

Отзыв официального оппонента
Власова Игоря Ивановича
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.

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям квантовых систем и структур на основе широкозонных полупроводников. Такого рода исследования направлены как на создание квантовых датчиков, так и на создание элементной базы для квантовой информатики, за которой будущее наноэлектроники.

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. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения возможности практического применения полученных результатов. Достоверность результатов впервых 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 были опубликованы в 13 статьях реферируемых научных журналах, в том числе в высокорейтинговых журналах: *PhysicalReview X* и *ScientificReports*. Результаты работ были представлены на большом количестве российских и международных конференциях по физике конденсированного состояния, что также подтверждает интерес к теме диссертационного исследования со стороны научного сообщества.

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 выполнен обзор литературы, в котором описаны существующие модели центров окраски в карбиде кремния.

Во второй главе описана технология приготовления образцов для исследований и техника эксперимента. Техника эксперимента содержит описание разработанного сканирующего спектрометра магнитного резонанса.

В третьей главе Анисимовым А.Н. приводятся результаты исследований методом ОДМР центров окраски в SiC. Стоит отметить что резонансное воздействие радиочастотного излучение влияет на эти центры в широком интервале температур, включая комнатные. В данной главе также описан обнаруженный автором эффект "выжигания провалов" в неоднородно уширенных линиях ОДМР спиновых центров окраски карбида кремния. Этот эффект демонстрирует возможность использования пакетов спиновых центров в магнитометрии.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования антипересечения зеемановских спиновых уровней, для основного и возбужденного состояний центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде. Описан обнаруженный автором эффект кросс-релаксации с центрами окраски в триплетном спиновом состоянии центров окраски со спином $S=3/2$ в карбиде кремния.

В пятой главе диссертации описаны принципы магнитометрии и термометрии с использованием экспериментальных исследований четвертой и третьей глав. Стоит отметить работы, направленные на создание наноразмерных сенсоров с использованием АСМ, совмещенного с конфокальным микроскопом. Такого рода сенсоры позволят увеличить возможности АСМ по исследованию физики поверхности.

В заключении диссертационной работы приведены результаты и выводы.

Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Анализ спиновых свойств центров окраски в гексагональных и ромбических поли типах карбида кремния при высоких температурах, включая комнатные и выше.

2. Оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР) на спиновых центрах окраски в широком диапазоне температур, включая

комнатные и выше, с высокой чувствительностью, вплоть до регистрации счетного количества спинов, а также "выжигание провалов" за счет выбора спинового пакета.

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

4. Разработка оптических квантовых сенсоров температуры и магнитного поля с субмикронным пространственным разрешением.

Основным недостатком диссертационной работы является «слабость» литературного обзора (глава 1):

- Объем литературного обзора в 10 страниц и количество цитируемой литературы (74) на мой взгляд не вполне достаточны для того, чтобы читатель получил представление о современном уровне исследований по теме диссертационной работы.

- отсутствует анализ опубликованных в мире научных работ по исследованию спиновых центров окраски в SiC и других материалах методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), из которого должна вытекать актуальность задач, поставленных в настоящей диссертационной работе.

- в пунктах 1.1.4. и 1.2 диссертации дана информация о структуре и оптических свойствах вакансионных центров в карбиде кремния без единой ссылки на литературные источники.

Имеется также ряд замечаний к оформлению работы. В названии диссертации пропущена запятая после слова "кремния". Форматирование таблицы 1 (стр. 44) по колонкам не одинаковое. Подписи к рисункам 1.2, 3.6, 3.8 частично или полностью перенесены на отдельную от рисунка страницу. Имеются также опечатки и пропуски знаков препинания.

Сделанные замечания 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.

Официальный оппонент, заведующий
лабораторией углеродной нанофотоники
ФГБУН Институт общей физики им.
А.М.Прохорова Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук,
Тел.: +7(499)95038789
e-mail.: vlasov@nsc.gpi.ru
Почтовый адрес: 119991 г.Москва,
Ул.Вавилова д.38, корп.5

/ И. И. Власов/

«11» февраля 2019 года