



УТВЕРЖДАЮ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

на № 20.12.2022 № ОР-21-4-559
от _____

Проректор по научно-организационной
деятельности
д.т.н. Ю.С. Ключков
«20» декабря 2022 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» – на диссертационную работу **Бреева Ильи Дмитриевича на тему «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 01.03.08 – физика конденсированного состояния.

Актуальность работы. Диссертационная работа Бреева Ильи Дмитриевича посвящена изучению вакансионных центров кремния в карбиде кремния и его гетероструктурах методами оптической спектроскопии и оптически детектируемого магнитного резонанса. Эти объекты рассматриваются международным научным сообществом в качестве перспективных материалов для применения в квантовых технологиях. Исследуемые в работе свойства вакансионных центров кремния, такие как зависимость спиновой структуры центров от механических деформаций и температуры, структура возбужденного состояния, особенности поляризации излучения, представляют интерес для применения в квантовой сенсорике, вычислениях и криптографии. Таким образом, диссертационное исследование является, несомненно, своевременным и актуальным.

Структура диссертации. Диссертация Бреева И.Д. хорошо структурирована, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (128 источников). Во введении сформулирована цель диссертационной работы и связанные с ней задачи,

010371

обоснована её актуальность, научная новизна и значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также указан личный вклад соискателя и апробация работы.

В первой главе представлен литературный обзор объектов исследования и используемых в диссертации экспериментальных методов для изучения спин-оптических и спин-деформационных свойств V_{Si} центров в карбиде кремния. Описано современное состояние исследований V_{Si} центров в карбиде кремния, история их обнаружения, кристаллическая и спиновая структура. В конце главы показана схема экспериментальной установки, используемой в работе.

Вторая глава посвящена исследованию распределения механических напряжений на интерфейсе AlN/SiC в гетероструктурах AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC спектроскопией комбинационного рассеяния света. Проведён анализ экспериментальных данных и сделаны выводы об источниках возникновения механических напряжений.

В третьей главе экспериментально показано влияние механических напряжений в кристаллах SiC на спиновые свойства V_{Si} центров, а именно на величину расщепления в нулевом поле в основном и возбужденном состояниях, построена теоретическая модель связи этих параметров.

В четвертой главе изложены результаты оптических исследований 6H-SiC с V_{Si} центрами. Исследуются поляризационные зависимости спектров фотолюминесценции и оптически детектируемого магнитного резонанса при комнатной температуре и температуре жидкого гелия.

Пятая глава посвящена исследованию температурного поведения V_{Si} центров в 6H-SiC методами спектроскопии анти-пересечения уровней, оптически детектируемого магнитного резонанса и электронного парамагнитного резонанса, проведен анализ времен спин-спиновой релаксации при разных температурах.

Новизна исследований и полученных результатов. С точки зрения научной новизны, следует отметить следующие наиболее значимые результаты:

1. На интерфейсе гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC получено распределение механических напряжений с субмикронным пространственным разрешением, обнаружены механические напряжения на интерфейсе вплоть до 1 ГПа, предложена модель их образования.

2. В карбиде кремния политипов 4H-SiC и 6H-SiC установлена зависимость расщепления спиновой системы V_{Si} центров от статических механических напряжений в нулевом магнитном поле, предложена теоретическая модель связи спинового гамильтониана с механическими напряжениями.

3. Для политипа 6H-SiC установлена поляризация излучения V_{Si} центров и направление преимущественного излучения. Сделаны теоретические выводы о структуре возбужденного состояния и порядке расположения спиновых подуровней для разных V_{Si} центров.

4. В политипе 6H-SiC обнаружено критическое температурное поведение V_{Si} центров V3 вблизи критической температуры $T_c=16$ К, описаны предполагаемые причины подобного поведения. Продемонстрирована возможность когерентного контроля V_{Si} центров V3 в 6H-SiC при температуре ниже критической.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Достоверность полученных результатов достигается путем применения современных, надежных и зарекомендовавших себя экспериментальных методов измерений с использованием высокоточного оборудования. Достоверность подтверждается соответствием полученных результатов с исследованиями, описанными в литературных источниках, а также высокой степенью согласования экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями и расчётами.

Научная и практическая значимость. Полученные результаты раскрывают потенциал для использования V_{Si} центров в карбиде кремния политипов 4H-SiC и 6H-SiC в качестве кубитов и квантовых сенсоров.

1. Полученные распределения механических напряжений на интерфейсе гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC можно применить для улучшения качества монокристаллов AlN, выращенных на подложках SiC.

2. Исследованная зависимость V_{Si} центров от механических напряжений позволит учесть дрейф их спиновых свойств при промышленном производстве, а также сделает возможным использование механических напряжений для управления и настройки спинового состояния V_{Si} центров.

3. Исследования оптических свойств центров, позволяют определить структуру возбужденного состояния, что важно для установления полной картины оптического цикла накачки и релаксации и выбора наиболее подходящих спиновых центров для использования в планарных фотонных кристаллах.

4. Критическое температурное поведение V_{Si} центров в 6H-SiC является одним из ключевых факторов для определения механизма оптического выстраивания спиновых подуровней и структуры спинового состояния.

Рекомендации по использованию результатов работы. Полученные в рассматриваемой диссертации результаты могут быть использованы в научных и прикладных исследованиях, проводимых в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, Казанском физико-техническом институте РАН, Нижегородском Государственном университете, Институте физики полупроводников СО РАН, Институте физики твердого тела РАН, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Институте физических проблем РАН, Казанском федеральном университете.

Замечания по диссертационной работе. По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Во второй главе диссертации приводятся результаты записи спектров комбинационного рассеяния света на торце гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC по оси нормали к интерфейсу, а затем показаны расчеты компонент тензора напряжений и деформации. Однако не указано в каких точках на торцах гетероструктур были записаны данные профили сдвигов пиков комбинационного рассеяния.
2. Во второй главе диссертации сказано, что нет возможности построить зависимость компонент тензора напряжений в слое 6H-SiC из-за отсутствия в литературе полного набора констант фонон-деформационных потенциалов. Но при этом в третьей главе была представлена зависимость расщепления спиновых подуровней вакансионных центров кремния в 6H-SiC от механических деформаций, неясно, как она была получена.
3. На Рис. 4.2 (а)-(б) на спектрах фотолюминесценции отсутствует шкала интенсивности, что затрудняет подтверждение вывода, что вакансионные центры кремния V3 в 6H-SiC излучает свет предпочтительно вдоль оси с.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку и не снижают научной и практической ценности диссертации.

Апробация работы. Диссертационная работа И.Д. Бреева выполнена на высоком и современном научном уровне и является весомым вкладом в развитие физики конденсированного состояния. Основные результаты этой работы опубликованы в ведущих реферируемых российских и зарубежных высокорейтинговых научных журналах (npj Quantum Information, Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, Физика и Техника Полупроводников, Physical Review B), доложены на многих международных и российских конференциях, семинарах.

Заключение. Рассматриваемая диссертационная работа посвящена актуальной теме, соискателем проведен значительный объем исследовательской работы, продемонстрировано полное соответствие приемов и методов исследований поставленной в работе цели, полученные в работе результаты обладают необходимой новизной и значимостью.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы. Представленная диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Её автор, Бреев Илья Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.08 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составил:

Профессор кафедры физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»

д. ф.-м.н.

Ф.С. Насрединов

Тел: +7 (812) 552-77-90

E-mail: nasfas@mail.ru

Доклад И.Д. Бреева, отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на заседании кафедры физики ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» 7 декабря 2022 г, протокол № 3.

Заведующий кафедрой физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»,

д.ф.-м.н., доцент

тел.: (812) 552-77-90



Е.Г. Апушкинский

Секретарь, к.ф.-м.н., доцент

В.В. Мизина

Сведения о ведущей организации. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Тел: +7 (812) 775-05-30

E-mail: office@spbstu.ru