

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ОДИНОЧНОГО NV⁻-ЦЕНТРА В АЛМАЗЕ

Н. С. Кукин^{a,b}, А. Р. Мурадова^{a,b}, А. К. Никитин^{a,b}, А. А. Бухтияров^a,
П. А. Семенов^b, А. Н. Васильев^b, Н. И. Каргин^b, М. О. Смирнова^b, С. А. Терентьев^c,
С. А. Тарелкин^c, Н. В. Корнилов^c*

^a АНО «Институт инженерной физики»
142210, Серпухов, Московская область, Россия

^b Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Россия

^c Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов»
108840, Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.,
после переработки 31 мая 2023 г.
Принята к публикации 7 июня 2023 г.

Экспериментально исследованы спектры оптически детектируемого магнитного резонанса одиночных NV⁻-центров в двух твердотельных образцах в области сверхтонкого взаимодействия спина электрона NV⁻-центра со спином ядра азота в этом же центре. Цель исследований — получить максимальное разрешение по частоте СВЧ в используемой экспериментальной установке. Для измерений были выращены два монокристаллических образца алмаза с низким содержанием азота (не более 50 ppb). Измеренное время спиновой декогеренции T_2^* NV⁻-центров составило в первом образце около 2 мкс, а на втором — 20 мкс. Для этих двух образцов был получен и исследован спектр оптически детектируемого магнитного резонанса сверхтонкого расщепления одиночного NV⁻-центра и атома ¹⁴N. Оценка величины разрешения в этих образцах составляет 3.5 МГц и 0.18 МГц соответственно. Отмечено, что с увеличением времени спиновой декогеренции T_2^* одиночного NV⁻-центра улучшается разрешение спектра.

DOI: 10.31857/S00044451023120039
EDN: NBMXRL

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее перспективных квантовых систем для применения в области квантовых технологий являются отрицательно заряженные центры окраски NV⁻ в алмазе (далее NV). Они привлекают внимание исследователей благодаря своим беспрецедентным оптическим и спиновым свойствам при комнатной температуре [1–3]. Как квантовый объект NV-центры в алмазе имеют набор энергетических уровней, между которыми можно возбуждать переходы при приложении резонансного излу-

чения. Частоты переходов NV-центров в микроволновом диапазоне зависят от магнитного поля. Схема переходов NV-центров в видимом диапазоне позволяет проводить эти измерения оптически. Традиционным методом исследований NV-центров является метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) [4, 5]. Прецизионное измерение спектра ОДМР позволяет оценить качество образцов алмаза, включая изучение структуры и состава добавок вокруг NV-центров.

В течение последних нескольких лет мы плотно работаем с ФГБНУ «ТИСНУМ» по получению полностью изготовленных в России образцов искусственных алмазов с одиночными NV-центрами, располагающимися в заранее запланированных местах внутри образцов. С каждым годом получаемые из

* E-mail: n.s.kukin@mail.ru



Рис. 1. Схема эксперимента

ТИСНУМ образцы становятся лучше и приближают нас к конечной цели. Главной задачей наших исследований, описанных в данной статье, была выработка рекомендаций для создания в России надежной технологии роста таких «чистых» образцов для приложений квантовой информатики. Для этого были исследованы два типичных образца, изготовленных в последнее время с интервалом в год с учетом рекомендаций, накопленных нами при исследовании предыдущих образцов. В качестве критерия необходимых для квантовой информатики российских образцов на этот раз было выбрано измерение чувствительности спектра ОДМР одиночного NV-центра в алмазе.

Заметим также, что центры окраски в алмазе являются перспективной квантовой системой для высокочувствительной оптической магнитометрии [6, 7]. Чувствительность сенсора для всех этих исследований определяется максимальным разрешением ОДМР-спектра по частоте.

В данной работе были исследованы два образца искусственных алмазов с целью достижения наилучшего для экспериментальной установки (рис. 1) разрешения по частоте СВЧ в ОДМР-спектре одиночных NV-центров. Кристаллические решетки в обоих образцах имели ориентацию в направлении [111]. Оба образца были выращены методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод) по разработанной технологии синтеза сверхчистых алмазов с содержанием азота ниже определяемого порога чувствительности концентрации азота в алмазах. Оба образца имели низкий уровень концентрации азота (не более 50 ppb). Однако, поскольку технология синтеза постоянно развивается, есть основания полагать, что концентрация азота во втором образце оказалась ниже, по крайней мере в районе

исследованных нескольких центров и их окружений. Кроме того, в процессе синтеза образцов были созданы условия для формирования слоя одиночных NV-центров на глубине в несколько микрометров от поверхности.

Исследования проводились в области расщепления по частоте СВЧ пиков ОДМР на три пика благодаря сверхтонкому взаимодействию спина электронов NV-центра со спином ядра азота ^{14}N ($S = 1$) в этом же центре. Для исключения неопределенности в спектре ОДМР при исследованиях применялось небольшое внешнее магнитное поле (10 мТл), направленное вдоль оси NV-центра и снимающее вырождение уровней для разных проекций спина NV-центра на направление магнитного поля за счет эффекта Зеемана.

Поскольку, как показано в работе [8], измерения с непрерывной лазерной накачкой дают ширину пиков в ОДМР-спектре на порядок больше, чем импульсные схемы, для проведения исследований был выбран метод с импульсной лазерной накачкой.

Взаимодействие одиночного NV-центра с окружающей его средой ограничивает чувствительность спектра ОДМР, уменьшая когерентность квантовых состояний. Поэтому важно найти такой NV-центр в образце, время когерентности которого будет максимальным для данного образца. Тогда можно ожидать наиболее высокое разрешение (по частоте СВЧ) измеренного спектра ОДМР в этом центре окраски, которое необходимо для многих задач квантовой информатики и которое, например, определяет чувствительность квантового сенсора NV-магнитометрии.

В одиночном NV-центре за счет различных взаимодействий электронного спина этого NV-центра с его окружением, например с кристаллической ре-

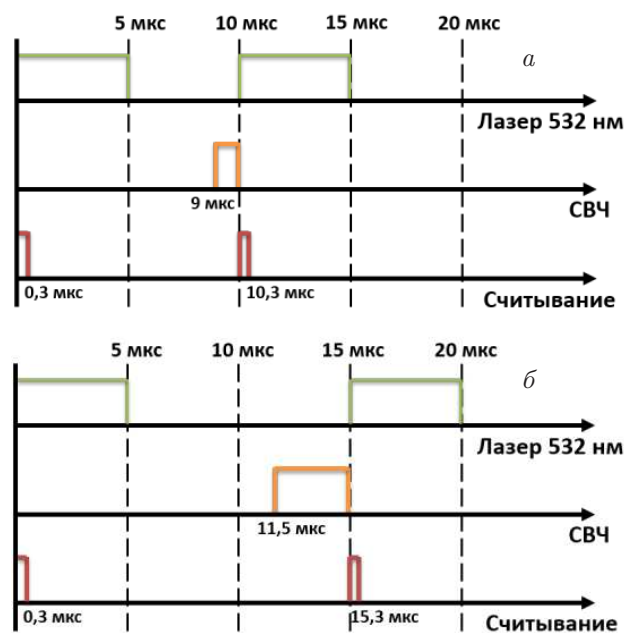


Рис. 2. Измерение ОДМР-спектра при малом малых (а) и больших (б) значениях T_2^*

шеткой алмаза, спиновая система будет релаксировать к состоянию равновесия. Время продольной релаксации T_1 связано с передачей энергии от спиновой системы к решетке, что приводит к деполяризации NV-центра.

Спин-спиновые взаимодействия, включающие все механизмы, посредством которых спины могут обмениваться энергией друг с другом, а не с решеткой в целом, разрушают когерентность между спиновыми состояниями. Время поперечной релаксации T_2 связано с этими взаимодействиями и определяет спиновую декогеренцию NV-центра.

В образце обязательно присутствуют разные локальные неоднородности, потенциалы, механические напряжения и другие факторы, которые приводят к уменьшению времени T_2 . Такое время принято обозначать T_2^* и называть временем расфазировки. Поскольку оно является наименьшим, его влияние становится определяющим. Его называют временем спиновой декогеренции.

Время когерентности квантового состояния NV-центра было оценено из затуханий осцилляций Раби на этом центре. Данные хорошо аппроксимируются экспонентой с постоянной затухания τ [9]. Этот параметр определяется через время продольной релаксации T_1 и время декогерентности T_2^* по формуле [10]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{3}{4T_1} + \frac{1}{2T_2^*}.$$

Без разделения вкладов T_1 и T_2^* была получена оценка времени декогеренции центра окраски по величине параметра τ .

2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка включала в себя конфокальный микроскоп от компании НТ-МДТ (Зеленоград, Московская обл.), формирующий оптический тракт для расположенного в синтетическом монокристалле алмаза с ориентацией [111] одиночного NV-центра. Возбуждение осуществлялось импульсным или непрерывным модулированным лазером с длиной волны 532 нм и средней мощностью в непрерывном режиме 230 мВт. Результаты измерений уровня флуоресценции после воздействия СВЧ нормировались на уровень флуоресценции при отсутствии СВЧ для исключения влияния долговременных воздействий (механическое смещение образца, нестабильность лазера и т.д.). Целесообразность нормировки была обусловлена наличием корреляции флуоресценции до и после воздействия СВЧ. Схема эксперимента и временная последовательность управляющих сигналов представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Синтез образцов был проведен методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе MPACVD BJS150 PLASSYS на монокристаллические алмазные подложки типа IIa, выращенные методом температурного градиента при высоком давлении и высокой температуре (НРНТ-TG). Для синтеза используются высокочистые газы метан (чистота 6.0) и водород (чистота 7.0). Разработанный процесс синтеза CVD-алмаза позволяет достичь чистоты алмаза по азоту не хуже 50 ppb (50 атомов азота на миллиард атомов углерода). Данный уровень является предельным уровнем обнаружения азота в алмазе методами оптической спектроскопии поглощения на просвет. В процессе неравновесного CVD-синтеза небольшая часть атомов азота (от 0.1% до 1%) образует азот-вакансионные центры (NV).

Основным источником фонового загрязнения в камере при таком синтезе является остаточное натекание азота из атмосферы. Вклад натекания и, как следствие, парциальную концентрацию остаточного

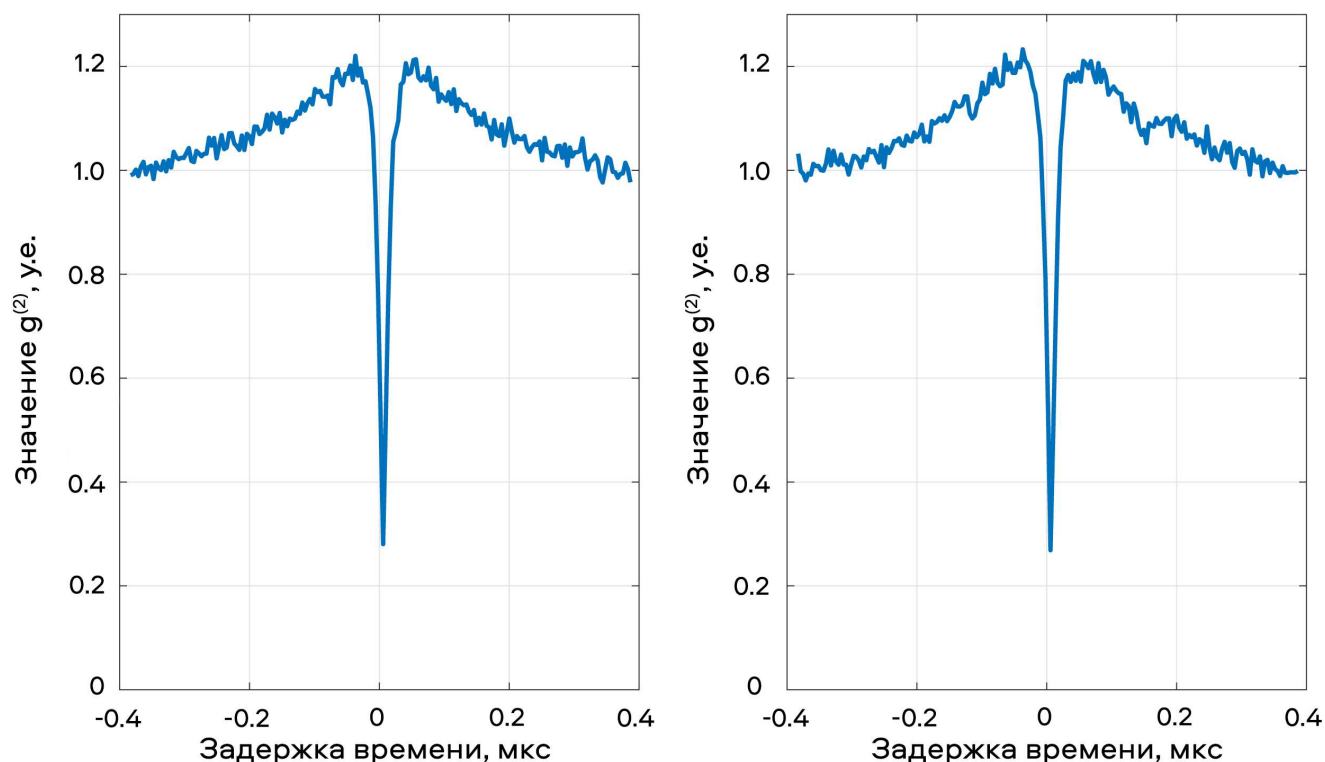


Рис. 3. Вид автокорреляционных функций второго порядка $g^{(2)}$ для NV-центров образцов № 1 (слева) и № 2 (справа) как доказательство того, что NV-центры являлись одиночными

азота можно изменять путем изменения интенсивности газообмена (потоков процесс-газов водорода и метана) при синтезе.

Для изучения влияния концентрации остаточного азота были выращены образцы с разными потоками процесс-газов. Интенсивность откачки камеры при разных потоках динамически подстраивается для обеспечения одинакового заданного давления газа во время синтеза, при этом вклад остаточного натекания из атмосферы увеличивается.

Далее в статье экспериментальные образцы алмаза именуются как образец № 1 и образец № 2. Параметры синтеза пластин приведены в таблице.

Перед началом исследований были отобраны одиночные центры в двух образцах, при этом для них были измерены автокорреляционные функции второго порядка $g^{(2)}$ для фотонов, испускаемых этими центрами окраски. Вид этих функций однозначно позволил идентифицировать одиночные NV-центры. На рис. 3 представлены автокорреляционные функции $g^{(2)}$ для обоих образцов.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Спектр ОДМР одиночного NV-центра в образце №1

Сначала исследовалась зависимость разрешения спектра ОДМР для синтетического монокристалла с ориентацией [111] от нахождения атома ^{13}C вблизи NV-центра. В этом образце алмаза были найдены два одиночных центра окраски — с атомом ^{13}C во второй координационной сфере и вдали от таких атомов. Был исследован NV-центр с близко расположенным атомом ^{13}C . В работе [11] предложен метод векторной магнитометрии, реализуемый с помощью одиночной спиновой системы $\text{NV}-^{13}\text{C}$ в алмазе и основанный на априорном знании характеристик сверхтонкого взаимодействия и наличия экспериментально измеренных положений линий в спектре ОДМР такой системы.

Исследования проводились с помощью импульсного лазера с длиной волны 532 нм. Ширина линии спектра ОДМР зависела от двух мощностей: мощно-

Таблица. Параметры CVD-роста образцов

Параметры	Номер образца	
	№ 1	№ 2
Средняя скорость роста, мкм/ч	≈ 1.4	≈ 0.5
Толщина эпитаксиального слоя, мкм	≈ 40	≈ 30
Толщина второго слоя, мкм	2–3	4–5
Температура в ростовой камере, °C	770 ± 10	770 ± 10
Давление в ростовой камере, Торр	190–200	190–200
Поток метана и водорода во время роста, см ³ /мин	5/120	20/480

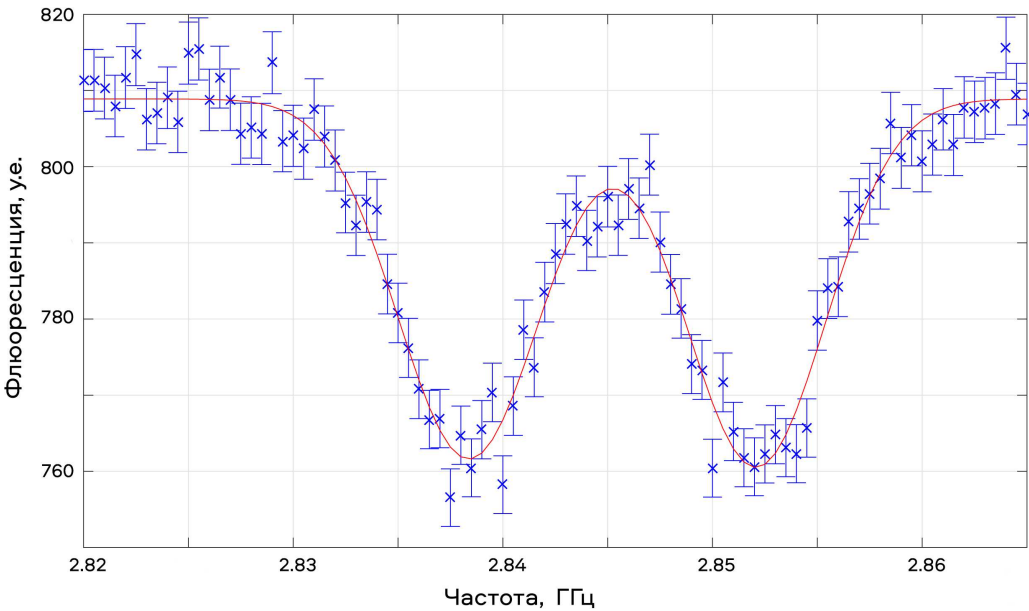


Рис. 4. ОДМР-спектр NV-центра с атомом ^{13}C . Расстояние между пиками примерно 14 МГц, что соответствует спектру связанной системы NV– ^{13}C , в которой ядерный спин ^{13}C расположен во второй координационной сфере (место 224) вблизи вакансии NV-центра. Сверхтонкое расщепление состояний с $m_s = \pm 1$ в нулевом магнитном поле для таких систем около 13 МГц, что почти соответствует расщеплению 14 МГц линий в имеющемся экспериментальном спектре. Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении частоты составила 0.5%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 0.87$ на степень свободы

сти лазера и мощности генератора СВЧ. Чтобы достичь минимальной ширины пиков в спектре ОДМР, определяющих чувствительность метода для магнитометрии, надо было уменьшать мощность как лазера, так и генератора СВЧ. Но одновременно уменьшалась и величина контраста спектра ОДМР. Поэтому были выбраны такие величины этих двух мощностей, чтобы контраст спектра ОДМР был не менее 5%. С помощью поля постоянного магнита величиной около 2 мТл энергетические уровни, соответствующие проекциям спина $m_s = \pm 1$, были раздвинуты для исключения их взаимного влияния

на ОДМР-спектры. На рис. 4 показана левая часть ($m_s = -1$) ОДМР-спектра одиночного NV-центра с атомом ^{13}C во второй координационной сфере [12, 13] в постоянном магнитном поле.

Аппроксимирующая кривая описывается функцией

$$f(\nu) = f_0 - C_1 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_1)^2}{w_1^2}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_2)^2}{w_2^2}\right), \quad (1)$$

где C_1, C_2 — свободные коэффициенты, ν_1, ν_2 — центральные положения резонансных частот, w_1, w_2 — полные ширины на полувысоте (FWHM) пиков поглощения.

Из рис. 4 можно оценить FWHM пика в спектре ОДМР не лучше 10 МГц. При таком разрешении спектральные линии сверхтонкого взаимодействия спина электрона NV-центра и ядра азота не могут быть определены, поскольку расчетное значение разности энергий уровней составляет 2.15 МГц. Для повышения разрешения была предпринята попытка жесткой синхронизации фазы СВЧ-излучения. Данная процедура не привела к повышению разрешения ОДМР-спектра.

Была измерена постоянная затухания τ осцилляций Раби, и она оказалась равной примерно 1.7 мкс. Постоянная затухания τ определяется через T_1 и T_2^* (см. Введение). Однако известно, что время T_1 на несколько порядков больше, чем время T_2^* . Так, например, в работе [14] для одиночных NV-центров в наноалмазах получено $T_2^* = 0.325 \pm 0.020$ мкс, а $T_1 = 72 \pm 14$ мкс, т. е. более чем на два порядка больше. Также в этой работе измерено время T_1 для образцов алмаза миллиметровых размеров (габариты исследуемых образцов 4×4 мм²), которое еще гораздо больше, чем в наноалмазах ($T_1 > 1000$ мкс). Отдельно время спиновой декогеренции T_2^* не измерялось. Основываясь на результатах других групп, можно сделать вывод о том, что $T_1 \gg T_2^*$, и тогда T_2^* просто определяется с помощью измеренного времени τ . Получив плохое разрешение по частоте (10 МГц), далее мы перешли к поиску одиночного NV-центра, расположенного вдали от атомов ¹³C.

Для дальнейших исследований был отобран одиночный NV-центр вдали от расположенного атома ¹³C (на расстоянии примерно 15 мкм). Данные центры имеют схожие времена спиновой декогеренции T_2^* . Значение T_2^* получено как результат аппроксимации зависимостей от времени осцилляций Раби между квантовыми состояниями с проекциями спина $m_s = 0$ и $m_s = -1$, показанных на рис. 5. Эта величина составила около 2 мкс.

Аппроксимирующая кривая описывается функцией

$$f(t) = f_0 + C_1 e^{-t/\tau} \cos(2C_2 t \pi + \phi), \quad (2)$$

где C_1, C_2 — свободные коэффициенты, τ — постоянная затухания, ϕ — начальная фаза.

В соответствии с результатами экспериментов можно сделать вывод о слабом влиянии расположенного (место 224 во второй координатной сфере) рядом с NV-центром атома ¹³C на разрешение спектра ОДМР в данном образце.

Далее было проведено сравнение влияния импульсного и модулированного постоянного лазерного возбуждения на разрешение ОДМР-спектра. На рис. 6 показан фрагмент ОДМР-спектра одиночного NV-центра с расположенным вблизи атомом ¹³C при возбуждении импульсным лазером с длиной волны 532 нм.

Аппроксимирующая кривая описывается функцией

$$f(\nu) = f_0 - C_1 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_c)^2}{w_c^2}\right), \quad (3)$$

где C_1 — свободный коэффициент, ν_c — центральное положение резонансной частоты, w_c — полная ширина на полувысоте пика поглощения.

Из анализа рис. 6 следует, что сверхтонкое расщепление в ОДМР-спектре не выражено. Чувствительность метода к пикам в этом образце составила примерно 3.5 МГц (сигма разрешения).

Было отмечено, что повышение частоты импульсного лазера с 2 до 20 МГц и переход к непрерывному модулированному лазеру практически не меняют описанные выше результаты.

4.2. Спектр ОДМР одиночного NV-центра в образце № 2

Было проведено построение спектра ОДМР одиночного NV-центра в образце № 2. При проведении экспериментов для возбуждения NV-центра использовался модулированный непрерывный лазер с длиной волны 532 нм.

Для выбора параметров СВЧ-сигнала при построении спектра ОДМР была проведена оценка времени спиновой декогеренции T_2^* для одного из NV-центров на этом образце.

Оценка времени T_2^* , определяющего спиновую декогеренцию квантового состояния рассматриваемого NV-центра, была получена в соответствии с аппроксимацией графика осцилляций Раби на рис. 7.

Время спиновой декогеренции T_2^* составило величину примерно 20 мкс. Такое большое время T_2^* было получено еще для нескольких разных NV-центров в этом образце. Сравнивая графики осцилляций Раби на рис. 7 и рис. 4, можно сделать вывод о существенном (на порядок) увеличении времени спиновой декогеренции квантового состояния NV-центра для образца № 2.

Для оценки разрешения по частоте СВЧ был построен спектр ОДМР одиночного NV-центра без атома ¹³C в образце № 2 при возбуждении модулированным непрерывным лазером с длиной волны 532 нм. Для снижения влияния СВЧ-поля на спино-

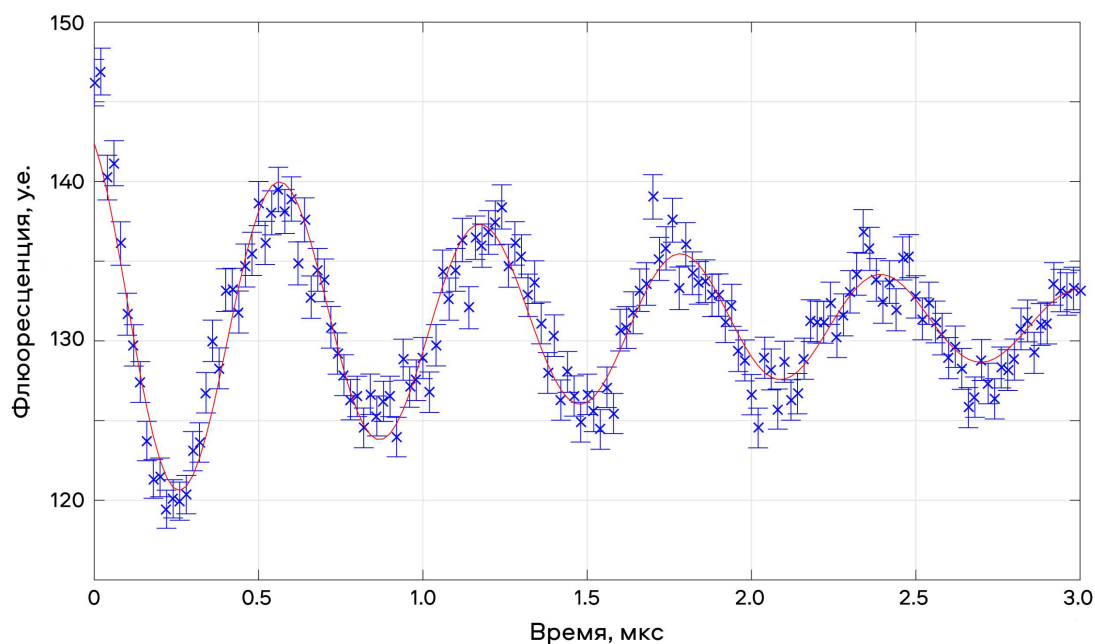


Рис. 5. Осцилляции Раби между квантовыми состояниями с проекциями спина $m_s = 0$ и $m_s = -1$ одиночного NV-центра без расположенного вблизи атома ^{13}C . Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении длительности по времени СВЧ-сигнала составила 1%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 1.87$ на степень свободы

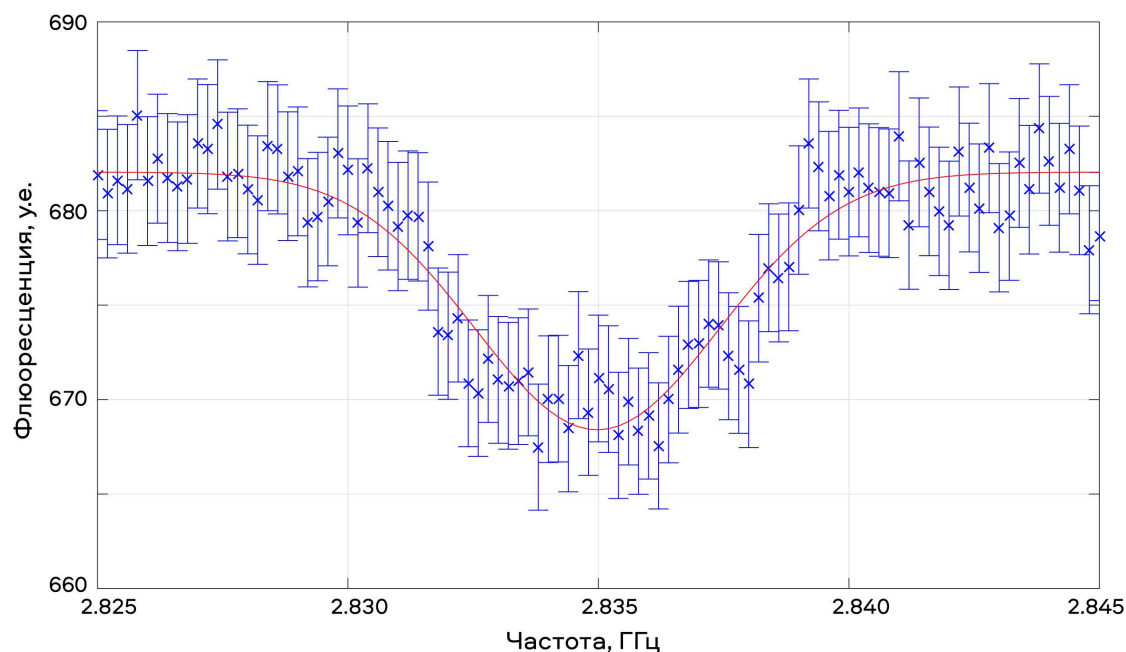


Рис. 6. Фрагмент ОДМР-спектра одиночного NV-центра с атомом ^{13}C , расположенным во второй координационной сфере (место 224) вблизи вакансии NV-центра. Возбуждение проводилось импульсным лазером. Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении частоты составила 0.5%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 0.28$ на степень свободы. Видно, что ошибки завышены

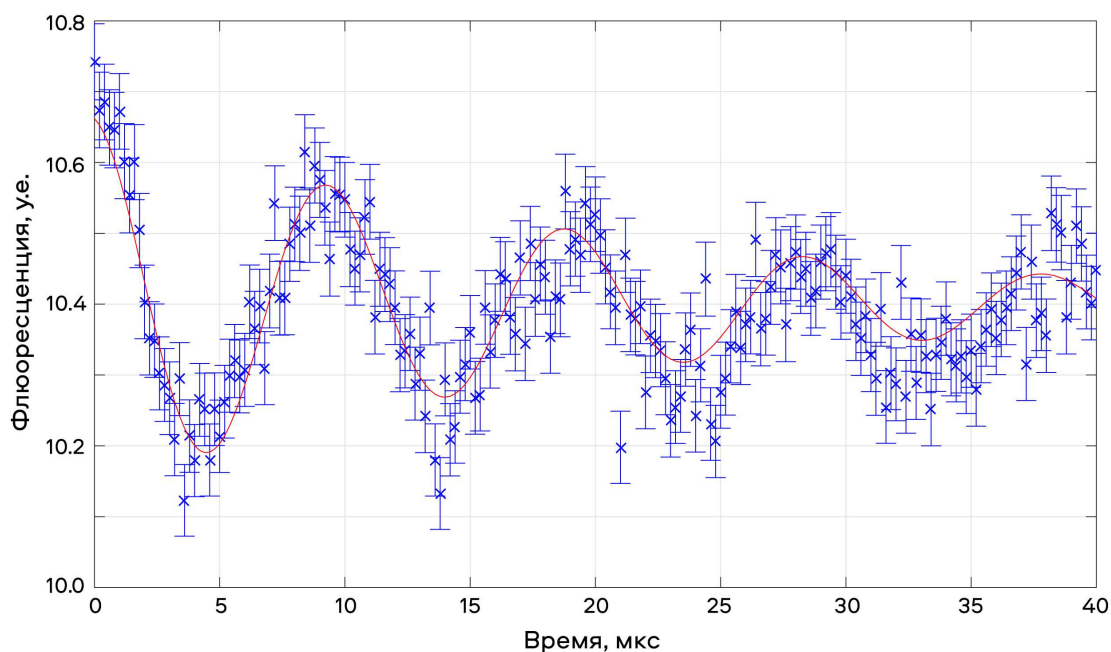


Рис. 7. Осцилляции Раби между квантовыми состояниями с проекциями спина $m_s = 0$ и $m_s = -1$ одиночного NV-центра без близко расположенного атома ^{13}C в синтетическом монокристалле с пониженным содержанием азота. Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении длительности по времени СВЧ-сигнала составила 0.5%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 1.27$ на степень свободы

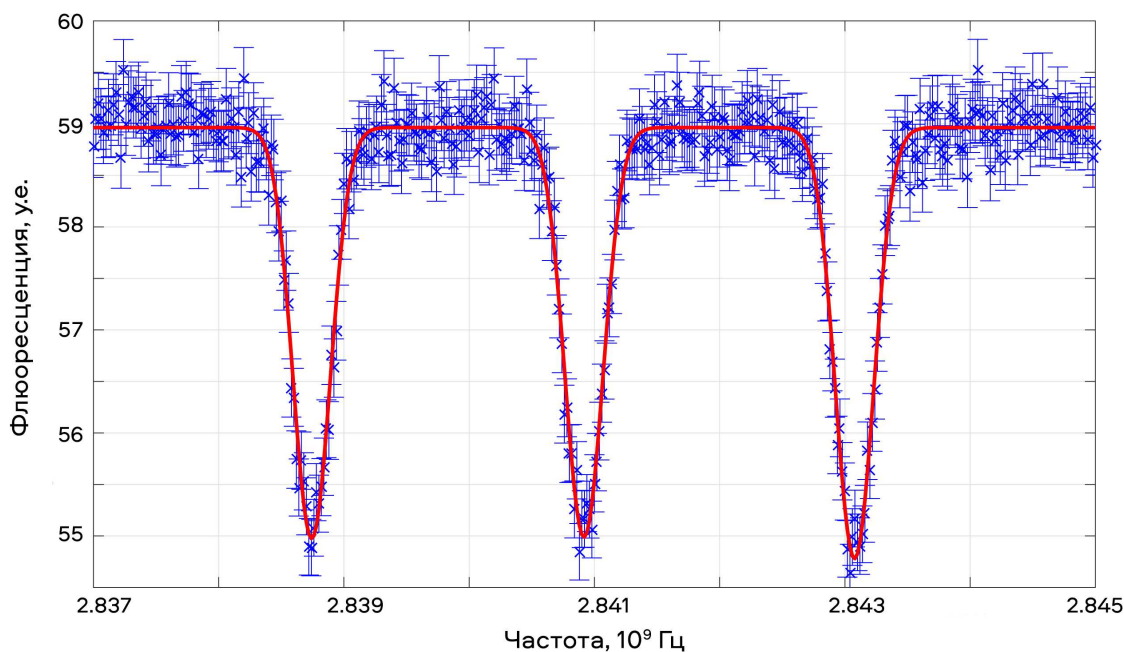


Рис. 8. Фрагмент ОДМР-спектра одиночного NV-центра без атома ^{13}C в монокристалле № 2. Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении частоты составила 0.5%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 0.5$ на степень свободы. Видно, что ошибки слегка завышены

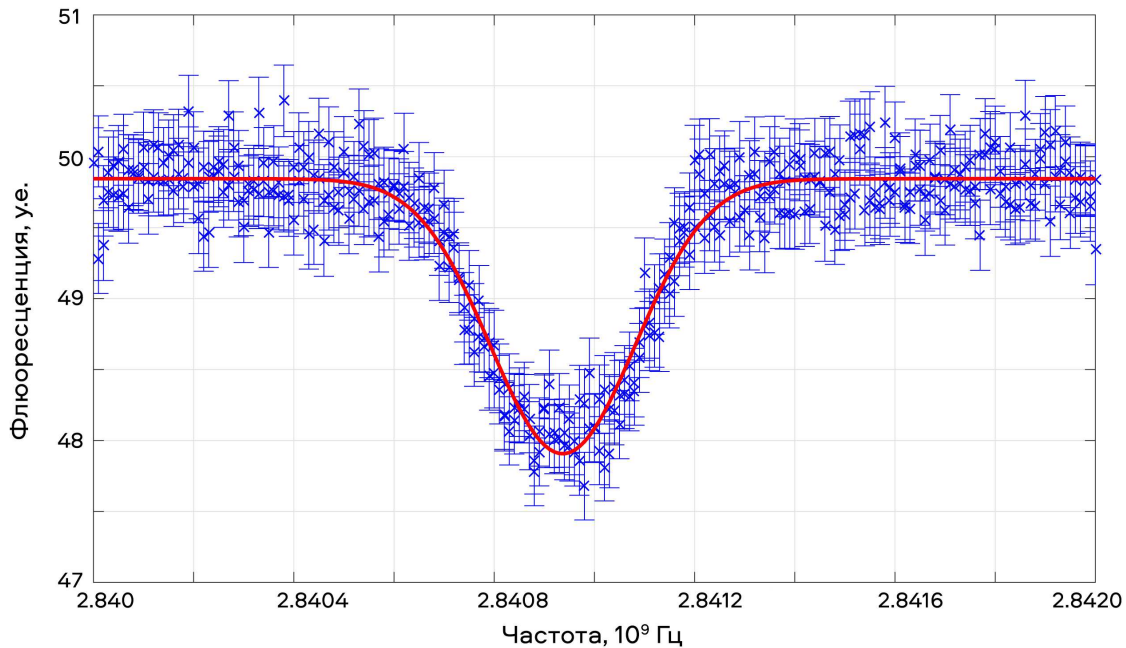


Рис. 9. Увеличенный фрагмент спектра ОДМР на рис. 8. Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация. Относительная ошибка измерения интенсивности люминесценции при каждом значении частоты составила 0.5%, результатом аппроксимации является значение $\chi^2 = 0.61$ на степень свободы. Видно, что ошибки слегка завышены

вую декогеренцию квантового состояния NV-центра мощность СВЧ-излучения была выбрана таким образом, чтобы длительность π -импульса составляла 4.5 мкс. Мощность генератора СВЧ-сигналов была 0.4 мВт. Время спиновой декогеренции T_2^* составило около 20 мкс.

Аппроксимирующая кривая описывается функцией

$$f(\nu) = f_0 - C_1 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_1)^2}{w_1^2}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_2)^2}{w_2^2}\right) - C_3 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_3)^2}{w_3^2}\right), \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3 — свободные коэффициенты, ν_1, ν_2, ν_3 — центральные положения резонансных частот, w_1, w_2, w_3 — полные ширины на полувысоте пиков поглощения.

На рис. 8 четко разрешаются пики, соответствующие сверхтонкому взаимодействию спинов электронов NV-центра со спином ядра азота. Величина расщепления (расстояние между пиками) составило около 2.1 МГц, что хорошо согласуется с результатом работы [8]. Ширина пиков на полувысоте составляет около 430 кГц, т. е. чувствительность метода к разрешению пиков в образце с низким содержанием азота составляет примерно 180 кГц (сигма раз-

решения). Это почти в 20 раз меньше, чем та же чувствительность в образце с невысоким значением T_2^* .

Для определения максимальной чувствительности были также проведены измерения с мощностью СВЧ 0.1 мВт. При такой мощности длительность π -импульса составила около 9 мкс. Однако существенного уменьшения ширины линий ОДМР-спектра не было зарегистрировано. На рис. 9 представлен спектр ОДМР для одного из пиков триплета с шагом 10 кГц по частоте СВЧ. Оценка ширины линии не изменилась и составила около 180 кГц. Плоская вершина пика позволяет сделать вывод о дополнительном взаимодействии, вероятно, со спином ядра изотопа ^{13}C во второй координационной сфере. Таким образом, для дальнейшего повышения разрешения спектра ОДМР требуются образцы с пониженным содержанием изотопа ^{13}C .

Отметим, что в работе [15] был представлен спектр ОДМР с тремя пиками от сверхтонкого взаимодействия спина электрона NV-центра со спином ядра ^{14}N . Однако образец алмаза был выращен методом HPHT (высокое давление, высокая температура) с высоким содержанием азота — около 10 ppm, что более чем на два порядка больше, чем в исследуемом CVD-образце. Эксперимент был выполнен на ансамбле NV-центров, и получено время T_2^* около 7 мкс, что в три раза меньше, чем в настоящем эксперименте. И, как результат, примерно во столько

же раз, по нашей оценке из рисунка с тремя пиками в работе [15], разрешение спектра ОДМР хуже, чем у нас на одиночном NV-центре. Заметим, что преимущество искусственного алмаза, выращенного методом CVD, над алмазом, выращенным методом HPHT, еще и в том, что в методе CVD можно при росте создавать плоскости с одиночными NV-центрами на любых заданных толщинах внутри образца, что крайне важно для задач квантовой информатики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований впервые получен выращенный в России методом CVD образец искусственного алмаза с временем спиновой декогеренции одиночного NV-центра около 20 мкс.

Можно однозначно утверждать, что достижимое разрешение спектра ОДМР заметно улучшается с ростом времени спиновой декогеренции T_2^* NV-центра.

В проведенном эксперименте разрешение (сигма) спектра ОДМР для образца №1 со временем спиновой декогеренции 2 мкс составило несколько мегагерц, при этом не удалось разделить три пика от сверхтонкого взаимодействия спина электрона NV-центра со спином азота из этого же центра. Расчетные значения разности частот между пиками составляют около 2.14 МГц.

Для образца №2 со временем спиновой декогеренции 20 мкс это разрешение составило уже примерно 180 кГц, что позволило четко увидеть искомые три пика. Такие результаты удалось получить еще для нескольких NV-центров на этом образце с такими же временами спиновой декогеренции.

Можно предположить, что разные значения времени спиновой декогеренции T_2^* в двух образцах получились из-за разных концентраций азота, по крайней мере, в областях исследований на обоих образцах.

Полученное разрешение 180 кГц — это вполне приемлемое разрешение для использования прецизионного измерения спектров ОДМР одиночных NV-центров в алмазе при комнатной температуре для многих задач квантовой информатики, включая магнитометрию слабых магнитных полей.

Благодарности. Работа выполнена в АНО «Институте инженерной физики» (г. Серпухов). Авторы благодарят А. Н. Царькова, С. В. Смурова и А. И. Алатарцева за поддержку работы. Синтез и подготовка образцов проводилась с использованием оборудования ЦКП «Технологический инсти-

тут сверхтвердых и новых углеродных материалов» [ТИСНУМ] (<http://tisnum.ru/suec>). Авторы выражают благодарность Д. В. Тетеруку за участие в росте образца алмаза №1 и В. Д. Бланку за стимулирующие дискуссии.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-42-04416).

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Wrachtrup and F. Jelezro, J. Phys.: Condens. Matter **18**, 807 (2006).
2. T. Schröder, F. Gädeke, M. J. Banholzer, and O. Benson, New J. Phys. **13**, 055017 (2011).
3. J. Joo and E. Ginossar, Sci. Rep. **6**, 26338 (2016).
4. J. L. Webb, J. D. Clement, L. Troise et al., Appl. Phys. Lett. **114**, 231103 (2019).
5. R. L. Patel, L. Q. Zhou, A. C. Frangeskou et al., Phys. Rev. Appl. **14**, 044058 (2020).
6. L. Rodnin, J.-P. Tetienne, T. Hingant et al., Rep. Prog. Phys. **77**, 056503 (2014).
7. J. F. Barry, J. M. Schloss, E. Bauch et al., Rev. Mod. Phys. **92**, 015004 (2020).
8. A. Dreau, M. Lesik, L. Rondin et al., Phys. Rev. B **84**, 195204 (2011).
9. L. Robdelo, H. Bernien, I. V. Weperen, R. Hanson et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 177403 (2010).
10. W. E. Moerner, W. E. Moerner, M. Orrit, and U. E. Wild, *Single Molecule Optical Detection, Imaging and Spectroscopy*, Wiley-VCH, Weinheim (1996).
11. А. П. Низовцев, Н. С. Кукин, А. Р. Мурадова и др., ЖПС **89**, 807 (2022).
12. A. P. Nizovtsev, S. Ya. Kilin, A. L. Pushkarchuk et al., New J. Phys. **16**, 083014 (2014).
13. A. P. Nizovtsev, S. Ya. Kilin, A. L. Pushkarchuk et al., New J. Phys. **20**, 023022 (2018).
14. Yu. L. Raikher and V. I. Stepanov, Appl. Phys. Lett. **105**, 063111 (2015).
15. O. R. Rubinas, V. V. Vorobyov, V. V. Soshenko et al., J. Phys. Commun. **2**, 115003 (2018).