

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Калитухо Инны Викторовны

«ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ

В ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ ФЕРРОМАГНЕТИК -

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КВАНТОВАЯ ЯМА»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.8 – физика

конденсированного состояния.

Рецензируемая диссертация посвящена изучению закономерностей взаимодействия спиновых систем ферромагнетика и полупроводника в гибридных гетероструктурах металл/полупроводниковая квантовая яма. Несмотря на то, что изучение взаимодействия спиновых систем в гибридных структурах ферромагнетик/полупроводник вот уже более 40 лет является предметом интенсивных исследований во всем мире, интерес к ним продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение взаимодействия спиновых систем ферромагнетиков и полупроводников позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для совершенствования уже имеющихся и создания новых типов приборов, для записи, хранения и чтения информации, использующих спиновые состояния носителей в качестве бита информации, а так же стимулирует развитие новых технологий. Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно, является **актуальной**, а поскольку, несмотря на прогресс в области создания гибридных гетероструктур металл/полупроводник механизмы, определяющие ферромагнитный эффект

близости в этих объектах, изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из **введения, пяти глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований. В **первой главе**, посвященной методическим вопросам проводимых исследований, приведена технология получения образцов, их структура, характеристики исследуемых образцов. Дано подробное описание методик, использовавшихся для характеристики параметров структур и определения состояния спиновой поляризации носителей заряда в ферромагнетиках и полупроводниках. Обсуждаются условия проведения экспериментов и обработки полученных результатов для определения параметров, определяющих взаимодействие спиновых систем ферромагнетика и носителей заряда в квантовой яме.

В оригинальной части диссертации, **Главы 2 - 5**, рассматриваются три основные задачи. **Первая** из них заключалась в изучении механизмов взаимодействия спиновых систем ферромагнетика и носителей заряда в полупроводниковой квантовой яме в гибридных гетероструктурах Co/CdMgTe/CdTe и Fe/CdMgTe/CdTe . Методами поляризационной стационарной и время разрешенной фотолюминесценции в магнитном поле продемонстрировано взаимодействие дырок в квантовой яме с ферромагнетиком. Автор, проанализировав различные механизмы, способные объяснить циркулярную поляризацию фотолюминесценции из квантовой ямы показывает, что экспериментальные данные свидетельствуют об эффективном дальнедействующем обменном взаимодействии между d -электронами ферромагнетика и тяжелыми дырками, локализованными на акцепторах в квантовой яме. В работе установлено, что дырки взаимодействуют не с магнитными ионами в пленках металлов, а с некоторыми интерфейсными ферромагнетиками, которые формируются на гетерогранице металл/ CdMgTe . В структурах Fe/CdMgTe/CdTe дополнительно к дальнедействующему эффекту p - d обменного взаимодействия, обнаружено короткодействующее s - d обменное

взаимодействие электронов в квантовой яме с d -электронами, локализованными на магнитных ионах в пленке железа, обусловленное перекрытием их волновых функций. **Вторая задача** диссертации заключалась в определении констант эффективного p - d обменного взаимодействия в исследуемых гибридных гетероструктурах методом комбинационного рассеяния света с переворотом спина. Измерение магнитополевой зависимости Рамановского сдвига для оптических переходов с участием локализованной на акцепторе дырки, позволило оценить эффективного магнитное поле ферромагнетика, влияющее на расщепление состояний дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме. Показано, что величина константы обменного взаимодействия с ростом толщины барьера между ферромагнетиком и квантовой ямой увеличивается вплоть до расстояний 30 нм и, следовательно, взаимодействие не связано с перекрытием волновых функций электронов в слое ферромагнетика с носителями заряда в квантовой яме. Автором установлено, что передача углового момента из ферромагнетика в квантовую яму осуществляется через эллиптически поляризованные фононы, которые возбуждаются в ферромагнетике, пересекают границу ферромагнетик-полупроводник и проникают вглубь полупроводника, где передают свой угловой момент тяжёлым дыркам, локализованным на акцепторах в квантовой яме. И, наконец, **третья из упомянутых задач**, заключалась в исследовании возможности контроля величины p - d обменного взаимодействия при приложении внешнего электрического поля. Для определения энергии обменного взаимодействия проводилось измерения магнитополевых зависимостей энергетических сдвигов Рамановских линий с переворотом спина локализованной на акцепторе дырки при различных напряжениях смещения. Было установлено, что эффективной силой обменного взаимодействия в гибридной системе можно управлять электрическим полем с напряжённостью порядка $10^4 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$. Сделан вывод о том, что изменение дальнедействующего p - d обменного взаимодействия происходит за счет изменения в электрическом поле энергии расщепления состояний тяжёлой и лёгкой дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны, инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы значительно расширяют существующие представления о механизмах ферромагнитного эффекта близости в гибридных системах ферромагнетик /полупроводник. По результатам проводимых исследований созданы предпосылки для разработки устройств записи, хранения и чтения информации, использующих спиновые состояния носителей, что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. Имеет место избыточная детализация при формулировании защищаемых положений. На мой взгляд, защищаемые положение № 2 и № 4 «о влиянии электрического поля на величину $p-d$ обменного взаимодействия» можно было бы объединить в одно защищаемое положение.
2. В работе много раз подчеркивается, что максимальное значение дальнедействующего $p-d$ обменного взаимодействия в системе интерфейсный ферромагнетик – квантовая яма при приложении внешнего электрического поля наблюдается в конфигурации плоских зон. Между тем, в рамках предложенной модели $p-d$ обменного взаимодействия, его величина определяется соотношением между энергией эллиптически поляризованных фононов и расщеплением уровней лёгких и тяжёлых дырок. Тот факт, что в изучаемых системах это соотношение приводит к максимальному значению обменного взаимодействия в конфигурации плоских зон, не более чем игра параметров. Было бы уместно отметить, что в других гибридных структурах максимальное значение обменного взаимодействия может реализоваться при не нулевом изгибе энергетических зон полупроводника.

3. В целом, текст диссертации и автореферата написан ясным языком. Рисунки, в основном, хорошо оформлены, однако, местами встречаются досадные неувязки. Так, например, на рисунке 2.7 на одной и той же оси ординат отложены значения для двух функций с разными размерностями, а на рисунке 2.16 было бы разумнее нормировать ось ординат от -1 до $+1$.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация И.В. Калитухо представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для понимания механизмов, ответственных за появление ферромагнитного эффекта близости в гибридных системах ферромагнетик/полупроводник. **Достоверность и обоснованность результатов** определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях. Название и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности. Автореферат **правильно передает содержание диссертации**. Считаю, что диссертационная работа И.В. Калитухо «Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик-полупроводниковая квантовая яма» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор, И.В. Калитухо, безусловно, **заслуживает присуждения** ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

д.ф.-м.н.,

доцент по специальности физика полупроводников

_____ Тимур Сезгирович Шамирзаев

« 23 » марта 2022 г.

01.04.10 – физика полупроводников

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН
Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.

_____ С.А. Аржанникова