

## ОТЗЫВ

На автореферат диссертации

**Бреева Ильи Дмитриевича**

### **«Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе»**

представленной на соискание ученой кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.08 - "Физика конденсированного состояния"

Современный этап развития физики конденсированного состояния характеризуется широким использованием перспективных методов квантовой физики в исследовании структурных и оптических свойств полупроводников, особое место среди которых занимает гексагональный карбид кремния. Этот широкозонный материал обладает низкой концентрацией электронных и ядерных спинов и, соответственно, большими временами спиновой когерентности при температурах, выше температуры жидкого гелия, что обуславливают перспективы его применения в квантовых устройствах, квантовых сенсорах физических полей и квантовых информационных технологиях.

Одним из важнейших методов является метод оптически детектируемого магнитного резонанса, который в сочетании с поляризационной спектроскопией, спектроскопией анти-пересечений, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и осцилляций Раби способен дать детальную информацию о структуре и свойствах центров окраски в широкозонных полупроводниках. Однако, в известных отечественных и зарубежных работах невозможно найти комплексное изучение свойств этих центров с использованием перечисленных выше методов. Проведение подобных исследований свойств центров окраски в активно внедряемых в производство широкозонных полупроводниках представляется весьма своевременным и актуальным.

Автореферат диссертации посвящен актуальному направлению на стыке современной квантовой физики и полупроводникового материаловедения, а именно исследованию структурных и электронных состояний парамагнитных центров вакансий кремния в политипах гексагонального карбида кремния, введенных в процессах роста. **Актуальность** работ в данном направлении определяется широким кругом проводимых в мире исследований, в которых анализируются как полупроводниковые, так и квантово-механические свойства центров окраски в SiC для их возможного применения в различных областях от силовых полупроводниковых приборов до устройств квантовой информатики и сенсорики. Среди важных приложений следует также упомянуть источники одиночных фотонов, сенсоры электрических, температурных и магнитных полей с рекордными чувствительностью, нанометровым разрешением, вплоть до томографии отдельных ядерных и электронных спинов в макромолекулах. Однако на пути использования карбида кремния в микроэлектронике и квантовых вычислениях имеются нерешенные

фундаментальные проблемы от создания до определения положения в запрещенной зоне уровней различных оптически и электрически активных центров и их заполнения в условиях внешнего возбуждения. Решение этих проблем зависит от результатов фундаментальных исследований структуры и оптических свойств центров окраски, поскольку многие теоретические модели оптически и электрически активных центров, предложенных для карбида кремния, не находят экспериментальных подтверждений.

Экспериментальное исследование парамагнитных центров в карбиде кремния методами ОДМР, ЭПР, поляризационной спектроскопией, спектроскопией антипересечений и осцилляций Раби является непростой задачей, поскольку в SiC наблюдается множество собственных и примесных ЭПР и ОДМР активных центров, а их свойства, определяемые разными методами, слабо коррелируют друг с другом.

Автореферат диссертации И.Д. Бреева посвящен детальному изучению структуры, оптических и электронных состояний  $V_{Si}$  центров в SiC, связанных с присутствием в структуре вакансионных дефектов атомов кремния в решетке. Значимость данной работы подтверждается необходимостью фундаментального понимания структуры и свойств оптических и электронных состояний  $V_{Si}$  центров, а также поисками нового подхода, позволяющего получать требуемые оптические и электрические свойства центров окраски в заданных областях широкозонных гетероструктур на основе карбида кремния 4H-SiC и 6H-SiC.

Основные результаты автореферата обладают **научной новизной**. Так, новыми результатами являются: распределение механических напряжений на интерфейсе гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC с субмикронным пространственным разрешением; зависимость спинового расщепления в нулевом магнитном поле от статических механических напряжений; поляризационная зависимость и когерентный контроль излучения  $V_{Si}$  центров в 6H-SiC.

Практическая ценность работы определяется развитием фундаментальных представлений о природе и свойствах  $V_{Si}$  центров в решетке гексагонального карбида кремния и гетероструктурах на его основе, необходимых для применения центров окраски в квантовых информационных и сенсорных приложениях.

#### Замечания по тексту автореферата:

Стр. 1. Последний абзац. Не бывает вакансии кремния в алмазе. Есть центр кремний-вакансия, где примесный атом кремния смещен из узла решетки алмаза в сторону соседнего вакантного узла.

Стр. 2. Пункт 2 Практическая значимость. «Исследована зависимость ???  $V_{Si}$  центров от...» -пропущено слово.

Стр. 2. Последний абзац. Для чего в защищаемом положении 1 приведены геометрические параметры гетероструктур? Их уместно было бы указать на стр. 7 в последнем абзаце, а не защищать случайные попавшиеся цифры.

Стр. 15 и 17. Есть ссылки на формулу и уравнение, которые не приведены в автореферате.

Несмотря на указанные замечания, в целом, судя по автореферату, представленная работа является самостоятельным и оригинальным исследованием, содержащим элементы научной новизны.

Считаю, что диссертационная работа Бреева И.Д. «Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.08 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Бреев И.Д. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук

Попов Владимир Павлович

Подпись В.П. Попова удостоверяю  
Ученый секретарь  
Института физики полупроводников  
им.А.В. Ржанова СО РАН, к.ф.-м.н.

С.А. Аржанникова

ФГБУН ИФП СО РАН, Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.  
<http://www.isp.nsc.ru/>; [IFP@isp.nsc.ru](mailto:IFP@isp.nsc.ru)