

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 28.04.2022 № _____

О присуждении Калитухо Инне Викторовне
гражданке Республики Беларусь,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик-полупроводниковая квантовая яма» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 24 февраля 2022 г., протокол №2, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 15 от 19.01.2021 г. и № 13 от 21.01.2022 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Калитухо Инна Викторовна, 1993 г.р., в 2016 году окончила магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» по специальности «Электроника и наноэлектроника». Экзамены по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «физика конденсированного состояния» успешно сданы соискателем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2018 г. В настоящее время

соискатель работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника (по совместительству) в лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Сапега Виктор Федорович, д.ф.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Рожанский Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

2. Шамирзаев Тимур Сезгирович, доктор физико-математических наук, доцент по специальности физика полупроводников, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии соединений АЗВ5 ФГБУН “Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова” СО РАН г. Новосибирск, Россия, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания.

Ведущая организация Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» предоставила положительное заключение на диссертацию, содержащее 6 замечаний. Заключение подготовлено доктором физико-математических наук, доцентом кафедры физики полупроводников и криоэлектроники

физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова Манцевичем Владимиром Николаевичем и доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова Снигиревым Олегом Васильевичем. В заключении указано, что содержание диссертации Калитухо И. В. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», а соискатель Калитухо И. В. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что МГУ им. М. В. Ломоносова ведет активные исследования в различных областях физики конденсированного состояния, в частности в области оптических и спиновых явлений в магнитных и полупроводниковых гетероструктурах. Кафедра физики полупроводников и криоэлектроники специализируется на экспериментальных, в том числе спектроскопических, и теоретических исследованиях целого ряда явлений в твердом теле, связанных с воздействием оптического излучения и кинетическими электронными и спиновыми процессами. В МГУ им. М. В. Ломоносова работает диссертационный совет МГУ.01.01 по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации представлено в 5 научных статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. Korenev V. L., Salewski M., Akimov I. A., Sapega V. F., Langer L., Kalitukha I. V., Debus J., Dzhioev R. I., Yakovlev D. R., Müller D., Schröder C., Hövel H., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Kusrayev Yu. G., Bayer M. Long-range p-d exchange interaction in a ferromagnet-semiconductor hybrid structure // *Nature Physics*.—2016.— Т. 12.—P. 85.
2. Akimov I. A., Salewski M., Kalitukha I. V., Poltavtsev S. V., Debus J., Kudlacik D., Sapega V. F., Kopteva N. E., Kirstein E., Zhukov E. A., Yakovlev D. R., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Korenev V. L., Kusrayev Yu. G., Bayer M. Direct measurement of the long-range p-d exchange coupling in a ferromagnet-semiconductor Co/CdMgTe/CdTe quantum well hybrid structure // *Physical Review B*.—2017.— Т. 96.—P. 184412.
3. Kalitukha I. V., Salewski M., Akimov I. A., Korenev V. L., Sapega V. F., Yakovlev D. R., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Kusrayev Yu. G., Bayer M. Interfacial ferromagnetism in a Co/CdTe ferromagnet/semiconductor quantum well hybrid structure // *Physics of the Solid State*.— 2018.— Т. 60, no. 8.— P. 1578–1581.
4. Korenev V. L., Kalitukha I. V., Akimov I. A., Sapega V. F., Zhukov E. A., Kirstein E., Ken O. S., Kudlacik D., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Ilyinskaya N. D., Lebedeva N. M., Komissarova T. A., Kusrayev Yu. G., Yakovlev D. R., Bayer M. Low voltage control of exchange coupling in a ferromagnet-semiconductor quantum well hybrid structure // *Nature Communications*.— 2019.— Т. 10.— P. 2899.
5. Kalitukha I. V., Ken O. S., Korenev V. L., Akimov I. A., Sapega V. F., Yakovlev D. R., Dimitriev G. S., Langer L., Karczewski G., Chusnutdinov S., Wojtowicz T., Bayer M. Coexistence of short- and long-range ferromagnetic proximity effects in a Fe/(Cd,Mg)Te/CdTe quantum well hybrid structure // *Nano Letters*.— 2021.— Т. 21, no. 6.— P. 2370-2375.

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв д.ф.-м.н. Аверкиева Никиты Сергеевича, профессора, заведующего сектором теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, положительный, замечаний не содержит.

2. Отзыв д.ф.-м.н. Вербина Сергея Юрьевича, профессора кафедры физики твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета, положительный, замечаний не содержит.
3. Отзыв д.ф.-м.н. Дорохина Михаила Владимировича, заведующего лабораторией Научно-исследовательского физико-технического института ФГАОУВО Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, положительный, содержит 1 замечание, касающееся небольшого количества опечаток и неточностей, присутствующих в автореферате.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по экспериментальному изучению взаимодействия спиновых систем ферромагнетика и полупроводника в гибридной структуре, состоящей из пленки металлического ферромагнетика (Co или Fe) и квантовой ямы CdTe, разделённых тонким немагнитным барьером CdMgTe, были получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально обнаружен дальнедействующий эффект близости в структуре Co/CdMgTe/CdTe-квантовая яма и определен характерный для него пространственный масштаб,
2. Установлено, что механизмом ферромагнитного эффекта близости в структуре Co/CdMgTe/CdTe-квантовая яма является дальнедействующее эффективное p - d обменное взаимодействие d -электронов интерфейсного ферромагнетика и дырок (p -система), локализованных на акцепторах в квантовой яме. Предложено, что данное взаимодействие основано на фононном динамическом эффекте Штарка, т.е. возникновении эффективного магнитного поля при распространении эллиптически поляризованных фононов из ферромагнетика в квантовую яму, снимающего крамерсово вырождение дублета дырок.
3. Предложен и продемонстрирован способ управления эффективным p - d обменным взаимодействием в структуре Co/CdMgTe/CdTe-квантовая яма статическим электрическим полем.
4. В структуре Fe/CdMgTe/CdTe-квантовая яма экспериментально обнаружено сосуществование короткодействующего и дальнедействующего ферромагнитных эффектов близости.

5. Показано, что короткодействующий эффект близости в структуре Fe/CdMgTe/CdTe-квантовая яма обусловлен s - d обменным взаимодействием s -электронов в квантовой яме и d -электронов плёнки железа, связанным с перекрытием их волновых функций.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную значимость для более глубокого понимания возникновения и взаимодействия спин-поляризованных носителей в гетероструктурах на основе полупроводников и ферромагнитных материалов. Полученные результаты по наблюдению, установлению механизмов и управлению дальнедействующим и короткодействующим обменным взаимодействиями между носителями в полупроводниковых квантовых ямах и ферромагнитными пленками открывают путь к поиску и изучению целого класса систем на основе магнитных материалов и полупроводниковых гетероструктур, в которых такие явления могут наблюдаться и могут демонстрировать значительные величины. Несомненную практическую значимость представляет демонстрация дальнедействующего обменного взаимодействия в структурах на основе полупроводник - ферромагнетик, открывающая новые возможности для интеграции магнитных материалов в устройства полупроводниковой электроники и спинтроники.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Природа ферромагнитного эффекта близости в структуре Co/CdMgTe/CdTe заключается в дальнедействующем эффективном p - d обменном взаимодействии d -электронов интерфейсного ферромагнетика и дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме. Характерный масштаб этого взаимодействия существенно превышает масштаб перекрытия волновых функций носителей.
2. Статическое электрическое поле влияет на эффективное p - d обменное взаимодействие в структуре Co/CdMgTe/CdTe. Константа Δ_{pd} обменного взаимодействия, напрямую измеренная методом неупругого рассеяния света с переворотом спина, уменьшается со значения 140

мкэВ в режиме плоских зон до 11 мкэВ при приложении обратного смещения.

3. В основе дальнедействующего эффективного p - d обменного взаимодействия лежит фононный динамический эффект Штарка. Этот эффект заключается в распространении из ферромагнетика в квантовую яму эллиптически поляризованных фононов, создающих эффективное магнитное поле, которое снимает крамерсово вырождение дублета $\pm 3/2$ дырок, локализованных на акцепторах.
4. Электрическое поле, приложенное к структуре Co/CdMgTe/CdTe, влияет на константу Δ_{pd} обменного взаимодействия за счёт изменения энергии расщепления состояний акцепторов с моментами $3/2$ и $1/2$ в квантовой яме посредством статического эффекта Штарка. Величина обменной константы Δ_{pd} зависит от отстройки энергии эллиптически поляризованных фононов от энергии расщепления акцепторов с моментами $3/2$ и $1/2$.
5. В структуре Fe/CdMgTe/CdTe сосуществуют короткодействующий и дальнедействующий ферромагнитные эффекты близости. Короткодействующий эффект близости обусловлен s - d обменным взаимодействием электронов в квантовой яме с d -электронами пленки железа на масштабе перекрытия их волновых функций. Дальнедействующий эффект близости обусловлен взаимодействием d -электронов интерфейсного ферромагнетика на границе Fe/CdMgTe и тяжёлых дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме, на масштабе существенно превышающем масштаб перекрытия их волновых функций.

Достоверность представленных в диссертации результатов и обоснованность положений подтверждена применением современных экспериментальных методов исследования, таких как спектроскопия поляризованной фотолюминесценции в стационарном режиме и с временным разрешением, неупругое рассеяние света с переворотом спина, магнитооптический эффект Керра в режиме накачка-зондирование, воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов, а также системностью проводимых исследований. Полученные результаты

прошли апробацию более чем на 15 международных и российских конференциях, опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах по физике конденсированного состояния.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что подробно указано в тексте автореферата.

Диссертация Калитухо И. В. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие такого актуального направления современной физики конденсированного состояния, как спинтроника.

На заседании 28 апреля 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Калитухо И. В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 15 докторов по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель Председателя
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Соколов Игорь Александрович

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Калашникова Александра Михайловна

28 апреля 2022 г.