

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 549.211:666.233:535.376

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.001

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗАХ ТИПА Ia

Виктор Генрихович Винс¹, Александр Павлович Елисеев²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «ВЕЛМАН», ул. Русская, 43, Новосибирск, 630058, Россия

² Институт Геологии и Минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, пр. академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

¹ vgvins@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0773-0810>

² eliseev@igm.ncs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0509-2122>

Аннотация. Методами оптической спектроскопии исследована коллекция природных алмазов типа Ia подвергнутых облучению нейтронами в комбинации с последующим отжигом в вакууме. Определены доминирующие в структуре алмазов атомные дефекты (центры) в зависимости от дозы облучения и температуры последующего отжига. Определено, что среда высокого кристаллического качества с максимально интенсивной НЗ - люминесценцией и минимальным содержанием других оптически активных дефектов может быть получена из алмаза чистого типа IaA (с Na $\approx$ 200 ppm) облучением нейтронами дозой $D_N = 0.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в комбинации с последующим высокотемпературным отжигом в вакууме. Найдено пороговое значение произведения дозы облучения на суммарное содержание азота в кристалле, выше которого, при отжиге 1500° С за счет последовательной трансформации дефектов, в кристаллической решетке появляется около 4 ppm C-дефектов, составляющее $380 \cdot 10^{17} \text{ ppm} \times \text{нейтронов/см}^2$. Характерными для облучения нейтронами являются: а) система H1g ($\sim 4444 \text{ см}^{-1}$ или $\sim 2250 \text{ нм}$); б) дуплет узких линий поглощения (80К) при 638/643 нм; и в) система в ближнем ИК диапазоне с линией при 913 нм.

Ключевые слова: облучение нейтронами, высокотемпературный отжиг, природные алмазы типа Ia, оптически активные дефекты (центры)

Благодарности: Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400157-9

Для цитирования: Винс В.Г., Елисеев А.П. Образование и отжиг радиационных повреждений в облученных нейтронами природных алмазах типа Ia // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 1. С. 9-23. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.001.

Original article

FORMATION AND ANNEALING OF RADIATION DAMAGE IN NEUTRON-IRRADIATED NATURAL TYPE Ia DIAMONDS

Viktor G. Vins¹, Alexander P. Eliseev²

¹ LLC VELMAN, 43 Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

¹ vgvins@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0773-0810>

² eliseev@igm.ncs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0509-2122>

Abstract. Optical spectroscopy was used to study a collection of natural type Ia diamonds subjected to neutron irradiation followed by vacuum annealing. The dominant atomic defects (centers) in the diamond structure were determined as functions of the irradiation dose and subsequent annealing temperature. It was determined that a high-quality crystalline medium with the most intense H3 luminescence and a minimum content of other optically active defects can be obtained from pure type IaA diamond (with Na $\approx$ 200 ppm) by neutron irradiation with a dose of $D_N = 0.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ in combination with subsequent high-temperature annealing in vacuum. A threshold value of the product of the irradiation dose and the total nitrogen content in the crystal was found, above which, upon annealing at 1500° C, due to sequential transformation of defects, about 4 ppm of C defects appear in the crystal lattice, amounting to $380 \cdot 10^{17} \text{ ppm} \times \text{neutrons/cm}^2$. The following are characteristic for neutron irradiation: a) the H1g system ($\sim 4444 \text{ cm}^{-1}$ or $\sim 2250 \text{ nm}$); b) a doublet of narrow absorption lines (80K) at 638/643 nm; and c) a system in the near-IR range with a line at 913 nm.

Keywords: neutron irradiation, high-temperature annealing, type Ia natural diamonds, optically active defects (centers)

Acknowledgments: The study was carried out under a state assignment from the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS No. 122041400157-9

For citation: Vins V.G., Eliseev A.P (2026). Formation and annealing of radiation damage in neutron-irradiated type Ia natural diamonds. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 9-23. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.001.

Введение

Алмаз высоко ценится за свои экстремальные физические свойства, такие как высокая теплопроводность, исключительная твердость, высокая радиационная стойкость и широкая запрещенная зона. Недавние достижения в материаловедении дополнительно позиционируют его как ключевую платформу для новых технологий [1,2]. От NV⁻ - алмазных лазеров и квантовых сенсоров [3-7], от высокочастотной силовой электроники до квантовых фотонных устройств и излучателей одиночных фотонов [8], технологический потенциал алмаза заключается не только в его кристаллической структуре, но и в его способности содержать богатый спектр оптически - и электронно - активных дефектов [9-11]. Алмаз является и безальтернативным материалом для элементов рентгенов-

ской оптики - поскольку увеличение средней мощности и яркости рентгеновских пучков источников синхротронного излучения 4-го поколения и лазеров на свободных электронах приводит к экстремальным тепловым нагрузкам на эти элементы, ограничивая возможность использования в дифракционной кристаллооптике традиционных материалов, таких как кремний и германий [12]. Поэтому исследование радиационных повреждений, создаваемых в алмазах ионизирующими излучениями, помимо фундаментального, имеет и большое практическое значение. Конечно, в различных «хай-тек» и «ультра хай-тек» устройствах в первую очередь планируется использование лабораторно-выращенных алмазов. Однако нужно иметь в виду, что такие монокристаллы всегда содержат дефект С: атом азота в замещающем положении в нейтральном зарядовом состоянии, а

также производные от дефекта С: в НРНТ монокристаллах это азотно-вакансионные центры, а в CVD – центры NVH [13,14]. Дело в том, что одиночный азот в процессе НРНТ или CVD синтеза, и/или термобарической обработки, даже при самых высоких допустимых температурах, диффундируя по кристаллу, не успевает полностью трансформироваться в агрегаты азота. То есть монокристаллы лабораторно-выращенного алмаза, всегда содержат азот, в основном в виде С-дефекта. Но присутствие в структуре даже следовых количеств дефекта С может негативно сказываться на микроэлектронных и квантово-сенсорных свойствах алмаза. В отличие от лабораторно-выращенных, природные алмазы формировались в мантии Земли под воздействием сравнительно невысоких (менее 1400°C) температур, но зато в течение миллионов лет, за которые произошла практически полная трансформация дефектов С в более сложные А- и В1-дефекты. Это означает, что в перспективных для квантово-сенсорных и лазерных исследованиях дефекта N3 в природном алмазе [15,16], негативное влияние дефекта С и производных от него центров будет минимизировано. В связи с чем, исследования образования и отжига радиационных повреждений в облученных нейтронами природных алмазах типа Ia представляются весьма актуальными.

Объект и методы исследований

Общепринятая мировая система классификации алмазов основывается на наличии или отсутствии примеси азота в них. В соответствии с этим критерием выделяют два типа алмазов: I - азотные и II - безазотные (малоазотные). Тип I является наиболее распространенным среди природных алмазов. Для него характерно присутствие азота в качестве основной примеси, обычно в количестве до 0,1%. В свою очередь тип I подразделяется на два подтипа, а и b, в зависимости от положения азота в структуре алмаза. В алмазах типа Ia возможны две конфигурации атомов азота: два атома азота, находящиеся в непосредственной близости друг от друга (так называемые А-дефекты) и четыре атома азота, окружающие вакансию (В1-дефекты). В соответствии с этим выделяют алмазы типов IaA и IaB1. Если же атомы азота образуют отдельные узлы в решетке, заменяя углерод, и находятся изолированно друг от

друга (т.н. дефект С, или донорный азот), то тип алмазов называется Ib. Азотные С-, А-, и В1-дефекты относятся к основным, которые могут присутствовать в кристаллах самостоятельно, без сопровождения других дефектов (рис.1).

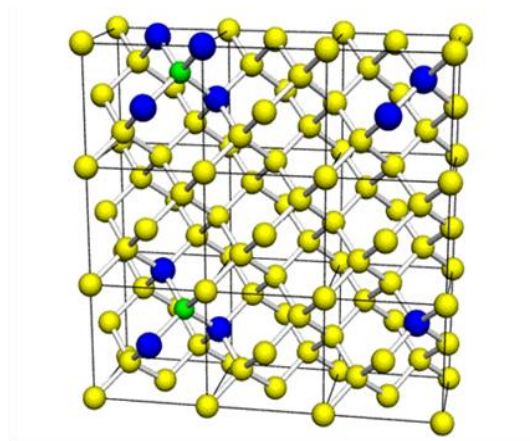


Рис.1. Фрагмент кристаллической структуры алмаза, содержащей основные примесные С-, А-, В1-дефекты. Атомы углерода изображены шарами желтого цвета, атомы азота – синего цвета, вакансии – зеленого. С – дефект – изолированный атом азота в позиции замещения; А – дефект – два атома азота в соседних узлах решетки; В1-дефект – четыре замещающих атома азота в первой координационной сфере вакансии. Здесь же изображен N3-дефект – три замещающих атома азота с вакансией, образующие треугольник в плоскости {111}

Fig. 1. Fragment of the diamond crystal structure containing the main impurity C-, A-, B1- defects. Carbon atoms are shown as yellow spheres, nitrogen atoms are blue, and vacancies are green. The C defect is an isolated nitrogen atom in a substitution position; the A defect is two nitrogen atoms in adjacent lattice sites; the B1- defect is four substitutional nitrogen atoms in the first coordination sphere of a vacancy. Also shown here is the N3- defect - three substitutional nitrogen atoms with a vacancy, forming a triangle in the {111} plane.

Кроме основных, в алмазе есть и дополнительные дефекты, которые присутствуют только в сочетании с основными дефектами. Наиболее распространёнными из них является дефект B2 - пластинчатая сегрегация в плоскости {100}, содержащаяся только в кристаллах с А-, и В1-дефектами. Классическая азотная модель этого дефекта сменилась сначала моделью планарного дефекта, состоящего из интерстиционных атомов углерода с низким содер-

жанием азота (5-10% от общего), а затем аналогичной моделью без участия атомов азота.

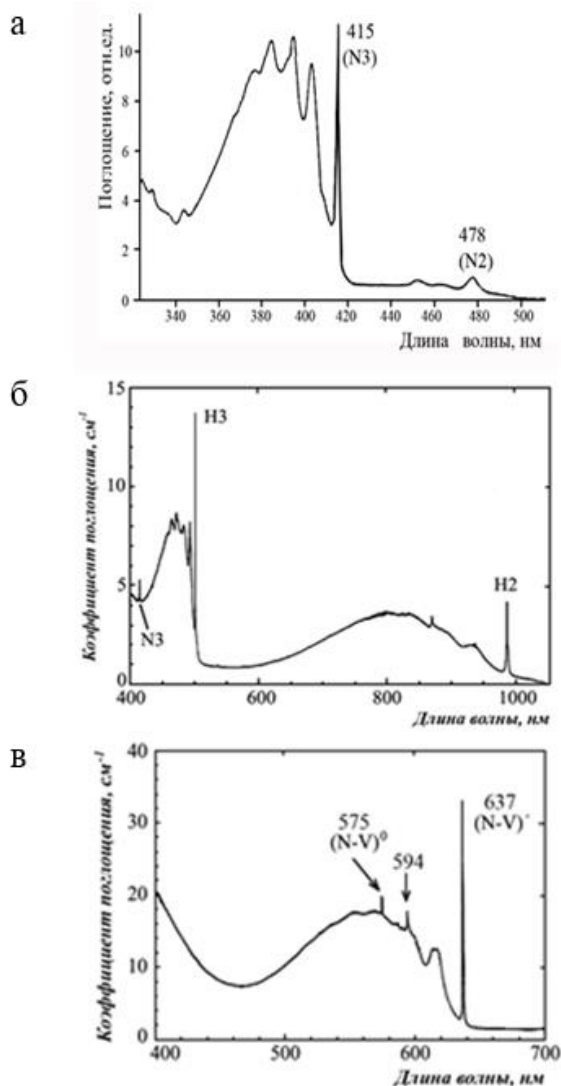


Рис.2. Спектры поглощения основных азотно-вакансионных дефектов - центров окраски алмаза: а) дефект N3; б) дефекты H3/H2; в) дефекты NV⁻/NV[°].

Fig. 2. Absorption spectra of the main nitrogen-vacancy defects - diamond color centers: a) N3 defect; b) H3/H2 defects; c) NV⁻/NV[°] defects.

Помимо вышеперечисленных, в структуре алмазов встречаются азотно-вакансионные дефекты, имеющие поглощение в видимом спектральном диапазоне и, таким образом, являющимися центрами окраски. Наиболее известный и распространенный из них дефект N3 - ответственный за систему N3 с бесфонной линией (БФЛ) 415,2 нм во многих оптических спектрах природных алмазов (рис.2а). По со-

вокупности данных дефекту приписывается структура из трех атомов азота окружающих вакансию (рис.1). В синтетических алмазах типа Ib эти центры могут быть получены после высокотемпературного отжига при T выше 1700°C. "Визитная карточка" дефекта N3 - полоса с БФЛ 415,2 нм в спектрах поглощения (рис.2а) и зеркально симметричных им спектрах фотолюминесценции. Алмазы с большим содержанием N3 - дефектов окрашены в желтый цвет.

Дефекты H3/H2. По современным представлениям, являются А - дефектами, захватившими вакансию, в нейтральном и отрицательном зарядовом состоянии, соответственно. С дефектом H3 связывается зеленовато-желтая окраска алмазов и их желтовато-зеленая фотолюминесценция в системе с БФЛ 503,2 нм. Когда конфигурация N-V-N находится вблизи атома донорного азота (дефекта С), она приобретает отрицательный заряд и возникает H2-дефект с полосой поглощения с БФЛ при 986,3 нм (рис.2б).

Дефекты NV. Вакансия, захваченная С - дефектом, образует дефект NV. Эти дефекты могут существовать в отрицательном зарядовом состоянии, и тогда они являются оптическим центром NV⁻ с БФЛ при 637,2 нм, или в нейтральном состоянии, и тогда они становятся оптическим центром NV[°] с БФЛ при 575,0 нм (рис.2в). Зарядовое состояние NV определяется его близостью к донору электронов - одиночному атому азота (С-дефекту).

Дефекты H4/H5. Дефект H4 образуется при захвате вакансии В1 - дефектом. Захватив вакансию, В1-дефекты трансформируются так, что атомы азота декорируют первую координационную сферу дивакансии. Дефекты H4 проявляются в спектрах поглощения и люминесценции системой с БФЛ 495,8 нм. Те из H4 - дефектов, которые находятся вблизи с атомам донорного азота (С-дефектами), с приобретением пятого валентного электрона С-дефекта переходят в отрицательное зарядовое состояние, образуя дефекты H5 [17]. Спектральным проявлением дефекта H5 является система поглощения с БФЛ 805,2 нм, интенсивность которой коррелирует с интенсивностью линии 495,8 нм.

Радиационные нарушения в решетке природного алмаза сопровождаются появлением в оптических спектрах систем GR1 (пара БФЛ при 740,9 и 744,5 нм) и ND1 (БФЛ при 393,5

нм), обусловленных одиночными изолированными вакансиями в нейтральном и отрицательном зарядовых состояниях, соответственно. Также, сразу после любых радиационных воздействий в алмазах всех типов появляется система 3Н с БФЛ 503.5нм, связываемая с проявлением атома углерода в межузельном положении (т.н. собственная интерстиция).

В настоящей работе комплексом методов оптической спектроскопии исследованы радиационные повреждения, образующиеся в кристаллах природного алмаза типа Ia при облучении нейтронами. Облучение происходило в нейтронном канале с воздушным теплообменником активной зоны ядерного реактора, с плотностью потока нейтронов выше 10^{13} нейтронов/сек $\times$ см². Кристаллы были разделены на три группы, по 5 образцов с одинаковыми спектральными характеристиками в каждой группе, что позволило анализировать результаты облучения и отжига, как выполненные на одном образце, облученном все возрастающими дозами нейтронов. Кристаллы были подобраны таким образом, чтобы в каждой группе было по одному образцу, близкому к чистым подтипам IaA и IaB1 и по три образца смешанного подтипа IaAB1. Суммарное содержание азота в дефектах A и B1 составляло от 200 до 400 ppm. Условия облучения алмазов всех трех групп: значения интегрального потока нейтронов и потока нейтронов с $E_N > 0,5$ МэВ, приведены в Таблице 1. В дальнейшем описании, под флюенсом нейтронов, будут пониматься не интегральные потоки, а дозы «надепловых» нейтронов с $E_N > 0,5$ МэВ составлявшие в наших исследованиях от $0,20 \times 10^{17}$ до $2,2 \times 10^{17}$ см⁻².

Таблица 1. Условия облучения - потоки нейтронов Ψ_N (нейтронов/см²) – для разных групп исследованных образцов

Table 1. Irradiation conditions - neutron fluxes Ψ_N (neutrons/cm²) - for different groups of studied samples

Группа	Интегральный поток Ψ_N	$\Psi_N (E > 0,5 \text{ МэВ})$
1	$(1,14 \div 2,83) \times 10^{18}$	$(0,20 \div 0,936) \times 10^{17}$
2	$(2,96 \div 4,02) \times 10^{18}$	$(0,95 \div 1,390) \times 10^{17}$
3	$(4,1 \div 5,10) \times 10^{18}$	$(1,42 \div 2,200) \times 10^{17}$

Последующий за радиационным воздействием отжиг алмазных пластинок осуществлялся в вакууме в диапазоне от 100 до 1500°С. Детальное описание вакуумной печи и методики

отжига дано в работе [18]. Используя в исследовании методы оптической спектроскопии и методики расчета содержания основных азотных А-, и В1- центров описаны в наших работах [19-21].

Общие закономерности образования радиационных дефектов в алмазе при облучении быстрыми нейтронами

Поскольку нейтрон не имеет заряда, он производит радиационные нарушения только при прямом взаимодействии с ядром атома мишени. Быстрый нейтрон передает импульс ядру, с которым он сталкивается. Под понятием «быстрые» понимаются нейтроны, с энергией более 0,5 МэВ, способные создавать радиационные нарушения кристаллической структуры. Наиболее вероятным типом взаимодействия для таких нейтронов являются упругие столкновения, и энергия, передаваемая атому, лежит в пределах от нуля до максимальной величины T_m , определяемой следующим выражением:

$$T_m = 4M_N M_C E_N / (M_N + M_C)^2,$$

где M_N – масса нейтрона, E_N – энергия нейтрона, M_C – масса ядра атома углерода.

Расчет T_m , в диапазоне эффективных энергий нейтронов от 0.5 до 1 МэВ, что соответствует реальным условиям облучения наших образцов в ядерном реакторе, дает величины: для $E_N = 1,0$ МэВ; $T_m = 284$ кэВ. В случае наиболее распространенного предположения об изотропном характере рассеивания нейтронов, все значения энергии отдачи между 0 и T_m являются равновероятными, также как в случае столкновений твердых шаров. При этих условиях средняя энергия $T_{ср}$, передаваемая при одном столкновении равна: $T_{ср} = T_m/2$. Таким образом, выбитые из решетки алмаза атомы углерода получают среднюю энергию $T_{ср}$ при энергии падающего нейтрона:

$$E_N = 1,0 \text{ МэВ}; T_{ср} = 140 \text{ кэВ};$$

Полученные значения $T_{ср}$ на порядки больше средних значений энергии первично выбитых атомов при бомбардировке электронами с энергией 3 МэВ [17]. Соответственно, первично выбитые атомы, обладая такой огромной энергией, способны привести к дальнейшему смещению сотен атомов углерода. В результате, в кристаллической структуре алмаза, возникают так называемые «клинья смещения» - частично аморфизированных областей,

содержащих большое количество атомов. Приосевая, внутренняя часть этих клиньев обогащена вакансиями, а наружная – межузельными атомами (рис.3).

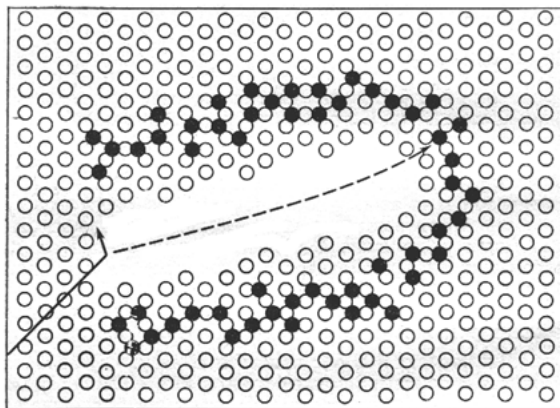


Рис. 3. Клин смещений, образовавшийся при взаимодействии быстрого нейтрона с кристаллом [22].

Fig. 3. Displacement wedge formed during the interaction of a fast neutron with a crystal [22].

Рассмотрим общие закономерности оптических спектров алмазов облученных нейтронами в зависимости от дозы облучения и температуры последующего отжига. При малых дозах облучения в видимом диапазоне спектра алмазов всех типов наблюдались системы GR1 и 3Н, обусловленные одиночными изолированными вакансиями в нейтральном зарядовом состоянии и интерстиционными центрами, соответственно. По мере увеличения дозы, кристаллы, вне зависимости от физического типа, темнели, их край прозрачности смещался в ИК-область. После облучения дозами выше $1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ интенсивное, т.н. «серое», поглощение простиралось вплоть до однофононной области, частично налагая на примесное поглощение. В области поглощения, примыкающей к однофононной области, в алмазах всех типов появлялись линии при 1530, и на порядок меньшей интенсивности при 1570 см^{-1} . В дополнение им, в кристаллах типа Ia регистрировалось слабое поглощение в линии 1450 см^{-1} . Интенсивности всех трех линий возрастали линейно до дозы облучения $1,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, затем интенсивности линий 1530 и 1570 см^{-1} по-прежнему линейно возрастали в зависимости от дозы облучения, а поглощение в линии 1450 см^{-1} насыщалось, оставаясь без изменений при больших дозах. Поведение линий позволяет

сделать вывод, что первые две линии связаны с проявлением первичных собственных радиационных дефектов: вакансий, интерстиций и их комплексов. Линия 1450 см^{-1} , обозначаемая в литературе как система Н1а, по современным представлениям связывается с дефектом, содержащим два межузельных атома азота: межузельный расщепленный атом азота $\langle 001 \rangle$ (дефект N_{2i}) [23]. При последующем отжиге линии 1530 и 1570 см^{-1} разрушались начиная с температуры 100° С, особенно быстро их интенсивность падала в интервале 250-400°С. Одновременно происходило «осветление» кристаллов – край прозрачности смещался в видимую область, существенно уменьшалось «серое» поглощение в ИК диапазоне. При температуре выше 250° С, начинался рост интенсивности линии 1450 см^{-1} (система Н1а). Линия достигала своего максимума при 500° С и оставалась практически неизменной до 1200° С. Затем ее интенсивность монотонно уменьшалась и полностью отжигалась при 1500° С. В своем максимуме интенсивность линии линейно зависит от суммарного содержания азота в основных примесных дефектах А и В1. Эти результаты подтверждает модель дефекта, как двух азотных интерстиций. Действительно, образовавшиеся при облучении собственные интерстиции, при температурах отжига 250 - 400° С приобретают подвижность - мигрируя по кристаллу и встречая примесный азотный атом в регулярном положении, собственная интерстиция выдавливает его из узла решетки в межузельное положение: $C_i + N_s \rightarrow C_s + N_i$. Появление вблизи друг от друга двух межузельных атомов азота, приводит к образованию центра N_{2i} , сопровождающееся ростом поглощения в системе Н1а. Появление линии 1450 см^{-1} сразу после облучения нейтронами не противоречит данной модели и указывает на то, что в образующихся клиньях смещения, содержащих сотни (или даже тысячи) атомов, в том числе присутствуют и атомы азота, причем часть из них находится в межузельном положении. То есть, после облучения нейтронами алмазов типов Ib и Ia в наружной части образовавшихся клиньев смещения, помимо регулярных атомов, вакансий, собственных интерстиций, пар Френкеля (вакансия – собственная интерстиция), присутствуют и азотные интерстиции. В таком кластере все составляющие находятся на разных расстояниях друг от друга и образуют набор разных структурных конфигураций друг с дру-

гом. Спектральным проявлением кластера, скорее всего, является интенсивное поглощение во всем диапазоне длин волн, а также линии 1530 и 1570 см^{-1} . Кроме того, часть межузельных атомов азота участвуют в формировании центра N_{21} . При отжиге начинается разрушение кластера и восстановление кристаллической решетки. Очевидно, что разрушение кластера начинается с межузельных атомов, которые при повышении температуры занимают близлежащие более устойчивые позиции в структуре, для релаксации в которые требуется минимум энергии. Одновременно с этим аннигилируют пары Френкеля, компоненты которых находятся на расстояниях, близких к расстояниям без активационной аннигиляции. Эти трансформации приводят к снижению «серого» поглощения. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к интенсивному разрушению кластера, сопровождающемуся уменьшением линий 1530 и 1570 см^{-1} , формированию новых дефектов, набор которых зависит от типа кристалла. В алмазах типов Ia и Ib, содержащих азотные центры, наряду с другими дефектами, формируется высокостабильный N_{21} -дефект с линией 1450 см^{-1} , интенсивность поглощения в которой, как уже упоминалось, зависит: а) от суммарного содержания азота; б) флюенса нейтронов; и в) T/t – параметров последующего отжига. При дозе облучения $2,2 \times 10^{17} \text{см}^{-2}$, в кристаллах с содержанием азота $\approx 200 \text{ ppm}$, после отжига 800° C/120 минут, коэффициент поглощения в линии достигает 10 см^{-1} . При этом в существенной мере отжигается «серое» поглощение и восстанавливается прозрачность кристаллов.

Таковы общие закономерности трансформации оптических спектров алмазов содержащих азотные центры при их облучении быстрыми нейтронами. Перейдем к более детальному рассмотрению особенностей оптических спектров облученных и отожженных алмазов типа Ia.

Алмазы типа Ia

Спектр поглощения кристаллов, облученных дозой $0,2 \times 10^{17} \text{см}^{-2}$ и отожженных (800° C/120 мин.), в видимом и ближнем ИК диапазоне определяется (рис.4) краем пропускания при 350 нм, доминирующей системой H3, и линиями меньшей интенсивности 594, 1077 нм. В ИК спектрах присутствуют системы

группы H1, наблюдавшиеся в алмазах типа Ia и после облучения высокоэнергетичными электронами [17]: а) узкая интенсивная линия при 1450 см^{-1} (система H1a); б) производная от дефектов A система H1b (4941 см^{-1} или 2024 нм) с интенсивностью не более 0,5 см^{-1} для алмазов с поглощением центров A около 12 см^{-1} ; в) производная от B1- дефектов система H1c (5170 см^{-1} или 1934 нм) также с малой интенсивностью – менее 0,2 см^{-1} для поглощения дефектов B1 около 2,5 см^{-1} .

Увеличение дозы облучения до $(0,4 \div 0,6) \times 10^{17} \text{см}^{-2}$ и температуры отжига до (1000° C/ 120 мин.) приводит к существенному изменению вида кривых поглощения (рис.5). Край пропускания смещается к 500 нм, появляется группа новых особенностей: дуплет узких линий при 638/643 нм, новая интенсивная система с линией при 913 нм, интенсивные линии при 958, 1268, 1646-1659, 1729-1746 нм, а также теперь уже интенсивные системы группы H1: системы H1a, H1c, H1b, плюс система H1g ($\sim 4444 \text{см}^{-1}$ или $\sim 2250 \text{ нм}$). Структура электронно-колебательных систем с выделенными ноль - фононными линиями и энергиями участвующих фононов приведена на рис.5.

Дальнейшее увеличение дозы облучения до $(1,0 \div 2,2) \times 10^{17}$ нейтронов/ см^2 и температуры отжига до (1500° C/180 мин.) приводит к следующим изменениям (рис.6): в видимом диапазоне доминируют две системы H3 и H2, в ближней ИК области сохраняется интенсивное поглощение в системах H1c и H1b, а остальные линии выжигаются, в том числе и система H1a. Появляется ряд новых линий с интенсивностью менее 1 см^{-1} . В видимом диапазоне это дуплет 644,4/649,6 нм; в однофононном диапазоне линии 2682,5; 2850,4; 2921,7; 4412,2 см^{-1} (детали на рис.6), близкие по положению к обнаруженным в [16] после облучения электронами и последующего отжига.

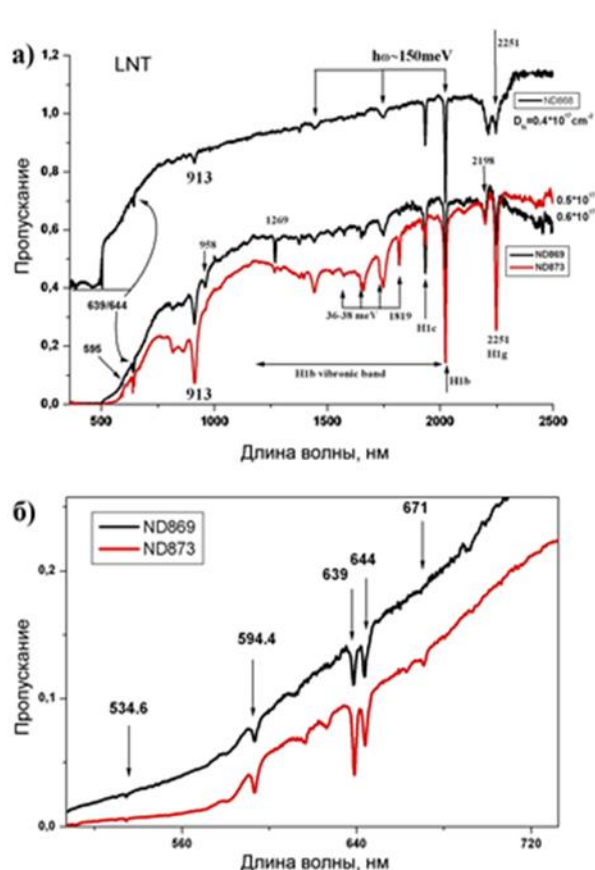


Рис.5. Спектры пропускания (а,б) алмазов типа Ia (ND 869 и ND 873) после облучения дозами нейтронов $D_N = (0.4 \div 0.6) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и НТ – отжига ($1000^\circ\text{C}/120 \text{ мин.}$), (б) – детали спектра в диапазоне 520-720 нм.

Fig. 5. Transmission spectra (a, b) of type Ia diamonds (ND 869 and ND 873) after irradiation with neutron doses $D_N = (0.4 \div 0.6) \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ and HT annealing ($1000^\circ\text{C}/120 \text{ min.}$), (b) – details of the spectrum in the range of 520-720 nm.

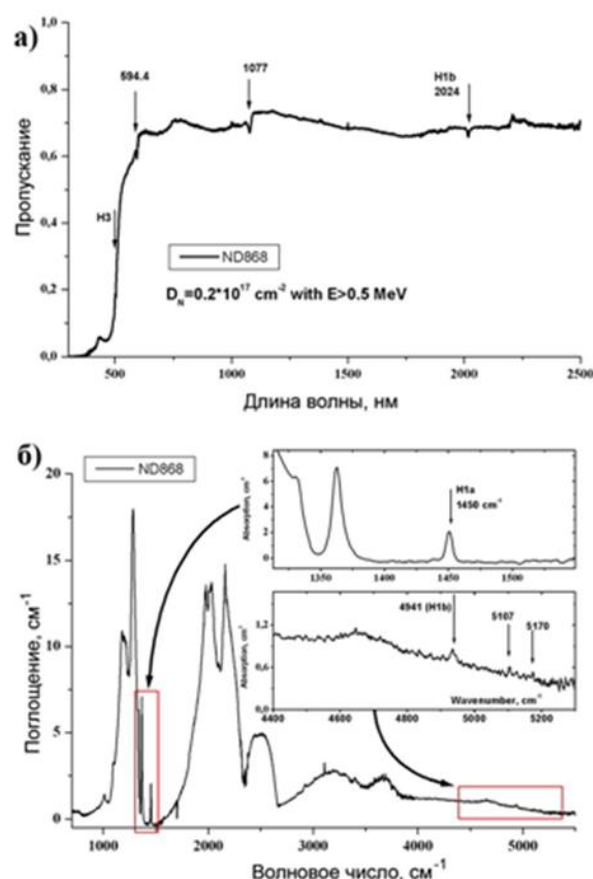


Рис.4. Спектры пропускания (а) и поглощения (б) алмаза типа Ia (ND 868) после облучения нейтроном дозой $D_N = 0.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и НТ – отжига ($800^\circ\text{C}/120 \text{ мин.}$): а) видимый и ближний ИК-диапазон, б) ИК-диапазон.

Fig. 4. Transmission (a) and absorption (b) spectra of type Ia diamond (ND 868) after neutron irradiation with a dose of $D_N = 0.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ and LT annealing ($800^\circ\text{C}/120 \text{ min.}$): a) visible and near IR range, b) IR range.

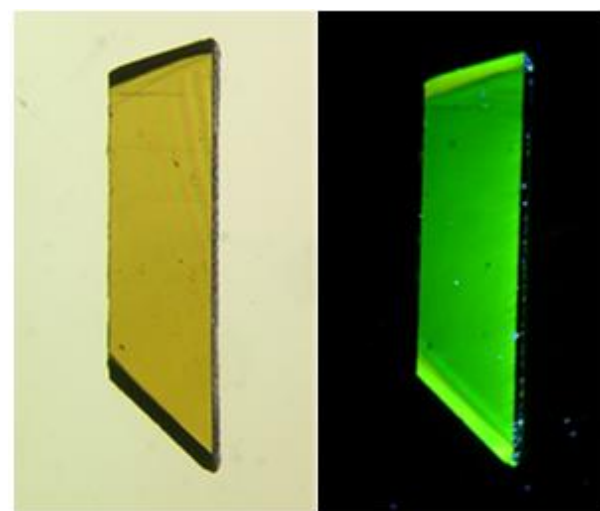
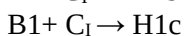
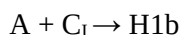


Рис.7. Вид в проходящем свете и фотолюминесценция (возб. $\lambda_{\text{Hg}} = 365 \text{ нм}$) алмаза типа IaA (ND 843) после облучения нейтронами дозой $D_N = 0.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и НТ – отжига ($800^\circ\text{C}/120 \text{ мин.}$). Окраска и люминесценция кристалла обусловлены центром НЗ.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты позволяют проанализировать трансформацию оптически активных дефектов в облученных нейтронами алмазах при их последующем отжиге.

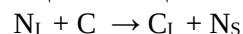
Следует отметить, что увеличение дозы облучения и температуры отжига тут же приводят к появлению множества других оптически активных дефектов. Первичные радиационные дефекты: вакансии, интерстиции и их комплексы, практически полностью отжигаются к 800° С трансформируясь в более высокотемпературные дефекты: в видимом диапазоне спектра - это центры НЗ и Н4, в ИК диапазоне - центры Н1а, Н1б и Н1с характерные для всех азотсодержащих алмазов. Исключение составляет центр 594 нм, также являющийся собственным дефектом кристаллической структуры алмаза. Поскольку он наблюдается в спектрах поглощения алмазов всех типов, в том числе CVD алмазов с $N_c \sim$ несколько ppb [24], облученных 3 МэВ-ными электронами в комбинации с последующим отжигом при 800°С. Поглощения в линии 594 нм становится заметным при 400° С, достигает максимума при 700°С, остается на этом уровне до 800°С, а при дальнейшем увеличении температуры в диапазоне 800-1100°С интенсивность линии 594 нм монотонно убывает и полностью отжигается при 1200°С. Синхронно, с уменьшением интенсивности линии 594 нм, начинается рост поглощения в системах Н1б и Н1с, связываемых с дефектами, производными от основных азотных А-, и В1- дефектов, соответственно. Возможно, распад дефекта 594 нм сопровождается освобождением собственных интерстиций, с большой вероятностью входящих в состав этого дефекта. Освободившиеся интерстиции (или их комплексы) тут же захватываются А-, и В1-дефектами, с образованием дефектов Н1б и Н1с, соответственно:



Поведение дефектов Н1б и Н1с при отжиге похоже друг на друга: - их интенсивность достигает максимума при 1200° С, когда поглощение 594 нм полностью отжигается. Затем приблизительно до 1250° С интенсивность дефектов почти не изменяется. При более высоких температурах начинается разрушение дефектов и обусловленное ими поглощение полностью исчезает при 1600 - 1650°С.

Отдельно проанализируем поведение оптического центра Н1а (дефект N_{21}), проявляющегося в спектрах ИК поглощения линией 1450 cm^{-1} . Центр регистрируется непосредственно после облучения, интенсивность линии 1450 cm^{-1} возрастает до 500°С, остается неизменным почти

до 1200°С, затем монотонно спадает, полностью отжигаясь при 1500°С. Когда начиная с 1200° С интенсивность линии 1450 cm^{-1} уменьшается, наблюдается резкий рост поглощения в системе Н2 с линией 986,3 нм. По-видимому, распад дефекта N_{21} происходит с образованием донора электронов - дефекта С, что в свою очередь приводит к перезарядке части сформировавшихся вследствие облучения и отжига дефектов НЗ. Пятый валентный электрон атомов донорного азота (дефекта С) переходит на близлежащие дефекты НЗ – дефекты, трансформируя их в Н2-дефекты: $H3 + e^- \rightarrow H2$. Для наблюдаемого интенсивного роста содержания Н2-дефектов, требуются большие концентрации как исходных НЗ-дефектов, так и вновь образующихся С-дефектов. Одновременное с разрушением дефектов Н1а возрастание поглощения Н2-дефектов указывает на то, что, скорее всего, именно N_{21} – дефекты трансформируются при отжиге в С-дефекты. Механизм трансформации представляется следующим образом. При повышении температуры отжига выше 1200°С, N_{21} – дефекты приобретают подвижность и распадаются на две отдельные азотные интерстиции. Мигрируя по кристаллической решетке и оказываясь вблизи регулярного узла, азотная интерстиция оказывается способной сместить регулярный атом углерода в межузельное положение. Заняв освободившийся узел решетки, азотная интерстиция становится С-дефектом - изолированным одиночным атомом азота в позиции замещения:



Интенсивность поглощения в системе Н2, а следовательно и концентрация донора электронов – С-дефектов, возрастает с возрастанием дозы облучения. Очевидно, что количество образующихся С-дефектов, также должно зависеть от суммарного содержания азота в кристалле. Действительно, как было установлено, интенсивность поглощения системы Н1а линейно зависит и от дозы облучения и от суммарного содержания азота в кристалле. Таким образом, появляется возможность оценить пороговое значение произведения дозы «надтепловых» нейтронов на суммарное содержание азота в кристалле, выше которого, за счет последовательной трансформации дефектов при отжиге 1500°С в кристаллической решетке появляются С-дефекты. Для расчетов можно выбрать кристаллы ND1 и ND1а (рис.6 а), в спектрах которых начинает проявляться

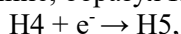
система Н2. В данном случае интенсивность Н2, сравнима в интенсивностью этой же системы, возникающей после НРНТ отжига пластически деформированных коричневых алмазов в тех случаях, когда в кристаллической структуре образуется около 4 ppm С-дефектов [21,25]. Поглощение в пике 1344 см^{-1} , вызываемое таким количеством С-дефектов, составляет около $0,1\text{ см}^{-1}$. Следовательно, пороговой величиной образования такого же количества С-дефектов в облученных нейтронами и отожженных алмазах типа Ia, равной произведению суммарной концентрации атомов азота в основных А-, и В1 – дефектах и дозы облучения, будет величина $380 \cdot 10^{17}\text{ ppm} \times \text{нейтронов/см}^2$.

Скорее всего, диссоциация Н1b -, и Н1с – дефектов, происходящая при более высокой температуре, к образованию С-дефектов отношения не имеет и сопровождается освобождением А-, и В1-дефектов и межузельных атомов углерода – либо в виде одиночных атомов, либо в виде более сложных комплексов.

Отметим, что в спектрах кристаллов, близких к чистому подтипу IaB1, т.е. с преобладанием азота в В1-форме, после облучения и отжига при 1500°C , не удалось зарегистрировать производные от В1-дефекта азотно-вакансионные Н4/Н5 -дефекты. В кристаллах подтипа IaB1 после облучения и отжига закономерно образуются 594 нм -, и N_{21} – дефекты. Наряду с ними, при захвате мигрирующей вакансии В1-дефектом, в диапазоне температур $800 - 1200^\circ\text{C}$, образуются Н4-дефекты:



Линии 594 нм и Н1с в алмазе типа IaB1 подвергаются такому же воздействию отжига как и линии 594 нм и Н1b в алмазах типа IaA, с преобладанием азота в А-форме, но при этом в алмазах подтипа IaB1 не возникает поглощения Н2. Однако, в структуре таких кристаллов вследствие отжига N_{21} – дефектов, должны образовываться С-дефекты. При появлении этих дефектов – доноров электронов, как было показано в работе [17], близлежащие к С-дефектам Н4-дефекты будут переходить в отрицательное зарядовое состояние, образуя Н5-дефекты:



Спектральным проявлением Н5-дефектов является ЭКС с БФЛ при $805,2\text{ нм}$ ($1,539\text{ эВ}$). Однако в спектрах систем Н4/Н5 не наблюдались. Возможно, это связано с тем, что при температуре отжига 1500°C большая часть де-

фектов Н4 уже трансформировалась в дефекты Н3: $\text{Н4} \rightarrow \text{Н3} + \text{Н3}$, но при этом достаточного количества Н3-дефектов еще не образовалось. Но, и возможно, что $\text{Н4} \rightarrow \text{Н3}$ -трансформация происходит через промежуточные стадии.

В спектрах поглощения облученных нейтронами и затем отожженных алмазов появляется множество и других особенностей в виде линий и систем: система 1077 нм ; дуплет линий $644,4/649,6\text{ нм}$; интенсивная система с линией при 913 нм ; группа интенсивных линий при $958, 1268, 1646-1659, 1729-1746\text{ нм}$; линии в ИК диапазоне $2682,5; 2850,4; 2921,7; 4412,2\text{ см}^{-1}$; и система Н1g ($\sim 4444\text{ см}^{-1}$ или $\sim 2250\text{ нм}$). Некоторые из этих особенностей, например система 1077 нм , появляются в спектрах алмазов после их облучения электронами в комбинации с последующим отжигом. Но большая часть особенностей, например дублет линий $644,4/649,6\text{ нм}$ [26], система с линией при 913 нм и система Н1g, по-видимому, являются характеристичными для облучения нейтронами. Система Н1g ($\sim 4444\text{ см}^{-1}$ или $\sim 2250\text{ нм}$) появляется в спектральном диапазоне, близком к проявлению в безазотных алмазах типа Ia т.н. янтарных центров (4100 см^{-1}) (Amber Centers [27]), связываемых с проявлением вакансионных кластеров [28,29]. Возможно, система Н1g также связана с вакансионными кластерами, модифицированными примесными атомами азота. Логично, и большую часть не описанных ранее в литературе центров, наблюдаемых в спектрах после облучения и отжига, также связать с проявлением собственных дефектов кристаллической структуры, устойчивых при данной температуре отжига в комбинации с атомами примесного азота.

Заключение и выводы

Таким образом, проведенное на представительной коллекции кристаллов исследование закономерностей образования и отжига радиационных повреждений в облученных нейтронами природных алмазах типа Ia, позволяет сделать следующие выводы:

1. При бомбардировке нейтронами, выбитые из решетки алмаза атомы углерода получают на порядки большую энергию, чем первично выбитые атомы при бомбардировке электронами с энергией 3 МэВ . Соответственно, обладая огромной энергией, первично выбитые атомы способны привести к дальнейше-

му смещению сотен атомов углерода – в кристаллах возникают «клинья смещения» (или кластеры) – частично аморфизированные области, приосевая, внутренняя часть которых обогащена вакансиями, а наружная – межузельными атомами. Различие в механизмах дефектообразования и в наборе первичных радиационных дефектов, при облучении быстрыми электронами и нейтронами, отражается в оптических спектрах.

2. Спектральным проявлением кластеров является интенсивное поглощение во всем диапазоне длин волн, а также линии 1530 и 1570 см⁻¹. При отжиге происходит разрушение кластеров – первичные радиационные дефекты практически полностью отжигаются к 800°C, трансформируясь в более высокотемпературные дефекты 594 нм и H1a, и характерные, производные от A-, и B1- дефектов, азотно-вакансионные центры H3 и H4, соответственно.

3. Увеличении температуры отжига облученных нейтронами алмазов типа Ia в диапазоне 800-1100°C приводит к разрушению дефекта 594 нм, при одновременном образовании производных от A-, и B1, дефектов H1b и H1c, соответственно.

4. В кристаллах типа IaA, с преобладанием A-формы азота, рост H2-дефектов в диапазоне температур отжига 1200-1500° C происходит синхронно с разрушением дефектов H1a, что может быть связано с трансформацией азотной интерстиции в C-дефект, с последующей перезарядкой части H3 – дефектов в отрицательное зарядовое состояние.

5. Пороговое значение произведения дозы «надепловых» нейтронов на суммарное содержание азота в кристалле, выше которого, при отжиге 1500° C за счет последовательной трансформации дефектов, в кристаллической решетке появляется около 4 ppm C-дефектов, составляет $380 \cdot 10^{17}$ ppm² нейтронов/см².

6. Линии 594 нм и H1c в кристаллах типа IaB1, с преобладанием B1-формы азота, подвергаются такому же воздействию отжига как и линии 594 нм и H1b в алмазах типа IaA, но при этом не возникает поглощения H2 -, и H4/H5-дефектов.

7. Характерными для облучения нейтронами являются: а) система H1g (~ 4444 см⁻¹ или ~ 2250 нм); б) дуплет узких линий поглощения (80K) при 638/643 нм; и в) система в ближнем ИК диапазоне с линией при 913 нм.

Список литературы

1. Bradac, C., Gao, W., Forneris, J., Trusheim, M. E., & Aharonovich, I. // Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond. *Nature Communications*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13332-w>.
2. Lenzini, F., Gruhler, N., Walter, N., & Pernice, W. H. P. Diamond as a platform for integrated quantum photonics. // *Advanced Quantum Technologies*. – 2018. – Vol. 1. – p 3-11.. <https://doi.org/10.1002/qute.201800061>.
3. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yelisseyev A., Vins V. NV⁻ diamond laser. // *Nature communications*. – 2021. – Vol.12, 7118. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27470-7>.
4. Lipatov E., Genin D., Shulepov M, Vins V. Superluminescence in the phonon wing of the photoluminescence spectrum of NV centres in diamond optically pumped at $\lambda = 532$ nm. // *Quantum Electronics*. – 2022. – Vol.52. – №5.- p. 465-468. DOI: 10.1070/QEL18044.
5. Genin D., Lipatov E., Shulepov M, Vins V., Yelisseyev A., Izmailov I., Savvin A., Dormidonov A. Microjoule-Range Diamond NV-Laser with Optical Pumping. // *Physica status solidi (RRL)* – Rapid Research Letters. – 2024.-Vol. 18.- p 2-18. DOI: 10.1002/pssr.202300062.
6. Rubinas O, Vorobyov V., Soshenko V., Bolshedvorskii S., Sorokin V., Smolyaninov A., Vins V., Yelisseyev A., Akimov A. Spin properties of NV centers in high-pressure, high-temperature grown diamond. // *J. Phys. Commun*. – 2018. – Vol.2.- p.115003. DOI: 10.48550/arXiv.1806.09816.
7. Rubinas O., Soshenko V., Cojocaru I., Bolshedvorskii S., Vilyuzhanina P., Primak E., Drofa S., Kozodaev A., Vins V., Sorokin V., Smolyaninov A., Akimov A. Interaction of nitrogen-vacancy centers in diamond with a dense ensemble of carbon-13. // *AVS Quantum Sci.* – 2024.- Vol. 6. doi: 10.1116/5.0180456.
8. Tchernij S., Lüthmann T., Herzig T. et al. Single-Photon emitters in Lead-Implanted Single-Crystal diamond. // *ACS Photonics*. – 2018. – Vol. 5. – No 12. – P.4864–4871. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01013>.
9. Lüthmann T., John R., Wunderlich R., et al. Coulombdriven single defect engineering for scalable qubits and spin sensors in diamond. // *Nature*.

- ture Communications. – 2019. – Vol. 10. – P.1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12556-0>.
10. Magyar, A., Hu, W., Shanley, T., Flatté, M. E., Hu, E., & Aharonovich, I. Synthesis of luminescent europium defects in diamond. // *Nature Communications*. – Vol 5. – p. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms4523>.
11. Orphal-Kobin L., Unterguggenberger K., Pregnolato T. et al. Optically coherent Nitrogen-Vacancy defect centers in diamond nanostructures. // *Physical Review X*. – 2023. – Vol. 13(1). <https://doi.org/10.1103/physrevx.13.011042>.
12. Терентьев С.А. Рентгеновская и алмазная оптика. Новые материалы и приборы для технологического прорыва. // *НАНО ИНДУСТРИЯ*. – т.13. – №3-4. – стр.97. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3-4.168.173.
13. Mansoor M, Czelej K, Eaton-Magaña S, Mansoor Me. et al. Engineering NV Centers via Hydrogen-Driven Defect Chemistry in CVD Diamonds for Quantum Applications: NVHx Dissociations into NV, Origin of 468nm Center, and Cause of Brown Coloration. //DOI: 10.48550/arXiv.2507.00300.
14. Хмельницкий Р.А. Оптические методы в геммологии алмаза». // *ООО Алмазный НТК, из-во «Перо»*. – 2025. – 152 стр. ISBN 978-5-00258-308-9.
15. А.Г. Бураченко, В.Г. Винс, Д.Е. Генин, А.П. Елисеев, Е.И. Липатов, О.И. Лыга, В.С. Рипенко, В.В. Чашин, М.А. Шулепов (2024) «Квантовый магнитометр на основе N2V центров в алмазе» *Патент РФ № 2 816 560*.
16. А.Г. Бураченко, В.Г. Винс, Д.Е. Генин, А.П. Елисеев, Е.И. Липатов, О.И. Лыга, В.С. Рипенко, В.В. Чашин, М.А. Шулепов (2024) «Квантовый магнитометр на основе алмазного лазера». *Патент РФ № 2 825 078*.
17. Винс В., Елисеев А., Старостенков М. Генерация и отжиг радиационных дефектов в алмазах, облученных электронами. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2011.- Том 8. - №1. - стр.66-79.
18. Vins V., Yelisseyev A., Lobanov S., Afonin D., Maksimov A., Blinkov A. APHT treatment of brown type Ia natural diamonds: dislocation movement or vacancy cluster destruction? // *Diamond & Related Materials*. – 2010. – Vol.19. – p.829-832. DOI: 10.1016/j.diamond.2010.02.010.
19. Yelisseyev A., Vins V., Lobanov S., Afonin D., Maksimov A., Blinkov A. Aggregation of Donor Nitrogen in Irradiated Ni-Containing Synthetic Diamonds. // *Journal of Crystal Growth*. – 2011.- Vol. 318. – p. 539-544. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.10.043.
20. Винс В., Елисеев А. Агрегация азота в синтетических алмазах с никелевыми и радиационными дефектами. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2011. – том 8. - №1. - стр.17-24.
21. Dobrinets I., Vins V., and Zaitsev A. HPHT-Treated Diamonds. // *Springer Berlin Heidelberg*. – 2013. – 257 p. DOI: 10.1007/978-3-642-37490-6.
22. Динс Д., Винйард Д. Радиационные эффекты в твердых телах. // М.: Иностран. Лит.. – 1960. – 243 стр.
23. Liggins S. Identification of point defects in treated single crystal diamond. // Thesis Submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophy. – 2010. <http://webcat.warwick.ac.uk/record=b2491628~S15>.
24. Vins V., Yelisseyev A., Smovzh D., Novopashin S. Optical properties of CVD single crystal diamonds before and after different post-growth treatments. // *Diamond & Related Materials*. – 2018. – Vol. 86. – p. 79-86. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.04.022.
25. Vins V., Eliseev A. Effect of annealing at high pressures and temperatures on the defect-admixture structure of natural diamonds. // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2010. Vol.1. – No 4. – p.303 – 310. DOI: 10.1134/S2075113310040076.
26. Zaitsev A. Optical Properties of Diamond. // *A Data Handbook*. Berlin: Springer. – 2001. – 502 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04548-0.
27. Massi L., Fritsch E., Collins A., Hainschwang T., Notari F. The “amber centres” and their relation to the brown colour in diamond. // *Diamond & Related Materials*. – 2005. – Vol.14. p. 1623–1629. DOI: 10.1016/j.diamond.2005.05.003.
28. Shiryayev A., Titkov S. Spatial distribution of “Amber” defects in diamond: Results of IR mapping. // *New Data Miner*. – 2018. – Vol.52. – p. 87–90.
29. Eaton-Magaña S., Moe K. Temperature effects on radiation stains in natural diamonds. // *Diamond & Related Materials*. – 2016. – Vol. 64. – P. 130–142. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.02.009.

Информация об авторах

Винс В.Г. – доктор физико-математических наук, директор ООО «ВЕЛМАН».

Елисеев А.П. – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

References

1. Bradac, C., Gao, W., Forneris, J., Trusheim, M. E., & Aharonovich, I. // Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond. *Nature Communications*. – 2019. - Vol. 10. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13332-w>.
2. Lenzini, F., Gruhler, N., Walter, N., & Pernice, W. H. P. Diamond as a platform for integrated quantum photonics. // *Advanced Quantum Technologies*. – 2018. - Vol. 1. – p 3-11.. <https://doi.org/10.1002/qute.201800061>.
3. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yelisseyev A., Vins V. NV⁻ diamond laser. // *Nature communications*. – 2021. – Vol.12, 7118. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27470-7>.
4. Lipatov E., Genin D., Shulepov M, Vins V. Superluminescence in the phonon wing of the photoluminescence spectrum of NV centres in diamond optically pumped at $\lambda = 532$ nm. // *Quantum Electronics*. – 2022. - Vol.52. - №5.- p. 465-468. DOI: 10.1070/QEL18044.
5. Genin D., Lipatov E., Shulepov M, Vins V., Yelisseyev A., Izmailov I., Savvin A., Dormidonov A. Microjoule-Range Diamond NV-Laser with Optical Pumping. // *Physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters*. – 2024.-Vol. 18.- p 2-18. DOI: 10.1002/pssr.202300062.
6. Rubinas O, Vorobyov V., Soshenko V., Bolshedvorskii S., Sorokin V., Smolyaninov A., Vins V., Yelisseyev A. and Akimov A. Spin properties of NV centers in high-pressure, high-temperature grown diamond. // *J. Phys. Commun*. – 2018. – Vol.2.- p.115003. DOI: 10.48550/arXiv.1806.09816.
7. Rubinas O., Soshenko V., Cojocar I., Bolshedvorskii S., Vilyuzhanina P., Primak E., Drofa S., Kozodaev A., Vins V., Sorokin V., Smolyaninov A. and Akimov A. Interaction of nitrogen-vacancy centers in diamond with a dense ensemble of carbon-13. // *AVS Quantum Sci.*- 2024.- Vol. 6. doi: 10.1116/5.0180456.
8. Tchernij S., Lühmann T., Herzig T. et al. Single-Photon emitters in Lead-Implanted Single-Crystal diamond. // *ACS Photonics*. – 2018. - Vol. 5. - №12. - P.4864–4871.
9. Lühmann T., John R., Wunderlich R. et al. Coulombdriven single defect engineering for scalable qubits and spin sensors in diamond. // *Nature Communications*. – 2019. –Vol. 10. P.1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12556-0>.
10. Magyar, A., Hu, W., Shanley, T., Flatté, M. E., Hu, E., & Aharonovich, I. Synthesis of luminescent europium defects in diamond. // *Nature Communications*. - Vol 5. – p. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms4523>.
11. Orphal-Kobin L., Unterguggenberger K., Pregolato T. et al. Optically coherent Nitrogen-Vacancy defect centers in diamond nanostructures. // *Physical Review X*. – 2023. - Vol. 13(1). <https://doi.org/10.1103/physrevx.13.011042>.
12. Terentyev S. (2020) X-ray and diamond optics. New materials and devices for a technological breakthrough. *NANO INDUSTRY*, v.13, no.3-4(97). (In Russ.) DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3-4.168.173
13. Mansoor M, Czelej K, Eaton-Magaña S, Mansoor Me. et al.(2025) « Engineering NV Centers via Hydrogen-Driven Defect Chemistry in CVD Diamonds for Quantum Applications: NVHx Dissociations into NV, Origin of 468nm Center, and Cause of Brown Coloration» DOI: 10.48550/arXiv.2507.00300.
14. Khmelnitsky R.A. (2025) "Optical methods in diamond gemology." LLC Almazny NTK, from Pero, 152 pages. (In Russ.) ISBN 978-5-00258-308-9.
15. A.G. Burachenko, V.G. Vince, D.E. Genin, A.P. Eliseev, E.I. Lipatov, O.I. Lyga, V.S. Ripenko. V.V. Chashchin, M.A. Shulepov (2024) "Quantum magnetometer based on N2V centers in diamond" Russian Federation Patent No. 2 816 560. (In Russ.)
16. A.G. Burachenko, V.G. Vince, D.E. Genin, A.P. Eliseev, E.I. Lipatov, O.I. Lyga, V.S. Ripenko. V.V. Chashchin, M.A. Shulepov (2024) "Quantum magnetometer based on a diamond laser". Russian Federation Patent No. 2 825 078. (In Russ.)
17. Vins V., Yelisseyev A., Starostenkov M. Generation and annealing of radiation defects in diamonds irradiated with electrons. // *Fundamental*

Problems of Modern Materials Science. – 2011.- Vol. 8, No. 1, pp. 66-79. (In Russ.)

18. Vins V., Yeliseyev A., Lobanov S., Afonin D., Maksimov A., Blinkov A. APHT treatment of brown type Ia natural diamonds: dislocation movement or vacancy cluster destruction? // *Diamond & Related Materials*. – 2010. - Vol.19. -p. 829-832. DOI: 10.1016/j.diamond.2010.02.010.

19. Yeliseyev A., Vins V., Lobanov S., Afonin D., Maksimov A., Blinkov A. Aggregation of Donor Nitrogen in Irradiated Ni-Containing Synthetic Diamonds. // *Journal of Crystal Growth*. – 2011.- Vol. 318. - p. 539-544. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.10.043.

20. Vins V., Eliseev A. (2011) "Nitrogen Aggregation in Synthetic Diamonds with Nickel and Radiation Defects. // *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. – 2011. - Vol. 8. - No. 1. -pp. 17–24. (In Russ.)

21. Dobrinets I., Vins V., and Zaitsev A. HPHT-Treated Diamonds. // *Springer Berlin Heidelberg*. – 2013. - 257 p. DOI: 10.1007/978-3-642-37490-6.

22. Deans D., Vineyard D.. Radiation effects in solids. // M.: Foreign. Lit. - 1960.- 243 pp.

23. Liggins S. Identification of point defects in treated single crystal diamond. // Thesis Submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophy. - 2010. <http://webcat.warwick.ac.uk/record=b2491628~S15>.

24. Vins V., Yeliseyev A., Smovzh D., Novopashin S. Optical properties of CVD single crystal diamonds before and after different post-growth treatments. // *Diamond & Related Materials*. –

2018. - Vol. 86. - p. 79-86. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.04.022.

25. Vins V., Eliseev A. Effect of annealing at high pressures and temperatures on the defect-admixture structure of natural diamonds. // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2010. - Vol.1. - No 4. - p. 303 – 310. DOI: 10.1134/S2075113310040076.

26. Zaitsev A. Optical Properties of Diamond. // *A Data Handbook*. Berlin: Springer. – 2001. - 502 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04548-0.

27. Massi L., Fritsch E., Collins A., Hainschwang T., Notari F. The “amber centres” and their relation to the brown colour in diamond. // *Diamond & Related Materials*. – 2005. – Vol.14. p. 1623–1629. DOI: 10.1016/j.diamond.2005.05.003.

28. Shiryayev A., Titkov S. Spatial distribution of “Amber” defects in diamond: Results of IR mapping. // *New Data Miner*. – 2018. – Vol.52. – p. 87–90.

29. Eaton-Magaña S., Moe K. Temperature effects on radiation stains in natural diamonds. // *Diamond & Related Materials*. - 2016. - Vol. 64. - P. 130–142. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.02.009.

Information about the authors

1. V.G. Vins – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of VELMAN LLC.

2. A.P. Eliseev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher at the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 21 Nov. 2025; approved after reviewing 23 Feb. 2026; accepted for publication 02 Mar. 2026.