

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Голубка Александра Олеговича

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.

Карбид кремния - широкозонный полупроводник, имеющий большое число политипов. Этот материал уже многие годы привлекает внимание исследователей и находит широкое применение в различных областях науки и техники, благодаря уникальным электронным, оптическим и тепловым свойствам. В настоящее время особое внимание исследователей приковано к созданию и изучению спиновых центров окраски в карбиде кремния. Диссертационная работа А.Н. Анисимова посвящена экспериментальному исследованию спиновых центров окраски в карбиде кремния с оптическим выстраиванием населенностей спиновых уровней в широком диапазоне температур. Актуальность и практическая значимость работы в первую очередь связаны с активным поиском элементной базы для квантовых компьютеров, функционирующих при комнатной температуре. Кроме того, спиновые центры в карбиде кремния могут стать чувствительными элементами новых типов квантовых магнитометров и оптических датчиков температуры, при этом, благодаря наноразмерам, спиновые центры обеспечивают высокую локальность измерений, что открывает новое направление в сканирующей зондовой микроскопии, являющейся одним из базовых методов современной нанодиагностики материалов.

Диссертация А.Н.Анисимова имеет структуру, соответствующую 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 значимость результатов работы, даны сведения об апробации работы.

В первой главе диссертации выполнен обзор литературы, в котором описаны существующие модели центров окраски в карбиде кремния, приведены данные об их энергетической и спиновой структуре.

Во второй главе описана техника эксперимента и технология выращивания кристаллов. Автор исследовал кристаллы карбида кремния гексагональных и ромбических политипов (4H, 6H, 15R), в которые с помощью облучения ионизирующим излучением вводились спиновые центры окраски. В данной главе описан разработанный А.Н. Анисимовым сканирующий спектрометр магнитного резонанса на основе промышленного конфокального и атомно-силового микроскопов. Новизна экспериментального подхода подтверждается наличием у автора патентов как на устройство, так и на способ измерения.

В третьей главе приводятся результаты исследований методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) спиновых центров окраски в SiC. Резонансное воздействие радиочастотным излучением на спиновые центры осуществлялось в широком интервале температур, включая комнатные. Важным результатом является обнаружение эффекта "выжигания узких провалов" в неоднородно уширенных линиях ОДМР спиновых центров окраски. Этот эффект демонстрирует возможность создания отдельных изолированных кудитов на спиновых пакетах спиновых центров для дальнейшего использования в квантовых вычислениях.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования антипересечения зеемановских спиновых уровней для основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния, а также описан эффект кросс-релаксации с центрами окраски в триплетном спиновом состоянии. Температурно-зависимое расщепление тонкой структуры триплетного центра может быть использовано при

создании оптических датчиков температуры. Стоит отметить, что исследования антипересечения зеemanовских спиновых уровней отлично дополняют и согласуются с исследованиями ОДМР.

В пятой главе диссертации автор, опираясь на результаты, полученные в предыдущих главах, описывает принципы измерения магнитного поля и температуры с помощью квантовых датчиков на спиновых центрах. Особый интерес, на наш взгляд, представляет эксперимент с наночастицами SiC, выполненный в результате совмещения АСМ с конфокальным микроскопом и продемонстрировавший возможность создания наносенсора на спиновых центрах. Создание таких наносенсоров открывает новое направление в сканирующей зондовой микроскопии нанообъектов различной природы.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе. Наиболее важными среди них, на наш взгляд, являются следующие результаты:

1. проанализированы спиновые свойства центры окраски в гексагональных и ромбических поли типах карбида кремния при высоких температурах, включая комнатные и выше;

2. установлено, что на спиновых центрах окраски в широком диапазоне температур, включая комнатные и выше, возможно оптически детектировать магнитный резонанс (ОДМР) с высокой чувствительностью, вплоть до регистрации счетного количества спинов, а также наблюдать "выжигание провалов" за счет выбора спинового пакета;

3. установлена возможность регистрации антипересечения спиновых уровней основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в SiC;

4. разработаны устройства оптических квантовых сенсоров на спиновых центрах в SiC и предложены методики измерения температуры и магнитного поля с субмикронным пространственным разрешением.

Достоверность результатов, во-первых, обусловлена тщательно выполненными экспериментальными исследованиями целого семейства спиновых центров окраски в карбиде кремния, во-вторых, подтверждается их согласованностью с результатами, которые были получены другими научными группами. Описанные в диссертации

исследования опубликованы в 13 статьях в реферируемых научных журналах, в том числе журналах первого квартиля, таких как Physical Review X и Scientific Reports и апробированы на многочисленных российских и международных конференциях по физике конденсированного состояния.

По диссертации имеются вопросы и замечания.

1. На стр. 30-31 сообщается, что нанокристаллы со спиновыми центрами получались после облучения бездефектного SiC электронным пучком и последующего измельчения. Вместе с тем, на стр. 38 и 100 говорится, что массив спиновых центров окраски вводился в наноразмерный кристалл SiC, закрепленный на острие зонда, а на стр. 103 сказано, что для создания центров окраски использовались также пучки протонов и нейтронов. Хотелось бы уточнить методику приготовления образцов.

2. Для измерения локальной температуры образца по изменению сигнала фотолюминесценции возбуждающий фотолюминесценцию лазерный пучок фокусируется в объёме $\sim 1 \text{ мкм}^3$. Не будет ли возбуждающий оптический пучок нагревать образец?

3. Имеются замечания к оформлению диссертации. Отсутствует нумерация формул. Подписи к рисункам 1.2, 3.6, 3.8 частично или полностью перенесены на отдельную от рисунка страницу. На рис.2.4 (стр.34) на схеме ОДМР спектрометра нет поясняющих подписей. Необходимые пояснения даются только в тексте диссертации, что затрудняет знакомство с достаточно сложным материалом.

4. В тексте диссертации встречаются опечатки, неточности, стилистические погрешности. Например, АСМ зонд на рис. 2.8 (стр. 40) обозначается как САМ зонд, на рис.2.5 (стр.35) на схеме эксперимента по регистрации АПУ не указан канал опорного сигнала синхродетектора и перепутано направление выходного сигнала, на стр.45 читаем, что “эффективное разрешение значительно увеличивается в десять раз”, а на стр. 75 сказано, что “радиус электронов в возбужденном состоянии сильно больше, чем в основном”. Весьма странно выглядит подпись к рис. 5.11 на стр.98, погрешности в тексте встречаются также на стр. 56, 59, 60, 62, 63, 66, 68, 87,100.

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 законченным 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.

Официальный оппонент

зам. директора по научной работе,
зав. Отделом приборов и методов нанотехнологий,
д.ф-м.н., с.н.с.



А.О. Голубок

«11» февраля 2019 года