

На правах рукописи



МУХИН МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**СПИН-ЗАВИСИМЫЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И
ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА
ОСНОВЕ InAs**

Специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Я.В. Терентьев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, в.н.с.
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В.Ф. Сапега

доктор физико-математических наук, профессор
Физический факультет, СПбГУ

И.В. Игнатьев

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук,
г. Черноголовка

Защита состоится "31" мая 2012 г. в 12:00 час. на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

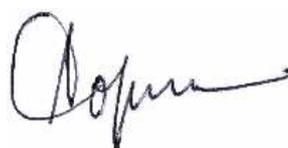
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан "23" апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в области физики полупроводниковых структур особый интерес вызывают исследования спиновых явлений. В частности, большие усилия сосредоточены на изучении спиновой динамики носителей заряда, особенностей их спин-орбитального взаимодействия, разработке методов создания и детектирования спиновой ориентации электронов и дырок путем исследования оптических и транспортных спин-зависимых эффектов. Успехи в области изучения явлений, связанных с оптической ориентацией, инжекцией поляризованных по спину носителей заряда из магнитных материалов, управления спином внешними полями создают базу для разработки новых функциональных устройств электроники, основанных на манипуляции спином [1*].

Спиновая динамика носителей заряда определяется тонкой структурой их энергетического спектра и может управляться внешними воздействиями, такими как электрические и магнитные поля. Приложение внешнего магнитного поля приводит к расщеплению спиновых подзон электронов и дырок за счет эффекта Зеемана. В узкозонных соединениях A3B5, обладающих большой величиной электронного g -фактора, спиновое расщепление приводит к сильной спиновой поляризации носителей заряда. При этом соответствующие межзонные переходы оказываются циркулярно-поляризованными [2*].

В настоящее время для изучения оптической ориентации электронов в полупроводниках и полупроводниковых гетероструктурах используется широкий спектр методов, таких как: регистрация спиновой ориентации электронов по циркулярной поляризации фотолюминесценции, определение деполяризации излучения в магнитном поле (эффект Ханле), оптическая регистрация ядерного и электронного парамагнитных резонансов, исследование фотоэмиссии поляризованных электронов, изучение поверхностного поляризационно-зависимого фотогальванического эффекта, применение «*rim-probe*» методики с высоким разрешением. Среди названных методик следует особо отметить методы исследования полупроводниковых структур путем магнитооптических и фотогальванических измерений. Измерение циркулярно-поляризованной фотолюминесценции в ряде случаев позволяет непосредственно измерять степень спиновой поляризации носителей заряда, участвующих в излучательной рекомбинации [3*]. Измерение фотогальванического эффекта позволяет оценивать величину эффекта Зеемана [4*] в некоторых гетероструктурах, в которых отсутствуют излучательные переходы.

Арсенид индия является весьма перспективным материалом для решения задач спинтроники. Это обусловлено сочетанием ряда уникальных свойств, таких как малая эффективная масса электрона, сильное спин-орбитальное взаимодействие, большой собственный g -фактор электронов, рекордная подвижность двумерного электронного газа в гетероструктурах на основе InAs [5*]. Важно отметить, что InAs близок по параметру решетки к другим представителям так называемого семейства « 6.2 \AA » материалов, к которым

относятся GaSb и AlSb. Это позволяет создавать эффективные детекторы и лазеры инфракрасного диапазона, что делает InAs действительно универсальным материалом [6*].

Необходимо также отметить трудности, связанные с исследованием структур на основе InAs, излучающих в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. К ним, в первую очередь, относится сложность измерения циркулярно-поляризованной эмиссии, так как люминесцентная эффективность таких структур в среднем ИК-диапазоне относительно невелика; с другой стороны, эффективность детекторов в таком диапазоне значительно ниже, чем у фотоэлектронных умножителей и ПЗС-матриц, используемых для регистрации света в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Возможно, по этой причине поляризованная фотолюминесценция структур на основе InAs, в том числе в магнитном поле, изучена достаточно мало.

Диссертационная работа направлена на исследование магнитооптических и фотогальванических эффектов в гетероструктурах на основе InAs, обусловленных спином носителей заряда. В работе экспериментально исследовались гетероструктуры типа II с ультратонкими (1 монослой) вставками InSb в матрице InAs, гетеровалентные квантовые ямы AlSb/InAs/Zn(Mn)Te и диодные структуры на основе InAs. Построены теоретические модели обнаруженных эффектов.

Цель работы заключалась в исследовании спиновых свойств носителей заряда в гетероструктурах на основе InAs, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, и детальном рассмотрении факторов, влияющих на спин-зависимые магнитооптические и фотогальванические свойства данных структур.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие основные задачи:

- Определение спиновых свойств носителей заряда в гетероструктурах типа II с ультратонкими (1 монослой) вставками InSb в матрице InAs:
 - определение зависимости спиновой поляризации носителей заряда от температуры и интенсивности возбуждения с помощью измерения циркулярно-поляризованной магнито-фотолюминесценции в геометрии Фарадея гетероструктур типа II InSb/InAs;
 - расчет энергетического спектра носителей заряда в ультратонкой квантовой яме InSb/InAs методом сильной связи с учетом сложной зонной структуры, упругих напряжений в системе и влияния микроскопической структуры интерфейса;
 - определение g -фактора тяжелых дырок и относительной силы осциллятора оптических переходов с участием электронов с различными спинами в монослойной вставке InSb в матрице InAs.
- Определение спиновых свойств двумерного электронного газа в квантовых ямах AlSb/InAs/Zn(Mn)Te:

- исследование гигантского эффекта Зеемана двумерного электронного газа в гетеровалентной квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te, обусловленного обменным взаимодействием электронов InAs канала с ионами Mn^{2+} , находящимися в барьере, с помощью измерения магнитоиндуцированного фототока;
- оценка степени влияния ионов Mn^{2+} в Zn(Mn)Te барьере на магнитные свойства электронного газа в канале InAs;
- определение величины гигантского Зеемановского расщепления электронов в квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te в зависимости от положения и поверхностной концентрации ионов Mn^{2+} в Zn(Mn)Te барьере.
- Определение спиновых свойств электронов в p-n структуре на основе InAs:
 - определение зависимости спиновой поляризации носителей заряда от температуры и интенсивности возбуждения с помощью измерения циркулярно-поляризованной магнито-фотолюминесценции в геометрии Фарадея p-n структур на основе InAs;
 - расчет энергетического спектра электронов и дырок объемного InAs, находящегося во внешнем магнитном поле, с применением $k \cdot p$ метода;
 - оценка влияния встроенного электрического поля p-n структуры на основе InAs на вероятность рекомбинации электрона с легкой и тяжелой дыркой. Оценка подавления рекомбинации электрона с тяжелой дыркой электрическим полем.

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в проведении комплексного экспериментального и теоретического исследования спин-зависимых магнитооптических и фотогальванических явлений в гетероструктурах на основе InAs.

1. Впервые показано, что в гетероструктурах с ультратонкими (1 монослой) вставками InSb в матрице InAs благодаря сильному зеемановскому расщеплению электроны в зоне проводимости InAs и дырки, локализованные InSb вставками, полностью поляризованы по спину при гелиевой температуре и интенсивности возбуждения меньше 0.1 Вт/см^2 во внешнем магнитном поле больше 2 Тл.
2. Экспериментально показано, что при самых низких температурах и интенсивностях возбуждения степень циркулярной поляризации излучения гетероструктур InSb/InAs составляет 100%, увеличение температуры или интенсивности возбуждения приводит к уменьшению степени поляризации, смене ее знака и насыщению на уровне 10%.
3. Впервые на основе экспериментальных данных в рамках используемых моделей определены g -фактор тяжелых дырок $g_{hh} = 3 \pm 1$ и относительная сила осциллятора оптических переходов с участием электронов с различным спином $r = 1.5 \pm 0.3$ в монослойной вставке InSb в матрице InAs.
4. Доказано существование двумерного электронного газа в структурах AlSb/InAs/Zn(Mn)Te, демонстрирующего гигантское зеемановское расщепление.

5. Экспериментально и теоретически показано, что магнитные свойства электронов в квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te определяются положением и поверхностной концентрацией ионов Mn^{2+} в Zn(Mn)Te барьере.

6. Показано, что фотолюминесценция нелегированного слоя InAs, находящегося в электрическом поле р-п перехода, в условиях приложенного в геометрии Фарадея магнитного поля имеет аномальный знак циркулярной поляризации, величина которой достигает 90% в магнитном поле выше 2 Тл.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В ультратонких квантовых ямах InSb/InAs с толщиной 1 монослой циркулярная поляризация фотолюминесценции, регистрируемая в геометрии Фарадея, достигает 100% во внешнем магнитном поле более 2 Тл и температуре менее 10 К вследствие полной спиновой поляризации носителей, обусловленной эффектом Зеемана, и снятия вырождения подзон легких и тяжелых дырок в результате эффекта размерного квантования и действия упругих напряжений.

2. Величина и знак циркулярной поляризации фотолюминесценции из квантовых ям InSb/InAs во внешнем магнитном поле, приложенном в геометрии Фарадея, зависят от температуры и интенсивности оптического возбуждения, что обусловлено зависимостью силы осциллятора оптического перехода от энергии рекомбинирующих носителей.

3. В гетеровалентной квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te, в которой ионы Mn^{2+} отделены от квантовой ямы InAs туннельно-прозрачным барьером ZnTe, при приложении магнитного поля возникает сильная спиновая поляризация двумерного электронного газа, величина которой зависит от концентрации ионов Mn^{2+} и их расположения в барьере ZnMnTe.

4. Фотолюминесценция слоя InAs, находящегося в электрическом поле р-п перехода, в условиях приложенного в геометрии Фарадея магнитного поля имеет аномальный знак циркулярной поляризации, величина которой достигает 90% в магнитном поле более 2 Тл.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и симпозиумах: 15th International Conference on Narrow Gap Systems (15-я Международная конференция по узкозонным материалам (Блэксбург, США 2011)); 40th International School and Conference on the Physics of Semiconductors (40-я Международная школа и конференция по физике полупроводников (Крыница-Здруй, Польша, 2011)); X Российская конференция по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2011); 18th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (18-й Международный симпозиум «Наноструктуры: физика и технология» (Санкт-Петербург 2010)); Международная зимняя школа по физике полупроводников (Зеленогорск, 2010); 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (30-я Международная конференция по физике полупроводников (Сеул, Корея 2010)); Международный форум по нанотехнологиям (Rusnanotech) (Москва 2009).

Публикации. Перечень публикаций, раскрывающих основное содержание диссертации, содержит 4 печатные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 120 страниц, включая 30 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных в данной работе исследований, сформулирована цель и основные задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснован выбор методов исследования, приведены выносимые на защиту научные положения и краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме работы и постановке задач исследования. Описаны перспективы практического применения гетероструктур на основе InAs в спинтронике, обусловленные уникальными по сравнению с другими соединениями III-V группы параметрами электронов: малой эффективной массой, сильным спин-орбитальным взаимодействием, большим собственным g -фактором электронов, рекордной подвижностью двумерного электронного газа.

Вторая глава посвящена магнитооптическим исследованиям эффекта Зеемана в гетероструктуре типа II InSb/InAs. Исследуемые образцы с монослойными вставками InSb в матрице InAs были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). InSb вставки формировались путем короткопериодной экспозиции поверхности InAs под потоком Sb_4 за счет эффективной As-Sb анионной обменной реакции (§ 2.1). Толщина вставки InSb управлялась температурой роста, меняющейся в диапазоне 400 – 485 °С. Длина волны фотолюминесценции InSb/InAs варьировалась в диапазоне 3.4 – 3.95 мкм (при температуре 80 К) в зависимости от толщины вставки InSb при ее изменении в диапазоне 0.6 – 1 монослоя (МС). Для увеличения номинальной толщины вставки больше 1 МС использовалась следующая за экспозицией дополнительная МПЭ InSb при температуре 430 °С. С целью увеличения яркости люминесценции во всех образцах формировались несколько вставок InSb, разделенных слоями InAs толщиной 15 нм. Активная область образцов была ограничена потенциальными барьерами для электронов, сформированными слоями AlGaAsSb.

В § 2.2 описан метод исследования полученных гетероструктур. Образцы исследовались с помощью измерения циркулярно-поляризованной магнито-фотолюминесценции в геометрии Фарадея, когда направление распространения регистрируемого излучения совпадает с направлением вектора магнитного поля. Для проведения экспериментов использовался гелиевый магнитооптический криостат со сверхпроводящим магнитом, создающим магнитное поле до 5 Тл. Температура образца варьировалась в диапазоне от 2

до 120 К. Плотность мощности возбуждающего лазерного излучения с длиной волны 809 нм менялась в диапазоне $0.3 - 40 \text{ Вт/см}^2$. Дано краткое описание оптической схемы экспериментальной установки.

Основные экспериментальные данные, такие как зависимость степени циркулярной поляризации фотолюминесценции (ФЛ) от магнитного поля, интенсивности возбуждения и температуры представлены в § 2.3. Приложение внешнего магнитного поля существенно изменяет спектры ФЛ, расщепляя их на циркулярно-поляризованные компоненты с разной амплитудой. При малых магнитных полях ($B < 2 \text{ Тл}$) наблюдается нелинейный диамагнитный сдвиг пиков ФЛ, при средних магнитных полях положение пиков линейно зависит от магнитного поля. Такое поведение отражает суперпозицию эффекта магнитного вымораживания [7*] и магнитного квантования энергетических уровней.

Увеличение магнитного поля приводит к росту степени циркулярной поляризации, которая определялась как $P = (I^{\sigma^+} - I^{\sigma^-}) / (I^{\sigma^+} + I^{\sigma^-}) \cdot 100\%$, где

$I^{\sigma^{+(-)}}$ – интенсивность $\sigma^{+(-)}$ поляризованного пика фотолюминесценции. При слабой интенсивности возбуждения ($< 0.1 \text{ Вт/см}^2$) и низкой температуре ($< 10 \text{ К}$) степень циркулярной поляризации излучения достигает 100%, что свидетельствует о полной ориентации спинов носителей заряда магнитным полем.

На рис. 1 представлены зависимости степени циркулярной поляризации от интенсивности возбуждающего излучения, измеренные в магнитном поле 4 Тл при различных температурах. Степень поляризации экспоненциально спадает при росте интенсивности возбуждения и, в конечном итоге, меняет знак. Интенсивность возбуждения, при которой происходит инверсия знака поляризации, уменьшается с ростом температуры. Дальнейшее увеличение интенсивности возбуждения приводит к росту степени поляризации и насыщению ее на уровне 10% поляризации.

Увеличение температуры приводит к уменьшению степени циркулярной поляризации и

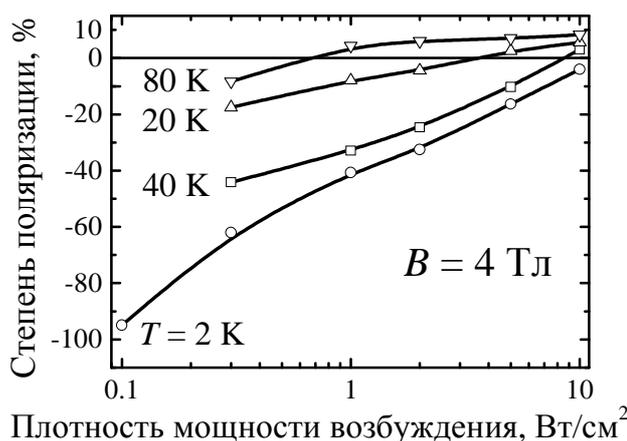


Рис. 1. Зависимости степени поляризации P от плотности интенсивности возбуждения, измеренные при разных температурах.

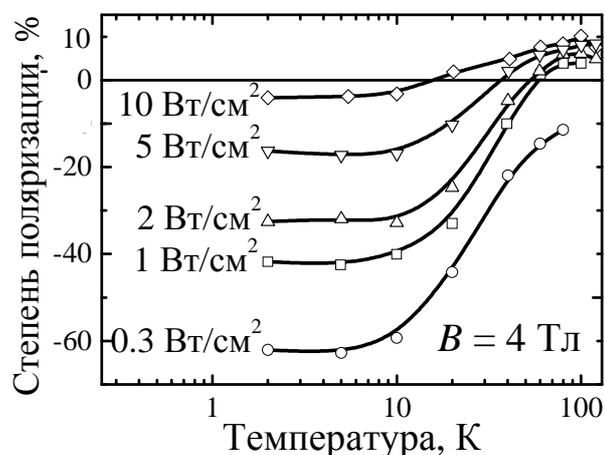


Рис. 2. Температурные зависимости степени поляризации P , измеренные при разных интенсивностях возбуждения.

инверсии ее знака, что в принципе аналогично зависимости степени поляризации от интенсивности возбуждения (рис. 2). Степень поляризации насыщается на уровне 10% при высоких температурах. В области температур ниже 10 К степень поляризация не зависит от температуры при любых уровнях возбуждения.

Для объяснения экспериментальных данных был выполнен расчет энергетического спектра носителей заряда в приближении ультратонкой квантовой ямы InSb/InAs на основе метода сильной связи с учетом сложной зонной структуры, упругих напряжений в системе и влияния микроскопической структуры интерфейса (§ 2.4). Результаты расчета показали, что гетероструктура InSb/InAs имеет разрыв зон типа II с неперекрывающимися запрещенными зонами. При этом дырки локализованы в InSb квантовой яме, а электроны находятся в прилегающих слоях InAs. В такой системе возможны только не прямые в реальном пространстве оптические переходы. Основной дырочный уровень размерного квантования в квантовой яме InSb/InAs представляет собой смешанный уровень, преимущественно состоящий из тяжелых дырок (~ 90%). Следующий уровень имеет примерно на 40 мэВ большую энергию и в основном состоит из спин-орбитально отщепленных дырок (~ 60%) и легких дырок (~ 30%).

В § 2.5 на основе данных магнитооптических исследований и результатов расчета зонной структуры определен g -фактор тяжелых дырок в монослойной вставке InSb/InAs. Зависимость энергии оптического перехода от магнитного поля при больших магнитных полях может быть описана в рамках эффективного гамильтониана, включающего в себя уровни Ландау и уровни зеемановского расщепления электронов в InAs и тяжелых дырок в InSb вставке. В малых магнитных полях из-за эффекта магнитного вымораживания зависимость энергии оптического перехода $E(B)$ от магнитного поля B не является линейной. Это связано с увеличением энергии локализации носителей с ростом магнитного поля. Этот эффект, ярко выраженный в узкозонных материалах, существенен в области магнитных полей, где энергия уровня Ландау носителей заряда имеет меньшее значение по сравнению с энергией локализации. В гетероструктуре InSb/InAs эффект магнитного вымораживания связан с локализацией электронов InAs в мелкой треугольной квантовой яме, возникающей у гетероинтерфейса InSb/InAs. Моделирование экспериментальных зависимостей положения пиков фотолуминесценции от магнитного поля при больших магнитных полях позволило оценить g -фактор тяжелых дырок в монослойной InSb вставке $g_{hh} = 3 \pm 1$.

При малой интенсивности возбуждения и низкой температуре зеемановское расщепление носителей заряда в магнитном поле приводит к полной поляризации по спину электронов в InAs и тяжелых дырок в InSb. При данных условиях наблюдаемая 100% степень поляризации объясняется тем, что заселены только основные состояния электрона и дырки, рекомбинация которых, согласно правилам отбора, происходит с испусканием σ^- поляризованного фотона. Для объяснения уменьшения степени поляризации и смены ее знака с ростом температуры или повышением интенсивности

возбуждения необходимо учитывать два фактора: заполнение носителями заряда более высоких уровней Зеемана и различную силу осциллятора оптических переходов носителей с разными энергиями. Последнее является характеристической особенностью систем с разрывом зон типа II [8*].

В § 2.6 в рамках предложенной модели определена относительная сила осциллятора r оптических переходов с участием электронов с разными энергиями в монослойной вставке InSb в матрице InAs. Степень поляризации в соответствии с зонной структурой и правилами отбора в данном случае

описывается уравнением
$$P = \frac{r \cdot n_{-1/2} \cdot P_{+3/2} - n_{+1/2} \cdot P_{-3/2}}{r \cdot n_{-1/2} \cdot P_{+3/2} + n_{+1/2} \cdot P_{-3/2}}$$
. В условиях малой

интенсивности возбуждения, когда справедливо распределение Больцмана, зависимость степени поляризации от температуры описывается уравнением

$$P = -\tanh\left(\frac{\Delta E_e + \Delta E_{hh}}{2kT} - \frac{\ln(r)}{2}\right),$$

где $\Delta E_e + \Delta E_{hh}$ – экспериментальное значение суммарного зеемановского расщепления зоны проводимости InAs и уровня тяжелых дырок в InSb. Моделирование экспериментальной зависимости степени поляризации от температуры (рис. 3), измеренной в магнитном поле 4 Тл, с помощью указанного уравнения позволило оценить относительную силу осциллятора $r = 1.5 \pm 0.3$.

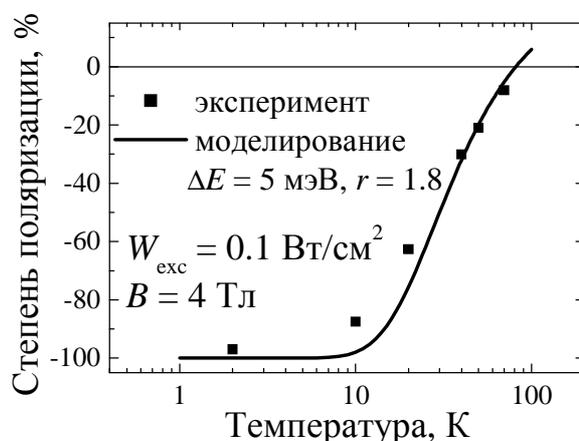


Рис. 3. Моделирование зависимости степени поляризации от температуры.

Третья глава посвящена исследованию обменного взаимодействия электронов в квантовой яме InAs с ионами Mn^{2+} в барьере гетеровалентных структур AlSb/InAs/Zn(Mn)Te. Магнитные гетеровалентные КЯ AlSb/InAs/Zn(Mn)Te с электронным каналом были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии с применением III-V/II-VI «гибридной» технологии (§ 3.1). Структуры были выращены на (001) ориентированных GaAs подложках при температуре 280 °С. Для роста AlSb/InAs/Zn(Mn)Te гетеровалентных структур с Mn-содержащими барьерами использовались 2 отдельные установки МПЭ. В первой установке МПЭ растилась III-V часть структуры, содержащая GaAs и GaSb буферные слои с толщинами 0.2 мкм и 2 мкм соответственно, на которых были выращены 4 нм барьерный слой AlSb и следующая за ним InAs квантовая яма толщиной 15 нм. II-VI часть структуры растилась псевдоморфно на III-V части во второй двухкамерной установке МПЭ. Для передачи структуры из одной МПЭ установки в другую применялась *ex-situ* химическая пассивация поверхности InAs в растворе $Na_2S \cdot 9H_2O$.

Для демонстрации того, что наличие ионов Mn^{2+} приводит к усилению магнитных свойств двумерного электронного газа в InAs, была выращена серия

образцов отличающихся концентрацией и распределением ионов Mn^{2+} в II-VI барьере. Образцы типа А содержали монослойную вставку $MnTe$ (~ 0.3 нм), отделенную от $InAs$ квантовой ямы 10-ю монослоями $ZnTe$. Образцы типа В имели такой же $ZnTe$ спейсер и 10 нм слой $Zn_{0.9}Mn_{0.1}Te$. Референсные немагнитные образцы типа С не содержали ионов Mn^{2+} .

Исследования проводились с помощью измерения магнитоиндуцированного фототока. В качестве источника возбуждения использовался генератор микроволнового излучения (§ 3.2). Образцы с парой омических контактов, расположенных на противоположных краях, облучались микроволновым излучением, приводящим к разогреву электронного газа. Внешнее магнитное поле с максимальной величиной 3 Тл прикладывалось в плоскости квантовой ямы. Фототок измерялся в плоскости образца в направлении, перпендикулярном вектору магнитного поля.

В § 3.3 представлены основные экспериментальные данные, описано поведение зависимости фототока J_x от магнитного поля и температуры для «магнитных» и «немагнитного» образцов. Во всех структурах ток увеличивается с ростом магнитного поля B (рис. 4), а также меняет знак при смене его направления. Температурные зависимости фототока, измеренные при $B = 1$ Тл, представлены на рис. 5. На вставке к рисунку показана модель, иллюстрирующая возникновение спин-поляризованных токов при микроволновом разогреве электронного газа в образце. В нецентросимметричных КЯ при нарушении термодинамического равновесия между двумерным электронным газом и кристаллической решеткой возникают спиновые токи [9*]. Благодаря спин-зависимой асимметрии электрон-фононного взаимодействия электроны со спином $+1/2$ быстрее релаксируют на дно подзоны из состояний с положительными значениями k_x , а электроны со спином $-1/2$ быстрее опустошают высокоэнергетичные

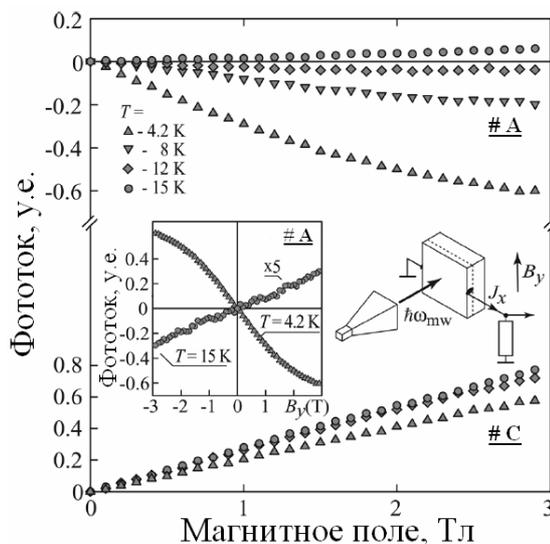


Рис. 4. Зависимости фототока J_x от магнитного поля. На вставках представлена зависимость J_x для обоих направлений поля и геометрия эксперимента.

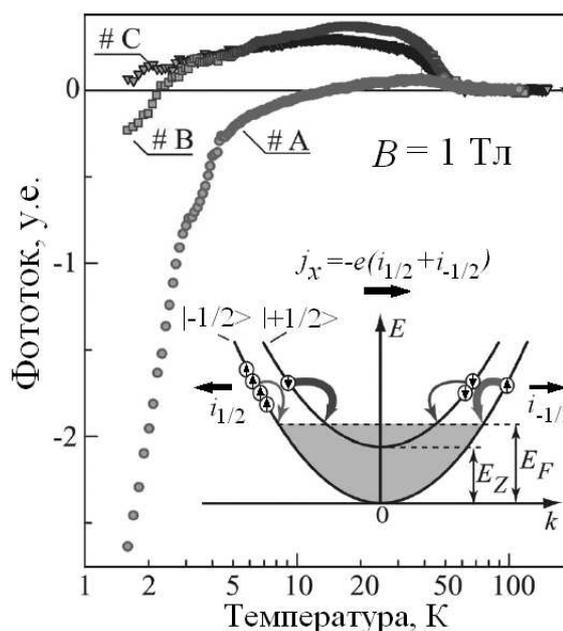


Рис. 5. Температурные зависимости фототока, измеренные при $B = 1$ Тл. На вставке показана модель возникновения фототока.

состояния с отрицательными значениями k_x . Это приводит к асимметричному распределению электронов в k пространстве и возникновению чисто спинового тока. Внешнее магнитное поле поляризует электронный газ по спину и нарушает баланс между потоками электронов в спиновых подзонах, что приводит к возникновению электрического тока, пропорционального зеемановскому расщеплению электронных состояний.

На рис. 5 представлены температурные зависимости фототока. При температуре выше 60 К фототоки всех трех типов структур имеют одинаковый знак и примерно равную амплитуду. При понижении температуры в референсном немагнитном образце С полярность сигнала и его зависимость от магнитного поля остаются неизменными. В образцах А и В уменьшение температуры приводит к смене знака поляризации фототока. В образце А при температуре ниже $T_{инв} \sim 15$ К фототок более чем на порядок превышает значение фототоков образцов В и С, измеренных при той же температуре. В образце А при температуре $T < 8$ К фототок проявляет нелинейную зависимость от магнитного поля и имеет насыщение при высоких магнитных полях (рис. 4). В образце В температура инверсии знака поляризации фототока значительно ниже ($T_{инв} \sim 2.5$ К) и амплитуда сигнала значительно меньше в сравнении с образцом А.

Измеренная при температуре 4.2 К концентрация двумерного электронного газа гетеровалентной структуры AlSb/InAs/ZnTe составила $n = (1 \div 2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, подвижность $\mu \sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Полученная концентрация электронов примерно в 5 раз выше, чем аналогичный параметр в InAs квантовой яме с AlSb барьерами. Из этого следует, что в гетеровалентных структурах большая часть электронов в канале InAs возникает за счет ионизации донорных центров на III-V/II-VI гетеровалентном интерфейсе. Таким образом, на гетероинтерфейсе InAs/ZnTe имеется большая концентрация положительно заряженных донорных центров. Теоретическое рассмотрение показало, что наличие заряженных донорных центров приводит к возникновению встроенного электрического поля, которое обеспечивает сильную локализацию электронного газа КЯ у гетеровалентного интерфейса InAs/ZnTe (§ 3.4). В приближении треугольной квантовой ямы с плоскими барьерами были рассчитаны как положение уровня размерного квантования для электронов в КЯ InAs, так и глубина проникновения волновой функции электронов в ZnTe барьер (рис. 6). Волновая функция электронов InAs глубоко проникает в барьер и достигает слоев (Zn,Mn)Te, что приводит к эффективному обменно-взаимодействию с ионами Mn^{2+} .

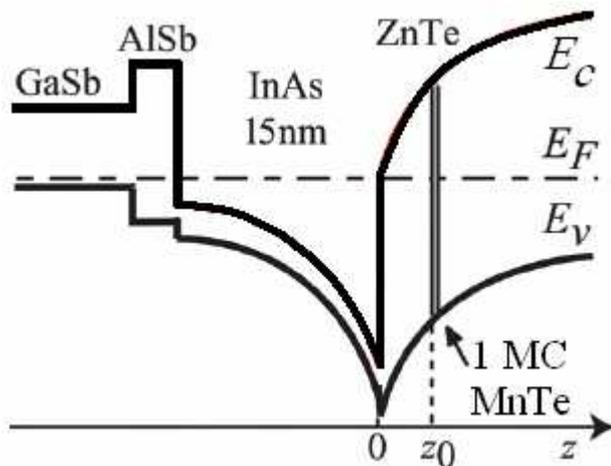


Рис. 6. Зонная диаграмма квантовой ямы AlSb/InAs/Zn(Mn)Te

Проведенное в § 3.5 сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными доказывает, что структуры AlSb/InAs/Zn(Mn)Te со вставками марганца в II-VI барьере характеризуются гигантским зеемановским расщеплением электронов в InAs квантовой яме и демонстрируют поведение, типичное для разбавленных магнитных полупроводников. Показано, что усиленные магнитные свойства электронов в InAs канале, обусловленные глубоким проникновением электронной волновой функции в (Zn,Mn)Te слой, определяются положением и концентрацией ионов Mn^{2+} в Zn(Mn)Te барьере.

Экспериментальные результаты хорошо описываются моделью, основанной на разнице в заселенности спиновых подуровней электронов, возникающей благодаря эффекту Зеемана. Разная заселенность электронных спиновых подзон приводит к появлению электрического тока $J_x \propto \Delta E_Z$, где ΔE_Z – величина зеемановского расщепления.

В немагнитной структуре зеемановское расщепление спиновых подзон определяется только собственным g -фактором. Соответственно, в немагнитной структуре C величина фототока линейно зависит от приложенного магнитного поля (рис. 4). В Mn-легированных образцах сильная температурная зависимость энергии расщепления спиновых подзон и инверсия знака поляризации фототока с изменением температуры объясняется обменным взаимодействием двумерного электронного газа с ионами Mn^{2+} , обусловленным проникновением электронной волновой функции в барьерный слой (рис. 5). В магнитных образцах зеемановское расщепление состоит из двух слагаемых, имеющих противоположный знак – собственного спинового расщепления и расщепления, обусловленного обменным взаимодействием электрона с ионами Mn^{2+} . При низкой температуре доминирует второе слагаемое, и фототок, пропорциональный ΔE_Z , имеет большую величину и насыщается при больших магнитных полях (рис. 4). Проведенные оценки показали, что при низкой температуре спиновое расщепление электронов в InAs, обусловленное обменным взаимодействием, на порядок превосходит собственное зеемановское расщепление (в магнитном поле 1 Тл). С повышением температуры роль обменного взаимодействия уменьшается. При определенной температуре собственное расщепление спиновых подзон, описываемое первым слагаемым, начинает доминировать, что приводит к инверсии направления тока (рис. 5). Теоретическая модель находится в полном соответствии с экспериментом. Таким образом, с помощью измерения спин-поляризованных электрических фототоков обнаружено гигантское зеемановское расщепление электронных уровней в InAs КЯ.

Четвертая глава посвящена магнитооптическим исследованиям InAs p-n структур. Исследуемые образцы выращены методом МПЭ (§ 4.1). Область с p^+ -легированием включала в себя InAs подложку, эпитаксиальный буферный слой InAs (0.2 мкм), потенциальный барьер для электронов, образованный слоями AlGaAsSb (0.2 мкм) и AlSb (100 Å), и тонкий слой InAs (300 Å). Концентрация легирующей примеси в p^+ -слоях составляла 10^{17} - 10^{18} см⁻³. n-область была

образована слоем InAs толщиной 0.27 мкм и барьером для дырок AlGaAsSb (0.1 мкм). Слой InAs в активной области не легировался, однако фоновая концентрация электронов n_0 составляла $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Тонкий слой InAs (300 Å), прилегающий к p-AlGaAsSb, был сильно легирован, чтобы отдалить p-n переход от гетерограницы.

InAs p-n структуры исследовались описанным ранее методом магнитофотолюминесцентной спектроскопии.

В § 4.3 представлены основные экспериментальные данные: зависимость степени циркулярной поляризации ФЛ от магнитного поля, интенсивности возбуждения и температуры для диодных структур на основе InAs и референсного эпитаксиального объемного слоя InAs. В спектрах эпитаксиального однородного слоя InAs, обладающего некоторой фоновой концентрацией собственных примесей, наблюдаются два пика, связанные с переходами донор-валентная зона и донор-акцептор. Приложение внешнего магнитного поля приводит к появлению относительно небольшой степени циркулярной поляризации (не превышающей 20% в магнитных полях до 5 Тл), при этом переход донор-валентная зона имеет σ^+ поляризацию, а переход донор-акцептор – циркулярную поляризацию другого знака. Циркулярно-поляризованные компоненты обоих пиков имеют одинаковую энергию. С ростом температуры степень поляризации пиков падает и при температуре 35 К практически исчезает (в пределах погрешности эксперимента).

В спектрах циркулярно-поляризованной ФЛ из образцов с p-n переходом наблюдается один пик с энергией меньше ширины запрещенной зоны InAs. p-n₀ структура отличается от объемного слоя InAs, описанного выше, только наличием встроенного электрического поля. При приложении магнитного поля пик ФЛ излучения смещается в голубую область, при этом, как и в случае объемного InAs, не наблюдается его расщепление на циркулярно-поляризованные компоненты.

Диаманитный сдвиг излучения имеет вид, характерный для эффекта магнитного вымораживания электронов.

На рис. 7 представлена зависимость степени циркулярной поляризации излучения InAs p-n структуры от величины магнитного поля. С увеличением магнитного поля степень поляризации быстро растет и насыщается на значении 80-90% в полях $B \sim 2$ Тл, что свидетельствует о сильной спиновой ориентации электронов.

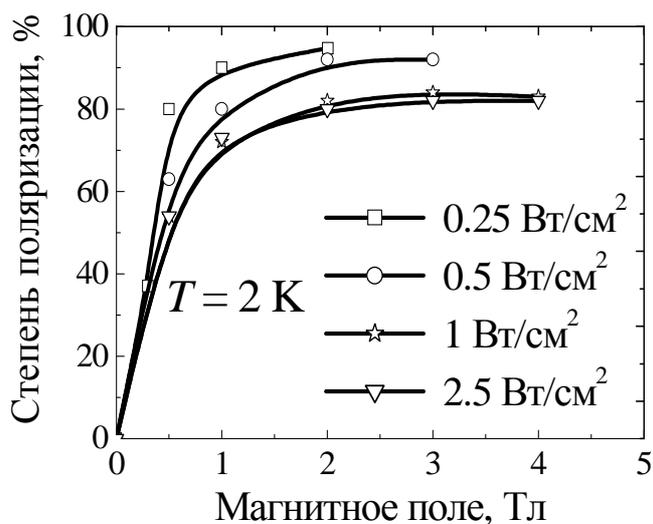


Рис. 7. Зависимости степени циркулярной поляризации ФЛ InAs p-n структуры от поля B , измеренные при разных интенсивностях возбуждения.

Зависимости степени поляризации от магнитного поля, измеренные при разных температурах, представлены на рис. 8. Увеличение температуры приводит к уменьшению степени поляризации, но не приводит к смене ее знака.

Для объяснения наблюдаемых явлений с помощью *k-p* метода был проведен детальный расчет зонной структуры InAs во внешнем магнитном поле на основе 8-зонной модели Пиджена-Брауна [10*].

Определены правила отбора (и соответственно, ожидаемый знак поляризации излучения) для оптических переходов с нижних состояний носителей (§ 4.4). Электронный *g*-фактор в InAs равен -15, это приводит к сильному зеемановскому расщеплению зоны проводимости. Расщепление подзон валентной зоны невелико (< 1 мэВ). Согласно правилам отбора знаки циркулярной поляризации при рекомбинации электрона с тяжелой и легкой дырками различаются. При этом в умеренных магнитных полях матричный элемент оптического перехода с участием тяжелой дырки примерно в три раза больше матричного элемента оптического перехода с участием легкой дырки [11*]. В сильном магнитном поле и при низкой температуре степень циркулярной поляризации должна иметь положительный знак, что обусловлено рекомбинацией электрона с легкой дыркой. С повышением температуры за счет термического заселения начинаются переходы с участием тяжелой дырки, сопровождающиеся излучением σ^- поляризованных фотонов. Таким образом, с повышением температуры ожидается резкое уменьшение степени поляризации и, в конечном итоге, смена ее знака (что обусловлено большей величиной матричного элемента оптического перехода с участием тяжелой дырки). Уже при температуре 10 К должна наблюдаться смена знака поляризации, так как тепловая энергия kT составляет величину ~ 1 мэВ, что обеспечивает равномерное заселение дырочных подзон. В магнитном поле 5 Тл экспериментально измеренная степень поляризации начинает заметно уменьшаться только при температуре > 10 К, что в свою очередь, связано с заселением следующего спинового электронного состояния. Даже при температуре 80 К не происходит смена знака поляризации (рис. 8).

Теоретическое рассмотрение также как и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что встроенное электрическое поле р-п перехода подавляет рекомбинацию с участием тяжелой дырки (§ 4.5). Электрическое поле формирует потенциальный барьер для носителей, поэтому рекомбинация возможна только за счет встречного туннелирования носителей. При этом вероятность оптического перехода пропорциональна перекрытию волновых функций электрона и дырки. Учет эффекта туннелирования в рамках

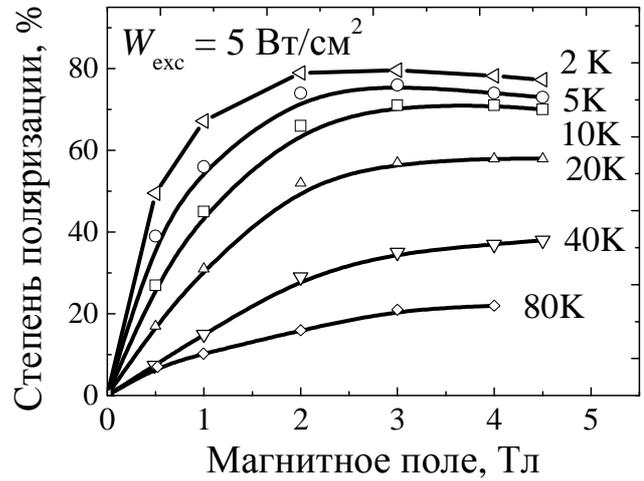


Рис. 8. Зависимости степени поляризации ФЛ InAs p-n структуры от поля B , измеренные при разных температурах.

классического приближения показывает, что в электрическом поле р-п перехода вероятность рекомбинации электрона с легкой дыркой значительно превосходит вероятность рекомбинации с тяжелой дыркой. Это приводит к доминированию вклада легких дырок, что обеспечивает высокую степень σ^+ поляризации излучения.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Показано, что в гетероструктурах с ультратонкими (толщиной в 1 монослой) вставками InSb в матрице InAs благодаря сильному зеемановскому расщеплению электроны в зоне проводимости InAs и дырки, локализованные InSb вставками, при низкой температуре и интенсивности возбуждения полностью поляризованы по спину во внешнем магнитном поле более 2 Тл.
2. Рассчитана зонная структура ультратонкой вставки InSb в матрице InAs с помощью метода сильной связи с учетом упругих напряжений в системе и влияния микроскопической структуры гетероинтерфейсов.
3. Показано, что при самых низких температурах и интенсивностях возбуждения степень циркулярной поляризации излучения гетероструктур InSb/InAs имеет 100% циркулярную поляризацию, увеличение температуры или интенсивности возбуждения приводит к уменьшению степени поляризации, смене ее знака и насыщению на уровне 10%.
4. На основе экспериментальных данных в рамках используемых моделей определены g -фактор тяжелых дырок $g_{hh} = 3 \pm 1$ и относительная сила осциллятора оптических переходов с участием электронов с различным спином $r = 1.5 \pm 0.3$ в монослойной вставке InSb в матрице InAs.
5. С помощью измерения магнитоиндуцированного фототока экспериментально обнаружен гигантский эффект Зеемана для двумерного электронного газа в гетеровалентной квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te, обусловленный обменным взаимодействием электронов с ионами Mn^{2+} .
6. Теоретически показано, что из-за наличия на гетероинтерфейсе InAs/ZnTe большой концентрации заряженных донорных центров в квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te возникает встроенное электрическое поле, которое обеспечивает сильную локализацию электронного газа КЯ у гетеровалентного интерфейса. В результате, волновая функция электронов InAs глубоко проникает в барьер и достигает слоев (Zn,Mn)Te, что приводит к эффективному обменному взаимодействию с ионами марганца Mn^{2+} .
7. Экспериментально и теоретически показано, что магнитные свойства электронов в квантовой яме AlSb/InAs/Zn(Mn)Te могут управляться изменением положения и поверхностной концентрации ионов Mn^{2+} в Zn(Mn)Te барьере.
8. Показано, что фотолюминесценция нелегированного слоя InAs, находящегося в электрическом поле р-п перехода, в условиях приложенного в геометрии Фарадея магнитного поля, имеет аномальный знак циркулярной поляризации, величина которой достигает 90% в магнитном поле выше 2 Тл.
9. С помощью $k \cdot p$ метода проведен детальный расчет энергетического спектра объемного InAs во внешнем магнитном поле на основе 8-ми зонной модели

Пиджена-Брауна, определен ожидаемый знак поляризации излучения с учетом правил отбора для оптических переходов с нижних уровней носителей. Показано, что учет эффекта туннелирования в электрическом поле р-п перехода приводит к доминированию вклада легких дырок, что обеспечивает высокую степень σ^+ поляризации излучения.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Ya.V. Terent'ev, C. Zoth, V.V. Bel'kov, P. Olbrich, C. Drexler, V. Lechner, P. Lutz, M.S. Mukhin, S.A. Tarasenko, A.N. Semenov, V.A. Solov'ev, I.V. Sedova, G.V. Klimko, T.A. Komissarova, S.V. Ivanov, and S.D. Ganichev, Exchange interaction of electrons with Mn in hybrid AlSb/InAs/ZnMnTe structures // Appl. Phys. Lett. – 2011 – V. 99 – P. 072111 (1-3).
2. M.S. Mukhin, Ya.V. Terent'ev, L.E. Golub, M.O. Nestoklon, B.Ya. Meltser, A.N. Semenov, V.A. Solov'ev, A.A. Toropov, and S.V. Ivanov, Electron spin alignment in InSb type II quantum dots in an InAs matrix // AIP Conf. Proc. – 2011 – V. 1416 – P. 34-37.
3. M.S. Mukhin, Y.V. Terent'ev, L.E. Golub, M.O. Nestoklon, B.Ya. Meltser, A.N. Semenov, V.A. Solov'ev, A.A. Sitnikova, A.A. Toropov, and S.V. Ivanov, Magneto-optical studies of narrow band-gap heterostructures with type II quantum dots InSb in an InAs matrix // Acta Physica Polonica A – 2011 – V. 120 (5) – P. 868-869.
4. Я.В. Терентьев, М.С. Мухин, В.А. Соловьев, А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, А.А. Усикова, С.В. Иванов, Исследование механизмов фото- и электролюминесценции в квантово-размерных гетероструктурах InSb/InAs // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 – В. 8 – С. 1098-1103.

Список цитируемой литературы

- 1*. T. Dietl, D. Awschalom, and M. Kaminska, Spintronics in Semiconductors and Semimetals series. - Academic, London, 2008.
- 2*. F. Meier and B.P. Zakharchenya, Optical Orientation, volume 8 of Modern Problems in Condensed Matter Sciences. - North-Holland, Amsterdam, 1984.
- 3*. R.R. Parsons, Band-to-band optical pumping in solids and polarized photoluminescence // Phys. Rev. Lett. – 1969 – V. 23 – P. 1152-1154.
- 4*. В.Л. Альперович, В.П. Белиничер, В.Н. Новиков, А.С. Терехов, Поверхностный фотогальванический эффект в арсениде галлия // Письма в ЖЭТФ – 1980 – V. 31 – P. 581-586.
- 5*. I. Vurgaftman, J.R. Meyer, and L.R. Ram-Mohan, Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // J. Appl. Phys. – 2001 – V. 89 – P. 5815-5875.
- 6*. E.R. Glaser, R. Magno, B.V. Shanabrook, and J.G. Tischler, Optical characterization of $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{Sb}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epitaxial layers for development of 6.2-Å-based heterojunction bipolar transistors // J. Vac. Sci. Technol. B – 2006 – V. 24 – P. 1604-1606.

- 7*. M.I. Dyakonov, A.L. Efros, and D.L. Mitchell, Magnetic Freeze-Out of Electrons in Extrinsic Semiconductors // *Phys. Rev.* – 1968 – V. 180 – P. 813-818.
- 8*. F. Hatami, M. Grundmann, N.N. Ledentsov, F. Heinrichsdorff, R. Heitz, J. Bohrer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, and Z.I. Alferov, Carrier dynamics in type-II GaSb/GaAs quantum dots // *Phys. Rev. B* – 1998 – V. 57 – P. 4635-4641.
- 9*. E.L. Ivchenko and S.A. Tarasenko, Pure spin photocurrents // *Semicond. Sci. Technol.* – 2008 – V. 23 – P. 114007 (1-9).
- 10*. C.R. Pidgeon and R.N. Brown, Interband magneto-absorption and Faraday rotation in InSb // *Phys. Rev.* – 1966 – V. 146 – P. 575-583.
- 11*. R. Winkler, Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems, volume 191 of Springer Tracts in Modern Physics. - Springer, Berlin, 2003.