

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кокурина Ивана Александровича «Эффекты спин-орбитального взаимодействия в ультратонких полупроводниковых наноструктурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

В диссертационной работе Кокурина Ивана Александровича проводятся теоретические исследования ряда спектральных, оптических и транспортных явлений, обусловленных спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) в структурах с сильным размерным квантованием.

По своей сути диссертация и поставленные в ней задачи направлены на исследования спин-зависимых явлений в полупроводниковых наноструктурах с большой спин-орбитальной связью, которые в последнее время привлекают большое внимание в связи с быстрым развитием спинтроники. Особый интерес в таких исследованиях вызывает поиск различных путей управления спиновыми состояниями. Спин-орбитальное взаимодействие здесь играет важную роль, поскольку через него возможна связь спина с электрическим полем. Поэтому тема диссертации и проводимые в ней исследования спиновой ориентации под воздействием оптической световой волны и электрического тока, безусловно, являются актуальными.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы.

**Во введении** диссертационной работы обоснована **актуальность** исследования. Показано, что исследования спектральных и транспортных явлений в полупроводниковых наноструктурах с учетом спиновой степени свободы у носителей, актуальны в связи с развитием спинтроники и могут быть использованы в квантовых вычислениях. Отмечена важность взаимного влияния сильного размерного квантования и спин-орбитального взаимодействия в проявлении эффектов спиновой поляризации.

**В первой главе** проводится теоретическое исследование оптической ориентации спинов свободных и локализованных в квантовых ямах GaAs/AlGaAs:Mn носителей при возбуждении циркулярно-поляризованным светом оптического перехода, переводящего ион марганца в нейтральное состояние. Показано, что фотонейтрализация отрицательно заряженных акцепторов в квантовых ямах циркулярно поляризованным светом, позволяет достичь высокой степени спиновой поляризации. Рассмотрена циркулярная поляризация фотолюминесценции при рекомбинации термализованных электронов со дна зоны проводимости и дырок, локализованных на  $Mn^0$ . Показано, что можно достичь высокой степени поляризации люминесценции, изменяя ширину квантовой ямы при определенном соотношении между временами релаксации электронов и дырок.

**Во второй главе** работы исследованы спектральные и транспортные свойства электронного газа в InAs-нанопроволоках с сильным СОВ Рашбы. Аналитически решена спектральная задача для тубулярного электронного газа на цилиндрической поверхности InAs-нанопроволоках при учете сильного СОВ Рашбы и зеемановского расщепления в магнитном поле. Показано, что сильное СОВ приводит к появлению W-образных подзон и СО-щелей. Спецификой сильного СОВ явилась немонотонная зависимость кондактанса и знакопеременная зависимость термоэдс от химического потенциала. Обсуждается уширение СО-щелей за счет эффекта Дрессельхауза, а также указывается на конкуренцию вкладов Рашбы и Дрессельхауза при образовании W-образных подзон. Предложена возможность экспериментального определения параметра СОВ Рашбы на основе определения магнитных полей, приводящих к исчезновению СО-щелей.

**В третьей главе** построена микроскопическая теория эффекта ориентации спинов носителей в квазиодномерной квантовой проволоке при пропускании через нее электрического тока. Показано, что необходимым условием возникновения эффекта является заполнение как минимум двух подзон размерного квантования и наличия межподзонного рассеяния.

Все основные результаты демонстрируют несомненную **научную новизну**. Результаты диссертационной работы являются достоверными, поскольку получены с применением к анализу квантоворазмерных систем с сильным СОВ оригинальных

подходов, не противоречащих известным в литературе результатам.

**Научные положения**, выносимые на защиту достаточно полно обоснованы.

**Практическая значимость** работы связана в первую очередь с тем, что в ней предложен новый подход к созданию спиновой ориентации носителей заряда за счет оптической фотонейтрализации магнитных ионов  $Mn^{2+}$  в квантовых ямах. Показано, что спектральные и транспортные свойства электронного газа в InAs-нанопроволоках с сильным СОВ Рашбы и Дрессельхауза существенным образом изменяются. Предложен новый подход к созданию спиновой ориентации током в квазиодномерных квантовых проволоках. Кроме того, работа представляет ценность с методологической точки зрения, поскольку в ней предлагаются оригинальные подходы к анализу квантоворазмерных систем с сильным СОВ.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Обосновывая актуальность исследований, необходимо было бы привести оценки ожидаемого эффекта спиновой поляризации электронов, поскольку доля таких электронов будет очень низка из-за низкого уровня легирования марганцем КЯ и малого количества ионизированных акцепторов из-за слабой компенсации донорами.
2. Критерий применимости приближения «объемного акцептора» обоснован не четко. Это сделано на стр. 20 диссертации. Там говорится, что размер волновой функции акцептора 1 нм остается меньше ширины КЯ. Приведу несколько характерных величин. Известно, что спиновая плотность для 3d электронов в Al<sub>0.5</sub>B<sub>0.5</sub>, измеренная в ДЭЯР экспериментах (J. Hage, J.R. Niklas, J-M. Spaeth. Z. Semicond. Sci. Technol. 4, 773 (1989); S.J. van Gisbergen, A.A. Ezhevskii, N.T. Son, T. Gregorkievich, C.A.J. Ammerlaan. Phys. Rev. B49, 10999 (1994)) имеет максимум на второй координационной сфере (~0.4 нм) и дальше быстро спадает. Зарядовая плотность вокруг примеси марганца, которая наблюдалась в СТМ экспериментах (A.M. Yakunin, A.Yu. Silov, P.M. Koenraad, J.H. Wolter, W. Van Roy, J. De Boeck, J.-M. Tang, M.E. Flatte, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 216806), простирается в радиусе не менее 3 нм, т.е. в квантовой яме  $w=10$  нм примесь марганца занимала бы большую часть пространства. Таким образом, можно

предположить, что волновая функция дырки, локализованной на марганце в КЯ, может быть достаточно сильно деформированной в направлении роста.

3. В разделе 1.5 рассматривается степень циркулярной поляризации люминесценции с учетом спиновой релаксации дырки, локализованной на марганце. Однако, рассматриваются лишь предельные случаи релаксации  $\tau=0$  и  $\tau=\infty$ . Можно было бы сделать оценки реальной скорости спиновой релаксации, поскольку все необходимые для этого параметры известны.
4. В последней главе, посвященной ориентации спинов током говорится, что в 1D-системах ориентация спинов током ранее не изучалась ни теоретически, ни экспериментально. Однако далее делается ссылка на работу [91], в которой показывается, что в 1D-системах такие эффекты просто отсутствуют.
5. В положении 3, выносимом на защиту не следовало указывать, что баллистический кондактанс является немонотонной функцией, т.к. это утверждение уже имеется в работе [53].
6. В целом работа написана четко и ясно, легко читается, но иногда встречаются опечатки и пропущенные запятые.

Представленные выше замечания **не снижают ценности и обоснованности** содержания диссертации. Работа в целом является логически законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне и заслуживает **положительной** оценки.

Результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях и докладывались на многих научных конференциях.

Содержание автореферата полностью отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа Кокурина Ивана Александровича является **оригинальным** исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК в соответствии с пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней. Автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

Доктор физико-математических наук, профессор,

профессор кафедры физики полупроводников  
и оптоэлектроники физического факультета ННГУ

А.А. Ежевский

тел. (831) 465-64-75

e-mail: ezhevski@phys.unn.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Телефон: (831) 462-30-08      Факс: (843) 462-31-06

Электронный адрес: <http://www.unn.ru/>

E-mail: [unn@unn.ru](mailto:unn@unn.ru)

Подпись

Ежевского А.А.

заверяю

Проректор

В.Б. Казанцев

Казанцев В.Б.

