середньої відстані між електроном і діркою в паралельному до площини надгратки напрямку при зростанні магнітного поля до $B=200$ кГс зменшується майже вдвічі, порівняно з його відсутністю ($B=0$) при сталій сумарній

товщині $L=60 \text{ \AA}$. Поступовий спад величини $\langle \rho \rangle$ із збільшенням магнітного поля спостерігається як в надгратках I типу, так і II типу. Причому, значення середньої відстані ρ між електроном і легкою діркою є меншими, ніж відповідні величини для екситонів з важкими дірками при всіх B .

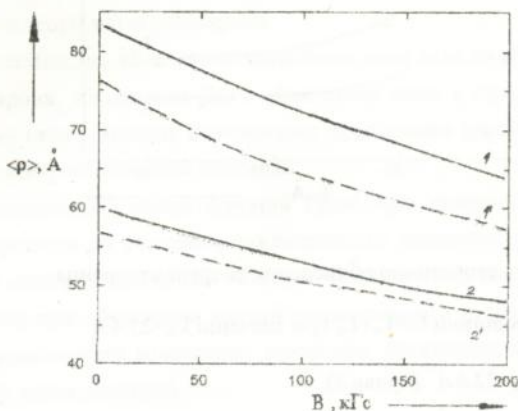


Рис.5. Функція $\langle \rho \rangle = \langle \rho \rangle(B)$ для екситонів з важкою (криві 1,1') та легкою (криві 2,2') дірками у випадку надграток I (штрихові криві) та II (суцільні криві) типів.

У даній моделі розраховано енергію утворення екситонів як з важкою так і легкою діркою. Цікаво порівняти отримані результати обчислення енергії у вибраній моделі надгратки II типу з відповідними експериментальними даними [4].

У випадку, коли магнітне поле відсутнє, при $L_h=25.4 \text{ \AA}$ і $L_e=22.6 \text{ \AA}$ експериментальне значення енергії утворення екситона з важкою діркою $E_{ex,1}=12.6 \text{ меВ}$ (без врахування енергії розмірного квантування і ширини забороненої зони). При інших значеннях товщин шарів GaAs і AlAs, відповідно $L_e=22.6 \text{ \AA}$ і $L_h=28.3 \text{ \AA}$, енергія утворення екситона $E_{ex,2}=14.8 \text{ меВ}$. На рис.6 подано залежність теоретично обчислених енергій утворення екситона E_x від товщини L_e шару AlAs при значенні $L_h=25.4 \text{ \AA}$, яке використовувалось в експериментальних зразках (крива 1), а також залежність E_x від товщини L_h шару GaAs, якщо $L_e=22.6 \text{ \AA}$ (крива 2).

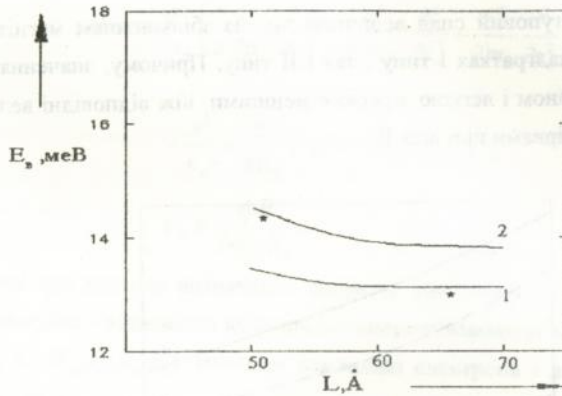


Рис.6. Залежність теоретично обчислених енергій утворення екситона E_e від товщини $L = L_e + L_h$ при значенні $L_h = 25.4 \text{ \AA}$ (крива 1) і при $L_e = 22.6 \text{ \AA}$ (крива 2).

Зірочками відмічені наведені вище експериментальні дані. Обидва графіки вказують на збільшення E_e при зменшенні геометричних параметрів структури, що і спостерігалось на експерименті. Крім того, одержані числові значення енергій екситонів мало відрізняються від отриманих експериментально. Розрахунки показують, що відносні похибки $\eta = \frac{E_e - E_{ex}}{E_{ex}}$ дорівнюють:

$$\eta_1 = 2,1\% \quad (L_h = 25,4 \text{ \AA} \text{ і } L_e = 39,6 \text{ \AA}),$$

$$\eta_2 = 1,6\% \quad (L_e = 22,6 \text{ \AA} \text{ і } L_h = 28,3 \text{ \AA}),$$

що вказує на достатню точність вибраної моделі надграток, а також методу розрахунку енергій утворення екситона. Проведені обчислення можна використати для теоретичного вивчення екситонів в різних надгратках, які експериментально досліджуються.

Основні результати і висновки:

1. Обчислено енергію, ефективну масу магнітополярона та середнє число фононів у поляронному стані як варіаційним методом Лі-Лоу-Пайнса, так і методом функцій Гріна при врахуванні в масовому операторі всіх одно-, дво- і трифононних віртуальних процесів. Встановлено, що в такому підході метод функцій Гріна можна застосувати в теорії магнітополярона.

2. Показано, що збільшення магнітного поля веде до збільшення енергії зв'язку магнітополярона, збільшення його ефективної маси і середнього числа фононів у поляронному стані. Останнє пояснюється ефективним зростанням у магнітному полі константи електрон-фононної взаємодії.

3. Використано метод функцій Гріна при врахуванні багатофононних віртуальних процесів до вивчення циклотронного резонансу в кристалах із слабким і проміжним електрон-фононним зв'язком. Встановлено, що для узгодження теорії та експерименту при обчисленні енергії циклотронного резонансу в таких кристалах необхідно враховувати міжрівневу взаємодію, багатофононні віртуальні процеси та кейнівський закон дисперсії.

4. Варіаційним методом розв'язало рівняння Шредингера для зв'язаного стану електрона і дірки при врахуванні взаємодії з поверхнями тонкої плівки.

5. На основі проведених розрахунків пояснено експериментально спостережувану залежність величини діаманітного зсуву A і B екситонних серій в MoS_2 від товщини плівок. Показано, що збільшення товщини плівки веде до зменшення "деформації" екситона і, внаслідок цього, до збільшення коефіцієнту діаманітного зсуву.

6. Використовуючи варіаційний метод, визначено енергії та хвильові функції екситона Ванье-Мотта в напівпровідникових наддратках GaAs/AlAs , InAs/GaSb I та II типів при наявності однорідного магнітного поля. Встановлено, що енергії утворення екситонів зростають із збільшенням магнітного поля та зменшенням величини періоду наддраток. Отримані теоретичні результати добре узгоджуються з експериментом.

Основні результати дисертаційної роботи викладені в публікаціях:

1. Бойчук В.І., Стасів Н.І., Білинський І.В. Основний стан екситона Ванье-Мотта в тонкій анізотропній плівці // УФЖ-1991.-т.36,№2.-с.177-180.
2. Бойчук В.И., Стасив Н.И. Основное экситонное состояние и диамагнитный сдвиг в пленке кристалла MoS_2 // ФТТ - 1992.-т.34,№1.-с.215-218.
3. Бойчук В.И., Гамарник А.Т., Пазюк Р.И., Стасив Н.И. Экситон Ванье-Мотта в тонкой пленке анизотропного полупроводника. -Львов: 1992.-16с. (Препр./ АН УССР Ин-т физики конденс. систем -92-7Р).
4. Бойчук В.І., Стасів Н.І. Електрон-фононна система іонного напівпровідника у сильному магнітному полі // УФЖ -1995.-т.40,№10.-с.1093-1097.
5. Бойчук В.І., Стасів Н.І., Пазюк Р.І. Циклотронний резонанс в кристалах з проміжним електрон-фононним зв'язком // УФЖ -1997.-т.42,№4.-с.411-414.
6. Бойчук В.І., Пазюк Р.І., Стасів Н.І. Енергія та ефективна маса основного та збуджених станів полярона подвійної симетричної гетероструктури // УФЖ -1997.-т.42,№5.-с.564-569.
7. Бойчук В.И., Билинский И.В., Стасив Н.И., Пазюк Р.И. Экситон Ванье-Мотта в полупроводниковой пленке //III Всесоюзная конференция по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок. Тезисы докладов. Часть II. Ивано-Франковск.-1990.-с.233.
8. Бойчук В.І., Білинський І.В., Ковальчук С.М., Пазюк Р.І., Стасів Н.І. Стани електрон-діркової системи в квантовій ямі простої гетероструктури// Збірник доп. ювілейної конференції ІЕФ-93.-Ужгород-1993.-с.95-98.
9. Boichuk V.I., Kovalchuk S.M., Stasiv N.I. Dependence of form-function of exciton stripe of a thin film absorption on its temperature and thickness // *Materials of the 4th international conference.* -Ivano-Frankivsk -1993.-p.65.
10. Білинський І.В., Бойчук В.І., Стасів Н.І. Дослідження поляронних ефектів в простій напівпровідниковій гетероструктурі і в сильному магнітному полі // I Міжнародна науково-технічна конференція "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників".-Чернівці-1994.-с.31.
11. Бойчук В.І., Білинський І.В., Пазюк Р.І., Стасів Н.І. Дослідження впливу фононного та магнітного полів на електрон-діркові стани в простих і подвійних гетероструктурах напівпровідників // *Матеріали V Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок.* Івано-Франківськ - 1995.-с.241.
12. Бойчук В.І., Стасів Н.І., Пазюк Р.І. Екситонні стани в квантових ямах GaAs/AlAs типу II // *Науковий семінар з статистичної теорії конденсованих систем. Тези доповідей.* - Львів - 1997.-с.34.

Список цитованої літератури:

1. Левинсон И.Б., Рашба Є.И. Пороговые явления и связанные состояния в полярной проблеме // УФН.-1973.-т.111,№4.-с.683-718.
2. Ткач Н.В. Системы точных уравнений для массового оператора квазичастиц, взаимодействующих с фононами // ТМФ.-1984.-т.61,№3.-с.400-408.
3. Андриюшин Е.А., Силин А.П. Экситоны в тонких полупроводниковых пленках // ФТТ.-1980.-22,№9.-с.2676-2680.
4. Hodge C.C., Phillips C.C., Skolnick M.S., Smith G.W., Whitehouse C.R., Dawson P. and Foxon C.T. Induced absorption spectroscopic determination of exciton binding energies in type-II GaAs/AlAs superlattices // Phys.Rev.B.-1990.-v.41,№17.-p.12319-12322.

Стасів Н.І. *Вплив магнітного поля на екситонні та електронні стани в напівпровідниках.* — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 - фізика напівпровідників і діелектриків, Чернівецький державний університет, Чернівці, 1997.

У дисертаційній роботі проведено дослідження електрон-фононної системи іонного напівпровідника в сильному магнітному полі. Методом функцій Гріна, у масовому операторі яких враховано багатофононні віртуальні процеси, обчислено енергію, ефективну масу магнітополярона, середнє число фононів у поляронному стані та енергії циклотронного резонансу для кристалів з проміжним електрон-фононним зв'язком. Показано, що запропонована методика дозволяє отримати досить високу збіжність теорії з експериментальними даними. Розв'язно задачу основного стану екситона Ваньє-Мотта в тонкій плівці анізотропного напівпровідника. Для плівок конкретних кристалів отримано залежність енергії зв'язку екситона, діаманітного зсуву від товщини плівки. Варіаційним методом досліджено вплив однорідного магнітного поля на енергію утворення екситона, відстані між електроном і діркою, що перебувають у зв'язаному стані в надгратках I та II типів. Показано, що вибрана модель є достатньо ефективною для теоретичного вивчення екситонного спектру в різних надгратках, які експериментально досліджуються.

Ключові слова: магнітне поле, напівпровідник, екситонні стани, магніто-полярон, анізотропія, діаманітний зсув, надгратка.

Стасив Н.И. *Влияние магнитного поля на экситонные и электронные состояния в полупроводниках.* — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков. Черновицкий государственный университет, Черновцы, 1997.

В диссертационной работе проведено исследование электрон-фононной системы ионного полупроводника в сильном магнитном поле. Методом функций Грина, в массовом операторе которых учтены многофононные виртуальные процессы, вычислено энергию, эффективную массу магнитополярона, среднее число фононов в поляронном состоянии, энергии циклотронного резонанса для кристаллов с промежуточной электрон-фононной связью. Показано, что предлагаемая методика позволяет получить достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными. Решена задача основного состояния экситона Ванье-Мотта в тонкой пленке анизотропного полупроводника. Для пленок конкретных кристаллов получено зависимость энергии связи экситона, диамагнитного сдвига от толщины пленки. Вариационным методом исследовано влияние однородного магнитного поля на энергию образования экситона, расстояния между электроном и дыркой, которые находятся в связанном состоянии в сверхрешетках I и II типов. Показано, что использованная модель является достаточно эффективной для теоретического изучения экситонного спектра в различных, экспериментально используемых, сверхрешетках.

Ключевые слова: магнитное поле, полупроводник, экситонные состояния, магнитополярон, анизотропия, диамагнитный сдвиг, сверхрешетка.

Stasiv N.I. *Influence of magnetic field on exciton and electron states in semiconductors.* — Manuscript.

Thesis on search of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on the speciality 01.04.10 - Physics of Semiconductors and Dielectrics. Chernivtsi State University, Chernivtsi, 1997.

In this thesis work the investigation of electron-phonon system of ionic semiconductor in a strong magnetic field is carried out. With the help of the method of Green functions, in the mass operator of which many-phonon virtual processes are taken in consideration, we calculated the energy and the effective mass of magnetopolaron, the average number of phonons in the polaron state and cyclotron resonance energy for crystals with intermediate electron-phonon connection. It is shown that the suggested methods allow us to get a good agreement of theory with the experimental data. The problem of the

ground state of Wannier-Mott exciton in a thin film of the anisotropic semiconductor is solved. The dependence of exciton binding energy, diamagnetic shift on film thickness is received for films of certain crystals. The influence of the homogeneous magnetic field on the exciton binding energy, distances between the electron and the hole that are in connection in I- and II-type superlattices are investigated by variational method. The chosen model is quite effective for theoretical studies of an exciton spectrum in different superlattices which are being experimentally investigated.

Key words: magnetic field, semiconductor, exciton state, magnetopolaron, anisotropy, diamagnetic shift, superlattice.

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'M. Reif', is located in the lower right quadrant of the page.

Издательство «Ленинградское»
Ленинград, 1937 г.
Учреждение «Ленинградское»
Ленинград, 1937 г.
Ленинградское издательство
Ленинград, 1937 г.

Издательство «Ленинградское»
Ленинград, 1937 г.

1937 г.

Підписано до друку 16.12.97.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим.
Зам. 254.

Надруковано в «Поліграфічних послугах»
293720, Дрогобич, вул. Грушевського, 2

U.S. Post

431722

AB 39.208

AB 39.208