

03,08

Оптические и спиновые свойства вакансионных кремниевых центров, созданных облучением протонами в гетероструктуре карбида кремния 6H/15R

© И.А. Елисеев, Е.В. Единач, О.П. Казарова, А.Н. Смирнов[†]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия[†] E-mail: alex.smirnov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 28 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 28 апреля 2023 г.

Принята к публикации 30 апреля 2023 г.

Исследованы оптически активные вакансионные кремниевые дефекты (V_{Si}), обладающие электронным спином $S = 3/2$ в гетероструктуре карбида кремния 6H-SiC/15R-SiC, выращенной методом высокотемпературной сублимации. Методами низкотемпературной микро-фотолюминесценции и электронного парамагнитного резонанса показана возможность создания посредством облучения протонами с энергией $E = 15$ MeV пяти спектрально-различимых типов V_{Si} центров в данном типе гетероструктуры. При этом каждый тип V_{Si} центров характеризуется бесфононной линией люминесценции и определенной величиной расщепления спиновых подуровней в нулевом магнитном поле. Таким образом, нами реализована возможность масштабирования числа оптически активных спиновых центров, заключенных в единую кристаллическую матрицу.

Ключевые слова: карбида кремния, гетероструктуры, фотолюминесценция, электронный парамагнитный резонанс, облучение протонами, спиновые центры.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55661.74

1. Введение

Высокоспиновые состояния оптически-активных дефектов в широкозонных полупроводниках в настоящее время рассматриваются в качестве одной из основных платформ для развития квантовых технологий [1–4]. Главное свойство дефектов, позволяющее их использование в квантовых технологиях, заключается в том, что высокоспиновое состояние дефекта, расщепленное в нулевом магнитном поле (zero field splitting (ZFS)), может быть оптически поляризовано за счет наличия канала спин-зависимой рекомбинации в цикле оптического возбуждения дефекта [1–4]. Одними из наиболее ярких представителей таких дефектов являются вакансионные дефекты в карбиде кремния (SiC), обладающие свойством оптически-индуцированного выстраивания спиновых подуровней в основном состоянии [2,4–6]. Данные дефекты можно условно разделить на два широких класса: парные дефекты, обладающие триплетным ($S = 1$) основным состоянием [5,7–9] и вакансионные дефекты, обладающие квадруплетным ($S = 3/2$) основным состоянием [4–6]. Триплетные дефекты наиболее ярко представлены отрицательно заряженными дивакансиями $V_{Si}-V_C$ (ближайшая пара вакансий кремния и углерода) [5,7] и отрицательно заряженными азотно-вакансионными комплексами (N_C-V_{Si}) [8,9]. Оптически активными центрами со спином $S = 3/2$ являются дефекты на основе отрицательно заряженной вакансии кремния (V_{Si}) [4–6]. Следует отметить, что общепринятой микроскопической модели дефектов со спином $S = 3/2$ на сегодняшний день не существует. В некото-

рых работах данный дефект рассматривается как изолированная вакансия кремния [10]. В других работах эти же центры рассматриваются как отрицательно-заряженная вакансия кремния, возмущенная углеродной вакансией, находящейся в нейтральном зарядовом состоянии, или непарамагнитной примесью, каждая из которых молекулярно не связана с вакансией кремния [5,11]. В дальнейшем, чтобы избежать путаницы, мы будем обозначать оптически активные центры со спином $S = 3/2$ используя общепринятую аббревиатуру по их обозначению через энергии бесфононных линий люминесценции (БФЛ) и величины расщепления спиновых подуровней $S = 3/2$ в нулевом магнитном поле 2D, где параметр D является константой тонкой структуры [6,11]. Эти данные представлены в таблице для SiC политипов 6H и 15R. Отметим, что политипизм SiC является дополнительной степенью свободы, позволяющей регулировать спиновые и оптические свойства дефектов, что видно на примере дефектов, представленных в таблице.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности создания оптически активных V_{Si} центров с $S = 3/2$ в гетероструктурах SiC посредством технологии инженерии радиационных дефектов, а также демонстрация возможности создания оптически индуцированной инверсной заселенности спиновых подуровней V_{Si} центров в этих гетероструктурах. Последнее является основным критерием использования спинового состояния дефекта в квантовых технологиях. Для этого, методами конфокальной микро-рамановской спектроскопии, микрофотолюминесценции (μ -ФЛ) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) была исследована ге-

Обозначения оптически активных V_{Si} центров со спином $S = 3/2$ в $6H$ -SiC и $15R$ -SiC, энергии и длины волн соответствующих БФЛ, величины расщеплений в нулевом магнитном поле (2D) с учетом знака константы тонкой структуры D

Политип	6H-SiC			15R-SiC		
	БФЛ	V1	V2	V3	V2	V3
$E, eV/\lambda, nm$	1.433/865	1.397/887	1.368/906	1.399/886.5	1.372/904	1.352/917.4
ZFS (2D), MHz	-27	+128	-27	+139	-11.6	+16.7

тероструктура $6H$ -SiC/ $15R$ -SiC, выращенная сублимационным сэндвич-методом [12]. В результате исследований показано, что путем облучения протонами в такой гетероструктуре возможно создавать оптически адресуемые V_{Si} центры со спином $S = 3/2$.

2. Экспериментальная часть

Выращивание гетероструктур $6H$ -SiC/ $15R$ -SiC проводилось в установке резистивного нагрева модифицированным методом высокотемпературной сублимации из газовой фазы (PVT) — сублимационным сэндвич-методом [12]. В качестве затравочного кристалла использовался карбид кремния поли типа $6H$ высокого структурного совершенства и чистоты ($N_d - N_a \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Температура выращивания кристалла SiC поли типа $15R$ находилась в пределах $2000\text{--}2100^\circ\text{C}$, давление аргона в ростовой камере изменялось в пределах $300\text{--}700 \text{ mm Hg}$, чистота аргона составляла 99.999%. Для получения ромбического поли типа $15R$ -SiC в ростовую зону вводилась изовалентная примесь олова (Sn), в присутствии которой растущий слой поли типа $6H$ трансформировался в $15R$, при условии, если рост велся в направлении $[0001]$ Si. В процессе роста были выращены гетероструктуры $6H$ -SiC/ $15R$ -SiC, диаметр образцов составлял $\sim 15 \text{ mm}$, толщина гетероструктуры составляла $\approx 240 \mu\text{m}$. Помимо гетероструктуры, в работе использовались эталонные образцы сравнения SiC поли типов $6H$ и $15R$ высокого структурного совершенства и чистоты ($N_d - N_a \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). С целью создания вакансионных дефектов, гетероструктура и эталонные образцы были облучены протонами с энергией 15 MeV и дозой $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ на изохронном циклотроне МГЦ-20 в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Стоит отметить, что данная радиационная методика успешно использовалась ранее для создания вакансий кремния в SiC [8,9,13]. Рамановские спектры и спектры μ -ФЛ регистрировались с помощью спектрометра LabRAM HREvo UV-VIS-NIR-Open (Horiba, Lille, France) оснащенного конфокальным микроскопом и кремниевой ПЗС матрицей, охлаждаемой до температуры жидкого азота. Для возбуждения рамановских спектров и спектров μ -ФЛ использовалась линия $\lambda = 532 \text{ nm}$ (2.33 eV) Nd:YAG-лазера (Torus, Laser Quantum, Inc., Edinburg, UK). Луч лазера на поверхности образца фокусировался с использованием объективов Olympus $100\times$ ($NA = 0.9$)

и Leica PL FLUOTAR $50\times$ ($NA = 0.55$) в пятно диаметром $\sim 1\text{--}2 \mu\text{m}$. Спектры регистрировались с использованием дифракционных решеток 1800 и 600 gr/mm . Спектры электронного парамагнитного резонанса регистрировались на стандартном ЭПР спектрометре Jeol в X-диапазоне ($\approx 9.4 \text{ GHz}$) при комнатной температуре и при непрерывном оптическом освещении образца лазером $\lambda = 808 \text{ nm}$.

3. Результаты и обсуждение

С целью установления политипной композиции карбид-кремниевой гетероструктуры были выполнены ее исследования методом рамановской спектроскопии. Известно, что каждый отдельный политип SiC обладает характерным набором акустических и оптических фононных мод [14].

Наиболее ярко выраженное отличие между поли типами наблюдается в низкочастотной области рамановского спектра, где регистрируется рассеяние света на сложных поперечных акустических фононах (FTA). Данное обстоятельство проиллюстрировано на рис. 1, *a*, где приведены рамановские спектры, зарегистрированные на эталонных образцах сравнения поли типов $6H$ -SiC и $15R$ -SiC в геометрии рассеяния света $z(xx)\bar{z}$. Здесь z — направление гексагональной оптической оси. Частоты, соответствующие рассеянию света на FTA фононах, обозначены серой штриховкой и находятся в соответствие с табличными значениями, установленными в работе [14]. Так как в дальнейшем речь пойдет о спектрах, зарегистрированных на гетероструктуре $6H/15R$, на рис. 1, *a* также приведен спектр, ожидаемый для такой гетероструктуры, который был получен путем простого суммирования рамановских спектров для поли типов $6H$ -SiC и $15R$ -SiC.

Результаты измерения рамановских спектров на гетероструктуре $6H$ -SiC/ $15R$ -SiC при сканировании сфокусированного пятна лазера вглубь образца, показаны на рис. 1, *b*. Верхний спектр, зарегистрированный при фокусировке лазера на внешней поверхности образца, полностью соответствует спектру образца $6H$ -SiC, приведенному на рис. 1, *a*. Спектр, зарегистрированный при фокусировке лазера вглубь образца на расстояние приблизительно $70 \mu\text{m}$, содержит спектральные линии на частотах 150 и 173 cm^{-1} , соответствующие рассеянию на FTA фононах, характерных для поли типов $6H$ - и $15R$ -SiC, соответственно. Дополнительная линия

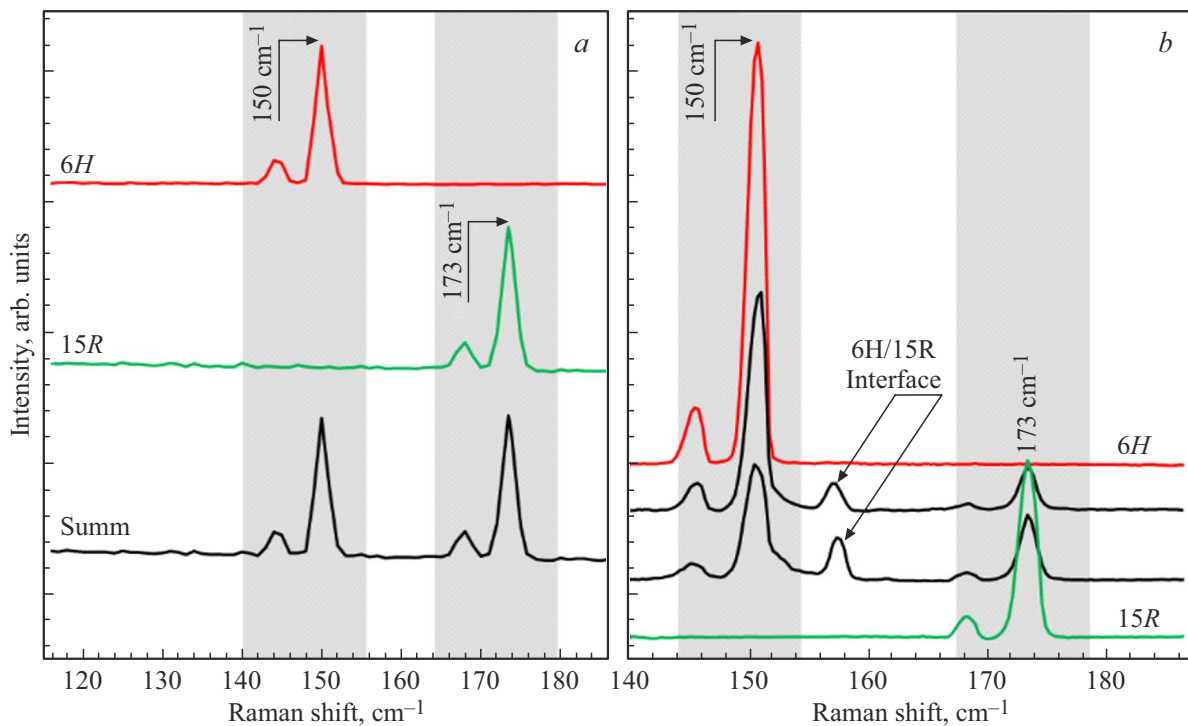


Рис. 1. (а) Рамановские спектры, зарегистрированные на политипах 6H- и 15R-SiC при комнатной температуре и оптическом возбуждении лазером с длиной волны $\lambda = 532$ nm. Нижний спектр получен путем сложения спектров 6H-SiC и 15R-SiC. (b) — Рамановские спектры, зарегистрированные на гетероструктуре 6H/15R-SiC при сканировании сфокусированного пятна лазера вглубь образца. Верхний спектр получен при фокусировке лазера на внешнюю поверхность образца. Второй и третий спектры соответствует фокусу пятна лазера на расстоянии 70 и 80 μm вглубь гетероструктуры. Нижний спектр соответствует фокусировке на глубину 110 μm .

(6H/15R Interface) в спектре на частоте ~ 157 cm^{-1} , отмеченная на рис. 1, b стрелками, по-видимому, возникает из-за рассеяния света на акустических фонах интерфейса гетероструктуры. Дальнейшее сканирование вглубь образца на расстояние порядка 110 μm показывает наличие только политипа 15R-SiC без посторонних включений. Исходя из результатов сканирования можно сделать вывод о том, что исследованная гетероструктура действительно представляет собой систему 6H-SiC/15R-SiC.

Далее, нами были проведены исследования гетероструктуры 6H-SiC/15R-SiC методом низкотемпературной конфокальной микро-фотолюминесценции. При этом, для расшифровки оптических спектров был применен подход, аналогичный использованному при исследовании этой гетероструктуры методом рамановской спектроскопии. А именно, сначала были проведены μ -ФЛ исследования каждого политипа в отдельности на эталонных образцах 6H-SiC и 15R-SiC, облученных протонами. Соответствующие спектры с отмеченными положениями бесфонных линий вакансий кремния, обозначенных согласно номенклатуре приведенной в таблице, приведены на рис. 2, a. Здесь необходимо отметить, что бесфонные линии V1 и V1', наблюдаемые в политипе 15R, не приведены в таблице, так как ранее их обсуждение в литературе не проводилось. На рис. 2, b приведен

спектр, полученный сложением спектров, зарегистрированных в отдельности для политипов 6H-SiC и 15R-SiC. В итоге, показана общая картина ожидаемого спектра ФЛ вакансий кремния в гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC. На рис. 3 представлен спектр μ -ФЛ, зарегистрированный на гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC. Видно полное соответствие данного спектра и суммарного спектра, приведенного на рис. 2, b. Таким образом, нами показано, что вакансии кремния в гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC могут быть успешно созданы облучением протонами и они характеризуются аналогичным спектральным набором бесфонных линий, а именно V1, V2, V3 для политипа 6H-SiC, и V1, V1', V2, V3 и V4 для политипа 15R-SiC, что явно видно из спектров, приведенных в увеличенном масштабе.

После того, как была проведена спектральная идентификация вакансий кремния в гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC по бесфонным линиям фотолюминесценции, мы провели исследования гетероструктуры методом электронного парамагнитного резонанса с целью выявления соответствия между спиновыми свойствами вакансий кремния в гетероструктуре и спиновыми свойствами вакансий кремния в политипах 6H-SiC и 15R-SiC. Конкретными задачами являлись оценка величины расщепления спиновых подуровней в нулевом магнитном поле и исследование возможности создания оптически

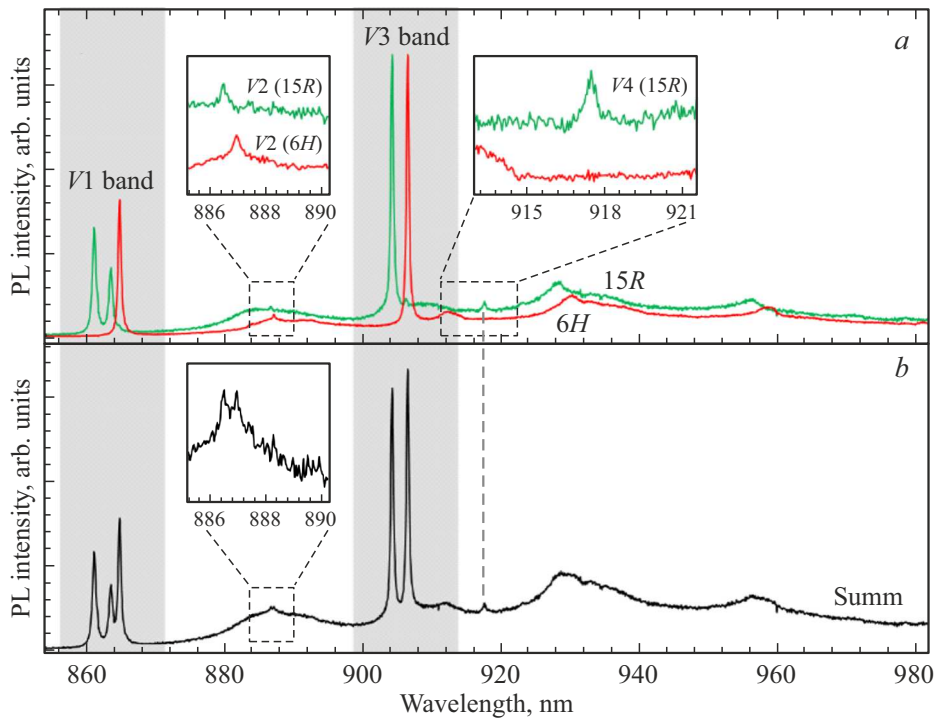


Рис. 2. (a) — Низкотемпературные спектры ($T = 80$ К) μ -ФЛ, зарегистрированные на политипах 6H-SiC и 15R-SiC. Серой штриховкой показаны диапазоны длин волн, соответствующие БФЛ V1/V1' и БФЛ V3 (V1 band, V3 band). На вставках показаны БФЛ V2 и V4 в увеличенном масштабе, обозначенные как V2 (6H), V2 (15R) и V4 (15R). (b) Спектр, полученный сложением спектров μ -ФЛ, показанных на рис. 1, a. На вставке приведено положение БФЛ V2. Положение БФЛ V4 на суммарном спектре обозначено штрих-пунктирной линией.

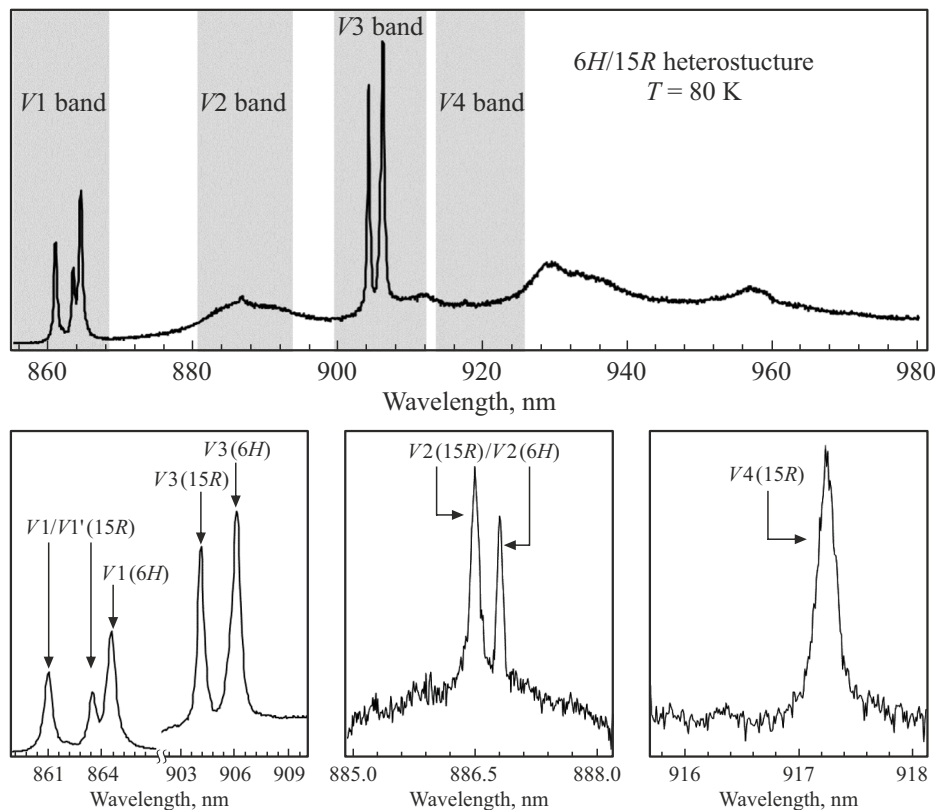


Рис. 3. На верхней панели приведен низкотемпературный спектр μ -ФЛ, зарегистрированный на гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC в широкой развертке длин волн. Серым цветом выделены спектральные диапазоны БФЛ V1, V2, V3 и V4, которые показаны на нижних панелях в увеличенном масштабе.

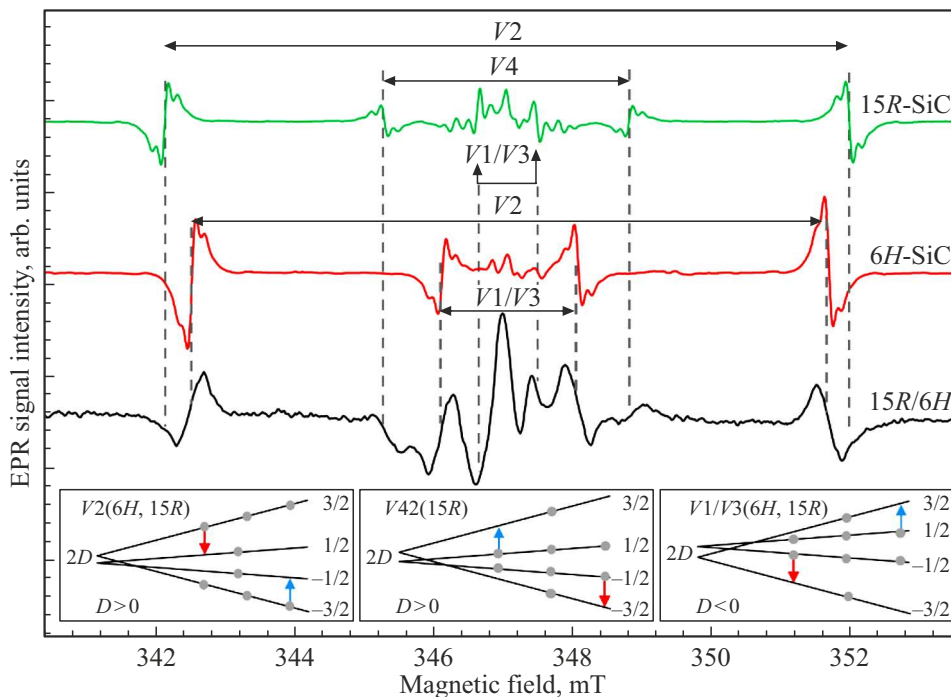


Рис. 4. Спектры ЭПР, зарегистрированные на эталонных образцах 6H- и 15R-SiC (спектры 1, 2) и на гетероструктуре 6H-SiC/15R-SiC (спектр 3), при ориентации внешнего магнитного поля $B \parallel c$ и оптическом возбуждении лазером с $\lambda = 808$ nm. Горизонтальными стрелками показаны разрешенные переходы ЭПР ($\Delta m_s = \pm 1$). Вертикальные штриховые линии нанесены для наглядности, чтобы подчеркнуть наличие всех пяти конфигураций V_{Si} центров в гетероструктуре 6H/15R (6H ($V1/V3$, $V2$) и 15R ($V1/V3$, $V2$, $V4$)). На нижних вставках схематически показаны оптически индуцированные заселенности спиновых подуровней V_{Si} центров в зависимости от знака константы тонкой структуры D [11]. Величина расщепления в нулевом магнитном поле (ZFS) обозначена как $2D$. Направление стрелок соответствует усиленному излучению/поглощению микроволновой мощности.

индуцированной преимущественной заселенности спиновых подуровней в основном квадруплетном состоянии. Для решения этих задач, мы сначала провели измерения спектров ЭПР облученных протонами эталонных образцов 6H-SiC и 15R-SiC, при параллельной ориентации постоянного внешнего магнитного поля B относительно гексагональной оси c карбида кремния ($B \parallel c$). Результаты измерений приведены на рис. 4. Видно, что спектр ЭПР в случае каждого политипа характеризуется набором пар дублетов (обозначены стрелками), компоненты тонкой структуры которых инвертированы друг относительно друга. Данные спектры ЭПР наблюдались ранее и однозначно идентифицируют вакансии кремния со спином $S = 3/2$ в основном состоянии [5,6,11,15]. В данной ориентации магнитного поля величины расщеплений по магнитному полю между резонансными компонентами тонкой структуры соответствуют удвоенной величине расщепления в нулевом магнитном поле, а именно $\Delta B = 4D/\gamma_e$, где $\gamma_e = 28$ MHz/mT это гиромагнитное отношение. Используя данные таблицы легко привести в соответствие сигналы ЭПР вакансионным центрам $V1$, $V2$, $V3$, $V4$ так, как это показано на рис. 4, используя вышеуказанное соотношение. Инвертированность фаз сигналов ЭПР свидетельствует о том, что под действием оптической накачки создается преимущественная заселенность спиновых состояний, сильно отличающаяся

от бoльцмановского распределения. Оптически индуцированное заселение спиновых подуровней вакансий кремния в политипах 6H-SiC и 15R-SiC схематически приведено на вставках рис. 4.

Нижний спектр ЭПР на рис. 4 зарегистрирован на гетероструктуре 6H/15R при оптическом возбуждении лазером с $\lambda = 808$ nm. Видно, что он характеризуется тем же набором сигналов ЭПР с теми же параметрами ZFS, что и для спектров, зарегистрированных на эталонных кристаллах 6H-SiC и 15R-SiC. Иными словами, наблюдается соответствие положений линий в данном спектре ЭПР с положением линий в спектрах в 6H-SiC и 15R-SiC, что для наглядности отражено пунктирными вертикальными линиями. Стоит отметить, что ввиду использования большей амплитуды модуляции магнитного поля (0.5 mT) сигналы ЭПР, зарегистрированные на гетероструктуре, значительно уширены по сравнению с сигналами на спектрах 1 и 2, которые регистрировались при модуляции 0.1 mT. Данное обстоятельство выражается в суперпозиции сигналов $V2$, наблюдаемое в случае гетероструктуры. Инвертированность фаз компонент тонкой структуры, которая наблюдается в спектре 3, свидетельствует об оптически индуцированном выстраивании спиновых подуровней V_{Si} центров в гетероструктуре. Таким образом, исследования методом ЭПР однозначно показали наличие пяти спектрально

разрешимых оптически активных V_{Si} центров в гетероструктуре $6H$ -SiC и $15R$ -SiC, созданных посредством облучения протонами.

4. Заключение

Показано, что облучение гетероструктуры $6H$ -SiC/ $15R$ -SiC высокоэнергетическими протонами приводит к созданию оптически активных вакансионных кремниевых центров. Установлено, что оптическая накачка лазером с $\lambda = 808$ nm приводит к поляризации спиновых подуровней вакансий кремния в гетероструктуре при комнатной температуре. Таким образом, реализована возможность масштабирования числа оптически активных спиновых центров, заключенных в единую кристаллическую матрицу до пяти спектрально разрешимых дефектов. Данные результаты открывают возможность создания многокубитной платформы на основе таких гетероструктур, что перспективно с точки зрения квантовых информационных систем, квантовых сенсоров и мазеров, активных при комнатной температуре [16,17]. Также показано, что в такой гетероструктуре основными радиационными дефектами после облучения протонами являются вакансионные кремниевые центры, и данный тип облучения не приводит к макроскопическим искажениям кристаллической решетки политипов $6H$ - и $15R$ -SiC. Последнее подтверждается результатами спектроскопии ЭПР, так как расщепления спиновых подуровней вакансий кремния в нулевом магнитном поле соответствуют величинам, установленным ранее для необлученных образцов [6]. Отдельно стоит отметить, что в последнее время особое внимание уделяется спиновым и оптическим свойствам вакансионных дефектов в SiC, локализованных в дефектах упаковки (stacking faults). Так, в работах [18–21] было показано, что дефекты вакансионного типа, расположенные в дефектах упаковки, значительно отличаются по своим свойствам от аналогичных дефектов, созданных в регулярном окружении, характерном для конкретного политипа SiC. При этом изменение свойств дефектов связывается с тем, что локальные короткопериодные структурные изменения политипа SiC приводят к возникновению квантовых ям, в которых присутствует эффект квантового ограничения. Таким образом, гетероструктуры SiC могут предоставить интересную возможность исследования свойств дефектов, созданных в интерфейсах, которые могут быть рассмотрены как локальный „срыв“ заданного политипа, приводящий к возникновению квантовой ямы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Солтамову за плодотворное обсуждение результатов работы.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L.C.L. Hollenberg. *Phys. Rep.* **528**, 1 (2013).
- [2] D. Awschalom, R. Hanson, J. Wrachtrup, B.B. Zhou. *Nature Photon.* **12**, 516 (2018).
- [3] F.F. Murzakhonov, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, U. Gerstmann, W.G. Schmidt, T. Biktagirov, I. Aharonovich, A. Gottscholl, A. Sperlich, V. Dyakonov, V.A. Soltamov. *Nano Lett.* **22**, 7, 2718 (2022).
- [4] S.A. Tarasenko, A.V. Poshakinskiy, D. Simin, V.A. Soltamov, E.N. Mokhov, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. *Phys. Status Solidi B* **255**, 1700258 (2018).
- [5] V.S. Vainer, V.A. Il'in. *Sov. Phys. Solid State* **23**, 2126 (1981). [*Fiz. Tverd. Tela* **23**, 3659 (1981).]
- [6] P.G. Baranov, A.P. Bundakova, A.A. Soltamova, S.B. Orlinskii, I.V. Borovykh, R. Zondervan, R. Verberk, J. Schmidt. *Phys. Rev. B* **83**, 125203 (2011).
- [7] P.G. Baranov, I.V. Il'in, E.N. Mokhov, M.V. Muzafarova, S.B. Orlinskii, J. Schmidt. *JETP Lett.* **82**, 441 (2005).
- [8] H.J. von Bardeleben, J.L. Cantin, A. Csore, A. Gali, E. Rauls, U. Gerstmann. *Phys. Rev. B* **94**, 121202(R) (2016).
- [9] F.F. Murzakhonov, B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, H.J. von Bardeleben, T. Biktagirov, U. Gerstmann, V.A. Soltamov. *Phys. Rev. B* **103**, 245203 (2021).
- [10] V. Ivády, J. Davidsson, N.T. Son, T. Ohshima, I.A. Abrikosov, A. Gali. *Phys. Rev. B* **96**, 161114(R) (2017).
- [11] V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, I.D. Breev, A.P. Bundakova, R.A. Babunts, A.N. Anisimov, P.G. Baranov. *Phys. Rev. B* **104**, 125205 (2021).
- [12] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, A.D. Roenkov. *Krist. Tech.* **14**, 729 (1979).
- [13] H.J. von Bardeleben, J.L. Cantin, I. Vickridge, G. Battistig. *Phys. Rev. B* **62**, 15 (2000).
- [14] S. Nakashima, H. Harima. *Phys. Status Solidi A* **162**, 39 (1997).
- [15] V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, D.O. Tolmachev, R.A. Babunts, A.G. Badalyan, V.Yu. Davydov, E.N. Mokhov, I.I. Proskuryakov, S.B. Orlinskii, P.G. Baranov. *Phys. Rev. Lett.* **115**, 247602 (2015).
- [16] H. Kraus, V.A. Soltamov, D. Riedel, S. Váth, F. Fuchs, A. Sperlich, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. *Nature Phys.* **10**, 157 (2014).
- [17] J.D. Breeze, E. Salvadori, J. Sathian, N. McN. Alford, C.W.M. Kay. *Nature* **555**, 493 (2018).
- [18] V. Ivády, J. Davidsson, N. Deegan, A.L. Falk, P.V. Klimov, S.J. Whiteley, S.O. Hruszkewycz, M.V. Holt, F.J. Heremans, N.T. Son, D.D. Awschalom, I.A. Abrikosov, A. Gali. *Nature Commun.* **10**, 5607 (2019).
- [19] J.H. Lee, W.B. Jeon, J.S. Moon, J. Lee, S.-W. Han, Z. Bodrog, A. Gali, S.-Y. Lee, J.-H. Kim. *Nano Lett.* **21**, 9187 (2021).
- [20] N.T. Son, D. Shafizadeh, T. Ohshima, I.G. Ivanov. *J. Appl. Phys.* **132**, 025703 (2022).
- [21] H. Iwata, U. Lindefelt, S. Öberg, P.R. Briddon. *Microelectron. J.* **34**, 371 (2003).

Редактор К.В. Емцев