

На правах рукописи

**Гуревич Алексей Сергеевич**

**ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ  
ГЕТЕРОСТРУКТУР С АСИММЕТРИЧНЫМИ  
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2007

Работа выполнена в Лаборатории спектроскопии твердого тела Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, с.н.с.  
Кочерешко Владимир Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф.  
Агемян Вадим Фадеевич,  
кандидат физико-математических наук, м.н.с.  
Родина Анна Валерьевна

Ведущая организация: Московский Государственный Университет,  
г. Москва

Защита состоится 8 ноября 2007 года в 10 часов на заседании диссертационного совета К002.205.01 в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 8 октября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, с.н.с.

С. И. Бахолдин

## ОБЩАЯ АРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** С точки зрения создания новых приборов и материалов с уникальными свойствами, разработка технологий создания новых твердотельных наноструктур и изучение их физических свойств являются наиболее перспективными направлениями. В настоящее время значительная доля таких исследований связана с изучением полупроводниковых наноструктур. В качестве одной из причин устойчивого интереса именно к полупроводниковым нанокристаллам можно назвать существование широкого спектра возможностей для управления свойствами образующих полупроводников. Как известно, радикального изменения их свойств можно достичь путем варьирования состава полупроводниковых твердых растворов, изменения концентрации и типа примесей, изменением внешних условий – температуры, параметров освещения, напряженности внешних электрического и магнитного полей.

Ограничение движения свободных носителей в одном или нескольких направлениях приводит к эффектам размерного квантования, которые изменяют энергетический спектр электронов и дырок [1]. Это приводит к изменению оптических и транспортных свойств полупроводниковых наноструктур [2], и открывает дополнительную возможность эффективного управления их свойствами путем изменения размеров.

По-видимому, именно достижения в области технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которая позволяет в полной мере реализовывать оба указанных преимущества твердотельных наноструктур на основе полупроводников, позволили в 90-х годах прошлого века получить первые результаты, указывающие на существование других, не известных ранее способов управления свойствами полупроводниковых наноструктур. Обобщая полученные результаты можно сказать, что при всех прочих равных условиях, свойства планарных гетероструктур могут зависеть от того является ли точечная симметрия квантовых ям пониженной или нет. В частности, было обнаружено, что для гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе широкозонных бинарных соединений без общего химического элемента  $ZnSe/BeTe$ , степень линейной поляризации фотолуминесценции (ФЛ) может достигать 80% и определяться исключительно типом химических связей на интерфейсах [3]. Вследствие дальнего порядка, ориентация и тип интерфейсных химических связей оказываются взаимосвязанными, и высокая степень поляризации наблюдается только в тех случаях, когда ориентация интерфейсных связей сокращает число операций симметрии, переводящих КЯ саму в себя.

В работе [4] так же для случая образцов с КЯ пониженной симметрии был предсказан эффект анизотропии в плоскости спиновой релаксации электронов. Причем необходимое понижение симметрии может быть обусловлено не только конфигурацией интерфейсных химических связей, но

и градиентом состава композиционного полупроводника в КЯ в направлении оси роста структуры.

В настоящей диссертации исследовались низкотемпературные оптические свойства гетероструктур с КЯ пониженной симметрии. Структуры были выращены методом МЛЭ на основе композиционных II-VI и III-V полупроводников со структурой цинковой обманки в направлении (001). Для исследований оптических свойств использовались методы спектральной эллипсометрии и спектроскопии ФЛ с поляризационным разрешением.

**Целью** настоящей работы являлось следующее.

1. Исследовать влияние ориентации интерфейсных химических связей на эффективные оптические константы периодических гетероструктур типа-II ZnSe/BeTe в спектральной области, соответствующей межзонным оптическим переходам в слоях ZnSe.
2. Исследовать оптические свойства периодических гетероструктур ZnSe/BeTe на предмет возможных проявлений собственных интерфейсных состояний – интерфейсного аналога поверхностных уровней Тамма.
3. Исследовать гетероструктуры на основе твердых растворов AlGaAs с асимметричными квантовыми ямами с целью обнаружения предсказанного ранее эффекта анизотропии в плоскости спиновой релаксации электронов.

**Научная новизна** работы обусловлена применением спектральной эллипсометрии для исследования низкотемпературных оптических свойств полупроводниковых гетероструктур, исследованием влияния микроструктуры интерфейсов на оптические свойства образцов с периодическими гетероструктурами, исследованиями возможности одномерной локализации носителя одиночным гетеропереходом, а так же проведением исследований, направленных на разработку новых способов манипуляции спином электронов в полупроводниковых структурах с КЯ.

В работе впервые экспериментально показано, что вызванное неэквивалентностью интерфейсов понижение точечной симметрии периодических гетероструктур ZnSe/BeTe приводит к появлению латеральной анизотропии действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления периодических структур. В оптических свойствах периодически гетероструктур ZnSe/BeTe обнаружены проявления не наблюдавшихся ранее собственных интерфейсных состояний. Для структур с квантовыми ямами на основе AlGaAs с треугольным профилем потенциала обнаружен предсказанный ранее эффект анизотропии в плоскости спиновой релаксации электронов.

**Достоверность и надежность результатов.** Основные положения диссертации обоснованы экспериментально и теоретически. Достоверность и надежность результатов обеспечивается тщательной проработкой инженерно-технического проведения экспериментов, подтверждается

достаточной воспроизводимостью и необходимым соответствием результатам других исследований. Результаты исследований опубликованы в авторитетных реферируемых журналах и докладывались на различных международных конференциях и симпозиумах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Вызванное неэквивалентностью интерфейсов понижение симметрии периодических гетероструктур с разрывами зон типа-II ZnSe/BeTe, выращенных вдоль направления [001], приводит к появлению оптической анизотропии в плоскости образцов. Эффект проявляется в различии действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления структур для света, линейно поляризованного вдоль кристаллографических направлений [110] и  $[1\bar{1}0]$ . Величина наблюдаемой оптической анизотропии максимальна в спектральной области экситонных переходов в слоях ZnSe.

2. В спектральных зависимостях латеральной оптической анизотропии периодических гетероструктур ZnSe/BeTe обнаружены два типа особенностей, соответствующих оптическим переходам с энергиями, лежащими в области запрещенной зоны. По сравнению с межзонными оптическими переходами, спектральное положение особенностей первого типа не зависит от периода исследованных гетероструктур. Особенности второго типа при уменьшении периода гетероструктур испытывают монотонный сдвиг в область низких энергий, сравнимый с увеличением энергии межзонных переходов вследствие размерного квантования.

3. Обнаруженное поведение объяснено в рамках модели, учитывающей существование в гетероструктурах ZnSe/BeTe собственных интерфейсных состояний – интерфейсного аналога поверхностных уровней Тамма. Модель учитывает существование в запрещенной зоне собственных интерфейсных состояний электронного и дырочного типов – спутников зоны проводимости и валентной зоны, соответственно. Наблюдаемое уменьшение энергии оптических переходов между электронными и дырочными интерфейсными состояниями при уменьшении толщины слоев в гетероструктурах объясняется перекрытием волновых функций интерфейсных состояний на соседних гетерограницах и сдвигом их уровней вглубь запрещенной зоны.

4. В согласии с теоретическим предсказанием было обнаружено, что в гетероструктурах с асимметричными квантовыми ямами с треугольным профилем потенциала на основе AlGaAs, выращенных вдоль направления [001], времена спиновой релаксации по механизму Дьяконова-Переля

различны для спина электронов ориентированного в плоскости вдоль кристаллографических направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ .

**Научная и практическая значимость.** Полученные результаты, связанные с анизотропией в плоскости эффективных оптических констант гетероструктур ZnSe/BeTe указывают на возможные направления дальнейших исследований, направленных на поиск новых эффективных способов управления оптическими свойствами полупроводниковых наноструктур, не связанных непосредственно с приложением внешних полей, варьированием состава образующих полупроводников, а так же размеров нанокристаллов.

Полученные экспериментальные свидетельства существования в гетероструктурах ZnSe/BeTe собственных интерфейсных состояний, аналогичных поверхностным уровням Тамма, делают актуальными дальнейшие исследования гетероструктур с ультратонкими КЯ, поскольку в такой ситуации оценки для плотности состояний носителей, захваченных в интерфейсные состояния и носителей, локализованных в КЯ будут давать сравнимые результаты. Такие исследования могут привести к разработке новых методов управления энергетическим спектром носителей в полупроводниках, основных на внедрении ультратонких слоев.

Практическая ценность экспериментального наблюдения эффекта анизотропии спиновой релаксации обусловлена актуальностью задач спинтроники, связанных с разработкой эффективных способов управления спином носителей в полупроводниковых гетероструктурах.

**Апробация работы.** Вошедшие в работу результаты докладывались автором на «низкоразмерном семинаре» Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН, на семинаре Физического Факультета Университета Бат (2005, Бат, Великобритания), на семинаре в Университете Калифорнии (2005, Сан-Диего, США), на Российской конференции по физике полупроводников (2005, Звенигород), на международных симпозиумах “Nanostructures: Physics and Technology” (2005, 2006, Санкт-Петербург), на международных конференциях по II-VI полупроводникам (2005, Варшава, Польша; 2007, Чеджу, Республика Корея), а так же на симпозиумах по оптике и фотонике общества SPIE (2005, 2006, Сан-Диего, США).

**Публикации и личный вклад автора.** По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 4 работы в реферируемых журналах, и 5 работ в сборниках трудов международных конференций. Общий список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора в исследования периодических гетероструктур ZnSe/BeTe (вторая и третья главы диссертации) состоит в постановке экспериментальной методики, проведении экспериментов и интерпретации их результатов, проведении расчетов, написании статей. Личный вклад автора в исследования анизотропии спиновой релаксации (четвертая глава

диссертации) в структурах с КЯ на основе AlGaAs заключается в участии в экспериментах и обсуждении результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 110 страниц текста, включая 29 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 95 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и основные защищаемые положения диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, описана структура диссертации.

**Первая глава** является вводной. Приводится обзор результатов исследований различных проявлений оптической анизотропии в плоскости гетероструктур с КЯ, симметрия которых понижена. Рассматриваются механизмы понижения симметрии КЯ, обусловленные атомарной структурой интерфейсов в гетеросистемах с различным катионно-анионным составом, а так же механизмы, связанные с приложением внешнего электрического поля вдоль оси роста гетероструктур.

Описывается метод спектральной эллисометрии [5]. С помощью формализма матриц Джонса для приближения полностью поляризованных световых пучков выполнен расчет поляризационной схемы эллисометра с вращающимся компенсатором. Эта поляризационная схема была выбрана в данной работе для исследования оптических свойств периодических гетероструктур ZnSe/BeTe. С применением формализма матриц Мюллера [5], необходимого для расчетов поляризационных схем в случае частичной поляризации световых пучков, выполнены расчеты, необходимые для обработки результатов экспериментов по регистрации спектров ФЛ с поляризационным разрешением.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию эффекта латеральной оптической анизотропии эффективного показателя преломления периодических гетероструктур ZnSe/BeTe с неэквивалентными интерфейсами.

Вначале главы приводится обзор исследований, связанных с технологией выращивания гетероструктур на основе соединений ZnSe и BeTe методом МЛЭ. Описываются некоторые свойства данных бинарных полупроводников с кристаллической структурой цинковой обманки, приводятся результаты исследований оптических свойств гетероструктур на их основе. На Рис. 1 представлена зонная диаграмма исследованных периодических гетероструктур ZnSe/BeTe. Структуры обладают разрывом зон типа-II – электроны локализованы в слоях ZnSe, а дырки локализованы в слоях BeTe. Высоты барьеров сравнительно велики и составляют 2.6 эВ для электронов и

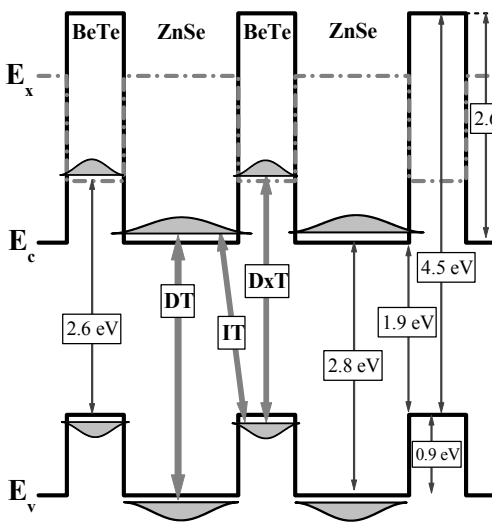


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктур ZnSe/BeTe с разрывом зон типа-II. Штрихпунктирная кривая – уровень минимума X долины зоны проводимости. На схеме: DT – пространственно прямые межзонные оптические переходы в слоях ZnSe; DxT – пространственно прямые межзонные оптические переходы с участием состояний валентной зоны и X долины BeTe; IT – пространственно не прямые межзонные оптические переходы между электронами в слоях ZnSe и дырками в слоях BeTe, обусловленные перекрытием волновых функций носителей, проникающих под барьеры.

0.9 эВ для дырок. Структуры обладают малым ( $< 0.4\%$ ) рассогласованием постоянных решеток между образующими полупроводниками и подложкой GaAs, являясь практически ненапряженными. Все исследованные в данной диссертации структуры были выращены методом МЛЭ вдоль направления [001], не были легированы и содержали по 20 периодов ZnSe/BeTe. Во всех структурах слои ZnSe были в два раза толще слоев BeTe. Исследовались гетероструктуры с номинально неэквивалентными интерфейсами вида Zn-Te...Be-Se. Как было теоретически показано в [6], при такой атомарной структуре гетерограниц симметрия КЯ оказывается пониженной (до  $C_{2v}$ ), что должно приводить к различию оптических свойств образцов для света, линейно поляризованного вдоль направлений [110] и  $[1\bar{1}0]$ . Этот эффект исследовался в настоящей диссертации экспериментально с помощью метода спектральной эллипсометрии. В процессе экспериментов для нескольких различных углов падения света на образец измерялось отношение комплексных амплитудных коэффициентов отражения Френеля [5]:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \rho_{abs} \exp(i\Delta) \quad (1)$$

Измерения проводились при температурах жидкого азота в сине-зеленой области спектра для двух ориентаций кристаллографических осей образцов [110] и  $[1\bar{1}0]$  относительно плоскости падения. Эта плоскость образована падающим на образец и отраженным от него лучами. В первом случае ось  $[1\bar{1}0]$  была параллельна плоскости падения, а во втором – перпендикулярна



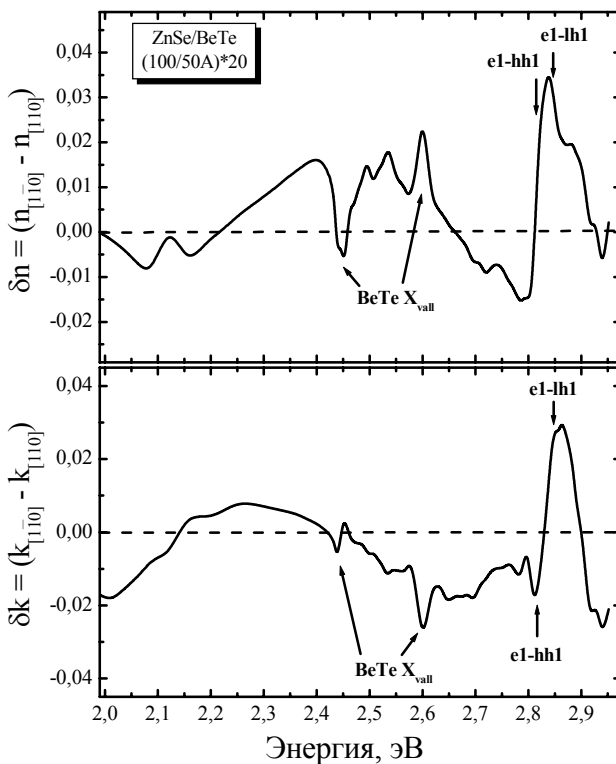


Рис. 2. Спектральная зависимость разности величин эффективных оптических постоянных, соответствующих кристаллографическим направлениям  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$  периодических гетероструктур ZnSe/BeTe с номинально неэквивалентными интерфейсами. Толщины слоев ZnSe/BeTe составляли  $100/50\text{\AA}$ ; структура содержала 20 периодов.  $\delta n$  - разность показателей преломления;  $\delta k$  - разность показателей поглощения. Температура образца  $T = 77\text{K}$ .

ей. Действительные ( $n_{[\bar{1}\bar{1}0]}$ ,  $n_{[110]}$ ) и мнимые ( $k_{[\bar{1}\bar{1}0]}$ ,  $k_{[110]}$ ) части эффективных показателей преломления структур для света, линейно поляризованного вдоль направлений  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , находились численно путем минимизации суммарной разности между измеренными и рассчитанными значениями отношения амплитудных коэффициентов отражения  $\rho = r_p/r_s$ .

На Рис. 2 представлены полученные спектральные зависимости разностей оптических констант для периодической структуры с толщиной слоев ZnSe/BeTe  $100/50\text{\AA}$ . Анизотропия показателя преломления, определяемая здесь как разность  $\delta n = n_{[\bar{1}\bar{1}0]} - n_{[110]}$ , достигает своего максимального

значения  $\delta n_{\max} \approx 0.035$  при энергии  $E = 2.838$  эВ. При этом анизотропия показателя преломления проходит через ноль при энергии, соответствующей экситонному резонансу в слоях ZnSe с участием тяжелой дырки (e1-hh1), что соответствует отсутствию видимого расщепления между энергиями экситонных резонансов с тяжелой дыркой (e1-hh1) для света, линейно поляризованного вдоль направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$  (Рис. 2, верхняя кривая). В свою очередь, анизотропия показателя поглощения света, так же определяемая как разность  $\delta k = k_{[1\bar{1}0]} - k_{[110]}$ , достигает наибольшего значения  $\delta k_{\max} \approx 0.03$  при энергии света  $E = 2.861$  эВ (Рис. 2, нижняя кривая). При этом видно, что анизотропия показателя поглощения имеет разный знак для переходов с участием тяжелой (e1-hh1) и легкой (e1-lh1) дырок. В представленных зависимостях так же отчетливо видны особенности, связанные с пространственно прямыми переходами в слоях BeTe из валентной зоны в X долину зоны проводимости (BeTe  $X_{\text{vall}}$ , Рис. 2).

Наблюдаемая оптическая анизотропия эффективных показателей преломления и поглощения света периодических структур ZnSe/BeTe с неэквивалентными интерфейсами объясняется различной степенью смешивания состояний легких и тяжелых дырок на левом и правом неэквивалентных интерфейсах КЯ. Следствием такого различного смешивания является различие матричных элементов межзонных оптических переходов для двух ортогональных ориентаций оси  $[110]$  образца относительно плоскости поляризации падающего света [6].

**Третья глава** посвящена исследованиям, в результате которых были обнаружены экспериментальные свидетельства существования в гетероструктурах ZnSe/BeTe таммовских интерфейсных состояний – интерфейсного аналога поверхностных уровней Тамма.

Низкотемпературная латеральная оптическая анизотропия периодических структур ZnSe/BeTe с номинально неэквивалентными интерфейсами исследовалась в широком диапазоне энергий фотонов (1.5 ÷ 3.1 эВ) для набора структур с различной толщиной слоев (длинной периода). Анализировалась спектральная зависимость разности  $\delta\Delta = \Delta_{[1\bar{1}0]} - \Delta_{[110]}$ . Величины  $\Delta_{[1\bar{1}0]}$  и  $\Delta_{[110]}$  представляют собой сдвиги фаз (см. (1)) между p- и s-волнами, измеренные для случаев, когда кристаллографическая ось образца  $[1\bar{1}0]$  была перпендикулярна и параллельна плоскости падения, соответственно. Нетрудно показать (см. [5]), что ненулевая величина  $\delta\Delta$  соответствует ненулевой латеральной анизотропии эффективных оптических констант гетероструктур. Характерная спектральная зависимость величины  $\delta\Delta$ , измеренная для периодической структуры с толщиной слоев ZnSe/BeTe 230/115Å представлена на Рис. 3(а). Резонансная особенность DT соответствует пространственно прямым межзонным переходам в слоях ZnSe.

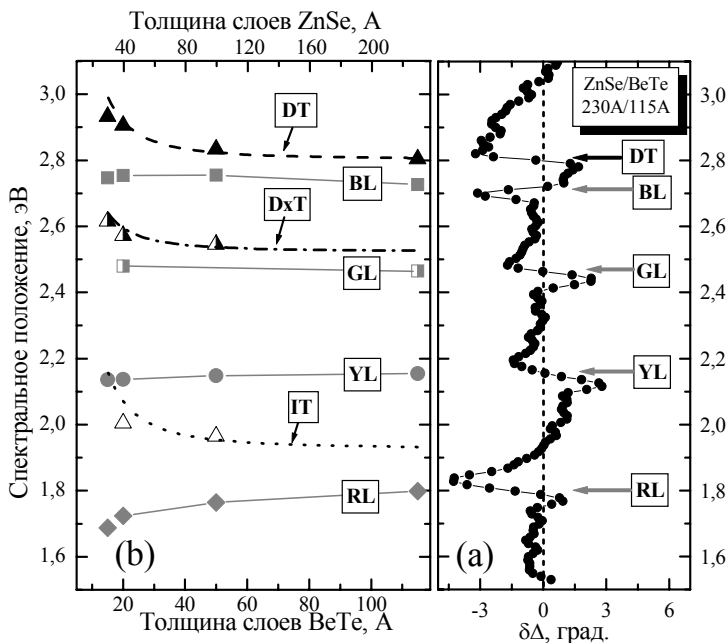


Рис. 3. (а) – спектральная зависимость величины  $\Delta\delta$ , соответствующей латеральной оптической анизотропии периодической структуры с толщиной слоев ZnSe/BeTe 230/115Å. (б) – спектральное положение обнаруженных особенностей для периодических структур ZnSe/BeTe с различной толщиной слоев. Символами DT и DxT обозначены особенности, соответствующие пространственно прямым межзонным оптическим переходам в слоях ZnSe и BeTe, соответственно; IT – пространственно непрямым межзонам переходам; BL, GL, YL и RL – новые особенности, попадающие в область запрещенной зоны.

Особенности BL, GL, YL и RL соответствуют новым, не наблюдавшимся ранее оптическим переходам с энергиями, попадающими в область запрещенной зоны. На Рис. 3(б) представлены зависимости спектрального положения наблюдавшихся особенностей от толщины слоев (периода) исследованных структур. Сплошными и полузаполненными треугольниками представлено спектральное положение межзонных пространственно-прямых переходов в слоях ZnSe (DT) и в слоях BeTe (DxT), соответственно. Данные особенности испытывают коротковолновый сдвиг при уменьшении толщин слоев в вследствие размерного квантования. Белыми треугольниками представлено спектральное положение пространственно не прямых межзонных переходов (IT). Из-за сравнительно малой силы осциллятора таких переходов их спектральное положение определялось по спектрам ФЛ. Штриховыми, штрихпунктирными и пунктирными кривыми представлены

зависимости энергии межзонных переходов, рассчитанные в рамках метода эффективной массы.

Серыми квадратами и кружками на Рис. 3(b) представлено спектральное положение особенностей (BL, GL, YL), практически не меняющих своего спектрального положения при уменьшении периода исследованных гетероструктур с 345Å до 45Å. Серыми ромбами представлено спектральное положение особенности (RL), которая испытывает монотонный сдвиг в область меньших энергий, достигающий 110 мэВ и сравнимый с увеличением энергии межзонных оптических переходов вследствие размерного квантования.

Наблюдаемое поведение может быть объяснено в рамках модели, учитывающей существование в гетероструктурах ZnSe/BeTe собственных интерфейсных состояний – интерфейсного аналога поверхностных уровней Тамма. При построении картины уровней таммовских интерфейсных состояний (ТИС) в исследованных структурах учитывались полученные в данной работе экспериментальные результаты, результаты теоретических и экспериментальных исследований поверхностных уровней Тамма для случая бинарных полупроводников [7], а так же результаты теоретических исследований ТИС в полупроводниковых гетероструктурах с различным катионно-анионным составом: InAs/AlSb [8] и ZnSe/BeTe [9]. Для гетероинтерфейсов, сформированных связями Zn-Te в рамках предложенной модели учитывается существование ТИС электронного и дырочного типов, отмеченных на Рис. 4 как  $ie1$  и  $ih1$ , соответственно. Для гетероинтерфейсов, сформированных связями Be-Se, предполагается существование электронного ТИС  $ie2$  ниже уровня X долины BeTe (серая пунктирная ломаная, Рис. 4), и дырочного ТИС  $ih2$  выше уровня потолка валентной зоны ZnSe. Под электронным ТИС подразумевается состояние, заряд которого равен нулю, когда оно свободно и отрицателен, когда оно занято электроном. Аналогично для ТИС дырочного типа – его заряд нейтрален когда оно свободно и положителен, когда оно занято дыркой. Учет указанных четырех ТИС и возможности оптических переходов между ними позволяет объяснить наблюдаемые особенности BL, GL и RL (см. Рис. 3). Для объяснения особенности YL необходимо дополнительно учесть глубокое ТИС, обозначенное на Рис. 4 символом  $ieh$ .

Наблюдаемое уменьшение энергии оптических переходов между ТИС  $ie1$  и  $ih1$  при уменьшении периода гетероструктур (особенность RL, Рис. 4 и Рис. 3) может быть интерпретировано в рамках метода эффективной массы при рассмотрении интерфейсов в качестве  $\delta$ -функциональных притягивающих потенциалов. С этой целью рассмотрим одномерное уравнение Шредингера с потенциалом:

$$U(x) = U_{QW}(x) - \gamma[\delta(x-a) + \delta(x+a)], \quad (2)$$

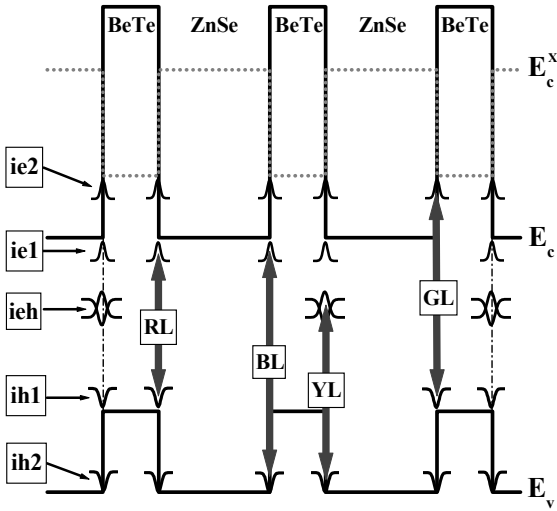


Рис. 4. Энергетическое положение тамбовских интерфейсных состояний в гетероструктурах ZnSe/BeTe. На схеме: ie1 и ie2 – интерфейсные состояния электронного типа; ih1 и ih2 – интерфейсные состояния дырочного типа; ieh – глубокое интерфейсное состояние. Пунктирной ломанной представлен уровень X долины зоны проводимости. Вертикальными стрелками отображены наблюдаемые оптические переходы между интерфейсными состояниями.

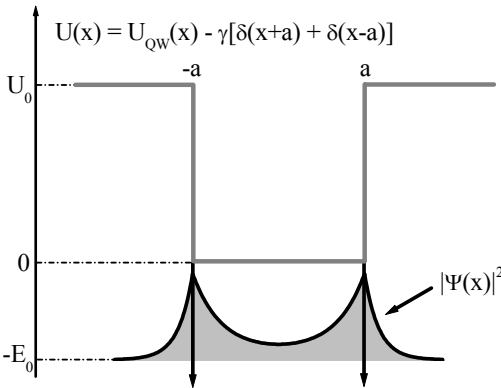


Рис. 5. Локализация носителя на двух интерфейсах.

где  $\gamma$  – положительный параметр, описывающий мощность  $\delta$ -функции,  $U_{qw}(x)$  – потенциал изображенной на Рис. 5 симметричной прямоугольной КЯ шириной  $2a$  с конечными барьерами высотой  $U_0$ . Нетрудно показать, что при достаточной силе  $\delta$ -функции (т. е. когда  $\gamma^2 > U_0 \hbar^2 / 2m$ , где  $m$  – эффективная масса частицы) указанное уравнение имеет решение, соответствующее локализованному состоянию с уровнем энергии ниже дна КЯ. Плотность вероятности такого симметричного состояния отображена в виде серой области на Рис. 5. Волновой вектор  $q_0$  частицы в области КЯ

определяет положение уровня энергии состояния и находится из дисперсионного уравнения:

$$th(q_0 a) = \frac{2m\gamma}{\hbar^2} \frac{1}{q_0} - \sqrt{\frac{2mU_0}{\hbar^2 q_0^2} + 1}. \quad (3)$$

Из данного уравнения следует, что при достаточном сближении гетерограниц (т. е. когда  $a$  сравнимо или меньше характерного размера локализации частицы вне области барьера) уменьшение расстояния между интерфейсами  $a$  приводит к увеличению волнового вектора  $q_0$ , и, следовательно, к смещению уровня энергии состояния вглубь запрещенной зоны. Таким образом, при сближении гетерограниц в периодической структуре, ТИС  $ie1$  и  $ih1$  будут двигаться навстречу друг другу (см. Рис. 4), и энергия оптических переходов между ними (особенность RL, Рис. 4 и Рис. 3) будет уменьшаться.

В данной работе с помощью метода спектральной эллипсометрии оптические переходы между ТИС наблюдались как для периодических гетероструктур ZnSe/BeTe, так и для периодических структур с небольшим добавлением Mn: Zn<sub>0.99</sub>Mn<sub>0.01</sub>Se/Be<sub>0.93</sub>Mn<sub>0.07</sub>Te. При этом в спектрах ФЛ короткопериодных структур с Mn была обнаружена яркая полоса, соответствующая излучательной рекомбинации носителей, захваченных в ТИС  $ie1$  и  $ih2$ . Заключительная часть третьей главы посвящена обсуждению свойств обнаруженной ФЛ через ТИС.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию эффекта анизотропии в плоскости спиновой релаксации электронов в асимметричных квантовых ямах.

Основным механизмом спиновой релаксации электронов в КЯ на основе GaAs является кинетический механизм Дьяконова-Переля [10]. Он может быть обусловлен отсутствием центра инверсии в объемном полупроводнике, на основе которого выращена гетероструктура (объемная асимметрия), и отсутствием центра инверсии в самой гетероструктуре (структурная асимметрия). Структурная асимметрия (СА) может быть вызвана электрическим полем или деформацией. Вклад объемной асимметрии (ОА) сильно зависит от размеров локализации носителей. Поэтому с помощью приложенного напряжения вдоль нормали к гетероструктуре, а так же с помощью специального дизайна гетероструктуры возможно управление временами спиновой релаксации. В работе [4] была предсказана анизотропия спиновой релаксации для гетероструктур, выращенных вдоль направления [001]. Было показано теоретически, что времена жизни спинов, ориентированных вдоль осей [110],  $[1\bar{1}0]$  и [001] различны. В частности, изменение соотношений вкладов СА и ОА может приводить к полному подавлению релаксации спина, ориентированного вдоль одной из осей {110}.

В данной работе наблюдалась анизотропия спиновой релаксации в плоскости асимметричных КЯ. Для демонстрации данного эффекта была выращена структура со сравнимыми вкладами СА и ОА. Образцы выращивались методом МЛЭ на нелегированных подложках GaAs в направлении [001]. Структуры содержали: барьер  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$  толщиной 200 нм, КЯ GaAs толщиной 80Å, далее – участок с монотонно возрастающей долей Al от 4% до 28% толщиной 270Å, и затем снова барьер  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$  толщиной 200нм. Зонная диаграмма такой структуры представлена на Рис. 6.

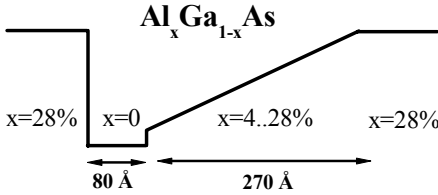


Рис. 6. Зонная диаграмма исследованной гетероструктуры.

Времена спиновой релаксации измерялись с помощью эффекта Ханле – деполаризации ФЛ в поперечном магнитном поле [11]. Зависимость степени циркулярной поляризации ФЛ от поперечного магнитного поля имеет вид т. н. пика Лоренца, обратное значение полуширины которого определяется выражением [4]:

$$\gamma(\theta) = \sqrt{\gamma_+^2 \cos^2 \theta + \gamma_-^2 \sin^2 \theta}, \quad \gamma_{\pm} = g\mu_B \sqrt{\tau_z \tau_{\pm}} / \hbar \quad (4)$$

Здесь:  $\theta$  - угол между вектором  $\mathbf{B}$  и осью  $[1\bar{1}0]$ ;  $g$  - электронный фактор Ланде в плоскости КЯ;  $\mu_B$  - магнетон Бора;  $\tau_z$ ,  $\tau_+$  и  $\tau_-$  - времена релаксации спина, ориентированного: вдоль оси роста КЯ [001], вдоль направления [110] и вдоль направления  $[1\bar{1}0]$ , соответственно. При этом предполагается, что время спиновой релаксация много меньше времени излучательной рекомбинации:  $\tau_i \ll \tau_0$  ( $i = z, +, -$ ),  $\tau_0$  - время излучательной рекомбинации.

Из угловой зависимости  $\gamma^{-1}(\theta)$  полуширины пика Ханле можно определить произведения  $\tau_z \tau_+$  и  $\tau_z \tau_-$ . В случае релаксации по механизму Дьяконова-Переля скорости спиновой релаксации дополнительно связаны соотношением  $\tau_+^{-1} + \tau_-^{-1} = \tau_z^{-1}$ . Это позволяет определить все три времени спиновой релаксации по измерениям эффекта Ханле.

На Рис. 7 представлена зависимость обратной полуширины  $\gamma(\theta)$  от угла  $\theta$  между вектором поля  $\mathbf{B}$  и кристаллографической осью  $[1\bar{1}0]$ . Черными кружками представлены экспериментальные значения. Сплошная кривая

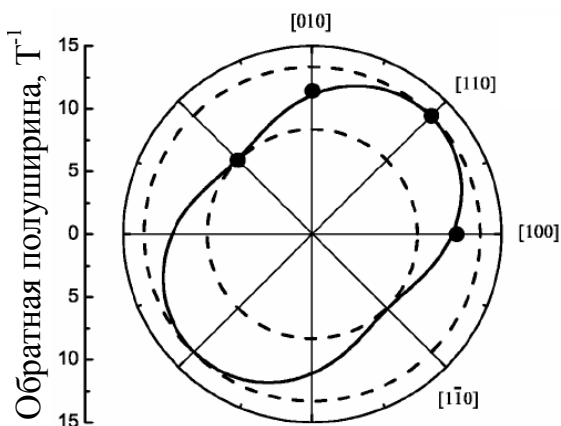


Рис. 7. Экспериментальные значения (кружки) и результаты расчета согласно (4) (кривая) зависимости обратной полуширины контуров Ханле от угла между направлением магнитного поля в плоскости квантовой ямы и кристаллографической осью

соответствует зависимости (4) с параметрами полуширины  $\gamma_+^{-1} = 0.12\text{Г}$  и  $\gamma_-^{-1} = 0.075\text{Г}$  найденными из подгонки кривых Ханле, измеренных для магнитного поля  $\mathbf{V} \parallel [1\bar{1}0]$  и  $\mathbf{V} \parallel [110]$ . Рис. 7 демонстрирует, что выражение (4) полностью описывает угловую зависимость эффекта Ханле, которая, в свою очередь демонстрирует анизотропию времени спиновой релаксации. Для исследованной структуры времена спиновой релаксации электронов при температуре жидкого азота и составили  $\tau_- = 0.8$  нс,  $\tau_+ = 0.3$  нс и  $\tau_z = 0.2$  нс.

В **Заключении** обобщены основные результаты диссертации.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] А. С. Гуревич, В. П. Кочерешко, А. В. Платонов, А. Ваг, Д. Р. Яковлев и Г. Ландвер. «Анизотропия оптических констант гетероструктур ZnSe/BeTe без общего атома на интерфейсах». Физика Твердого Тела **46**, 4, 759 (2004).
- [2] А. С. Гуревич, В. П. Кочерешко, А. В. Платонов, Б. А. Зякин, А. Ваг, Г. Ландвер, «Таммовские интерфейсные состояния в периодических гетероструктурах ZnSe/BeTe». Физика Твердого Тела **47**, 10, 1886 (2005).
- [3] A. S. Gurevich, V. P. Kochereshko, A. V. Platonov, B. A. Zyakin, A. Waag. “Tamm-like interface states in periodical ZnSe/BeTe heterostructures: observed by spectroscopic ellipsometry” Proceedings of SPIE **5888**, 58881G (2005).
- [4] A. S. Gurevich, V. P. Kochereshko, A. V. Platonov, B. A. Zyakin, A. Waag and G. Landwehr, “Tamm-like interface states in periodical ZnSe/BeTe heterostructures”. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium Nanostructures: Physics and Technologies”, June 20-25, 2005, Saint-Petersburg, Russia.
- [5] A. V. Platonov, A. S. Gurevich, V. P. Kochereshko, A. S. Shkolnik, M. G. Rastegaeva, V. P. Evtikhiev, L. E. Golub, N. S. Averkiev “In-plane anisotropy



of spin relaxation in asymmetrical quantum wells". Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium Nanostructures: Physics and Technologies", June 20-25, 2005, Saint-Petersburg, Russia.

[6] N. S. Averkiev, L. E. Golub, A. S. Gurevich, V. P. Evtikhiev, V. P. Kochereshko, A. V. Platonov, A. S. Shkolnik, and Yu. P. Efimov. "Spin-relaxation anisotropy in asymmetrical (001)  $Al_xGa_{1-x}As$  quantum wells from Hanle-effect measurements: Relative strengths of Rashba and Dresselhaus spin-orbit coupling", Phys. Rev. B **74**, 033305 (2006).

[7] A. S. Gurevich, V. P. Kochereshko, A. N. Litvinov, A. V. Platonov, B. A. Zyakina, A. Waag, and G. Landwehr. "Strong photoluminescence caused by optical transitions between electron and hole Tamm-like interface states in ZnSe/BeTe heterostructures". Proceedings of SPIE **6321**, 632109 (2006).

[8] A. N. Litvinov, A. S. Gurevich, V. P. Kochereshko, A. V. Platonov, B. A. Zyakina, A. Waag, and G. Landwehr. "Effective radiative recombination of electron and hole Tame-like interface states in ZnSe/BeTe heterostructures". Proceedings 14<sup>th</sup> International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", June 26-30, 2006, Saint-Petersburg, Russia.

[9] V. P. Kochereshko, A. V. Platonov, A. S. Gurevich. "Optical Anisotropy of Cubic Crystals, from Bulk to Quantum Dots". Journal of Luminescence **125**, 1-2, 133-146 (2007).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] G. Bastard. Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures. 1 edition, Les Ulis: Les Editions de Physique, (1988).

[2] E. L. Ivchenko, G. E. Pikus. Superlattices and other heterostructures. Symmetry and optical phenomena. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1997).

[3] А. В. Платонов, В. П. Кочерешко, Д. Р. Яковлев, Г. В. Михайлов, В. Оссау, А. Вааг, и Г. Ландвер. Физика и Техника Полупроводников **33**, 9, 1093 (1999).

[4] N. S. Averkiev, L. E. Golub. Phys. Rev. B **60**, 15582 (1999).

[5] Р. Аззам, Н. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., Мир (1981).

[6] Е. Л. Ивченко, А. А. Торопов, П. Вуазен. Физика Твердого Тела **40**, 10, 1925 (1998).

[7] С. Дэвисон, Дж. Левин. Поверхностные (Таммовские) состояния. Мир, М. (1973). 231с.

[8] М. О. Nestoklon. International Journal of Nanoscience **2**, 6, 411 (2003).

[9] A. V. Rodina and A. Yu. Alekseev. Phys. Rev. B **73**, 115312 (2006).

[10] М. И. Дьяконов, В. Ю. Качоровский. Физика и Техника Полупроводников **20**, 178 (1986).

[11] Оптическая ориентация, под ред. Б.П.Захарчени, Ф. Майера, Наука, Л. 1989.