

На правах рукописи



Боев Максим Вадимович

**Транспортные и оптические эффекты в
двумерных экситонных газах**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Ковалёв Вадим Михайлович, доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Тарасенко Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

Пейсахович Юрий Григорьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования Новосибирский государственный технический университет.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

Защита состоится 4 декабря 2018 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 на базе Федерального государственного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук:

<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/boev-m-v>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,

Подпись

Погосов Артур Григорьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В области физики низкоразмерных структур большое количество исследований посвящено разнообразным электрон-дырочным системам. Работы в данном направлении ведутся на протяжении уже нескольких десятилетий. Активность исследований в данной области обусловлена рядом интересных физических явлений, характерных для таких систем. При этом можно выделить широкий класс задач, связанный с изучением газа экситонов – нейтральных квазичастиц, представляющих собой связанные пары электронов и дырок.

Одним из наиболее интригующих явлений, наблюдаемых в двумерных экситонных газах, является эффект конденсации Бозе-Эйнштейна (БЭК), заключающийся в макроскопическом заполнении частицами основного энергетического состояния при понижении температуры ниже критического значения. Фундаментальное значение данного эффекта сложно переоценить, а состоит оно в возможности наблюдения проявлений *квантовой* статистики Бозе-Эйнштейна на *макроскопических* масштабах. К настоящему моменту ведущими экспериментальными группами в данной области была проделана значительная работа [1–4], и на сегодняшний день можно уверенно утверждать о получении конденсата Бозе-Эйнштейна экситонов на базе структур с двойными квантовыми ямами (ДКЯ). При этом узкая линия в спектре фотолюминесценции экситонов не является единственным аргументом, подтверждающим достижение фазы БЭК. Возможности современной экспериментальной техники позволяют проводить измерения степени когерентности излучения, поступающего с разных участков пространственной области фотолюминесценции экситонов. Результаты данных экспериментов подтверждают наличие единой волновой функции экситонов в БЭК.

Текущие исследования БЭК двумерных экситонов ведутся в нескольких направлениях. Помимо упомянутой выше пространственной и временной спек-

троскопии большой интерес вызывают неравновесные процессы, обусловленные взаимодействием экситонного газа с электромагнитными и акустическими полями, элементарными возбуждениями кристалла, а также различной геометрией ограничивающего потенциала. В этом направлении особо важными являются вопросы о способах пространственного переноса экситонов и транспортных свойствах экситонного газа. Ответы на данные вопросы имеют не только фундаментальное значение, но и возможное практическое приложение в области оптоэлектроники.

Наиболее современный спектр задач связан с исследованиями гибридных двумерных экситон-электронных структур. Пристальное внимание к таким системам обусловлено теоретическими предсказаниями возможного наблюдения в них сверхпроводимости и состояния сверхтекучего твердого тела. Стоит отметить, что увеличение количества работ, посвященных данным структурам, лежит в русле общей тенденции роста интереса к системам сильно коррелированных частиц.

Большое фундаментальное значение исследований в обозначенной выше области физики низкоразмерных систем, а также множество еще не решенных проблем определяют актуальность данной диссертации.

Цель диссертационной работы:

Целью настоящей диссертации является построение теории транспортных и оптических эффектов в наноструктурах с двумерными экситонами в условиях их взаимодействия с электромагнитными полями и элементарными возбуждениями двумерного электронного газа.

Научная новизна заключается в решении следующих задач:

1. Построена теория эффектов кулоновского и фотонного увлечения газа двумерных непрямых экситонов в нормальном фазовом состоянии.
2. Дано теоретическое описание резонанса Фано в спектре поглощения электромагнитного излучения гибридной экситон-электронной системы в условиях бозе-конденсации экситонов.

3. Разработана микроскопическая теория процессов захвата электрона на примесный центр в присутствии экситонного бозе-конденсата.

4. Построена теория эффекта генерации объемных звуковых волн газом двумерных непрямых экситонов, облучаемым электромагнитной волной.

5. Теоретически исследованы оптические свойства экситонов в квантовых ямах со спин-орбитальным взаимодействием Рашба.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Построенная теория эффектов кулоновского и фотонного увлечения экситонного газа может найти применение в области оптической электроники и оптических систем коммуникации, а также при экспериментальных исследованиях транспортных свойств двумерных экситонов.

2. Теория резонанса Фано в гибридной экситон-электронной системе вносит вклад в область фундаментальных исследований гибридных Бозе-Ферми систем полупроводниковых наноструктур.

3. Разработанная теория захвата электрона на примесный центр в присутствии бозе-конденсата экситонов может найти применение в исследованиях транспортных свойств гибридных экситон-электронных систем и в области конструирования примесных фотодетекторов.

4. Теоретическое описание эффекта генерации звука газом непрямых экситонов предоставляет дополнительный инструмент в детектировании фазового перехода экситонного газа в состояние бозе-конденсата.

5. Построенная теория оптических переходов экситонов в квантовых ямах со спин-орбитальным взаимодействием описывает тонкую структуру уровней внутреннего движения экситона, а также предсказывает частотное поведение коэффициента поглощения света вблизи порога.

Методология и методы исследования.

Построение теории эффектов, представленных в настоящей диссертации, основано на использовании общепринятых методов физики твердого тела и квантовой теории поля.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость величины кросс-проводимости двумерной экситон-электронной системы от расстояния между экситонным и электронным газами различна в диффузионном и баллистическом режимах транспорта. Температурная зависимость кросс-проводимости существенно зависит от экранировки экситон-электронного взаимодействия экситонной подсистемой.

2. Частотная зависимость плотности потока экситонов в условиях фотонного увлечения проявляет резонансный характер. Положение резонанса определяется расстоянием между уровнями внутреннего движения экситона, отличающимся на единицу собственного значения оператора орбитального момента.

3. В спектре поглощения гибридных двумерных экситон-электронных систем в однородном магнитном поле присутствует несимметричный резонанс Фано.

4. Процессы с испусканием двух боголонов дают основной вклад в вероятность захвата электрона на примесный центр в гибридных экситон-электронных системах.

5. Облучаемый электромагнитной волной газ двумерных непрямых экситонов испускает объемные поперечные звуковые волны. Частотная зависимость амплитуды звуковых волн определяется фазовым состоянием экситонного газа.

6. Тонкая структура уровней внутреннего движения экситонов в квантовых ямах со спин-орбитальным взаимодействием проявляется при внутризонных оптических переходах. Учет кулоновского взаимодействия электрона и дырки снимает расходимость в частотной зависимости вероятности фотоэффекта вблизи порога.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 15 Всероссийской Молодежной Конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013); XII и XIII Российских Конференциях по Физике Полупровод-

ников (Москва, Ершово, 2015; Екатеринбург, 2017); Российской Конференции по Актуальным Проблемам Полупроводниковой Фотоэлектроники «Фотоника – 2015» (Новосибирск, 2015); 24th, 25th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology (St. Petersburg, 2016, 2017); 18th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (Wurzburg, Germany, 2017); META'17, the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (Incheon - Seoul, South Korea, 2017).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 99 страниц, включая 19 рисунков. Библиография включает 112 наименований на 11 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту положения.

В Обзоре литературы приведено описание уникальных свойств двумерных наноструктур с экситонным газом, привлекающих внимание исследователей, а также раскрыто современное состояние фундаментальных исследований в данном направлении.

Первая глава "Эффекты увлечения в двумерном газе непрямых экситонов" содержит теоретическое описание эффектов, характеризующих транспортные свойства двумерного газа непрямых экситонов, пребывающего в нормальном фазовом состоянии.

В параграфе **1.1** изложена теория эффекта кулоновского увлечения двумерного экситонного газа постоянным электрическим током в близко лежащем электронном слое [A1]. Для построения данной теории использована диаграммная техника Мацубары. Такой подход позволяет единым образом рассмотреть как квазибаллистический предел Друде-Больцмана, так и диффузионный предел.

Ключевым параметром эффекта кулоновского увлечения выступает кросс-проводимость, определяемая как коэффициент пропорциональности между плотностью потока экситонов и приложенным к двумерному электронному газу электрическим полем: $\mathbf{J} = \sigma_D \mathbf{E}$, где σ_D – кросс-проводимость, являющаяся скалярной величиной в отсутствие магнитного поля. Вычисление кросс-проводимости в линейном приближении по приложенному электрическому полю проводится с помощью формулы Кубо [5]:

$$\sigma_D(\mathbf{R} - \mathbf{r}, t - t') = -e \frac{\Theta(t - t')}{\Omega} \langle [\mathbf{J}(\mathbf{R}, t), \mathbf{j}(\mathbf{r}, t')] \rangle, \quad (1)$$

где $\mathbf{J}(\mathbf{R}, t)$ и $-e\mathbf{j}(\mathbf{r}, t')$ – операторы плотности потока экситонов и плотности электронного тока соответственно; Ω – частота приложенного поля; \mathbf{R} и \mathbf{r} – радиус-вектора в плоскостях экситонного и электронного газов, а искомое выражение для статической кросс-проводимости получается с помощью предельного перехода $\sigma_D = \lim_{\Omega \rightarrow 0} \lim_{\mathbf{Q} \rightarrow 0} \sigma_D(\mathbf{Q}, \Omega)$, где $\sigma_D(\mathbf{Q}, \Omega)$ – Фурье-образ кросс-проводимости (1). При построении теории кулоновского увлечения учитывается наличие случайного потенциала $u_i(\mathbf{r})$, порожденного примесями и иными дефектами. Для расчета принимается стандартная модель случайного примесного поля, статистические свойства которого описываются соотношениями $\langle u_i(\mathbf{r}) \rangle = 0$, $\langle u_i(\mathbf{r}) u_i(\mathbf{r}') \rangle = u_0^2 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$, при этом полагается, что рассеяние на случайном по-

тенциале в экситонной и электронной подсистемах происходят независимо. Учет приместного потенциала позволяет рассмотреть эффект кулоновского увлечения в двух режимах транспорта экситонов и электронов – диффузионном и баллистическом. Для каждого режима транспорта рассмотрены предельные случаи по параметру отношения расстояния между экситонным и электронным слоями l к длине экранирования экситон-электронного взаимодействия $1/\kappa$, где $\kappa = 2e^2m_e/\epsilon$ – импульс Томаса-Ферми. Полученные выражения для кросс-проводимости приведены в Табл.1 (в таблице и до конца абзаца восстановлена постоянная Планка). В формулах в Табл.1 d – размер экситона, m_e и

Диффузионный режим	$\kappa l \ll 1$	$\sigma_D = -\frac{e T e^4 d^2 \tau_e \tau_{ex}}{\hbar} \frac{F(T)}{2\epsilon_T^2 (l\hbar)^2 (1 + \tau_e \epsilon_F M / \hbar m_e)}$
	$\kappa l \gg 1$	$\sigma_D = -\frac{e 3T e^4 d^2 \tau_e \tau_{ex}}{\hbar 4\epsilon_T^2 (\kappa l)^2 (l\hbar)^2} \frac{F(T)}{(1 + \tau_e \epsilon_F M / \hbar m_e)}$
Баллистический режим	$\kappa l \ll 1$	$\sigma_D = -\frac{e 2T e^4 d^2 \tau_e \tau_{ex}}{\hbar M \hbar \epsilon_T^2 v_F l^3} F(T)$
	$\kappa l \gg 1$	$\sigma_D = -\frac{e 6T e^4 d^2 \tau_e \tau_{ex}}{\hbar M \hbar \epsilon_T^2 v_F l^3} \frac{F(T)}{(\kappa l)^2}$

Таблица 1: Выражения для кросс-проводимости в различных предельных случаях

M – эффективные массы электрона и экситона соответственно, $\tau_e = 1/(m_e u_0^2)$ и $\tau_{ex} = 1/(M u_0^2)$ – времена рассеяния на случайном потенциале, v_F и ϵ_F – скорость и энергия Ферми,

$$\epsilon_T = \epsilon [1 + (e^{T_c/T} - 1) 8d/a_B] \quad (2)$$

– перенормированная экситонным экранированием диэлектрическая проницаемость, a_B – борковский радиус экситона, $T_c = \pi \hbar^2 N / 2M$, N – полная концентрация экситонов, а

$$F(T) = \frac{2M}{\pi \hbar^2} (e^{T_c/T} - 1). \quad (3)$$

Отрицательная величина кросс-проводимости имеет простой физический смысл: возникновение экситонного тока обусловлено передачей импульса от движущихся электронов. В связи с тем, что движение электронов и внешнее электрическое поле направлены противоположно, то и экситонный ток течет в обратном относительно внешнего поля направлении.

В параграфе **1.2** изложена теория эффекта фотонного увлечения двумерного экситонного газа, заключающегося в возникновении экситонного потока при передаче импульса фотона экситону [A2]. Несмотря на то, что непрямые экситоны в двойных квантовых ямах являются нейтральными по своей природе возбуждениями, они, тем не менее, обладают встроенным дипольным моментом, что позволяет управлять их движением посредством электрического поля. Однако такой способ имеет ряд ограничений. Например, если поле создается электромагнитной волной, ток увлечения будет иметь малость порядка ka (где k – волновой вектор света, a – плечо диполя), поскольку длина световой волны значительно превосходит величину a . Тем не менее, известно, что в случае резонансного взаимодействия, эффект светового давления на атомы может стать существенным даже в рамках дипольного приближения [6]. Действительно, основная идея механического воздействия света на атомы (в условиях резонансного светового давления) заключается в следующем. Электромагнитное поле световой волны, E , наводит индуцированный дипольный момент, $p = \alpha(\omega)E$, где $\alpha(\omega)$ – динамическая поляризуемость атома. При этом сила, действующая на атом, даётся усреднением величины $F = -\nabla U$ по времени, где $U = -pE$ – энергия поляризованного атома в поле волны. В результате в стационарном режиме получаем: $\langle F \rangle = \alpha(\omega)\nabla\langle E^2 \rangle$. Из этого выражения видно, что если частота света близка к частоте атомного перехода, величина силы возрастает резонансно. Изложенные соображения могут быть применены и к экситонным возбуждениям кристалла. Таким образом, настоящий параграф посвящен построению квантовой теории эффекта фотонного увлечения применительно к дипольным экситонам, пребывающим в нормальной фазе. Результат расчета потока увле-

каемых экситонов в дипольном приближении сводится к выражению:

$$j = j_0 F(\omega), \quad (4)$$

где j_0 определяется заселенностями уровней внутреннего движения экситонов, амплитудой и углом падения электромагнитной волны, а безразмерный множитель

$$F(\omega) = \frac{(\Delta\tau)^2}{\omega\tau} \left[\frac{1}{1 + (\omega\tau - \Delta\tau)^2} - \frac{1}{1 + (\omega\tau + \Delta\tau)^2} \right] \quad (5)$$

характеризует частотное поведение потока увлечения (Рис.1). В формуле (5) ω – частота падающей волны, τ – время рассеяния экситона на примесных центрах, Δ – расстояние между уровнями внутреннего движения, различающимися на единицу собственного значения оператора углового момента.

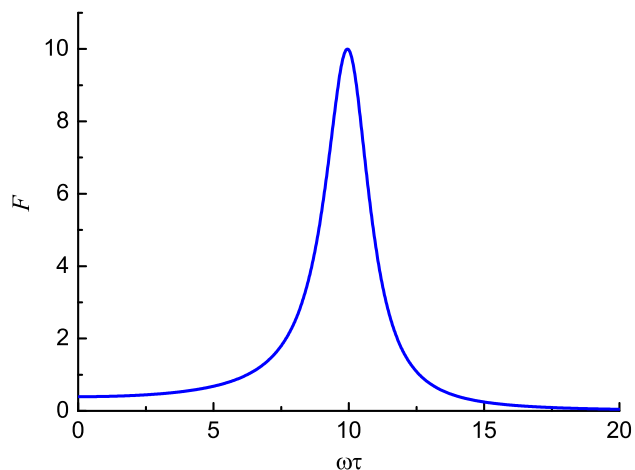


Рис. 1: Резонансное поведение плотности тока увлечения экситонов как функции частоты света.

В параграфе **1.3** приведены краткие выводы к первой главе.

Во второй главе "*Магнетоплазменный резонанс и процессы захвата в гибридной экситон-электронной системе*" теоретически исследована полупроводниковая гетероструктура, в которой непрямые экситоны локализованы в двойной квантовой яме, а электроны – в отстоящей на некотором расстоянии одиночной квантовой яме.

В параграфе **2.1** изложена теория, описывающая появление резонанса Фано в спектрах поглощения электромагнитного излучения гибридной экситон-электронной системой в однородном магнитном поле в условиях конденсации Бозе-Эйнштейна в экситонном газе [А3]. В такой системе несмотря на то, что движение частиц в плоскости квантовых ям является инфинитным, рассеяние

электронов и экситонов друг на друге, обусловленное электрон-экситонным взаимодействием, приводит к возможности распространения частиц по многим траекториям, интерферирующим между собой. В зависимости от характера интерференции - конструктивной либо деструктивной – транспорт частиц может как усиливаться, так и оказаться подавленным [7],[8], что проявляется в виде резонанса Фано, имеющего несимметричную форму и образованного двумя резонансными максимумами и одним минимумом.

Количественной характеристикой данного эффекта выступает поглощаемая структурой мощность электромагнитного излучения с частотой ω и волновым числом k . Данная величина пропорциональна вещественной части проводимости двумерного электронного газа в магнитном поле $\text{Re } \tilde{\sigma}_{k\omega}$, перенормированной экситон-электронным взаимодействием. Результат вычисления перенормированной проводимости сводится к следующему выражению:

$$\tilde{\sigma}_{k\omega} = \frac{1}{\sigma_B^{-1} + i \frac{k^2}{e^2 \omega} [U_k + V_k^2 P_{k\omega}]},$$

где σ_B – комплексная проводимость электронного газа в переменном электрическом и постоянном магнитном полях, U_k и V_k – потенциалы электрон-электронного и электрон-экситонного взаимодействий соответственно, $P_{k\omega}$ – функция отклика БЭК экситонов. Для построения частотной зависимости поглощаемой мощности были выбраны типичные для эксперимента параметры структуры: размер экситона $d = 10^{-6}$ см, расстояние между электронным и экситонным слоями $a = 10^{-5}$ см, друдевская проводимость электронного газа $\sigma_0 = 3.2 \cdot 10^{-5}$ см/с, фиксированное дифракционной решеткой волновое число электромагнитной волны $k = 4.2 \cdot 10^4$ см $^{-1}$. На Рис.2 приведены спектры поглощения, на которых явно проявляется резонанс Фано. С увеличением скорости боголонов резонанс Фано сдвигается в область больших частот внешнего электромагнитного поля, причем вдали от магнетоплазмонного резонанса его форма существенно асимметричная (Рис. 2(а) и 2(с)).

В параграфе **2.2** представлена теория процессов захвата электрона в ги-

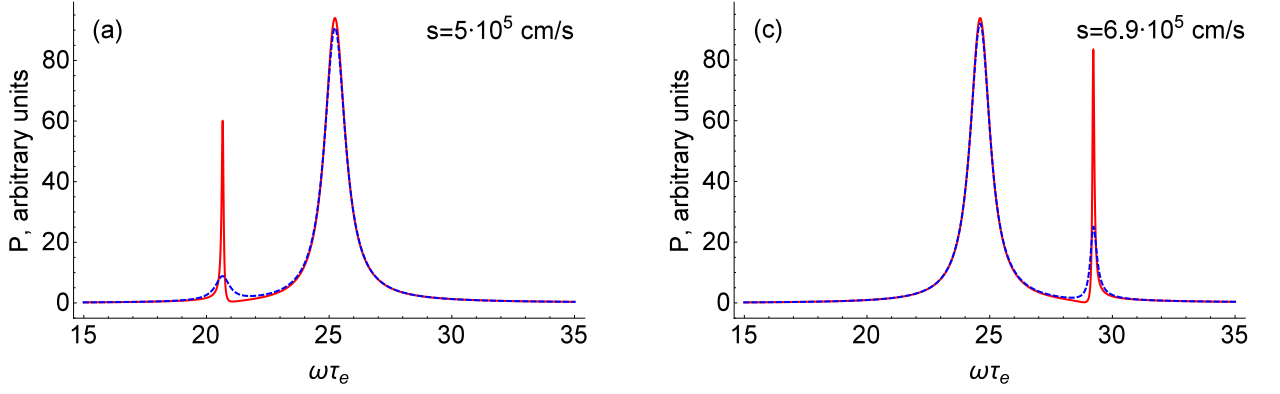


Рис. 2: Проявление Фано-резонанса в спектре поглощения гибридной электрон-экситонной системы. На графиках приведена частотная зависимость поглощаемой мощности излучения P при различных скоростях боголюбовского звука s и временах релаксации в экситонной подсистеме: $\tau_X = 10^{-8}$ с (красная сплошная кривая) и $\tau_X = 10^{-10}$ с (синяя пунктирная кривая).

бридной экситон-электронной системе на примесные состояния [A4]. Как известно, наличие примесей в полупроводниковых наноструктурах сильно влияет на их свойства [9, 10]. При низких температурах рассеяние на примесных атомах является доминирующим и определяет электрические свойства наноструктур, в частности, их проводимость [11]. В зависимости от знака взаимодействия электрон может либо рассеиваться на примесном центре, либо захватываться им [12–14]. На языке классической теории Друде первый процесс определяет эффективное транспортное время экситонов, тогда как второй процесс приводит к уменьшению концентрации электронов, дающих вклад в транспорт.

В большинстве случаев захват электрона на примесный центр сопровождается испусканием акустических и оптических фононов [15–17], при котором электрон теряет энергию и становится локализованным. Такой механизм захвата электрона считается основным, однако, можно ожидать, что боголюбовские возбуждения экситонного конденсата, представляющие собой колебания его плотности, также способны приводить к захвату электрона на примесь.

Построение теории захвата электрона проведено в низшем порядке теории возмущений по экситон-электронному взаимодействию. При этом учтены процессы захвата, сопровождаемые испусканием одного либо двух боголонов (Рис. 3). Полученные аналитические выражения были использованы для коли-

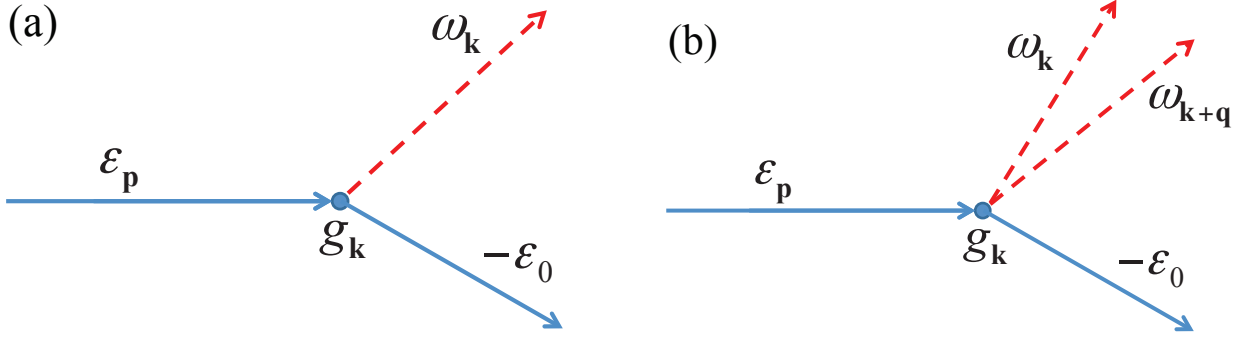


Рис. 3: Схематическое изображение захвата электрона, сопровождаемого испусканием одного (a) либо двух (b) боголонов.

чественного сравнения одно- и двухбогolonного вкладов в вероятность захвата. В связи с тем, что реальные структуры, позволяющие экспериментально наблюдать БЭК экситонов, получают на основе соединений InAlGaAs и MoS₂ [18], для численного расчета были выбраны типичные параметры экспериментальной реализации на основе соединений GaAs: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 12.5$, массы электрона и экситона $m = 0.067 m_0$ и $M = 0.517 m_0$ соответственно (m_0 – масса свободного электрона), размер экситона $d = 10$ нм, расстояние между экситонным и электронным слоями $l = 50$ нм, а также на основе MoS₂: диэлектрическая проницаемость h-BN $\epsilon = 4.89$, эффективная масса электрона $m = 0.47 m_0$, эффективная масса экситона типа "A" $M = 0.499 m_0$, $d = 3.5$ нм (что составляет приблизительно 10 монослоев h-BN) и $l = 17.5$ нм [19]. Полученные зависимость вероятности захвата от плотности экситонного БЭК представлены на Рис. 4

В параграфе 2.3 приведены краткие выводы к первой главе.

В третьей главе "*Взаимодействие двумерных экситонов с внешним электромагнитным полем: генерация звука и оптические переходы*" представлена теория эффектов, проявляющихся при помещении экситонного газа в поле электромагнитной волны.

В параграфе **3.1** рассматривается задача о генерации звуковых волн экситонным газом под действием внешнего электромагнитного возмущения, промодулированного металлической дифракционной решеткой (grating structure),

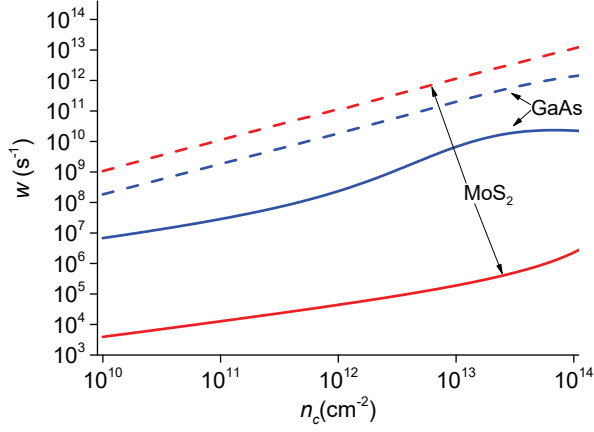


Рис. 4: Зависимость вероятности захвата электрона от плотности экситонов в БЭК. Сплошные линии соответствуют захвату с испусканием одного бogoлона, пунктирные – двух бogoлонов.

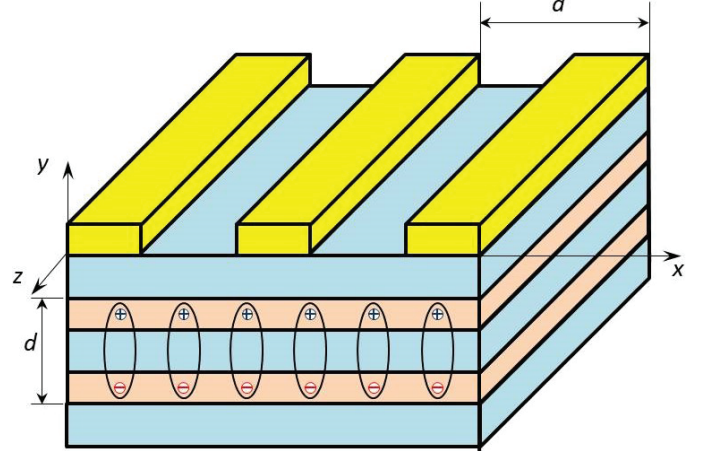


Рис. 5: Экситонный газ в двойной квантовой яме

расположенной над двумерным экситонным газом (Рис.5) [А5,А6]. Основным вопросом здесь является поведение амплитуды колебаний вектора смещения решетки при фазовом переходе экситонного газа в режим бозе-эйнштейновского конденсата. Кроме общefизического интереса, такая задача может иметь и практическое значение, как метод экспериментального детектирования указанного перехода.

Решение уравнений движения упругой среды с учетом граничных условий на поверхности изотропной подложки позволяет записать компоненты вектора смещения в виде:

$$\begin{aligned} u_x(x, y) &= [A_x^l(k_a, \omega)e^{-i\chi_l y} + A_x^t(k_a, \omega)e^{-i\chi_t y}]e^{ik_a x}, \\ u_y(x, y) &= [A_y^l(k_a, \omega)e^{-i\chi_l y} + A_y^t(k_a, \omega)e^{-i\chi_t y}]e^{ik_a x}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_a = 2\pi/a$, $\chi_{l,t} = \sqrt{\omega^2/c_{l,t}^2 - k_a^2}$, $\omega > c_l k_a > c_t k_a$, ω – частота электромагнитной волны, c – скорость звука, а индексы l и t – различают продольную и поперечную волны. Амплитуды колебаний в формуле (6) пропорциональны фурье-образу силы, действующей на экситоны со стороны электромагнитной

волны $A_i^j \sim f(k_a, \omega) \sim S(k_a, \omega)W(k_a, \omega)$, где $S(k_a, \omega)$ – функция линейного отклика экситонного газа, а $W(k_a, \omega)$ – фурье-образ взаимодействия дипольного момента экситона с электромагнитным полем. Таким образом, частотное поведение амплитуд генерируемого звука определяется поведением функции отклика $S(k_a, \omega)$ выше и ниже температуры конденсации экситонного газа. При не больших частотах $\omega > c_l k_a$; $\omega > c_t k_a$ все четыре амплитуды в (6) одного порядка величины, и излучаемая в объем подложки волна представляет собой линейную комбинацию поперечной и продольной волн. При больших частотах $\omega \gg \max[c_{l,t}]k_a$ амплитуда $A_x^t(k, \omega) \sim \chi_t^3$ становится значительно больше всех остальных, т.е. излучаемая волна становится почти полностью поперечной, распространяясь под малым углом $\alpha \approx k_a c_t / \omega \ll 1$ к нормали структуры.

В параграфе **3.2** теоретически изучается вопрос о тонкой структуре энергетического спектра экситона, обусловленной спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) Рашба электрона и дырки. В данном вопросе интерес привлекает влияние СОВ как на дискретную так и на континуальную области энергетического спектра относительного движения электрона и дырки, а также какое влияние оно оказывает на спектры поглощения света экситоном в квантовой яме (КЯ). Как известно, оператор, описывающий СОВ Рашба для электрона в КЯ, имеет хорошо известный вид:

$$V_e = \alpha[\boldsymbol{\sigma}_e, \mathbf{p}_e]\mathbf{n}, \quad (7)$$

где α – постоянная СОВ, $\boldsymbol{\sigma}$ – матрицы Паули, \mathbf{p} – импульс электрона, \mathbf{n} – нормаль к плоскости КЯ. Спин-орбитальное взаимодействие дырок описывается оператором [20]

$$V_h = \beta[\mathbf{J}, \mathbf{p}_h]\mathbf{n}, \quad (8)$$

где \mathbf{J} – оператор углового момента $j = 3/2$. Оператор (8) смешивает состояния легких и тяжелых дырок. Однако если квантование дырок в КЯ является достаточно сильным, т.е. энергетическое расстояние E_0 между нижайшими подзонами легких и тяжелых дырок достаточно велико, то дополнительное сла-

гаемое (8) в гамильтониане можно "расцепить" на два независимых слагаемых для тяжелых и легких дырок. При этом оказывается, что СО-расщепление спектра тяжелых дырок значительно меньше по сравнению с расщеплением легких, поэтому им можно пренебречь. Оператор СОВ легких дырок имеет вид, аналогичный электронному:

$$V_{lh} = \beta[\boldsymbol{\sigma}_{lh}, \mathbf{p}_{lh}]\mathbf{n}, \quad (9)$$

Расчет вероятности поглощения света показал, что в случае межзонного перехода в спектрах поглощения не проявляется тонкая структура уровней внутреннего движения экситона, а происходит лишь сдвиг максимумов поглощения на постоянную величину $\gamma = \mu(\alpha^2 + \beta^2)$, где μ – приведенная масса экситона. Напротив, при внутризонных оптических переходах в спектре поглощения экситона появляется тонкая структура, обусловленная переходами между ранее вырожденными состояниями. Для переходов с изменением главного квантового числа n СОВ приводит к поправкам к интенсивности переходов $\sim \mu^2\alpha^2$. Теория предсказывает, что при рассмотрении межзонного и внутризонного фотоэффекта важно учитывать кулоновское взаимодействие электрона и дырки в конечном состоянии свободного движения. Это связано с тем, что без учета кулоновского притяжения СОВ приводит к появлению корневой расходимости вероятности фотоэффекта вблизи порога $w \sim 1/\sqrt{\omega - \omega_0}$. Данная корневая расходимость вероятности фотоэффекта обусловлена структурой плотности конечных состояний: наличие кольца экстремумов в энергетическом спектре эффективно "одномеризует" относительное движение электрона и дырки, и частотное поведение вероятности фотоэффекта вблизи порога отражает структуру плотности состояний для одномерных систем. Включение же кулоновского притяжения в конечном состоянии снимает корневую расходимость и модифицирует частотное поведение вероятности фотоэффекта вблизи порога $w \sim \sqrt{\omega - \omega_0}$

В Заключение обобщены основные результаты работы:

- Построена теория кулоновского увлечения газа непрямых экситонов, пребывающих в нормальном фазовом состоянии, электронным током в близлежащей КЯ. В рамках данной теории получены выражения для кросс-проводимости экситонного газа в диффузионном и баллистическом режимах транспорта. Анализ полученных выражений в предельных случаях по параметру отношения межслоевого расстояния l к длине экранировки экситон-электронного взаимодействия $1/\kappa$ показал, что величина кросс-проводимости в области $\kappa l \ll 1$ ведет себя как $\sim 1/l^2$ в диффузионном режиме и $\sim 1/l^3$ в баллистическом, а в обратном пределе $\kappa l \gg 1$ – как $\sim 1/l^4$ и $\sim 1/l^5$ соответственно. В диффузионном режиме транспорта зависимость кросс-проводимости от процессов примесного рассеяния электронов фактически отсутствует. Температурная зависимость кросс-проводимости существенно зависит от экранировки межслоевого взаимодействия как электронной, так и экситонной подсистемами, при этом в пределе высокой температуры величина кросс-проводимости стремится к постоянному значению.
- Разработана теория фотонного увлечения газа непрямых экситонов. Показано, что частотное поведение плотности потока экситонов является резонансным, при этом положение резонанса определяется расстоянием между энергетическими уровнями внутреннего движения экситона, отличающимися на единицу собственного значения оператора орбитального момента. При инверсной заселенности уровней внутреннего движения экситонов должен наблюдаться поток экситонов в противоположном направлении распространению света, что объясняется эффектом отдачи при спонтанном испускании фотонов инверсно-заселенными экситонами.
- Теоретически исследован спектр поглощения электромагнитного излучения гибридной экситон-электронной системы, помещенной в перпендикулярное магнитное поле. Показано, что в достаточно чистых структурах,

следует ожидать наблюдения двух резонансов поглощения, причем первый резонанс обусловлен поглощением электромагнитной волны магнетоплазмонами, а второй резонанс, обладающий несимметричной формой резонанса Фано, возникает вследствие кулоновское взаимодействие между электронной и экситонной подсистемами.

- Разработана теория захвата двумерного электрона на примесный центр, сопровождаемого процессами испускания элементарных возбуждений БЭК непрямых экситонов. В рамках данной теории получены выражения, позволяющие рассчитать вероятность захвата с испусканием одного либо двух фотонов. Показано, что оба вклада соответствуют одному порядку теории возмущений по экситон-электронному взаимодействию. Приведена зависимость вероятности захвата электрона от концентрации экситонов в БЭК, рассчитанная для наноструктур на базе двух материалов – GaAs и MoS₂.
- Построена теория испускания объемных звуковых волн газом непрямых двумерных экситонов, облучаемых электромагнитной волной. Проведен анализ частотной зависимости амплитуды генерируемого звука, на основании которого можно заключить, что испускаемая звуковая волна является поперечной и распространяется под малым углом к нормали плоскости ДКЯ. При переходе через точку бозе-конденсации экситонного газа частотная зависимость амплитуды звуковой волны меняется с $\sim \omega^{-3}$ при $T > T_c$ на $\sim \omega^{-2}$ при нулевой температуре, а фаза волны приобретает добавку $\varphi \rightarrow -\pi/2$.
- Теоретически изучена тонкая структура уровней внутреннего движения экситонов в КЯ со спин-орбитальным взаимодействием Рашба. Исследовано частотное поведение вероятности межзонных и внутризонных переходов, а также межзонного и внутризонного фотоэффекта. Проведен анализ

вероятности межзонного и внутризонного фотоэффекта вблизи порога, из которого следует, что кулоновское притяжение электрона и дырки снимает расходимость вероятности поглощения.

Список публикаций

- A1. Боев, М. В. Кулоновское увлечение непрямых экситонов в гибридной экситон-электронной системе / М. В. Боев , В. М. Ковалев // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Т. 107. — С. 668
- A2. Боев, М. В. Эффект резонансного фотонного увлечения дипольных экситонов / М. В. Боев , В. М. Ковалев // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Т. 107. — С. 763
- A3. Boev, M. V. Magnetoplasmon Fano resonance in Bose-Fermi mixtures / M. V. Boev, V. M. Kovalev, I. G. Savenko // Physical Review B.—2017.—Vol. 94.—P. 241408.
- A4. Boev, M. V. Bogolon-mediated electron capture by impurities in hybrid Bose-Fermi systems / M. V. Boev, V. M. Kovalev, I. G. Savenko // Physical Review B. — 2018. — Vol. 97.—P. 165305.
- A5. Боев, М. В. Генерация звука двумерным газом непрямых дипольных экситонов / М. В. Боев , В. М. Ковалев, А. В. Чаплик // Письма в ЖЭТФ. — 2015. — Т. 102. — С. 923.
- A6. Boev, M. V. Interaction of Rayleigh waves with 2D dipolar exciton gas: impact of Bose-Einstein condensation / M. V. Boev, A. V. Chaplik, V. M. Kovalev // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — Vol. 50. — P. 484002.
- A7. Боев, М. В. Оптические переходы экситонов в квантовых ямах со спин-орбитальным взаимодействием / М. В. Боев , В. М. Ковалев // Письма в ЖЭТФ. — 2013. — Т. 97. — С. 150–155.

Цитированная литература

1. Ларионов, А. В. О конденсации межъямных экситонов в GaAs/AlGaAs двойных квантовых ямах / А. В. Ларионов, В. Б. Тимофеев // Письма в ЖЭТФ. — 2001. — Т. 73. — С. 342–350.
2. Тимофеев, В. Б. О фазовой диаграмме бозе-конденсации диполярных экситонов в GaAs/AlGaAs гетероструктурах с квантовыми ямами / В. Б. Тимофеев, А. В. Горбунов // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Т. 96. — С. 145–155.
3. Butov, L. V. Condensation and pattern formation in cold exciton gases in coupled quantum wells / L. V. Butov // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2004. — Vol. 16. — P. R1577.
4. Butov, L. V. Cold exciton gases in coupled quantum well structures / L. V. Butov // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2007. — Vol. 19. — P. 295202.
5. Mahan, G. D. Many-Particle Physics / G. D. Mahan. — New York: Plenum Press, 1990. — P. 1032.
6. Казанцев, А. П. Резонансное световое давление / А. П. Казанцев // УФН. — 1978. — Т. 124. — С. 113–145.
7. Nonlinear Fano resonance and bistable wave transmission / A. E. Miroshnichenko, S. F. Mingaleev, S. Flach, Y. S. Kivshar // Physical Review E. — 2005. — Vol. 71. — P. 036626.
8. Ultrafast coherent dynamics of Fano resonances in semiconductors / U. Siegner, M.-A. Mycek, S. Glutsch, D. S. Chemla // Physical Review Letters. — 1995. — Vol. 74. — P. 470–473.
9. Jena, D. Enhancement of carrier mobility in semiconductor nanostructures by dielectric engineering / D. Jena, A. Konar // Physical Review Letters. — 2007. — Vol. 98. — P. 136805.
10. Gibbons, T. M. Impact of impurities on the thermal conductivity of semiconductor nanostructures: First-principles theory / T. M. Gibbons, S. K. Estre-

- icher // Physical Review Letters. — 2009. — Vol. 102. — P. 255502.
11. Simon, S. H. The Oxford Solid State Basics / S. H. Simon. — Oxford: Oxford University Press, 2013. — P. 312.
 12. Influence of impurities on short range electron transport in GaAs / D. G. Eschenko, V. G. Storchak, J. H. Brewer, R. L. Lichti // Physical Review Letters. — 2002. — Vol. 89. — P. 226601.
 13. Shi, L. Ab initio calculations of deep-level carrier nonradiative recombination rates in bulk semiconductors / L. Shi, L. W. Wang // Physical Review Letters. — 2012. — Vol. 109. — P. 245501.
 14. Monte Carlo study of the statistics of electron capture by shallow donors in silicon at low temperatures / A. Palma, J. A. Jimenez-Tejada, A. Godoy et al. // Physical Review B. — 1995. — Vol. 51. — P. 14147.
 15. Gummel, H. Thermal ionization and capture of electrons trapped in semiconductors / H. Gummel, M. Lax // Physical Review. — 1955. — Vol. 97. — P. 1469.
 16. Lax, M. Cascade capture of electrons in solids / M. Lax // Physical Review. — 1960. — Vol. 119. — P. 1502.
 17. Abakumov, V. N. Cross section for recombination of an electron with a positively charged center in a semiconductor / V. N. Abakumov, I. N. Yassievich // JETP. — 1976. — Vol. 44. — P. 345.
 18. Berman, O. L. High-temperature superfluidity of the two-component bose gas in a transition metal dichalcogenide bilayer / O. L. Berman, R. Ya. Kezrashvili // Physical Review B. — 2016. — Vol. 93. — P. 245410.
 19. Kylanpaa, I. Binding energies of exciton complexes in transition metal dichalcogenide monolayers and effect of dielectric environment / I. Kylanpaa, H. P. Komsa // Physical Review B. — 2015. — Vol. 92. — P. 205418.
 20. Winkler, R. Rashba spin splitting in two-dimensional electron and hole systems / R. Winkler // Physical Review B. — 2000. — Vol. 62. — P. 4245.

Научное издание

Боев Максим Вадимович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Транспортные и оптические эффекты в двумерных экситонных газах