

06

Спектроскопия алмазных пластин, модифицированных электронными пучками

© А.А. Костин, И.О. Подойлов, А.А. Харламова, А.А. Ладвищенко, М.К. Есеев,
Д.Н. Макаров, К.А. Макарова

Северный (Арктический) федеральный университет,
163002 Архангельск, Россия

e-mail: a.kostin@narfu.ru; i.podjlov@narfu.ru; a.a.harlamova@narfu.ru; a.ladvischenko@narfu.ru;
m.eeseev@narfu.ru; makarovd0608@yandex.ru; k.makarova@narfu.ru

Поступило в Редакцию 30 октября 2024 г.

В окончательной редакции 30 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Пять монокристаллических алмазных пластин типа Ib, содержание азота в которых варьировалось от 9 до 106 ppm, были облучены дозой электронов 10^{18} e/cm² энергией 3 MeV и подвергнуты отжигу в вакууме при температуре 1200 °C в течение 24 h. Методами инфракрасной спектроскопии и оптически детектируемого магнитного резонанса установлена зависимость величины сигнала резонанса от изменения концентрации замещающего азота в результате облучения электронами и последующего отжига.

Ключевые слова: алмаз, дефекты, азот-вакансионные, оптически детектируемый магнитный резонанс, инфракрасная спектроскопия.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59856.366-24

Введение

Оптически активные азот-вакансионные NV-центры в алмазе могут существовать в отрицательном зарядовом состоянии NV⁻ или в нейтральном состоянии NV⁰. NV⁻-центры обладают рядом уникальных свойств и могут быть использованы для различных научных и технических задач. NV⁻-центры чувствительны к магнитным полям, с помощью оптических приборов можно считывать спиновое состояние, измерять время когерентности. На данный момент эти свойства активно изучаются [1–3]. Под действием внешнего магнитного поля происходит расщепление спиновых состояний NV⁻-центра. Такие особенности центра используются для технической диагностики, например, для измерения токов разряда аккумулятора [4]. Измерение магнитных полей применяется в качестве неразрушающего контроля с высокой степенью точности. Бесконтактный метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР, ODMR) хорошо зарекомендовал себя в измерениях электромагнитных полей [5]. Другой пример использования диагностики магнитных полей связан с медициной. Диамагнитная природа человеческого тела позволяет проводить эффективную магнитную диагностику для терапевтических целей. Известны неинвазивные методы магнитно-резонансной томографии (МРТ), гипертермии и термоабляции с магнитными наночастицами, транскраниальной магнитной стимуляции и другие. Важным аспектом неинвазивной диагностики является нанесение вреда пациенту. Магнитное поле ослабевает по мере удаления от источника. Это означает, что для большей разрешающей способности и точности требуются такие

методы диагностики, которые позволяют „подобраться“ к источнику на максимально близкое расстояние без разрушения внешнего покрова. Решением такой задачи может служить прибор, способный составлять детальную карту магнитных полей. Для такого прибора необходим датчик, чувствительный к слабым магнитным полям, который можно поднести близко к ткани [6]. В частности, магнитоэнцефалография (МЭГ) разрешает диагностировать человеческий мозг неинвазивно. Среди приборов, для которых осуществим данный метод, используются датчики типа SQUID (superconducting quantum interference device). Датчики этого типа основаны на протекании туннельных токов, обладают высокой чувствительностью к магнитным полям и нуждаются в поддержании низкой температуры около 4 К — температуры жидкого гелия [7]. Жидкий гелий достаточно дорог, нуждается в сложном хранении, переливании, датчики SQUID невозможно поднести близко к живой ткани, не избежав ожогов. Ожидается альтернатива датчикам SQUID, способным работать при комнатной температуре. Успешным кандидатом на замену может выступить датчик на основе алмаза с NV⁻-центрами [8,9]. С помощью этой NV-пары на основе метода ОДМР проводится процедура считывания флуоресценции, которая зависит от основного спинового состояния триплета комплекса NV⁻-центра. Это состояние управляется внешним магнитным полем, спиновые подуровни отдаляются на основе эффекта Зеемана. Под воздействием гигагерцового микроволнового излучения пик резонанса, на котором резонансно затухает люминесценция комплекса NV⁻-центра, возбужденного лазером на длине волны 532 nm, смещается по частоте в зависимости от величины маг-

нитного поля. На данный момент некоторые датчики уже смогли достичь чувствительности $344 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, значительно превосходящей характеристики обычных датчиков Холла [10]. Для удачной интеграции алмазных пластин с NV^- -центрами в аппаратную архитектуру прибора необходимо соблюдать высокий уровень отношения сигнал/шум для обнаружения слабых сигналов [11]. В некоторых системах идут на компромисс, удерживая оптимальную чувствительность при комнатной температуре [12,13]. Для повышения чувствительности алмазной пластины в зашумленном пространстве (при комнатной температуре) проводится калибровка. При калибровке учитывается время когерентности и отделяется квантовый механизм от статистического шума [14]. Для создания квантового датчика необходимо проводить диагностику и калибровку пластины. Сложно предсказать, как выстроятся NV^- -центры после всех процедур выращивания и постростовой обработки в структуре кристаллической решетки [15,16]. Существует наиболее известный способ создания NV^- -центров — облучение монокристалла алмаза, допированного азотом, электронами на ускорителе [17,18]. Образование NV -пар, вакансий нелинейно зависит от дозы облучения и начальной концентрации азота [19,20]. Для выстраивания правильного ансамбля необходимо задавать наиболее оптимальные параметры, чтобы повысить чувствительность. Иные методы предполагают не только подбор начальных параметров алмазной пластины и характеристик подаваемого пучка электронов, но и изготовление алмазных наностолбов с NV^- -центрами [21]. Подобрал набор пластин, можно выявить общую тенденцию образования ансамбля, применяя методы диагностики. На данный момент не существует универсального метода диагностики, позволяющей подсчитать абсолютную концентрацию NV^- -центров, вакансий и кластеров вакансий в алмазе [22,23]. Ключевыми параметрами для создания чувствительных алмазных датчиков является высокая концентрация NV^- -центров по всему объему пластины и сочетание длительного времени спиновой когерентности с сильным оптическим переходом NV^- -центров [24]. Проводятся исследования, в которых оптимизируют интенсивность облучения электронами высокой энергии для создания чувствительной алмазной пластины с NV^- -центрами. Подтверждена полезность облучения электронами для получения высокой концентрации NV^- -центров [25–27]. В настоящей работе мы исследовали алмазные пластины, облученные высокоэнергетическим пучком электронов с последующим отжигом. Методом ИК спектроскопии [28] и методом ОДМР мы продемонстрировали новый способ оценки концентрации NV^- -центров.

1. Образцы

Были выбраны пять монокристаллических синтетических алмазных пластин, выращенных в системе Fe-Ni-C

методом НРНТ (high-pressure high-temperature) при температуре около 1300°C и давлении 50 kbar в лабораторном беспрессовом аппарате сверхвысокого давления типа БАРС. Тип кристалла Ib, содержание азота варьировалось от 9 до 106 ppm (желтый оттенок различной интенсивности). Параметры пластин: длина грани не более 6 mm , толщина — 0.5 mm с ориентацией лицевой грани $\{111\}$. Одновременно облучались пять пластин на линейном ускорителе электронов с дозой облучения 10^{18} e/cm^2 и энергией 3 MeV [29]. После облучения алмазные пластины подверглись отжигу в вакууме при температуре 1200°C в течение 24 h (метод отжига LPHT „Low Pressure/High Temperature“ — низкое давление и высокая температура). Их окрас изменился. Образовавшиеся вакансии в течение отжига становятся подвижными, формируя с азотом NV^- -центры с сопутствующим проявлением фиолетового оттенка на пластине. Образцы до и после облучения с последующим отжигом представлены на рис. 1.

2. Методы исследования

2.1. Метод ИК спектроскопии

Методы ИК спектроскопии в однофононной области спектра алмаза в среднем ИК диапазоне регистрируют основные азотные дефекты (C , C^+). В исследованных синтетических алмазах из этого набора присутствуют только C -центры (одиночные замещающие атомы азота), а после облучения также присутствуют те же центры в ионизированном состоянии (C^+ -дефекты). В настоящей работе в режиме пропускания использовался ИК фурье-спектрометр FT-801 с ИК микроскопом MICRAN-3 производства Simex (Новосибирск). Спектры ИК поглощения были получены в точках, расположенных вдоль сетки с шагом $95 \mu\text{m}$ при размере светового пятна, настраиваемого апертурой, $100 \times 100 \mu\text{m}$. Излучение регистрировалось приемником КРТ (кадмий-ртуть-теллур), охлаждаемым жидким азотом. Спектральное разрешение составляло 8 cm^{-1} , в каждой точке выполнялось по 4 сканирования и учитывалось усредненное значение. Базовый спектр регистрировался в режиме пропускания без образца, чтобы задать порог, относительно которого измерялось поглощение интенсивности после прохождения инфракрасного излучения через образец. Таким образом спектры были получены на каждом шаге, составляя карту распределения ИК поглощения по всей поверхности пластины. Для всех типов алмаза характерно собственное ИК поглощение в диапазоне $4000\text{--}16000 \text{ cm}^{-1}$, где коэффициенты поглощения должны соответствовать собственным значениям. Каждый спектр алмазной пластины, полученный ИК методом, нормализован на величину $(12.8 \pm 0.3) \text{ cm}^{-1}$ собственного поглощения решетки при значениях 2170 и 2030 cm^{-1} . Формула концентрации была определена в работах разрушающим методом с последующим сжиганием, где методом емкостной манометрии измерялся

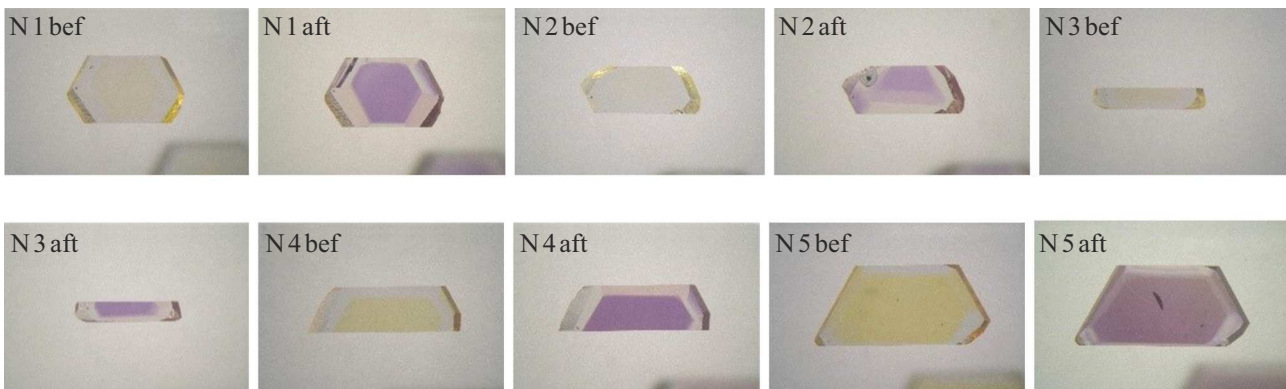


Рис. 1. Алмазные пластины №1, №2, №3, №4, №5 до (bef) и после (aft) облучения с последующим отжигом в вакууме при температуре 1200 °С в течение 24 h. Начальная концентрация азота возрастает с номером. Концентрация одиночно замещающего атома азота С-дефектов до облучения составляет 9 ppm, 17 ppm, 32 ppm, 51 ppm и 106 ppm соответственно.

выделившийся азот [30]. Концентрация С-дефектов в алмазе связана с коэффициентом поглощения μ_{1130} на полосе 1130 cm^{-1} , как

$$N_C(\text{ppm}) = (25 \pm 2) \cdot \mu_{1130}. \quad (1)$$

Абсолютное значение концентрации определяется по этой формуле. После облучения часть С-дефектов из-за потери пятого валентного электрона превращается в C^+ -дефекты. В этом случае сигнал от С-дефектов ослабляется, и сигнал от C^+ -дефектов появляется в однофонной области с основной линией на полосе 1332 cm^{-1} [31].

2.2. Метод ОДМР

Сигнал ОДМР с исследуемых пластин регистрировался в непрерывном режиме в нулевом магнитном поле. Схема представлена на рис. 2.

Оптическое возбуждение осуществлялось полупроводниковым лазером Cobolt Samba с длиной волны 532 nm. Для выделения наиболее интенсивного луча первого порядка дифракции использовалась оптическая

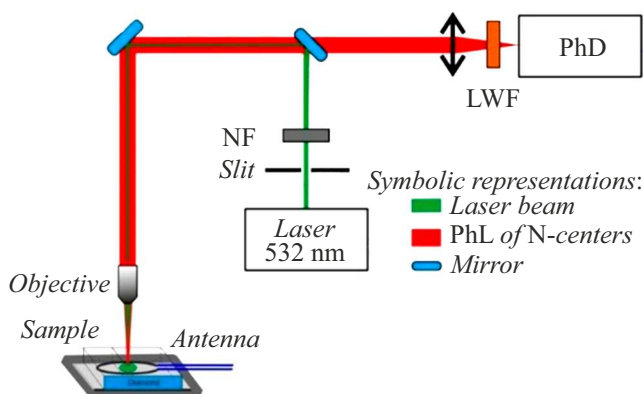


Рис. 2. Схема ОДМР.

щель. Затем луч первого порядка проходил через нейтральный фильтр (NF) и отражался от дихроичных зеркал серии DMLP550. Через объектив MUY5X-802-5X лазерный луч падал на алмазную пластину, образуя пятно диаметром около $100 \mu\text{m}$. Свечение, возбуждаемое этим лазером, фокусировалось через длинноволновый фильтр (LWF) серии FEL0550 на фотоприемнике (PhD) серии APDC12703. Микроволновое излучение подавалось плоской антенной диаметром 1 mm в виде печатной платы, расположенной непосредственно под образцом [32]. Мощность лазера, возбуждающая люминесценцию NV^- -центров при комнатной температуре, не менялась при облучении образцов. Картирование алмазной пластины проходило с помощью моторизованного столика с шагом $100 \mu\text{m}$.

3. Результаты и обсуждение

Предположим, что люминесценция будет спадать на резонансной частоте пропорционально концентрации отрицательно заряженных NV^- -центров. При облучении лазером возбуждается ансамбль NV^- -центров, и с повышением концентрации ансамбля будет возрастать люминесценция. Подавая на алмазную пластину микроволновое излучение, мы уменьшаем люминесценцию ансамбля. Отметим, что величина уменьшения сигнала зависит от ряда параметров. Интенсивность люминесценции NV^- -центра зависит от температуры [33], изменение люминесценции пластины с NV^- -центрами на резонансной частоте зависит от пространственной неоднородности микроволнового излучения [34]. Рассеяние сигнала люминесценции с учетом эффектов преломления и дифракции идет по различным направлениям в алмазной пластине, и это ограничивает часть сигнала, попадающего в фотоприемник [35]. Указанные факторы являются менее существенными в наших измерениях в связи с различной начальной концентрацией азота. Разница средней концентрации С-дефектов в малоазотистых алмазных

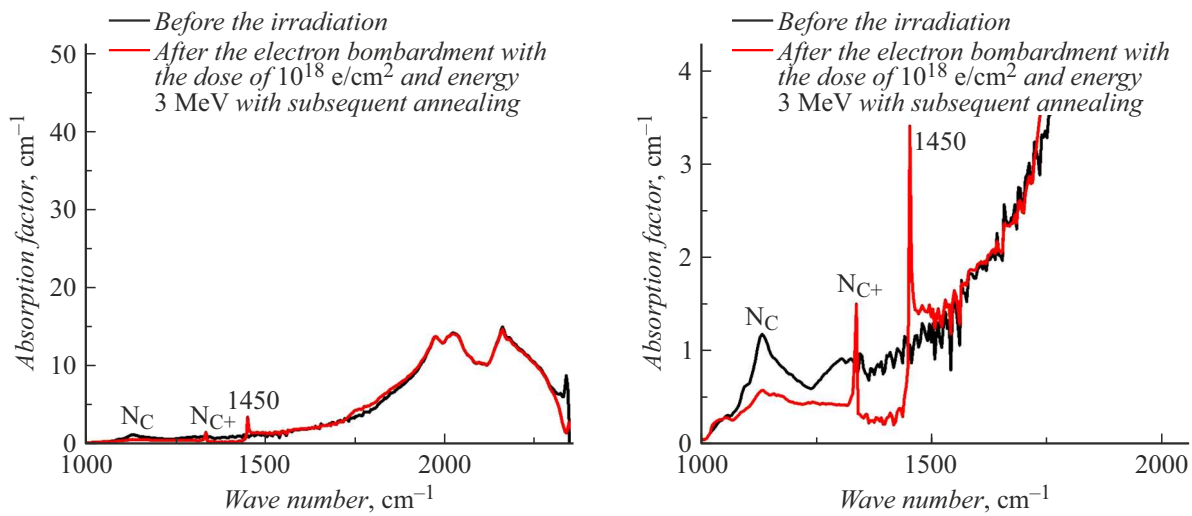


Рис. 3. Слева — ИК спектр поглощения пластины типа Ib до и после облучения электронами дозой 10^{18} e/cm^2 и энергией 3 MeV с последующим отжигом. Справа — то же в увеличенном по оси ординат масштабе.

пластинах составляет 8 ppm, для алмазных пластин с высоким содержанием азота разница средней концентрации С-дефектов составляет 20 ppm и более. В результате облучения электронами с последующим отжигом часть азота переходит в оптически активные NV^- -центры тоже с различной концентрацией. По разности сигнала люминесценции в различных алмазных пластинах мы можем дать оценку этой концентрации. Люминесценция ансамбля из NV^- -центров на резонансной частоте микроволнового излучения будет уменьшаться сильнее при их большей концентрации. Для обоснования этого предположения следует проанализировать зависимость разницы люминесценции ΔU , μV от отношения концентрации С-дефектов до облучения и после облучения с последующим отжигом — $(N_C)_{bef}/(N_C)_{aft}$.

На рис. 3 изображен нормализованный ИК спектр, полученный до облучения и после облучения электронами дозой 10^{18} e/cm^2 и энергией 3 MeV с последующим отжигом.

Данный ИК спектр одного из образцов получен в области $100 \times 100 \mu m$ для иллюстрации полос, где происходит поглощение интенсивности излучения. Такой спектр характерен для каждого из исследуемых образцов. Полученные спектры отличаются, преимущественно, только интенсивностью поглощения.

По ИК спектру определены полосы поглощения. Для каждого образца характерно следующее. До облучения с последующим отжигом имеется поглощение на полосе 1130 cm^{-1} , С-дефект. После облучения с последующим отжигом наблюдается уменьшение поглощения на полосе 1130 cm^{-1} и образование положительно заряженного азота в позиции замещения на полосе 1332 cm^{-1} , а также выражен пик на полосе 1450 cm^{-1} , который связан с образованием дефекта N1a (изолированный атом азота в межузельном положении) [36].

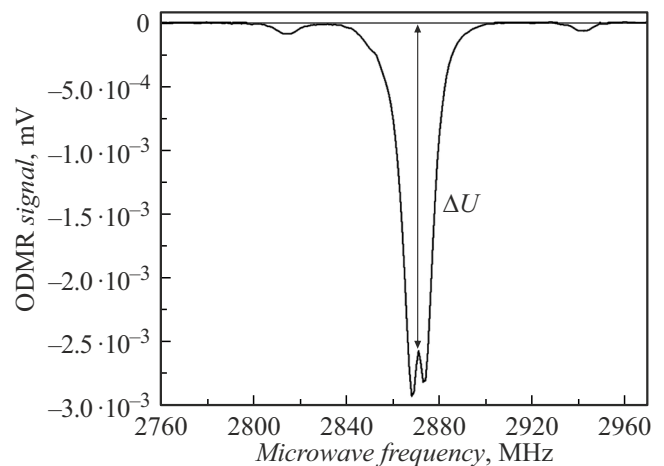







Рис. 4. ОДМР сигнал.

Учитывая сегментарное распределение, расчет среднего значения концентрации новообразовавшихся дефектов по всему объему пластины не будет являться достоверным. Концентрация С-дефектов, вследствие трансформации в другие виды дефектов в процессе отжига, уменьшалась. Поэтому рассчитывалась средняя концентрация С-дефектов до и после облучения с последующим отжигом $(N_C)_{bef}/(N_C)_{aft}$. Значение средней концентрации $(N_C)_{bef}$, ppm С-дефектов до облучения, значение средней концентрации $(N_C)_{aft}$, ppm С-дефектов после облучения с последующим отжигом и отношение $(N_C)_{bef}/(N_C)_{aft}$ для каждой алмазной пластины представлены в таблице.

ОДМР сигнал представлен на рис. 4.

При помощи ОДМР мы фиксировали только среднее значение разности люминесценции от алмазной пластины на резонансной частоте 2866 МГц. Полный сигнал

Средняя концентрация С-дефектов и карты ОДМР алмазных пластин

Образец	Карта ОДМР. По шкале отложено изменение интенсивности сигнала с фотоприемника ΔU , mV	$(N_C)_{bef}$, ppm	$(N_C)_{aft}$, ppm	$(N_C)_{bef} / (N_C)_{aft}$	Среднее значение ΔU , μV
№ 1		9	2	4.5	2.4
№ 2		17	11	1.5	1.2
№ 3		32	26	1.23	2.1
№ 4		51	48	1.06	3.3
№ 5		106	87	1.2	2.4

люминесценции во всем спектральном оптическом диапазоне не измерялся, так как нас интересовала люминесценция от NV^- -центров. Другие комплексы в алмазной пластине дают люминесценцию на других частотах, но нами она может интерпретироваться, как шум. Шум мог быть связан с фотоионизацией NV^- в NV^0 [37]. Средние значения ΔU , μV представлены в таблице.

На рис. 5 изображена зависимость усредненного значения люминесценции ΔU от отношения усредненной

концентрации С-дефектов до облучения и после облучения с последующим отжигом $(N_C)_{bef} / (N_C)_{aft}$.

В результате рассмотрения зависимости для образцов с малым содержанием азота (образцы №1 и №2) прослеживается описанная выше гипотеза. Большее количество азота, входящее в дефект С, агрегировало с одиночными вакансиями, и при большем значении отношения $(N_C)_{bef} / (N_C)_{aft}$ возрастает разница в люминесценции ΔU на резонансной частоте 2866 МГц. При переходе к

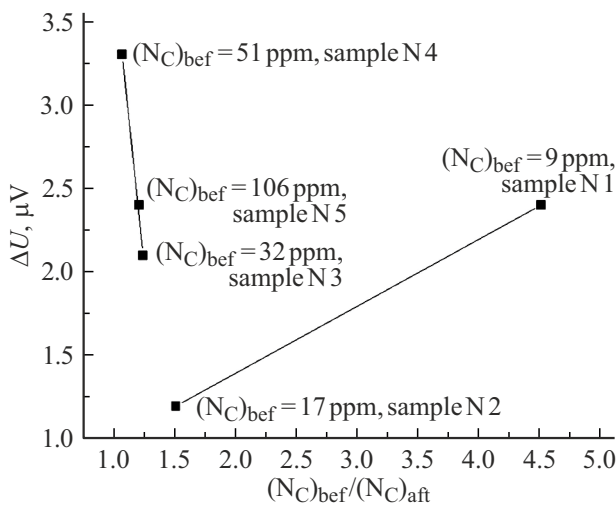


Рис. 5. Зависимость разницы люминесценции ΔU , μV от отношения концентрации С-дефектов до облучения и после облучения с последующим отжигом $(N_C)_{bef} / (N_C)_{aft}$.

образцам с большим содержанием азота (образцы №3, №4 и №5) анализ становится сложным, наблюдается нелинейность. Стоит учитывать, что, помимо С-дефектов и оптически активных NV^- -центров, в алмазе в процессе отжига возникли другие дефекты, как было указано выше. После облучения образуются вакансии, междоузельные атомы. В процессе отжига помимо отрицательно заряженных NV^- -центров образуются нейтрально заряженные центры NV^0 . Нейтрально заряженные NV^0 -центры — это оптически активные центры с фотолюминесценцией на длине волны 575 нм. Чувствительность фотоприемника на длине волны 637 нм (фотолюминесценция отрицательно заряженного центра NV^-) примерно в 10 раз больше, чем на длине волны 575 нм (фотолюминесценция нейтрально заряженного центра NV^0). При больших концентрациях донорного азота (более 3.5 ppm) резко преобладает образование NV^- -центров [38]. В настоящей работе рассматриваются образцы с концентрацией донорного азота 9 ppm и выше. Учитывая вышесказанное, влиянием центров NV^0 на ОДМР сигнал можно пренебречь. Вследствие отжига облученных алмазных пластин образуются азотные интерстиции (изолированный атом азота в междоузельном положении). После облучения образуются собственные интерстиции, которые перемещаются по кристаллу в процессе отжига и выталкивают атом азота в междоузельное положение. В образцах №3 и №5 конверсия С-дефектов в NV^- -центры прошла частично. С-дефект мог потерять свой пятый валентный электрон и перейти в состояние C^+ . Образец №3 требует дальнейшего анализа. Если рассматривать возможность образования кластеров вакансий при большой дозе облучения, которые не смогли сместиться в процессе отжига по объему кристаллической решетки, то это утверждение не совсем точное, так как при термической обработке 1200 °С в

течение 24 h вакансии полностью отжигаются [39]. В образце №5 концентрация С-дефектов больше 100 ppm и, скорее всего, коагуляты азота мешали образованию оптически активных дефектов [40]. Люминесценция у образца №4 уменьшается сильнее, чем у других образцов, следовательно, имеет наибольшую концентрацию NV^- -центров. При анализе крайних значений (образцы №1 и №4) наблюдается наибольшая конверсия С-дефектов в NV^- -центры в малоазотистой пластине №1. Прослеживается условная граница, при которой наибольшее количество дефектов С конверсирует в NV^- -центры. В образце №4 с начальной концентрацией С-дефектов $(N_C)_{bef} \approx 50$ ppm после облучения электронами дозой 10^{18} e/cm² и энергией 3 MeV с последующим отжигом при температуре 1200 °С в течение 24 h образуется высокая концентрация NV^- -центров.

Заключение

Был рассмотрен механизм образования NV^- -центров в пяти алмазных монокристаллических пластинах с различным содержанием азота, облученных электронами дозой 10^{18} e/cm² энергией 3 MeV с последующим отжигом в вакууме при температуре 1200 °С в течение 24 p. Тип кристалла Ib, ориентация лицевой грани пластин {111}. Применялись методы ИК спектроскопии и ОДМР. Построен график зависимости разницы люминесценции сигнала ОДМР от отношения концентрации С-дефектов до облучения и после облучения с последующим отжигом. Выявлена зависимость между уменьшением концентрации С-дефектов и конверсией в результате постростового инжиниринга атома азота и вакансии в NV^- -центр.

Можно сделать следующие выводы:

Наибольшая конверсия С-дефектов в NV^- -центры наблюдается в малоазотистой пластине.

Образец с концентрацией одиночного азота (С-дефекта) ≈ 50 ppm продемонстрировал наибольший сигнал ОДМР, что свидетельствует о высокой конверсии С-дефектов в NV^- -центры.

В дальнейшем необходимо провести исследования при помощи позитрон-аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Методом ПАС можно определить влияние кластеров вакансий на образование NV^- -центров.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-12-20014, <https://rscf.ru/project/23-12-20014/>, а также при поддержке Минобрнауки РФ по госзаданию в рамках работ лаборатории диагностики углеродных материалов и спиновых оптических свойств широкозонных полупроводников FSRU-2024 -0005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Gorrini, A. Bifone. *Biosensors*, **13**, 691 (2023). DOI: 10.3390/bios13070691
- [2] A. Shames, A. Panich, L. Friedlander, H. Cohen, J. Butler, R. Moreh. *Materials*, **17**, 1871 (2024). DOI: 10.3390/ma17081871
- [3] Q. Liu, Z. Lan, W. Guo, J. Deng, X. Peng, M. Chi, S. Li. *Sensors*, **24**, 5532 (2024). DOI: 10.3390/s24175532
- [4] Yu. Hatano, J. Shin, J. Tanigawa, Yu. Shigenobu, A. Nakazono, T. Sekiguchi, Sh. Onoda, T. Ohshima, K. Arai, T. Iwasaki, M. Hatano. *Sci. Reports*, **12**, Art. Num. 13991 (2022).
- [5] Yi. Hu, G.Z. Iwata, L. Bougas, J.W. Blanchard, A. Wickenbrock, G. Jakob, S. Schwarz, C. Schwarzinger, A. Jerschow, D. Budker. *Appl. Sci.*, **10**, 7864 (2020). DOI: 10.3390/app10217864
- [6] S. Rotundo, D. Brizi, A. Flori, G. Giovannetti, L. Menichetti, A. Monorchio. *Sensors*, **22**, 5132 (2022). DOI: 10.3390/s22145132
- [7] Y. Feng, W. Xiao, T. Wu, J. Zhang, J. Xiang, H. Guo. *Appl. Sci.*, **11**, 2415 (2021). DOI: 10.3390/app11052415
- [8] G. Chen, W. Wang, F. Lin, M. Zhang, Q. Wei, C. Yu, H.-X. Wang. *Materials*, **15**, 2557 (2022). DOI: 10.3390/ma15072
- [9] A. Crnjac, N. Skukan, G. Provatas, M. Rodriguez-Ramos, M. Pomorski. *Materials*, **13**, 2473 (2020).
- [10] F.M. Stürner, A. Brenneis, T. Buck, J. Kassel, R. Rölver, T. Fuchs, A. Savitsky, D. Suter, J. Grimmel, S. Hengesbach, M. Fortsch, K. Nakamura, H. Sumiya, Sh. Onoda, Ju. Isoya, F. Jelezko. *Adv. Quant. Technol.*, **4**, 2000111 (2021).
- [11] V.M. Acosta, E. Bauch, M.P. Ledbetter, C. Santori, K.M.C. Fu, P.E. Barclay, R.G. Beausoleil, H. Linget, J.F. Roch, F. Treussart, S. Chemerisov, W. Gawlik, D. Budker. *Phys. Rev. B*, **80**, 115202 (2009).
- [12] P.C.D. Hobbs. *Building Electro-Optical Systems: Making It All Work*, 3rd ed. Wiley Series in Pure and Applied Optics (John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2022)
- [13] V.K. Sewani, H.H. Vallabhapurapu, Ya. Yang, H.R. Firgau, Ch. Adambukulam, B.C. Johnson, J.J. Pla, A. Laucht. *American J. Phys.*, **88**, 1156 (2020). DOI: 10.1119/10.0001905
- [14] R.A. Babunts, A.S. Gurin, Yu.A. Uspenskaya, K.V. Likhachev, V.V. Yakovleva, A.V. Batueva, A.M. Skomorokhov, I.P. Veyshkort, M.V. Uchaev, M.K. Eseev, V.G. Vins, A.P. Yelissev, Z.F. Urmantseva, P.G. Baranov. *Appl. Magn. Resonance*, **55** (4), 417 (2024).
- [15] D. Makarov, M. Eseev, E. Gusarevich, V. Matveev, K. Makarova, M. Borisov. *Crystals*, **14** (2), 193 (2024).
- [16] M. Eseev, K. Makarova, D. Makarov. *Crystals*, **12** (10), 1417 (2022).
- [17] B. Campbell, A. Mainwood. *Phys. Status Solidi Appl. Res.*, **181**, 99 (2000).
- [18] J.G. Seo, Y.K. Ahn, J.W. Park. *Met. Mater. Int.*, **17**, 1031 (2011).
- [19] I.N. Meshkov, M.K. Eseev, I.V. Kuziv, A.A. Kostin, A.A. Sidorin, O.S. Orlov. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, **20**, 757 (2023). DOI: 10.1134/S1547477123040507
- [20] I.N. Meshkov, M.K. Eseev, I.V. Kuziv, A.A. Kostin, A.A. Sidorin, O.S. Orlov. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, **20** (4), 757 (2023).
- [21] K. Volkova, Ju. Heupel, S. Trofimov, F. Betz, R. Colom, R.W. MacQueen, S. Akhundzada, M. Reginka, A. Ehresmann, J.P. Reithmaier, S. Burger, C. Popov, B. Naydenov. *Nanomaterials*, **12**, 1516 (2022). DOI: 10.3390/nano12091516
- [22] I.N. Meshkov, M.K. Eseev, I.V. Kuziv, A.A. Kostin, A.A. Sidorin, O.S. Orlov. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, **21**, 526 (2024). DOI: 10.1134/S1547477124700523
- [23] M.K. Eseev, I.V. Kuziv, A.A. Kostin, I.N. Meshkov, A.A. Sidorin, O.S. Orlov. *Materials*, **16** (1), 203 (2023).
- [24] T. Luo, L. Lindner, J. Langer, V. Cimalla, X. Vidal, F. Hahl, C. Schreyvogel, S. Onoda, S. Ishii, T. Ohshima, D. Wang, D.A. Simpson, B.C. Johnson, M. Capelli, R. Blinder, J. Jeske. *New J. Phys.*, **24**, 033030 (2022).
- [25] S.C. Benjamin, B.W. Lovett, J.M. Smith. *Las. Phot. Rev.*, **3**, 556 (2009).
- [26] S. Ishii, S. Saiki, S. Onoda, Y. Masuyama, H. Abe, T. Ohshima. *Quantum Beam Sci.*, **6**, 2 (2022). DOI: 10.3390/qbs6010002
- [27] A.M. Gorbachev, M.A. Lobaev, D.B. Radishchev, A.L. Vikharev, S.A. Bogdanov, M.N. Drozdov, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Okhupkin, E.A. Arkhipova. *Radiophys. Quant. Electron.*, **63** (7), (2020).
- [28] A.M. Zaitsev. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook* (Springer, Berlin, 2001)
- [29] С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. *Интенсивные электронные и ионные пучки* (Энергоатомиздат, М., 1991)
- [30] S.R. Boyd, I. Kiflawi, G.S. Woods. *Phil. Mag. B*, **69**, 1149 (1994).
- [31] S.C. Lawson, D. Fisher, D.C. Hunt, M.E. Newton. *J. Phys. Condens. Matter*, **10**, 6171 (1998).
- [32] K. Sasaki, Ya. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase, K.M. Itoh, E. Abe. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 053904 (2016).
- [33] G. Kucsko, P.C. Maurer, N.Y. Yao, M. Kubo, H.J. Noh, P.K. Lo, H. Park, M.D. Lukin. *Nature*, **500**, 54 (2013).
- [34] O.R. Opaluch, N. Oshnik, R. Nelz, E. Neu. *Nanomaterials*, **11**, 2108 (2021). DOI: 10.3390/nano11082108
- [35] F. Jelezko, J. Wrachtrup. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **20**, 3207 (2006).
- [36] I. Kiflawi, G. Davies, D. Fisher, H. Kanda. *Diamond Relat. Mater.*, **8**, 1576 (1999).
- [37] C.E. Avalos. *Detection and Polarization of Nuclear and Electron Spins using Nitrogen-Vacancy Centers: Doctoral Theses* (University of California, Berkeley, 2014)
- [38] A.T. Collins, A. Connor, Ch.-H. Ly, A. Shareef. *P.M. Spear. J. Appl. Phys.*, **97**, 083517 (2005). DOI: 10.1063/1.1866501
- [39] G. Davies, A.T. Collins. *Diamond Relat. Mater.*, **8**, 1847 (1993).
- [40] A. Setzer, P.D. Esquinazi, O. Daikos, T. Scherzer, A. Pöppel, R. Staacke, T. Lühmann, S. Pessagna, W. Knolle, S. Buga, B. Abel, J. Meijer. *Phys. Status Solidi B*, **258**, 2100395 (2021). DOI: 10.1002/pssb.202100395