

ОТЗЫВ

официального оппонента Власенко Леонида Сергеевича на диссертационную работу Бреева Ильи Дмитриевича «Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

В диссертационной работе Бреева Ильи Дмитриевича представлены результаты исследований влияния механических напряжений, возникающих на границе раздела в гетероструктурах AlN/SiC, на оптические и спиновые свойства вакансионных центров в гексагональных политипах карбида кремния. Отличительной особенностью диссертационной работы является комплексный подход к исследованиям с использованием различных экспериментальных методов, таких, как оптическая спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), спектроскопия магнитного резонанса, включая электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и методы оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР). Применение оптических методов позволило детально исследовать распределение механических напряжений и деформаций в карбиде кремния создаваемых слоем нитрида алюминия на различных расстояниях от границы раздела. Эти данные были использованы для интерпретации и анализа новых явлений, обнаруженных методами ОДМР и связанных со спиновым состоянием вакансионных парамагнитных центров в SiC.

Важным и актуальным является выбор объектов исследования. Карбид кремния, являясь широкозонным полупроводниковым материалом с высокой термической стабильностью, находит применение в электронике для производства приборов, работающих в условиях повышенных температур, таких, как приборы силовой электроники, электрические переключатели высоких напряжений, светоизлучающие приборы. Благодаря развитой технологии выращивания монокристаллических подложек расширяется область его применения для создания гетеропереходов с другими широкозонными материалами, такими, например, как GaN и AlN.

Актуальным является изучение свойств точечных дефектов в SiC, таких, как кремниевые и углеродные вакансии и их комплексы, атомы легирующих примесей и атомы переходных металлов, которые влияют на оптические и магнитные свойства этого материала. В настоящее время точечные дефекты в SiC рассматриваются как перспективные кандидаты на роль кубитов в устройствах квантовой информатики, а для исследования их спиновых свойств используется спектроскопия магнитного резонанса.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что тема диссертационной работы Бреева Ильи Дмитриевича «Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе» является **актуальной**.

Диссертация Бреева И. Д. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, их цель и задачи. Обосновывается также их научная и практическая и значимость, формулируются основные результаты, выносимые на защиту и их достоверность.

В **Первой главе** дан обзор литературы, где проведен детальный анализ литературных данных по структуре и свойствам исследованных в диссертации материалов и методов их выращивания. Достаточно полно представлен обзор микроструктуры, оптических и спиновых характеристик кремниевых (V_{Si}) и углеродных (V_C) вакансий в политипах 4H-SiC и 6H-SiC и описаны методы экспериментов использованных в диссертационной работе для их исследования.

Во **Второй главе** изложены результаты исследований механических напряжений в гетероструктурах AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC. Использование методов комбинационного рассеяния света и конфокальной микроскопии позволило впервые получить данные о распределении механических напряжений и деформаций в карбиде кремния с субмикронным пространственным разрешением от границы гетероперехода до сотен микрометров. Эти данные были использованы в последующих главах для анализа и интерпретации результатов по исследованию спиновых свойств вакансионных центров в SiC.

Третья глава посвящена исследованиям влияния механических напряжений на спектры ОДМР кремниевых вакансий в структурах AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC. Здесь следует отметить, что впервые были обнаружены эффекты смещения линий магнитного резонанса и линий антипересечения магнитных подуровней V_{Si} центров в основном и возбужденном состояниях при приближении к интерфейсу. Показано, что эти эффекты связаны с влиянием механических деформаций на параметры тонкой структуры спектров ОДМР.

В **Четвертой главе** изложены результаты оптических исследований 6H-SiC, содержащих V_{Si} центры. Исследованы поляризационные зависимости спектров ФЛ и ОДМР при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. На основе результатов экспериментальных исследований делается вывод об инвертированной структуре возбужденного состояния V_{Si} центров.

В **Пятой главе** приведены результаты исследования обнаруженного эффекта изменения знака и положения линий ОДМР и линий антипересечения уровней V_{Si} центров в 6H-SiC при изменении температуры и дано объяснение этих эффектов. Методами импульсного ОДМР проведены измерения времен спиновой релаксации V_{Si} центров.

В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Научная новизна полученных результатов не вызывает сомнений. В диссертационной работе впервые проведены исследования влияния механических напряжений на оптические и спиновые свойства вакансионных центров в карбиде кремния, расположенных на различных расстояниях от границы гетеропереходов AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC. Определены значения механических напряжений и деформаций на

границе гетеропереходов. Обнаружены новые эффекты смещения линий ОДМР и линий антикроссинга спиновых подуровней кремниевых вакансий и определены параметры расщепления тонкой структуры в основном и возбужденном состояниях как при влиянии механических напряжений, так и при изменении температуры. Получены новые данные о микроструктуре и симметрии исследованных парамагнитных центров.

Научная и практическая ценность полученных в диссертационной работе результатов заключается в новой научной информации о свойствах гетеропереходов AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC, о характеристиках исследованных парамагнитных центров, которая, несомненно, будет использована в дальнейших прикладных научных исследованиях, а также для усовершенствования технологии получения гетероструктур на основе карбида кремния. Кроме того, информация о свойствах вакансионных центров окраски в SiC будет использована при разработке материалов и приборов квантовой оптики и информатики, датчиков механических напряжений.

Достоверность и обоснованность результатов работы, выводов и защищаемых положений подтверждается:

- использованием современного комплекса экспериментальных методик, позволяющего проводить корреляцию между результатами, полученными с помощью разных методов;
- воспроизводимостью параметров исследованных материалов и результатов экспериментов;
- сравнением полученных результатов с результатами других работ, в той части, где это возможно;
- соответствием полученных результатов теоретическим моделям наблюдаемых явлений.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В разделе 1.3.5 «Спектроскопия анти-пересечения уровней» на стр. 40 отмечено, «Однако согласно принципам квантовой механики, при наличии слабого возбуждения эти уровни не пересекаются, а дополнительно расщепляются пропорционально *величине возбуждения*». Обычно линии анти-пересечения уровней (АПУ) расщепляются при отклонении направления магнитного поля от оси симметрии дефектов. О каком *возбуждении* идет речь?
2. Параграф 2.3.3 «Переход от механических напряжений к деформации в 4H-SiC» на стр.60 в формулах (2.6), видимо, должны быть знаки (+) $\sigma_{xx}=C11\varepsilon_{xx}+C12\varepsilon_{yy}+C13\varepsilon_{zz}$, вместо $\sigma_{xx}=C11\varepsilon_{xx}C12\varepsilon_{yy}C13\varepsilon_{zz}$, и т.д.
3. При изложении результатов по исследованиям спектров ОДМР V_{Si} центров в главе 3 (рисунки 3.3 и 3.8) следовало бы специально отметить, что спектры наблюдались в нулевом магнитном поле и пояснить, с чем связан разный знак линий $V1/V3$ и $V2$.
4. В чем причина разной ширины линий антипересечения уровней АПУ1 и АПУ2 (на рисунках 3.4 и 3.5) для основного и возбужденного состояний V_{Si} центров?
5. Проводился ли анализ возможности сдвига линий антикроссинга уровней из-за

влияния механических напряжений на величину g-фактора V_{Si} центров?

Указанные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не снижают положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

Заключение. Считаю, что диссертационная работа Бреева Ильи Дмитриевича «Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе» удовлетворяет 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-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор, Бреев Илья Дмитриевич, безусловно, **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник
лаборатории Спиновых и оптических
явлений в полупроводниках
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

«8» декабря 2022 г.

Власенко Леонид Сергеевич

Контактные данные:
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
Тел.: +7 (812) 292-73-42
e-mail: Leovlas@solid.ioffe.ru

Подпись Власенко Л. С. удостоверяю,
Ученый секретарь ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН
к. ф.-м. н.

Патров М. И.

