

ОТЗЫВ

Отзыв официального оппонента Власова Игоря Ивановича 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

Диссертация посвящена исследованию особенностей центров окраски в карбиде кремния, а именно семейства отрицательно заряженных вакансионных центров кремния в гексагональных поли типах карбида кремния и содержащих его гетероструктурах. Эти центры являются аналогами других атомно-подобных центров, таких как NV-дефекты в алмазе. Эти объекты представляют интерес, как оптически активные квантово-механические системы, которыми можно управлять с помощью ВЧ и СВЧ излучения, и считывать их состояние по оптическому каналу. С их помощью возможно осуществлять измерение локальных физических полей, таких как температура, магнитное и электрическое поле, механические деформации кристаллической решетки. Кроме того, они рассматриваются в качестве кандидатов для реализации квантовых битов в квантовых вычислениях и криптографии. Тема диссертационной работы достаточно **актуальна**.

Во **введении** автор описывает актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи, основные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад соискателя. Перечислены конференции, на которых были доложены представленные в диссертации результаты.

Первая Глава посвящена описанию объекта исследования, материала носителя, и экспериментальным методам, использованным в диссертационной работе. Описаны основные особенности материала носителя – карбида кремния, история обнаружения, методы синтетического роста кристаллов, использование в промышленности и его полиморфные варианты, поли типы. Для объекта исследования – отрицательно заряженных вакансионных центров кремния в карбиде кремния гексагональных поли типов, описана история их обнаружения, возникновения модели для их описания, их оптические, спиновые и динамические свойства. Изложено описание экспериментальных методов, использованных в диссертации: комбинационного рассеяния света, оптической спектроскопии, оптически детектируемого магнитного резонанса и спектроскопии антипересечения уровней, а также представлена схема экспериментальной установки.

Во **Второй Главе** представлены исследования гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC методом комбинационного рассеяния света с конфокальным оптическим разрешением на поверхности скола со стороны перпендикулярной кристаллической оси c , а также расчёты величины механических напряжений и деформаций в слоях SiC по мере приближения к гетероинтерфейсу. Дополнительно представлено изображение границы раздела, полученное методом сканирующей трансмиссионной электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, для установления качества гетероперехода. В данной части диссертации показано, что несмотря на меньшую величину параметра решетки в SiC по сравнению с AlN, в слое SiC наблюдается возникновение деформаций сжатия кристаллической решетки вплоть до $-0,1\%$.

В **Третьей Главе** представлены результаты исследования гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC методами магнитного резонанса: оптически детектируемого магнитного

резонанса и антипересечения уровней, с конфокальным пространственным разрешением. Также как и в случае исследований в предыдущей главе, измерения проводились на поверхности скола гетероструктур на стороне перпендикулярной кристаллической оси c . В разделе было установлено, что линии магнитного резонанса в основном и возбужденном состоянии вакансионных центров в SiC испытывают сдвиг из-за механических деформаций кристалла по мере приближения к гетероинтерфейсу. Приведены модифицированные варианты спинового Гамильтониана для описания влияния механических деформаций на спиновую структуру вакансионных центров, а также рассчитаны величины параметров, описывающих связь энергии спиновых подуровней вакансионных центров с компонентами тензора механических деформаций.

В **Четвертой Главе** диссертации показаны результаты по измерению оптической поляризации нуль-фононных линий в спектрах фотолуминесценции вакансионных центров кремния в 6H-SiC, собранных с разных направлений относительно кристаллической оси c , в диапазоне от комнатной температуры до температуры жидкого гелия. Также проведены исследования поляризационных зависимостей линий оптически детектируемого магнитного резонанса вакансионных центров кремния в 6H-SiC. Установлено, что поляризация нуль-фононных линий вакансионных центров кремния V3 и V2 в 6H-SiC отличается. В разделе построена теоретическая модель гамильтониана, описывающего возбужденное состояние вакансионных центров и сделан вывод, что направление поляризации зависит от порядка следования подуровней возбужденного состояния, от знака расщепления из-за спин-орбитального взаимодействия, и, соответственно, от оптических правил отбора. Из экспериментальных данных сделан вывод об инвертированной структуре возбужденного состояния разных вакансионных центров кремния в 6H-SiC, V3 и V2.

В **Пятой Главе** диссертации показано исследование вакансионных центров кремния в 6H-SiC методами спектроскопии антипересечения уровней, оптически детектируемого магнитного резонанса, и записи осцилляций Раби, в широком диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого гелия. В разделе показана зависимость тонкого расщепления возбужденных состояний вакансионных центров кремния в 6H-SiC от температуры, переворот фазы сигнала ОДМР для V3 центра при проходе через температуру в 16 К, а также показаны осцилляции Раби вакансионных центров V2 и V3 при температуре ниже 16 К. Переворот фазы сигнала ОДМР объясняется изменением процесса оптического выстраивания спиновых подуровней для центра V3 при низкой температуре.

В **заключении** представлены основные выводы диссертационной работы, благодарности, список публикаций автора по теме диссертации в 13 отечественных и международных рецензируемых журналах.

Результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях. Основные исследования подробно освещены в рецензируемых и высоко цитируемых международных журналах. Эти факты свидетельствуют о высокой степени **достоверности** полученных результатов. В процессе работы были использованы современные физические методы исследования на дополнительно модифицированных установках.

Впервые было показано экспериментально распределение напряжений вблизи интерфейса объемных гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC с микронным пространственным разрешением. Также было показано, что слой SiC испытывают

механические деформации сжатия вплоть до $-0,1\%$ в обеих гетероструктурах, хотя постоянная решетки в плоскости интерфейса у SiC меньше, чем у AlN.

Ранее в литературе было описано изменение квантового состояния NV-дефектов в алмазе в присутствии механических напряжений. В данной диссертации была впервые показана зависимость основного состояния вакансионных центров кремния в 4H-SiC и 6H-SiC от механических деформаций, также была показана зависимость возбужденного состояния вакансионных центров кремния в 6H-SiC от механических деформаций.

Предыдущие исследования уже представляли разную поляризацию излучения вакансионных центров кремния в 4H-SiC и 6H-SiC. В работе соискателя были впервые проведены подробные измерения степени поляризации нуль-фононных линий при разных температурах, а также было представлено объяснение данной поляризации инвертированной структурой возбужденного состояния.

Ранее в литературе с помощью метода электронного парамагнитного резонанса было замечено изменение фазы сигнала вакансионного центра кремния V3 в 6H-SiC в диапазоне низких температур. Соискатель провел исследования процесса изменения фазы сигнала с помощью метода оптически детектируемого магнитного резонанса, а также подтвердил когерентное поведение центра V3 при температуре ниже температуры переворота фазы, что было связано с изменением типа оптического выстраивания.

Практическая значимость диссертации обусловлена важностью полученных экспериментальных данных. Полученные распределения механических напряжений на гетероинтерфейсе структур AlN/SiC можно использовать для оптимизации протоколов роста больших монокристаллов AlN на SiC высокого качества. Наиболее важными результатами работы можно считать установление связи спиновой системы вакансионных центров кремния в 4H-SiC и 6H-SiC с механическими деформациями кристаллической решетки, что является ключевой информацией при промышленном создании спиновых центров, а также для потенциальной возможности пьезомеханического контроля их спинового состояния. Также важным результатом является обнаружение инвертированной структуры возбужденного состояния вакансионных центров кремния в 6H-SiC, так как этот факт позволяет лучше понять структуру данных объектов, а также выбрать наиболее подходящие спиновые центры для использования в планарных фотонных кристаллах.

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Замечания

1. Во второй главе представлены результаты КРС в слоях AlN в исследуемых гетероструктурах и показано, что сдвиг пиков КРС составляет до 18 см^{-1} , что на порядок больше, чем показано для сдвигов пиков КРС в слоях SiC. В тексте не прокомментировано такое различие, как и не представлена величина механических деформаций в слое AlN.
2. В четвертой главе описана инвертированная структура возбужденного состояния вакансионных центров кремния в 6H-SiC. Можно ожидать, что спектрах фотолюминесценции появится две нуль-фононные линии для переходов из разных возбужденных состояний, однако об их наличии или отсутствии в тексте не говорится.

Указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

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» по своей актуальности, научной новизне, достоверности и практической значимости результатов соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Бреев Илья Дмитриевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8-физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент
кандидат физ.-мат. наук,
заведующий лабораторией углеродной нанофотоники
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки, Федерального исследовательского центра
Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук

«14» декабря 2022 г.

Власов Игорь Иванович

Контактные данные:
119991, Москва, ул.Вавилова, д. 38
Тел.:+7-916-601-8736
e-mail: vlasov@nsc.gpi.ru



ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ

Власова В.И.

СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН

Глушков В.В.

15.12.2022