

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 29.12.2022 № 12

О присуждении Брееву Илье Дмитриевичу
Гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Спин-оптические и спин-деформационные свойства вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния и гетероструктурах на его основе» принята к защите 28 октября 2022 г., протокол №11, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 15 от 19.01.2021 г. и № 13 от 21.01.2022 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Бреев Илья Дмитриевич, 1994 г.р., в 2018 году окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по специальности «Физика». Экзамены по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «физика конденсированного состояния» успешно сданы соискателем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2019 и 2021 гг. В настоящее время соискатель работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника в лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов Федерального бюджетного

учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Анисимов Андрей Николаевич, к.ф.м.н., и.о. научного сотрудника лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Научный консультант – Баранов Павел Георгиевич, д.ф.м.н., главный научный сотрудник – заведующий лабораторией микроволновой спектроскопии кристаллов ФТИ им. А. Ф. Иоффе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Власов Игорь Иванович, кандидат физ.-мат. наук, заведующий лаборатории углеродной нанофотоники Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 2 замечания.

2. Власенко Леонид Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого” предоставила положительное заключение на диссертацию, содержащее 3 замечания. Заключение подготовлено доктором физико-математических наук, профессором кафедры физики СПбПУ Петра Великого Насрединным Ф. С. и подписано доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой физики СПбПУ Петра Великого Апушкинским Е. Г. Отзыв утверждён проректором по научно-организационной работе СПбПУ Петра Великого д.т.н. Клочковым Ю. А. В заключении указано, что содержание

диссертации Бреева И. Д. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния», а соискатель Бреев И. Д. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а второй - кандидата наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что СПбПУ Петра Великого ведет активные исследования в различных областях физики конденсированного состояния, в частности в области перспективных полупроводниковых материалов. В СПбГУ действует диссертационный совет У.01.04.07 специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации представлено в 12 научных статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science, и одной конференционной статье, учитываемой в данной базе:

1. Anisimov A.N., Soltamov V.A., Breev I.D. et al. All-optical quantum thermometry based on spin-level cross-relaxation and multicenter entanglement under ambient conditions in SiC // AIP Advances, Vol. 8, No. 085304 2018 <https://doi.org/10.1063/1.5037158>
2. Анисимов А.Н., Солтамов В.А., Бреев И.Д. и др. Физические основы применения сканирующего зонда со спиновыми центрами в SiC для субмикронного квантового зондирования магнитных полей и температур // Письма в ЖЭТФ, т. 108, No. 9, с. 643 – 649, 2018
3. Бреев И.Д., Анисимов А.Н., Вольфсон А.А., Казарова О.П., Мохов Е.Н. Комбинационное рассеяние света в кристаллах AlN, выращенных методом

сублимации на затравках SiC и AlN // Физика и техника полупроводников, т. 53, No. 11, С. 1593-96, 2019

4. Анисимов А.Н., Бабунц Р.А., Бреев И.Д., Бундакова А.П., Ильин И.В., Музафарова М.В., Баранов П.Г. Сканирующий оптический квантовый магнитометр, основанный на явлении выжигания провалов // Письма в ЖТФ, т. 45, No. 10, С. 22-26, 2019

5. Breev I.D., Anisimov A.N., Baranov P.G., Mokhov E.N. Optical confocal spectroscopy of SiC and AlN interfaces using Raman scattering and Optically Detected Magnetic Resonance // Journal of Physics Conference Series, vol. 1400, No. 6, 2019

6. Breev I.D., Anisimov A.N., Babunts R.A., Baranov P.G. Optically Detected Magnetic Resonance Spectroscopy in Silicon Carbide using Temperature Sweep // Journal of Applied Spectroscopy, vol. 87, No. 1, p. 25-28, 2020

7. Breev I.D., Likhachev K.V., Yakovleva V.V., Hubner R., Astakhov G.V., Baranov P.G., Mokhov E.N., Anisimov A.N. Stress distribution at the AlN/SiC heterointerface probed by Raman spectroscopy // Journal of Applied Physics, vol. 129, No. 5, С. 055304, 2021

8. Singh H., Anisimov A.N., Breev I.D., Baranov P.G., Suter D. Optical spin initialization of spin-3/2 silicon vacancy centers in 6H-SiC at room temperature // Phys. Rev. B, vol. 103, No. 10, С. 104103, 2021

9. Breev I.D., Poshakinskiy A.V., Yakovleva V.V., Nagalyuk S.S., Mokhov E.N., Hubner R., Astakhov G.V., Baranov P.G., Anisimov A.N. Stress-controlled zero-field spin splitting in silicon carbide // Appl. Phys. Lett., vol. 118, No. 084003, 2021

10. Бабунц Р.А., Анисимов А.Н., Бреев И.Д., Гурин А.С., Бундакова А.П., Музафарова М.В., Мохов Е.Н., Баранов П.Г. Полностью оптическая регистрация сверхтонких электронно-ядерных взаимодействий в спиновых центрах в кристаллах 6H-SiC с модифицированным изотопным составом ^{13}C // Письма в ЖЭТФ, т. 114, No. 8, С. 533 – 540, 2021

11. Soltamov V.A., Yavkin B.V., Mamin G.V., Orlinskii S.B., Breev I.D., Bundakova A.P., Babunts R.A., Anisimov A.N., Baranov P.G. Electron nuclear interactions in spin-3/2 color centers in silicon carbide: A high-field pulse EPR and ENDOR study // Phys. Rev. B, vol. 104, No. 12, P. 125205, 2021

12. Бреев И.Д., Лихачев К.В., Яковлева В.В., Вейшторт И.П., Скоморохов А.М., Нагалюк С.С., Мохов Е.Н., Астахов Г.В., Баранов П.Г., Анисимов А.Н. Влияние механических напряжений на расщепление спиновых подуровней в 4H-SiC // Письма в ЖЭТФ, т. 114, No. 5, С. 323-327, 2021

13. Breev I.D., Shang Z., Poshakinskiy A.V. et. al. Inverted fine structure of a 6HSiC qubit enabling robust spin-photon interface // npj Quantum Inf., vol.8, No. 1, P. 23, 2022.

На автореферат поступило 6 отзывов.

1. Отзыв д.ф.-м.н. Воронковой Виолетты Константиновны, ведущего научного сотрудника лаборатории спиновой химии и спиновой физики Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук», положительный, замечаний не содержит.
2. Отзыв д.ф.-м.н. Гафурова Марата Ревгеровича, директора Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, положительный, замечаний не содержит.
3. Отзыв д.ф.-м.н. Константиновой Елизаветы Александровны, профессора кафедры общей физики и молекулярной электроники Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, положительный, замечаний не содержит.
4. Отзыв д.ф.м.н. Попова Владимира Павловича, заведующего лабораторией Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской Академии наук, положительный, содержит 4 замечания, касающихся корректности термина «вакансия кремния в алмазе», пропущенного слова, ссылок на рисунки, которые есть только в диссертации, а также того, насколько уместно приведение геометрических параметров структур в защищаемом Положении 1.
5. Отзыв к.ф.м.н. Рыжова И. И., старшего преподавателя кафедры фотоники Физического факультета Санкт-Петербургского Государственного университета, положительный, содержит 4 замечания относительно улучшения пунктуации, необходимости пояснения термина «структура с ограничением света», необходимости привести обсуждение дополнительного пика в спектрах на Рис. 3(а,в) и 4. Отмечается, что не корректно приводить в защищаемом Положении конкретные параметры исследуемых структур.

6. Отзыв д.ф.м.н. Сорокина Вадима Николаевича, главного научного сотрудника Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук, положительный, содержит 4 замечания относительно единиц измерения в спектрах комбинационного рассеяния, фактическому повтору информации в параграфах 2.1 и 3.1., ссылки на уравнение, которое не приведено в автореферате, и также различной точности, с которой приведены времена неоднородной релаксации в параграфе 5.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по экспериментальному и теоретическому изучению спин-оптических и спин-деформационных свойств вакансионных центров в гексагональном карбиде кремния, были получены следующие основные результаты:

1. Получено распределение механических напряжений на интерфейсе гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC с субмикронным пространственным разрешением величиной до 1 ГПа, а также предложена модель их образования.
2. Установлено расщепление в нулевом магнитном поле энергетических уровней спиновой системы центров V_{Si} в карбиде кремния 4H-SiC и 6H-SiC для разных величин статических механических напряжений и предложена теоретическая модель связи спинового Гамильтониана с механическими напряжениями.
3. Продемонстрирована поляризация излучения центров V_{Si} , а также выявлено направление преимущественного излучения, и сделаны теоретические выводы о структуре возбужденного состояния и энергетическом порядке расположения спиновых подуровней для разных центров V_{Si} .
4. Выявлено критическое температурное поведение центров V_{Si} в 6H-SiC в окрестности критической температуры $T_c = 16$ К, а также предложены причины такого поведения. Продемонстрирована слабая зависимости неоднородного времени спин-спиновой релаксации центров V_{Si} в 6H-SiC от температуры.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Полученные результаты, в частности,

способствуют пониманию перспектив применения центров VSi в карбиде кремния 4H-SiC и 6H-SiC в качестве кубитов и квантовых сенсоров.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. На интерфейсе гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC с толщиной слоёв 228/242 и 253/420 мкм, соответственно, выращенных методом физического осаждения из газовой фазы образуются механические деформации сжатия в SiC, достигающие $\varepsilon \sim -0,1 \%$.
2. Расщепление тонкой структуры основного состояния VSi центров со спином $3/2$ при сжатии кристаллической решетки увеличивается в центрах V2 в 6H-SiC и V2 4H-SiC, и уменьшается в центрах V1/V3 6H-SiC. Расщепление тонкой структуры возбужденного состояния VSi центров со спином $3/2$ при сжатии кристаллической решетки увеличивается для центра V2 в 6H-SiC и уменьшается для V1/V3 в 6H-SiC.
3. Поляризация фотолюминесценции VSi центра V3 со спином $3/2$ в 6H-SiC со стороны перпендикулярной оси с ортогональна поляризации фотолюминесценции VSi центра V2 со спином $3/2$ в 6H-SiC с векторами поляризации перпендикулярно и параллельно оси с, соответственно. Это связано с инвертированной структурой возбужденного состояния.
4. Расщепление тонкой структуры возбужденного состояния VSi центров со спином $3/2$ в 6H-SiC с увеличением температуры уменьшается для центра V2 и центра V3. Центр V3 в 6H-SiC имеет критическую температуру 16 К, при которой происходит инверсия процесса оптического выстраивания спиновых подуровней в основном состоянии.

Достоверность представленных в диссертации результатов и обоснованность положений подтверждена применением современных экспериментальных методов исследования, таких как оптически детектируемый магнитный резонанс, комбинационное рассеяние света, поляризационная фотолюминесценция, воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов, согласием с теоретическими моделями, а также системностью проводимых исследований. Полученные результаты прошли апробацию на 11 международных и российских

конференциях, опубликованы в 12 оригинальных статьях в рецензируемых журналах по физике конденсированного состояния, а также в одной конференционной статье.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что подробно указано в тексте диссертации и автореферата.

Диссертация Бреева И. Д. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие таких актуальных направлений современной физики конденсированного состояния, как спинтроника, микроволновая спектроскопия.

На заседании 29 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Брееву И. Д. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Кусраев Юрий Георгиевич

Ученый секретарь
диссертационного совета
PhD

Калашникова Александра Михайловна

29 декабря 2022 г.