

03

Изотопически модифицированный карбид кремния: полупроводниковая платформа для квантовых технологий

© Е.Н. Мохов, С.С. Нагалюк, О.П. Казарова, С.И. Дорожкин, В.А. Солтамов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Mokhov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 20 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2024 г.

Принята к публикации 26 ноября 2024 г.

Изложены тенденции и подходы к развитию материальной базы квантовых технологий на основе карбида кремния с использованием изотопной инженерии последнего. Приведен значительный обзор зарубежных научных проектов, направленных на исследования и разработку изотопно-модифицированного карбида кремния в качестве передовой высокотехнологичной базы квантовых технологий. Представлены результаты по характеристике изотопно-модифицированного 2'' (2 inch) ^{28}SiC , полученного на базе ФТИ им. Иоффе, методом масс-спектрометрии вторичных ионов, оптической и микроволновой спектроскопии. Показано наличие в облученных изотопно-модифицированных кристаллах двух семейств оптически активных спиновых центров, а именно триплетных центров ($S = 1$), таких как дивакансии ($V_{\text{Si}}-V_{\text{C}}$) и азотно-вакансионные (NV) дефекты, и квадруплетных центров ($S = 3/2$), связанных с вакансией кремния в отрицательном зарядовом состоянии (V_{Si}^-), используемых в мировой практике для создания квантовых сенсоров, кубитов, и квантовых информационных технологий. Данные результаты открывают новые возможности по исследованию свойств оптически активных высокоспиновых центров в изотопно чистых матрицах карбида кремния.

Ключевые слова: Карбид кремния, изотопная инженерия, вакансия кремния, дивакансия, NV-дефект, микроволновая спектроскопия.

DOI: 10.61011/FTT.2025.01.59776.316

1. Введение

Современные квантовые технологии требуют разработки новых материалов с уникальными свойствами [1,2]. Одним из перспективных направлений в данной области является создание изотопически чистых полупроводников, в частности, карбида кремния [3–5]. Этот материал обладает рядом преимуществ, сочетая в себе полупроводниковые свойства кремния, прочность, теплопроводность и химическую стойкость алмаза.

Особый интерес представляют оптически активные дефекты в SiC, обладающие высокоспиновым основным состоянием. Такие дефекты, как дивакансии, NV-центры и вакансионные кремниевые центры, могут использоваться для обработки квантовой информации, квантовой магнетометрии и термометрии, а также в качестве биосенсоров с субмикронным пространственным разрешением [1–5].

Для эффективного применения SiC в квантовых технологиях необходимо контролировать изотопный состав материала. Изотопически не модифицированный SiC содержит 4.7% изотопа ^{29}Si с ненулевым ядерным спином ($I = 1/2$), что может ограничивать времена когерентности квантовых состояний [3–5]. Изотопическое обогащение позволяет значительно снизить содержание ^{29}Si , заменив его на стабильные немагнитные изотопы кремния ^{28}Si ($I = 0$, 92.2%), ^{30}Si ($I = 0$, 3.1%), тем самым увеличивая времена спиновой когерентности дефектов [3–6].

Работы, направленные на получение изотопно-модифицированного карбида кремния для квантовых технологий, сейчас активно ведутся во многих научно-исследовательских институтах и группах и поддерживаются во всех крупных странах на уровне национальных программ развития. В качестве примера, имеет смысл проанализировать ход развития данной области в Европе и США. С 2023 года, Фраунгоферовский институт (Fraunhofer IISB) ведет работу по росту SiC с использованием изотопов ^{28}Si и ^{12}C для улучшения характеристик кубитов и однофотонных источников на базе спиновых дефектов. Проект SPINUS [7], финансируемый программой Horizon Europe, разрабатывает экспериментальные платформы на основе спиновых кубитов для квантовых симуляций и вычислений, с участием 12 партнеров из разных стран Европы. Проект QRC-4-ESP (Quantum Reservoir Computing for Efficient Signal Processing) [8], начавшийся в 2024 году, направлен на создание систем квантовых вычислений с использованием сверхпроводящих кубитов и дефектов в SiC. QRC-4-ESP включает 7 университетских центров и научных организаций из различных стран Европы, включая Германию, Великобританию, Швецию, Францию, Финляндию, Венгрию и Швейцарию. Проект SiCqurTech (Silicon Carbide Qubits towards a Fab-Ready Technology) [9] разрабатывает интеграцию спиновых центров в SiC в фотонные чипы для квантовых коммуникационных сетей, фокусируясь на технологиях, готовых к промышленному производству, что обосно-

вано ввиду того, что двухдюймовая технология хорошо освоена в случае карбида кремния. В проекте участвуют институты, такие как Люксембургский институт науки и технологий (LIST), Университет Фридриха-Александра и ETH Zürich из Швейцарии. Исследования в области квантовых технологий на базе SiC также активно развиваются в США. Для этого созданы несколько научных консорциумов. Основанный в 2020 году, Q-NEXT [10] объединяет около 100 экспертов из трех национальных лабораторий, 10 университетов и 14 технологических компаний. Квантовый научный центр Q-NEXT исследует спиновые дефекты в SiC для квантовых сенсоров, памяти и квантовой коммуникации. Окридская национальная лаборатория ORNL [11] исследует дефекты в SiC, изучая влияние изотопов на свойства квантовых центров. Эти исследования направлены на раскрытие потенциала SiC как платформы для устойчивых и масштабируемых квантовых систем, что имеет ключевое значение для развития квантовых технологий. Стоит особо подчеркнуть, что в вышеописанную выборку попали только крупные проекты, проводимые в рамках значительных научно-исследовательских программ или отдельно созданных под эти задачи научно-исследовательских центров.

В рамках нашей группы исследования, направленные на рост высококачественного изотопно-модифицированного карбида кремния и его использования в квантовых технологиях, ведутся сравнительно давно. Начиная с 2015 года нами были предложены некоторые приложения изотопно-модифицированного карбида кремния для квантовых технологий, таких как квантовые магнитометры [12], а также проведены пионерские исследования когерентных и спиновых свойств дефектов в таких кристаллах [4,6], на базе которых в настоящий момент предлагается создавать квантовые информационные системы. Отдельно стоит отметить недавние результаты по созданию отрицательно заряженных азотно-вакансионных дефектов в изотопически обогащенном $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$, путем облучения последнего частицами высоких энергий (электроны, протоны, нейтроны) и последующего отжига [13,14].

В настоящей статье мы демонстрируем возможность роста высокочистого, диаметром 2" (50.8 mm) карбида кремния сублимационным методом, обогащенного немагнитным изотопом ^{28}Si до 99.8%. Показываем возможность создания в таких кристаллах основных типов центров, предлагаемых сегодня для развития квантовых технологий. А именно, NV-центров и дивакансий (P6/P7 или VV^0 центры) с $S = 1$ [13–16], а также отрицательно заряженной вакансии кремния (V_{Si}^-) с $S = 3/2$ [17,18]. Иллюстрация основных спиновых и оптических свойств этих дефектов приведена на рис. 1, а их спектроскопические характеристики суммированы в табл. 1. Как показано на рис. 1, данные дефекты обладают оптически индуцированным спиновым выстраиванием, значительно отличающимся от болцмановского распределения, что позволяет использовать их как оптически адресуемые кубиты [19,20], основы для лазеров, активных в широком температурном диапазоне, вплоть до комнатной температуры [21,22], а также, ввиду интенсивной

фотолюминесценции и высокотехнологичности карбида кремния, для создания источников одиночных фотонных [17,20,23,24] и спин-фотонных интерфейсов [1,3,25], являющихся основой квантовых информационных технологий. Уникальность представленных в данной работе результатов состоит в демонстрации первых успешных шагов в сторону масштабируемых квантовых технологий на основе изотопно модифицированного карбида кремния в промышленно освоенной двухдюймовой технологии. Стоит подчеркнуть, что на основе наших результатов открывается возможность исследования всех трех основных центров окраски, предлагаемых сегодня для квантовых технологий, в рамках единой кристаллической матрицы с контролируемым изотопным составом. Это открывает перспективы для сравнительного анализа их свойств в идентичных условиях, что особенно важно для оптимизации параметров квантовых устройств на основе SiC.

2. Экспериментальная часть

Кристаллы карбида кремния $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$ с пониженным содержанием магнитного изотопа ^{29}Si ($I = 1/2$), были выращены методом высокотемпературной сублимации из газовой фазы (PVT) [31] с использованием прекурсора, обогащенного изотопом ^{28}Si . В качестве заправки использовалась подложка $6H\text{-SiC}$ с естественным содержанием изотопов кремния и углерода: ^{29}Si ($I = 1/2$, естественная распространенность 4.7%), ^{28}Si ($I = 0$, 92.2%), ^{30}Si ($I = 0$, 3.1%), и ^{12}C ($I = 1/2$, 98.9%), ^{13}C ($I = 1/2$, 1.1%). Коммерчески доступный изотопно-чистый источник ^{28}Si в виде порошка производства Госкорпорации „Росатом“ характеризовался уровнем чистоты 99.98% по содержанию указанного изотопа. Таким образом, содержание в прекурсорке стабильных изотопов — немагнитного изотопа ^{30}Si и магнитного изотопа ^{29}Si снижено более чем в 10 раз. Оценка концентраций основных примесей в выращенном образце и изотопного состава кремния в выращенных образцах проводилась методом вторично-ионной масс-спектрометрии (IMS 7f, CAMECA). Контрольное измерение концентрации изотопа ^{28}Si проводилось путем анализа интенсивности компонент сверхтонкой структуры в спектрах электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) V_{Si}^- центров. Спектры ЭПР как в непрерывном, так и в импульсном режимах, регистрировались на коммерческих спектрометрах BrukerESP300 и E680 в частотных диапазонах 9.4 GHz (X-band) и 94 GHz (W-band), соответственно. Импульсные спектры были получены путем регистрации интегральной интенсивности электронного спинового эха (ESE) как функции развертки магнитного поля \mathbf{B} с использованием последовательности импульсов Хана $\pi/2\text{-}\tau\text{-}\pi\text{-}\tau$ — ESE. Длительности $\pi/2$ импульса 44 ns, а $\tau = 280$ ns. Основная часть экспериментов проводилась при комнатной температуре ($T = 300$ K) и оптическом возбуждении IR лазерами ($\lambda = 785$; 808 и 980 nm). Измерения спектра ESE дивакансий проводились при

Таблица 1. Обозначения оптически активных V_{Si}^- центров со спином $S = 3/2$, NV^- центров и дивакансий со спином $S = 1$ в $6H$ -SiC. Соответствующие бесфононные линии в спектрах PL приведены в nm, величины расщеплений в нулевом магнитном поле (D для $S = 1$ и $2D$ для $S = 3/2$) с учетом знака константы тонкой структуры D , приведены в MHz

	V_{Si}^- [17,18,26]			NV^- [13,27]			VV^0 [28,29,30]		
ZPL	V_1	V_2	V_3	NV_{k1k2}	NV_{k2k1}	NV_{hh}	VV_{k1k2}	VV_{k2k1}	VV_{hh}
E, nm	865	887	906	1155	1227	1183	1139	1093	1135
ZFS, MHz	-27	+128	-27	+1355	+1278	+1328	+1300	+1342	+1334

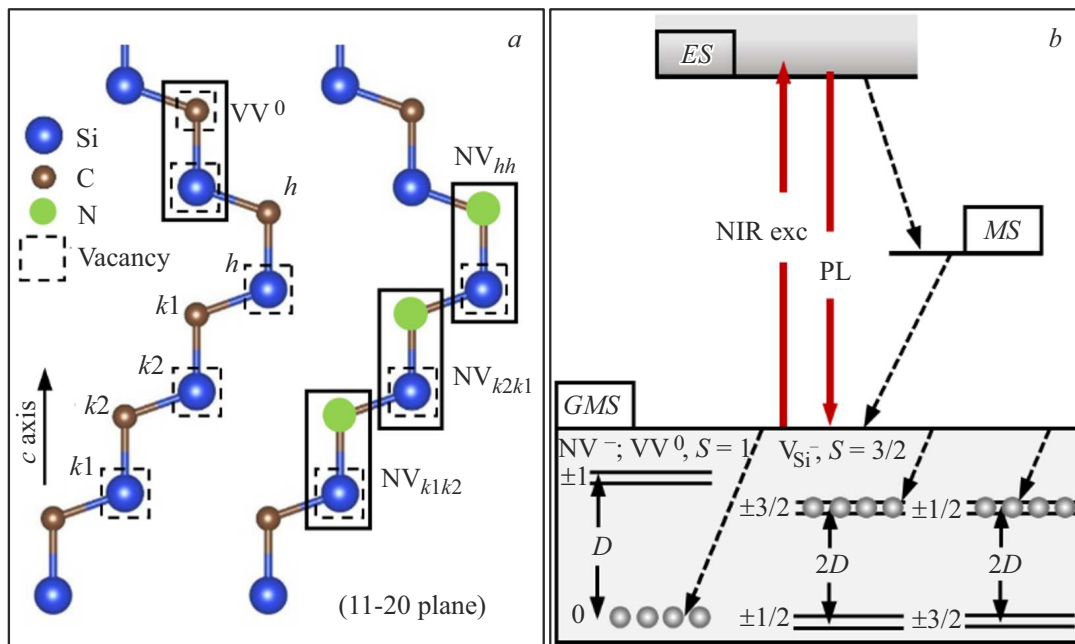


Рис. 1. (a) Вид решетки $6H$ -SiC в плоскости $(11\bar{2}0)$. Атомы кремния, углерода и азота показаны синим, коричневым и зеленым цветами, соответственно. Гексагональные (h) и квазикубические ($k1, k2$) неэквивалентные позиции обозначены соответственно. Вакансии кремния и углерода обозначены пунктирными линиями, парные дефекты NV и дивакансии указаны прямоугольниками. (b) Энергетическая структура уровней в цикле оптической накачки спиновых подуровней триплетных центров (NV^- , VV^0) и квадруплетных центров (V_{Si}^-). Пунктирными стрелками показана спин-зависимая рекомбинация из возбужденного состояния (ES) в основное состояние (GS) через метастабильное состояние (MS) под действием оптического возбуждения ближнего ИК диапазона (NIRexc). Спин-зависимая ИК-люминесценция обозначена как NIRPL. Разделение спиновых подуровней в отсутствие магнитного поля обозначено через параметр тонкой структуры D . Для V_{Si}^- приведены две схемы заселенности основного состояния, в зависимости от знака параметра тонкой структуры, определяющего порядок следования спиновых подуровней.

температуре 50 К с использованием проточного гелиевого криостата от Oxford Instruments для охлаждения образца. Эксперименты по микрофотолюминесценции (μ -ФЛ) проводились на спектрометре T64000 (Horiba Jobin-Yvon, Lille, France), оснащенный конфокальным микроскопом и кремниевой ПЗС-матрицей, охлаждаемой до температуры жидкого азота. Для возбуждения люминесценции использовался лазер $\lambda = 785 nm$. Спектры регистрировались с использованием дифракционной решетки 600 штрихов/mm. Для создания V_{Si}^- центров выращенный образец облучался электронами с энергией 2 MeV и дозой $2 \cdot 10^{18} cm^{-2}$. Дивакансии и NV^- дефекты создавались процедурой отжига облученного

образца при температуре $900^\circ C$ в течение 2 h в атмосфере аргона [13,32].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведена фотография пластины диаметром $2''$ монокристаллического $6H$ - ^{28}SiC . Слева на этом рисунке показаны результаты анализа образца методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на предмет основных неконтролируемых примесей (азот, кислород, бор, алюминий) и изотопного состава. Из данных ВИМС видно, что верхняя граница концентрации азо-

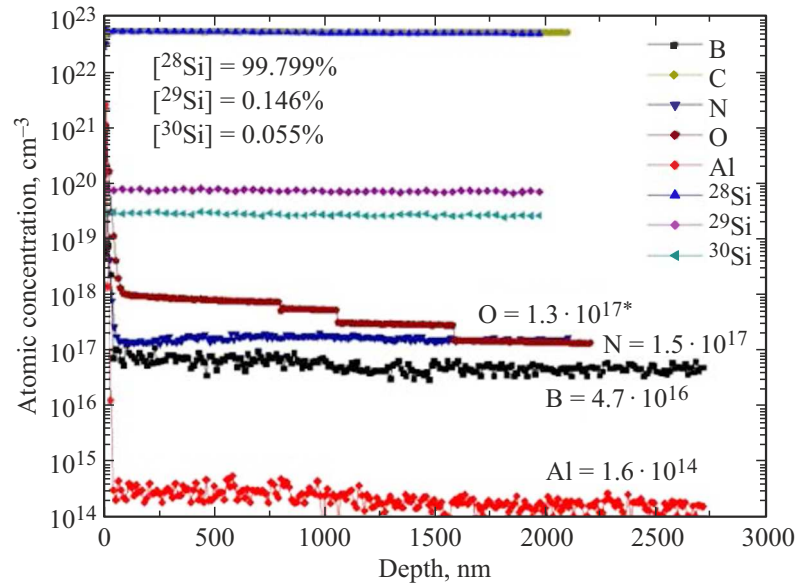
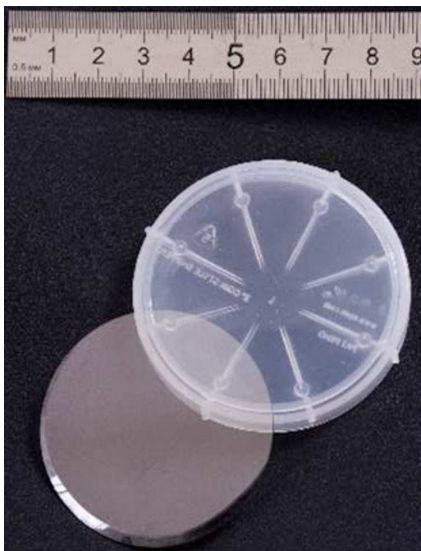


Рис. 2. Слева приведена фотография полированной пластины 2'' 6H- ^{28}SiC . Справа приведены данные анализа ВИМС, показывающие концентрации основных неконтролируемых примесей: N, B, Al и содержание изотопов ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si .

та составляет величину $1.5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, а концентрация компенсирующих примесей акцепторного типа (B, Al) составляет величину на порядок ниже.

Таким образом, выращенный образец содержит концентрацию некомпенсированных акцепторами донорной примеси азота порядка 10^{17}cm^{-3} . Изотопический анализ показывает, что степень обогащения выращенного образца SiC немагнитным 28 изотопом кремния составляет 99.799%, что хорошо согласуется со спецификацией прекурсора, а незначительное отклонение на 0.1% может быть объяснено автолегированием кремнием из подложки 6H-SiC, используемой в качестве затравки.

Облучение электронами образца 6H- ^{28}SiC приводит к созданию вакансионных центров, особенный интерес из которых представляет отрицательно заряженная вакансия кремния, характеризующиеся спиновыми и оптическими свойствами, показанными на рис. 1, b и параметрами, указанными в табл. 1, а именно набором бесфонных линий V1, V2, V3 в спектре фотолюминесценции, расщеплением спиновых подуровней основного $S = 3/2$ состояния в нулевом магнитном поле и оптически индуцированным выстраиванием спиновых подуровней. Данный набор характеристик проиллюстрирован на рис. 3. А именно, на рис. 3, a приведен спектр низкотемпературной фотолюминесценции. Три бесфонные линии V1, V2, V3 и их положение в спектре однозначно свидетельствуют о наличии в кристалле вакансий кремния в отрицательном зарядовом состоянии. На рис. 3, b показан спектр ЭПР, зарегистрированный в X-диапазоне при ориентации магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$ и оптическом возбуждении образца лазером $\lambda = 808 \text{ nm}$. Данный спектр ЭПР однозначно доказывает наличие V_{Si}^- центров в исследуемом образце [17,19]. В данной ориентации магнитного поля величины расщеплений по

магнитному полю между резонансными компонентами тонкой структуры, обозначенные на спектре как $\Delta B(V2)$ и $\Delta B(V1, V3)$ равны 9.1 mT и 1.9 mT, соответственно. Исходя из того, что в данной ориентации $\Delta B = 4D/g\mu_B$, где g фактор 2.00, а μ_B это магнетон Бора, величина ZFS, равная $2D$ может быть легко рассчитана равной 127.4 MHz для центров V2 и 26.6 MHz для центров V1/V3, что находится в хорошем соответствии с табл. 1. Важной особенностью спектров является инверсия фаз сигналов ЭПР в каждой паре компонент тонкой структуры, что свидетельствует о создании оптически индуцированного выстраивания спиновых подуровней, как это схематически показано на рис. 1, b и на вставке рис. 3, b.

После того, как наличие V_{Si}^- центров в изотопически чистом SiC было однозначно показано по набору спектроскопических характеристик, мы провели независимую дополнительную оценку изотопного обогащения карбида кремния немагнитным изотопом 28 кремния, принимая во внимание, что интенсивности спутников сверхтонкого взаимодействия (СТВ) электронного спина V_{Si}^- центров с ядерными магнитными моментами решетки SiC, наблюдаемые в спектрах ЭПР (показаны стрелками на вставке рис. 3, b), пропорциональны концентрации магнитного изотопа ^{29}Si .

Действительно, интенсивность каждой линии тонкой структуры, соответствующая переходам ЭПР между электронными спиновыми подуровнями для которых СТВ отсутствует, то есть отвечает взаимодействию с ядерными спинами 28 и 30 изотопа кремния, для которых $I = 0$. Сопровождающие дублеты сверхтонких линий с расщеплением 0.29 mT, возникают в результате СТВ с одним атомом ^{29}Si ($I = 1/2$) среди 12 ближайших соседей подрешетки Si [33,34]. Соотношение интенсивностей между общей интенсивностью двух компонент

СТВ и центральной линии тонкой структуры составляет 0.126. Принимая во внимание, что интенсивность СТВ-линии определяется вероятностью наличия одного атома ^{29}Si среди 12 ближайших соседей по решетке $\text{Si}(P_1)$, в то время как интенсивность центральной линии определяется вероятностью того, что все 12 атомов Si имеют $I = 0 (P_0)$ можно определить концентрацию ^{29}Si . А именно, вероятность того, что узел решетки занят нечетным изотопом определяется как $P_m = C_m^n X^m (1 - X)^{n-m}$, где m — количество узлов, занятых изотопом, n — количество эквивалентных узлов решетки, рассматриваемых в расчетах, и X — концентрация изотопа ^{29}Si . Таким образом, $P_1 = 12 \cdot X \cdot (1 - X)^{11}$ и $P_0 = (1 - X)^{12}$. Используя соотношение интенсивностей 0.126, мы получаем $X = 0.0103$, что соответствует содержанию ^{29}Si в образце приблизительно 1%. Моде-

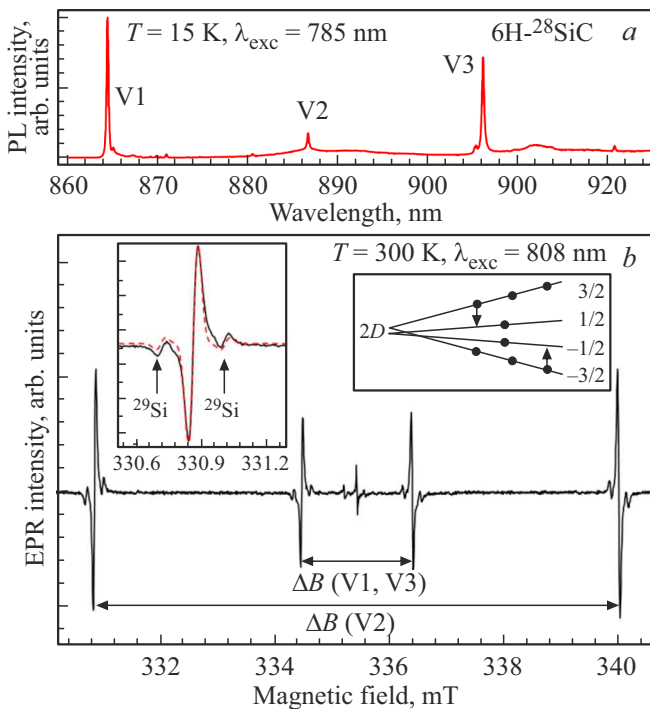


Рис. 3. (a) Спектр фотолуминесценции образца $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$, облученного электронами, зарегистрированный при возбуждении лазером $\lambda = 785 \text{ nm}$ и температуре $T = 15 \text{ K}$. Набор бесфонных линий V_{Si}^- центров обозначен через общепринятую аббревиатуру V1/V2/V3 [17,18]; положение линий соответствует данным, приведенным в табл. 1. (b) Спектр ЭПР образца $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$, зарегистрированный при комнатной температуре и оптическом возбуждении образца лазером $\lambda = 808 \text{ nm}$. Ориентация постоянного магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$. Сигналы ЭПР-центров V_{Si}^- указаны стрелками. На вставке справа схематично показана инверсная заселенность спиновых подуровней под действием оптической накачки. На вставке слева показана низкополевая компонента V_{Si}^- центров в увеличенном масштабе. Вертикальные стрелки указывают на дублет СТ компонент с расщеплением 0.29 mT , возникающим из-за СТВ с одним атомом ^{29}Si . Экспериментальный спектр показан черной сплошной линией, а смоделированная линия ЭПР при концентрации ^{29}Si 1% показана пунктирной красной линией.

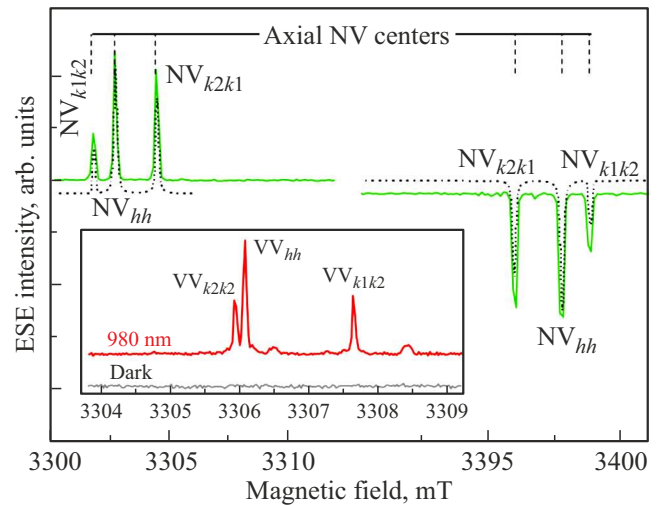


Рис. 4. Импульсный спектр ЭПР образца $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$, облученного электронами и отожженного при 900°C , зарегистрированный при $T = 300 \text{ K}$ и возбуждении лазером $\lambda = 980 \text{ nm}$. Ориентация магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$. Резонансные магнитные поля, соответствующие разрешенным переходам между спиновыми подуровнями триплетных центров обозначены как NV_{hh} , NV_{k2k1} и NV_{k1k2} . Пунктиром показан расчетный спектр с использованием табл. 1 и параметров табл. 2. На вставке показаны спектры, зарегистрированные при температуре $T = 50 \text{ K}$ с оптическим возбуждением лазером $\lambda = 980 \text{ nm}$ и без него (dark).

Таблица 2. Спектроскопические параметры NV-центров, использованные при расчете положений линий ЭПР согласно спиновому гамильтониану (1)

Дефект	g	$D, \text{ MHz}$
NV_{k1k2}	2.0045	1358
NV_{hh}	2.0044	1331
NV_{k2k1}	2.0046	1282

лирование формы линии EPR, выполненное с помощью программного обеспечения Bruker BioSpin при учете содержания ^{29}Si в 1%, представлено на вставке рис. 3, b красным цветом. Хорошее согласие между экспериментальным спектром и смоделированным спектром подтверждает корректность наших расчетов. Таким образом, из спектра ЭПР следует, что концентрация магнитного изотопа ^{29}Si снижена в 4.7 раз.

Далее, методом импульсного ЭПР в W-диапазоне (94 GHz) нами были исследованы облученные кристаллы $6H\text{-}^{28}\text{SiC}$, отожженные в течение двух часов при температуре 900°C в атмосфере аргона с целью демонстрации создания в изотопически чистых образцах NV^- центров и дивакансий. Спектр ЭПР, зарегистрированный в режиме электронного спинового эха при ориентации магнитного поля $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$ и при постоянном оптическом возбуждении лазером $\lambda = 964 \text{ nm}$ приведен на рис. 4. В спектре наблюдаются три пары линий, обозначенные

как NV_{hh} , NV_{k2k1} и NV_{k1k2} . Структура спектра указывает на расщепление в нулевом магнитном поле между спиновыми подуровнями триплетных дефектов. Спектр можно описать спиновым гамильтонианом аксиальной симметрии вида (1), который включает зеемановский член и член, отражающий расщепление спиновых подуровней в нулевом магнитном поле, приводящее к появлению тонкой структуры в спектре ЭПР:

$$H = g\mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} + D(S_z^2 - 2/3), \quad (1)$$

где \mathbf{S} — оператор электронного спина, \mathbf{B} — постоянное магнитное поле, D — параметр тонкой структуры, соответствующий величине ZFS на рис. 1, a , S_z^2 — оператор проекции спина триплетного центра. Расчет экспериментального спектра с использованием данного гамильтониана, выполненный в программе EasySpin с параметрами: $NV_{hh}g = 2.0044$, $D = 1331$ MHz; $NV_{k2k1}g = 2.0046$, $D = 1282$ MHz; $NV_{k1k2}g = 2.0045$, $D = 1358$ MHz, показан на рис. 4 пунктирной линией. Триплетное состояние и спектроскопические величины, соответствуют NV^- центрам аксиальной симметрии в $6H$ -SiC. Инвертированность сигналов высокополевых компонентов тонкой структуры внутри каждой пары линий триплета указывает на созданное оптическим возбуждением преимущественное заселение спинового подуровня с проекцией спина $m_s = 0$. На вставке рис. 4 приведен фрагмент спектра спинового эха, зарегистрированный при температуре $T = 50$ К. Линии в спектре, обозначенные как VV_{hh} , VV_{k2k2} и VV_{k1k2} , соответствуют другому семейству триплетных центров, а именно дивакансиям ($V_{Si}-V_C$) в нейтральном зарядовом состоянии [15,16].

4. Заключение

В настоящей работе представлены современные тенденции в мировой научной практике по работе в области квантовых технологий с использованием промышленного полупроводникового материала — карбида кремния. Мы продемонстрировали возможность получения 2'' монокристаллического $6H$ - 28 SiC на базе ФТИ им. Иоффе, используя в качестве прекурсора изотопически чистый кремний, полученный на базе РосАтома. Принимая во внимание то, что научная и технологическая сторона работы по исследованию и получению различных изотопов традиционно считается одной из сильнейших сторон Российской науки [33,34], развитие квантовых технологий на основе высокоспиновых дефектов в изотопически чистом SiC, на наш взгляд, является особенно перспективным. Также мы продемонстрировали технологию создания спиновых центров, V_{Si}^- , NV^- и VV^0 , обладающих свойством спинового выстраивания под действием оптической накачки, в выращенных кристаллах. Данные результаты могут считаться основой и отправной точкой для развития квантовых технологий на базе изотопически модифицированного карбида кремния.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания FFUG-2024-0024 „Функциональные материалы для микроэлектроники и фотоники“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Awschalom, R. Hanson, J. Wrachtrup, B.B. Zhou, Nat. Photonics **12**, 516–527 (2018).
- [2] P.G. Baranov, H.J. von Bardeleben, F. Jelezko, J. Wrachtrup. Springer Series in Material Science. Springer, Heidelberg (2017).
- [3] A. Bourassa, C.P. Anderson, K.C. Miao, et al. Nature Mater. **19**, 1319–1325 (2020).
- [4] V.A. Soltamov, C. Kasper, A.V. Poshakinskiy, A.N. Anisimov, E.N. Mokhov, A. Sperlich, S.A. Tarasenko, P.G. Baranov, G.V. Astakhov, V. Dyakonov. Nat. Commun. **10**, 1678 (2019).
- [5] I. Lekavicius, R.L. Myers-Ward, D.J. Pennachio, J.R. Hajzus, D.K. Gaskill, A.P. Purdy, A.L. Yeats, P.G. Brereton, E.R. Glaser, T.L. Reinecke, S.G. Carter, PRX Quantum **3**, 010343 (2022).
- [6] V.A. Soltamov, B.V. Yavkin, A.N. Anisimov, H. Singh, A.P. Bundakova, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, E.N. Mokhov, D. Suter, P.G. Baranov. Phys. Rev. B **103**, 195201 (2021).
- [7] URL: <https://spinus-quantum.eu/> ссылка на электронный ресурс, содержащий краткие сведения о проекте SPINUS (2024).
- [8] <https://www.qrc-4-esp.eu/> ссылка на электронный ресурс, содержащий краткие сведения о проекте qrc-4-esp
- [9] URL: <https://quantera.eu/sicqurtech/> ссылка на электронный ресурс, содержащий краткие сведения о проекте SiCqurTech
- [10] URL: <https://q-next.org/about/> ссылка на электронный ресурс, содержащий краткие сведения о лаборатории Q-NEXT
- [11] URL: <https://www.ornl.gov/quantum/> ссылка на электронный ресурс, содержащий краткие сведения о лаборатории ORNL
- [12] D. Simin, V.A. Soltamov, A.V. Poshakinskiy, A.N. Anisimov, R.A. Babunts, D.O. Tolmachev, E.N. Mokhov, M. Trupke, S.A. Tarasenko, A. Sperlich, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. Phys. Rev. X **6**, 031014 (2016).
- [13] F.F. Murzakanov, Yu.A. Uspenskaya, E.N. Mokhov, O.P. Kazarova, V.V. Kozlovskii, V.A. Soltamov. Phys. SolidState **66**, 4, 537–541 (2024).
- [14] F.F. Murzakanov, M.A. Sadovnikova, G.V. Maminetal. JETP Lett. **119**, 593–598 (2024).
- [15] V.S. Vainer, V.A. P'in. Sov. Phys. Solid State **23**, 2126 (1981).
- [16] P.A. Бабунц, Ю.А. Успенская, А.С. Гурин, А.П. Бундакова, Г.В. Мамин, А.Н. Анисимов, Е.Н. Мохов, П.Г. Баранов. JETPLett. **116**, 7, 485–492 (2022).
- [17] 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).

- [18] V.A. Soltamov, D.O. Tolmachev, I.V. Il'in, G.V. Astakhov, V.V. Dyakonov, A.A. Soltamova, P.G. Baranov. *Phys. Solid State* **57**, 891–899 (2015).
- [19] V.A. Soltamov, A.A. Soltamova, P.G. Baranov, I.I. Proskuryakov. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 226402 (2012).
- [20] D.J. Christle, P.V. Klimov, C.F. de las Casas, K. Szász, V. Ivády, V. Jokubavicius, J.U. Hassan, M. Syväjärvi, W.F. Koehl, T. Ohshima, N.T. Son, E. Janzén, Á. Gali, D.D. Awschalom. *Phys. Rev. X* **7**, 021046 (2017).
- [21] H. Kraus, V.A. Soltamov, D. Riedel, S. Vath, F. Fuchs, A. Sperlich, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. *Nature Phys.* **10**, 157–162 (2014).
- [22] A. Gottscholl, M. Wagenhöfer, V. Baianov, V. Dyakonov, A. Sperlich. *arXiv:2312.08251* (2023).
- [23] M. Widmann, S.-Y. Lee, T. Rendler, N.T. Son, H. Fedder, S. Paik, L.-P. Yang, N. Zhao, S. Yang, I. Booker, A. Denisenko, M. Jamali, S.A. Momenzadeh, I. Gerhardt, T. Ohshima, A. Gali, E. Janzén & J. Wrachtrup. *Nature Mater.* **14**, 164–168 (2015).
- [24] Z. Mu, S.A. Zargaleh, H.J. von Bardeleben, J.E. Fröch, M. Nonahal, H. Cai, X. Yang, J. Yang, X. Li, I. Aharonovich, W. Gao. *Nano Lett.* **20**, 8, 6142–6147 (2020).
- [25] C. Babin, R. Stöhr, N. Morioka, T. Linkewitz, T. Steidl, R. Wörnle, D. Liu, E. Hesselmeier, V. Vorobyov, A. Denisenko, M. Hentschel, C. Gobert, P. Berwian, G.V. Astakhov, W. Knolle, S. Majety, P. Saha, M. Radulaski, N.T. Son, J. Ul-Hassan, F. Kaiser, J. Wrachtrup. *Nature Mater.* **21**, 67–73 (2022).
- [26] T. Biktagirov, W. Gero Schmidt, U. Gerstmann, B. Yavkin, S. Orlinskii, P. Baranov, V. Dyakonov, V. Soltamov. *Phys. Rev. B* **98**, 195204 (2018).
- [27] Kh. Khazen, H.J. von Bardeleben, S.A. Zargaleh, J.L. Cantin, Mu Zhao, W. Gao, T. Biktagirov, U. Gerstmann. *Phys. Rev. B* **100**, 205202 (2019).
- [28] A.L. Falk, B.B. Buckley, G. Calusine, W.F. Koehl, V.V. Dobrovitski, A. Politi, C.A. Zorman, P.X.-L. Feng, D.D. Awschalom. *Nat. Commun.* **4**, 1819 (2013).
- [29] P.G. Baranov, I.V. Il'in, E.N. Mokhov, M.V. Muzafarova, S.B. Orlinskii, J. Schmidt. *JETP Lett.* **82**, 441 (2005).
- [30] J. Davidsson, V. Ivady, R. Armiento, T. Ohshima, N.T. Son, A. Gali, I.A. Abrikosov. *Appl. Phys. Lett.* **114**, 112107 (2019).
- [31] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, A.D. Roenkov. *Krist. Tech.* **14**, 729 (1979).
- [32] W.E. Carlos, N.Y. Garces, E.R. Glaser, M.A. Fanton. *Phys. Rev. B* **74**, 235201 (2006).
- [33] N.V. Abrosimov, D.G. Aref'ev, P. Becker, H. Bettin, A.D. Bulanov, M.F. Churbanov, S.V. Filimonov, V.A. Gavva, O.N. Godisov, A.V. Gusev, T.V. Kotereva, D. Nietzold, M. Peters, A.M. Potapov, H.-J. Pohl, A. Pramann, H. Riemann, P.-T. Scheel, R. Stosch, S. Wundrack, S. Zakel. *Metrologia* **54**, 599 (2017).
- [34] Из истории ФТИ им. Иоффе. Выпуск 4. Борис Павлович Константинов (к 100-летию со дня рождения). — СПб: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2010.

Редактор А.Н. Смирнов