

**Академия Наук Молдовы  
Институт Прикладной Физики**

**На правах рукописи  
УДК 538.94; 537.632/.636**

**Думанов Евгений Викторович**

**Коллективные свойства двумерных магнитоэкситонов,  
взаимодействующих с плазмонами**

**01.04.02 – теоретическая и математическая физика**

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук**

**Кишинев – 2008**

**Работа выполнена** в отделе теории полупроводников и квантовой электроники Института Прикладной Физики АНМ.

**Научный руководитель:**

**Москаленко С.А.**

доктор хабилитат физ.-мат. наук,  
профессор, академик АНМ.

**Официальные оппоненты:**

**Касиян А.И.**

доктор хабилитат физ.-мат. наук, профессор,  
Технический Университет Молдовы

**Клюканов А.А.**

доктор хабилитат физ.-мат. наук, профессор,  
Молдавский Государственный Университет

**Члены Ученого Специализированного Совета:**

1. **Москаленко Всеволод**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, академик, ИПФ (Председатель Ученого Специализированного Совета);
2. **Енаке Николай**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, ИПФ (Научный секретарь Ученого Специализированного Совета);
3. **Канцер Валерий**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, академик, АНМ;
4. **Жеру Ион**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, член корреспондент АНМ, АНМ;
5. **Покатилов Евгений**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, член корреспондент АНМ МолдГУ.

Защита состоится “12” декабря 2008 г. в 15.00 часов на заседании Специализированного ученого совета ДН 02.01.04.02-05 в зале заседаний Ученого совета ИПФ АНМ (Молдова, MD-2028, г. Кишинев, ул. Академическая, 5).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института Прикладной Физики АНМ и на сайте [www.cnaa.acad.md](http://www.cnaa.acad.md).

Автореферат разослан . \_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ 2008

**Учёный секретарь специализированного**

**Научного Совета ДН 02.01.04.02-06**

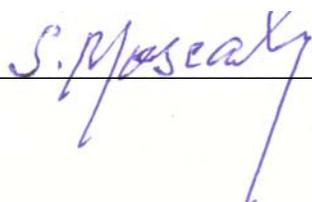
доктор хаб. физ.-мат. наук, профессор



**Енаке Н.А.**

**Научный руководитель:**

док. хаб. физ.-мат. наук, профессор, академик АНМ



**Москаленко С.А.**

**Автор: Думанов Е.В.**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Ключевые слова:** бозе-эйнштейновская конденсация, магнитоэкситон, экситон, электронно-дырочная жидкость, электронно-дырочная пара, оптический плазмон, акустический плазмон.

**Актуальность темы и состояние вопроса.** За прошедшие три десятилетия множество экспериментальных [1-4] и теоретических [5-12] работ были посвящены изучению двумерных (2D) систем в сильном перпендикулярном магнитном поле. Лернером, Лозовиком и Дзюбенко [5-7] впервые было изучено когерентное спаривание 2D электронов ( $e$ ) и дырок ( $h$ ), в процессе формирования бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) экситонов на одночастичное состояние с волновым вектором  $k = 0$ . Если энергией корреляции, связанной с возбужденными уровнями Ландау, можно пренебречь, то точное решение можно получить даже за пределами Хартри-Фоковской (ХФ) аппроксимации. В этом случае магнитоэкситоны при  $T = 0$  представляют собой идеальный экситонный газ. Несмотря на то, что кулоновское взаимодействие между электронами, между дырками, и электронами и дырками не ноль, результирующее взаимодействие между двумя магнитоэкситонами точно равняется нулю. Этот удивительный результат появляется вследствие того, что циклотронные орбиты электрона и дырки, входящие в состав экситона с  $k = 0$ , точно накладываются одна на другую и полностью совпадают, имея одинаковый радиус, несмотря на то, что их циклотронные частоты отличаются друг от друга, если массы электрона и дырки  $m_e, m_h$  не равны друг другу. Радиус циклотронной орбиты равен  $l\sqrt{2}$ , где  $l$  - магнитная длина, независимая от масс  $m_i$ , где  $i = e, h$ . Квадрат магнитной длины равен:  $l^2 = \frac{\hbar c}{eH}$ , где

$H$  - сила магнитного поля. Она предполагается настолько большой, что расстояние между уровнями Ландау для электронов и дырок  $\hbar\omega_{c,i} = \frac{\hbar e H}{m_i c}$  намного больше, чем энергия связи 2D экситона, а

магнитная длина  $l$  - меньше, чем радиус  $a_{ex}$  2D экситона. Критическое значение магнитного поля, которое удовлетворяет этим условиям:  $H_{er} = \frac{4cl^3 \mu^2}{\hbar^3 \epsilon_0^2}$ ;  $\mu = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$ . Для типичных значений кристалла

GaAs  $\epsilon_0 = 12,56$ ;  $\mu \leq m_e = 0,067m_0$ ;  $a_{ex} = 100 \text{ \AA}$  мы можем найти  $H_{er} = 6,57T$ . Другой удивительный результат это то, что капельки металлического типа электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) имеют минимальную энергию, приходящуюся на одну электронно-дырочную пару, когда фактор заполнения  $\nu$  нижайшего уровня Ландау (НУЛ) максимален, то есть  $\nu = 1$ , и эта энергия равна потенциалу ионизации экситона. Поэтому электронно-дырочные капли можно рассматривать как совокупность экситонов, слипшихся вместе [5, 6, 8, 9]. Учет более высоких уровней Ландау (ВУЛ) делает систему слабо неидеальной [5, 6], что приводит к топологическому фазовому переходу типа Березинского-Костерлица-Таулеса [13-15] при конечных температурах [5, 6, 8, 9]. Результаты, полученные в [5-7] были воспроизведены в [8] на основе более простого и прозрачного подхода, используя волновую функцию Бардин-Купер-Шрифферского (БКШ) типа для БЭК экситонов, а энергия основного состояния была рассчитана в Хартри-Фок-Боголюбовском приближении (ХФБП). Но дополнительно в [8] авторы приняли во внимание косвенное взаимодействие между частицами, лежащими на НУЛ из-за их одновременного виртуального перехода в течение кулоновского взаимодействия на более высокие уровни Ландау и их возвращение назад к начальным состояниям. Это косвенное взаимодействие, принятое во внимание в рамках ПХФБ эквивалентно вычислению корреляционной энергии БЭК экситонов, когда их поляризуемость обусловлена переходом заряженных частиц от НУЛ к более высоким уровням Ландау. Однако в [8] были рассмотрены только переходы на уровни Ландау с одинаковыми номерами  $n = m$  и какие-либо оценки этого взаимодействия отсутствуют. Мы провели полную оценку этого взаимодействия с учетом переходов на уровни,  $n = m$  и  $n \neq m$ . Это взаимодействие зависит от малого параметра равного отношению потенциала ионизации экситона  $I_i$  к

расстоянию между уровнями Ландау  $\hbar\omega_c$ . В этом случае циклотронная частота  $\omega_c$  рассчитана для приведенной массы экситона  $\mu$ .

Поляризуемость БЭК, рассмотренная в [9], обусловлена когерентными возбужденными состояниями в рамках НУЛ. Когерентные возбужденные состояния в условиях БЭК описывают случай, когда один экситон, принадлежащий БЭК, становится свободным и образует свободную e-h пару. Энергия возбуждения равна  $I_{ex}(k)$ , где  $I_{ex}(k)$  - ионизационный потенциал магнитоэкситона с волновым вектором  $k$ . Существует другой случай, когда один экситон, входящий в БЭК с волновым вектором  $k$  может перейти в другой экситон с волновым вектором  $\vec{k}' \neq k$ . В этом случае энергия возбуждения будет  $I_{ex}(k) - I_{ex}(k')$ . Но такой способ был принят во внимание только в случае не конденсированных экситонов [9]. Когерентные возбужденные состояния определяют поляризуемость БЭК когда первым ВУЛ и другими внутриэкситонными возбуждениями пренебрегают.

Возможность сосуществования двух БЭК – один с отличным от нуля дипольным моментом и другой без дипольного момента была впервые высказана в работе [10]. В заключение работ [9-12] можно подчеркнуть, что существование относительных минимумов химического потенциала  $\mu(k \neq 0, v^2)$  в зависимости от фактора заполнения  $v^2$  подразумевает формирование метастабильной диэлектрической жидкости с положительной сжимаемостью в окрестности  $v_m^2$ . Диэлектрическая жидкость сформирована из БЭК магнитоэкситонов с дипольным моментом, происходящим от движения. Если фактор заполнения меньше значения соответствующего локальному минимуму  $v_m^2$ , то в этом случае магнитоэкситоны будут группироваться в виде капель жидкости с фактором заполнения  $v_m^2$  вместо однородного распределения на поверхностном слое. Мы провели дальнейшее исследование этого нового состояния, и нашли спектр его коллективных элементарных возбуждений.

**Цель и объект исследования.** Основной целью является определение спектра элементарных возбуждений в 2D системе e-h пар в сильном перпендикулярном магнитном поле взаимодействующих в пределах нижайших уровней Ландау и в отсутствии кинетической энергии квазичастиц, а также определение и влияние ВУЛ на коллективные свойства этой системы. Имеется в виду два ее основных состояния: БЭК магнитоэкситонов и электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ). В процессе работы эти цели были реализованы в двух главных направлениях. Первый аспект связан с выводом гамильтониана непосредственного и косвенного взаимодействия электронов и дырок с учетом влияния ВУЛ и с определением их влияния на основное состояние БЭК магнитоэкситонов и ЭДЖ. Второй аспект диссертации связан с исследованием спектра элементарных возбуждений. Для достижения поставленных целей были рассчитаны и исследованы:

- Матричные элементы кулоновского взаимодействия на волновых функциях электронов в сильном магнитном поле
- Эффективный гамильтониан взаимодействия двумерных электронов и дырок находящихся на нижайших уровнях Ландау
- Химический потенциал бозе-конденсированных двумерных магнитоэкситонов в Хартри-Фок-Боголюбовском приближении
- Применение метода квазисредних Н.Н.Боголюбова для нарушения калибровочной симметрии исходного гамильтониана
- Уравнения движения для операторов флуктуации плотности электронов и дырок, и функций Грина в присутствии бозе-эйнштейновского конденсата магнитоэкситонов на одночастичные состояния с произвольным волновым вектором
- Плазменные колебания в 2D ЭДЖ
- Спектр элементарных возбуждений в случае больших волновых векторов бозе-конденсата в условиях образования метастабильной диэлектрической жидкости

**Научная новизна** представленных в диссертационной работе результатов обусловлена проведённым впервые полным исследованием влияния возбужденных уровней Ландау на бозе-эйнштейновскую конденсацию двумерных магнитоэкситонов, а так же получения спектра элементарных возбуждений в условиях: 1) плазменных колебаний 2D ЭДЖ 2) образования метастабильной диэлектрической жидкости в условиях БЭК магнитоэкситонов. При этом были получены следующие **новые результаты**:

- ❖ Было учтено влияние всех возбужденных уровней Ландау на основное состояние в условиях бозе-эйнштейновской конденсации магнитоэкситонов, причем был рассмотрен общий случай, когда электроны и дырки совершают виртуальные переходы на разноименные уровни Ландау
- ❖ Была доказана возможность сосуществование в системе двух различных фазовых состояний: электронно-дырочной жидкости и БЭК 2D магнитоэкситонов
- ❖ Была показана возможность существования в электронно-дырочных системах квазиэнергетических комплексов с участием плазмонов
- ❖ Был получен энергетический спектр двумерных акустических и оптических плазмонов в присутствии сильного магнитного поля в условиях образования ЭДЖ
- ❖ Был применен метод квазисредних Н.Н.Боголюбова для нарушения калибровочной симметрии исходного гамильтониана
- ❖ Был рассмотрен спектр элементарных возбуждений в случае больших волновых векторов бозе-конденсата в условиях образования метастабильной диэлектрической жидкости. Энергетический спектр элементарных возбуждений изучен в коллинеарной геометрии наблюдения
- ❖ Был получен спектр элементарных возбуждений экситон-плазмонного типа

**Положения, выносимые на защиту:**

- ✓ Получен новый общий гамильтониан непосредственного и косвенного взаимодействия, включающий в себя все возбужденные уровни Ландау, с учетом виртуальных парных возбуждений на разноименные и одноименные ВУЛ.
- ✓ При учете ВУЛ состояние БЭК 2D магнитоэкситонов с волновым вектором  $kl < 0.5$  является устойчивым в приближении Хартри-Фока-Боголюбова. При больших значениях волнового вектора  $kl > 0.5$  влияние когерентных возбужденных состояний является более важным и приводит к появлению метастабильной диэлектрической жидкой фазы [9]. Влияние ВУЛ в этой области незначительно.
- ✓ Поправки, возникшие из-за учета ВУЛ, понижают энергию приходящуюся на одну e-h пару в составе ЭДК. Значение энергии приходящейся на одну пару в составе ЭДК, находится на энергетической шкале в окрестности значения химического потенциала БЭК магнитоэкситонов с волновым вектором  $kl \sim 3-4$  и, следовательно, сосуществование двух состояний возможно.
- ✓ Существуют осцилляции плотности в 2D структуре в пределах нижайшего уровня Ландау, несмотря на отсутствие кинетической энергии.
- ✓ Существует возможность формирования различных квазиэнергетических комплексов с различными свободной энергией и затуханием.
- ✓ В электронно-дырочной системе существует два типа плазменных колебаний: оптические и акустические. В диапазоне малых значений волнового вектора акустическая ветвь плазменных колебаний имеет линейную зависимость. В диапазоне больших волновых векторов, спектр колебаний является монотонным с насыщением. Оптическая ветвь имеет квадратичную зависимость в диапазоне малых значений волнового вектора, немонотонное поведение ротонного типа в средней области и монотонное возрастание с насыщением при больших значениях волнового вектора.
- ✓ Спектр элементарных коллективных возбуждений в условиях БЭК магнитоэкситонов различен при учете и без учета концентрационных поправок. Это связано с участием плазменных ветвей спектра, квадрат энергии которых пропорционален концентрации носителей  $\frac{v^2}{2\pi l^2}$ , где  $v^2$  есть фактор заполнения. Без учета концентрационных поправок плазмоны отсутствуют. Химический потенциал не имеет концентрационных поправок и экситонный спектр элементарных возбуждений такой же, как у идеального экситонного газа, но с волновым вектором  $k \neq 0$ . Из-за

присутствия Бозе-конденсата имеются две экситонные ветви спектра, одна энергетическая, а другая квазиэнергетическая. Учет концентрационных поправок добавляет две плазменные ветви спектра с энергиями отличными от нуля. Их две, так же благодаря присутствию конденсата. Экситонные ветви спектра преобразуются. Из-за изменения химического потенциала появляются энергетические щели у экситонных ветвей и что более существенно, меняется их число. Концентрационные добавки к экситонному спектру появляются в виде плазменных спутников с добавлением плазмона к энергии экситонных ветвей и с отнятием энергии плазмона от энергии экситонных ветвей. Экситонные ветви теперь превращаются в экситон-плазменные ветви, и их число отличается от числа исходных экситонных ветвей.

### **Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:**

- 1) Теоретически изучены:
  - a) Виртуальные переходы квазичастиц с НУЛ на ВУЛ и их влияние на БЭК и ЭДЖ.
  - b) Плазменные колебания двумерной электронно-дырочной жидкости в пределах нижайшего уровня Ландау.
  - c) Элементарные коллективные возбуждения 2D магнитоэкситонов в условиях БЭК и образования метастабильной диэлектрической жидкости.
- 2) Разработаны эффективные аналитические методы, которые позволили:
  - a) Получить эффективный гамильтониан взаимодействия двумерных электронов и дырок, находящихся на нижайшем уровне Ландау
  - b) Сделать расщепление для цепочек уравнений функций Грина
  - c) Применить идеи метода квазисредних Н.Н.Боголюбова для нарушения калибровочной симметрии исходного гамильтониана.
  - d) Избрать коллинеарную геометрию наблюдения для рассмотрения элементарных коллективных возбуждений в случае больших волновых векторов конденсата.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях: 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (dedicated to the 40<sup>th</sup> anniversary of Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova), Kishinev, Moldova, September 21-26, 2004; ICONO – 2005 conference 11 – 15 May St.Petersburg Russia ICONO / LAT – SYS – 2005; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2005", Физический факультет МГУ, 15-17 апреля 2005; Conferința fizicienilor din Moldova CFM-2005, Chișinău, R. Moldova, 19-20 octombrie 2005; 4<sup>th</sup> International Conference on "Microelectronics and Computer Science", Chisinau, Moldova, September 15-17, 2005; Научная конференция молодых ученых, Физический факультет МГУ, 15-17 сентября 2005; 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. Mat. Sci. Chișinău, Moldova Cond. Mat. Phys., 2006; Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2006», 12-16 апреля 2006 г., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва; Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2007», 11-14 апреля 2007г., МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва; 3 Ukrainian Conference on Semiconductor Physics, 17-22 June 2007, Odessa, Ukraine; Conferința fizicienilor din Moldova CFM-2007, Chișinău, R. Moldova, 11-12 octombrie 2007; Conference dedicated to prof. E.P. Pokatilov, 8 June 2007, Chisinau; International Conference of Young Researchers, November 9, 2007, Chisinau Moldova; Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2008», 8-11 апреля 2008г., МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва; 4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Kishinev, Moldova, September 23-26, 2008

**Публикации.** Основные результаты опубликованы в 25 научных работах, список которых приводится в конце диссертации.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав с оригинальными научными результатами, общих выводов и списка цитируемой литературы. Работа содержит 105 страницы, 15 рисунков, и 68 литературных ссылок.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, научная новизна и практическая ценность темы исследований, сформулированы цели работы, указаны объекты исследований и положения, выносимые на защиту. Кратко описана структура диссертации.

**Первая оригинальная глава** посвящена изучению прямого и косвенного взаимодействия  $e$  и  $h$  находящихся на НУЛ в 2D системах в сильном перпендикулярном магнитном поле. Была рассмотрена 2D полупроводниковая структура в сильном перпендикулярном магнитном поле, предполагая, что расстояние между уровнями Ландау является достаточно большим и превышает ионизационный потенциал  $I_i$  магнитоэкситона с волновым вектором  $k=0$  и тем более энергию связи 2D экситона Ваннье-Мотта; тогда как магнитная длина  $l$  является меньше чем боровский радиус 2D экситона  $a_{ex}^{2D} (l < a_{ex}^{2D})$ . Плоскость нашего слоя описана в координатах  $(x, y)$ , а магнитное поле направлено по оси  $z$ . Векторный потенциал выбран в калибровке Ландау  $A = (-Hy, 0, 0)$ . Подобно работам [6-9] волновые функции для электронов и дырок вдоль направления оси  $y$  характеризуются квантовыми числами  $n, m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ , определяющими номера квантовых уровней Ландау, а в направлении оси  $x$  - волновые функции являются плоскими волнами с одномерными волновыми векторами  $p$  и  $q$ .

В нулевом приближении если пренебречь кулоновским взаимодействием, то частицы являются свободными в рамках НУЛ. Гамильтониан для электронов и дырок в представлении вторичного квантования содержит операторы рождения и уничтожения для электронов  $a_{n,p}^\dagger, a_{n,p}$  и для дырок  $b_{n,q}^\dagger, b_{n,q}$ . Предполагается, что наша система спинполяризованная.

Мы рассматриваем случай, когда в начальный момент времени обе частицы находились на НУЛах с  $n = m = 0$  и в результате кулоновского взаимодействия переходят на возбужденные состояния с  $n'$  и  $m'$  ( $n' \neq m'$ ), и следующим шагом они возвращаются в начальные состояния. Эти два квантовых перехода описываются во втором порядке теории возмущения приводят к косвенному взаимодействию между квазичастицами, и по существу влияют на основное состояние системы. Нами было показано, что виртуальные квантовые переходы электронно-дырочной пары вносят вклад в косвенное взаимодействие магнитоэкситонов двух типов. Оба вклада зависят от волнового вектора магнитоэкситона, но один из них отличен от нуля в точке  $k=0$ , тогда как другой в этой точке точно равняется нулю. Косвенные взаимодействия  $e$ - $e$  и  $h$ - $h$  вносят вклады во взаимодействие магнитоэкситонов, независимые от их волнового вектора. Квантовые переходы типа  $n \neq m$  также были приняты во внимание. В точке  $k=0$  вклады виртуальных переходов с  $n \neq m$  обращаются в нуль и остается только член с  $n = m$ . Но при  $k \neq 0$  вклад этих членов существенен. Это дополнительное косвенное взаимодействие существенным образом влияет на коллективные свойства 2D  $e$ - $h$  системы. Мы рассмотрели два альтернативных основных состояния, а именно БЭК магнитоэкситонов и электронно-дырочная жидкость металлического типа. Оба этих состояния были рассмотрены в Хартри-Фоковском (ХФ) приближении. Усреднение кулоновского взаимодействия в ХФ приближении содержит члены прямого спаривания операторов, что приводит к членам хартриевского типа, а также члены обменного спаривания, что приводит к членам фоковского типа. Члены прямого спаривания дополнительного косвенного взаимодействия  $e$ - $e$ ,  $h$ - $h$  и  $e$ - $h$  приводят к общему притяжению в системе и способствуют созданию коррелированной  $e$ - $h$  плазмы и  $e$ - $h$  жидкости. Дополнительное притяжение в системе увеличивает энергию связи магнитоэкситона и в то же самое время понижает энергию, приходящуюся на одну  $e$ - $h$  пару в ЭДЖ. Мы сравнили эти два процесса. Однако обменные члены гамильтониана косвенного притяжения, а также члены, проистекающие от  $u$ - $v$  преобразования Боголюбова, вызывают дополнительное отталкивание в  $e$ - $h$  системе. Оно стабилизирует БЭК магнитоэкситона и частично уменьшает энергию связи ЭДЖ. Следует отметить, что все расчеты матричных элементов кулоновского взаимодействия двумерных электронов и дырок в сильном перпендикулярном магнитном поле были выполнены впервые и опубликованы {2, 3, 5}. В итоговых работах {6, 7} расчеты сумм  $S$  и  $T$  были выполнены параллельно мной и В.В.Бочаном для большей надежности и независимой проверки полученных результатов.

Результирующее влияние всех ВУЛ на химический потенциал  $\mu(k, v^2)$ , рассчитанный в ПХФБ, определяется коэффициентом  $(B - 2A + \Delta(k))$ . Здесь член  $-2A$  связан со средними хартриевского типа

для дополнительного косвенного e-h, e-e, h-h взаимодействия, а член  $B$  связан с дополнительным обменным взаимодействием e-e, h-h. Член  $2v^2\Delta(k)$  связан с e-h взаимодействием и появляется в результате боголюбовского u-v преобразования [16]. Зависимость коэффициента  $(B - 2A + \Delta(k))$  от значения  $kl$  показана на Рис.1, для двух значений  $r = I_l / \hbar\omega_{c0} = 0,5; 1$ . Влияние всех ВУЛ на химический потенциал, так же как и влияние первого ВУЛа, описанного в [10], существенно только в диапазоне малых значений  $kl < 0.5$ , и быстро уменьшается с ростом  $kl$ . Результирующая зависимость химического потенциала от фактора заполнения  $v^2$  определяется коэффициентом  $[B - 2A + \Delta(k) - E(k)]$ , который учитывает влияние всех ВУЛов. Вид этого коэффициента представлен на Рис.2 в безразмерной форме для  $r = 0,5; 1$ . Главный результат диссертации в этом разделе связан с определением зависимости химического потенциала  $\mu^{HFB}$ , вычисленного в ПХФБ, от фактора заполнения НУЛ  $v^2$  для различных значений волнового вектора конденсата  $kl = 0; 0,5; 1; 3, 6$  и для двух различных значений  $r = 0,5; 1$ . Он представлен на Рис.3.

Мы можем заметить, что именно благодаря косвенному дополнительному взаимодействию БЭК 2D магнитоэкситонов с волновым вектором  $kl < 0.5$  устойчив в ПХФБ. В [9, 10] было замечено, что при больших значениях  $kl > 0.5$  влияние когерентных возбужденных состояний [17] является важным и приводит к появлению метастабильной диэлектрической жидкой фазы. Мы показали, что влияние ВУЛ в этой области мало. Можно заметить, что поправки, возникшие из-за ВУЛ, понижают энергию, приходящую на пару ЭДК. Значения  $\mathcal{E}_{EHD}$  наряду с химическим потенциалом БЭК магнитоэкситонов с произвольным волновым вектором  $k \neq 0$  представлены на Рис.3. Они расположены близко на энергетической шкале и следовательно сосуществование двух состояний возможно.

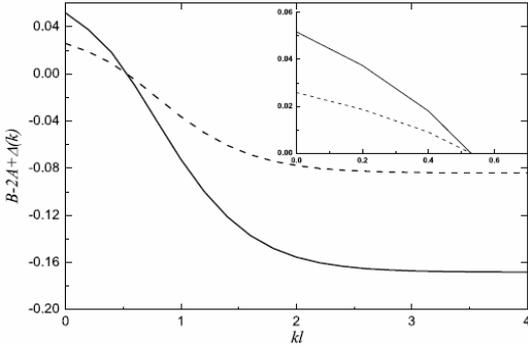


Рис. 1 Зависимость коэффициента  $(B - 2A + \Delta(k))$  от волнового вектора  $kl$ . Для двух значений коэффициента  $r$ . Сплошная линия -  $r = 1$ ; Пунктирная -  $r = 0.5$

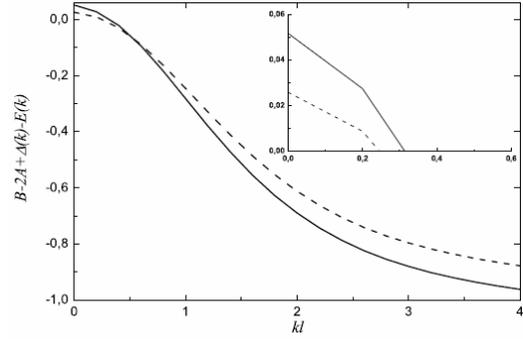
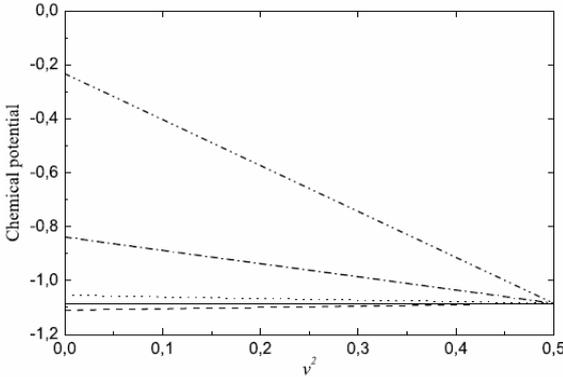
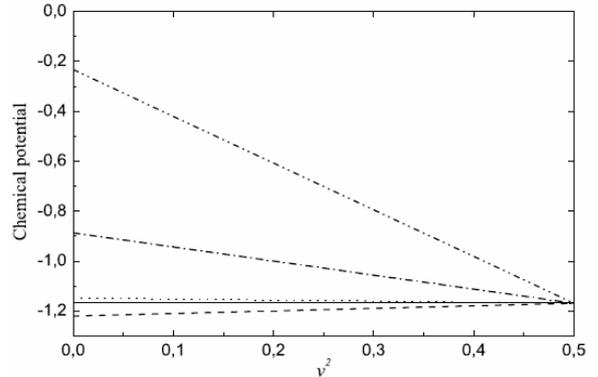


Рис. 2 Зависимость коэффициента  $(B - 2A + \Delta(k) - E(k))$  от волнового вектора  $kl$ . Для двух значений коэффициента  $r$ . Сплошная линия -  $r = 1$ ; Пунктирная -  $r = 0.5$



(a)  $I_l / \hbar\omega_c = 1/2$



(b)  $I_l / \hbar\omega_c = 1$

Рис. 3 Зависимость химического потенциала  $\mu^{HFB}$ , вычисленного в ПХФБ, от фактора заполнения НУЛ  $v^2$  для различных значений волнового вектора  $kl = 0; 0,5; 1; 3, 6$  и для двух различных значений  $r = 0,5; 1$ . Сплошная линия - энергия приходящаяся на пару ЭДК.

**Вторая глава** посвящена исследованию плазменных возбуждений в пределах нижайших уровней Ландау в электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) без учета ВУЛ. Такой тип возбуждений должен зависеть от электронно-дырочной концентрации, как это было показано в [18, 23, 24], в случае электронного газа в двухслойных системах в отсутствии магнитного поля. В нашем случае частоты плазменных колебаний должны быть пропорциональны фактору заполнения  $v^2$ . На самом деле они оказались пропорциональны обобщенному фактору заполнения  $v^2(1-v^2)$ , отражающему эффект заполнения НУЛ и эффект заполнения фазового пространства. Мы также получили две ветви плазменных частот в зависимости от волнового вектора, соответствующих двум компонентам  $e-h$  системы. Эти колебания находятся в противофазе в случае оптических колебаний и в фазе, для акустических колебаний. Соответствующие операторы флуктуации плотности обозначаются, как  $\hat{\rho}(P)$  и  $\hat{D}(P)$ . Они подчиняются разным уравнениям движения с разными законами дисперсии, так как содержат разные вклады прямого и обменного кулоновского взаимодействия. Имеется общая особенность энергетических спектров, полученных в этой главе так и спектров, рассмотренных в следующей главе в условиях БЭК магнитоэкситонов. Несмотря на различное происхождение этих энергетических спектров, они имеют много общих свойств. Главное из них это наличие кванта энергии кулоновского взаимодействия в присутствии магнитного поля  $E(P)$ , величина которого растет с ростом волнового вектора  $P$  и выходит на насыщение. Такое поведение присуще всем энергетическим спектрам. Законы дисперсии для оптических и акустических плазмонов, в случае внутриуровневых возбуждений, представлены на Рис.4 и Рис.5. В диапазоне малых значений  $x = Ql < 1$ , акустическая ветвь плазменных колебаний имеет линейную зависимость, а в диапазоне больших значений  $x > 1$ , является монотонно возрастающей функцией с насыщением. Оптическая ветвь имеет квадратичную зависимость от  $x$  в диапазоне  $x < 1$ , немонотонное поведение ротонного типа в средней области и монотонное возрастание с насыщением при больших  $x$ .

Сравним результаты, полученные в этой главе с результатами работ [19, 8, 20]. Главное отличие состоит в том, что плазменные частоты пропорциональны параметру  $v^2(1-v^2)$ . Хотя, плазменные колебания имеют независимую природу по сравнению со спектром энергии экситона, однако их зависимость от волновых векторов можно сравнить.

В отличие от работ [19, 20] в нашем случае электроны находятся в зоне проводимости, а дырки в валентной зоне и на том же самом слое, что и электроны. В таком случае электрон-электронное, дырка-дырочное и электронно-дырочное кулоновское взаимодействие по абсолютному значению является таким же, как и в симметричном случае [19]. Это сравнение может объяснить происхождение квадратичного закона дисперсии для оптических плазмонов. Акустическая ветвь плазмонов в отличие от оптической ветви имеет различные вклады от хартриевского и фоковского членов кулоновского взаимодействия, и ее закон дисперсии при малых длинах волн – линеен.

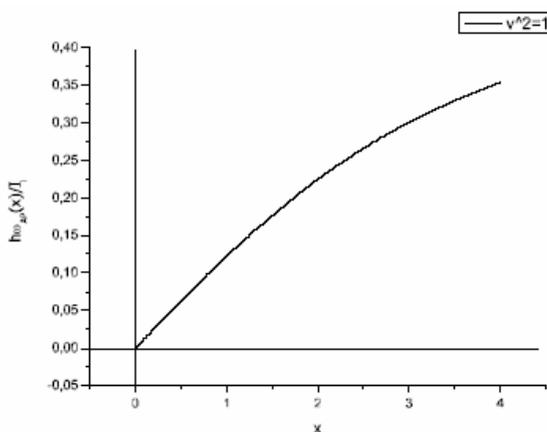


Рис. 4. Закон дисперсии акустического плазмона

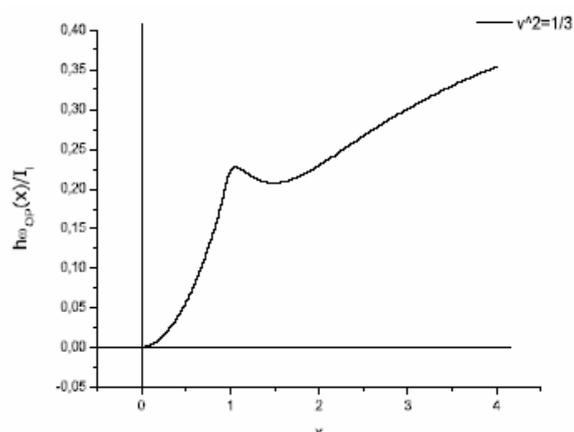


Рис. 5 Закон дисперсии оптического плазмона

**Третья глава** посвящена исследованию энергетического спектра коллективных элементарных возбуждений в системе БЭК магнитоэкситонов на состояния с волновым вектором  $k \neq 0$ . Мы предполагаем, что электроны и дырки расположены на нижайших уровнях Ландау (НУЛ) с фактором заполнения  $\nu^2 < 1$ , и пренебрегаем влиянием возбужденных уровней Ландау. Мы применили метод функций Грина. В этом случае свободная энергия в уравнении движения для операторов играет роль энергии для функции Грина нулевого приближения. Свободные энергии определяют функции Грина в нулевом приближении, тогда как нелинейные члены принимаются во внимание в более высоком порядке теории возмущения по малому параметру.

Мы предполагаем, что квазиэнергетические уровни энергии, как и в случае с лазерным излучением появляются и в случае сильного магнитного поля. Прибавляя или удаляя квант  $E(P)$ , мы можем формировать много виртуальных комплексов квазичастиц с различными свободными энергиями. Их можно объединить в квазиэнергетические комплексы. Поскольку, большинство из них имеет большое затухание, то физически они бессмысленны и, рассматриваться не будут. Первые наши результаты по исследованию коллективных элементарных возбуждений в условиях БЭК магнитоэкситонов опубликованы в совместной работе с В.В.Боцаном [4]. Однако, в его диссертации, защищенной в Упсале, Швеция [25], вошел только первоначальный вариант со свободной энергией в уравнениях движения для операторов  $\rho(P)$  и  $D(P)$ . После опубликования этой совместной статьи, мы обнаружили, что затухание таких квазиэнергетических плазмонов того же порядка величины, что и реальная часть энергетического спектра. Поэтому мы отказались от первоначального варианта и рассмотрели другой вариант, который исследован нами впервые и составляет содержание нашей третьей главы. Выбор конкретных форм уравнений движения существенно опирается на метод, предложенный Д.Н.Зубаревым в теории функций Грина.

Для описания возбуждений в пределах нижайших уровней Ландау мы используем теорию возмущения по малому параметру. Как и в предыдущей главе, он выражается через фактор заполнения нижайшего уровня Ландау  $\nu^2$  ( $0 < \nu^2 < 1$ ) и дополнительный фактор, отражающий принцип исключения Паули. Результирующий параметр малости имеет вид  $\nu^2(1 - \nu^2)$ . Такого типа параметры характерны для теории Бозе-газов. При факторе заполнения  $\nu^2 = 1$  могут появиться возбуждения между НУЛами и более высокими ВУЛами. Этот вопрос не был нами изучен. Поправками более высокого порядка теории возмущения пренебрегли. Цепочки уравнений для функций Грина расцепляются таким образом, что трехоператорные функции Грина выражаются через однооператорные, умноженные на среднее значение от произведения остальных двух операторов по основному состоянию системы.

Было получено сложное дисперсионное уравнение четвертого порядка, по собственно-энергетическим частям, которое в коллинеарной геометрии распадается на два дисперсионных уравнения – одно третьего порядка, а второе первого. Каждая собственно-энергетическая часть имеет в общем случае нелинейную зависимость от частоты, поэтому каждое из дисперсионных уравнений может иметь больше число ветвей спектра, чем кратность уравнения по числу собственно-энергетических частей. Уравнение третьего порядка по собственно-энергетическим частям определяет связанные экситонные и плазменные энергетические ветви. Эти ветви спектра описываются дискретным уравнением:

$$\Sigma_{11}(\vec{K} + \vec{q}, \omega)\Sigma_{22}(\vec{K} + \vec{q}, \omega)\Sigma_{44}(\vec{K} + \vec{q}, \omega) - 2\eta^2(\Sigma_{11}(\vec{K} + \vec{q}, \omega) + \Sigma_{22}(\vec{K} + \vec{q}, \omega)) = 0$$

Было изучена БЭК на одночастичное состояние экситона с безразмерным волновым вектором  $kl \approx 3,6$ , так как в этих условиях метастабильная диэлектрическая жидкость имеет минимальную энергию и положительную сжимаемость при факторе заполнения  $\nu_m^2 \approx 0,28$ .

Энергетический спектр элементарных коллективных возбуждений характеризуется взаимозависящими ветвями спектров экситона и акустических плазмонов, потому что в 2D электронно-дырочной системе в сильном перпендикулярном магнитном поле спектр элементарных возбуждений плазменного типа не имеет энергетической щели и лежит в той же спектральной области, что и элементарные экситонные возбуждения. Присутствие конденсата экситонов приводит к появлению квазиэнергетических областей спектра, что отражается дополнительной ветвью спектра экситонов, известной как квазиэнергетической ветви экситонного спектра. Это подобно случаю лазерного излучения, взаимодействующего с электронно-дырочными парами в полупроводнике и приводящему к

различным оптическим эффектам Штарка. Квазиэнергетическая ветвь спектра появляется и у акустических плазмонов. Как уже отмечалось выше, спектр элементарных коллективных возбуждений в условиях БЭК магнитоэкситонов различен при учете и без учета концентрационных поправок. Это связано с участием плазменных ветвей спектра, квадрат энергии которых пропорционален концентрации носителей  $v^2/2\pi l^2$ , где  $v^2$  есть фактор заполнения. Без учета концентрационных поправок плазмоны отсутствуют. Химический потенциал не имеет концентрационных поправок и экситонный спектр элементарных возбуждений такой же, как у идеального экситонного газа, но с волновым вектором  $k \neq 0$ . Из-за присутствия Бозе-конденсата имеются две экситонные ветви спектра, одна энергетическая, а другая квазиэнергетическая. Учет концентрационных поправок добавляет две плазменные ветви спектра с энергиями отличными от нуля. Их две, так же благодаря присутствию конденсата. Экситонные ветви спектра преобразуются. Из-за изменения химического потенциала появляются энергетические щели у экситонных ветвей и что более существенно, меняется их число. Концентрационные добавки к экситонному спектру появляются в виде плазменных спутников с добавлением плазмона к энергии экситонных ветвей и с отнятием энергии плазмона от энергии экситонных ветвей. Экситонные ветви теперь превращаются в экситон-плазменные ветви и их число отличается от числа исходных экситонных ветвей.

Рассмотрены графики спектров элементарных коллективных возбуждений двумерных магнитоэкситонов в условиях БЭК и образования метастабильной диэлектрической жидкости. На рисунках представлены следующие варианты:

На Рис. 6 изображен вид элементарных возбуждений БЭК магнитоэкситонов и спектр акустического плазмона при факторе заполнения  $v^2 = 0.28$ . Энергетическая щель в спектре экситонных возбуждений обусловлена тем, что конденсату вначале требуется затратить энергию для выхода из состояния метастабильной диэлектрической жидкости. Величина этой щели точно соответствует значению химического потенциала. Квазиэнергетическая ветвь получается из энергетической ветви с помощью двух операций симметрии. Одна связана с отражением относительно оси абсцисс, а другая с отражением относительно оси ординат. Поведение акустической плазменной ветви обусловлено тем, что конденсат находится в движении и поэтому мы имеем возникновение элементарных возбуждений как вперед, по направлению движения конденсата когда  $\text{Cos}(\alpha) = 1$ , так и назад, при  $\text{Cos}(\alpha) = -1$ . Видно, что энергия экситонного элементарного возбуждения в случае БЭК магнитоэкситонов входит не в чистом виде, а с добавкой энергии акустического плазмона. Экситонная ветвь спектра имеет два спутника с добавлением и отнятием энергии плазмона. Так же можно заметить, что у спектра плазмонов появляется акустическая квазиэнергетическая ветвь, которая так же является отражением присутствия конденсата.

На Рис. 7 показана та же самая ситуация, но для фактора заполнения  $v^2 = 0.028$ . Можно заметить, что при этом резко уменьшается энергетическая щель между спектрами энергии и квазиэнергии. Можно объяснить этот факт уменьшением энергии связи в метастабильной жидкости, в результате чего нужно затратить меньше энергии на возбуждение.

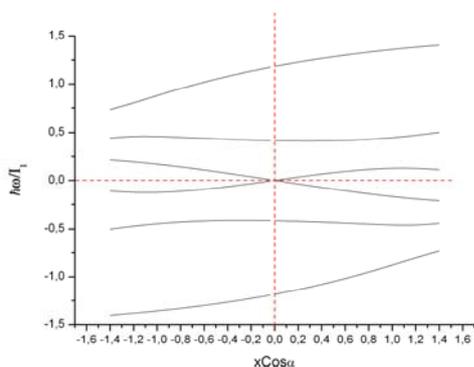


Рис. 6. Элементарные возбуждения БЭК магнитоэкситонов и спектр акустического плазмона при факторе заполнения  $v^2=0.28$ , волновой вектор  $y=3.6$ .

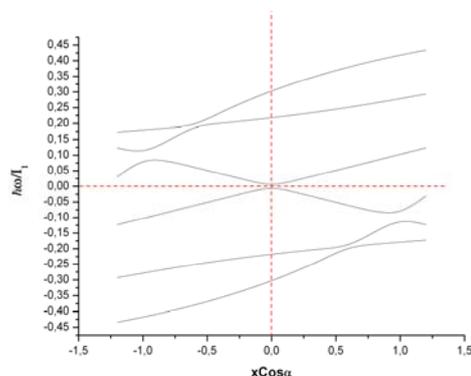


Рис. 7. Элементарные возбуждения БЭК магнитоэкситонов и спектр акустического плазмона при факторе заполнения  $v^2=0.028$ , волновой вектор  $y=3.6$ .

### ***Основные результаты, выводы, рекомендации***

- Выведен гамильтониан описывающий дополнительное косвенное взаимодействие между частицами находящимися на НУЛ обусловленное влиянием ВУЛ, при котором две частицы в процессе кулоновского взаимодействия совершают виртуальные переходы с НУЛ на разноименные и одноименные ВУЛ и возвращаются обратно. Косвенное двухчастичное взаимодействие за счет прямых членов при усреднении приводит к общему притяжению, и понижению энергии всей системы. На этом фоне обменные члены при усреднении приводят к стабилизации состояния БЭК магнитоэкситонов с волновыми векторами  $kl < 0.5$ . Значение химического потенциала при БЭК магнитоэкситонов и энергия, приходящаяся на одну e-h пару в основном состоянии ЭДЖ, оказываются близко расположенными на энергетической шкале и сосуществование двух фаз возможно.
- Гамильтониан данной работы может быть использован для изучения других состояний, например в случае однокомпонентной двумерной плазмы (OC2DP).
- Показано, что в электронно-дырочной системе существует возможность формирования различных виртуальных квазиэнергетических комплексов с различным затуханием, которое по существу зависит от их свободной энергии. Найдены такие уравнения движения для операторов флуктуации плотности, при которых затухание плазменных колебаний равно нулю, в рамках данного приближения. Имеются два типа плазменных колебаний: оптические и акустические. В диапазоне малых значений волнового вектора акустическая ветвь плазменных колебаний имеет линейную зависимость. В диапазоне больших волновых векторов, спектр колебаний является монотонным с насыщением. Оптическая ветвь имеет квадратичную зависимость в диапазоне малых значений волнового вектора, немонотонное поведение ротонного типа в средней области и монотонное возрастание с насыщением при больших значениях волнового вектора. Существенно то, что существуют осцилляции плотности в пределах НУЛ, несмотря на то, что 2D система находится под действием сильного перпендикулярного магнитного поля и у квазичастиц отсутствует кинетическая энергия.
- Показано, что энергетический спектр коллективных элементарных возбуждений над основным состоянием системы, представляющим собой Бозе-Эйнштейновский конденсат магнитоэкситонов, состоит из экситонных энергетических ветвей сопровождаемых плазмонными спутниками и чисто плазменными ветвями. Важно отметить, что концентрационные поправки у экситонных ветвей спектра появляются в виде плазмонных спутников и фактически имеются экситон-плазмонные ветви и чисто плазменные ветви спектра. Экситонная компонента экситон-плазмонных ветвей имеет энергетическую щель определяемую значением химического

потенциала, который в условиях метастабильной диэлектрической жидкости имеет отрицательные значения, зависящие от фактора заполнения. Энергетическая щель в спектре связана с затратой энергии на освобождение магнитного экситона из состава диэлектрической жидкости в процессе возникновения элементарного коллективного возбуждения. Такая ситуация не встречалась в теории бозе-газов. При рассмотрении БЭК магнитных экситонов с волновым вектором  $k = 0$  все члены кулоновского взаимодействия в пределах НУЛ взаимно точно уничтожаются, как это впервые показали Лернер и Лозовик [5, 6], если не учитывать ВУЛ, и спектр элементарных коллективных возбуждений совпадает со спектром возбуждения отдельного свободного магнитоэкситона. При этом спектр плазмонов в точности равен нулю при всех значениях волнового вектора элементарного плазменного возбуждения, которые в нашем случае отсчитываются от волнового вектора конденсата. Существенно отметить, что собственно энергетические части, определяющие усеченные функции Грина в технике развитой Д.Н.Зубаревым зависят от фактора когерентности, который зависит от волнового вектора конденсата  $k$  и в точности обращается в нуль в точке  $k = 0$ , что подтверждает ранее полученные результаты Лернера и Лозовика [5, 6], Пакета, Райса и Уеды [8] и объясняют поведение акустических плазмонов, описанное выше.

### Список литературы:

- [1] L.V.Butov and A.I.Finin Anomalous transport and luminescence of indirect excitons in AlAs/GaAs coupled quantum wells as evidence for exciton condensation. Phys.Rev.B, 1998, 58, pp. 1980 - 2000
- [2] V.Negoita, D.W.Snoke and K.Eberl, Harmonic-potential traps for indirect excitons in coupled quantum wells. Phys.Rev.B, 1999, 60, pp. 2661-2669
- [3] V.V.Krivolapchuk, E.S.Moskalenko and A.L.Zhmodikov, Specific features of the indirect exciton luminescence line in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As double quantum wells, Phys.Rev.B, 2001, 64, 045313 - 045318
- [4] А.В. Ларионов, В.Б. Тимофеев, П.А. Ни, С.В. Дубонос, И. Хвам, К. Соеренсен, Бозе-конденсация межъямных экситонов в двойных квантовых ямах Письма в Журн. Эксперим. и Теор. Физ., 2002, том 75, вып. 11, с. 689-694
- [5] I.V.Lerner and Yn.E.Lofovik, Phase transitions in two-dimensional electron-hole systems in high magnetic fields. J.Low Temper.Phys., 1980, 38, 333 - 352;  
И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Экситон Мотта в квазидвумерных полупроводниках в сильном магнитном поле, Журн. Эксперим. и Теор. Физ. (ЖЭТФ), 1980, 78, с. 1167 - 1174
- [6] И.В.Лернер и Ю.Е.Лозовик, Двумерные электронно-дырочные системы в сильном магнитном поле как почти идеальный газ экситонов. ЖЭТФ, 1981, 80, вып. 4, с. 1488 - 1503
- [7] A.B.Dzyubenko and Yn.E.Lofovik, Exact solutions and Bogoliubov transformations for zero-dimensional electron-hole systems, Fiz.Tverd.Tela (Leningrad), 1983, 25, 1519; Quasi-two-dimensional condensate of electron-hole pairs in a strong magnetic field, 1984 26, 1540 [Sov.Phys.Solid State 25,874 (1983); 26, 938 (1984)]
- [8] D.Paquet, T.M.Rice and K.Ueda Two-dimensional electron-hole fluid in a strong perpendicular magnetic field: Exciton Bose condensate or maximum density two-dimensional droplet, Phys.Rev.B, 1985, 32, 5208 - 5221
- [9] S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, D.W.Snoke and V.V.Botan, Polarizability, correlation energy, and dielectric liquid phase of Bose-Einstein condensate of two-dimensional excitons in a strong perpendicular magnetic field, Phys.Rev.B, 2002, 66, p. 245316 - 245330
- [10] S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, D.W.Snoke, V.V.Botan and B.Johansson, Bose-Einstein condensation of excitons in ideal two-dimensional system in a strong magnetic field. Physica E, 2003, 19, 278 - 288
- [11] V.V.Boţan, M.A.Liberman, S.A.Moskalenko, D.W.Snoke, B.Johansson, Bose-Einstein condensation of magnetoexcitons in ideal two-dimensional system in a strong magnetic field, Physica B: Condensed Matter, 2004, Vol 346-347, p. 460-464
- [12] S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, D.W.Snoke and V.V.Botan, Bose-Einstein condensation of excitons in ideal 2D system in strong magnetic field, Mold.Jour.Phys. Sciences, 2002, 1, №4, pp. 5-18,
- [13] Березинский В.Л. Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии, ЖЭТФ, 1970, т. 59, вып. 3(9), с. 907
- [14] J.M.Kosterlitz and D.J.Thouless Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems, J.Phys. C. 1973, 6, pp. 1181 - 1203
- [15] J.M.Kosterlitz, The critical properties of the two-dimensional xy model, J.Phys. C. 1974, 7, pp. 1046 - 1060
- [16] S.Schmitt-Rink, D.S.Chemla and H.Haug, Nonequilibrium theory of the optical Stark effect and spectral hole burning in semiconductors, Phys. Rev. B 1988, 37, pp. 941 - 955
- [17] Л.В.Келдыш, А.Н.Козлов, Коллективные свойства экситонов в проводниках, ЖЭТФ, 1968, 54, 978 A968
- [18] S.Das Sarma and A.Madhukar, Collective modes of spatially separated, two-component, two-dimensional plasma in solids, Phys.Rev.B, 1981, 23, 805 - 815
- [19] H.A.Fertig, Energy spectrum of a layered system in a strong magnetic field, Phys.Rev.B, 1989, 40, 1087 - 1095
- [20] Y.N.Joglekar and A.H.MacDonald, Microscopic functional integral theory of quantum fluctuations in double-layer quantum Hall ferromagnets, Phys. Rev. B, 2001, 64, 155315 - 155324

- [21] A.I.Baz', Ya.B.Zeldovich and A.M.Perelomov Scattering, Reactions and delays in Nonrelativistic Quantum mechanics (Nauka, Moscow, 1971) (in Russian)
- [22] S.A.Moskalenko and D.W.Snoko "Bose - Einstein condensation of excitons and biexcitons and coherent nonlinear optics with excitons". Cambridge University Press, Cambridge UK, New York USA, (2000), 415 pages
- [23] A.I.Kasyan, P.I.Rusu, The effect of collective electron-hole plasma modes on charge carrier mobility in polar semiconductors, Phys.Stat.Solid (b), 1985, 127, 439 – 447
- [24] А.И.Касиян, И.В.Шур, И.И.Балмуш, Подвижность 2D электронов при их рассеянии на связанных плазмонах – фононных колебаниях, Физ. Тех. Полупров., 1991б 25, 689
- [25] Vitalie Botan, Bose-Einstein Condensation of Magnetic Excitons in Semiconductor Quantum Wells. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 211. 67 pp. Uppsala, ISBN 91-554-6636-2, 2006

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. S.A.Moskalenko, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny and M.I.Shmiglyuk Coexistence of two Bose-Einstein condensates of two-dimensional magnetoexcitons with and without motional dipole moments. *Mold.Jour.Phys. Sciences (MJPS)* vol. 2, №3, p. 336 - 352, 2003
2. S.A.Moskalenko, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny. Coulomb scattering processes of electrons and holes between Landau levels and energy spectrum of two-dimensional magnetoexcitons. *MJPS*, vol 3, №1, p. 71 – 94, 2004
3. Е.Думанов, Влияние возбужденных уровней Ландау на бозе-эйнштейновскую конденсацию 2D магнитоэкситонов в сильном перпендикулярном магнитном поле, *Analele Stiint. ale Universit. de Stat din Moldova*, 2004, стр 47-52
4. S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, V.V.Botan, E.V.Dumanov, and Ig.V.Podlesny, Collective elementary excitations of Bose-Einstein condensed two-dimensional magnetoexcitons strongly interacting with electron-hole plasma, *MJPS*, Vol. 4, № 2, p. 142 - 196, 2005
5. S.A.Moskalenko, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny and M.I.Shmiglyuk, Bose-Einstein Condensation of two-dimensional magnetoexcitons. The influence of the excited Landau levels, *Proc. SPIE*, 2006 ICONO, vol. 6256, p.62560X. 1-14
6. S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, P.I.Khadzhi, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny and V.Boțan, Influence of the excited Landau levels on the two-dimensional electron-hole system in a strong perpendicular magnetic field, *Solid State Comm.*, 140/5, 236-239, 2006
7. S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, P.I.Khadzhi, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny and V.Boțan, Influence of Coulomb scattering of electrons and holes between Landau levels on energy spectrum and collective properties of two-dimensional magnetoexcitons, *Physica E*, 39, 137-149, 2007
8. E.V.Dumanov, M.A.Liberman, S.A.Moskalenko, M.I.Shmiglyuk, A.G.Stefan, The plasma oscillations in a two-dimensional electron-hole liquid, *Journal of Physical Studies*, Vol. 12, N4, 2008, 4 pages (in press)
9. S.A.Moskalenko, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny, M.I.Shmiglyuk Coulomb scattering processes of electrons and holes between Landau levels and energy spectrum of two-dimensional magnetoexcitons Abstract of 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (dedicated to the 40<sup>th</sup> anniversary of Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova), (Kishinev, Moldova, September 21-26, 2004)
10. Е.Думанов Влияние возбужденных уровней Ландау на Бозе-Эйнштейновскую конденсацию 2D магнитоэкситонов. *Confărinta Tinerilor Cercetatorii din Moldova*, 11 Noiembrie 2004, Chisinau, Moldova
11. S.A.Moskalenko, E.V.Dumanov, Ig.V.Podlesny and M.I.Shmiglyuk Bose-Einstein Condensation of two-dimensional magnetoexcitons. The influence of the excited of Landau levels. *ICONO – 2005 conference* 11 – 15 May St.Petersburg Russia *ICONO / LAT – SYS – 2005*, Oral presentation
12. Е.В.Думанов Влияние возбужденных уровней Ландау на Бозе-Эйнштейновскую конденсацию 2D магнитоэкситонов. *Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2005"*, секция "Физика", сборник тезисов, Том 2, Физический факультет МГУ, 15-17 апреля 2005, стр.152-153
13. E.V. Dumanov. Bose-Einstein Condensation of two-dimensional magnetoexcitons. The influence of the excited Landau levels. *Материалы IV Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве»*, г. Тирасполь, 5-9 июня 2005 г, стр. 68-69
14. S.A. Moskalenko, M.A. Liberman, V.V. Botan, E.V. Dumanov, Ig.V. Podlesny, A. Stefan. Exciton-plasmon collective elementary excitations of Bose-Einstein condensed two-dimensional magnetoexcitons. *Rezumatel Lucrărilor ale Conferinței fizicienilor din Moldova CFM-2005* (Chișinău, R. Moldova, 19-20 octombrie 2005), p.12
15. S.A. Moskalenko, E.V. Dumanov, Ig.V. Podlesny, M.I. Smigliuk and Ig.A. Leleakov. Influence of the excited Landau levels on two-dimensional magnetoexcitons. *Rezumatel Lucrărilor ale Conferinței fizicienilor din Moldova CFM-2005* (Chișinău, R. Moldova, 19-20 octombrie 2005), p.82
16. S.A. Moskalenko, E.V. Dumanov, Ig.V. Podlesny, M.I. Shmiglyuk. Bose-Einstein condensation of two-dimensional magnetoexcitons. The influence of the excited Landau levels. Energy spectrum of two-

- dimensional magnetoexcitons. Proceedings of the 4-th International Conference on “Microelectronics and Computer Science” (vol. 1), Chisinau, Moldova, September 15-17, 2005, p.100
17. Е.В. Думанов. Влияние возбужденных уровней Ландау на Бозе-Эйнштейновскую конденсацию 2D магнитоэкситонов. Материалы Форума "Всемирный год физики в Московском университете", Научная конференция молодых ученых, Секция 2, Теоретическая физика, Физический факультет МГУ, 15-17 сентября 2005, стр.24-25, Plenary session
  18. Dumanov E.V., Moscalenco S.A., Shmigliuc M.I., The plasma oscillations in a two-dimensional electron-hole system in a strong perpendicular magnetic field, 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. Mat. Sci.Chişinău, Moldova Cond. Mat. Phys., 2006, p. 225
  19. Е.В.Думанов, Влияние возбужденных уровней Ландау на образование двумерной электрон-дырочной, Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2006», Том 2, стр. 107-108, (12-16 апреля 2006 г., МГУ им. М. В. Ломоносова) Москва
  20. Е.В.Думанов, Возбуждения двумерной электронно-дырочной жидкости в пределах нижайшего уровня Ландау, Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2007», (11-14 апреля 2007г., МГУ им. М.В.Ломоносова) Москва, стр. 220-221 (Диплом за лучший доклад на секции «Физика»).
  21. E.V.Dumanov, M.A.Liberman, S.A.Moskalenko, M.I.Shmiglyuk, A.G.Stefan, The plasma oscillations in a two-dimensional electron-hole liquid, 3 Ukrainian Conference on Semiconductor Physics, 17-22 June 2007, Odessa, Ukraine
  22. S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, E.V.Dumanov, A.G.Stefan and M.I.Shmiglyuk, The plasma oscillations in the two-dimensional electron-hole systems, Rezumatele Lucrărilor ale Conferinței fizicienilor din Moldova CFM-2007 (Chişinău, R. Moldova, 11-12 octombrie 2007), p. 30
  23. S.A.Moskalenko, M.A.Liberman, E.V.Dumanov, A.G.Stefan and M.I.Shmiglyuk, Intra-Landau level plasmon excitations in two-dimensional electron-hole system Conference dedicated to prof. E.P. Pokatilov, 8 June 2007, Chisinau.
  24. E.V.Dumanov, Collective properties of 2D magnetoexcitons and plasmons, International Conference of Young Researchers, November 9, 2007, Chisinau Moldova
  25. Е.В.Думанов, С.В.Колун, Элементарные коллективные возбуждения в системе бозе-эйнштейновских конденсированных 2D магнитоэкситонов. Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых «Ломоносов-2008», (7-11 апреля 2008г., МГУ им. М.В.Ломоносова) Москва, [Электронный ресурс] — М.: Издательство МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); ISBN 978-5-91579-003-1

## ADNOTAREA

tezei „**Proprietățile colective ale excitonilor magnetici bidimensionali care interacționează cu plasmonii**”, elaborată de dl. Dumanov Evghenii și prezentată pentru obținerea gradului științific de doctor în științe fizico-matematice.

Disertația este dedicată rezolvării a două probleme interdependente ale teoriei sistemelor bidimensionale (2D) excitonice și electron-gol de înaltă densitate într-un câmp magnetic perpendicular puternic. Se are în vedere în primul rând influența nivelelor Landau excitate (NLE) asupra stărilor de bază care apar în aceste condiții și anume Condensarea Bose-Einstein a excitonilor magnetici și lichidul metalic electron-gol. A doua problemă este determinarea spectrului energetic al excitațiilor colective elementare, care apar în prezența acestor două stări de bază, atunci când cuasiparticulele sunt excitate în cadrul celor mai de jos nivelele Landau (NLJ) în absența energiei lor cinetice.

În lucrarea dată a fost dedus Hamiltonianul, care descrie interacțiunea suplimentară indirectă între particulele ce se găsesc pe NLJ. Ea este determinată de influența NLE în felul următor. Două particule în procese de interacțiuni Coulombiene exercită tranziții virtuale de pe NLJ pe NLE cu aceleași numere de cuantificare Landau sau cu numere diferite și după aceasta să întorc înapoi pe NLJ. Influența interacțiunii biparticule indirecte, care apare în urmă medierii și împerecherii directe a operatorilor aduce la o atracție generală în sistem și la coborârea pe scară energetică a energiei întregului sistem. Pe acest fondal termenii care apar în cazul unei împerecherii de schimb a operatorilor în timpul medierii și termenii care apar în urma transformării u-v Bogoliubov aduc la stabilizarea stării de condensare Bose-Einstein (CBE) a excitonilor magnetici cu vectorii de undă  $kl < 0.5$ . Valorile potențialului chimic în cadrul CBE a excitonilor magnetici și energia care revine la o pereche electron-gol (e-h), în cadrul lichidului e-h, sunt situate pe scara energetică în apropiere și coexistența a două faze este posibilă.

S-a demonstrat că în sisteme e-h există posibilitatea de a forma diferiți complecși virtuali cuasienergetici cu diferite atenuări, care depind de energiile libere ale complecșilor. Au fost găsite și alese astfel de ecuații de mișcare ale operatorilor fluctuației densității pentru care atenuarea oscilațiilor plasmonice este egală cu zero. Se are în vedere în cadrul aproximațiilor făcute pentru determinarea funcțiilor lor Green. Sunt două tipuri de oscilații plasmonice: oscilații optice și oscilații acustice. În regiunea valorilor mici ale vectorilor de undă ramura plasmonică a oscilațiilor acustice are o dependență liniară. În regiunea vectorilor de undă mari spectrul oscilațiilor plasmonice crește monoton și ajunge la saturare. Ramura optică are o dependență pătratică în regiunea valorilor mici ale vectorilor de undă. În regiunea valorilor medii ale vectorilor de undă ramura optică se caracterizează printr-o comportare nemonotonă de tip roton și are o comportare similară cu ramura acustică în regiunea valorilor mari ale vectorilor de undă. Este important faptul că există oscilațiile densității perechilor e-h în cadrul NLJ, necătfind la faptul că sistemul 2D să găsește sub influența câmpului magnetic puternic perpendicular și cuasiparticulele nu posedă energie cinetică.

Spectrul energetic al excitațiilor colective elementare, care apare atunci când starea de bază a sistemului este condensatul Bose-Einstein al excitonilor magnetici, constă din ramuri energetice excitoniceacompaniate de sateliți plasmonici și din ramuri curat plasmonice. Este important de menționat că ramurile excitonice ale spectrului au corecții în dependență de concentrație în formă de sateliți plasmonici. De fapt avem de a face cu ramuri exciton-plasmonice ale spectrului și cu ramuri curat plasmonice. Componenta excitonică a ramurii exciton-plasmonice are un gap energetic determinat de valoarea potențialului chimic, care în condițiile de formare a lichidului metastabil dielectric are valori negative, care depind de factorul de completare. Gapul energetic al ramurii date determină energia necesară pentru eliberarea excitonului din componenta lichidului dielectric metastabil în procesul de apariție a excitației colective elementare.

Rezultatele obținute au fost publicate în 25 de lucrări științifice.

Teza este scrisă în limba rusă, conține 105 pagini de text, 15 desene și 68 referințe bibliografice.

## ANNOTATION

For a thesis work “**Collective properties of 2D magnetoexcitons interacting with plasmons**” presented by **Evgeny Dumanov** for a doctor’s degree of physical-mathematical sciences.

The dissertation is dedicated to the solution of two interdependent problems of the theory of high-density two-dimensional excitons and electron-hole pairs in a strong perpendicular magnetic field. One of them is the influence of the excited Landau levels (ELLs) on two ground states of these systems such as Bose-Einstein condensation of magnetoexcitons and another one is the metallic-type electron-hole liquid. The second problem is the determination of the energy spectrum of the collective elementary excitations arising in the presence of these two ground states, when the excitations of the quasiparticles take place in the frame of the lowest Landau levels (LLLs) and in the absence of their kinetic energy.

In the present work a supplementary Hamiltonian of indirect interaction was calculated. It describes the additional indirect interaction between particles existing in the frame of the LLL, brought about by influence of ELL, under which two particles in the process of Coulomb interaction make virtual transitions from LLL to heteronymous and homonymous ELL and return back. The indirect supplementary e-e and h-h interaction gives rise to direct pairing terms and exchanges pairing terms. The first terms being negative increase the binding energy of magnetoexcitons and energy per pair in the electron-hole liquid (EHL) phase, whereas the second terms are repulsive. They diminish the influence of the direct pairing terms, but do not surpass them, so that the resulting influence of both terms remains attractive. The supplementary e-h attraction after the u-v transformation in the case of BEC of magnetoexcitons on the state with wave vector  $k$  gives rise to repulsive-type Bogoliubov self-energy terms. They stabilize the BEC in the small region of wave vectors  $kl < 0.5$ . The energy per one e-h pair inside the electron-hole droplet (EHD) happens to be situated on the energy scale very close to the value of the chemical potential of the Bose-Einstein condensed magnetoexcitons with wave vector  $k = 0$ . These two phases can coexist.

It was shown that in the electron-hole system exists a possibility of different virtual quasi-energy complexes with different free energies and rates damping formation, which in fact depend on their free energies. We have found out such equations of motion for operators of density fluctuations which permits obtain plasma oscillations without damping in our approximation for the Green function. The intra-Landau level excitations of the two-dimensional electron-hole liquid are characterized by two branches of the energy spectrum. One of them is the acoustical plasmon type branch with the linear dispersion law in the range of small wave vectors and monotonically increasing with saturation behavior at higher wave vectors. The second branch of the elementary excitations is an optical-plasmon branch with quadratic dispersion law at small wave vectors with a roton-type dispersion at intermediary wave vectors and with a similar behavior as the acoustical branch at higher wave vectors. It is essential that there exist density oscillations within the LLL, even though 2D system is under the influence of strong perpendicular magnetic field and quasi-particles have no kinetic energy.

Energy spectrum of collective elementary excitations in the ground state of the system, representing the Bose-Einstein condensation of magnetoexcitons, consists of excitonic energy branches accompanied by plasmon satellites and pure plasma branches. It is important to note, that concentration corrections of excitonic branches of spectrum appear in the form of plasmon satellites and actually the system has exciton-plasmon branches and pure plasma branches of spectrum. Excitonic component of exciton-plasmon branches has an energy gap defined by the value of chemical potential, which in conditions of metastable dielectric liquid phase has negative values, depending on the filling factor. An energy gap in the spectrum results from the energy required for detachment of magnetic exciton from the composition of dielectric liquid in the process of formation of elementary collective excitation.

Basic results of the dissertation paper were published in the form of 25 scientific works (8 articles and 17 abstracts). The dissertation paper consists of 105 pages, 15 illustrations and 68 bibliographical references.

