

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной работе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт Петербургский государственный
университет»
199034, г. Санкт-Петербург,
Университетская наб., д. 7/9

С.В. Микушев

« 20 » Января 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
на диссертационную работу
АНИСИМОВА АНДРЕЯ НИКОЛАЕВИЧА
«Магнито-оптическая резонансная спектроскопия и микроскопия спиновых
центров окраски в карбиде кремния, перспективных для создания квантовых
сенсоров магнитного поля и температуры»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного
состояния.

Диссертационная работа А.Н. Анисимова посвящена экспериментальному исследованию спиновых центров окраски в карбиде кремния, способных обнаруживать эффект оптического выстраивания населенностей спиновых уровней в широком диапазоне температур. Интерес к данной области физики конденсированного состояния сегодня обусловлен, во-первых, перспективностью создания на основе спиновых центров различного рода квантовых сенсоров, во-вторых, потенциальной возможностью использования данной твердотельной системы в качестве базового элемента квантового компьютера, что подтверждает несомненную актуальность диссертационной работы А.Н.Анисимова для науки и практических приложений.

Структура диссертация А.Н. Анисимова полностью соответствует рекомендациям ВАК. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и

библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, включая 50 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов работы, даны сведения об апробации работы. В первой главе диссертации выполнен обзор литературы, в котором подробно изложены существующие модели центров окраски в карбиде кремния, их энергетической и спиновой структуры. Во второй главе описана технология изготовления образцов для исследований и экспериментальная техника. Исследования проводились на кристаллах карбида кремния гексагональных и ромбических политипов (4H, 6H, 15R), в которых с помощью облучения ионизирующим излучением создавались спиновые центры окраски. Автор приводит детальное описание технологии выращивания кристаллов и описывает условия, необходимые для создания спиновых центров. Для проведения исследований Анисимов А.Н. разработал и изготовил сканирующий спектрометр магнитного резонанса на основе комбинации конфокального и атомно-силового микроскопов. Во второй главе диссертации описано его устройство. Новизна конструкции данного спектрометра и методик его работы подтверждается наличием у Анисимова А.Н. патентов, как на устройство, так и на способ.

Полученным научным результатам посвящены главы 3 – 5. В третьей главе Анисимовым А.Н. приводятся результаты исследований спиновых центров окраски в SiC методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Их спиновая структура изучена с помощью резонансного воздействия радиочастотного излучения в широком интервале температур, включая комнатные. Чувствительность, заявленная автором, позволяет регистрировать 10^4 - 10^5 спинов. В этой главе также описан обнаруженный эффект "выжигания узких провалов" в неоднородно уширенных линиях ОДМР спиновых центров окраски. Этот эффект демонстрирует возможности использования спиновых пакетов изучаемых спиновых центров для реализации квантовых алгоритмов обработки информации.

Экспериментальные исследования антипересечения зеemanовских спиновых уровней, описанные в четвертой главе, для основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния дополняют исследования методом ОДМР, приведенные в третьей главе. Далее описаны исследования эффектов кросс-релаксации по оптическому каналу между спиновыми уровнями центров окраски со спином $3/2$ и центрами окраски в триплетном спиновом состоянии с температурно-зависимым расщеплением тонкой структуры. Стоит отметить, что описанные исследования могут стать основой для создания полностью оптических квантовых сенсоров магнитных полей и температур, что указывает на

перспективность практического применения результатов диссертационного исследования. Физические принципы действия таких сенсоров описаны в пятой главе диссертации.

Достоверность результатов, полученных в диссертации А.Н. Анисимова, подтверждается, их согласованностью с результатами, полученными с помощью других методов и другими научными группами. Описанные в диссертации исследования были опубликованы в реферируемых научных журналах и были представлены на российских и международных конференциях.

Научная и практическая значимость диссертации обусловлена возможностью использования спиновых центров окраски в качестве элементной базы для квантовых вычислений. Малое спин-орбитальное взаимодействие изучаемой системы, по сравнению с полупроводниками типа GaAs, обеспечивает большое время жизни спина даже при комнатных температурах, что может быть использовано для осуществления квантовых алгоритмов и когерентного взаимодействия между кубитами.

Результаты работы можно рекомендовать для использования в научных и учебных организациях, в которых ведутся исследования по аналогичным научным направлениям: в Санкт-Петербургском государственном университете, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Казанском Физико-техническом институте им. Е.К. Завойского, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Российском квантовом центре, Московском Физико-техническом Институте, а также в других вузах и научно-исследовательских институтах.

По диссертации имеются следующие замечания и вопросы:

1. Собранный автором макет сканирующего спектрометра магнитного резонанса базируется на спектрометре фирмы НТ-МДТ СИ. Представляется уместным уточнить какая именно часть спектрометра изготовлена автором.
2. В диссертации широко используется термин «выстраивание», однако нигде не приведено строгое определение этого понятия.
3. В четвертой главе приведены результаты, показывающие наличие сверхтонких взаимодействий (СТВ) с ядерными спинами ^{29}Si и говорится о поляризации ядер вблизи области антипересечения уровней. При этом не поясняется, что именно приводит к ядерной поляризации.

4. В главе 4 говорится о сильной температурной зависимости расщепления спиновых подуровней центров окраски в возбужденном состоянии. Утверждается, что это связано с большим радиусом возбужденного состояния. Есть ли теоретические оценки радиуса возбужденного состояния? Насколько сильно сдвигается с температурой полоса фотолюминесценции?

5. Защищаемые положения написаны не очень четко. В частности, в положении 1 говорится, что «спиновые центры окраски в гексагональных и ромбических поли типах карбида кремния (4Н, 6Н, 15R) обладают люминесценцией в ближней ИК области спектра». Этот факт, однако, не является оригинальным результатом данной работы. В положении 2 говорится, что «воздействие резонансного радиочастотного излучения приводит к сильному изменению интенсивности фотолюминесценции спиновых центров окраски». Этот факт, как нам представляется, хорошо известен и лежит в основе метода ОДМР.

6. Ряд замечаний касается оформления работы. В частности, неудачное форматирование таблицы 5 на странице 23 сильно затрудняет восприятие значений энергии и длины волны оптических переходов. Подписи к рисункам 3.6 и 3.8 перенесены на отдельную страницу. Имеются также опечатки и пропуски знаков препинания. Описание экспериментальной установки в автореферате (стр. 10) представляется неясным.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне с использованием самых современных экспериментальных методов и необходимых теоретических расчетов и представляет собой законченное исследование, которое вносит существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния и ОДМР спектроскопию полупроводниковых кристаллов и наноструктур.

Основные положения диссертации А.Н. Анисимова, выносимые на защиту, обладают безусловной научной новизной, а сама работа выполнена на высоком научном уровне. Ее результаты полностью и своевременно опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, рецензируемая диссертационная работа Анисимова А.Н. «Магнито-оптическая резонансная спектроскопия и микроскопия спиновых центров окраски в карбиде кремния, перспективных для создания квантовых сенсоров магнитного поля и температуры» является завершенным научным исследованием, соответствует профилю Совета Д 002.205.01 (специальность

01.04.07 – физика конденсированного состояния), полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе, требованиям пунктов 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации, Анисимов Андрей Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа А.Н. Анисимова заслушана и обсуждена на совместном научном семинаре кафедры Физики твердого тела физического факультета и лаборатории Оптики спина им. И. Н. Уральцева Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 27 ноября 2018.

Адрес организации: Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9 Тел.: 324-12-58. Электронная почта: s.mikushev@spbu.ru. Веб-сайт: <http://spbu.ru/>

Отзыв подготовил:

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории Оптики спина,

доктор физико-математических наук, _____

В. С. Запасский/

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт Петербургский государственный университет»

198504. Санкт-Петербург, Петродворец

Ул. Ульяновская, д.1.

Тел. +7(921)5795751

e-mail: vzap@rambler.ru

Подпись В. С. Запасского удостоверяю:



Запасский В.С.
Лаборатория Оптики спина

«30» *ноября* _____ 2019 года