Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 7, с. 481 – 489

Проявления электронно-ядерных взаимодействий в спектрах высокочастотного ДЭЯР/ОДМР для триплетных Si-C дивакансий в SiC, обогащенном изотопом ^{13}C

Р. А. Бабунц[+], *Ю. А. Успенская*[+1)], *А. С. Гурин*[+], *А. П. Бундакова*[+], *Г. В. Мамин*[*], *А. Н. Анисимов*[+], *Е. Н. Мохов*[+], *П. Г. Баранов*[+]

[+]*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия*

[*]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Казань, Россия*

Поступила в редакцию 2 сентября 2022 г.
После переработки 5 сентября 2022 г.
Принята к публикации 6 сентября 2022 г.

Определены частоты электронно-ядерных взаимодействий с ядрами ^{13}C и ^{29}Si на удаленных координационных сферах в триплетных спиновых центрах в виде нейтральных Si-C дивакансий в кристалле карбида кремния гексагонального политипа 6H-SiC, десятикратно обогащенном изотопом ^{13}C. Применялись методы высокочастотного двойного электронно-ядерного резонанса и оптически детектируемого магнитного резонанса в условиях оптического выстраивания спинов. Обнаружены осцилляции электронной спиновой плотности на ядрах ^{29}Si и ^{13}C. Переходы ядерного магнитного резонанса на ларморовских и близких к ним частотах ^{13}C и ^{29}Si вызывают гигантские изменения населенностей спиновых подуровней с трансформацией этих резонансов в сигналы электронного парамагнитного резонанса и оптические сигналы.

DOI: 10.31857/S1234567822190107, EDN: kinuso

Карбид кремния (SiC) широко используется в электронных устройствах с возможностью применения их в экстремальных условиях окружающей среды. В SiC имеются два семейства спиновых центров окраски с $S = 1$ и $S = 3/2$, обладающих свойством оптического выстраивания населенностей спиновых уровней. Уникальные магнитно-оптические свойства, позволяющие оптически манипулировать электронными и ядерными спинами в условиях окружающей среды, дают возможность рассматривать эти спиновые центры в качестве материальной платформы для спинтроники, сенсорики, квантовой обработки информации, разработки гибридных квантовых систем [1–22]. В настоящей работе будет рассмотрено семейство триплетных ($S = 1$) центров окраски, являющихся нейтральными дивакансиями в виде ковалентно связанной пары вакансий V_{Si}-V_C [1, 2, 10, 12]. Симметрия этих центров обусловлена направлением связи Si-C, расщепления тонкой структуры для этих центров находятся в гигагерцовом диапазоне, подобно NV-центрам в алмазе [12, 23].

Основные спиновые явления в SiC в значительной степени определяются наличием изотопов кремния и углерода с ядерными магнитными моментами, несмотря на то, что содержание этих изотопов составляет единицы процентов: 4.7 % для ^{29}Si и 1.1 % для ^{13}C. Для многих квантовых применений спиновых центров в SiC важно фиксировать величины (частоты) электронно-ядерных взаимодействий, при этом низкое содержание изотопов с ядерными магнитными моментами часто затрудняет эти измерения. Тем не менее эти частоты необходимы для управления ядерными и электронными спиновыми состояниями при использовании спиновых центров в качестве сенсоров, кубитов, создания гироскопов на ядерных спинах, поэтому для их определения мы использовали кристаллы SiC, обогащенные изотопом ^{13}C ~ 12 %.

В ряде алгоритмов применения спиновых центров в SiC в квантовой обработке информации рассматривается возможность использования ядерных спинов ^{13}C и ^{29}Si в качестве долговременной памяти, например, [12]. В данной статье с помощью двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР) получены частоты сверхтонких (СТ) взаимодействий электронного спина с ядерными магнитными моментами изотопов ^{13}C и ^{29}Si, в том числе и с ядрами, удаленными от места локализации спинового центра. Важной задачей для использования спиновых центров является выяснение воздействия высокого содержа-

1)e-mail: yulia.uspenskaya@mail.ioffe.ru

ния изотопа с ядерным магнитным моментом (более чем десятикратное увеличение содержания ^{13}C в настоящих исследованиях) на релаксационные характеристики этих центров.

Номинально нелегированные кристаллы 6H-SiC n-типа, обогащенные изотопом ^{13}C $\sim 12\,\%$, были выращены сублимационным сэндвич-методом [24]. Образцы подвергались облучению быстрыми нейтронами при комнатной температуре с дозой $\sim 10^{18}\,\text{см}^{-2}$ с последующим 30-минутным изохронным отжигом при температуре 700 °C. Кристаллы были выколоты в виде пластин с известной кристаллографической ориентацией с возможностью вращения образца в магнитном поле в заданных плоскостях.

Эксперименты по электронному парамагнитному резонансу (ЭПР) и оптически детектируемому магнитному резонансу (ОДМР) выполнены на радиоспектроскопическом комплексе, созданном в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, включающем высокочастотный спектрометр ЭПР/ОДМР диапазона 94 ГГц (W-диапазон) с использованием магнитооптического криостата замкнутого цикла, с диапазоном рабочих температур 1.5–300 K и широким диапазоном изменения магнитных полей $-7 \div +7$ Тл с переходом через нулевое значение. В комплекс также входит спектрометр ОДМР, выполненный на базе конфокального оптического микроскопа [25]. Сигналы ОДМР регистрировались при различных температурах, вплоть до комнатной температуры, с помощью синхронного детектирования при приложении постоянного магнитного поля и осциллирующего на низкой частоте переменного магнитного поля.

Для определения концентрации изотопа ^{13}C непосредственно в кристаллической решетке 6H-SiC был зарегистрирован спектр ЭПР (X-диапазон, 9.4 ГГц, $T = 300$ K) классической изолированной отрицательно заряженной вакансии кремния V_{Si}^{-} ($S = 3/2$) [26], который представлен на рис. 1a. Пунктирной черной линией показан симулированный спектр ЭПР для кристалла 6H-SiC с содержанием изотопа ^{13}C $\sim 12\,\%$ и природным содержанием изотопа ^{29}Si. Для сравнения пунктирной синей линией показан симулированный спектр ЭПР для кристалла 6H-SiC с природным содержанием изотопов ^{13}C и ^{29}Si. Обозначены СТ переходы для взаимодействия с ближайшими четырьмя атомами углерода, C_{NN}, где NN – *nearest neighbor*: атом углерода # 1 расположен вдоль оси c кристалла, три атома # 2–4 расположены в эквивалентных позициях вдоль связей, отвернутых на 70° от оси c. В образце, обогащенном ^{13}C, эти переходы чрезвычайно интенсивные, но видны и в симулированном спектре ЭПР в кристалле с природным содержанием изотопов. В последнем случае видны интенсивные сателлиты от взаимодействия с двенадцатью атомами кремния во второй координационной сфере относительно вакансии кремния, обозначенные как Si_{NNN}, где NNN – *next nearest neighbor*. СТ структура для взаимодействия с ^{29}Si составляет примерно 9 МГц (~ 0.3 мТл) [27].

На рисунке 1b приведены последовательности импульсов, которые использовались для регистрации спектров ЭПР и ДЭЯР по электронному спиновому эху (ЭСЭ) в диапазоне 94 ГГц, оптимальная последовательность $\pi/2$-τ-π соответствовала временам 36–280–72 нс. Измерения ДЭЯР проводились на спектрометре ЭПР Bruker Elexsys 680, частота 95 ГГц. Принцип регистрации ДЭЯР основан на использовании высокоэнергетического сигнала ЭПР для детектирования низкоэнергетических квантов ядерного магнитного резонанса (ЯМР), что позволяет на порядки повысить чувствительность регистрации ЯМР и исследовать малые расщепления энергий, которые в обычном ЭПР не разрешаются и просто приводят к уширению линий. Регистрация ДЭЯР проводилась в импульсном режиме, поэтому основная часть измерений была выполнена в режиме ЭСЭ.

На рисунке 1c представлена структура кристаллической решетки 6H-SiC, имеются две квазикубические (k1, k2) и гексагональная (h) позиции Si и C. Возможны три конфигурации нейтральных дивакансий Si-C, ориентированных вдоль оси c: (k1k1), (k2k2), (hh), так называемые P6 центры [28], а также набор дивакансий, отвернутых на 70° от оси c: (k1k2), (k1h), (k2h) – P7 центры [28]. Семейства P6 и P7 имеют триплетные основные состояния нейтральной дивакансии Si-C и характеризуются симметрией C3v и C1h соответственно. На рисунке 1c представлена только одна конфигурация дивакансии (k1k1), обозначим ее как P6′, остальные конфигурации легко получить, используя изображенную часть кристаллической решетки. На рисунке 1c также выделена изолированная отрицательно заряженная вакансия V_{Si^-} [26], спектр ЭПР которой показан на рис. 1a. Эта вакансия характеризуется нулевым параметром тонкой структуры, $D = 0$, [29] и не проявляет уникальных спиновых свойств в виде оптически индуцированного выстраивания спинов. Обозначены атомы углерода и кремния (C_{NN}, Si_{NNN}, C_{III}, Si_{IV}), расположенные в окружении вакансии кремния, входящей в дивакансию V_{Si}-V_{C}, выделенную на рис. 1c как P6′.

На рисунке 2 приведены зарегистрированные по ЭСЭ ориентационные зависимости спектров ЭПР

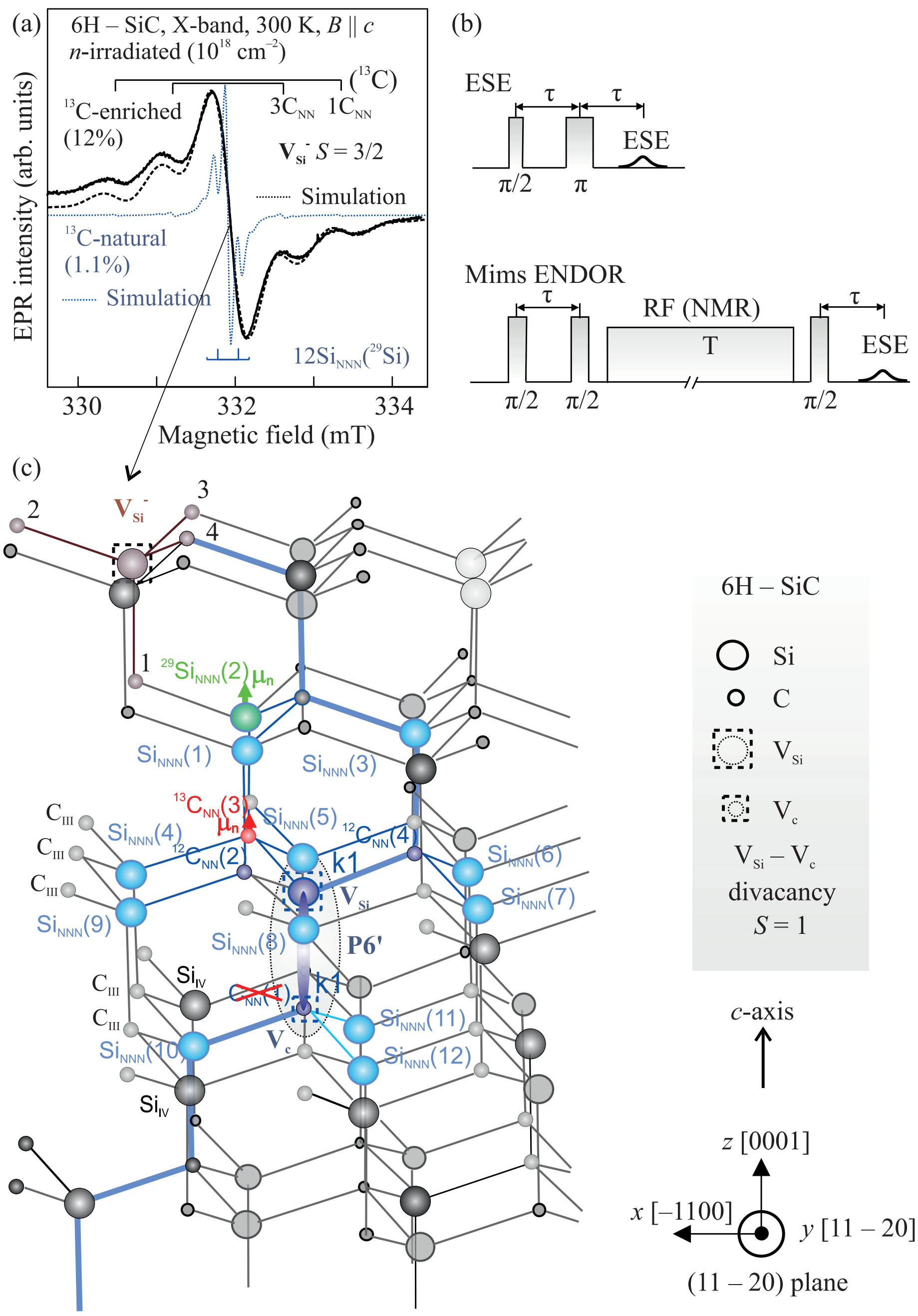

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Спектр ЭПР изолированной отрицательно заряженной вакансии кремния V_{Si}^- в кристалле 6H-SiC, обогащенном изотопом ^{13}C $\sim 12\,\%$, зарегистрированный на частоте 9.4 ГГц. Пунктирными линиями показаны симулированные спектры ЭПР (описание в тексте). (b) – Последовательности импульсов для регистрации спектров ЭСЭ и ДЭЯР в диапазоне 94 ГГц. (c) – Схематическое представление кристаллической решетки 6H-SiC. Представлена одна конфигурация дивакансии (k1k1). Обозначены атомы кремния и углерода, расположенные в окружении вакансии кремния, входящей в дивакансию V_{Si}-V_C. Условно показано попадание одного изотопа с ядерным магнитным моментом в окружение дивакансии

нейтральных дивакансий V_{Si}-V_C в кристалле 6H-SiC, обогащенном изотопом ^{13}C ($12\,\%$) при непрерывном оптическом лазерном возбуждении, длина волны 808 нм, температура 150 K. Для ориентации, близкой к $B \| c$ ($\theta = 0°$), черной линией показан спектр ЭПР при отсутствии оптического возбуждения. Видно, что в отсутствие света все линии ЭПР имеют одинаковую фазу, так как характеризуют оптиче-

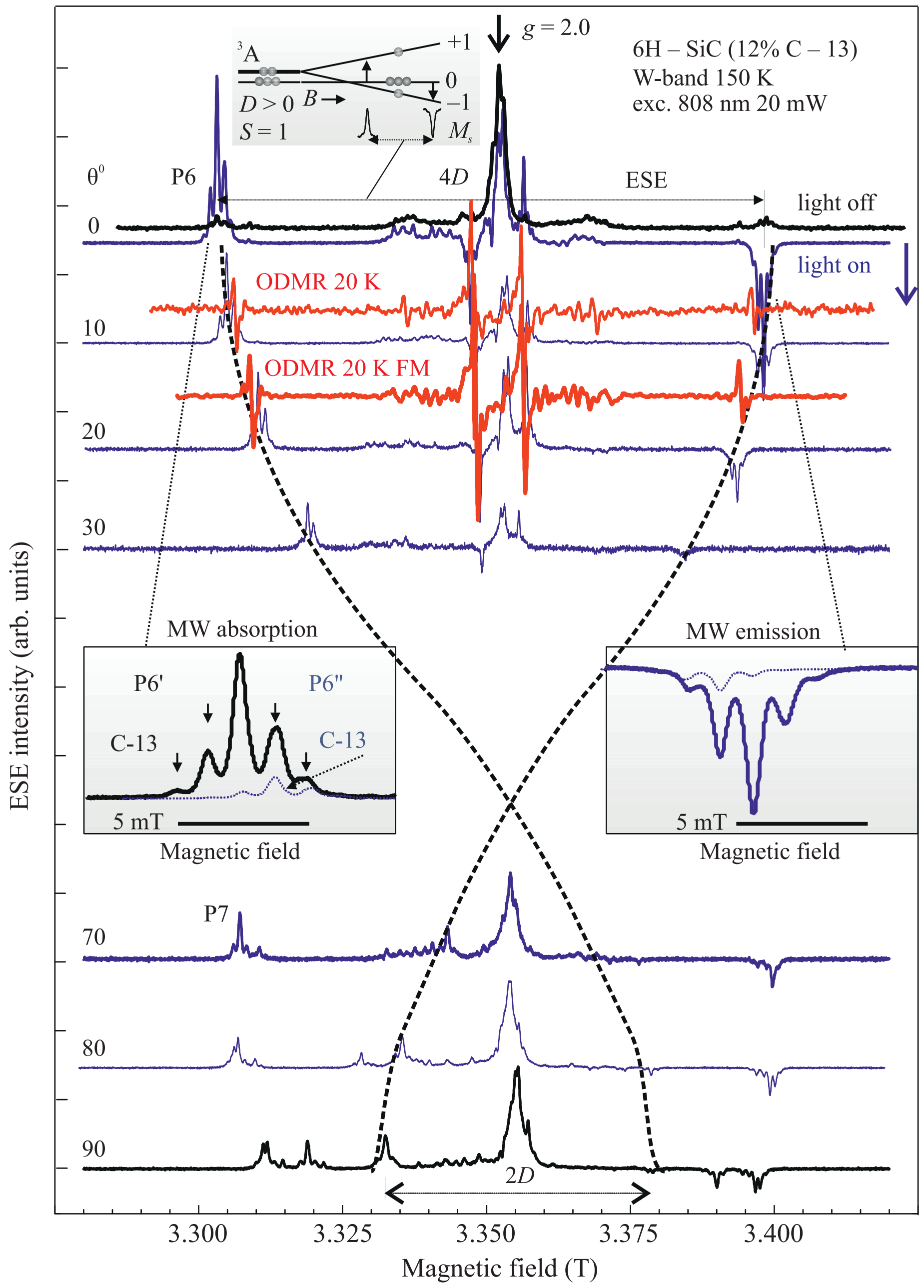

Рис. 2. (Цветной онлайн) Зарегистрированные по ЭСЭ ориентационные зависимости спектров ЭПР нейтральных дивакансий V_{Si}-V_C в кристалле 6H-SiC, обогащенном изотопом ^{13}C $\sim 12\,\%$ при непрерывном оптическом лазерном возбуждении (описание в тексте). Красным цветом представлены два спектра ОДМР, зарегистрированные в том же образце, что и спектры ЭСЭ. Все спектры зарегистрированы на частоте 94 ГГц (W-диапазон)

ское поглощение микроволновой энергии, в то же время оптическое возбуждение приводит к инвертированию фаз для ряда переходов, что объясняется наличием излучения вместо поглощения микроволновой энергии. На вставке в увеличенном масштабе представлены линии излучения и поглощения микроволновой мощности для ориентации близкой к $\theta = 0°$, где отчетливо проявляется СТ структура ^{13}C для двух P6 центров (P6$'$ и P6$''$) в виде переходов для взаимодействия с ближайшими тремя атомами углерода #2–4, расположенными в эквивалентных позициях вдоль связей, отвернутых на 70° от оси c, $\theta = 70°$ (см. рис. 1c). В ориентации $\theta = 70°$ проявляются спектры ЭПР нейтральных дивакансий V_{Si}-V_C, отвернутых на 70° от оси c (P7 центры).

Красным цветом представлены два спектра ОДМР, зарегистрированные в том же образце при двух ориентациях. Сигналы в области $g = 2$ (в диапазоне магнитных полей 3.347–3.357 Тл) принадлежат семейству спиновых центров с $S = 3/2$ и будут рассмотрены в отдельной работе. Фаза линий ОДМР одинакова для обоих переходов, хотя эти линии соответствуют поглощению и излучению микроволнового излучения. Таким образом, поглощение и излучение микроволновой мощности приводят к одним и тем же изменениям интенсивности фотолюминесценции спиновых центров.

Спиновый гамильтониан, описывающий основное состояние нейтральной дивакансии V_{Si}-V_C в SiC, имеет вид [12]:

$$\hat{H} = g_e\mu_B\mathbf{B}\cdot\hat{\mathbf{S}} + D[\hat{S}_z^2 - (1/3)S(S+1)] + \\ + E[\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2] + \Sigma_i(\hat{\mathbf{S}}\cdot\mathbf{A}_i\cdot\hat{\mathbf{I}}_i - g_{\mathrm{N}i}\mu_{\mathrm{N}}\mathbf{B}\cdot\hat{\mathbf{I}}_i). \qquad (1)$$

Здесь $\hat{\mathbf{S}}$ – оператор спина электрона с $S = 1$, g_e – изотропный электронный g-фактор, равный ~ 2.0, μ_B – магнетон Бора. Первый член описывает зеемановское взаимодействие электронов, второй и третий члены отражают тонкую структуру вследствие взаимодействия с кристаллическим полем, при этом $E = 0$ для P6 центров и отлично от нуля для P7 центров. СТ структура в спектрах ЭПР и ДЭЯР описывается последними членами спинового гамильтониана под знаком суммирования. Представлены операторы ядерного спина для ядер ^{29}Si ($I_{\mathrm{Si}} = 1/2$) или ^{13}C ($I_{\mathrm{C}} = 1/2$), расположенных в разных координационных сферах относительно положений дивакансии V_{Si}-V_C, $g_{\mathrm{N}i}$ – g-фактор ядра i (g_{N} – отрицательный для ^{29}Si и положительный для ^{13}C), μ_{N} – ядерный магнетон. Первая часть суммы отражает сверхтонкое взаимодействие, где $\mathbf{A}_i$ – тензор, описывающий СТ взаимодействие с i-ми атомами Si или C. СТ взаимодействия в первой и второй сферах относительно вакансии Si частично разрешены в спектрах ЭПР. Вторая часть под знаком суммирования описывает ядерное зеемановское взаимодействие для ядер ^{29}Si и ^{13}C.

Без внешнего магнитного поля ($B = 0$) основное состояние $S = 1$ расщепляется из-за наличия аксиального кристаллического поля с параметром тонкой структуры D, расщепление между подуровнями $M_S = 0$ и $M_S = \pm 1$ имеет значение $\Delta = D$. Оптическое возбуждение приводит к изменению населенностей (выстраиванию) спиновых состояний дивакансии в SiC, в результате избыточно населяется уровень $M_S = 0$ и опустошаются уровни $M_S = \pm 1$ (вставка на рис. 2). Изменение населенностей уровней в результате резонансного воздействия микроволнового излучения приводит к сильным изменениям интенсивности фотолюминесценции (ФЛ). Этот эффект позволяет осуществить оптическое детектирование магнитного резонанса. Техника ОДМР приводит к гигантскому увеличению чувствительности, вплоть до возможности регистрировать одиночные спины [10, 11, 23].

Параметры тонкой структуры рассматриваемых в настоящей работе триплетных центров приведены в ряде работ [28, 30, 31], в них представлены различные конфликтующие модели, которые были пересмотрены и окончательно установлены как нейтральные дивакансии V_{Si}-V_C в основном триплетном состоянии в 6H-SiC [1]. Было показано, что основное состояние соответствует $S = 1$, в результате сделан вывод о нейтральном зарядовом состоянии дивакансии в решетке SiC, т.е. имеются по 4 электрона на связях для вакансии углерода и кремния. Позднее модель нейтральной дивакансии была подтверждена в 4H-SiC [2]. Параметры D для семейства P6 и P7, найденные в различных работах, в основном совпадают, несмотря на различие в интерпретации структуры этих центров. В наших экспериментах для P6′ и P6″ параметр D равен $\sim 440\times10^{-4}$ см$^{-1}$ и $\sim 430\times10^{-4}$ см$^{-1}$ соответственно.

Частоты переходов ДЭЯР, определяемые правилами отбора, $\Delta M_S = 0$ и $\Delta m_I = \pm 1$, даются формулами [12]:

$$\nu_{\mathrm{ENDOR}i} = h^{-1}|M_S[a_i + b_i(3\cos^2\theta - 1)] - g_{\mathrm{N}i}\mu_{\mathrm{N}}B|, \quad (2)$$

где a_i и b_i – изотропная и анизотропная части СТ взаимодействия с i-м ядром, θ – угол между внешним магнитным полем B и тензором СТ взаимодействия, $g_{\mathrm{N}i}\mu_{\mathrm{N}}B/h$ – ларморовская частота f_L. Компоненты тензора СТ взаимодействия могут быть выражены через изотропную a- и анизотропную b-компоненты как $\mathrm{A}_\parallel = a + 2b$ и $\mathrm{A}_\perp = a - b$ с аксиальной симметрией относительно оси p-функции. Здесь $a = (8\pi/3)g_e\mu_B g_{\mathrm{N}}\mu_{\mathrm{N}}|\Psi_{2s}(0)|^2$ и $b = (2/5)g_e\mu_B g_{\mathrm{N}}\mu_{\mathrm{N}}\langle r_{2p}^{-3}\rangle$, где g_e – электронный g-фактор, а Ψ – волновая функция неспаренного электрона, т.е. значения a и b дают возможность однозначно определять спиновую плотность на ядрах лигандов.

На рисунке 3 представлены зарегистрированные по ЭСЭ спектры ДЭЯР дивакансий V_{Si}-V_C в кристалле 6H-SiC, обогащенном изотопом ^{13}C $\sim 12\,\%$ при непрерывном оптическом возбуждении лазером 808 нм и температуре 150 К. Справа представлен спектр ЭПР, зарегистрированный по ЭСЭ в ориентации, близкой к $B\|c$ ($\theta = 0°$). Спектры ДЭЯР, обозначенные как lf (*low field*) и hf (*high field*), соответ-

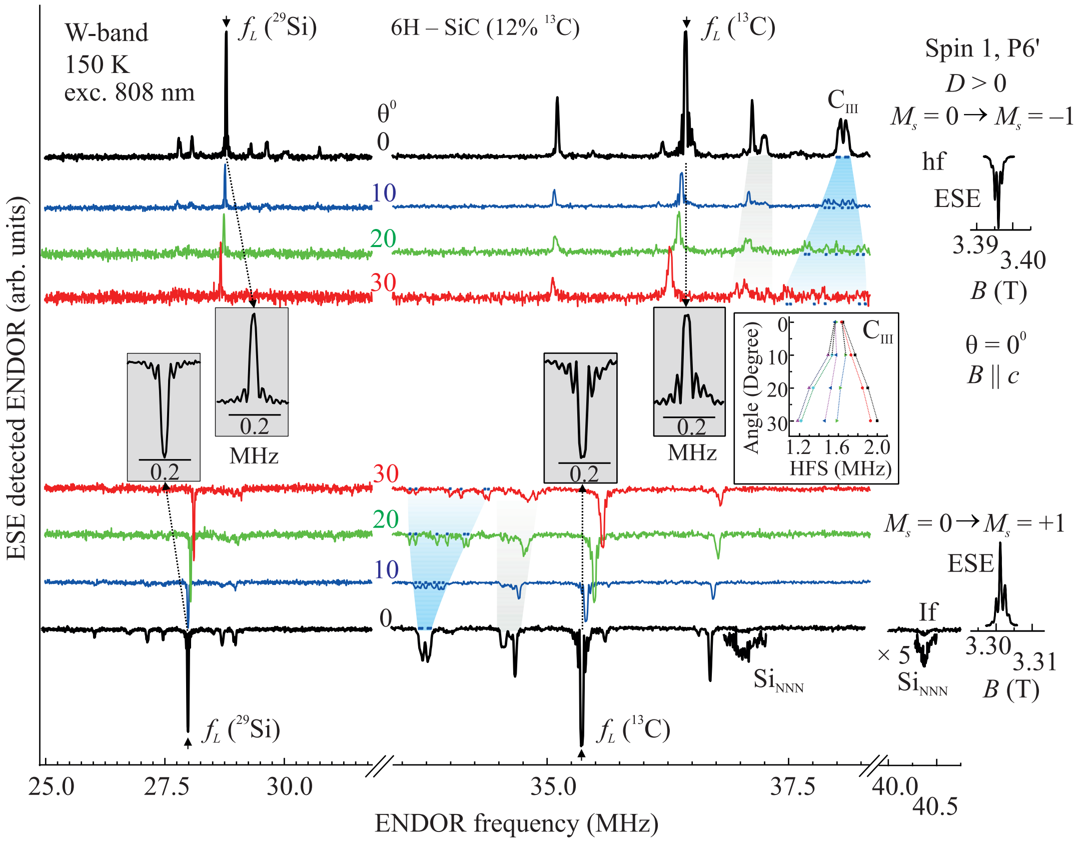

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зарегистрированные по ЭСЭ в диапазоне 94 ГГц спектры ДЭЯР нейтральной дивакансии V_{Si}-V_C, P6′, в кристалле 6H-SiC, обогащенном изотопом ^{13}C ∼ 12 % при непрерывном оптическом лазерном возбуждении. Справа представлены две линии ЭПР P6′ центров: высокополевая (hf) и низкополевая (lf). На вставках показаны в увеличенном масштабе линии ДЭЯР, зарегистрированные в области ларморовских частот ^{13}C и ^{29}Si. На правой вставке представлена угловая зависимость СТ структуры (HFS) для одной из групп координационной сферы C_{III}

ствуют низкополевому и высокополевому ЭПР переходам, показанным справа. Наблюдается зеркальное отражение линий ДЭЯР, обусловленных СТ взаимодействиями с ^{13}C и ^{29}Si, находящихся в различных координационных сферах относительно дивакансии, зарегистрированных по низкополевому и высокополевому переходам. СТ взаимодействия с ядрами ^{29}Si и ^{13}C однозначно разделены благодаря селективному заселению уровней тонкой структуры с определенными значениями M_S. Определены знаки этих взаимодействий и, как следствие, знаки осциллирующей спиновой плотности на ядрах ^{29}Si и ^{13}C. Определены значения СТ взаимодействия с ядрами ^{29}Si и ^{13}C, которые могут быть использованы рядом алгоритмов квантовой обработки информации в качестве долговременной памяти (см., например, [32]).

Отличительной особенностью спектров ДЭЯР является наблюдение интенсивных сигналов на ларморовских частотах ^{13}C и ^{29}Si, т.е. переходы ЯМР на удаленных сферах от дивакансии с $S = 1$ индуцируют сильные изменения населенностей спиновых подуровней центра, что и отражается в изменениях интенсивности ЭСЭ. На вставках рис. 3 показаны в увеличенном масштабе линии ДЭЯР, зарегистрированные в области ларморовских частот ^{13}C и ^{29}Si. На правой вставке рис. 3 представлена угловая зависимость СТ структуры (*hyper-fine structure – HFS*) для одной из групп координационной сферы C_{III}.

В соответствии с предложенной моделью нейтральной дивакансии с $S = 1$ основную роль для СТ взаимодействий играет вакансия кремния, в ближайшем окружении которой находятся три атома углерода C_{NN} (один атом углерода, # 1, расположенный вдоль оси *c* кристалла отсутствует), # 2–4, расположенные в эквивалентных позициях вдоль связей, отвернутых на 70° от оси *c*. На вставке рис. 2 показаны сателлиты, обусловленные СТ взаимодействиями именно с тремя атомами углерода, обозначенные как # 2, # 3 и # 4 на схеме рис. 1с. Отметим, что в спектре ЭПР на рис. 1а для изолированной (темной) ва-

Таблица 1. Сверхтонкие взаимодействия с ядрами ^{13}C и ^{29}Si, окружающими нейтральные дивакансии Si-C со спином $S = 1$, обозначенные как P6′ и P6″ в 6H-SiC. СТ взаимодействие с тремя атомами C, расположенными в ближайшем окружении (NN) кремниевой вакансии, входящей в состав дивакансии, имеет симметрию, близкую к аксиальной вдоль направления связи Si-C, поэтому параметры даны параллельно связи ($A_\parallel$) и перпендикулярно связи ($A_\perp$). Структура центра P6′ и обозначения атомов C и Si приведены на рис. 1c. Жирным шрифтом выделены группы линий, принадлежащих одному типу позиций атомов углерода

Центр	Позиция C и Si	Расщепления СТ взаимодействия для ^{13}C, ^{29}Si (МГц)
P6′	C_{NN}(2-4)	$A_{70} = 60$ $A_\parallel \approx 114$, $A_\perp \approx 49$ z-ось ($\parallel$) вдоль направления связи V_{Si}-C_{NN}
	C_{III}	$\theta = 0$: **1.651**, **1.637**, **1.582**; **1.568**, 0.798, 0.672; -1.346, -1.221, -0.256
		$\theta = 10$: **1.776**, **1.734**, **1.678**, **1.582**, **1.540**, **1.498**; -1.317
		$\theta = 20$: **1.907**, **1.852**, **1.623**, **1.525**, **1.345**, **1.303**; 0.95, 0.881, 0.839, 0.728, 0.7; -1.283
		$\theta = 30$: **2.004**, **1.935**, **1.588**, **1.463**, **1.22**, **1.185**; 1.006, 0.776, 0.693; -1.221 Удаленные координационные сферы 0.067, 0.038; -0.064, -0.036
	Si_{NNN} (1-12)	Si_{NNN} (1-3): 19.412 Si_{NNN} (4-9): 9.09, 9.15 Si_{NNN} (10-12): $\theta = 0$: 1.015, 0.987, 0.736, 0.721, 0.553; -1.945, -1.244, -0.836, -0.513 Удаленные координационные сферы 0.062, 0.035; -0.064, -0.038
P6″	C_{NN} (2-4) [C_I]	$A_{70} = 55$ $A_\parallel \approx 105$, $A_\perp \approx 44$ z-ось ($\parallel$) вдоль направления связи V_{Si}-C_{NN}

вакансии кремния с $S = 3/2$ имеется также взаимодействие с атомом углерода # 1, который отсутствует в дивакансии.

В таблице 1 представлены сверхтонкие взаимодействия с ядрами ^{13}C и ^{29}Si, окружающими нейтральную дивакансию Si-C, обозначенные как P6′ и P6″. По данным ЭПР, СТ взаимодействие с тремя атомами углерода, расположенными в ближайшем окружении кремниевой вакансии, входящей в состав дивакансии, имеет симметрию близкую к аксиальной вдоль направления связи, поэтому параметры даны параллельно связи ($A_\parallel$) и перпендикулярно связи ($A_\perp$). Константа СТ взаимодействия определяется по формуле $A = (A_\parallel^2 \cos^2\theta + A_\perp^2 \sin^2\theta)^{1/2}$.

Структура центра P6′ и обозначения атомов C и Si приведены на рис. 1c. Положительным значениям СТ расщепления для ^{29}Si соответствует отрицательная спиновая плотность, а положительным значениям СТ расщепления для ^{13}C соответствует положительная спиновая плотность (также верно обратное утверждение). Мы не анализировали полные ориентационные зависимости сигналов ДЭЯР, так как при больших значениях угла линии ЭПР начинают перекрываться, как для разных переходов в дивакансии, так и с линиями ЭПР других спиновых центров. Тем не менее в табл. 1 мы приводим значения СТ взаимодействий с различными координационными сферами, полученными из спектров ДЭЯР. Видно, что ряд сигналов обладает сильной анизотропией, также различие в знаках может дать информацию для идентификации позиции атомов ^{13}C и ^{29}Si. Необходимо проведение теоретических расчетов для обоснования наблюдаемых СТ взаимодействий, что выходит за рамки настоящей работы.

Широкие возможности для применения карбида кремния в сенсорике, квантовых вычислениях и для создания квантовых гироскопов открываются благодаря эффективному воздействию ЯМР на ларморовских частотах ^{13}C и ^{29}Si на сигнал ЭСЭ, что непосредственно связано с изменением населенностей электронных спиновых уровней, и, как результат, превращение ЯМР в оптические сигналы. Подобные эффекты наблюдались для NV-центров в алмазе, которые также имеют триплетное основное состояние, как и дивакансии, в которых используются ядерные магнитные моменты для долговременной записи информации и при создании гироскопов. Именно для таких применений необходимо использование SiC, обогащенного изотопами с магнитными моментами в фиксированных пропорциях, поскольку большинство применений основывается на использовании свойств ядерных магнитных моментов изотопов ^{13}C и ^{29}Si. При этом важную роль может играть различие в знаках магнитных моментов ^{13}C и ^{29}Si, так как ожидается эффективная компенсация нежелательных вращений ядер при их использовании для разработки гироскопических приборов. Параллельная регистрация ОДМР в 6H-SiC (^{13}C $\sim 12\,\%$) свидетельствует о том, что любые изменения населенностей электронных спиновых подуровней изменяют интенсивность люминесценции спиновых центров.

Заключение. Методами высокочастотного импульсного ЭПР и ДЭЯР определены величины электронно-ядерных взаимодействий с ядрами углерода ^{13}C и кремния ^{29}Si на удаленных оболочках для нейтральных дивакансий со спином $S = 1$ в условиях оптически индуцированного выстраивания спинов в 6H-SiC, десятикратно обогащенном изотопом ^{13}C. Сверхтонкие взаимодействия с ядрами ^{13}C и ^{29}Si однозначно разделены благодаря селективному заселению уровней тонкой структуры с определенными значениями M_S. Определены знаки этих взаимодействий и обнаружены осцилляции спиновой плотности на ядрах ^{29}Si и ^{13}C. Ранее такой эффект был обнаружен для центров окраски с $S = 3/2$ в SiC [27], а также теоретически предсказан для NV-центров в алмазе [33]. Переходы ЯМР на ларморовских частотах ^{13}C и ^{29}Si и частотах, чрезвычайно близких к ларморовским, отстоящих от них на килогерцы с осциллирующей спиновой плотностью, вызывают гигантские изменения населенностей спиновых подуровней. Этот эффект свидетельствует о сильном воздействии ЯМР на удаленных ядрах на населенности электронных спиновых уровней, изменения которых могут трансформироваться в сигналы ЭСЭ и оптические сигналы. Отметим, что оптические сигналы совместимы с полосой прозрачности волоконной оптики и живой материи.

Авторы работы выражают глубокую благодарность Орлинскому Сергею Борисовичу за плодотворное сотрудничество, ценные и конструктивные предложения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 20-12-00216).

1. P. G. Baranov, I. V. Il'in, E. N. Mokhov, M. V. Muzafarova, S. B. Orlinskii, and J. Schmidt, JETP Lett. **82**, 441 (2005).
2. N. T. Son, P. Carlsson, J. ul Hassan, E. Janzén, T. Umeda, J. Isoya, A. Gali, M. Bockstedte, N. Morishita, T. Ohshima, and H. Itoh, Phys. Rev. Lett. **96**, 055501 (2006).
3. P. G. Baranov, A. P. Bundakova, I. V. Borovykh, S. B. Orlinskii, R. Zondervan, and J. Schmidt, JETP Lett. **86**, 202 (2007).
4. J. R. Weber, W. F. Koehl, J. B. Varley, A. Janotti, B. B. Buckley, C. G. van de Walle, and D. D. Awschalom, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **107**, 8513 (2010).
5. W. F. Koehl, B. B. Buckley, F. J. Heremans, G. Calusine, and D. D. Awschalom, Nature **479**, 84 (2011).
6. P. G. Baranov, A. P. Bundakova, A. A. Soltamova, S. B. Orlinskii, I. V. Borovykh, R. Zondervan, R. Verberk, and J. Schmidt, Phys. Rev. B **83**, 125203 (2011).
7. V. A. Soltamov, A. A. Soltamova, P. G. Baranov, and I. I. Proskuryakov, Phys. Rev. Lett. **108**, 226402 (2012).
8. D. Riedel, F. Fuchs, H. Kraus, S. Väth, A. Sperlich, V. Dyakonov, A. A. Soltamova, P. G. Baranov, V. A. Ilyin, and G. V. Astakhov, Phys. Rev. Lett. **109**, 226402 (2012).
9. H. Kraus, V. A. Soltamov, D. Riedel, S. Väth, F. Fuchs, A. Sperlich, P. G. Baranov, V. Dyakonov, and G. V. Astakhov, Nat. Phys. **10**, 157 (2014).
10. D. J. Christle, A. L. Falk, P. Andrich, P. V. Klimov, J. U. Hassan, N. T. Son, E. Janzén, T. Ohshima, and D. D. Awschalom, Nat. Mater. **14**, 160 (2015).
11. M. Widmann, S.-Y. Lee, T. Rendler et al. (Collaboration), Nat. Mater. **14**, 164 (2015).
12. P. G. Baranov, H. J. von Bardeleben, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, *Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures: Basic and Advanced Applications*, Springer Series in Materials Science, Springer-Verlag GmbH Austria (2017), v. 253.
13. 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, and P. G. Baranov, Phys. Rev. Lett. **115**, 247602 (2015).
14. S. A. Tarasenko, A. V. Poshakinskiy, D. Simin, V. A. Soltamov, E. N. Mokhov, P. G. Baranov, V. Dyakonov, and G. V. Astakhov,, Phys. Status Solidi B **255**, 1700258 (2018).
15. 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, and V. Dyakonov, Nat. Commun. **10**, 678 (2019).

16. H. Singh, A. N. Anisimov, S. S. Nagalyuk, E. N. Mokhov, P. G. Baranov, and D. Suter, Phys. Rev. B **101**, 134110 (2020).
17. H. Singh, A. N. Anisimov, I. D. Breev, P. G. Baranov, and D. Suter, Phys. Rev. B **103**, 104103 (2021).
18. C. J. Cochrane, J. Blacksberg, M. A. Anders, and P. M. Lenahan, Sci. Rep. **6**, 37077 (2016).
19. A. N. Anisimov, V. A. Soltamov, I. D. Breev, M. M. Khalisov, R. A. Babunts, A. V. Ankudinov, and P. G. Baranov, JETP Lett. **108**, 610 (2018).
20. A. N. Anisimov, R. A. Babunts, I. D. Breev, V. A. Soltamov, E. N. Mokhov, and P. G. Baranov, JETP Lett. **112**, 774 (2020).
21. R. A. Babunts, A. N. Anisimov, I. D. Breev, A. S. Gurin, A. P. Bundakova, M. V. Muzafarova, E. N. Mokhov, and P. G. Baranov, JETP Lett. **114**, 463 (2021).
22. I. D. Breev, K. V. Likhachev, V. V. Jakovleva, I. P. Veishtort, A. M. Skomorokhov, S. S. Nagalyuk, E. N. Mokhov, G. V. Astakhov, P. G. Baranov, and A. N. Anisimov, JETP Lett. **114**, 274 (2021).
23. A. Gruber, A. Drabenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, and C. von Borczyskowski, Science **276**, 2012 (1997).
24. Yu. A. Vodakov, E. N. Mokhov, M. G. Ramm, and A. D. Roenkov, Krist. Tech. **14**, 729 (1979).
25. E. V. Edinach, Yu. A. Uspenskaya, A. S. Gurin, R. A. Babunts, H. R. Asatryan, N. G. Romanov, A. G. Badalyan, and P. G. Baranov, Phys. Rev. B **100**, 104435 (2019).
26. T. Wimbauer, B. K. Meyer, A. Hofstaetter, A. Scharmann, and H. Overhof, Phys. Rev. B **56**, 7384 (1997).
27. V. A. Soltamov, B. V. Yavkin, G. V. Mamin, S. B. Orlinskii, I. D. Breev, A. P. Bundakova, R. A. Babunts, A. N. Anisimov, and P. G. Baranov, Phys. Rev. B **104**, 125205 (2021).
28. V. S. Vainer and V. A. Il'in, Sov. Phys. Solid State **23**, 2126 (1981).
29. S. B. Orlinski, J. Schmidt, E. N. Mokhov, and P. G. Baranov, Phys. Rev. B **67**, 125207 (2003).
30. Th. Lingner, S. Greulich-Weber, J.-M. Spaeth, U. Gerstmann, E. Rauls, Z. Hajnal, Th. Frauenheim, and H. Overhof, Phys. Rev. B **64**, 245212 (2001).
31. M. V. B. Pinheiro, E. Rauls, U. Gerstmann, S. Greulich-Weber, H. Overhof, and J.-M. Spaeth, Phys. Rev. B **70**, 245204 (2004).
32. S. Pezzagna and J. Meijer, Appl. Phys. Rev. **8**, 011308 (2021).
33. A. Gali, M. Fyta, and E. Kaxiras, Phys. Rev. B **77**, 155206 (2008).