

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2024

№ 8

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 28006



Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2024

Учредитель:
Национальный исследовательский Томский государственный университет

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА
«ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»**

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета,
д-р хим. наук, профессор, академик РАН,
почетный доктор НИ ТГУ
Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор
И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.А. Дынкин – д-р экон. наук, профессор,
академик РАН
С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор
С.Д. Каракотов – д-р хим. наук, профессор,
академик РАН
М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.В. Лопатин – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
Г.В. Сакович – д-р техн. наук, профессор,
академик РАН
В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор,
академик РАН
А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук,
профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук,
профессор
М.Г. Хмелева – ответственный секретарь,
канд. физ.-мат. наук
Д.Ю. Баланев – канд. психол. наук
С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук
Н.А. Глушенко – канд. ист. наук
К.С. Голохваст – д-р биол. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАО
В.М. Грузнов – д-р техн. наук
Е.А. Данилова – д-р полит. наук
И.А. Жуков – д-р техн. наук
А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук
В.А. Кагадей – д-р физ.-мат. наук, профессор
Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А.С. Князев – д-р хим. наук
М.И. Лернер – д-р техн. наук
Е.М. Максимов – д-р техн. наук
Г.Я. Павловец – д-р техн. наук, профессор
А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАН
В.И. Сачков – д-р хим. наук, доцент
В.С. Смирнов – канд. хим. наук
В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А. Тсатсакис – д-р биол. наук, иностранный член РАН
С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук
А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

E-mail: safety@mail.tsu.ru

**EDITORIAL COUNCIL
LIFE SAFETY /
SECURITY TECHNOLOGIES**

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council, Dr.Sc.
(Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of
Sciences, Honorary Doctor of TSU
Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor
Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander A. Dynkin – Dr.Sc. (Economics), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor
Salis D. Karakotov – Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician
of the Russian Academy of Sciences
Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexey V. Lopatin – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of
the Russian Academy of Sciences
Gennady V. Sakovich – Dr.Sc. (Engineering), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Vladimir P. Chekhonin – Dr.Sc. (Medicine), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics),
Professor

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc.
(Physics and Mathematics), Professor
Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc.
(Physics and Mathematics)
Dmitry Yu. Balanev – Cand.Sc. (Psychology)
Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)
Kirill S. Golokhvast – Dr.Sc. (Biology), Professor
of the Russian Academy of Sciences, corresponding member
of the Russian Academy of Education
Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)
Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)
Ilya A. Zhukov – Dr.Sc. (Engineering)
Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Valery A. Kagadey – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Alexey S. Knyazev – Dr.Sc. (Chemistry)
Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)
Evgeniy M. Maksimov – Dr.Sc. (Engineering)
Georgiy Y. Pavlovets – Dr.Sc. (Engineering), Professor
Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor
of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the
Russian Academy of Sciences
Victor I. Sachkov – Dr.Sc. (Chemistry), Associate professor
Vladimir S. Smirnov – Cand.Sc. (Chemistry)
Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Aristidis Tsatsakis – Dr.Sc. (Biology), Foreign Member of the
Russian Academy of Sciences
Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

СОДЕРЖАНИЕ

Квантовые технологии

Липатов Е.И. Квантовые технологии для решения задач безопасности жизнедеятельности	5
Генин Д.Е., Самолов А.В. Современное состояние развития лазеров на NV-центрах в алмазе	13
Чащин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V° -центров в алмазе при различных температурах	22
Васильева Л.А., Бородулин З.И., Шулепов М.А. NV и N_2V -центры окраски алмаза в спектрах электролюминесценции алмаза	28

Углеродная электроника и фотоника

Крылов А.А., Бураченко А.Г., Рипенко В.С., Переседова Д.А., Вуколов А.В. Спектры свечения малопримесных алмазных образцов под действием пучков электронов с энергией десятки кэВ – единицы МэВ	37
Рипенко В.С., Переседова Д.А., Гусев И.С., Шулепов М.А., Бураченко А.Г., Крылов А.А., Артёмов К.П., Гольденберг Б.Г., Винс В.Г. Катодо-, фото- и рентгенолюминесценция синтетического алмаза, содержащего NV° -центры	45
Бородулин З.И., Васильева Л.А., Смородин К.И., Шулепов М.А. Электролюминесценция азот-вакансионных и никелевых центров окраски алмаза	52
Резванова А.Е., Кудряшов Б.С., Пономарёв А.Н. Модель метода неразрушающего контроля керамического материала на основе гидроксипатита с добавками углеродных нанотрубок	59
Павлова А.А., Сусляев В.И., Коровин Е.Ю., Мазиллов Д.А. Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок	67
Липатов Е.И., Маслова Ю.В., Ходова Ю.В., Коротаев А.Г., Доценко О.А., Васильев А.В., Садыков Г.И. От стартапа – к промышленному предприятию: совместная деятельность вузов и промышленных партнёров	75

CONTENTS

Quantum technologies

Lipatov E.I. Quantum technologies for solving life safety problems	5
Genin D.E., Samolov A.V. The current state of development of lasers at NV centers in diamond	13
Chashchin V.V., Lyga O.I., Shulepov M.A. Magnetosensitivity of N_2V^0 -photoluminescence centers in diamond at different temperatures	22
Vasilyeva L.A., Borodulin Z.I., Shulepov M.A. NV and N_2V color centers in electroluminescence spectra of diamond	28

Carbon Electronics and Photonics

Krylov A.A., Burachenko A.G., Ripenko V.S., Peresedova D.A., Vukolov A.V. Radiation spectra of low-impurity diamond samples under the action of electron beams with energies of tens of keV – units of MeV	37
Ripenko V.S., Peresedova D.A., Gusev I.S., Shulepov M.A., Burachenko A.G., Krylov A.A., Artemov K.P., Goldenberg B.G., Vins V.G. Luminescence of synthetic diamonds depending on the method of excitation	45
Borodulin Z.I., Vasilyeva L.A., Smorodin K.I., Shulepov M.A. Electroluminescence of nitrogen-vacancy and nickel color centers in diamond	52
Rezvanova A.E., Kudryashov B.S., Ponomarev A.N. Model of a non-destructive testing method for ceramic material based on hydroxyapatite with carbon nanotube additives	59
Pavlova A.A., Suslyayev V.I., Korovin E.Yu., Mazilov D.A. Ferrofluids with controlled shielding characteristics based on magnetite and multi-walled carbon nanotubes	67
Lipatov E.I., Maslova Yu.V., Khodova Yu.V., Korotaev A.G., Dotsenko O.A., Vasilyev A.V., Sadykov G.I. From Startup to Industrial Enterprise: Joint Activities of Universities and Industrial Partners	75

Квантовые технологии

Научная статья

УДК 530.145.82, 543.544.7.08, 621.391.7

doi: 10.17223/29491665/8/1

Квантовые технологии для решения задач безопасности жизнедеятельности

Евгений Игоревич Липатов^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

^{1,2} *evlip@mail2000.ru*

Аннотация. Приведен краткий обзор квантовых технологий, имеющих стратегическое значение как для жизнедеятельности государства, так и для развития общества. Синтетический алмаз – один из краеугольных материалов квантовых технологий будущего, включая лазеры, квантовые сенсоры, однофотонные источники, фотонные интегральные схемы и квантовые компьютеры. С учётом научно-технологического задела, сформированного в 2010–2020-х гг. в Сибири, в Томске имеются все необходимые условия для создания крупного производства синтетического алмаза и высокотехнологических изделий и устройств на его основе.

Ключевые слова: технологии безопасности жизнедеятельности, квантовые технологии, алмаз, квантовая криптография, квантовый компьютер, квантовый сенсор

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030), проект № 2.4.4.23 ИГ «N₂V⁰-центры окраски алмаза для квантовой магнитометрии».

Для цитирования: Липатов Е.И. Квантовые технологии для решения задач безопасности жизнедеятельности // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 5–12. doi: 10.17223/29491665/8/1

Original article

doi: 10.17223/29491665/8/1

Quantum technologies for solving life safety problems

Evgeniy I. Lipatov^{1,2}

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

² *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

^{1,2} *evlip@mail2000.ru*

Abstract. The article provides a brief overview of quantum technologies, which importance of strategic both for the life of the state and for the development of society. Synthetic diamond is one of the cornerstones of future quantum technologies, including lasers, quantum sensors, single-photon sources, photonic integrated circuits and quantum computers. In addition, diamond is in demand in one of the areas of post-silicon technologies – carbon electronics and photonics – for creating heat sinks, hard radiation detectors (photons, elementary particles) and radiation-resistant optoelectronic devices. Considering the scientific and technological groundwork formed in the 10-20 s of the new century, Tomsk have all the necessary conditions to create a large-scale production of synthetic diamond and high-tech products and devices based on it, including quantum components. There is a resource base for production, trained technological, scientific and pedagogical personnel, and a strategically advantageous geopolitical position.

Keywords: life safety technologies, quantum technologies, diamond, quantum cryptography, quantum computer, quantum sensor

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Tomsk State University Development Program (Priority 2030), project №2.4.4.23 IG «N₂V⁰ diamond color centers for quantum magnetometry».

For citation: Lipatov, E.I. (2024). Quantum technologies for solving life safety problems. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedejatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 5–12 (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/1

Квантовые технологии на страже безопасности жизнедеятельности

Квантовые криптография, вычисления и сенсорика, которые принято называть технологиями вто-

рой квантовой революции, постепенно выходят из лабораторий научных центров и исследовательских подразделений компаний в виде технологий, устройств и систем, производимых в промышленном масштабе.

Квантовое шифрование основано на невозможности создания идеальной копии произвольного заранее неизвестного состояния элементарной частицы. Методы квантовой криптографии начали развиваться с 70-х гг. прошлого века [1]. Рекорды дальности установления связи с применением методов квантовой криптографии по оптоволоконным линиям выросли с 23 км в 1995 г. до более 1 000 км в 2023 г. Ведётся активная работа по развитию квантовой спутниковой связи, т.е. атмосферных и беспроводных каналов связи. «Бесшумные» однофотонные приемники уже созданы и выпускаются в промышленных масштабах. В настоящее время в квантовой криптографии используется ослабленное лазерное излучение, но активно ведутся исследования и разработки по созданию истинно однофотонных источников.

Необходимость в квантовой криптографии возникла как следствие развития квантовых вычислений изначально математическими методами и симуляторами, а затем ввиду создания квантовых компьютеров [2], потенциально способных восстанавливать сообщения, защищенные методами асимметричного шифрования [3]. Данные методы ныне повсеместно применяются для защиты передаваемых данных в сети интернет – от соцсетей до банковских и госуслуг. Для решения обратной задачи (дешифровки) по установлению закрытого ключа на основе известного открытого ключа необходимо быстро производить разложение числа на простые сомножители с помощью алгоритмов факторизации. Однако для чисел порядка 10^{10} и более время факторизации с помощью суперкомпьютеров имеет масштаб лет и столетий, что делает дешифровку сообщений неактуальной. Предполагается, что алгоритм Шора (квантовый алгоритм факторизации) позволит дешифровать сообщения, защищенные методами асимметричного шифрования, за время в масштабе секунд. Или уже позволяет. Косвенно на реальность этого указывают усилия, предпринимаемые ведущими странами по развитию методов постквантового шифрования [4], т.е. методов абсолютной защиты данных без использования квантовых алгоритмов, а также тот факт, что практически повсеместно в мире квантовая криптография перешла в область закрытых разработок.

Действительно, квантовые компьютеры соревнуются по количеству кубитов: от 7 кубитов в 2001 г. до 433 кубитов в 2023 г. Конечно же, квантовые компьютеры являются одним из путей дальнейшего развития вычислительной техники ввиду того, что современная микроэлектроника достигла своего фундаментального предела миниатюризации, ограниченного размерами одного атома полупроводникового материала (размерами на порядок большего масштаба, связанного с паразитным туннелированием

электронов через обедненный слой затвора интегрального полевого транзистора). Но нельзя отрицать и того, что развитие квантовой криптографии и квантовых компьютеров напоминает соревнование брони и снаряда: если бы не был создан снаряд, не понадобилась бы и броня.

Физическая реализация квантовых компьютеров происходит с использованием различных технологий, среди которых можно условно выделить три направления: многоатомные кубиты; ионы / атомы в вакуумных ловушках; дефекты структуры в твердых телах. Ввиду накопления систематической ошибки многоатомные кубиты со временем будут вытеснены кубитами из отдельных атомов в вакууме или в твердотельной матрице. На данный момент среди одноатомных кубитов вырвались вперед ионы металлов в ионных ловушках [5], но с точки зрения миниатюризации квантовых компьютеров, несомненно, атомы (дефекты структуры) в твердотельной матрице (в полупроводнике) представляют наибольший интерес.

Квантовые сенсоры используют паразитную чувствительность кубитов к изменениям параметров окружающей среды, таким как флуктуации температуры, электромагнитного и гравитационного поля и т.д. Такие чувствительные сенсоры найдут широкое применение – от нейроинтерфейсов до систем дистанционного зондирования Земли.

Упомянутые выше аспекты имеют высокую государственную важность, поскольку со временем будут иметь отношение ко всем процессам жизнедеятельности общества. Именно поэтому развитию квантовых технологий в России уделяется повышенное внимание.

Алмаз в квантовых технологиях и углеродной электронике и фотонике

Алмаз – высокотемпературный радиационно стойкий полупроводник, характеризующийся многообразием центров окраски [6]. В отличие от традиционных полупроводников, таких как кремний и арсенид галлия, а также новых полупроводников, таких как карбид кремния и нитрид галлия, алмаз демонстрирует высокую интенсивность люминесценции при комнатной и повышенной температуре (сотни градусов Цельсия). Некоторые из центров окраски алмаза, содержащие атомы азота, кремния и германия, выступают в роли кубитов, однофотонных источников и центров активных лазерных сред.

Создание алмазного лазера на центрах окраски с оптической накачкой [7–9] продемонстрировало возможность использования алмаза как основы для фотонных интегральных схем (ФИС). ФИС на основе алмаза востребованы в квантовой сенсорике, квантовых компьютерах и высокотемпературных радиационно стойких оптических компьютерах.

Ведутся разработки алмазных инжекционных светоизлучающих устройств (светодиодов), генерирующих на длинах волн от синей области видимого света до ближнего инфракрасного диапазона [10–12]. В ближайшей перспективе возможно создание алмазных инжекционных лазеров, в основе которых – явление электролюминесценции.

Потребность в таких светоизлучающих диодах диктуется необходимостью управлять кубитом / активным центром сенсора / элементом оптической памяти на основе центров окраски алмаза с помощью

лазерного излучения, попадающего в контур поглощения используемых центров. Например, для управления центрами NV^- необходимо излучение в области 500–630 нм, т.е. требуется разработать алмазные инжекционные лазеры на центрах N_2V^+ , GeV_2^- или NV^0 (рис. 1).

Сами по себе лазеры на центрах окраски алмаза, даже с оптической накачкой, способны составить конкуренцию фемтосекундным лазерам на основе $Ti:Al_2O_3$ ввиду высокой теплопроводности алмаза и, как следствие, несущественности паразитных эффектов тепловой линзы.

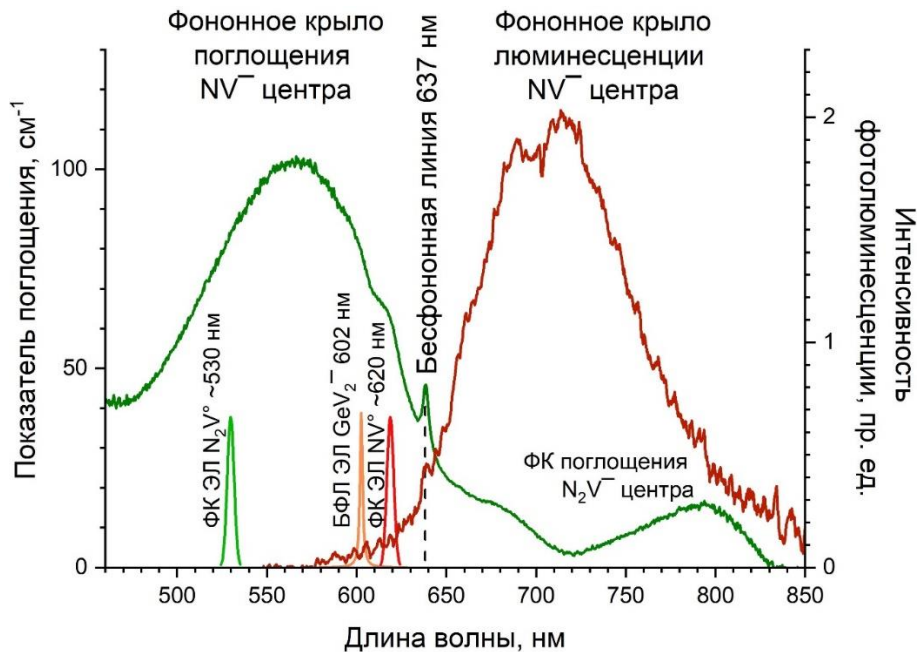


Рис. 1. Спектр оптического поглощения (слева) и спектр фотолюминесценции (справа) центра NV^- окраски алмаза с бесфононной линией на длине волны 637 нм. В области 520–640 нм показаны положения полос предполагаемой лазерной генерации центров окраски N_2V^+ (~530 нм), GeV_2^- (602 нм) и NV^0 (~620 нм), способных возбуждать люминесценцию центров NV^-

Fig. 1. The optical absorption spectrum (left) and photoluminescence spectrum (right) of the NV^- diamond color center with the phononless line at 637 nm. In the spectral region of 520–640 nm, the band positions of the proposed laser generation of the NV^- (~530 nm), GeV_2^- (602 nm), and N_2V^+ (~620 nm) color centers capable of exciting the luminescence of NV^- centers are shown

Инжекционные алмазные лазеры найдут своё применение в контрольно-измерительных системах и системах связи космических аппаратов, позволяющих отказаться от медных проводников, что существенно удешевит стоимость запуска и увеличит выводимую полезную нагрузку. Современный космический аппарат почти на 30 % своей массы состоит из медных проводников. При этом наблюдается тенденция увеличения бортового напряжения. При текущем уровне в 100 В недолговечность изоляции медных проводников ограничивает работу космических аппаратов ввиду электрического пробоя и замыканий. Альтернативой увеличению бортового напряжения и решению соответствующих проблем с электрической изоляцией является переход на оптоволоконные системы

управления, связи, контрольных измерений, а также энергопитания для удаленных маломощных блоков космического аппарата.

Ограничивающим фактором данного перехода является отсутствие радиационно стойких полупроводниковых лазеров. Алмазные инжекционные лазеры будут потенциально на порядок более долговечными в условиях воздействия тяжелых заряженных частиц, чем стандартные инжекционные лазеры ближнего инфракрасного диапазона на основе полупроводниковых гетероструктур. В то же время не будет являться проблемой использование алмазных лазеров видимого диапазона (в спектральной области интенсивного релеевского рассеяния в оптоволокне), поскольку длина оптоволоконных линий на борту космического аппарата не будет превышать 1 км.

Создание однофотонных источников на основе центров окраски алмаза идёт по двум направлениям: на основе наноалмазов, получаемых методом детонации смеси взрывчатых веществ в условиях отрицательного кислородного баланса [13], и на основе алмазных светоизлучающих PIN-структур [11, 12].

Спиновые взаимодействия парных электронов в центрах окраски алмаза (например, в центрах NV^- и N_2V^0) создают тонкое расщепление электронных состояний, необходимое для работы кубитов и квантовых сенсоров. Квантовые сенсоры на основе центров окраски в алмазе имеют высокий потенциал применения в медицине для задач терагностики, при создании неинвазивных нейроинтерфейсов, в системах навигации беспилотных летательных аппаратов в качестве магнитометров и гироскопов, характеризующихся высокой чувствительностью и малыми размерами (до 1 см^3 в интегрированном исполнении). Такие устройства составят конкуренцию существующим МЭМС и волоконно-оптическим сенсорам, превосходя по чувствительности и точности измерений первые и имея существенно меньшие массогабаритные параметры, чем вторые. Алмазные квантовые сенсоры будут работать на основе методов оптического детектирования магнитных резонансов (ОДМР) [14] и лазерной пороговой магнитометрии [15, 16].

Первые сообщения о возможности использования центров NV^- окраски алмаза в качестве кубитов квантового компьютера относятся к началу 2000-х гг. [17]. Однако разработки квантовых регистров на основе центров NV^- показали наличие достаточно серьёзных ограничений: электрическая нейтральность данных центров окраски, малое необходимое расстояние между кубитами для квантового перепутывания их состояний (10–20 нм) и, как следствие, практическая невозможность индивидуальной адресации к каждому кубиту.

H_3 центры окраски алмаза представляют собой N_2V^0 -центры в нейтральном зарядовом состоянии [6]. Центры N_2V^0 аналогичны хорошо изученным центрам NV^- , но не имеют недостатков, присущих центрам NV^- . Для того чтобы NV^- -центры находились в отрицательном зарядовом состоянии, в алмазной решетке должен присутствовать свободный замещающий азот с концентрацией выше, чем концентрация NV^- -центров, в 3 раза и более. Высокая концентрация замещающего азота в алмазе, необходимая для работы NV^- кубитов, уменьшает время декогерентности спиновых состояний и является ещё одной проблемой для реализации квантового компьютера на центрах NV^- [17].

Однако N_2V^0 -центры окраски алмаза лишены этих недостатков, так как сразу содержат два локализованных в вакансии электрона (по одному от каждого из

атомов азота), поэтому для данных центров нет необходимости смещать уровень Ферми вверх с помощью высокой концентрации замещающего азота. Кроме того, известно о прототипах светодиодов на N_2V^0 -центрах алмаза, что указывает на их электрическую активность [18]. Современные методы радиационно-термической обработки позволяют создавать алмазные образцы, содержащие только один тип примесно-дефектных центров, в нашем случае центры N_2V^0 (или H_3) [19]. На таких алмазных кристаллах недавно нами продемонстрирована возможность работы квантовых магнитометров [20, 21], т.е. нашли подтверждение теоретические расчёты, указывающие на спиновое расщепление электронных состояний центров N_2V^0 , наличие в них триплетной и синглетной подсистем, а также интеркомбинационной конверсии между ними [22, 23]. Таким образом, есть все основания сделать вывод о перспективности вложений в разработку квантовых регистров на центрах N_2V^0 и, следовательно, в технологии синтеза высококачественного алмаза и радиационно-термической постростовой обработки (для создания необходимых центров окраски).

Актуальность создания производства синтетического алмаза в Томске

На рис. 2 приведен фрагмент административной карты Российской Федерации, где отмечены местоположения научных организаций и промышленных предприятий, производящих алмаз, в том числе синтетический.

В настоящее время все коммерческие предприятия по синтезу алмаза больших площадей и размеров сосредоточены в европейской части России. В зеленом овале, отмеченном на карте (см. на рис. 2), имеются в наличии ресурсы, научно-технологические компетенции и компетенции по подготовке кадров для организации производства по синтезу алмаза и высокотехнологичных устройств на его основе.

На глобальном рынке основными поставщиками синтетического алмаза являются китайские и индийские производители. Ежегодные объемы производства в КНР составляют более 2 000 т [24]. В основном в КНР производится абразивный необработанный алмаз методом температурного градиента при высоких давлениях и температуре.

По разрозненным сведениям, Индия заняла второе место по объемам производства синтетического алмаза методом газохимического осаждения. Однако ввиду того, что в Индии подвергаются огранке 80 % бриллиантов из природных алмазов, что сопровождается «подмешиванием» синтетических образцов, то точные данные в открытом доступе отсутствуют.



Рис. 2. Фрагмент административной карты Российской Федерации с обозначением месторождений природный алмазов, лабораторий, производств и сырья для производства синтетических алмазов. ВДВТ – синтез при высоких давлениях и высоких температурах, ГХО – газохимическое осаждение

Fig. 2. A fragment of the administrative map of the Russian Federation with the designation of natural diamond deposits, laboratories, production facilities and raw materials for the production of synthetic diamonds. HPHT – synthesis at high pressures and high temperatures, CVD –chemical vapor deposition

Среди экономически развитых стран производство синтетического алмаза развёрнуто в Великобритании, Японии, Германии и США.

В Российской Федерации синтетический алмаз, а также устройства и инструменты на его основе производят более десяти предприятий. Некоторые компании пока ведут только НИОКР, другие производят только абразивный инструмент, целый ряд компаний являются диверсифицированными предприятиями, имеющими небольшую долю алмазосодержащей продукции. Некоторые государственные предприятия не разглашают свои финансовые показатели. Тем не менее эти показатели можно оценить.

Наибольшее число коммерческих производителей синтетического алмаза расположено в Москве и Троицке (город-спутник). Оценочно их суммарная выручка от реализации алмазосодержащей продукции за 2022 г. составила несколько млрд рублей.

Второй центр по синтезу алмаза – Санкт-Петербург и его город-спутник Сестрорецк с суммарной выручкой за 2022 г. более 500 млн руб. Можно отметить коммерческое производство по синтезу алмаза в

особой экономической зоне «Моглино» в Псковской области с выручкой за 2022 г. почти 30 млн руб. В Кабардино-Балкарии и Смоленской области расположены предприятия по производству абразивного инструмента на основе алмаза с суммарной выручкой порядка 400 млн рублей.

Таким образом, в азиатской части России отсутствуют коммерческие производства синтетического алмаза. Исключением является производство наноалмазов детонационным синтезом в Бийске (Алтайский край). Известно, что объёмы производства детонационным синтезом составляют более 2 т в год.

Заключение

Рынки квантовых технологий – перспективные развивающиеся и формирующиеся сегменты глобального рынка информационных технологий, имеющие стратегическое значение как для жизнедеятельности государства, так и для развития общества.

Синтетический алмаз – один из краеугольных материалов квантовых технологий будущего, включая

лазеры, квантовые сенсоры, однофотонные источники, фотонные интегральные схемы и квантовые компьютеры.

Кроме того, алмаз востребован в одном из направлений посткремниевых технологий – углеродной электронике и фотонике – для создания теплопроводов, детекторов жестких излучений (фотоны, элементарные частицы) и радиационно стойких оптоэлектронных приборов.

С учётом научно-технологического задела, сформированного в 2010–2020-е гг. в Сибири, в Томске имеются все необходимые условия для создания крупного производства синтетического алмаза и высокотехнологических изделий и устройств на его основе, включая квантовые компоненты. Для этого в наличии имеются ресурсная база для производства, подготовленные технологические, научные и педагогические кадры, а также стратегически выгодное геополитическое положение.

Список источников

1. Wiesner S.J. Conjugate coding // SIGACT News. 1983. Vol. 15, № 1. P. 78–88.
2. Feynman R.P. Simulating physics with computers // International journal of theoretical physics. 1982. Vol. 21, № 6/7. P. 467–488.
3. Gerck Ed. Quantum computing (QC) has become a reality // LinkedIn. URL: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7125215279688601600/> (дата обращения: 13.01.2024).
4. Q&A with post-quantum computing cryptography researcher Jintai Ding // IEEE Spectrum. 01.11.2008. URL: <https://spectrum.ieee.org/qa-with-postquantum-computing-cryptography-researcher-jintai-ding> (дата обращения: 11.12.2024).
5. Российский квантовый центр, ФИАН и «Росатом» представили 16-кубитный квантовый компьютер на ионах. URL: <https://new.ras.ru/activities/news/rossiyskiy-kvantovyy-tsentr-fian-i-rosatom-predstavili-16-kubitnyy-kvantovyy-kompyuter-na-ionakh/?ysclid=m53aps7lk6234905342> (дата обращения: 11.12.2024).
6. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin : Springer-Verlag, 2001. 502 p.
7. 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. P. 7118. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
8. Патент № 2779410 Российская Федерация. Фотовозбуждаемый алмазный NV-лазер / Бураченко А.Г., Дормидонов А.Е., Винс В.Г., Генин Д.Е., Елисеев А.П., Липатов Е.И., Потанин С.А., Рипенко В.С., Саввин А.Д., Тельминов Е.Н., Шулёпов М.А. заявл. 08.09.2021, опубл. 06.09.2022.
9. 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 – Rapid research letters. 2024. Vol. 18, № 2. P. 2300062. doi: 10.1002/pssr.202300062
10. Zhang B., Shen S., Wang J., He J., Shanks H.R., Leksono M.W., Girvan R. Blue-green electroluminescence of free-standing diamond thin films // Chinese Physics Letters. 2009. Vol. 11, № 4. P. 235. doi: 10.1088/0256-307X/11/4/01
11. Lobaev M.A., Radishev D.B., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Isaev V.A., Kraev S.A., Okhapkin A.I., Arhipova E.A., Drozdov M.N., Shashkin V.I. Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence // Physica Status Solidi. 2020. Vol. 14, № 11. P. 2000347. doi: 10.1002/pssr.202200432
12. Lobaev M.A., Radishev D., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Bogdanov S.A., Isaev V.A., Kraev S.A., Okhapkin A.I., Arhipova E.A., Demidov E.V., Drozdov M.N. SiV center electroluminescence in high current density diamond p-i-n diode // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123. P. 251116. doi: 10.1063/5.0178908
13. Долматов В.Ю., Веретенникова М.В., Марчуков В.А., Суцев В.Г. Современные промышленные возможности синтеза наномазов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, № 4. С. 596–600
14. Antonov V.A., Kartashov I.A., Podlesnyi S.N., Popov V.P., Shishaev A.V., Palyanov Yu.N., Lipatov E.I., Shulepov M.A., Kolesnik E.A., Kozorez A.V. ODMR spectroscopy of NV⁻ color centers in synthetic diamonds // Proceedings of SPIE. 2023. Vol. 12920. XVI International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2023), Tomsk, Russia. P. 1292018. doi: 10.1117/12.3009421
15. Jeske J., Cole J.H., Greentree A.D. Laser threshold magnetometry // New journal of physics. 2016. Vol. 18. P. 013015. doi: 10.1088/1367-2630/18/1/013015
16. Патент № 2825078 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе алмазного лазера / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136092, заявл. 29.12.2023, опубл. 19.08.2024. Бюл. № 23. 5 с.
17. Pezzagna S., Meijer J. Quantum computer based on color centers in diamond // Applied physics review. 2021. Vol. 8, № 1. P. 011308. doi: 10.1063/5.0007444
18. Burchard B., Zaitsev A.M., Fahrner W.R., Melnikov A.A., Denisenko A.V., Varichenko V.S. Diamond based light emitting structures // Diamond and related materials. 1994. Vol. 3, № 4-6. P. 947–950. doi: 10.1016/0925-9635(94)90306-9
19. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. HPHT-Treated Diamonds // Springer Series in Materials Science. 2013 Vol. 181. P. 1–270. doi: 10.1007/978-3-642-37490-6
20. Патент № 2816560 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе N₂V-центров в алмазе / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136053, заявл. 29.12.2023, опубл. 02.04.2024. Бюл. № 10. 10 с.
21. Lipatov E.I., Lyga O.I., Chashchin V.V., Shulepov M.A., Vins V.G., Yelisseyev A.P. H3 diamond color centers for quantum magnetometry // Proceedings of 21st International Conference «Laser Optics», ICLO 2024, 1-5 July 2024, St. Petersburg, Russia, 2024.
22. Udvarhelyi P., Thiering G., Londero E., Gali A. Ab initio theory of the N₂V defect in diamond for quantum memory implementation // Physical review B. 2017. Vol. 96. P. 155211. doi: 10.1103/PhysRevB.96.155211
23. Bian G., Zhang J., Xu L., Fan P., Li M., Wu C., Li J., Wang H., Zhang Q., Cai Z., Yuan H. Symmetry-protected two-level system in the H3 center enabled by a spin-photon interface: A competitive qubit candidate for the NISQ technology // Advanced Quantum Technologies. 2022. Vol. 5, № 11. P. 2200044. doi: 10.1002/qute.202200044
24. Made-in-China Diamonds Poised to Shape Global Market. Пекин : Информационное агентство «Синьхуа». 07.02.2019, http://www.china.org.cn/business/2019-02/07/content_74445839.htm. (дата обращения: 11.12.2024).

References

1. Wiesner, S.J. (1983) Conjugate coding. *SIGACT News*. 15 (1). pp. 78–88.
2. Feynman, R.P. (1982) Simulating physics with computers. *International journal of theoretical physics*. 21 (6/7). pp. 467–488.
3. Gerck, Ed. Quantum computing (QC) has become a reality // LinkedIn. URL: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7125215279688601600/> (date of access 01/13/2024)/
4. Q&A with post-quantum computing cryptography researcher Jintai Ding // IEEE Spectrum. 01.11.2008. URL: <https://spectrum.ieee.org/qa-with-postquantum-computing-cryptography-researcher-jintai-ding> (date of access 12.11.2024).
5. Rossiyskiy kvantovyy tsentr, FIAN i «Rosatom» predstavili 16-kubitnyy kvantovyy komp'yuter na ionakh [Russian Quantum Center, Lebedev Physical Institute and «Rosatom» presented a 16-qubit quantum computer on ions]. URL: <https://new.ras.ru/activities/news/rossiyskiy-kvantovyy-tsentr-fian-i-rosatom-predstavili-16-kubitnyy-kvantovyy-kompyuter-na-ionakh/?ysclid=m53aps7lk6234905342> (date of access 12.11.2024).
6. Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin : Springer-Verlag. 502 p.
7. Savvin, A., Dormidonov, A., Smetanina, E., Mitrokhin, V., Lipatov, E., Genin, D., Potanin, S., Yelissev, A. & Vins, V. (2021) NV⁻ diamond laser. *Nature communications*. 12. p. 7118. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
8. Burachenko, A.G., Dormidonov, A.E., Vins, V.G., Genin D.E., Yelissev, A.P., Lipatov, E.I., Potanin, S.A., Ripenko, V.S., Savvin, A.D., Telminov, E.N. & Shulepov, M.A. (2022) *Fotovozbuzhdayemyy almaznyy NV-lazer* [Photoexcited diamond NV-laser] Patent No 2779410 Russian Federation. appl. 08.09.2021, publication date 06.09.2022
9. Genin, D., Lipatov, E., Shulepov, M., Vins, V., Yelissev, A., Izmailov, I., Savvin, A. & Dormidonov, A. (2024) Microjoule-range diamond NV-laser with optical pumping. *Physica status solidi – Rapid research letters*. 18 (2). p. 2300062. doi: 10.1002/pssr.202300062
10. Zhang, B., Shen, S., Wang, J., He, J., Shanks, H.R., Leksono, M.W. & Girvan, R. (2009) Blue-green electroluminescence of free-standing diamond thin films. *Chinese Physics Letters*. 11 (4). p. 235. doi: 10.1088/0256-307X/11/4/01
11. Lobaev, M.A., Radishev, D.B., Bogdanov, S.A., Vikharev, A.L., Gorbachev, A.M., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I., Arhipova, E.A., Drozdov, M.N. & Shashkin, V.I. (2020) Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence. *Physica Status Solidi*. 14 (11). p. 2000347. doi: 10.1002/pssr.202200432
12. Lobaev, M.A., Radishev, D., Vikharev, A.L., Gorbachev, A.M., Bogdanov, S.A., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I., Arhipova, E.A., Demidov, E.V. & Drozdov, M.N. (2023) SiV center electroluminescence in high current density diamond p-i-n diode. *Applied Physics Letters*. 123. P. 251116. doi: 10.1063/5.0178908
13. Dolmatov, V.Yu., Veretennikova, M.V., Marchukov, V.A. & Sushchev, V.G. (2004) Currently available methods of industrial nanodiamond synthesis. *Physics of the Solid State*. 46 (4). pp. 611–615. doi: 10.1134/1.1711434
14. Antonov, V.A., Kartashov, I.A., Podlesnyi, S.N., Popov, V.P., Shishae, A.V., Palyanov, Yu.N., Lipatov, E.I., Shulepov, M.A., Kolesnik, E.A. & Kozorez, A.V. (2023) ODMR spectroscopy of NV⁻ color centers in synthetic diamonds. *Proceedings of SPIE*. 12920. XVI International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2023), Tomsk, Russia. p. 1292018. doi: 10.1117/12.300921
15. Jeske, J., Cole, J.H. & Greentree, A.D. (2016) Laser threshold magnetometry. *New journal of physics*. 18. p. 013015. doi: 10.1088/1367-2630/18/1/013015
16. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin D.E., Yelissev, A.P., Lipatov, E.I., Ripenko, V.S., Savvin, A.D., Chashin, V.V. & Shulepov, M.A. (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove almaznogo lazera* [A quantum magnetometer based on a diamond laser] Patent No 2825078 Russian Federation. appl. 29.12.2023, publication date 19.08.2024.
17. Pezzagna, S. & Meijer, J. (2021) Quantum computer based on color centers in diamond. *Applied physics review*. 8 (1). p. 011308. doi: 10.1063/5.0007444
18. Burchard, B., Zaitsev, A.M., Fahrner, W.R., Melnikov, A.A., Denisenko, A.V. & Varichenko, V.S. (1994) Diamond based light emitting structures. *Diamond and related materials*. 3 (4-6) pp. 947–950. doi: 10.1016/0925-9635(94)90306-9
19. Dobrinets, I.A., Vins, V.G. & Zaitsev, A.M. (2013) HPHT-Treated Diamonds. *Springer Series in Materials Science*. 181. pp. 1-270. doi: 10.1007/978-3-642-37490-6
20. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin D.E., Yelissev, A.P., Lipatov, E.I., Lyga, O.I., Ripenko, V.S., Chashin, V.V. & Shulepov, M.A. (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove N₂V-centrov v almaze* [Quantum magnetometer based on N₂V centers in diamond] Patent No 2816560 Russian Federation. appl. 29.12.2023, publication date 02.04.2024.
21. Lipatov, E.I., Lyga, O.I., Chashchin, V.V., Shulepov, M.A., Vins, V.G. & Yelissev, A.P. H3 diamond color centers for quantum magnetometry. (2024) *Proceedings of 21st International Conference «Laser Optics»*, ICLO 2024, 1-5 July 2024, St. Petersburg, Russia
22. Udvarhelyi, P., Thiering, G., Londero, E. & Gali, A. (2017) Ab initio theory of the N₂V defect in diamond for quantum memory implementation. *Physical review B*. 96. p. 155211. doi: 10.1103/PhysRevB.96.155211
23. Bian, G., Zhang, J., Xu, L., Fan, P., Li, M., Wu, C., Li, J., Wang, H., Zhang, Q., Cai, Z. & Yuan, H. (2022) Symmetry-protected two-level system in the H3 center enabled by a spin–photon interface: A competitive qubit candidate for the NISQ technology. *Advanced Quantum Technologies*. 5 (11). p. 2200044. doi: 10.1002/qute.202200044
24. Made-in-China Diamonds Poised to Shape Global Market. Beijing : ChinaNews Xinhua. 07.02.2019. http://www.china.org.cn/business/2019-02/07/content_74445839.htm. (date of access 12/11/2024).

Информация об авторе:

Липатов Евгений Игоревич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых информационных технологий, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Lipatov Evgeny I., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory of quantum information technologies, associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); senior researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья

УДК 621.373.8, 535, 548.4

doi: 10.17223/29491665/8/2

Современное состояние развития лазеров на NV-центрах в алмазе

Дмитрий Евгеньевич Генин¹, Андрей Валерьевич Самолов²

^{1,2} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

^{1,2} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *dm.genin@loi.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В данной работе проведён краткий обзор основных характеристик лазеров на NV-центрах в алмазе. На текущий момент лазеры на NV-центрах в отрицательном зарядовом состоянии генерируют импульсное лазерное излучение в диапазоне 714–720 нм длительностью единицы наносекунд с энергией в импульсе десятки микроджоулей и эффективностью несколько процентов. Обозначены основные этапы, пройденные на пути их исследования. Сделаны выводы о перспективах применения и потенциальных проблемах. Кроме того, в статье приведены новые данные об исследовании спектральных характеристик сверхлюминесценции центров NV⁻ алмазного лазера при нагреве кристалла от 100 до 300 К.

Ключевые слова: алмаз, лазер, NV-центры, квантовая сенсорика, центры окраски

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы «Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Генин Д.Е., Самолов А.В. Современное состояние развития лазеров на NV-центрах в алмазе // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 13–21. doi: 10.17223/29491665/8/2

Original article

doi: 10.17223/29491665/8/2

The current state of development of lasers at NV centers in diamond

Dmitry E. Genin¹, Andrey V. Samolov²

^{1,2} *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

^{1,2} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *dm.genin@loi.hcei.tsc.ru*

Abstract. In this paper, a brief overview of the main characteristics of lasers at NV centers in diamond is carried out. Currently, lasers at NV centers in a negative charge state generate pulsed laser radiation in the range of 714–720 nanometers with a duration of units of nanoseconds with a pulse energy of tens of microjoules and an efficiency of several percent. A significant increase in the efficiency and energy characteristics of NV⁻ lasers can be achieved through the use of multilayer reflective coatings on the faces of crystals as resonator mirrors. Lasers of this class have good prospects in the field of obtaining femtosecond pulses, since NV centers have a wide luminescence contour. Due to the high thermal conductivity of the diamond, they are able to provide generation with a high level of average power. To increase the pulse duration and transition to continuous generation, it is necessary to pump with a high level of average power. A possible solution would be injection pumping. This requires the creation of efficient light-emitting diamond electroconductive structures. In addition, the article presents new data on the study of spectral characteristics of the superluminescence of the NV⁻ centers of a diamond laser when the crystal is heated from 100 to 300 K. It is shown that the superluminescence band of such lasers actually consists of two spectral components that are not resolved at room temperature. The temperature behavior of these components is fundamentally different: the short-wave component practically does not change in intensity, while the long-wave component exponentially increases in intensity to 220 K, and then saturates and further decreases according to Mott's law. In addition, it was found that the maxima of these components experience a shift in the long-wavelength direction by about 6 meV when the temperature changes from 100 to 300 K. In the future, it is necessary to find out the exact nature and physical mechanisms of the detected phenomena, as well as to find their possible practical applications.

Keywords: diamond, laser, NV centers, quantum sensors, color centers

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Genin, D.E. & Samolov, A.V. (2024). The current state of development of lasers at NV centers in diamond. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedejatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 13–21. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/2

Введение

В течение многих лет алмаз рассматривался как перспективный материал для изготовления активных элементов твердотельных лазеров [1]. Причина этого кроется в его низком коэффициенте температурного расширения и высокой теплопроводности. Благодаря такому сочетанию свойств лазерный активный элемент, изготовленный из алмаза, при прочих равных условиях будет в существенно меньшей степени подвержен эффекту тепловой линзы, чем элементы из известных и широко применяемых на данный момент материалов, таких как сапфир, ИАГ и т.п.

Алмаз является непрямозонным материалом, из-за чего светоизлучающие устройства на его основе могут быть созданы только с использованием примесно-дефектных центров, создающих локальные уровни внутри запрещённой зоны. В последнее время удалось сделать первые шаги в области получения лазерной генерации на алмазах, содержащих центры «азот–вакансия» (NV-центр). Данная статья является кратким обзором результатов, полученных в данном направлении. Кроме того, авторы приводят новые результаты исследований спектральных характеристик свёрхлюминесценции центров NV^- алмазного лазера при нагреве кристалла от 100 до 300 К. Показано, что полоса свёрхлюминесценции таких лазеров состоит из двух спектральных компонент, которые не разрешаются при комнатной температуре. Температурное поведение этих компонент принципиально различно. Установлено, что их максимумы при изменении температуры от 100 до 300 К испытывают смещение в длинноволновую сторону примерно на 6 мЭВ.

Современное состояние вопроса

Впервые о лазерной генерации на алмазе было заявлено в работе [2]. Использовался природный алмаз, содержащий центры окраски НЗ. Сообщалось о получении генерации на длине волны 530 нм с эффективностью до 13%. Накачка производилась лазером на красителе на длине волны 480 нм. Позже в работе [3] данный результат был повторён на искусственном алмазе, но с существенно меньшей эффективностью. После этого вплоть до настоящего времени сообщения о лазерной генерации на центрах НЗ не появлялись.

С некоторого момента внимание исследователей привлёк центр окраски NV. Это связано, во-первых, с тем, что данный центр окраски обладает рядом интересных свойств, делающих возможным его применение в различных квантовых сенсорах (магнитометры, термометры и т.п.) [4–7]; во-вторых, к настоящему времени хорошо отлажены технологии синтеза алмазов, содержащих заданную концентрацию данных центров в заданном зарядовом состоянии. Зарядовых состояний NV-центра в настоящее время известно два: нейтральное (NV^0) и отрицательное (NV^-). Вероятность нахождения центров в том или другом состоянии определяется положением уровня Ферми. Для применений в квантовой сенсорике используется центр NV^- из-за особенностей структуры энергетических уровней.

Впервые лазерная генерация на центрах NV^- в алмазе была получена в работе [8]. В качестве активного элемента использовалась небольшая область кристалла, синтезированного при высоком давлении и высокой температуре (ВДВТ-методом). NV-центры в активной области находились в отрицательном зарядовом состоянии (во всех последующих работах – аналогично). Активная длина кристалла составляла около 4 мм. Грани кристалла были сошлифованы под углом Брюстера, кристалл помещался между двумя зеркалами с коэффициентом отражения 95%, для увеличения устойчивости резонатора в его состав была добавлена линза. Накачка производилась по поперечной схеме импульсами лазерного излучения на длине волны 532 нм с длительностью порядка 150 пс на полуволноте. Схема установки приведена на рис. 1.

При превышении определённого порога по накачке наблюдалось появление лазерной генерации в полосе с центром около 720 нм с полушириной около 15 нм. Энергия импульса генерации была приблизительно оценена в 10 нДж. Расходимость излучения составила порядка 10 мрад. В большей части кристалла, помимо упомянутой выше небольшой области, лазерной генерации не наблюдалось.

Длительность импульсов генерации при таком режиме накачки составляла единицы наносекунд.

Следующим шагом стало исследование образца, имеющего ярко выраженную секторальность [9] (рис. 2). Зоны роста значительно различались по содержанию NV-центров и замещающего азота.

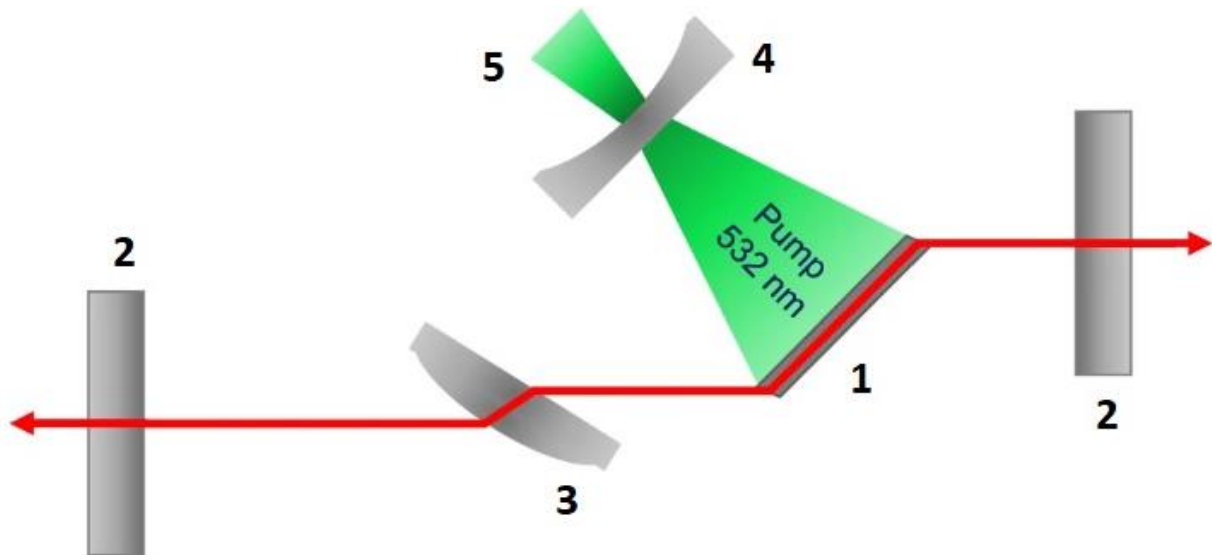


Рис. 1. Схема установки для получения лазерной генерации на алмазе с центрами NV^- [8]: 1 – алмазный образец; 2 – зеркало ($R = 0,95$); 3 – цилиндрическая линза ($F = 15$ мм); 4 – цилиндрическая линза; 5 – излучение накачки

Fig. 1. The scheme of obtaining laser generation on diamond with NV^- centers [8]: 1 – diamond sample; 2 – mirror ($R = 0.95$); 3 – cylindrical lens ($F = 15$ mm); 4 – cylindrical lens; 5 – pump radiation

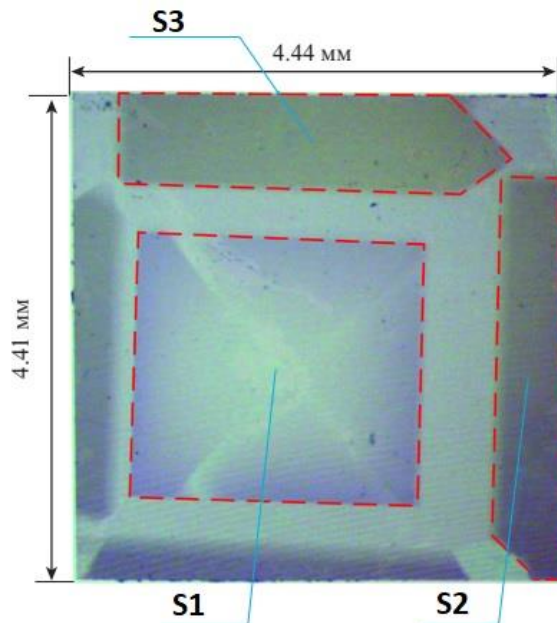


Рис. 2. Фотография алмазного образца с выраженной секторальностью [9]

Fig. 2. The picture of a diamond sample with pronounced sectorality [9]

Накачка производилась по поперечной схеме импульсами лазерного излучения на длине волны 532 нм с длительностью на полувысоте около 10 нс. Во всех зонах наблюдалась люминесценция NV-центров. Однако в зонах S1 и S2 повышение интенсивности накачки даже до десятков $MВт/см^2$ приводило лишь к увеличению интенсивности этой люминесценции, тогда как в зоне S3 при интенсивности накачки выше $2,7 MВт/см^2$ наблюдалось появление в

спектре люминесценции узкого пика с центром около 718 нм. С повышением интенсивности накачки интенсивность данного пика росла значительно быстрее, чем интенсивность остального крыла люминесценции; кроме того, данный пик наблюдался в спектре в ограниченном диапазоне углов выхода излучения относительно оптической оси. Было показано, что при появлении данного пика меняется характер зависимости максимума интенсивности излучения от

интенсивности накачки, это говорит о том, что наблюдается зарождение лазерной генерации. Зона S3 имела длину около 4 мм.

Анализ примесно-дефектного состава зон роста образцов из указанных работ показал, что зоны, в которых возможно получение лазерной генерации на NV-центрах, содержали порядка 6 ppm NV-центров и 150–160 ppm замещающего азота. Данные цифры были приняты за некий минимум, необходимый для получения лазерной генерации на образцах с активной длиной порядка 4 мм.

Образцы с увеличенным содержанием NV-центров и замещающего азота (8–10 и 200 ppm соответственно) продемонстрировали спектры излучения, на которых фоновое крыло практически не наблюдалось на фоне интенсивного пика, т.е. имела место более интенсивная генерация [10]. Максимум полосы генерации находился в диапазоне 714–

720 нм, значение менялось от образца к образцу. Полуширина полосы генерации также варьировалась в пределах 15–20 нм. В этих экспериментах обратная связь обеспечивалась исключительно за счёт френелевского отражения от граней кристаллов.

Один из образцов продемонстрировал генерацию с энергией в импульсе в несколько микроджоулей. Результаты приведены в [11]. Полуширина полосы генерации составила всего 6 нм. В режиме обеспечения обратной связи за счёт френелевского отражения (т.е. без дополнительных зеркал резонатора) энергия импульса генерации достигала 15 мкДж. Добавление в схему глухого алюминиевого зеркала позволило увеличить данный показатель примерно на 30%. При этом на визуализаторе наблюдалось существенное изменение пространственной структуры излучения: выделялись несколько ярких каналов. Расходимость одиночного канала составила порядка 5 мрад (рис. 3).

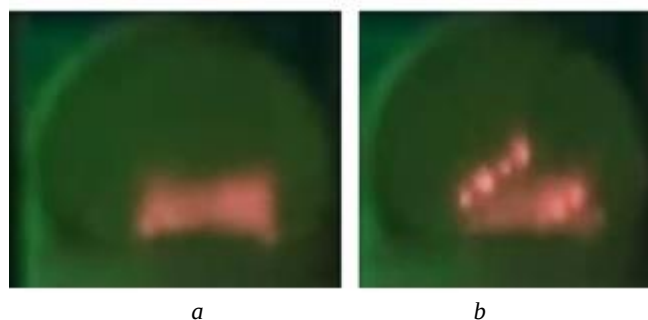


Рис. 3. Визуализация излучения лазера на центрах NV^- , полученная в работе [11]: *a* – без зеркала; *b* – с зеркалом

Fig. 3. The visualization of laser radiation at NV^- centers obtained in [11]: *a* – without a mirror; *b* – with a mirror

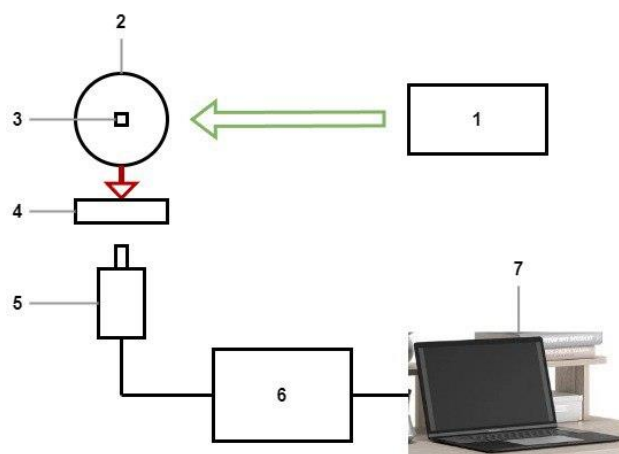


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки 532 нм; 2 – камера криостата; 3 – алмазный образец; 4 – фильтры; 5 – оптический волновод; 6 – спектрометр OceanOptics HR-2000; 7 – ПК

Fig. 4. The scheme of the experimental installation: 1 – 532 nm pumping laser; 2 – cryostat chamber; 3 – diamond sample; 4 – filters; 5 – optical waveguide; 6 – Ocean Optics HR-2000 spectrometer; 7 – PC

В процессе исследований был обнаружен необычный новый эффект. Если помимо основной импульсной накачки на кристалл дополнительно подавалось

непрерывное излучение с длиной волны 405 нм и интенсивностью от единиц до сотен мВт/см² (т.е. на несколько порядков более слабое), то интенсивность ла-

зерной генерации на NV-центрах значительно возросла. Увеличение интенсивности фиксировалось как спектрометром, так и (для некоторых образцов) измерителем энергии лазерного излучения. В отдельных случаях интенсивность возрастала в 3,5 раза. В таком режиме энергия импульсов излучения на длине волны 714 нм достигала 48 мкДж при использовании заднего глухого зеркала. Длительность импульса во всех экспериментах составляла 7–8 нс по полувысоте.

Во всех упомянутых работах накачка производилась импульсным лазерным излучением на длине волны 532 нм. Интенсивность накачки варьировалась от сотен кВт до единиц МВт на 1 см². Такие высокие интенсивности обусловлены малым временем жизни верхнего лазерного уровня (10–12 нс). Потенциально возможно осуществление на NV-центрах и непрерывной генерации, время жизни нижнего лазерного уровня крайне мало, однако требуются значительные мощности накачки. Возможность осуществления такой накачки предполагается предметом дальнейших исследований.

Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Лазерное излучение на длине волны 532 нм (вторая гармоника импульсного лазера Nd:YAG лазера), использовалось для возбуждения свертлюминесценции (СЛ) алмазного образца C104, размеры которого составляют 3,8×3,3×1,1 мм³, этот же кристалл ис-

пользовался ранее в работе [11], где продемонстрировал лазерную генерацию с энергией импульса до 48 мкДж. В данной работе энергия импульсов накачки, наоборот, подбирались таким образом, чтобы генерация осуществлялась в припороговом режиме, фактически можно говорить о работе в режиме свертлюминесценции. Частота следования импульсов накачки составляла 3 Гц, длительность импульса – примерно 20 нс на полувысоте. Излучение накачки фокусировалось кварцевой цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 30 см. Торцы образца выполняли роль зеркал резонатора за счет френелевского отражения. Алмазный образец помещался в криостат и охлаждался с помощью жидкого азота. Свертлюминесценция образца регистрировалась спектрометром HR 2000 (Ocean Optics). Контроль температуры производился с помощью терморезистора, закреплённого на держателе образца.

Алмазный образец охлаждался до температуры 102 К, после чего происходил его нагрев от окружающей среды. Температура определялась по сопротивлению терморезистора, через каждые 50 Ом регистрировались спектры свечения образца. Температура менялась в диапазоне от 100 до 300 К.

Результаты экспериментов

При понижении температуры ниже определённого порога наблюдалось разделение полосы свертлюминесценции на две компоненты. Спектр, демонстрирующий данное явление, представлен на рис. 5.

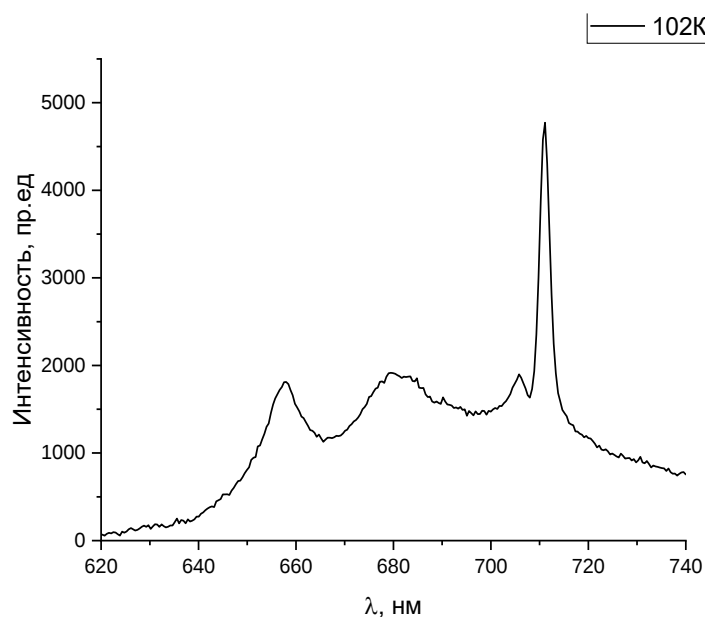


Рис. 5. Спектр свертлюминесценции образца C104 при температуре 102 К

Fig. 5. The Superluminescence spectrum of sample C104 at a temperature of 102 K

Компоненту с максимумом около 706 нм далее будем называть коротковолновой, а с максимумом около 711 нм – длинноволновой. Данное явление наблюдалось при температурах ниже 200 К. Проанализировав поведение максимумов этих двух компонент, можно сделать вывод, что величина максимума интенсивности коротковолновой компоненты не претерпевает заметных изменений с изменением температуры. В свою очередь, величина максимума интенсивности длинноволновой компоненты имеет сильную зависимость от температуры. Считается, что испускание фотона с длиной волны около 710 нм происходит с одновременной генерацией трёх фононов [10]. Было вы-

двинуто предположение, что явление раздвоения полосы СЛ вызвано распределением вероятностей энергий излучаемых фононов в конфигурации, при которой излучение происходит преимущественно на длинах волн 706 нм и 711 нм. При этом разница энергий этих двух компонент СЛ составляет 12 мэВ. Поэтому альтернативная гипотеза состоит в том, что в процессе испускания фотонов на 706 нм и 711 нм происходит испускание двух фононов различной энергии, т.е. возможны комбинации из локальных фононов и фононов решетки.

Зависимость значения интенсивности длинноволнового максимума полосы сверхлюминесценции от температуры представлена на рис. 6.

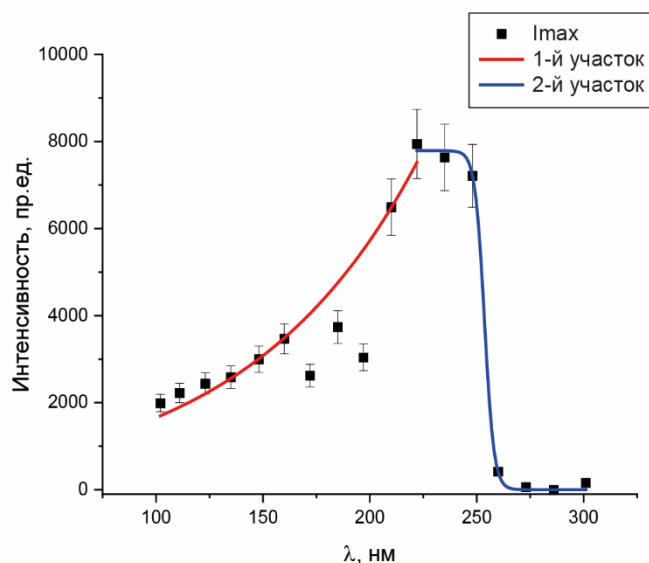


Рис. 6. Зависимость интенсивности длинноволновой компоненты сверхлюминесценции от температуры

Fig. 6. The dependence of the intensity of the long-wave component of the superluminescence on temperature

Стоит отметить необычный характер данной зависимости. Известно, что с увеличением температуры увеличивается вероятность безызлучательных процессов релаксации и интенсивность люминесценции уменьшается вследствие температурного тушения, т.е. зависимость максимума интенсивности полосы СЛ от температуры должна описываться законом Мотта. Однако из графика на рис. 6 видно, что зависимость имеет вид, схожий с законом Мотта только на определенном участке, располагающемся в диапазоне температур от 220 до 300 К, а в диапазоне от 100 до 220 К интенсивность свечения увеличивается с ростом температуры. Было выдвинуто два предположения о причинах данного явления. Первое предположение состоит в том, что данное явление может быть вызвано деформацией алмазного образца: образец зажимается в металлическом держателе, коэффициенты температурного расширения материалов держателя (медь и стальные стягивающие винты) отличаются от данного показателя для алмаза; возможно возникновение механического напряжения. Второе

предположение заключается в том, что существует неизвестный термоактивируемый процесс при повышении температуры от 100 до 220 К, вследствие которого происходит увеличение интенсивности.

Также было обнаружено, что с изменением температуры происходит смещение максимума полосы сверхлюминесценции. На рис. 7 показаны спектры сверхлюминесценции при температурах 100 и 300 К.

График зависимости положения максимума интенсивности полосы сверхлюминесценции от температуры представлен на рис. 8. Из рисунка видно, что положение максимума интенсивности полосы сверхлюминесценции изменяется от 714 до 711 нм.

Интересно отметить, что положение максимума остаётся неизменным в диапазоне температур от 100 до 200 К, и лишь затем начинается смещение в длинноволновую сторону. Предположительно данный термоактивируемый процесс связан с увеличением плотности состояний оптических фононов при температурах выше 200 К.

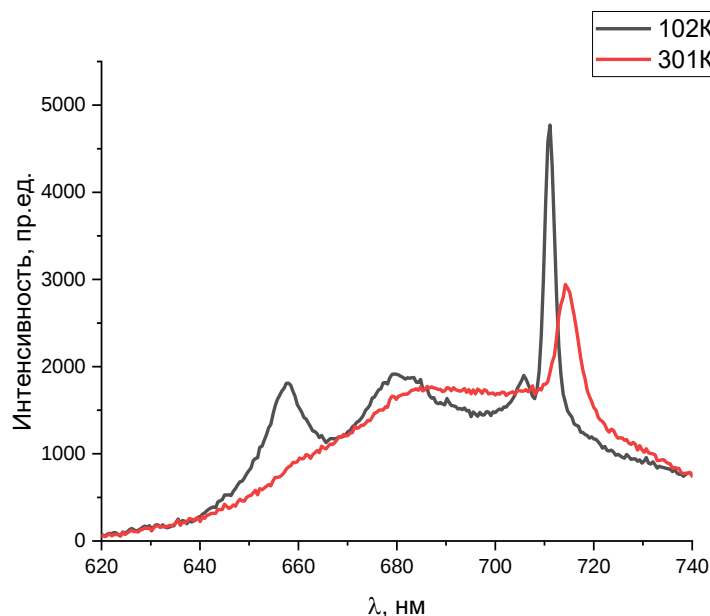


Рис. 7. Спектры сверхлюминесценции алмазного образца C104 при температурах 102 К и 301 К

Fig. 7. Superluminescence spectra of the C104 diamond sample at temperatures of 102 K and 301 K

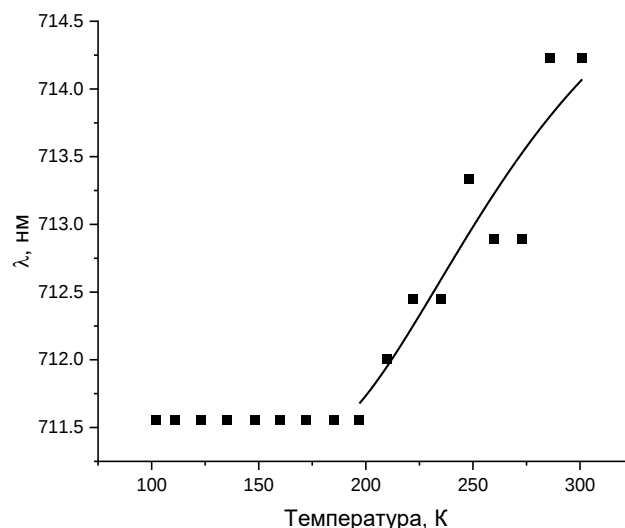


Рис. 8. Зависимость положения максимума полосы сверхлюминесценции от температуры

Fig. 8. The dependence of the position of the superluminescence band maximum on temperature

Закключение

Развитие лазеров на центрах окраски в алмазах находится пока на зачаточной стадии. Тем не менее можно обозначить некоторые характерные особенности лазеров на алмазах с центрами NV^- :

- типичная длина волны 714–720 нм;
- импульсный режим работы, энергия импульса – до десятков мкДж;
- эффективность – порядка 1%;
- длительность импульса – единицы наносекунд;

Эффективность лазеров NV^- может быть существенно увеличена благодаря использованию многослойных отражающих покрытий на торцах алмазных кристаллов в качестве зеркал резонатора. В работах, вошедших в обзор, данное решение не использовалось, так как ещё недостаточно отработана технология нанесения покрытий с заданными свойствами на поверхность алмаза.

Лазеры данного класса имеют хорошие перспективы в области получения фемтосекундных импульсов, поскольку центры NV^- обладают широким кон-

туром люминесценции. За счёт высокой теплопроводности алмаза они способны обеспечить генерацию с высоким уровнем средней мощности.

Увеличение же длительности импульса и переход к непрерывной генерации пока вызывают вопросы. Для этого необходимо производить накачку с высоким уровнем средней мощности. Возможным решением может стать переход к инжекционной накачке, для чего требуется решение задачи по созданию токопроводящих светоизлучающих алмазных структур.

Приведены первые результаты исследования зависимости спектральных характеристик лазеров на NV-центрах в алмазе от температуры. Показано, что полосу сверхлюминесценции таких лазеров на самом

деле состоит из двух спектральных компонент, которые не разрешаются при комнатной температуре. Температурное поведение этих компонент принципиально различно: интенсивность коротковолновой компоненты практически не меняется, в то время как интенсивность длинноволновой компоненты экспоненциально растёт до 220 К, а затем насыщается и далее уменьшается согласно закону Мотта. Установлено, также что максимумы этих компонент при изменении температуры от 100 до 300 К смещаются по спектру примерно на 6 мЭВ в длинноволновую сторону.

В дальнейшем предстоит выяснить точную природу и физические механизмы обнаруженных явлений, а также найти им возможные практические применения.

Список источников

1. Vins V.G., Pestryakov E.V. Color centers in diamond crystals: Their potential use in tunable and femtosecond lasers // *Diamond and related materials*. 2006. Vol. 15, № 4-8, P. 569–571. doi: 10.1016/j.diamond.2005.11.038
2. Rand S.C., DeShazer L.G. Visible color-center laser in diamond // *Optics Letters*. 1985. Vol. 10, № 10. P. 481–483. doi: 10.1364/OL.10.000481
3. Nalcashima T., Yazu S. Optical Properties and Laser Action of H3 Center in Synthetic Diamond // *SPIE*. 1990. Vol. 1325. Diamond Optics 111. P. 10–16. doi: 10.1117/12.22438
4. Maze J.R., Stanwix P.L., Hodges J.S., Hong S., Taylor J.M., Cappellaro P., Jiang L., Gurudev Dutt M.V., Togan E., Zibrov A.S., Yacoby A., Walsworth R. L., Lukin M. D. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond // *Nature*. 2008. Vol. 455, № 7213. P. 644–647. doi: 10.1038/nature07279
5. Dolde F., Fedder H., Doherty M.W., Nöbauer T., Rempp F., Balasubramanian G., Wolf T., Reinhard F., Hollenberg L.C.L., Jelezko F., Wrachtrup J. Electric-field sensing using single diamond spins // *Nature Physics*. 2017. Vol. 7, № 6. P. 459–463. doi: 10.1038/nphys1969
6. Grazioso F., Patton B.R., Delaney P., Markham M.L., Twitchen D.J., Smith J.M. Measurement of the full stress tensor in a crystal using photoluminescence from point defects: The example of nitrogen vacancy centers in diamond // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103, № 10. P. 101905. doi: 10.1063/1.4819834
7. Shao L., Zhang M., Markham M., Edmonds A.M., Lončar M. Diamond Radio Receiver: Nitrogen-Vacancy Centers as Fluorescent Transducers of Microwave Signals // *Physical Review Applied*. 2016. Vol. 6, № 6. P. 064008. doi: 10.1103/PhysRevApplied.6.064008
8. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yeliseyev A., Vins V. NV⁻ diamond laser // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. P. 7118. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
9. Липатов Е.И., Генин Д.Е., Шулепов М.А., Тельминов Е.Н., Саввин А.Д., Елисеев А.П., Винс В.Г. Сверхлюминесценция в фоновом крыле спектра фотолюминесценции NV-центров в алмазе при оптической накачке на $\lambda = 532$ нм // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52, № 5. С. 465–468. doi: 10.1070/QEL18044
10. Mironov V., Tel'minov E., Genin D., Lipatov E., Shulepov M., Dormidonov A., Savvin A., Yeliseyev A., Vins V. Peculiarities of nitrogen-vacancy centers' superluminescence in diamond under optical pumping at 532 nm // *Applied Physics B*. 2023. Vol. 129. P. 18. doi: 10.1007/s00340-022-07957-x
11. Genin D., Lipatov E., Shulepov M., Vins V., Yeliseyev A., Izmailov I., Savvin A., Dormidonov A. Microjoule-Range Diamond NV-Laser with Optical Pumping // *Physica Status Solidi: Rapid Research Letters*. 2023. Vol. 18, № 2. P. 2300062. doi: 10.1002/pssr.202300062

References

1. Vins, V.G. & Pestryakov, E.V. (2006) Color centers in diamond crystals: Their potential use in tunable and femtosecond lasers. *Diamond and related materials*. 15 (4-8). pp. 569–571. doi: 10.1016/j.diamond.2005.11.038
2. Rand, S.C. & DeShazer, L.G. (1985) Visible color-center laser in diamond. *Optics Letters*. 10 (10). pp. 481–483. doi: 10.1364/OL.10.000481
3. Nalcashima, T. & Yazu, S. (1990) Optical Properties and Laser Action of H3 Center in Synthetic Diamond. *SPIE*. 1325 (Diamond Optics 111). pp. 10–16. doi: 10.1117/12.22438
4. Maze, J.R., Stanwix, P.L., Hodges, J.S., Hong, S., Taylor, J.M., Cappellaro, P., Jiang, L., Gurudev Dutt, M. V., Togan, E., Zibrov, A. S., Yacoby, A., Walsworth, R. L. & Lukin, M. D. (2008) Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. *Nature*. 455 (7213). pp. 644–647. doi: 10.1038/nature07279
5. Dolde, F., Fedder, H., Doherty, M.W., Nöbauer, T., Rempp, F., Balasubramanian, G., Wolf, T., Reinhard, F., Hollenberg, L.C.L., Jelezko, F. & Wrachtrup, J. (2017) Electric-field sensing using single diamond spins. *Nature Physics*. 7 (6). pp. 459–463. doi: 10.1038/nphys1969
6. Grazioso, F., Patton, B.R., Delaney, P., Markham, M.L., Twitchen, D.J. & Smith, J.M. (2013) Measurement of the full stress tensor in a crystal using photoluminescence from point defects: The example of nitrogen vacancy centers in diamond. *Applied Physics Letters*. 103 (10). pp. 101905. doi: 10.1063/1.4819834
7. Shao, L., Zhang, M., Markham, M., Edmonds, A.M. & Lončar, M. (2016) Diamond Radio Receiver: Nitrogen-Vacancy Centers as Fluorescent Transducers of Microwave Signals. *Physical Review Applied*. 6 (6). pp. 064008. doi: 10.1103/PhysRevApplied.6.064008

8. Savvin, A., Dormidonov, A., Smetanina, E., Mitrokhin, V., Lipatov, E., Genin, D., Potanin, S., Yelisseyev, A. & Vins, V. (2021) NV-diamond laser. *Nature Communications*. 12. p. 7118. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
9. Lipatov, E.I., Genin, D.E., Shulepov, M.A., Tel'minov, E.N., Savvin, A.D., Eliseev, A.P. & Vins, V.G. (2022) Superluminescence in the phonon wing of the photoluminescence spectrum of NV centres in diamond optically pumped at $\lambda = 532$ nm. *Quantum Electronics*. 52 (5). pp. 465–468. doi: 10.1070/QEL18044
10. Mironov, V., Tel'minov, E., Genin, D., Lipatov, E., Shulepov, M., Dormidonov, A., Savvin, A., Yelisseyev, A. & Vins, V. (2023) Peculiarities of nitrogen-vacancy centers' superluminescence in diamond under optical pumping at 532 nm. *Applied Physics B*. 129. p. 18. doi: 10.1007/s00340-022-07957-x
11. Genin, D., Lipatov, E., Shulepov, M., Vins, V., Yelisseyev, A., Izmailov, I., Savvin, A. & Dormidonov, A. (2023) Microjoule-Range Diamond NV-Laser with Optical Pumping. *Physica Status Solidi: Rapid Research Letters*. 18 (2). p. 2300062. doi: 10.1002/pssr.202300062

Информация об авторах:

Генин Дмитрий Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dm.genin@loi.hcei.tsc.ru. ORCID ID: 0000-0001-7822-7692

Самолов Андрей Валерьевич – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Genin Dmitry E., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), junior researcher, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation); researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dm.genin@loi.hcei.tsc.ru. ORCID ID: 0000-0001-7822-7692

Samolov Andrey V., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья
УДК 537.635, 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/3

Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах

Владимир Вениаминович Чашин¹, Ольга Игоревна Лыга²,
Михаил Александрович Шулепов³

^{1,2,3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1,3} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

² *lloodia@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования изменения фотолюминесценции N_2V^0 -центров окраски алмаза в слабом ($\ll 1$ Тл) магнитном поле при возбуждении непрерывным лазером с длиной волны излучения $\lambda = 405$ нм. Приведены температурные зависимости влияния приложенного магнитного поля на фотолюминесценцию центров окраски.

Ключевые слова: алмаз, N_2V^0 -центры окраски, квантовый сенсор, магнитометрия

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации «Программы Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Чашин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 22–27. doi: 10.17223/29491665/8/3

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/3

Magnetosensitivity of N_2V^0 -photoluminescence centers in diamond at different temperatures

Vladimir V. Chashchin¹, Olga I. Lyga², Mikhail A. Shulepov³

^{1,2,3} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{1,3} *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

² *lloodia@yandex.ru*

Abstract. The article presents a study of changes in the photoluminescence N_2V^0 of diamond color centers in a weak ($\ll 1$ T) magnetic field when excited by a continuous laser with a radiation wavelength $\lambda = 405$ nm. The temperature dependences on the effect of the applied magnetic field on the photoluminescence of the color centers are given.

Keywords: diamond, N_2V^0 color centers, quantum sensor, magnetometry

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Chashchin, V.V., Lyga, O.I. & Shulepov, M.A. (2024) Magnetosensitivity of N_2V^0 -photoluminescence centers in diamond at different temperatures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 22–27. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/3

Введение

Алмаз – перспективный материал для использования в квантовых технологиях, вычислительных системах и криптографии.

На основе центров окраски алмаза создаются высокотехнологичные устройства, в том числе лазеры,

кубиты и квантовые сенсоры [1–3]. Основными преимуществами алмаза по сравнению с другими используемыми в настоящее время материалами являются

- высокотемпературные характеристики;
- устойчивость к экстремальным условиям.

Цель работы и современное состояние вопроса

В настоящее время происходит активное развитие квантовых технологий, в том числе разработка новых типов сенсоров и датчиков. Перспективным материалом для этих устройств является алмаз, содержащий различные центры окраски. Центры окраски в алмазе представляют собой встроенные в решетку дефекты структуры, инородные атомы с примесно-дефектными комплексами, включающими вакансии [4]. На данный момент наиболее популярным и изученным центром окраски для использования в квантовых технологиях и создания устройств является центр NV^- [5–7]. На его основе уже созданы прототипы магнитометров. В данной работе предлагается использование менее изученного центра окраски N_2V° (N_2 -центр) в качестве платформы для создания магнитометра [8, 9]. Причины такого выбора – не только положительное влияние магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции этого центра окраски, но и потенциальная возможность создания алмазного образца, не содержащего прочих азотсодержащих центров окраски, таких как NV° , NV^- и т.д.

Материалы и методы исследования

Центры окраски в алмазе (NV^- , N_2V° и т.д.) характеризуются электронными переходами в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также тонким расщеплением электронных уровней на спиновые подуровни, что позволяет использовать их при создании квантовых сенсоров. Как было сказано ранее, перспективным для использования N_2V° -центр делает не только его магниточувствительность, но и более удобная структура.

На рис. 1 представлены структуры NV^- и N_2V° -центров окраски алмаза. Для того чтобы NV -центр в алмазе находился в отрицательном зарядовом состоянии (NV^-), необходимо наличие высокой концентрации замещающего азота. N_2V° -центр обладает тем же количеством электронов, локализованных в вакансии, при этом в решетке кристалла не требуется замещающего азота. Это свойство делает N_2V° -центр более перспективным для использования, поскольку появляется возможность создания кристалла, не содержащего прочих центров окраски, создающих «спиновую ванну». В то же время создание кристалла, содержащего только центры NV^- , невозможно, поскольку обязательным условием является наличие атомов замещающего азота в решетке кристалла, что неизбежно приведет к возникновению NV° -центров.

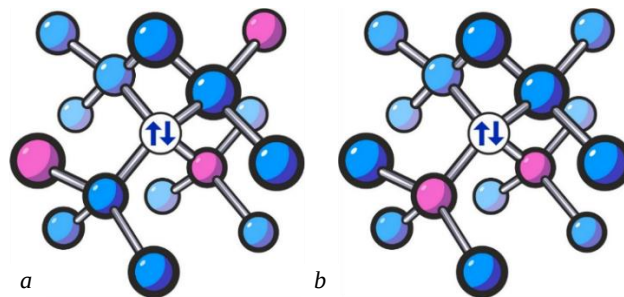


Рис. 1. Структуры NV^- -центров (a) и N_2V° -центров (b). Атомы углерода обозначены синим цветом, атомы азота в замещающей позиции – красным; две стрелки в белом круге указывают на два электрона, локализованных в вакансии

Fig. 1. Structures of a) NV^- and b) N_2V° centers. Carbon atoms are indicated in blue, nitrogen atoms in the replacement position are indicated in red, two arrows in a white circle indicate two electrons localized in the vacancy

Для создания магнитного поля с необходимыми параметрами могут подойти обычные постоянные магниты. Однако в этом случае индукция поля будет составлять ~ 1000 Гс при отсутствии возможности ее регулировки. Оптимальным вариантом для использования являются кольца Гельмгольца. Такое решение позволяет не только создавать поле с конкретным значением индукции в области образца, но и делать поле равномерным во всех направлениях. На рис. 2 представлен расчет одной пары колец Гельмгольца.

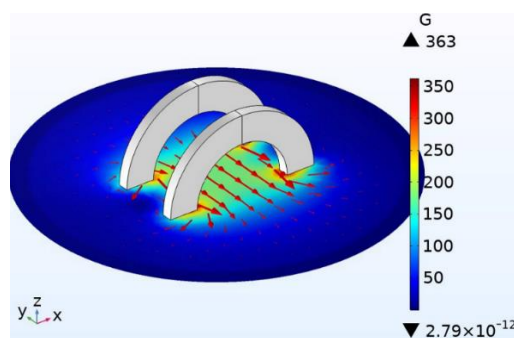


Рис. 2. Расчет пары колец Гельмгольца и распределения магнитного поля

Fig. 2. The calculation of a pair of Helmholtz coils and magnetic field distribution

Результаты

Впервые эффект положительного влияния магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции N_2V° -центров окраски был обнаружен при использовании двух неодимовых магнитов с индукцией поля в области образца ~ 1300 Гс. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности фотолюминесценции бесфоновой линии N_2V° -центра в алмазном образце, помещенном в поле постоянных магнитов, от температуры.

В последующих экспериментах в качестве источника магнитного поля использовалась рассчитанная ранее пара колец Гельмгольца с возможностью регулировки индукции поля (максимальная индукция ~ 320 Гс при токе на катушках ~ 10 А). Фотолюминесценция возбуждалась лазером с длиной волны 405 нм.

На рис. 4 представлена зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фонованного крыла N_2V^0 -центра первого образца (условный номер C166) от температуры.

Максимальная разность в интенсивности фотолюминесценции наблюдается в области ~ 170 К. На

рис. 5 представлен спектр фотолюминесценции образца C166 с включенным и выключенным внешним магнитным полем.

Исходя из спектров фотолюминесценции, можно заметить, что образец C166 содержит большое количество центров N_2V^0 и NV^0 , в то время как центры NV^- практически не наблюдаются. При приложении магнитного поля наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции в фонованном крыле центров N_2V^0 и NV^0 , при этом изменений интенсивности фотолюминесценции в фонованном крыле центра NV^- не наблюдается.

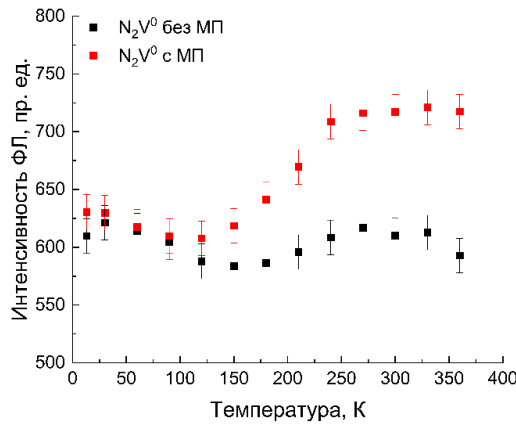


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотолюминесценции бесфононной линии N_2V^0 -центра (черные точки – без магнитного поля, красные – при воздействии магнитного поля) от температуры

Fig. 3. Temperature dependence on the photoluminescence intensity of the zero-phonon line of the N_2V^0 center (black dots – without a magnetic field, red dots – when exposed to a magnetic field)

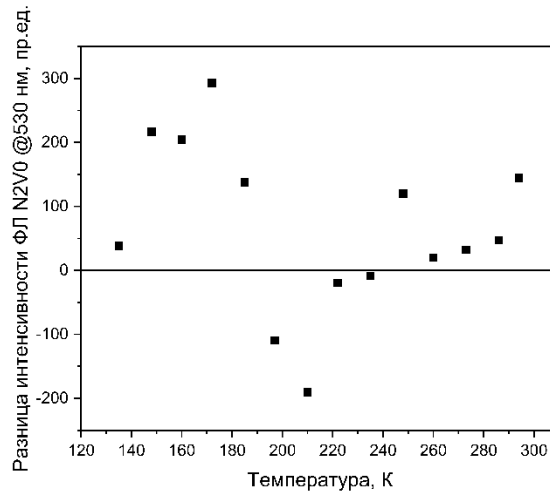


Рис. 4. Зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фонованного крыла N_2V^0 -центра в образце C166 (разница определялась как $I_{PL(\text{магнит})} - I_{PL(\text{без магнита})}$) от температуры

Fig. 4. Temperature dependence on the difference in photoluminescence intensity of the maximum of the phonon wing N_2V^0 center in sample C166 (the difference was calculated as $I_{PL(\text{magnet})} - I_{PL(\text{without magnet})}$)

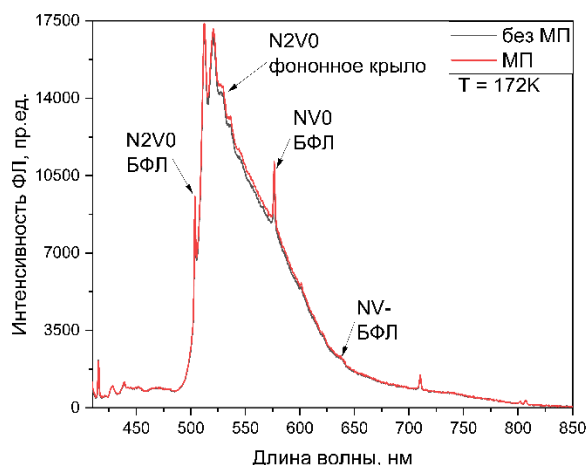


Рис. 5. Спектр фотолюминесценции образца C166 с учетом (красный) и без учета (черный) внешнего магнитного поля при температуре 172 K

Fig. 5. The photoluminescence spectrum of sample C166 with (red) and without (black) external magnetic field at a temperature of 172 K

На рис. 6 представлена температурная зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фононного крыла N_2V° и максимума фононного крыла центра NV^- второго образца (условный номер C167).

Здесь максимальная разность в интенсивности фотолюминесценции максимума фононного крыла N_2V° -центра наблюдается в области ~ 180 K. На рис. 7 представлен спектр фотолюминесценции образца C167 с учетом и без учета внешнего магнитного поля.

Исходя из спектров фотолюминесценции, можно заметить, что образец C167 содержит большое количество как центров N_2V° , так и центров NV^- , в то время как центров NV^0 практически не наблюдается. При приложении магнитного поля в этом образце отмечено увеличение интенсивности фотолюминесценции в фононном крыле центра N_2V° и уменьшение интенсивности фотолюминесценции в фононном крыле центра NV^- .

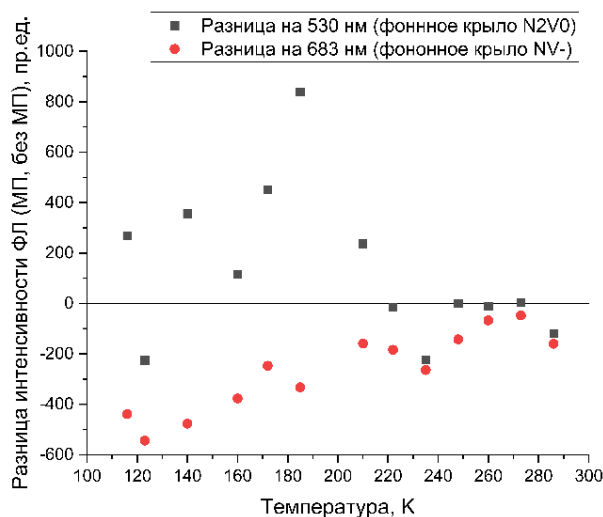


Рис. 6. Зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции фононного крыла N_2V° -центра (черный) и фононного крыла центра NV^- (красный) в образце C167 (разница определялась как $I_{PL(\text{магнит})} - I_{PL(\text{без магнита})}$) от температуры

Fig. 6. The temperature dependence on the photoluminescence intensity difference between the phonon wing of the N_2V° center (black) and the phonon wing of the NV^- center (red) in sample C167 (the difference was calculated as $I_{PL(\text{magnet})} - I_{PL(\text{without magnet})}$)

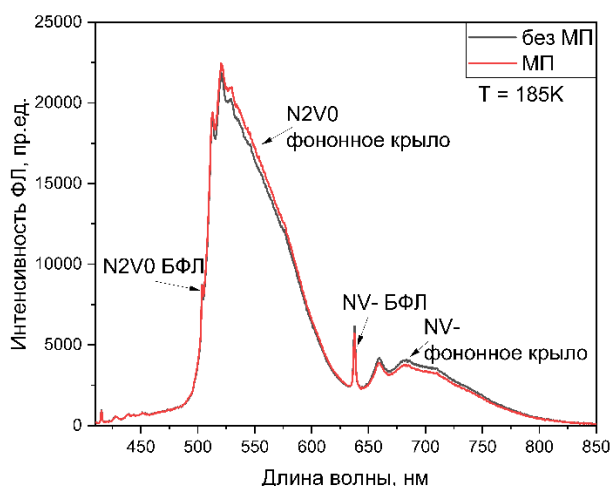


Рис. 7. Спектр фотолюминесценции образца C167 с включенным (красный) и выключенным (черный) внешним магнитным полем при температуре 185 K

Fig. 7. The photoluminescence spectrum of sample C167 with (red) and without (black) external magnetic field at a temperature of 185 K

Закключение

Нами было впервые обнаружено аномальное поведение N_2V° -центра окраски алмаза в присутствии внешнего магнитного поля: интенсивность фотолюминесценции этого центра возрастает в присутствии поля, что позволяет использовать кристаллы с этим центром окраски для создания принципиально нового типа магнитометров. Несмотря на то, что впервые этот эффект был обнаружен при использовании магнитного поля с индукцией в области образца ~ 1300 Гс, результат был воспроизведен и подтвержден и при меньшей индукции поля (~ 320 Гс). На данный мо-

мент пороговое значение индукции поля, при котором эффект не наблюдается, не установлено, но продолжается активная работа в этом направлении.

Помимо эффекта положительного влияния магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции, N_2V° -центр окраски представляет интерес для исследователей также ввиду возможности создания кристалла, не содержащего в своем составе прочих центров окраски.

Авторами данного сообщения получено два патента на изобретение по тематике квантовых сенсоров на основе центров NV^{-} и N_2V° окраски алмаза [8, 9].

Список источников

1. 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. Art. no. 7118. P. 1–8. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
2. Ruf M., Wan N.H., Choi H., Englund D., Hanson R. Quantum networks based on color centers in diamond // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 130, № 7. Art. no. 070901. P. 1–20. doi: 10.1063/5.0056534
3. Chouaieb S., Martínez L.J., Akhtar W., Robert-Philip I., Dréau A., Brinza O., Achard J., Tallaie A., Jacques V. Optimizing synthetic diamond samples for quantum sensing technologies by tuning the growth temperature // Diamond and Related Materials. 2019. Vol. 96. P. 85–89. doi: 10.1016/j.diamond.2019.04.022
4. Thiering G., Gali A. Color centers in diamond for quantum applications // Semiconductors and semimetals. 2020. Vol. 103. P. 1–36. doi: 10.1016/bs.semsem.2020.03.001
5. Liu G.Q., Liu R.B., Li Q. Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors // Accounts of Chemical Research. 2023. Vol. 56, № 2. P. 95–105. doi: 10.1021/acs.accounts.2c00576
6. Barry J.F., Schloss J.M., Bauch E., Turner M.J., Hart C.A., Pham L.M., Walsworth R.L. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry // Reviews of Modern Physics. 2020. Vol. 92, № 1. Art. no. 015004. P. 1–68. doi: 10.1103/RevModPhys.92.015004
7. Wu Y., Jelezko F., Plenio M.B., Weil T. Diamond quantum devices in biology // Angewandte Chemie International Edition. 2016. Vol. 55, № 23. P. 6586–6598. doi: 10.1002/anie.201506556
8. Патент № 2816560 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе N_2V -центров в алмазе / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136053, заявл. 29.12.2023, опубл. 02.04.2024. Бюл. № 10. 10 с.
9. Патент № 2825078 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе алмазного лазера / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136092, заявл. 29.12.2023, опубл. 19.08.2024. Бюл. № 23. 5 с.

References

1. Savvin, A., Dormidonov, A., Smetanina, E., Mitrokhin, V., Lipatov, E., Genin, D., Potanin, S., Yelissev, A. & Vins, V. (2021) NV⁻ diamond laser. *Nature communications*. 12. Art. no. 7118. pp. 1–8. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
2. Ruf, M., Wan, N.H., Choi, H., Englund, D. & Hanson, R. (2021) Quantum networks based on color centers in diamond. *Journal of Applied Physics*. 130 (7). Art. no. 070901. pp. 1–20. doi: 10.1063/5.0056534
3. Chouaieb, S., Martinez, L.J., Akhtar, W., Robert-Philip, I., Dréau, A., Brinza, O., Achard, J., Tallaire, A. & Jacques, V. (2019) Optimizing synthetic diamond samples for quantum sensing technologies by tuning the growth temperature. *Diamond and Related Materials*. 96. pp. 85–89. doi: 10.1016/j.diamond.2019.04.022
4. Thiering, G. & Gali, A. (2020) Color centers in diamond for quantum applications. *Semiconductors and semimetals*. 103. pp. 1–36. doi: 10.1016/bs.semsem.2020.03.001
5. Liu, G.Q., Liu, R.B. & Li, Q. (2023) Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors. *Accounts of Chemical Research*. 56 (2). pp. 95–105. doi: 10.1021/acs.accounts.2c00576
6. Barry, J.F., Schloss, J.M., Bauch, E., Turner, M.J., Hart, C.A., Pham, L.M. & Walsworth, R.L. (2020) Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry. *Reviews of Modern Physics*. 92 (1). Art. no. 015004. pp. 1–68. doi: 10.1103/RevModPhys.92.015004
7. Wu, Y., Jelezko, F., Plenio, M.B. & Weil, T. (2016) Diamond quantum devices in biology. *Angewandte Chemie International Edition*. 55 (23). pp. 6586–6598. doi: 10.1002/anie.201506556
8. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E. [et al.] (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove N2V-centrov v almaze* [Quantum magnetometer based on N2V centers in diamond] Patent No 2816560 Russian Federation. № 2023136053, appl. 29.12.2023, publication date 02.04.2024, Bul. no. 10.
9. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E. [et al.] (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove almaznogo lazera* [A quantum magnetometer based on a diamond laser] Patent No 2825078 Russian Federation. № 2023136092, appl. 29.12.2023, publication date 19.08.2024, Bul. no. 23.

Информация об авторах:

Чащин Владимир Вениаминович – младший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: lloodia@yandex.ru. ORCID ID: 0009-0002-2558-8130. SPIN-код: 3345-3640

Лыга Ольга Игоревна – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). SPIN-код: 4917-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Chashchin Vladimir V., Junior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer of the laboratory of optical radiation, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lloodia@yandex.ru. ORCID ID: 0009-0002-2558-8130. SPIN-code: 3345-3640

Lyga Olga I., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Shulepov Mikhail A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4917-2804

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья
УДК 537.635, 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/4

NV- и N₂V-центры окраски в спектрах электролюминесценции алмаза

Людмила Александровна Васильева¹, Захар Игоревич Бородулин²,
Михаил Александрович Шулепов³

^{1,2,3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{2,3} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

¹ *wassil_93@mail.ru*

² *zhar.borodulin12@gmail.com*

Аннотация. В статье исследованы спектры электролюминесценции двух синтетических алмазных образцов. Замещающий азот, встраиваясь в кристаллическую решетку алмаза, после дополнительной постростовой радиационно-термической обработки образует NV-центры и N₂V-центры окраски в двух зарядовых состояниях. Данные центры окраски люминесцируют в диапазоне от 500 до 800 нм, который используется для управления квантовыми сенсорами и кубитами на основе алмаза.

Ключевые слова: алмаз, азот-вакансионные центры окраски, дефекты структуры, электролюминесценция, фотолюминесценция, катодолуминесценция, спектр пропускания, спектр поглощения

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития учебного дизайн-центра «Микроэлектроника квантовой радиогарфии» (соглашения от 29.02.2024 г. № 075-02-2024-1500 и № 075-02-2024-1504) в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Для цитирования: Васильева Л.А., Бородулин З.И., Шулепов М.А. NV и N₂V-центры окраски алмаза в спектрах электролюминесценции алмаза // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 28–36. doi: 10.17223/29491665/8/4

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/4

NV and N₂V color centers in electroluminescence spectra of diamond

Lyudmila A. Vasilyeva¹, Zakhar I. Borodulin², Mikhail A. Shulepov³

^{1,2,3} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{2,3} *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

¹ *wassil_93@mail.ru*

² *zhar.borodulin12@gmail.com*

Abstract. Diamond, because of its unique properties, is a promising material for optoelectronic devices based on it: LEDs and lasers. The article examines the main optically active color centers of diamond, their characteristics and methods of production, and provides a literary overview of the most common light-emitting structures based on diamond – PIN-structures. The ways of creating these structures, their advantages and disadvantages, are considered. In the practical part of the work, it is shown that substitutional nitrogen can be embedded in the diamond structure and form, for example, such color centers as NV centers or N₂V centers in two charge states. The color of the sample, the method of excitation and the intensity of luminescence, and the width of the emission spectrum depend on the method of inclusion, concentration, and charge state of the nitrogen color centers. The spectra of photoluminescence, cathodoluminescence and electroluminescence are considered using the example of two samples. The intensity of electroluminescence in both samples is noticeably lower than that of cathodoluminescence and photoluminescence. Optically active centers are determined based on the spectra. The analysis of peaks at a certain wavelength and the width of the spectrum allow us to identify and distinguish one center from another. In sample C122, nitrogen was embedded in the structure in the form of an NV center, and in sample C130 in the form of an N₂V center. Since the intensity of electroluminescence directly depends on the current in the sample, Raman spectra are given to determine inhomogeneous inclusions affecting the flow of current. The analysis of Raman spectra shows the presence of non-diamond forms of carbon in samples such as carbide and graphite.

Key words: diamond, nitrogen-vacancy color centers, structural defects, electroluminescence, photoluminescence, cathodoluminescence, transmission spectrum, absorption spectrum

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel training and scientific foundation for the electronic industry» of the State program of the Russian Federation «Scientific and technological development of the Russian Federation» during the implementation of the Program for the development of the educational design center «Microelectronics of Quantum Radiography» (agreements dated 29.02.2024 № 075-02-2024-1500 and № 075-02-2024-1504) at the Institute of High-current Electronics SB RAS.

For citation: Vasilyeva, L.A., Borodulin, Z.I. & Shulepov, M.A. (2024) NV and N₂V color centers in electroluminescence spectra of diamond. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 28–36. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/4

Введение

Алмаз привлекает внимание исследователей и разработчиков в области электроники и фотоники благодаря высокой теплопроводности, высокой радиационной стойкости и химической инертности. Одним из перспективных направлений развития, в которых может применяться алмаз, являются квантовые технологии. Алмазные структуры рассматриваются как потенциальные источники одиночных фотонов [1–3]. На основе алмаза разрабатываются квантовые сенсоры [2–5]. Предполагается применение центров окраски алмаза для квантовых вычислений [6, 7]. Наиболее отработанными являются технологии создания азот-вакансионных центров окраски в алмазе в процессе постростовой обработки, включая радиационно-термическую [8], облучение фемтосекундным лазером [9], ионную имплантацию [10].

Современное состояние исследований в области электролюминесценции алмаза

В настоящий момент многие научные коллективы, занимающиеся исследованиями алмаза, уделяют большое внимание изучению электролюминесценции (ЭЛ). Долгое время данное явление не исследовалось на синтетических алмазах. Прежде всего это было связано с особенностями синтеза алмаза: сложность в получении материала приборного качества, трудности в изготовлении многослойных структур, плохая адгезия контактов к алмазу, проблемы с получением различных центров окраски, низкая повторяемость результатов.

В алмазе выделяют более 500 центров окраски, не все они являются оптически активными. К наиболее перспективным оптически активным центрам можно отнести следующие [11].

NV-центр. Данный центр окраски представляет собой азот-вакансионный комплекс, расположенный в соседних узлах решетки алмаза, и является наиболее изученным. Это связано с тем, что данный центр наиболее просто получить в синтетических алмазах, при этом изначально он был обнаружен в природных алмазах. На NV-центре в лабораторных условиях были получены генерация связанных состояний света

и квантовая память со временем жизни более 1 с. Для NV-центров характерно сильное электрон-фононное взаимодействие с решеткой алмаза, поэтому не более 3% энергии люминесценции NV-центров приходится на бесфононную линию (БФЛ), в то время как остальная энергия высвечивается в фононном крыле [11]. В зависимости от положения уровня Ферми, обычно определяемого концентрацией свободного замещающего азота Ns (C-центры), NV-центр может находиться в двух зарядовых состояниях – нейтральном (БФЛ 575 нм) и отрицательном (БФЛ 637 нм).

SiV-центр. Данный центр окраски, представляющий собой атом кремния, заместивший два атома углерода, привлек внимание исследователей как перспективный кандидат для квантовых технологий. Важной особенностью этого центра является то, что в отрицательном зарядовом состоянии на его БФЛ 738 нм приходится порядка 70% интенсивности излучения люминесценции, а её ширина составляет всего около 5 нм при комнатной температуре. Квантовая эффективность люминесценции SiV-центра при этом составляет порядка 5% [11].

GeV-центр. Примерно в 2015 г. появились первые работы по обнаружению полосы с БФЛ 602 нм в спектрах люминесценции алмаза, легированного германием, либо в алмазе после ионной имплантации германия и последующего отжига. Данная полоса обусловлена GeV-центром в отрицательном зарядовом состоянии. Было установлено, что данный центр обладает всеми свойствами источника одиночных фотонов. В отличие от SiV-центра в спектрах данного центра не наблюдалось изотопного разделения БФЛ при низких температурах [12].

N₂V-центр возникает при захвате N₂-центром (A-центром) свободной вакансии или при диссоциации N₄V₂-дефекта. N₂V-центр в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ 503 нм является весьма перспективным для квантовых технологий [13]. Ранее сообщалось о создании светоизлучающих алмазных структур, в том числе на основе ЭЛ N₂V-центров при высоких напряженностях электрического поля – от 100 до 150 кВ/см [14]. При этом спектры ЭЛ N₂V-центров были очень близки к спектрам катодолуминесценции (КЛ) тех же образцов.

Следует отметить, что не каждое зарядовое состояние центров окраски можно наблюдать в спектрах

ЭЛ, хотя они имеют место при оптическом возбуждении. Это связано с тем, что при оптической накачке центры окраски ведут себя подобно изолированным атомам, взаимодействуя с решеткой алмаза только посредством фононов. Электрическое же возбуждение, наоборот, базируется на передаче возбуждения от свободных носителей заряда к электронам центра окраски. Необходимость получения ЭЛ обосновывается стремлением к миниатюризации уже имеющихся приборов, работающих на основе фотолюминесценции. В перспективе – создание принципиально новых квантовых устройств, которые ранее никто просто не рассматривал ввиду невозможности таких процессов при оптической накачке [15].

Для создания светоизлучающего прибора на основе алмаза необходимо изготовить токопроводящую PIN-структуру. В такой эпитаксиальной структуре имеются различные алмазные слои с разным типом проводимости. Дырочный тип проводимости обеспечивается легированием алмаза бором. Слой, легированный азотом, кремнием или германием, будет иметь собственный тип проводимости, т.е. термически азотная примесь будет ионизоваться только при высоких температурах [16] или не ионизоваться вовсе, если примесь изоэлектрическая (кремний или германий). Для получения слоя с n-типом проводимости

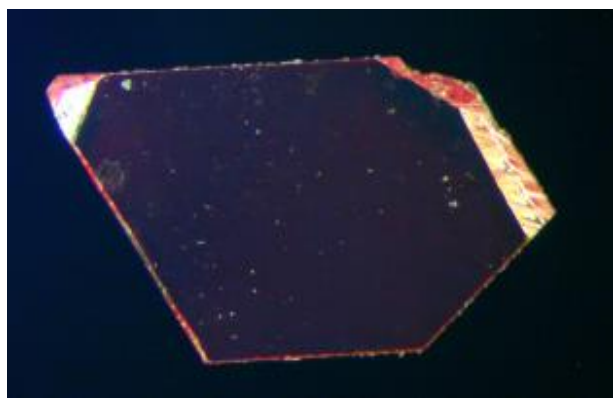
в уже имеющуюся PI-структуру вводят соответствующую примесь. На данный момент возможными легирующими примесями n-типа для алмаза являются азот, фосфор, сера, литий, церий, но полученные на сегодняшний день результаты противоречивы [17, 18]. В большинстве попыток синтезировать CVD-алмаз с n-типом проводимости используют фосфор, но фосфор имеет больший ковалентный радиус по сравнению с ковалентным радиусом азота, что затрудняет изоморфное замещение углерода в решетке алмаза [19]; возможно, встраиваясь в алмазную решетку, фосфор пассивируется водородом. Поэтому наиболее важная технологическая задача для углеродной электроники сегодня – это поиск решений для создания низкомного алмаза с n-типом проводимости.

Целью настоящей работы является исследование ЭЛ синтетических алмазных образцов, содержащих азот-вакансионные центры окраски типа NV и N₂V в различных зарядовых состояниях, а также сравнение свечения ЭЛ с фото- и катодолуминесценцией этих же образцов.

Материалы и методы исследований

В работе исследовались алмазные образцы, характеристики которых приведены в таблице.

Обозначение алмазного образца	Содержащиеся азот-вакансионные центры	Толщина образца, мм	Напряжение появления электролюминесценции, В
C122	NV	0,652	150 В
C130	N ₂ V	0,779	100 В



C122



C130

Рис. 1. Фотографии исследованных алмазных образцов с условными обозначениями C122 и C130

Fig. 1. Pictures of the studied diamond samples with the symbols C 122 and C130

На рис. 1 приведены фотографии алмазных образцов C122 и C130. Данные образцы были выращены методом температурного градиента в условиях высоких давлений и высоких температур (ВДВТ) и изначально содержали атомы азота в свободной замещающей форме Ns.

Хотя фотографиях образцы, за исключением сколов и трещин, выглядят довольно однородно, они содержат неалмазные формы углерода. На рис. 2 приведены спектры комбинационного рассеяния (КР) алмазных образцов C122 и C130 при возбуждении лазером на 633 нм.

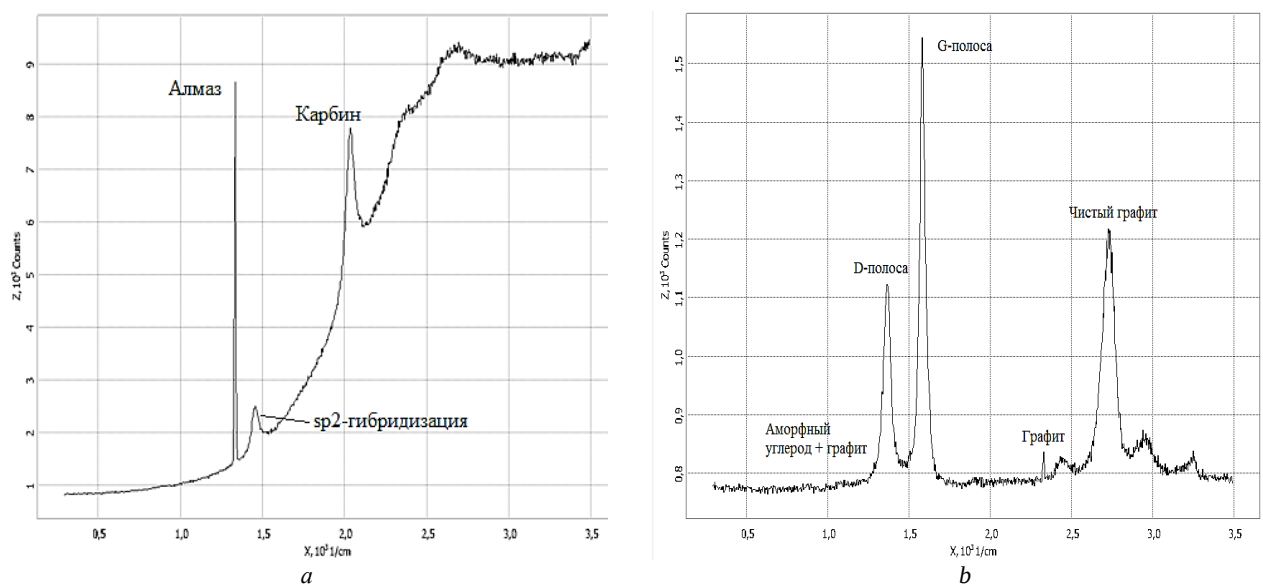


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния алмазных образцов C122 (a) и C130 (b) при возбуждении лазером на 633 нм

Fig. 2. Raman spectra of diamond samples C122 (a) and C130 (b) when excited by a laser at 633 nm

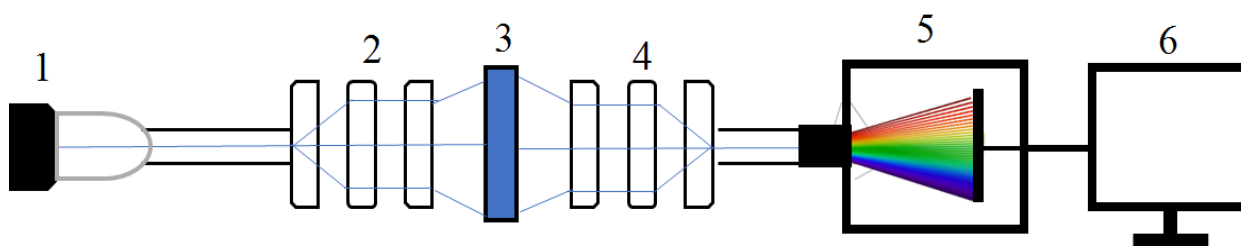


Рис. 3. Схема установки для измерения спектров пропускания: 1 – широкополосный источник оптического излучения; 2, 4 – световоды; 3 – образец в держателе; 5 – спектрометр; 6 – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 3. The scheme of measuring transmission spectra: 1 – broadband optical source; 2, 4 – optical fibers; 3 – sample in a holder; 5 – spectrometer; 6 – personal computer with software for processing spectra

Из спектров КР следует (см. рис. 2, a), что в образце C122 присутствуют углерод в виде sp^2 -гибридизированных углеродных связей ($1\,456\text{ см}^{-1}$), а также карбин ($2\,037\text{ см}^{-1}$).

Спектр КР образца C130 продемонстрировал наличие различных неалмазных форм углерода (см. рис. 2, b). В данном образце отмечается наличие D-полосы sp^2 -гибридизированного углерода на $1\,334\text{ см}^{-1}$. Фаза метастабильного углерода, которая включает аморфный углерод и графит, проявляет себя в спектре КР данного образца на $1\,493\text{ см}^{-1}$. На $1\,577\text{ см}^{-1}$ наблюдается G-полоса графита, свойственная низкокачественным алмазам, содержащим графит в сочетании с алмазной фазой углерода. При волновых числах более $2\,000\text{ см}^{-1}$ отмечается графит в различных формах на $2\,333$ и $2\,732\text{ см}^{-1}$.

Наличие таких неалмазных фаз может влиять на протекание тока в образце и, как следствие, на ЭЛ.

Предположительно неалмазные включения появились в данных образцах в результате радиационно-термической обработки, проведенной по схеме: облучение электронами с поверхностной дозой около $2 \cdot 10^{18}\text{ e}^-/\text{см}^2$ и последующий отжиг в аргоне при температуре $1\,000\text{ °C}$ в течение 2 ч.

Несмотря на изначально одинаковую азотную примесь, алмазные образцы отличаются по цвету (см. рис. 1). Это свидетельствует о том, что замещающий азот образовал разные центры окраски. Определить тип азотных центров окраски позволяют спектры поглощения, вычисляемые из спектров пропускания образцов. Блок-схема установки для измерения спектров пропускания представлена на рис. 3.

Алмазный образец закреплялся в держателе 3, к образцу с двух сторон были подведены световоды 2 и 4; один – от источника широкополосного источника излучения SL5 Stellar-Net 1, другой – от спектрометра Ocean

Optics HR2000 5. Опорный спектр широкополосного источника измерялся в отсутствие алмазного образца в держателе. Спектр пропускания вычислялся автоматически программным обеспечением спектрометра после измерения опорного спектра и установки алмазного образца в держатель. Из полученного спектра пропускания с использованием стандартной методики вычислялся спектр поглощения образца.

Для сравнения, а также наблюдения люминесцирующих центров окраски, возбуждаемых селективно или изменяющих в процессе возбуждения своё заря-

довое состояние, исследовались спектры фотolumинесценции и катодolumинесценции на установках, схемы которых приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

При измерении спектров фотolumинесценции в качестве источника излучения использовались УФ эксимерные лампы с длиной волны 222 и 308 нм. Излучение от лампы 1 подавалось на образец 2, вызывая фотolumинесценцию, свечение которой системой линз 4 подавалось на вход спектрометра Ocean Optics HR2000 5. Светофильтр 3 не пропускал в спектрометр излучение УФ лампы.

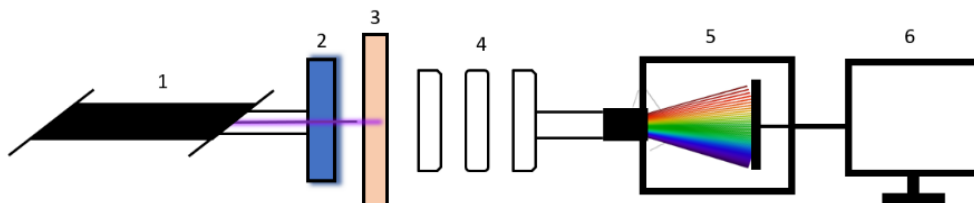


Рис. 4. Схема установки для измерения спектров фотolumинесценции: 1 – эксимерная лампа; 2 – алмазный образец; 3 – светофильтр; 4 – фокусирующие линзы; 5 – спектрометр; 6 – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 4. The scheme of measuring photoluminescence spectra: 1 – excimer lamp; 2 – diamond sample; 3 – light filter; 4 – focusing lens; 5 – spectrometer; 6 – personal computer with software for processing spectra

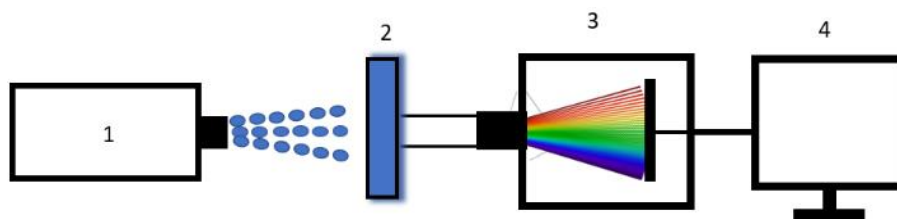


Рис. 5. Схема установки для измерения спектров катодolumинесценции: 1 – импульсный сильноточный ускоритель электронов; 2 – алмазный образец; 3 – спектрометр; 4 – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 5. The scheme of measuring cathodoluminescence spectra: 1 – pulsed high-current electron accelerator; 2 – diamond sample; 3 – spectrometer; 4 – personal computer with software for processing spectra

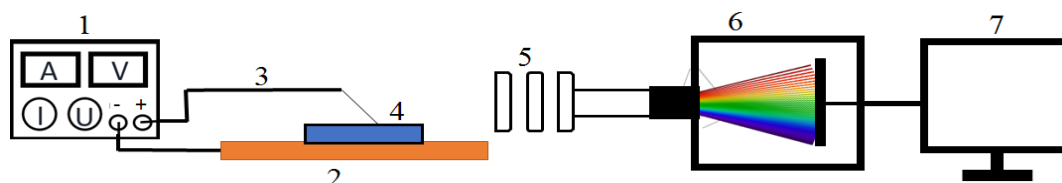


Рис. 6. Схема установки для измерения спектров электролюминесценции: 1 – источник питания; 2 – плоский электрод; 3 – игольчатый электрод; 4 – алмазный образец; 5 – фокусирующая линза и световод; 6 – спектрометр; 7 – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 6. The scheme of measuring electroluminescence spectra: 1 – power source; 2 – flat electrode; 3 – needle electrode; 4 – diamond sample; 5 – focusing lens and optical fiber; 6 – spectrometer; 7 – personal computer with software for processing spectra

В качестве источника излучения при измерении спектров катодolumинесценции использовался ускоритель электронов НОРА с частотой 2 Гц и энергией

«бомбардирующих» электронов порядка 100–200 кэВ. ЭЛ алмазных образцов исследовалась с помощью установки, схема которой приведена на рис. 6.

Измерение ЭЛ проводилось следующим образом: алмазный образец 4 закреплялся на плоском электроде 2. От источника питания Rigol DP832 1 подавалось напряжение, игольчатый электрод 3 прикладывался к поверхности образца в разных областях. При обнаружении люминесцирующей области к образцу подносился световод с концевой фокусирующей линзой 5. Спектр ЭЛ измерялся спектрометром Ocean Optics HR2000 6.

Измерение всех спектров проводилось при комнатной температуре образцов.

Результаты

На рис. 7, а, б представлены спектры поглощения и ЭЛ алмазных образцов C122 и C130.

На рис. 7, а приведены спектры поглощения (черная кривая) и люминесценции (синяя кривая) образца C122. Спектр ЭЛ данного образца коррелирует со спектром NV-центра (в отрицательном зарядовом состоянии), наблюдаемого в спектрах фотолюминесценции с БФЛ на длине волны 637 нм, и спектральным максимумом – на длине волны 680 нм.

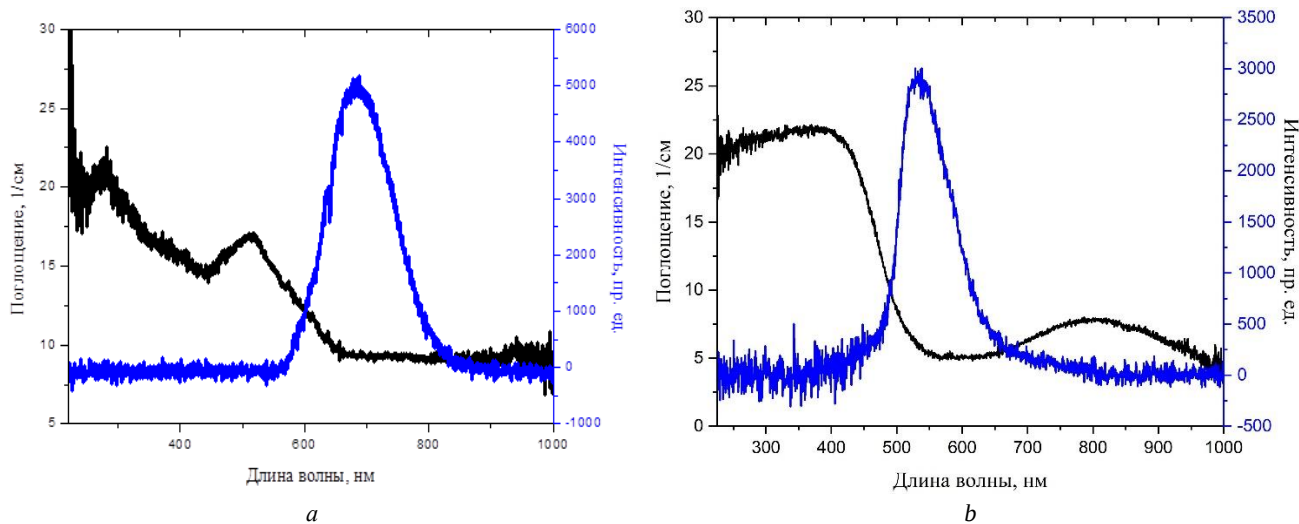


Рис. 7. Спектры поглощения (черные кривые) и электролюминесценции (синие кривые) алмазных образцов C122 (а) и C130 (б)

Fig. 7. The spectra of absorption and electroluminescence of diamond samples C 122 (a) and C130 (b)

При этом в спектре ЭЛ образца C122 наблюдается сильное антистоксовое фоновое крыло в области 590–635 нм. В то же время в спектре поглощения данного образца полоса NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии практически отсутствует, однако наблюдается сильная полоса поглощения NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм и максимумом фонованого крыла поглощения вблизи 510 нм. Слабое поглощение в области 580–640 нм можно отнести на счёт антистоксового крыла поглощения NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии. Помимо полос NV-центров, наблюдается интенсивный континуум поглощения свободного замещающего азота Ns, располагающийся в спектре от 450 нм в коротковолновую область.

На рис. 7, б приведены спектры поглощения (черная кривая) и люминесценции (синяя кривая) образца C130. Полосы поглощения данного образца указывают на наличие в нем свободного замещающего азота Ns (континуум в УФ и синей части спектра), а также N₂V-центров в обоих зарядовых состояниях с БФЛ на 503 нм для нейтрального и с БФЛ на 986 нм –

для отрицательного соответственно. В спектре ЭЛ данного образца наблюдается суперпозиция полосы N₂V-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 503 нм и полосы с максимумом около 480 нм, возможно, обусловленной одним из никель-азотных центров.

Для сравнения дополнительно были измерены спектры катодолуминесценции (КЛ) и фотолюминесценции (ФЛ) алмазных образцов C122 и C130. На рис. 8, а, б приведены спектры ЭЛ (синие кривые), КЛ (красные кривые) и ФЛ (зеленые кривые) алмазных образцов C122 и C130.

Необходимо отметить, что свечение КЛ и ФЛ образцов визуально наблюдалось во всем объеме образцов, в то время как ЭЛ возникала только в области скола на грани образцов, т.е. в областях, которые имели токопроводящие каналы.

КЛ и ФЛ спектры образца C122 подтверждают наличие в нём NV-центров в обоих зарядовых состояниях: явно наблюдается БФЛ на длине волны 575 нм с характерными фоновыми повторениями в области 580–630 нм, а также БФЛ 637 нм в виде линии самопоглощения в спектре ЭЛ.

Это позволяет сделать вывод о механизме наблюдения в спектре ЭЛ образца C122 полосы NV-центров

в отрицательном зарядовом состоянии, которые не являются электрически активными [20].

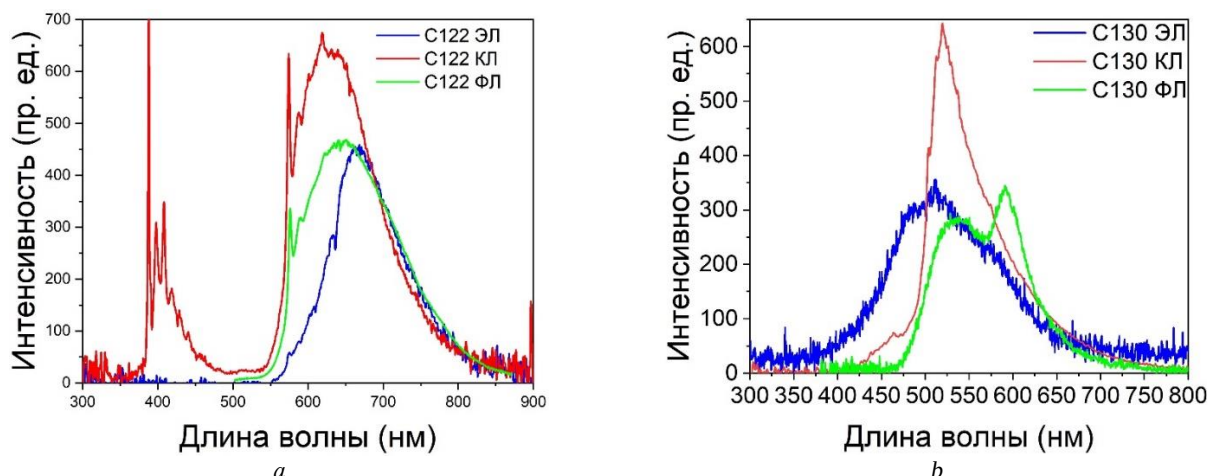


Рис. 8. Спектры электро- (синие кривые), катодо- (красные кривые) и фотолюминесценции (зеленые кривые) алмазных образцов C122 (a) и C130 (b)

Fig. 8. Spectra of electro- (blue curves), cathodo- (red curves) and photoluminescence (green curves) of diamond samples C122 (a) and C130 (b)

Ввиду достаточно высокого показателя поглощения NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм (до 17 см^{-1} , см. рис. 7, a) полоса NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм практически не наблюдается в спектре ЭЛ (рис. 8, a). Протекая по токоведущим каналам внутри образца, электрический ток возбуждает интенсивную ЭЛ NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм, излучение которой возбуждает ФЛ NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм. Само же излучение NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм поглощается, проходя через образец с NV-центрами в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм.

Помимо свечения NV-центров, в спектре КЛ образца C122 наблюдается полоса люминесценции с БФЛ 389 нм, которая обусловлена примесно-дефектными комплексами Ns-Ci, включающими азотный замещающий атом (Ns) и собственное междоузлие (Ci).

На рис. 8, b представлены спектры ЭЛ, КЛ и ФЛ образца C130. Его сложный примесно-дефектный состав вызывает появление полос люминесценции различной природы – N_2V -центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 503 нм, NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ 575 нм и никель-азотных центров с максимумом вблизи 480 нм. В зависимости от способа возбужде-

ния наблюдаются различные интенсивности и относительные вклады данных полос в суммарный спектр люминесценции.

Заключение

Исследованы спектры комбинационного рассеяния, поглощения, электролюминесценции, катодолуминесценции и фотолюминесценции двух синтетических алмазных образцов, содержащих неалмазную фазу углерода в виде аморфного углерода, графита и карбина (линии и полосы комбинационного рассеяния $1456, 1493, 1577, 2037, 2333, 2732 \text{ см}^{-1}$). Предположительно неалмазные включения, визуально не наблюдаемые, формируют разветвленную сетку токоведущих каналов, обеспечивающих протекание электрического тока и электролюминесценцию алмазных образцов. В спектрах исследованные алмазные образцы содержат NV- и N_2V -центры окраски, каждый в отрицательном и нейтральном зарядовом состоянии (БФЛ 503, 575, 637 и 936 нм), замещающий азот Ns (континуум поглощения от 450 нм в коротковолновую сторону), Ns-Ci-центры (БФЛ на длине волны 389 нм) и никель-азотные центры (полоса люминесценции 480 нм). Получение алмазных образцов, содержащих только NV- и N_2V -центры окраски, позволит создавать светоизлучающие токопроводящие структуры, востребованные в квантовых технологиях для управления сенсорами и кубитами.

Список источников

1. Lobaev M.A., Radishev D.B., Bogdanov S.A. Diamond p-i-n Diode with Nitrogen Containing Intrinsic Region for the Study of Nitrogen-Vacancy Center Electroluminescence // Physica Status Solidi - Rapid Research Letters. 2020. Vol. 14 (11). Art. no. 2000347. P. 1–5. doi: 10.1002/pssr.202000347

2. Богданов С.А. Горбачев А.М., Лобаев М.А., Радищев Д.Б. Создание локализованных ансамблей NV-центров в CVD-алмазе с помощью облучения электронным пучком // Письма в ЖТФ. 2019. № 46. С. 36–39. doi: 10.21883/PJTF.2019.06.47498.17634
3. Fedyanin D.Yu., Agio M. Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures // New journal of physics. 2016. Vol. 18 (7). Art. no. 073012. P. 1–27. doi: 10.1088/1367-2630/18/7/073012
4. Горбачев А.М., Лобаев М.А., Радищев Д.Б., Вихарев А.Л., Богданов С.А., Большедворский С.В., Зеленева А.И., Сошенко В.В., Акимов А.В., Дроздов М.Н., Исаев В.А. Формирование многослойных наноструктур NV-центров в монокристаллическом CVD-алмазе // Письма в ЖТФ. 2020. № 46. С. 19–23.
5. Рубинас О.Р., Сошенко В.В., Большедворский С.В., Кожокару И.С., Зеленева А.И., Воробьев В.В., Сорокин В.Н., Вин В.Г., Смолянинов А.Н., Акимов А.В. Оптическое детектирование ансамбля C-центров в алмазе и когерентное управление им с помощью ансамбля NV-центров // Квантовая электроника. 2021. Т. 51, № 10. С. 938–946.
6. Pezzagna S., Meijer J. Quantum computer based on color centers in diamond // Applied physics review. 2021. № 8. Art. no. 011308.
7. Российский квантовый центр. URL: https://rqc.ru/backend/uploads/RQC_Annual_report_2023_web_rus_c515b7ed1f.pdf (дата обращения: 27.11.2024).
8. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. HPHT-Treated Diamonds // Springer Series in Materials Science. 2013. P. 1–270.
9. Кузьмин Е.В., Красин Г.К., Гулина Ю.С. Структурная микромодификация алмаза фемтосекундными лазерными импульсами через оптический контакт с нелинейной сильнорефрактивной иммерсионной средой // Письма в ЖЭТФ. 2024. № 4. С. 267–272.
10. Вавилов В.С. Возможности и ограничения ионной имплантации в алмаз и их сопоставление с другими методами введения электрически активных примесей // Успехи физических наук. 1994. № 4. С. 429–433.
11. Большедворский С.В. Исследование центров окраски в алмазах и их агрегатах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2022. 104 с.
12. Екимов Е.А., Кондрин М.В. Примесно-вакансионные комплексы в алмазе: перспективы синтеза и применений // Успехи физических наук. 2017. С. 577–598.
13. Патент № 2816560 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе N₂V-центров в алмазе / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е., Елисеев А.П., Липатов Е.И., Лыга О.И., Рипенко В.С., Чашин В.В., Шулепов М.А. № 2023136053, заявл. 29.12.2023; опубл. 02.04.2024. Бюл. № 10. 7 с.
14. Burchard B., Zaitsev A.M., Fahrner W.R., Melnikov A.A., Denisenko A.V., Varichenko V.S. Diamond based light emitting structures // Diamond and related materials. 1994. Vol. 3. P. 947–950.
15. Алмаз – основа квантовой связи и компьютеров будущего. URL: <https://indicator.ru/physics/uchenye-zayavlyayut-chto-kvantovyy-almaz-stanet-osnovoj-kvantovoj-svyazi-i-kompyuterov-budushhego-03-08-2016.htm> (дата обращения: 27.11.2024).
16. Парфенов В.В., Закиров Р.Х. Полупроводниковый инжекционный лазер : методическое пособие. Казань : Казанский университет, 2014. 22 с.
17. Спицин Б.В., Алексеев А.Е. Химическая кристаллизация алмаза и нанесение алмазных покрытий из газовой фазы // Защита металлов. 2007. Т. 43, № 5. С. 456–474.
18. Wang X., Wang L., Yhang B., Yao N. Elctroluminescenc of diamond: Ce thin films // Semiconductor Science and Technology. 2003. Vol. 18. P. 144–146.
19. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. М. : Физматлит, 2008. 495 с.
20. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond. Bochum : Springer, 2001. 486 p.

References

1. Lobaev, M.A., Radishev, D.B. & Bogdanov, S.A. (2020) Diamond p–i–n Diode with Nitrogen Containing Intrinsic Region for the Study of Nitrogen-Vacancy Center Electroluminescence. *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*. 14 (11). Art. no. 2000347. pp. 1–5. doi: 10.1002/pssr.202000347
2. Bogdanov, S.A. Gorbachev, A.M., Lobashev, M.A. & Radishchev, D.B. (2019) Creation of localized ensembles of NV centers in a CVD diamond using electron beam irradiation. *Letters in ZhTF*. 46. pp. 36–39, DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47498.17634
3. Fedyanin, D.Yu. & Agio, M. (2016) Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures. *New journal of physics*. 18 (7). Art. no. 073012. pp. 1–27. doi: 10.1088/1367-2630/18/7/073012
4. Gorbachev, A.M., Lobaev, M.A., Radishchev, D.B., Vikharev, A.L., Bogdanov, S.A., Drozdov, M.N., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I. & Arkhipova, E.A. (2020) Creation of localized ensembles of NV centers in a diamond grown in a microwave CVD reactor and study of their properties. *Radiophysics and quantum electronics*. 63 (7). pp. 530–541. doi: 10.1007/s11141-021-10077-9
5. Rubinas, O.R., Zelenev, A.I., Sorokin, V.N., Soshenko, V.V., Bolshedvorskii, S.V., Cojocar, I.S., Smolyaninov, A.N., Akimov, A.V., Vorobyov, V.V. & Vins, V.G. (2021) Optical detection of an ensemble of C centres in diamond and their coherent control by an ensemble of NV centres. *Quantum electronics*. 51 (10). pp. 938–946. doi: 10.1070/QEL17624
6. Pezzagna, S. & Meijer, J. (2021) Quantum computer based on color centers in diamond. *Applied physics review*. 8. Art. no. 011308.
7. Russian Quantum Center. URL: https://rqc.ru/backend/uploads/RQC_Annual_report_2023_web_rus_c515b7ed1f.pdf (date of access 11/27/2024).
8. Dobrinets, I.A., Vins, V.G. & Zaitsev, A.M. (2013) HPHT-Treated Diamonds. *Springer Series in Materials Science*. pp. 1–270.
9. Kuzmin, E.V., Krasin, G.K. & Gulina, Yu.S. (2024) Structural micromodification of diamond by femtosecond laser pulses through optical contact with a nonlinear highly refractive immersion medium. *Letters to JETP*. 4. pp. 267–272.
10. Vavilov, V.S. (1994) Possibilities and limitations of ion implantation in diamond, and comparison with other doping methods. *Physics-Uspekhi*. 37. pp. 407–411. doi: 10.1070/PU1994v037n04ABEH000023
11. Bolshedvorskii, S.V. (2022) Study of color centers in diamonds and their aggregates: diss. Cand. phys.-math. sciences. Moscow.
12. Ekimov, E.A. & Kondrin, M.V. (2017) Vacancy-impurity centers in diamond: perspectives of synthesis and applications. *Physics-Uspekhi*. 60. pp. 539–558. doi: 10.3367/UFNe.2016.11.037959
13. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E., Eliseev, A.P., Lipatov, E.I., Lyga, O.I., Ripenko, V.S., Chashchin, V.V. & Shulepov, M.A. (2024) Kvantovyy magnitometr na osnove N2V centrov v almaze [Quantum magnetometer based on N2V centers in diamond] Patent No. 2816560 Russian Federation. № 2023136053, appl. 29.12.2023; publication date 04.02.2024. Bul. No. 10.

14. Burchard, B., Zaitsev, A.M., Fahrner, W.R., Melnikov, A.A., Denisenko, A.V. & Varichenko, V.S. (1994) Diamond based light emitting structures. *Diamond and related materials*. 3. pp. 947–950.
15. Diamond – the basis of quantum communication and computers of the future. URL: <https://indicator.ru/physics/uchenye-zayavlyayut-cto-kvantovj-almaz-stanet-osnovoj-kvantovj-svyazi-i-kompyuterv-budushego-03-08-2016.htm> (date of access: 11/27/2024).
16. Parfenov, V.V. & Zakirov, R.Kh. (2014) Semiconductor injection laser / Methodological manual. Kazan: Kazan University.
17. Spitsyn, B.V. & Alekseenko, A.E. (2007) Chemical crystallization of diamond and application of diamond coatings from the gas phase. *Protection of metals*. 43 (5). pp. 456–474.
18. Wang, X., Wang, L., Yhang, B. & Yao, N. (2003) Elctroluminescenc of diamond: Ce thin films. *Semiconductor Science and Technology*. 18. pp. 144–146.
19. Schubert, F.E. (2008) Light-emitting diodes. M.: Fizmatlit.
20. Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond. Bochum: Springer.

Информация об авторах:

Васильева Людмила Александровна – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий, аспирант радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: wassil_93@mail.ru

Бородулин Захар Игоревич – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). SPIN-код: 4917-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vasilyeva Lyudmila A., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, postgraduate student, faculty of radio-physics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: wassil_93@mail.ru

Borodulin Zakhar I., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer of the laboratory of optical radiation, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Shulepov Mikhail A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4917-2804

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Углеродная электроника и фотоника

Научная статья
УДК 535, 548.4, 53.087.92
doi: 10.17223/29491665/8/5

Спектры свечения малопримесных алмазных образцов под действием пучков электронов с энергией десятки кэВ – единицы МэВ

Александр Александрович Крылов¹, Александр Геннадьевич Бураченко²,
Василий Сергеевич Рипенко³, Дарья Александровна Переседова⁴,
Артем Владимирович Вуколов⁵

^{1, 2, 3, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1, 2, 3, 4} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

⁵ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

¹ *daivi22@mail.ru*

⁵ *dsws@vrpenko.ru*

Аннотация. Исследованы спектры свечения малопримесных синтетических алмазных образцов при возбуждении их электронными пучками с энергией десятки–сотни кэВ и единицы МэВ с различной плотностью тока – сотни А/см² и десятки нА/см². Обнаружено существенное различие в спектрах катодолуминесценции исследуемых образцов при изменении энергии и плотности тока пучка. Определены более подходящие образцы, которые могут использоваться в черенковских детекторах на основе алмаза в различных условиях.

Ключевые слова: алмаз, катодолуминесценция, излучение Вавилова-Черенкова, электронный пучок, черенковский детектор

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации «Программы Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Крылов А.А., Бураченко А.Г., Рипенко В.С., Переседова Д.А., Вуколов А.В. Спектры свечения малопримесных алмазных образцов под действием пучков электронов с энергией десятки кэВ – единицы МэВ // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 37–44. doi: 10.17223/29491665/8/5

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/5

Radiation spectra of low-impurity diamond samples under the action of electron beams with energies of tens of keV – units of MeV

Alexander A. Krylov¹, Alexander G. Burachenko², Vasily S. Ripenko³,
Daria A. Peresedova⁴, Artyom V. Vukolov⁵

^{1, 2, 3, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{1, 2, 3, 4} *Institute of high current electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

⁵ *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *daivi22@mail.ru*

⁵ *dsws@vrpenko.ru*

Abstract. The radiation spectra of low-impurity synthetic diamond samples were studied when excited by electron beams with energies of tens to hundreds of keV and units of MeV with different densities – hundreds of A/cm² and tens of nA/cm². A significant difference in the cathodoluminescence spectra of the studied samples was found when changing the energy and density of the beam current. More suitable samples were determined that can be used in diamond-based Cherenkov detectors under various conditions.

Keywords: diamond, cathodoluminescence, Cherenkov radiation, electron beam, Cherenkov detector

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of

the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Krylov, A.A., Burachenko, A.G., Ripenko, V.S., Peresedova, D.A. & Vukolov, A.V. (2024) Radiation spectra of low-impurity diamond samples under the action of electron beams with energies of tens of keV – units of MeV. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 37–44. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/5

Введение

Алмаз является перспективным материалом для высокотемпературной радиационно-стойкой полупроводниковой электроники и фотоники, в том числе для использования его в оптоэлектронных детекторах ионизирующих излучений [1], преобразующих их энергию в оптическое излучение в широком диапазоне длин волн. В частности, алмаз является перспективным материалом для детектирования высокоэнергетических электронов в условиях высокого радиационного фона и высоких температур [2]. Для регистрации таких электронов используются детекторы, основанные на эффекте Вавилова–Черенкова (черенковские), которые обладают рядом преимуществ [3] относительно детекторов, принцип работы которых основан на сцинтилляции материала детектора (сцинтилляционные). В [2] показано, как с помощью черенковского детектора (ЧД) в установках типа «Токамак» регистрируют потоки высокоэнергетических убегающих электронов, которые в процессе работы могут повредить стенки камеры термоядерной установки; последствием может стать дорогостоящий и длительный ремонт. Очень важно контролировать потоки убегающих электронов, появление которых может привести к таким негативным последствиям. Основная энергия таких электронов лежит в диапазоне десятков–сотен кэВ, а также может составлять и единицы МэВ.

Кроме того, является перспективным использование ЧД на основе алмаза для регистрации высокоэнергетических частиц солнечного ветра (в частности, электронов), которые могут негативным образом воздействовать на бортовую электронику космических аппаратов – выводить ее из строя вследствие накопления избыточного заряда на обшивке аппаратов. Основная энергия электронов солнечного ветра составляет также десятки–сотни кэВ, единицы МэВ [4]. Известно, что при таких энергиях электронов в материале радиатора (алмаз) ЧД, помимо излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ), может возникать катодолюминесценция, которая будет искажать полезный сигнал детектора. Поэтому, с одной стороны, представляется целесообразным использование чистых беспримесных алмазных образцов для регистрации высокоэнергетических электронов, в которых отсутство-

вала бы полностью люминесценция. С другой стороны, известно, что в спектрах свечения номинально-беспримесных алмазных образцов (содержание примесей менее нескольких частиц на миллион атомов углерода) может возникать интенсивная экситонная полоса люминесценции в УФ области спектра [5], затрудняющая регистрацию ИВЧ, интенсивность которой максимальна в УФ области спектра. Поэтому в случае, когда люминесценция вносит паразитный вклад в регистрируемый сигнал ЧД, необходимо знать спектр свечения используемого материала радиатора ЧД.

Цель работы и современное состояние вопроса

В работах [6–10], посвященных регистрации убегающих электронов (с энергией десятки–сотни кэВ и единицы МэВ) в токамаках с помощью ЧД на основе алмаза не приводятся спектры свечения используемых алмазных образцов, не приводятся также данные о влиянии люминесценции на сигнал ЧД. Однако для корректного измерения сигнала ЧД в случае, когда катодолюминесценция может вносить паразитный вклад в этот сигнал, необходимо предварительно проводить спектральные измерения свечения алмазного образца для определения его пригодности в качестве материала черенковского детектора в условиях, в которых он будет применяться.

Целью данной работы является исследование спектральных характеристик свечения малопримесных алмазных образцов при облучении их пучками электронов с энергиями как десятки–сотни кэВ, так и единицы МэВ. При этом плотность тока пучка также была различной – сотни А/см² и десятки нА/см².

Материалы и методы исследований

Спектральные исследования свечения проводились с тремя алмазными образцами, синтезированными методами температурного градиента в условиях высокого давления, высокой температуры (ВДВТ) и газохимического осаждения (ГХО). Данные образцы являлись малопримесными по азоту, содержащими собственные дефекты. Образцы имели форму плоскопараллельных пластин различных размеров и толщины (0,25 или 0,5 мм). Характеристики используемых образцов представлены в таблице.

Номер образца	Метод синтеза	Наличие примесей / дефектов	Размеры образца, мм
№ 1	ГХО	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	5 × 5 × 0,25
№ 2	ГХО	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	5,5 × 3,5 × 0,5
№ 3	ВДВТ	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	5 × 5 × 0,25

Исследование спектральных характеристик свечения осуществлялось на двух различных установках. Облучение алмазных образцов электронным пучком с энергией десятки–сотни кэВ проводилось на импульсном генераторе электронов НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э [11, 12]. Генератор работал с частотой следования импульсов 2 Гц, энергия электронов в пучке находилась в диапазоне 30–300 кэВ, длительность импульса тока пучка на полувысоте составляла ~1 нс. Блок-схема экспериментальной установки представлена в [13]. Исследование свечения алмазных образцов проводилось при разных плотностях тока пучка. В первом случае алмазные образцы устанавливались на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э [13], во втором случае – непосредственно вблизи фольги электронной трубки ИМА3-150Э. Электронный пучок диафрагмировался до 3 мм в диаметре. Излучение от образцов попадало в коллимирующую линзу и передавалось с помощью световода в спектрометр Ocean Optics HR2000+ES. Спектральная чувствительность спектрометра, а также линзы и световода лежала в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Все исследования свечения проводились при комнатной температуре. Плотность электронного пучка на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э составляла ~200 А/см², а вблизи фольги электронной трубки была на ~40% выше.

Исследование свечения алмазных образцов в области энергий электронов ~единиц МэВ проводилось на микротроне МИ-6 Томского политехнического университета [14, 15]. Блок-схема экспериментальной установки для исследования спектральных характеристик свечения алмазных образцов приведена в [16]. Энергия моноэнергетического пучка электронов МИ-6 составляла 5,7 МэВ, длительность макроимпульса – ~0,5 мкс, частота следования макроимпульсов – 25 Гц. Диаметр электронного пучка составлял 3 мм, при этом плотность тока пучка составляла ~20 нА/см².

Результаты и их обсуждение

Спектры свечения исследуемых образцов алмаза при облучении их пучком электронов различной плотности генератора НОРА, а также спектры пропускания данных образцов показаны на рис. 1, 2.

В случае расположения исследуемых образцов на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки

ИМА3-150Э в образцах № 1 и № 3 наблюдались люминесценция свободных экситонов с максимумом на длине волны 235 нм и максимум двухфононной компоненты ($TO + O'$) излучательной рекомбинации свободных экситонов на длине волны 241 нм (рис. 1, а, б) [17]. В образце № 3 также наблюдалась слабоинтенсивная полоса люминесценции в диапазоне 400–600 нм (рис. 1, с); предположительно данная полоса является А-полосой [17], природа которой до сих пор однозначно не установлена. В разных публикациях дефектами А-полосы называли sp^2 -гибридизованные связи [18], азотные центры [19], донорно-акцепторные пары [20] и дислокации [21].

В спектрах свечения образца № 2 (рис. 1, б) наблюдалась еле различимая на уровне шумов полоса люминесценции в диапазоне 400–600 нм, природа которой пока не установлена.

При увеличении плотности тока пучка на ~40% (образцы устанавливались вблизи электронной трубки ИМА3-150Э) во всех трёх образцах наблюдались люминесценция свободных экситонов и излучение Вавилова–Черенкова (см. рис. 2, а–с), которое не отмечено при меньшей плотности тока пучка (см. рис. 1, а–с). Появление экситонной полосы люминесценции в образце № 2 (рис. 2, б), вероятно, связано с тем, что свечение свободных экситонов является квадратичным процессом излучательной рекомбинации носителей заряда [12]. Следовательно, интенсивность свечения экситонной полосы люминесценции сильно зависит от плотности электронного пучка, который ее возбуждает.

В спектрах катодолюминесценции трех образцов при воздействии пучком электронов меньшей плотности (см. рис. 1, а–с) наблюдается еле заметная на уровне шумов электронно-колебательная система (ЭКС) с бесфононной линией на 389 нм. Данная ЭКС обусловлена собственными междоузельными атомами. При увеличении плотности тока пучка на ~40% данная ЭКС в спектрах свечения уже не отмечалась на фоне ИВЧ (см. рис. 2, а–с).

Спектры свечения для всех алмазных образцов существенно изменились при облучении их пучком электронов с энергией 5,7 МэВ (рис. 3, а–с). Люминесценции свободных экситонов не наблюдалось для всех образцов (рис. 3, а–с). Отсутствие данной люминесценции в спектрах свечения, по-видимому, является следствием малой плотности тока пучка, так как экситонная люминесценция, как уже ранее говорилось, является квадратичным процессом излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар.

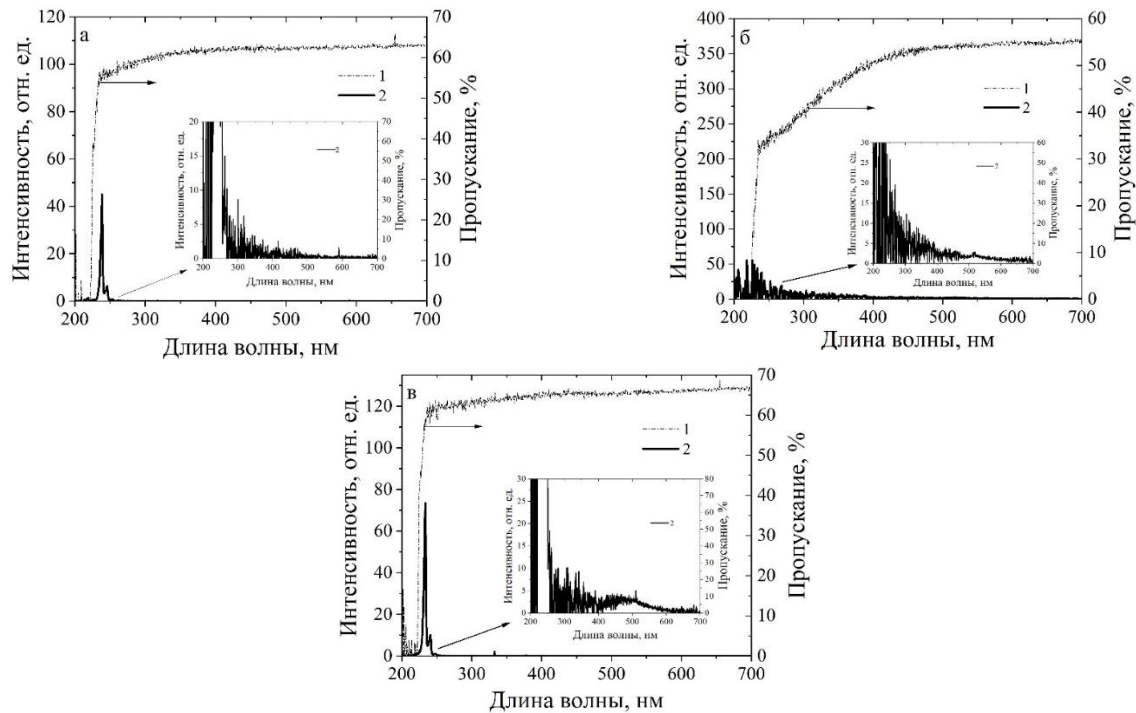


Рис. 1. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), полученные на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э, и их спектры пропускания (кривая 1). Генератор НОРА

Fig. 1. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b), and No. 3 (c), obtained at a distance of 14 mm from the foil of the electronic tube IMA3-150E, and their transmission spectra (curve 1). Generator NORA

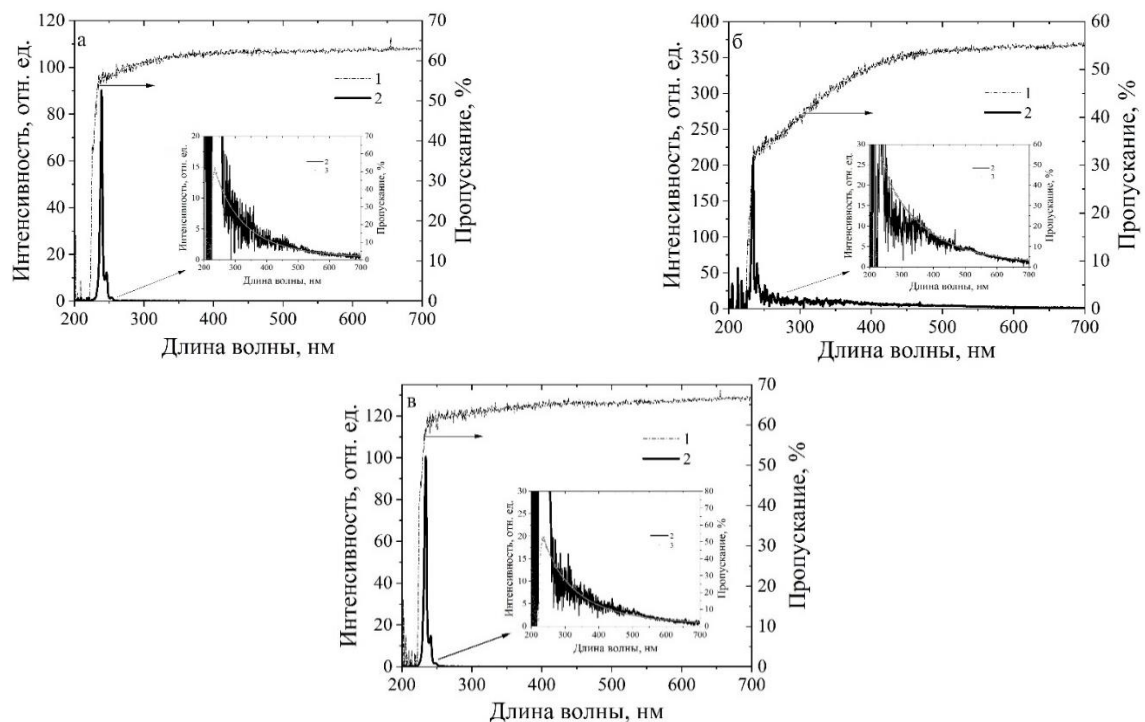


Рис. 2. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), полученные вблизи фольги электронной трубки ИМА3-150Э, а также их спектры пропускания (кривая 1) и расчетные спектры ИВЧ (кривая 3). Генератор НОРА

Fig. 2. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b), and No. 3 (c), obtained near the foil of the electronic tube IMA3-150E, along with their transmission spectra (curve 1) and calculated infrared spectra (curve 3). Generator NORA

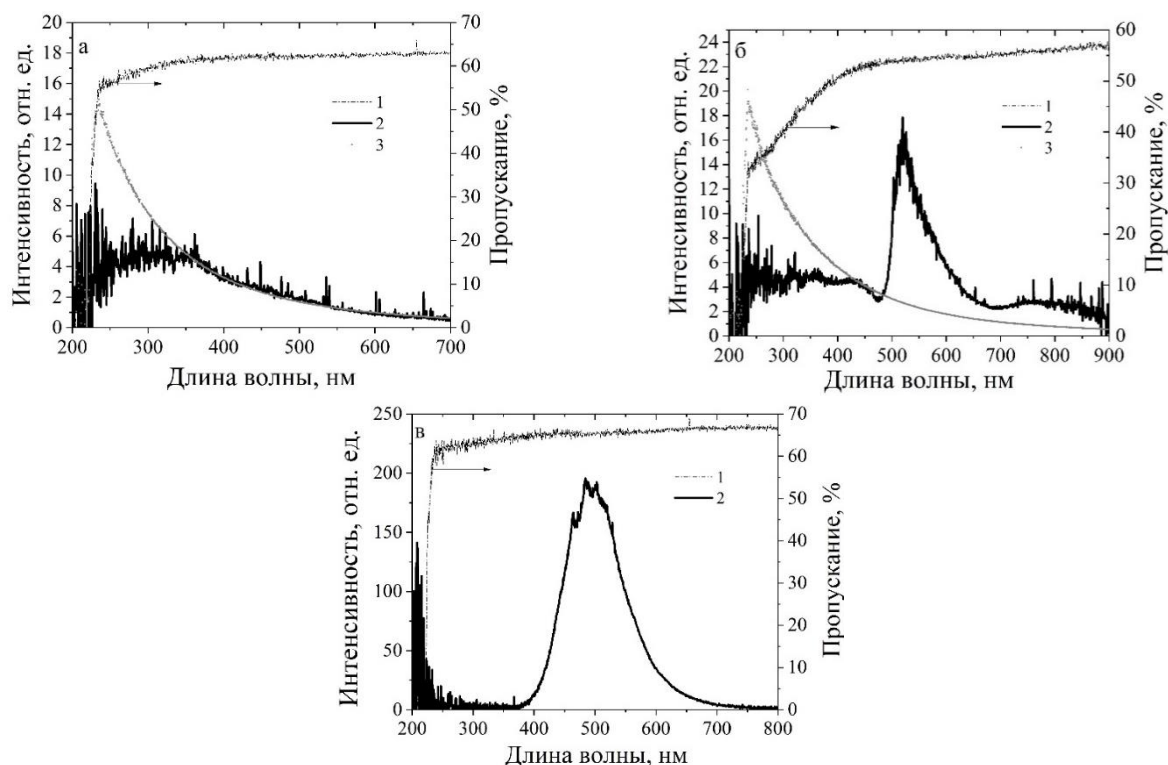


Рис. 3. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), а также их спектры пропускания (кривая 1) и расчетные спектры ИВЧ (кривая 3). Микротрон МИ-6

Fig. 3. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b) and No. 3 (c), as well as their transmission spectra (curve 1) and calculated infrared spectra (curve 3). Microtron MI-6

В спектре свечения образца № 1 зарегистрировано только ИВЧ, расчетный спектр которого достаточно хорошо совпадает с экспериментальным (рис. 3, a). В спектральной области короче ~ 350 нм несовпадение расчетного и экспериментального спектров обусловлено сильным поглощением образца в этой области (рис. 3, кривая 1), которое не было учтено в расчете. В спектре излучения образца № 2 также наблюдалось ИВЧ в области короче ~ 500 нм. Кроме того, в спектре данного образца отмечена интенсивная полоса люминесценции, которая является ЭКС НЗ центра с БФЛ на 503 нм [17]. Максимум данной полосы люминесценции составляет 519 нм и примерно совпадает с максимумом слабоинтенсивной полосы, полученной при возбуждении пучком электронов от генератора НОРА (см. рис. 1, b). Вероятно, природа данной полосы люминесценции в этом образце при разных способах возбуждения (генератор НОРА и микротрон) одна и та же. Отличие интенсивности свечения данной полосы люминесценции в этих спектрах (рис. 1, b; рис. 3, b), по-видимому, обусловлено разной энергией электронного пучка, однако точную причину еще предстоит выяснить.

В спектре образца № 3 (рис. 3, c) наблюдалась интенсивная полоса люминесценции в диапазоне 400–

700 нм, которая предположительно является А-полосой. ИВЧ на фоне интенсивной полосы люминесценции в спектре данного образца не отмечено, хотя оно также должно присутствовать в УФ области спектра, так как толщина образца № 3 и его спектр пропускания схожи с образцом № 1 (см. рис. 3, a, c, кривая 1). Кроме того, спектры пропускания всех образцов демонстрировали край фундаментального поглощения на 225 нм, что подтверждало малое содержание в них примесей и дефектов. Однако образец № 2 был менее чистым, чем образцы № 1 и 3, так как в нем экситонная люминесценция возникала при большей плотности тока пучка, а также в УФ области спектра он имел большее поглощение (см. рис. 3, b, кривая 1).

Закключение

Исследованы спектры излучения малопримесных алмазных образцов при возбуждении пучком электронов различных энергий (десятки–сотни кэВ и единиц МэВ) и плотностей тока пучка (десятки–сотни А/см² и десятки нА/см²). Показано существенное влияние энергии и плотности тока пучка на спектры свечения различных малопримесных алмазных образцов. Выбор конкретного алмазного образца для ис-

пользования его в качестве материала радиатора черенковского детектора в значительной степени зависит от условий, в которых он будет регистрировать потоки высокоэнергетических частиц. Так, например, в условиях околоземного космического пространства, где концентрация электронов относительно низкая, наиболее подходящим образом для регистрации высокоэнергетических электронов является номинально-беспримесный алмазный образец с примесно-дефектным составом, подобным образцу №1, полученному методом ГХО. В условиях более высоких концентраций электронов с энергией десятки–сотни кэВ наиболее

перспективным образцом для радиатора черенковского детектора будет малопримесный образец, но с большей концентрацией примесного азота, с примесно-дефектным составом, подобным образцу № 2, полученный также методом ГХО.

Результаты исследования будут полезны при создании и проектировании черенковских детекторов на основе алмаза, способных работать в экстремальных условиях (высокие температуры, высокий уровень радиационного фона) при различных энергиях и плотностях потоков высокоэнергетических электронов.

Список источников

1. Hochedez J.-F., et. al. Diamond UV detectors for future solar physics missions // *Diamond and Related Materials*. 2001. Vol. 10. P. 673–680. doi: 10.1016/S0925-9635(01)00374-0
2. Sadowski M.J. Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasma // *Nukleonika*. 2011. Vol. 56, № 2. P. 85–98.
3. Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий М. : Атомиздат, 1968. 304 с.
4. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли // *СОЖ*. 1999. № 6. С. 74–81.
5. Рипенко В.С., Бураченко А.Г., Переседова Д. А., Липатов Е.И. Краевая люминесценция алмазов при температурах от 80 до 800 К // *Известия вузов. Физика*. 2022. Т. 65, № 11. С. 132–137. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
6. Plyusnin V.V., Jakubowski L., Zebrowski J., Fernandes H., Silva C., Malinowski K., Duarte P., Rabinski M., Sadowski M.J. Use of Cherenkov-type detectors for measurements of runaway electrons in the ISTTOK tokamak // *Review of Scientific Instruments*. 2008. Vol. 79, № 10. P. 10F505.
7. Jakubowski L., Sadowski M.J., Zebrowski J., Rabinski M., Malinowski K., Mirowski R., Lotte Ph., Gunn J., Pascal J.-Y., Colledan G.i, Basiuk V., Goniche M., Lipa M. Cherenkov-type diamond detectors for measurements of fast electrons in the TORE-SUPRA tokamak // *Review of Scientific Instruments*. 2010. Vol. 81, № 1. P. 013504.
8. Ghanbari M.R., Ghoranneviss M., Elahi A.S., Mohammadi S., Arvin R. Controlling the diffusion of runaway electrons by safety factor changes in IR-T1 tokamak // *Journal of Fusion Energy*. 2016. Vol. 35, № 2. P. 180–186.
9. Pourshahab B., Abdi M.R., Sadighzadeh A., Rasouli C. Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, № 7. P. 072501.
10. Popovic Z., Esposito B., Martin-Solis J.R., Bin W., Buratti P., Carnevale D., Causa F., Gospodarczyk M., Marocco D., Ramogida G., Riva M. On the measurement of the threshold electric field for runaway electron generation in the Frascati Tokamak Upgrade // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, № 12. P. 122501.
11. Месяц Г.А. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск : Наука, 1983. 169 с.
12. Соломонов В.И., Михайлов С.Г. Импульсная катодолуминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 181 с.
13. Бураченко А.Г., Рипенко В.С., Липатов Е.И., Артемов К.П., Крылов А.А. Катодолуминесценция азотсодержащих алмазных образцов при температурах 80–800 К // *Известия вузов. Физика*. 2022. Т. 65, № 11. С. 19–25.
14. Bakshi E.Kh., Alekseev B.A., Burachenko A.G., Vukolov A.V., Potylitsyn A.P., Tarasenko V.F., Uglov S.R., Shevelev M.V. Emission of fused silica and KBr samples in the UV and visible spectral ranges under irradiation with 2.7 MeV electrons // *Matter and Radiation at Extremes*. 2022. Vol. 7, № 2. P. 026901. doi: 10.1063/5.0061100
15. Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х., Ерофеев М.В., Бураченко А.Г. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения Черенкова при возбуждении прозрачных материалов пучком электронов // *Оптика и спектроскопия*. 2021. № 129. С. 569. doi: 10.21883/OS.2021.05.50883.310-20
16. Бураченко А.Г., Артёмов К.П., Вуколов А.В., Крылов А.А., Липатов Е.И., Рипенко В.С., Гоголев А.С. Излучение Вавилова–Черенкова и катодолуминесценция в алмазе под действием электронов с энергией 5,7 МэВ // *Оптика и спектроскопия*. 2023. Т. 131, № 12. С. 1653–1660. doi: 10.61011/OS.2023.12.57400.5713-23
17. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin : Springer, 2001. 353 p. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0
18. Takeuchi D., Watanabe H., Yamanaka S., Okushi H., Sawada H., Ichinose H., Sekiguchi T., Kajimura K. Origin of band-A emission in diamond thin films // *Physical review B*. 2001. Vol. 63. P. 245328. doi: 10.1103/PhysRevB.63.245328
19. Соболев Е.В., Елисеев А.П. Об энергетических уровнях центров N9 и ND1 в алмазах // *Журнал структурной химии*. 1976. Т. 17, № 5. С. 935–938.
20. Dean P.J., Jones I.H. Recombination radiation from diamond // *Physical review*. 1964. Vol. 133, № 6A. P. A1698–A1705.
21. Walker J. Optical absorption and luminescence in diamond // *Reports on progress in physics*. 1979. Vol. 42. P. 1607–1659.

References

1. Hochedez, J.-F., et. al. (2001) Diamond UV detectors for future solar physics missions. *Diamond and Related Materials*. 10. pp. 673–680. doi: 10.1016/S0925-9635(01)00374-0
2. Sadowski, M.J. (2011) Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasma. *Nukleonika*. 56 (2). pp. 85–98.
3. Zrelov, V.P. (1968) *Izluhenie Vavilova-Cherenkova I ego primenenie v fizike visokih energiy* [Vavilov-Cherenkov Radiation and Its Applications in High-Energy Physics] Moscow: Atomizdat Publishing.
4. Galper, A.M. (1999) *Radiacionnyy po yas zemli* [The Earth's Radiation Belt]. Moscow: SOZh Publishing.

5. Ripenko, V.S., Burachenko, A.G., Peresedova, D.A., & Lipatov, E.I. (2022). Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K. *Izvestiya VUZ. Physics*. 65 (11). pp. 132–137. doi: 10.17223/00213411/65/11/132.
6. Plyusnin, V.V., Jakubowski, L., Zebrowski, J., Fernandes, H., Silva, C., Malinowski, K., Duarte, P., Rabinski, M. & Sadowski, M.J. (2008) Use of Cherenkov-type detectors for measurements of runaway electrons in the ISTTOK tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 79 (10). pp. 10F505.
7. Jakubowski, L., Sadowski, M.J., Zebrowski, J., Rabinski, M., Malinowski, K., Mirowski, R., Lotte, Ph., Gunn, J., Pascal, J.-Y., Colledani, G., Basiuk, V., Goniche, M. & Lipa, M. (2010) Cherenkov-type diamond detectors for measurements of fast electrons in the TORE-SUPRA tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 81 (1). pp. 013504.
8. Ghanbari, M.R., Ghoranneviss, M., Elahi, A.S., Mohammadi, S. & Arvin, R. (2016) Controlling the diffusion of runaway electrons by safety factor changes in IR-T1 tokamak. *Journal of Fusion Energy*. 35 (2). pp. 180–186.
9. Pourshahab, B., Abdi, M.R., Sadighzadeh, A. & Rasouli, C. (2016) Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak. *Physics of Plasmas*. 23 (7). pp. 072501.
10. Popovic, Z., Esposito, B., Martín-Solís, J.R., Bin, W., Buratti, P., Carnevale, D., Causa, F., Gospodarczyk, M., Marocco, D., Ramogida, G. & Riva, M. (2016) On the measurement of the threshold electric field for runaway electron generation in the Frascati Tokamak Upgrade. *Physics of Plasmas*. 23 (12). pp. 122501.
11. Mesyats, G.A. (1983) *Silnotochnie impulsnie elektronnie puchki v technologii* [High-Current Pulsed Electron Beams in Technology]. Novosibirsk: Nauka.
12. Solomonov, V.I., & Mikhailov, S.G. (2003) *Impulsnaya katodoluminescenciya I ee primeneniye dlya analiza kondensirovannich veshstv* [Pulsed Cathodoluminescence and Its Application for the Analysis of Condensed Matter]. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS.
13. Burachenko, A.G., Ripenko, V.S., Lipatov, E.I., Artemov, K.P., & Krylov, A.A. (2022) Katodoluminescenciya azotosoderjaschich almaznich obrazcov pri temperaturach 80–800 K [Cathodoluminescence of Nitrogen-Containing Diamond Samples at Temperatures of 80–800 K]. *Izvestiya VUZ. Physics*. 65 (11). pp. 19–25.
14. Baksht, E.Kh., Alekseev, B.A., Burachenko, A.G., Vukolov, A.V., Potylitsyn, A.P., Tarasenko, V.F., Uglov, S.R. & Shevelev, M.V. (2022) Emission of fused silica and KBr samples in the UV and visible spectral ranges under irradiation with 2.7 MeV electrons. *Matter and Radiation at Extremes*. 7 (2). pp. 026901. doi: 10.1063/5.0061100
15. Tarasenko, V.F., Baksht, E.Kh., Yerofeev, M.V., & Burachenko, A.G. (2021) Spectral and Amplitude-Temporal Characteristics of Cherenkov Radiation Excited in Transparent Materials by an Electron Beam. *Optics and Spectroscopy*. 129. pp. 569. doi: 10.21883/OS.2021.05.50883.310-20
16. Burachenko, A.G., Artemov, K.P., Vukolov, A.V., Krylov, A.A., Lipatov, E.I., Ripenko, V.S., & Gogolev, A.S. (2023) Vavilov-Cherenkov Radiation and Cathodoluminescence in Diamond under the Action of Electrons with an Energy of 5.7 MeV. *Optics and Spectroscopy* 131 (12). pp. 1653–1660. doi: 10.61011/OS.2023.12.57400.5713-23
17. Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0
18. Takeuchi, D., Watanabe, H., Yamanaka, S., Okushi, H., Sawada, H., Ichinose, H., Sekiguchi, T. & Kajimura, K. (2001) Origin of band-A emission in diamond thin films. *Physical review B*. 63 (245328). pp. 1–7. doi: 10.1103/PhysRevB.63.245328
19. Sobolev, E.V. & Eliseev, A.P. (1976) Ob energeticheskikh urovnyach centrov N9 I ND1 v almazach [On the Energy Levels of N9 and ND1 Centers in Diamonds]. *Jurnal strukturnoy khimii - Journal of Structural Chemistry*. 17 (5). pp. 935–938.
20. Dean, P.J. & Jones, I.H. (1964) Recombination radiation from diamond. *Physical review* 133 (6A). pp. A1698–A1705.
21. Walker, J. (1979) Optical absorption and luminescence in diamond. *Reports on progress in physics*. 42. pp. 1607–1659.

Информация об авторах:

Крылов Александр Александрович – студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: daivi22@mail.ru

Бураченко Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Рипенко Василий Сергеевич – научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); младший научный сотрудник лаборатории оптических излучений, Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: dsws@vripenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Переседова Дарья Александровна – студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Вуколов Артем Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5900-6464.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Krylov Alexander A., Student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: daivi22@mail.ru

Burachenko Alexander G., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Ripenko Vasily S., Researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); junior researcher, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dsws@vripenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Peresedova Daria A., Student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Vukolov Artyom V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5900-6464

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

ok

Научная статья
УДК 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/6

Катодо-, фото- и рентгенолюминесценция синтетического алмаза, содержащего NV⁰-центры

Василий Сергеевич Рипенко¹, Дарья Александровна Переседова², Иван Сергеевич Гусев³,
Михаил Александрович Шулепов⁴, Александр Геннадьевич Бураченко⁵,
Александр Александрович Крылов⁶, Константин Петрович Артёмов⁷,
Борис Григорьевич Гольденберг⁸, Виктор Генрихович Винс⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*
^{1, 2, 4, 5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
^{3, 8} *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*
⁹ *ООО «ВЕЛМАН», Новосибирск, Россия*
¹ *dsws@vripenko.ru*
⁴ *mixshlp@yandex.ru*

Аннотация. Проведено исследование спектров свечения синтетического алмазного образца при трех различных видах воздействия: электронным пучком, лазерным и рентгеновским излучением. Спектры катодолюминесценции представлены в широком температурном диапазоне – от 80 до 700 К. Катодолюминесценция возбуждалась электронным пучком с энергией до 300 кэВ. Спектры фотолюминесценции были получены при возбуждении кристалла лазерами на длине волны 371, 405, 450 и 520 нм. Рентгенолюминесценция возбуждалась синхротронным пучком с энергией до 6 кэВ. Показана возможность использования подобных кристаллов для создания мониторов-визуализаторов синхротронного пучка.

Ключевые слова: алмаз, катодолюминесценция, рентгенолюминесценция, фотолюминесценция, монитор, NV-центр, синхротронное излучение

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы «Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Рипенко В.С., Переседова Д.А., Гусев И.С., Шулепов М.А., Бураченко А.Г., Крылов А.А., Артёмов К.П., Гольденберг Б.Г., Винс В.Г. Катодо-, фото- и рентгенолюминесценция синтетического алмаза, содержащего NV⁰-центры // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 45–51. doi: 10.17223/29491665/8/6

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/6

Luminescence of synthetic diamonds depending on the method of excitation

Vasily S. Ripenko¹, Darya A. Peresedova², Ivan S. Gusev³, Mikhail A. Shulepov⁴,
Alexander G. Burachenko⁵, Alexander A. Krylov⁶, Konstantin P. Artemov⁷,
Boris G. Goldenberg⁸, Viktor G. Vins⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *Institute of High-current Electronics SB RAS, Russian Federation*
^{1, 2, 4, 5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
^{3, 8} *Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*
⁹ *WELMAN LLC, Novosibirsk, Russian Federation*
¹ *dsws@vripenko.ru*
⁴ *mixshlp@yandex.ru*

Abstract. A synthetic diamond, due to its unique properties, is widely used in various fields of science and technology. In addition, diamond has a large number of color centers, one of the most common of which is the NV⁰ center. To create crystals with such centers, synthetic diamonds grown by the temperature gradient method with a high content of substitutional nitrogen are

usually used. Such crystals are subjected to radiation-heat treatment to create the necessary color centers. Diamonds with a high content of NV⁰ centers are excellent indicators of various kinds of action (electrons, X- and γ -photons, α -particles etc). This article examines the spectra of a synthetic diamond sample under three different types of excitation: electron beams, laser irradiation, and X-ray radiation. The cathodoluminescence (CL) spectra are presented over a wide temperature range from 80 to 700 K. Cathodoluminescence was excited by an electron beam with energies up to 300 keV. Photoluminescence (PL) spectra were obtained by exciting the crystal with lasers at wavelengths of 371, 405, 450, and 520 nm. X-ray luminescence (XL) was excited by a synchrotron beam with energies up to 6 keV. The paper shows the possibility of using such crystals to create synchrotron-beam imaging monitors designed for a high level of X-ray flux.

Keywords: diamond, cathodoluminescence, X-ray luminescence, photoluminescence, monitor, NV center, synchrotron radiation

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Ripenko, V.S., Peresedova, D.A., Gusev, I.S., Shulepov, M.A., Burachenko, A.G., Krylov, A.A., Artemov, K.P., Goldenberg, B.G. & Vins, V.G. (2024) Luminescence of synthetic diamonds depending on the method of excitation. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 45–51. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/6

Введение

Алмаз обладает высокой радиационной стойкостью (энергия образования вакансии составляет от 35 до 80 эВ) по сравнению с другими полупроводниковыми материалами, такими как кремний (7 эВ) или арсенид галлия (~5,0 эВ). Во многом благодаря этому алмаз является отличным кандидатом для работы в условиях длительного радиационного воздействия. Для сравнения: длительность работы алмазных детекторов излучений на порядок больше, чем кремниевых детекторов [1]. Синтетический алмаз уже используют в качестве квантовых сенсоров, детекторов излучения и мониторов положения и интенсивности пучков заряженных частиц (электронных, синхротронных и т.д.), а также в других высокотемпературных приложениях в электронике [2–4].

Технологии синтеза алмазов с использованием методов высокого давления, высокой температуры (НРНТ) и химического осаждения из газовой фазы (CVD) постоянно совершенствуются. Метод НРНТ позволяет получать крупные образцы алмазов размером до 20 × 17 × 11 см [5]. Технология CVD позволяет создавать алмазные пластины диаметром до 120 мм и толщиной до 3 мм [6]. Облучение алмаза пучками электронов с энергией единицы МэВ позволяет производить направленное и контролируемое изменение свойств кристалла, в результате которого создаются точечные радиационные дефекты [7]. Последующий высокотемпературный отжиг приводит к диффузии радиационных дефектов и перестройке примесно-дефектного состава.

В спектрах катодолуминесценции (КЛ), фотолуминесценции (ФЛ) или рентгенолуминесценции (РЛ) примесно-дефектные центры проявляются в виде характеристических максимумов (линий) и их

колебательных систем. К наиболее изученным и технологически простым примесно-дефектным центрам относятся NV-центры в нейтральном NV⁰ с БФЛ на длине волны 575 нм (2,157 эВ) и в отрицательном NV⁻ с БФЛ на длине волны 637 нм (1,947 эВ) зарядовых состояниях. Кроме NV-центров, существуют также и другие центры окраски алмаза, формирующиеся при радиационно-термической обработке.

Цель работы и современное состояние вопроса

В большинстве рассмотренных нами литературных источников исследуются либо природные образцы, либо синтезированные методом газохимического осаждения (ГХО). В данной работе был исследован алмазный образец, полученный методом температурного градиента в условиях высокого давления и высокой температуры (ВДВТ) и подвергнутый радиационно-термической обработке, содержащий NV⁰-центры с концентрацией несколько единиц частиц на миллион (ppm).

Целью данной работы являлось сравнение спектров свечения алмазного образца, полученных различными методами воздействия, и их анализ, а также проверка возможности использования алмазных кристаллов с NV⁰-центрами в качестве мониторов-визуализаторов рентгеновских синхротронных пучков.

Материалы и методы исследований

В данной работе исследованы спектры КЛ, ФЛ и РЛ алмазного ВДВТ образца (С147), предоставленного ООО «ВЕЛМАН», г. Новосибирск. Данный образец был подвергнут радиационно-термической обработке (РТО) для формирования в них NV центров в состоянии нейтрального заряда.

Точная концентрация центров NV⁰ неизвестна, но находится в диапазоне от 1 до 10 ppm.

Вместе с образцом С147 были исследованы спектры РЛ алмазных ВДВТ образцов С144, С145, С146 от того же производителя.

Исследование катодолуминесценции проводилось на экспериментальной установке НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э. В установке использовался импульсный сильнотоочный пучок, имелась возможность охлаждения и нагрева образцов от 90 до 800 К. Однако если специально не указано, то люминесценция измерялась при комнатной температуре.

Более подробно данная установка описана в других наших работах (при охлаждении [8], при нагреве [9]). Энергия электронов в пучке ускорителя достигала 300 кэВ. Источниками возбуждения фотолуминесценции алмазного образца выступали полупроводниковые лазеры на длинах волн 371, 405, 450 и 520 нм. Регистрация спектров производилась при помощи спектрометра Ocean Optics HR2000 со спектральным диапазоном чувствительности от 200 до 1100 нм. Исследование РЛ производилось на экспериментальной станции синхротронного излучения ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

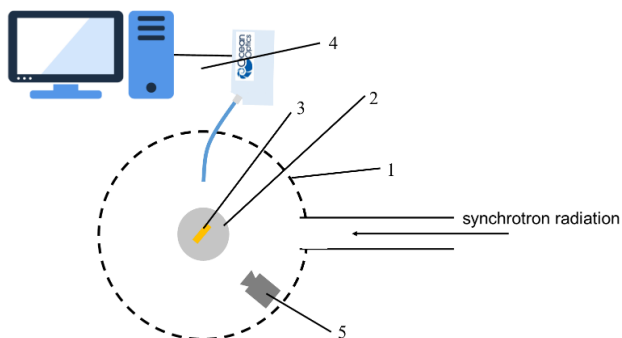


Рис. 1. Схема исследования рентгенолюминесценции алмаза под действием синхротронного излучения: 1 – вакуумная камера; 2 – оптический стол; 3 – образец алмаза; 4 – спектральный комплекс; 5 – видеокамера

Fig. 1. The scheme of investigation of diamond X-ray luminescence under the action of synchrotron radiation: 1 – vacuum chamber; 2 – optical table; 3 – diamond sample; 4 – spectral complex; 5 – video camera

Расчет и моделирование РЛ алмаза под действием синхротронного излучения проводились в программе GEANT4.

Результаты

В ходе экспериментов были получены спектры катодолуминесценции алмазного образца С147 в температурном диапазоне от 90 до 800 К (рис. 2). В спектрах свечения данного образца наблюдались линии и

полосы, обусловленные различными примесно-дефектными центрами. При понижении температуры до 90 К в спектрах КЛ проявлялись бесфононные линии (БФЛ) и их фононные повторения, что позволяло более детально исследовать спектры свечения.

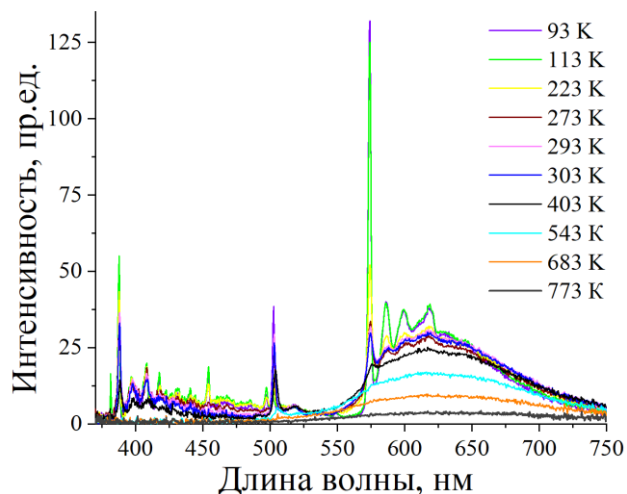


Рис. 2. Спектры катодолуминесценции для синтетического алмазного образца С147 в диапазоне температур 93–773 К

Fig. 2. The cathodoluminescence spectra of synthetic diamond sample C147 in the temperature range 93–773 K

В диапазоне 380–450 нм наблюдалась электронно-колебательная система (ЭКС) с БФЛ на длине волны 389 нм (3,188 эВ), которая соответствует дефекту структуры, в котором атом замещающего азота связан с атомом углерода, находящимся в междоузельном положении. В максимуме полосы 456–471 нм на длине волны 467,8 нм (2,65 эВ) наблюдался дефект TR12.

Полоса с максимумом на 484 нм (2,562 эВ) является ЭКС, которая наблюдается в спектрах катодолуминесценции у образцов, выращенных с использованием катализатора-растворителя, содержащего никель. Модель данного дефекта содержит один атом никеля или замещающий ион Ni_s^- [10]. Линия с максимумом на длине волны 497 нм (2,49 эВ) – это S3 центр, моделью которого является ион Ni в положении дивакансии, с двумя атомами азота в первой координационной сфере N-V-Ni-V-N [11].

БФЛ на длине волны 503 нм обусловлена расщепленным междоузельным центром 3Н (503,4 нм (2,463 эВ)) [12]. В области от 550 до 800 нм наблюдалась ЭКС с БФЛ на длине волны 575 нм, которая обусловлена NV^0 -центром.

Спектры фотолуминесценции алмазного образца С147 представлены на рис. 3.

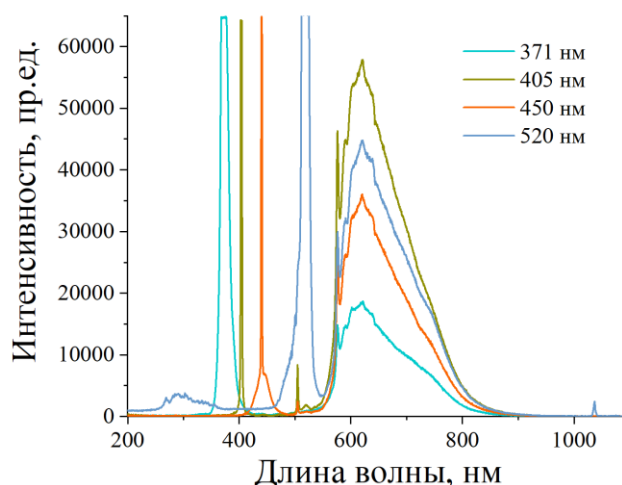


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции синтетического алмазного образца при возбуждении на различных длинах волн

Fig. 3. The photoluminescence spectrum of a synthetic diamond sample under excitation at various wavelengths

Данные спектры оказались менее информативными по сравнению со спектрами КЛ. Так, при облучении образца длиной волны 520 нм возбуждается ЭКС с БФЛ на длине волны 389 нм. При возбуждении образца лазерами 405 и 450 нм возбуждалась БФЛ на длине волны 503 нм центров 3Н. При действии на образец лазерным излучением на всех длинах волн возбуждалась БФЛ на длине волны 575 нм NV⁰-центров.

На рис. 4 приведены фотография свечения алмазного образца C146 под действием рентгеновского синхротронного пучка и спектры синхротронной РЛ алмазных образцов C144, C145, C146 и C147.

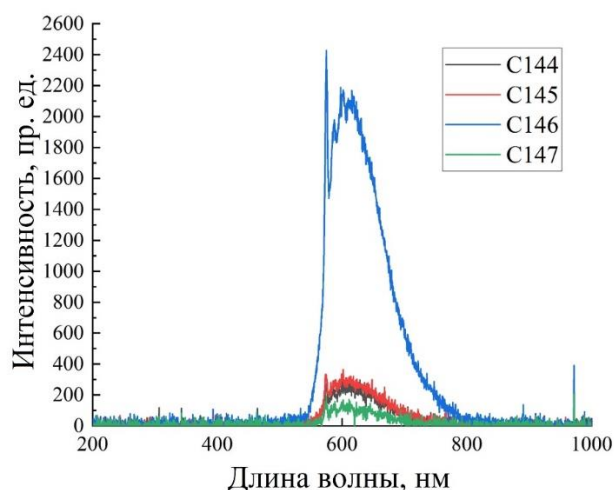


Рис. 4. Спектры рентгенолюминесценции алмазных образцов C144, C145, C146, C147 и фотография свечения образца C146

Fig. 4. X-ray luminescence spectra of diamond samples C144, C145, C146, C147 and a photo of the luminescence of the sample C146

Из рисунка видно, что в спектрах излучения алмазных образцов преобладает свечение NV⁰-центра с БФЛ на длине волны 575 нм. По фотографии свечения можно судить о достаточной четкости получаемого изображения синхротронного пучка.

В случае использования таких образцов в качестве мониторов пучков следует располагать их таким образом, чтобы рентгеновское излучение не попадало напрямую в детектирующее устройство. Было предложено расположить кристалл под углом 45° к траектории пучка.

Авторы провели расчеты площади рентгеновского свечения синхротронного пучка на поверхности образца алмаза с NV⁰-центрами. На рис. 5 приведен результат моделирования генерации фотонов видимого спектра при прохождении через кристалл алмаза рентгеновского излучения. Кристалл располагался под углом 45° к траектории пучка. Величина световых выходов принималась как 1100 квантов/МэВ, толщина кристалла – 250 мкм. Поперечные размеры пучка составляли 2 × 2 мм. Моделирование проводилось для пучка рентгеновских фотонов 10,305 кэВ (ось X – горизонтальная, ось Y – вертикальная; кристалл развернут на 45° вокруг оси X). Кроме того, был проведен расчет зависимости интенсивности РЛ от угла поворота кристалла алмаза (рис. 6).

Параметры кристалла и рентгеновского пучка в данном случае были такими же, как при моделировании «отпечатка» пучка (см. рис. 5). При этом кристалл вращался с шагом 5 градусов от полностью поперечного расположения к траектории пучка до полностью продольного.

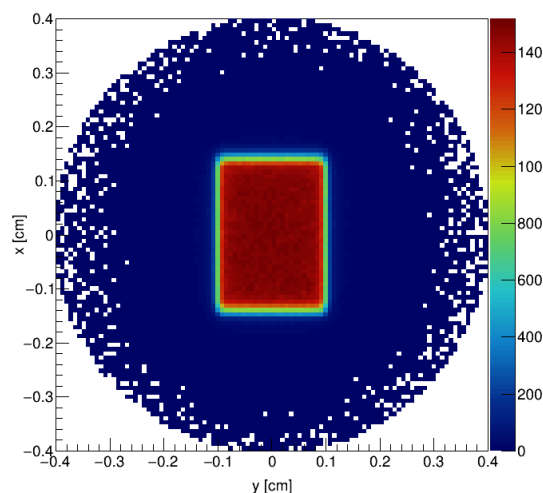


Рис. 5. Моделирование генерации фотонов видимого спектра при прохождении рентгеновского излучения через алмазный кристалл

Fig. 5. The simulation of the generation of photons of the visible spectrum during the passage of X-ray radiation through a diamond crystal

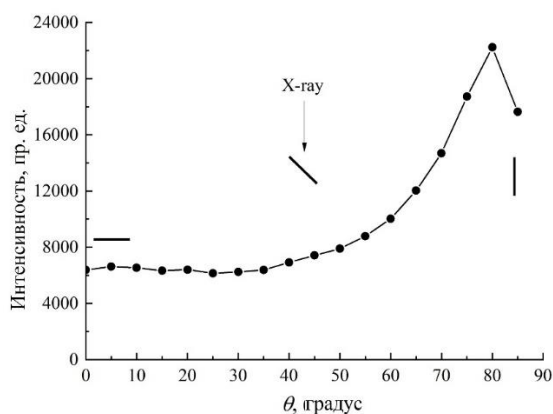


Рис. 6. Моделирование зависимости интенсивности РЛ от угла поворота алмазного кристалла

Fig. 6. The modeling the dependence of the X-ray luminescence intensity on the angle of rotation of a diamond crystal

Регистрация светового излучения осуществлялась под углом 45° к траектории пучка на расстоянии 15 мм от геометрического центра (точки вращения) кристалла алмаза с помощью детектирующей области в виде круга с телесным углом $0,536$ ср.

Для вычисления каждой точки на графике проводилось моделирование для 10^7 рентгеновских квантов/с.

Заключение

В данной работе было представлено сравнение спектров КЛ, ФЛ и РЛ алмазного образца С147, синтезированного методом ВДВТ. При возбуждении интенсивным электронным пучком в спектрах КЛ наблюдаются линии и полосы практически всех центров окраски, присутствующих в алмазном образце.

При всех видах воздействия в спектрах люминесценции наблюдались БФЛ в спектрах всех образцов NV^0 -центра на длине волны 575 нм и её фононные повторения. Таким образом, монокристаллические алмазы, содержащие NV^0 -центры, являются отличным визуализатором оптических, рентгеновских и катодных излучений, включая синхротронные пучки.

Несмотря на низкий световыход, полученный в результате моделирования, в условиях, когда фотонный поток будет в интервале 10^{12} – 10^{13} фотонов/с (например, ускорителя СКИФ), яркости свечения будет достаточно для задач визуализации положения и измерения интенсивности синхротронного излучения, что подтверждается экспериментальными данными, полученными на установке ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск).

Список источников

1. Meier D., Adam W., Bauer C., Berdermann E., Bergonzo P., Bogani F., Borch E., Bruzzi M. et al. Proton irradiation of CVD diamond detectors for high-luminosity experiments at the LHC // *Nuclear instruments and methods in physics research A*. 1999. Vol. 426. P. 173–180. doi: 10.1016/S0168-9002(98)01488-0
2. Umezawa H. Recent advances in diamond power semiconductor devices // *Materials science in semiconductor processing*. 2018. Vol. 78. P. 147–156. doi: 10.1016/j.mssp.2018.01.007
3. Rouvalis E., Baynes F.N., Xie X., Li K., Zhou Q., Quinlan F., Fortier T.M., Diddams S.A., Steffan A.G. et al. High-power and high-linearity photodetector modules for microwave photonic applications // *Journal of lightwave technology*. 2014. Vol. 32 (20). P. 3810–3816. doi: 10.1109/JLT.2014.2310252
4. Lobaev M.A., Radishev D.B., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Isaev V.A., Kraev S.A., Okhapkin A.I., Arhipova E.A., Drozdov M.N., Shashkin V.I. Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence // *Physica Status Solidi*. 2020. Vol. 14, № 11. P. 2000347.
5. Deljanin B., Alessandri M., Peretti A., Astrom M. NDT breaking the 10 carat barrier: World record faceted and gem-quality synthetic diamonds investigated // *Contributions to Gemology*. 2015. Vol. 15 (1). P. 1–7.
6. Anokin E., Muhr A., Bennett A., Twitchen D. J., de Wit H. Diamond optical components for high-power and high-energy laser applications // *Components and Packaging for Laser Systems*. 2015. Vol. 9346. Art. no. 93460T-1. P. 172–180. doi: 10.1117/12.2079714
7. Винс В.Г., Елисеев А.П., Старостенков М.Д. Генерация и отжиг радиационных дефектов в алмазах, облученных электронами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2011. № 8. С. 66–79.
8. Переседова Д.А., Рипенко В.С. Спектральные и температурные зависимости импульсной катодолюминесценции азотно-вакансионных центров в алмазе при температурах от 80 до 300 К. Томск : СКТ, 2023. С. 72–75.
9. Ripenko V.S., Burachenko A.G., Peresedova D.A., Lipatov E.I. Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K // *Russian Physics J*. 2023. Vol. 65. P. 1934–1939. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
10. Pereira E., Pereira L., Hofmann D.M., Stadler W., Meyer B.K. Excited levels of the 2.56 eV emission in synthetic diamond // *Radiation Effects and Defects in Solids*. 1995. № 68. P. 72–79. doi: 10.17223/19988621/68/7
11. Nadolinny V.A., Yelisseyev A.P. New paramagnetic centres containing nickel ions in diamond // *Diamond and Related Materials*. 1993. Vol. 3. P. 17–21. doi: 10.1016/0925-9635(94)90024-8
12. Steeds J.W., Charles S., Davis T.J., Gilmore A., Hayes J., Pickard D., Butler J.E. Creation and mobility of self-interstitials in diamond by use of a transmission electron microscope and their subsequent study by photoluminescence microscopy // *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. P. 94–100. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00443-9

References

1. Meier, D., Adam, W., Bauer, C., Berdermann, E., Bergonzo, P., Bogani, F., Borch, E. & Bruzzi, M. (1999) Proton irradiation of CVD diamond detectors for high-luminosity experiments at the LHC. *Nuclear instruments and methods in physics research A*. 426. pp. 173–180. doi: 10.1016/S0168-9002(98)01488-0

2. Umezawa, H. (2018) Recent advances in diamond power semiconductor devices. *Materials science in semiconductor processing*. 78. pp. 147–156. doi: 10.1016/j.mssp.2018.01.007
3. Rouvalis, E., Baynes, F.N., Xie, X., Li, K., Zhou, Q., Quinlan, F., Fortier, T.M., Diddams, S.A. & Steffan, A.G. et al. (2014) High-power and high-linearity photodetector modules for microwave photonic applications. *Journal of lightwave technology*. 32 (20). pp. 3810–3816. doi: 10.1109/JLT.2014.2310252
4. Lobaev, M.A., Radishev, D.B., Bogdanov, S.A., Vikharev, A.L., Gorbachev, A.M., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I., Arhipova, E.A., Drozdov, M.N. & Shashkin, V.I. (2020) Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence. *Physica Status Solidi*. 14 (11). pp. 2000347.
5. Deljanin, B., Alessandri, M., Peretti, A. & Astrom, M. (2015) NDT breaking the 10 carat barrier: World record faceted and gem-quality synthetic diamonds investigated. *Contributions to Gemology*. 15 (1). pp. 1–7.
6. Anokin, E., Muhr, A., Bennett, A., Twitchen, D. J. & de Wit, H. (2015) Diamond optical components for high-power and high-energy laser applications. *Components and Packaging for Laser Systems*. 9346. Art. no. 93460T-1. pp. 172–180. doi: 10.1117/12.2079714
7. Vince, V.G., Eliseev, A.P. (2011) Generaciya i otzhig radiacionnyh defektov v almazah, obluchennyh elektronami [Generation and annealing of radiation defects in diamonds irradiated with electrons]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 8. pp. 66–79.
8. Peresedova, D.A., Ripenko, V.S. (2023) *Spektral'nye i temperaturnye zavisimosti impul'snoj katodoluminescencii azotno-vakansionnyh centrov v almaze pri temperaturah ot 80 do 300 K* [Spectral and temperature dependences of pulsed cathodoluminescence of nitrogen vacancy centers in diamond at temperatures from 80 to 300 K]. Tomsk: STT. pp. 72–75.
9. Ripenko, V.S., Burachenko, A.G., Peresedova, D.A. & Lipatov, E. I. (2023) Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K. *Russian Physics J*. 65. pp. 1934–1939. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
10. Pereira, E., Pereira, L., Hofmann, D.M., Stadler, W. & Meyer, B.K. (1995) Excited levels of the 2.56 eV emission in synthetic diamond. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 135. pp. 143–148. doi: 10.1080/10420159508229824
11. Nadolinny, V.A. & Yelissev, A.P. (1993) New paramagnetic centres containing nickel ions in diamond. *Diamond and Related Materials*. 3. pp. 17–21. doi: 10.1016/0925-9635(94)90024-8
12. Steeds, J.W., Charles, S., Davis, T.J., Gilmore, A., Hayes, J., Pickard, D. & Butler, J.E. (1999) Creation and mobility of self-interstitials in diamond by use of a transmission electron microscope and their subsequent study by photoluminescence microscopy. *Diamond and Related Materials*. 8. pp. 94–100. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00443-9

Информация об авторах:

Рипенко Василий Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dsws@vrpenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Переседова Дарья Александровна – инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Гусев Иван Сергеевич – аспирант Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия). SPIN-код: 8290-8593

Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mixshlp@yandex.ru. SPIN-код: 4917-2804

Бураченко Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Крылов Александр Александрович – инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Артёмов Константин Петрович – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-2948-3195

Гольденберг Борис Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия). SPIN-код: 2622-2363.

Винс Виктор Генрихович – доктор физико-математических наук, директор ООО «ВЕЛМАН» (Новосибирск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-0773-0810

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ripenko Vasily S., Junior researcher, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dsws@vrpenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Peresedova Daria A., Engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Gusev Ivan S., Postgraduate student, Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). SPIN-code: 8290-8593

Shulepov Mikhail A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mixshlp@yandex.ru. SPIN-code: 4917-2804

Burachenko Alexander G., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Krylov Alexander A., Engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation); student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Artemov Konstantin P., Junior researcher, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-2948-3195

Goldenberg Boris G., Cand. Sc. (Technics), senior researcher, Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). SPIN-code: 2622-2363

Vince Victor G., Doct. Sc. (Physics and Mathematics), director, VELMAN LLC (Novosibirsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-0773-0810

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья
УДК 535.37, 535.373.2, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/7

Электролюминесценция азот-вакансионных и никелевых центров окраски алмаза

Захар Игоревич Бородулин¹, Людмила Александровна Васильева²,
Константин Игоревич Смородин³, Михаил Александрович Шулепов⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

^{1, 4} Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

¹ zahar.borodulin12@gmail.com

Аннотация. Исследованы электролюминесценции центров окраски четырех синтетических алмазных образцов, выращенных методом температурного градиента. Зарегистрированы спектры электролюминесценции азот-вакансионных и никелевых центров окраски: NV, N₂V, NE2. Измерены зависимости интенсивности свечения центров окраски от протекающего тока в объеме образца. Определено влияние зоны роста на электролюминесценцию в алмазе. Области внутренних напряжений алмазных образцов являлись источниками яркой электролюминесценции.

Ключевые слова: алмаз, лазер, квантовый сенсор, алмазный светодиод, электролюминесценция алмаза

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития учебного дизайн-центра «Микроэлектроника квантовой радиографии» (соглашения от 29.02.2024 г. № 075-02-2024-1500 и № 075-02-2024-1504) в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Для цитирования: Бородулин З.И., Васильева Л.А., Смородин К.И., Шулепов М.А. Электролюминесценция азот-вакансионных и никелевых центров окраски алмаза // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 52–58. doi: 10.17223/29491665/8/7

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/7

Electroluminescence of nitrogen-vacancy and nickel color centers in a diamond

Zakhar I. Borodulin¹, Lyudmila A. Vasilyeva², Konstantin I. Smorodin³, Mikhail A. Shulepov⁴

^{1, 2, 3, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 4} Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

¹ zahar.borodulin12@gmail.com

Abstract. A diamond is necessary for quantum technologies due to its unique properties and a variety of color centers. A diamond is a radiation-resistant chemically inert wideband semiconductor with the highest thermal conductivity. A diamond's color centers can be active centers of lasers, quantum sensors, single photon emitters and qubits. In 2020, an optically pumped NV⁻ diamond laser was shown for the first time. In 2022, a quantum diamond magnetometer was demonstrated for the first time at N₂V^o color centers. To improve these devices, it is necessary to use electrical excitation. Electrical excitation will increase the efficiency of the diamond laser and quantum magnetometer, as well as make these devices compact and easy to produce. At the moment, there are prototypes of diamond LEDs. Due to the difficulty of introducing impurities to create an n-layer and unstable electroluminescence, diamond LEDs are not produced industrially. The main way to create diamond LEDs is the chemical vapor deposition (CVD) method, which forms layers doped with boron, nitrogen/silicon/germanium and phosphorus. Diamond samples obtained by the temperature gradient (HTHP) method are used as substrates for diamond LEDs. The HPHT method is several times cheaper than the CVD method, so it is of interest for the industrial production of diamond optoelectronic devices. It is necessary to develop a methodology for creating diamond LEDs based on HTHP diamonds. The purpose of this study is to determine the properties of HTHP diamonds, which will help in the development of this method. The sectoriality of HTHP diamonds affects the electrical conductivity due to the amount of impurities. In this paper, the electroluminescence of the color centers of four synthetic diamond samples grown by the HPHT method is studied. Electroluminescence spectra of the nitrogen-vacancy and nickel color centers – NV, N₂V, NE2 – were recorded. The dependences of the luminescence intensity of the color centers on the current in the

sample volume were measured when scanning the sample with an electric probe. The effect of the sectoriality on electroluminescence in diamond was determined. The internal stress regions in the diamond samples were sources of bright electroluminescence. This data will be used in the future to develop the HTHP diamond LED technology.

Keywords: diamond, laser, quantum sensor, diamond LED, electroluminescence of diamond

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel training and scientific foundation for the electronic industry» of the State program of the Russian Federation «Scientific and technological development of the Russian Federation» during the implementation of the Program for the development of the educational design center «Microelectronics of Quantum Radiography» (agreements dated 29.02.2024 № 075-02-2024-1500 and № 075-02-2024-1504) at the Institute of High-current Electronics SB RAS.

For citation: Borodulin, Z.I., Vasilyeva, L.A., Smorodin, K.I. & Shulepov, M.A. (2024) Electroluminescence of nitrogen-vacancy and nickel color centers in diamond. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 52–58. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/7

Введение

Синтезированный алмаз является перспективным материалом для создания светоизлучающих приборов для квантовых устройств ввиду наличия центров окраски с высоким выходом люминесценции. Светоизлучающие приборы на базе алмаза имеют широкий спектр применения, включая алмазные лазеры, однофотонные источники, квантовые сенсоры и компьютеры [1–3]. Первые исследования электролюминесценции в алмазе датированы 1957 г. [4]. Исследования производились на природных алмазах и синтетических образцах с большим количеством неизвестных тогда дефектов структуры при приложенных напряжениях от 500 В. Развитие методов синтеза алмаза привело к снижению количества дефектов структуры в выращиваемых образцах [1]. На данный момент созданы прототипы алмазных PIN-структур [5].

В 2020 г. был впервые продемонстрирован алмазный лазер на центрах NV^- с оптической накачкой на основе алмазного образца, выращенного методом температурного градиента в условиях высоких давлений и температур (ВДВТ) [6]. Для повышения эффективности и придания компактности квантовому устройству на основе алмаза необходим алмазный лазер с электрической накачкой. Образцы, выращенные в условиях ВДВТ, обладают выраженной секторальностью, обусловленной зонами роста, в которые в процессе синтеза встраиваются примеси с разной концентрацией [7]. При исследовании эффекта электролюминесценции центров окраски алмаза было обнаружено, что в ВДВТ-образцах секторальность напрямую влияет на суммарное излучение. Ввиду неоднородного распределения примесей ток в образцах течет, не воздействуя на определенную часть объема образца, что влияет на суммарное излучение. Различные центры окраски изменяют характер своего излучения в зависимости от тока [8–10].

На данный момент существуют прототипы алмазных светодиодов, в основе которых – p-i-n и p-n структуры [5]. Известные центры окраски, на которых была получена электролюминесценция – SiV,

NV, N_2V , NE1, NE2 [8]. В данной работе представлено исследование зависимостей интенсивности электролюминесценции центров $NE2$, NV^- , N_2V^0 от приложенного напряжения в образцах C13, C122, C161, CGB2 (условные обозначения).

В ходе работы были исследованы четыре алмазных кристалла, в которых наблюдалась электролюминесценция. Все четыре образца являются монокристаллами и были синтезированы методом температурного градиента.

Материалы и методы исследований

В образцах присутствуют множественные механические повреждения, и концентрация примесей в них распределена неравномерно, что связано с секторальностью образцов. В областях, расположенных ближе к ребрам и сколам, концентрация дефектов и примесей повышается, на что указывает наличие внутренних напряжений. При воздействии электрическим полем на отдаленные от ребер области образца интенсивность электролюминесценции значительно уменьшалась. На рис. 1 приведены схема экспериментальной установки для исследования электролюминесценции алмазных образцов и фотография электролюминесцирующего алмазного образца C13.

Образец алмаза 1 закрепляли на медной пластине 2, которую помещали на координатный столик микроскопа Micromed P1-(LED) 3. Для наблюдения электролюминесценции была собрана электрическая схема из источника постоянного тока Rigol DP832 4, сканирующей иглы 5, подключенной к отрицательному полюсу источника питания, образца 1, медной пластины 2, подключенной к положительному полюсу источника. Свечение электролюминесценции регистрировалось с помощью видеокамеры, установленной на микроскоп 6. Спектры электролюминесценции регистрировались с помощью спектрометра Ocean Optics HR 2000 7 со спектральным диапазоном чувствительности 190–1100 нм. Полученные спектры и фотографии обрабатывались на персональном

компьютере 8, с учётом спектральной чувствительности прибора и пропускания оптического тракта посредством аналитического программного пакета OriginPro.

Измерение спектров электролюминесценции производилось при выключенном освещении и температуре ~ 300 К. Микроскоп был снабжен скрещенными поляризационными фильтрами, что позволило определить области внутреннего напряжения.

Результаты

При сканировании образца C161 электрическим зондом интенсивность электролюминесценции не изменялась от области воздействия. Плоскость, на которую воздействует электрический зонд, по информации производителя относится к зоне роста $\{111\}$. На рис. 2 приведены фотография свечения образца C161 и спектр свечения в данной области.

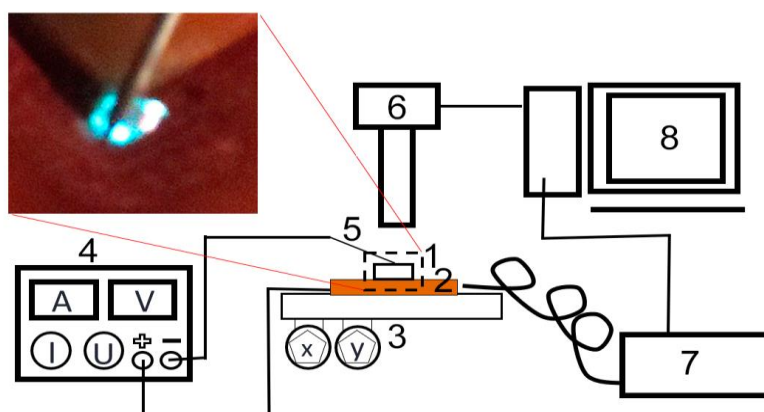
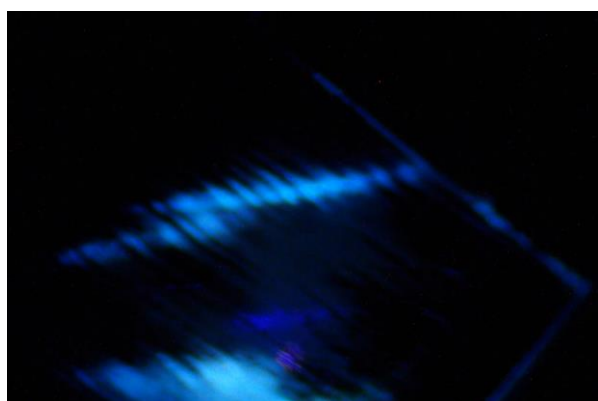
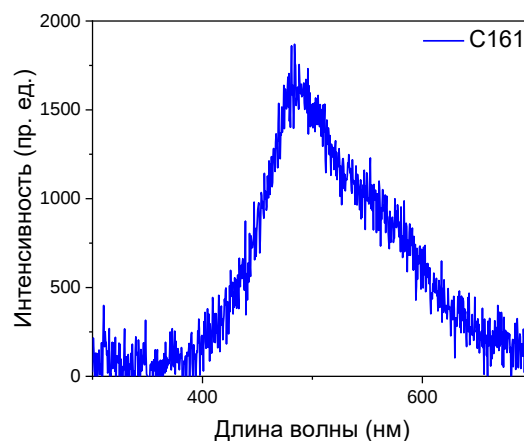


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и фотография люминесцирующего образца C13: 1 – алмазный образец; 2 – медная пластина; 3 – координатный столик микроскопа; 4 – источник питания; 5 – сканирующая игла; 6 – видеокамера; 7 – спектрометр; 8 – компьютер

Fig. 1. The experimental setup and the picture of the luminescent sample C13: 1 – diamond sample; 2 – copper plate; 3 – microscope coordinate table; 4 – power supply; 5 – scanning needle; 6 – video camera; 7 – spectrometer; 8 – computer



a



b

Рис. 2. Фотография электролюминесценции образца C161 образца в увеличении микроскопа (*a*). Спектры электролюминесценции образца C161 (*b*)

Fig. 2. The picture of electroluminescence of the sample C161 under microscope magnification (*a*). Electroluminescence spectra of the sample C161 (*b*)

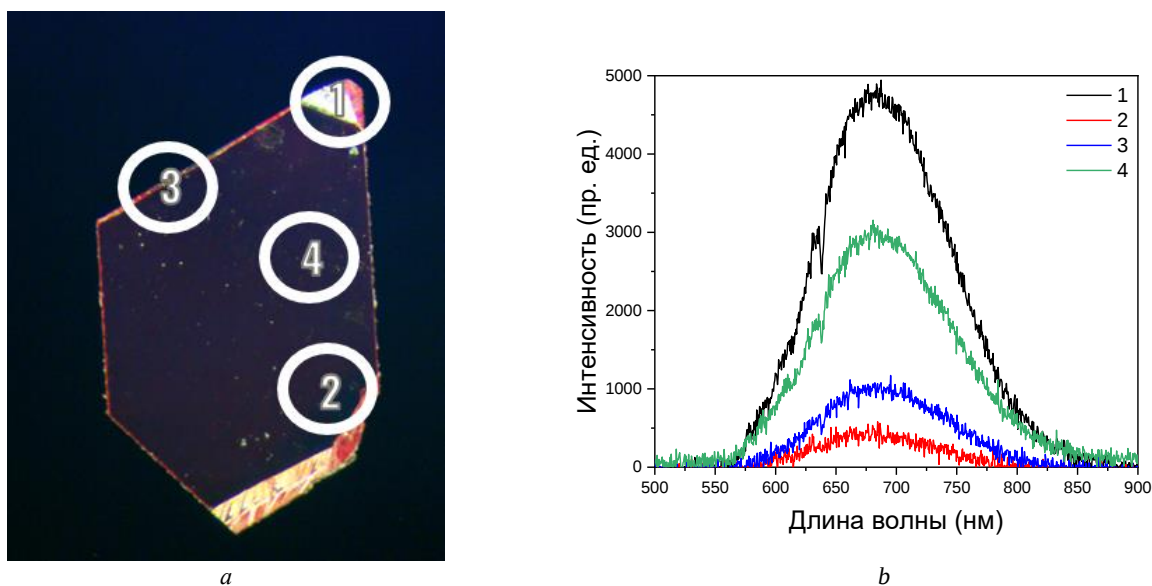


Рис. 3. Фотография образца C122 с указанием четырех областей воздействия и спектров электролюминесценции в указанных областях

Fig. 3. The picture of the sample C122 with points of action and electroluminescence spectra in these points

В образце C161 при протекании электрического тока наблюдается спектральная полоса центра окраски NE2 с бесфоновой линией (БФЛ) на длине волны 484 нм [8]. Пороговое напряжение для наблюдения электролюминесценции составляло 78 В.

В процессе сканирования образца C122 при воздействии на него зонда в разных областях интенсивность электролюминесценции отличалась на порядок величины. На рис. 3 представлен образец C122 с указанием областей воздействия и их спектров электролюминесценции.

Области 1 и 2 располагаются в дефектных областях

образца. Область 4, по данным производителя образца, расположена на плоскости $\{100\}$. Область 3 является границей зоны роста $\{111\}$. БФЛ в самопоглощении на 637 нм указывает на наличие в образце центров NV^- . Центр NV^- является электрически неактивным. В данном образце происходит возбуждение фотолюминесценции центров NV^- излучением электролюминесценции NV^0 -центров. Пороговое напряжение появления свечения образца составляло 196 В.

При сканировании образца CGB2 в трех разных зонах спектры электролюминесценции отличались качественно (рис. 4).

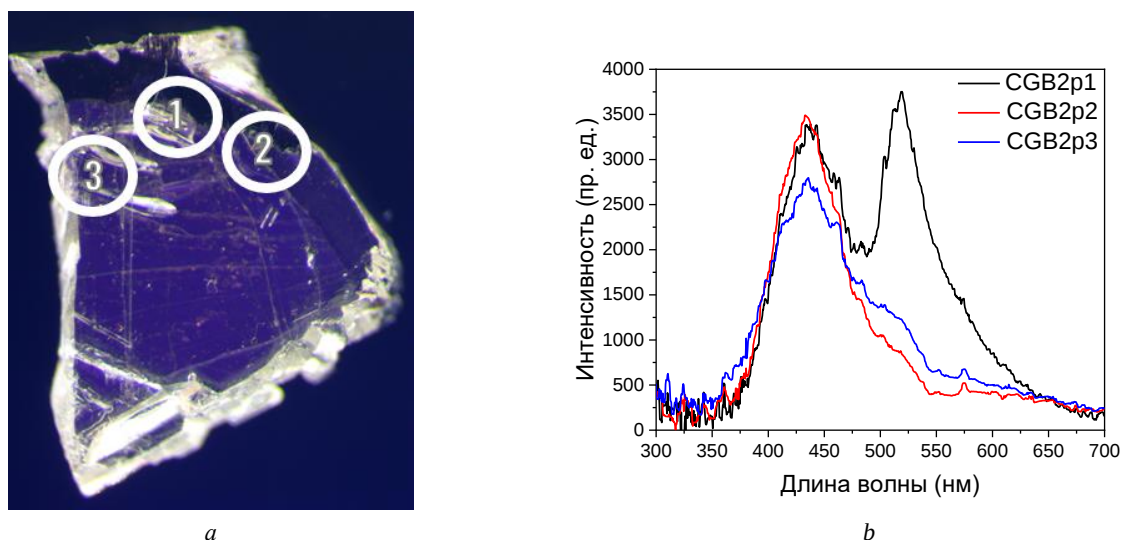


Рис. 4. Фотография образца CGB2 с тремя областями воздействия и спектров электролюминесценции в указанных областях

Fig. 4. The picture of the sample CGB2 with points of action and electroluminescence spectra in these points

В области 1 излучали предположительно NE1 (максимум на 445 нм) и NE4 (БФЛ 535 нм) центры окраски. В областях 2 и 3 основной полосой излучения электролюминесценции являлась система NE1. Пороговое напряжение составляло 230 В. Образец C13 характеризуется низким пороговым напряжением электролюминесценции – 13 В.

Области электролюминесценции в данном образце располагались в плоскостях зон роста {111}. Спектры

электролюминесценции отличались исключительно интенсивностью излучения (рис. 5). Спектр C13 образца показывает наличие излучения центров окраски NE2 (БФЛ 484 нм) и N_2V° (фононное крыло с максимумом вблизи 562 нм). Ввиду низкого порогового напряжения возникновения электролюминесценции данного образца была возможность исследовать зависимости интенсивности электролюминесценции некоторых центров окраски от приложенного напряжения (рис. 6).

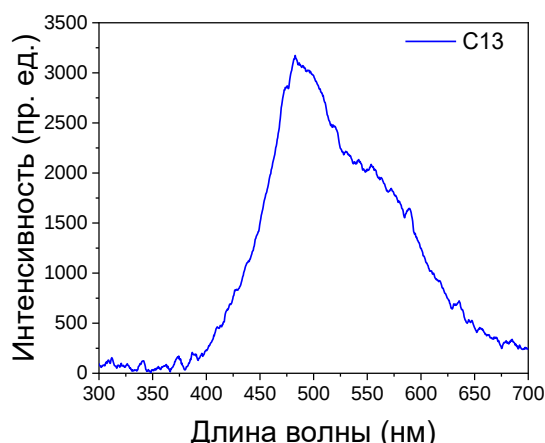


Рис. 5. Спектр электролюминесценции образца C13 при напряжении 300В

Fig. 5. The electroluminescence spectrum of the sample C13 at the applied voltage of 300 V

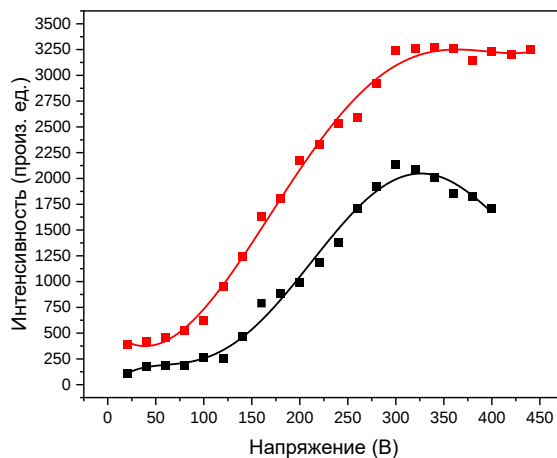


Рис. 6. Зависимости интенсивности электролюминесценции N_2V° (черные квадраты) и NE2 (красные квадраты) центров окраски от приложенного напряжения к алмазному образцу C13

Fig. 6. Dependences of the electroluminescence intensity of N_2V° (black squares) and N2 (red squares) color centers on the applied voltage to the diamond sample C13

Насыщение интенсивности электролюминесценции происходило при напряжении около 300 В.

Для N_2V° -центра при напряжениях выше 300 В интенсивность электролюминесценции продемонстрировала тенденцию к снижению.

Закключение

В исследованных алмазных образцах области электролюминесценции коррелируют с областями внутренних напряжений. Большинство областей электролюминесценции располагаются в зоне роста {111}.

По нашей гипотезе это связано с тем, что на поверхность данной зоны роста могут выходить дефекты типа винтовой дислокации, которые способны служить токовыми каналами, декорированными центрами излучательной рекомбинации носителей заряда. Помимо этого, на структурных неоднородностях поверхности может происходить усиление электрического поля. Ввиду секторальной структуры ВДВТ-алмазов в объеме образца концентрация и структура дефектов значительно варьируются.

Исследованные ВДВТ-алмазы сильно неоднородны, поэтому в разных областях кристаллов

наблюдается свечение электролюминесценции и фотолюминесценции (возбужденной электролюминесценцией) различных центров окраски. При достижении определенного значения приложенного напряжения интенсивность электролюминесценции выходит на насыщение.

Можно предположить, что при увеличении напряжения, концентрация возбужденных центров окраски в алмазе выходит на насыщение. При дальнейшем увеличении напряжения центры окраски могут менять зарядовое состояние, поэтому эмиссия света демонстрирует тренд к снижению.

Список источников

1. Хмельницкий П.А., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: ИКАР, 2017.
2. Khramtsov I. A., Fedyanin D. Superinjection in diamond homojunction P-I-N diodes // *Semiconductor Science and Technology*. 2019. Vol. 34, № 3. P. 03LT03. doi: 10.1088/1361-6641/ab0569
3. Pezzagna S., Meijer J. Quantum computer based on color centers in diamond // *Applied physics review*. 2021. Vol. 8, № 1. P. 011308. doi: 10.1063/5.0007444
4. Wolfe R., Woods J. Electroluminescence of Semiconducting Diamonds // *Physical review*. 1957. Vol. 2. P. 921–923.
5. Lobaev M.A., Radishev D., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Bogdanov S.A., Isaev V.A., Kraev S.A., Okhapkin A.I., Arhipova E.A., Demidov E.V., Drozdov M.N. SiV center electroluminescence in high current density diamond p-i-n diode // *Applied Physics Letters*. 2023. Vol. 123, P. 251116. doi: 10.1063/5.0178908
6. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yelissev A., Vins V. NV⁻ diamond laser // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12, № 7118. P. 21. doi:10.1038/s41467-021-27470-7
7. Li M., Yin L., Cui J., Song Y., Li F., Hao Z. Atom force microscopy study on HTHP as-grown diamond single crystals // *Journal of Material Science and Technology*. 2001. Vol. 19, № 2. P. 113–116. doi: 10.1007/s003390101007
8. Zaitsev A.M., Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z.
9. Zhang B., Shen S., Wang J., He J., Shanks H.R., Leksono M.W., Girvan R. Blue-green electroluminescence of free-standing diamond thin films // *Chinese Physics Letters*. 2009. Vol. 11, № 4. P. 235. doi: 10.1088/0256-307X/11/4/012
10. Haruyama M., Kato H., Ogura M., Kato Y., Takeuchi D., Yamasaki S., Iwasaki T., Morishita H., Fujiwara M., Mizuochi N., Makino T. Electroluminescence of negatively charged single NV centers in diamond // *Applied Physics Letters*. 2023. Vol. 122. P. 072101. doi: 10.1063/5.0138050I

References

1. Khmel'nitskiy, R.A., Talipov, N.H., & Chucheva, G.V. (2017) *Sinteticheskiyalmaz dlya elektroniki i optiki* [Synthetic diamond for electronics and optics] M: IKAR (in Russian)
2. Khramtsov, I.A. & Fedyanin, D. (2019) Superinjection in diamond homojunction P-I-N diodes. *Semiconductor Science and Technology*. 34 (3). p. 03LT03. doi: 10.1088/1361-6641/ab0569
3. Pezzagna, S. & Meijer, J. (2021) Quantum computer based on color centers in diamond. *Applied physics review*. 8 (1). p. 011308. doi: 10.1063/5.0007444
4. Wolfe, R. & Woods, J. (1957) Electroluminescence of Semiconducting Diamonds. *Physical review*. 2. pp. 921–923.
5. Lobaev, M.A., Radishev, D., Vikharev, A.L., Gorbachev, A.M., Bogdanov, S.A., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I., Arhipova, E.A., Demidov, E.V. & Drozdov, M.N. (2023) SiV center electroluminescence in high current density diamond p-i-n diode. *Applied Physics Letters*. 123. p. 251116. doi: 10.1063/5.0178908
6. Savvin, A., Dormidonov, A., Smetanina, E., Mitrokhin, V., Lipatov, E., Genin, D., Potanin, S., Yelissev, A. & Vins, V. (2021) NV⁻ diamond laser. *Nature Communications*. 12 (7118). p. 21. doi:10.1038/s41467-021-27470-7
7. Li M., Yin L., Cui J., Song Y., Li F. & Hao Z. (2001) Atom force microscopy study on HTHP as-grown diamond single crystals. *Journal of Material Science and Technology*. 19 (2). pp. 113–116. doi: 10.1007/s003390101007
8. Zaitsev, A.M. (2001) Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z.
9. Zhang, B., Shen, S., Wang, J., He, J., Shanks, H.R., Leksono, M.W. & Girvan, R. (2009) Blue-green electroluminescence of free-standing diamond thin films. *Chinese Physics Letters*. 11 (4). p. 235. doi: 10.1088/0256-307X/11/4/012
10. Haruyama, M., Kato, H., Ogura, M., Kato, Y., Takeuchi, D., Yamasaki, S., Iwasaki, T., Morishita, H., Fujiwara, M., Mizuochi, N. & Makino, T. (2023) Electroluminescence of negatively charged single NV centers in diamond. *Applied Physics Letters*. 122. pp. 072101. doi: 10.1063/5.0138050I

Информация об авторах:

Бородулин Захар Игоревич – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Васильева Людмила Александровна – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий, аспирант радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Сморodin Константин Игоревич, студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). SPIN-код: 4917-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Borodulin Zakhar I., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer of the laboratory of optical radiation, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Vasilyeva Lyudmila A., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Smorodin Konstantin I., Student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Shulepov Mikhail A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4917-2804

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья

УДК 535-92, 535-94, 514.88, 519.673

doi: 10.17223/29491665/8/8

Модель метода неразрушающего контроля керамического материала на основе гидроксиапатита с добавками углеродных нанотрубок

Анастасия Евгеньевна Резванова¹, Борис Сергеевич Кудряшов²,
Александр Николаевич Пономарёв³

^{1,2,3} *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

³ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

¹ *ranast@ispms.ru*

Аннотация. Керамические композиты, способные эффективно функционировать в условиях экстремальных нагрузок, должны обеспечивать их безопасную эксплуатацию. Определение оптических характеристик материалов методом неразрушающего контроля позволяет оценить их пористую структуру без механического разрушения. Построены структурные модели для представительного объема пористого керамического материала на основе гидроксиапатита с добавками 0,1 и 0,5 мас.% углеродных нанотрубок. С помощью метода конечных элементов смоделировано прохождение терагерцового излучения в частотном диапазоне от 0,2 до 1,1 ТГц, и проведена оценка влияния нанотрубок на структуру и оптические свойства модельных образцов.

Ключевые слова: гидроксиапатит, углеродные нанотрубки, метод конечных элементов, пористость, показатель преломления, коэффициент поглощения, терагерцовая спектроскопия

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2022-0002.

Для цитирования: Резванова А.Е., Кудряшов Б.С., Пономарёв А.Н. Модель метода неразрушающего контроля керамического материала на основе гидроксиапатита с добавками углеродных нанотрубок // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 59–66. doi: 10.17223/29491665/8/8

Original article

doi: 10.17223/29491665/8/8

Model of a non-destructive testing method for ceramic material based on hydroxyapatite with carbon nanotube additives

Anastasia E. Rezvanova¹, Boris S. Kudryashov², Alexander N. Ponomarev³

^{1,2,3} *Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

³ *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation*

¹ *ranast@ispms.ru*

Abstract. The use of materials with improved physical and mechanical properties for biomedical applications that can function effectively under extreme loads, such as radiation and chemical exposure, will significantly reduce injuries and prolong the quality of life of employees. At the same time, the development of such materials is labor-intensive and requires a large amount of fundamental research, long-term acquisition and processing of large amounts of experimental data. The solution to this problem may be to conduct a computer experiment using the finite element method to simulate the structure of materials and solve physics problems. In this paper, structural models were constructed for representative volumes of porous ceramic material based on hydroxyapatite with 0.1 and 0.5 wt. % carbon nanotubes additives. The effect of carbon nanotubes on the structure and optical properties of model samples was estimated by finite element simulations of terahertz radiation transmission in the frequency range from 0.2 to 1.1 THz. The optical properties such as the refractive index and absorption coefficient were calculated for the resulting models using the obtained data on the intensity, transmission speed and time delay of the THz pulse. The addition of nanotubes to the hydroxyapatite ceramic matrix leads to a decrease in the pore space in the samples, due to which the time delay of the THz pulse transmission through the models and the refractive index increase, while the absorption coefficient decreases. The simulation results showed quantitative similarity with the literature data on the refractive index and absorption coefficient of dental enamel and human cortical bone, and qualitative agreement with the experimental data on hydroxyapatite-carbon nanotubes ceramic composite.

Keywords: hydroxyapatite, carbon nanotubes, finite element method, porosity, refractive index, absorption coefficient, terahertz spectroscopy

Acknowledgements: The work was performed according to the Government research assignment for ISPMS SB RAS, Project FWRW-2022-0002.

For citation: Rezvanova, A.E., Kudryashov, B.S. & Ponomarev, A.N. (2024) Model of a non-destructive testing method for ceramic material based on hydroxyapatite with carbon nanotube additives. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 59–66. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/8

Введение

В современных условиях возрастает необходимость разработки новых материалов, способных противостоять техногенным и биологическим угрозам. Одним из важных аспектов обеспечения безопасности является использование биомедицинских материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, способных эффективно функционировать в условиях экстремальных нагрузок. Оптимизация структуры таких материалов для устойчивости к внешним воздействиям играет ключевую роль в обеспечении безопасности жизнедеятельности человека. Восстановление поврежденных костных тканей осуществляется за счет реконструкции и замещения дефектов при помощи имплантатов, в том числе керамических. Материалы для имплантатов должны удовлетворять таким требованиям, как биосовместимость с человеческими костными тканями, а также обладать близкими с ними физико-механическими свойствами [1–3]. Наиболее предпочтительным материалом для разработки керамического имплантата является гидроксиапатит (ГА), который относится к биоматериалам из ортофосфатов кальция, обладает высокой биосовместимостью и является основной минеральной составляющей костной ткани человека [4–6]. В то же время механические свойства ГА керамики, такие как твердость, прочность, вязкость разрушения, значительно ниже, чем у костной ткани [7–9], что ограничивает их использование в местах имплантации с высокими механическими нагрузками.

Одним из важных параметров керамических материалов на основе ГА является пористость [10], которая напрямую оказывает влияние на структуру [11] и физико-механические свойства [3, 12–14]. Структуру таких материалов можно изменять варьированием добавок углеродных нанотрубок (УНТ), которые при внедрении в матрицу ГА приводят к снижению пористости и получению необходимых физико-механических свойств [15]. Добавки УНТ заполняют поровое пространство матрицы ГА [1, 15], увеличивая плотность композита, а также укрепляют границы зерен керамики [16–18]. В работе [19] показано, что введение в матрицу ГА 1 мас.% добавок многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) приводит к уменьшению пористости от 2 до 1,5%, а в [20] проиллюстрировано, что при добавлении 4 мас.% МУНТ наблюдается снижение пористости от $10 \pm 1,5$ до $5 \pm 2,5\%$.

Одним из способов качественного анализа пористой структуры материалов является терагерцовая (ТГц) спектроскопия во временной области [21–23]. Данный метод позволяет исследовать внутреннюю структуру материалов без механических разрушений с помощью определения их оптических свойств в терагерцовом диапазоне частот [24]. Оптические свойства керамических материалов, в частности показатель преломления и коэффициент поглощения, зависят от эффектов, связанных с пространственным распределением локальных электрических полей, и обусловлены рассеянием ТГц излучения как отдельными структурными элементами, так и их группами [25]. Таким образом, определение оптических свойств позволяет получить важную информацию о внутренней структуре материалов, что необходимо учитывать при анализе их пористости.

Экспериментальные исследования оптических параметров требуют получения множества образцов с различным содержанием добавок УНТ, а также необходимости обработки большого количества экспериментальных данных. Для дополнения экспериментальных данных предлагается с помощью метода конечных элементов проведение компьютерного эксперимента по созданию структурных моделей керамических материалов ГА и композитов ГА–УНТ, а также пропускания ТГц-излучения через них.

Целью настоящего исследования является проведение компьютерного эксперимента по пропусканию ТГц-излучения через модели керамических композитов на основе ГА с добавками УНТ 0,1 и 0,5 мас.%. Предполагается определение таких оптических свойств, как показатель преломления и коэффициент поглощения, а также связанных с ними параметров, таких как временная задержка ТГц-импульса и интенсивность излучения.

Моделирование пористых структур композитной керамики ГА–МУНТ

Моделирование пористых структур композитного материала на основе гидроксиапатита (ГА) с добавками углеродных нанотрубок (УНТ) выполнялось в среде COMSOL Multiphysics [26] на основе метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод может применяться в области инженерно-математического моделирования в задачах структурного анализа, теплопередачи, потока жидкости, массопереноса и электромагнитного потенциала [27] для моделирования

электрической проводимости двумерных и трехмерных сред [28], а также для моделирования наночастиц типа ядро–оболочка для анализа их магнитоэлектрического поведения [29].

Для автоматического построения структурных моделей разработана программа, которая учитывает такие параметры, как размеры образца, количество пор, максимальные и минимальные радиусы пор, минимальное и максимальное количество УНТ, содержащихся в порах. За основу модели взят представительный объем материала в виде сплошного цилиндра с радиусом 20 мкм и высотой 40 мкм [30].

Первым шагом создания моделей материалов с пористой структурой, содержащих нанотрубки, является задание начальной конфигурации моделей с определенными параметрами. Для формирования пористой структуры ГА создаются сферы радиусами от 0,1 мкм до 1 мкм, которые произвольно располагаются внутри основного цилиндра и вырезаются из него с использованием инструмента «Difference» (рис. 1, а). Далее в каждой поре моделируются УНТ в виде цилиндров длиной 5 мкм с различными углами наклона, образующие агломераты нанотрубок (рис. 1, б).

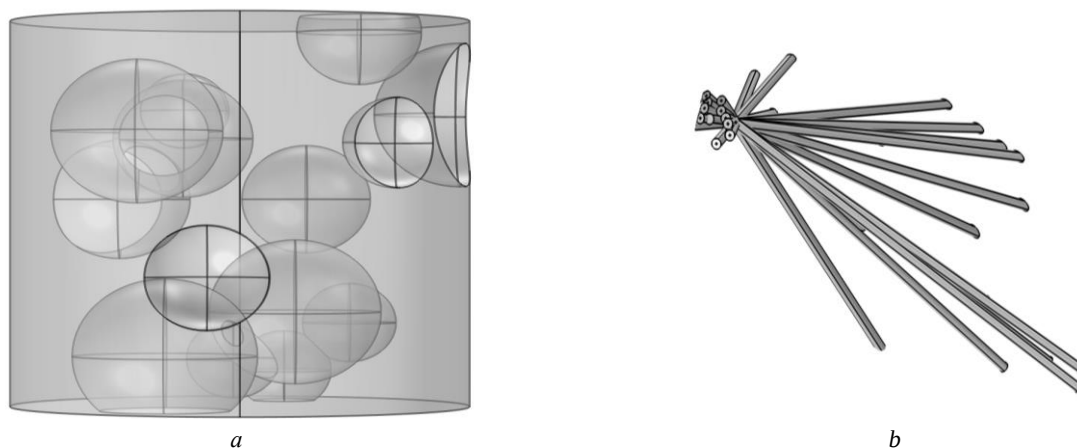


Рис. 1. Модели цилиндрического пористого образца ГА (а) и агломерата УНТ (б)

Fig. 1. Models of the cylindrical porous hydroxyapatite sample (а) and carbon nanotube agglomerate (б)

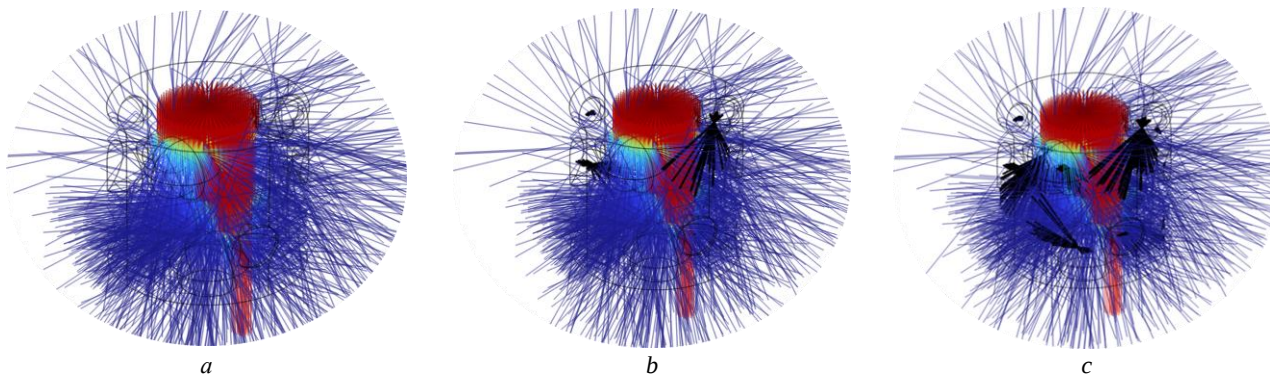


Рис. 2. Модели пропускания терагерцового излучения: ГА без добавок (а), ГА+0,1 мас.% УНТ (б), ГА+0,5 мас.% УНТ (с)

Fig. 2. Models of terahertz radiation transmission: hydroxyapatite without additives (а), hydroxyapatite with addition 0.1 mass. % of carbon nanotubes (б), hydroxyapatite with addition 0.5 mass. % of carbon nanotubes (с)

Затем каждая нанотрубка покрывается наружным слоем ГА с радиусом 45 нм и высотой, соответствующей длине УНТ. Дополнительные цилиндры того же размера, что и основной, используются для обрезки УНТ на поверхности модели с помощью инструмента «Intersection». Ключевым параметром разрабатываемых моделей является диаметр УНТ, равный 18 нм,

соответствующий среднему диаметру МУНТ, определенному экспериментально в работах [17, 30, 31]. С помощью модуля Release from Grid генерируется сетка точек на плоскости, образующая окружность диаметром, равным 1/2 диаметра цилиндрической модели образца. Прохождение лучей через образец моделировалось плоской волной, колеблющейся в

диапазоне частот от 0,2 до 1,1 ТГц. Начальная интенсивность излучения составляла 1000 Вт/м^2 . В данной работе проведение компьютерного эксперимента направлено на пропускание излучения в широком диапазоне частот от 0,2 до 1,1 ТГц в соответствии с экспериментальным исследованием керамики ГА-МУНТ [30], что является развитием исследования [32], в котором вычисление преломления и поглощения выполнялось при фиксированной частоте излучения в 1 ТГц.

Моделирование процесса пропускания ТГц излучения через пористые структуры

На рис. 2 показаны модели прохождения терагерцового излучения через пористую структуру материалов на основе ГА трех типов: ГА без добавок УНТ (a), ГА+0,1 мас.% УНТ (b) и ГА+ 0,5 мас.% УНТ (c).

Для каждой модели выполнялись расчеты интенсивностей излучения и временной задержки прохождения ТГц-лучей через пористые структуры с помощью модуля The Ray Optics Module [33], что представлено на рис. 3, 4.

Анализ данных на рис. 3 показывает, что добавление 0,5 мас.% УНТ приводит к увеличению временной задержки от 0,055479 до 0,055571 пс. Оценка полученных значений для построенных моделей качественно согласуется с экспериментальными данными [30], согласно которым наблюдается тенденция роста временной задержки импульса с увеличением МУНТ до 0,5 мас.% в матрицу ГА. На рис. 4 показано, что интенсивность ТГц-излучения зависит как от частоты излучения, так и от пористости материала, которая снижается с увеличением содержания УНТ. Полученные значения временной задержки и интенсивностей были использованы для расчета коэффициентов поглощения по закону Бугера–Ламберта–Бера и показателей преломления по закону Снеллиуса [34].

Зависимости показателей преломления и коэффициентов поглощения от частоты излучения для полученных моделей представлены на рис. 5: увеличение содержания УНТ в ГА-матрице приводит к увеличению показателя преломления (рис. 5, a) и уменьшению коэффициента поглощения (рис. 5, b), что качественно согласуется с оптическими свойствами керамики ГА–МУНТ, экспериментально определенными в диапазоне частот от 0,2 до 1,1 ТГц [30].

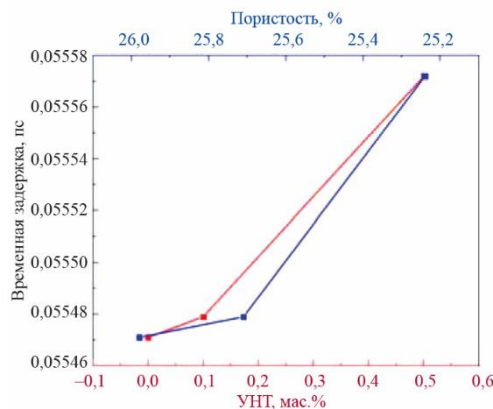


Рис. 3. Модельная зависимость временной задержки от концентрации УНТ и пористости

Fig. 3. The model dependence on time delay on the carbon nanotube concentration and porosity

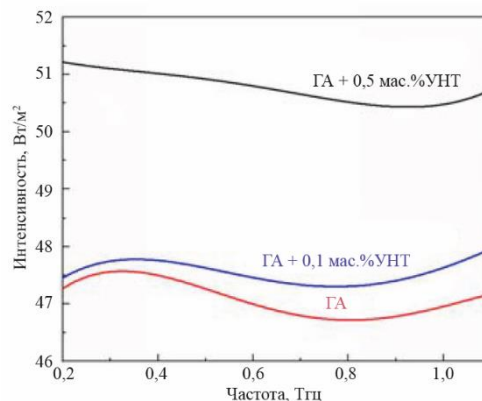


Рис.4. Модельная зависимость интенсивности от частоты ТГц-излучения

Fig. 4. The model dependence on intensity on the frequency of THz radiation

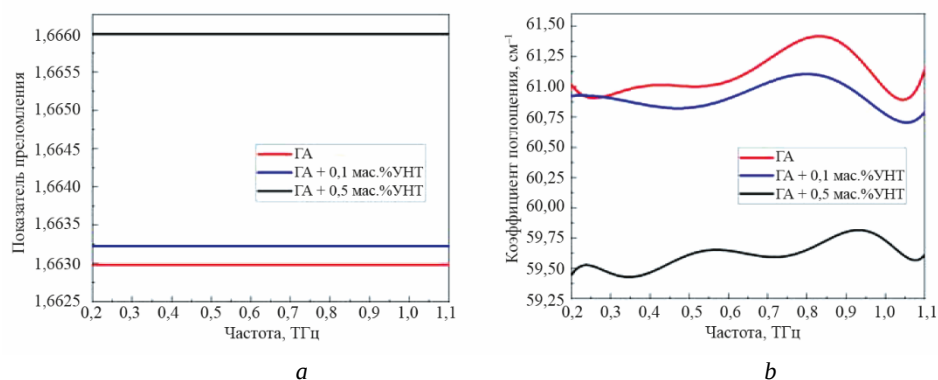


Рис. 5. Модельные частотные зависимости показателя преломления (a) и коэффициента поглощения (b) материалов на основе ГА

Fig. 5. The model frequency dependences on refractive index (a) and absorption coefficient (b) of hydroxyapatite-based materials

Результаты моделирования оптических свойств ГА материалов демонстрируют количественное согласие с литературными данными, где показатель преломления равен 1,64 [35], а коэффициент поглощения варьируется в диапазоне $5\text{--}37,08\text{ см}^{-1}$ [36]. Кроме того, установлено соответствие модельных данных с кортикальной костью человека, преломление которой $\sim 1,93$, а поглощение изменяется в диапазоне $5\text{--}72\text{ см}^{-1}$ в зависимости от частоты излучения

[37]. Сравнительный анализ модельных и экспериментальных данных оптических свойств представлен в таблице. Незначительное изменение показателя преломления и коэффициента поглощения моделей, содержащих УНТ, а также количественное расхождение между численными и экспериментальными данными обусловлено меньшими линейными размерами структурных моделей по сравнению с экспериментом и упрощениями при моделировании включений УНТ и их агломератов.

Оптические свойства экспериментальных и модельных образцов керамики на основе ГА в диапазоне частот от 0,2 до 1,1 ТГц

Материал	Показатель преломления	Коэффициент поглощения, см^{-1}
Эксперимент [30]		
ГА	2,45–2,63	15,65–34,48
ГА+0,1 мас.% МУНТ	2,59–2,70	8,52–28,29
ГА+0,5 мас.% МУНТ	2,72–2,83	7,80–28,35
Моделирование		
ГА	1,6632	60,93–61,47
ГА+0,1 мас.% УНТ	1,6630	60,75–61,20
ГА+0,5 мас.% УНТ	1,6660	59,45–59,91

Заключение

Проведенное моделирование пористой керамики на основе гидроксиапатита показало, что добавление углеродных нанотрубок способствует снижению пористости материала и получению оптических характеристик, схожих с костной тканью человека, что может быть полезным для потенциально новых применений в области медицины. Результаты моделирования коррелируют с экспериментальными данными и

могут быть использованы для дальнейших исследований в области создания медицинских имплантатов, что особенно актуально в условиях повышения требований к безопасности жизнедеятельности, в том числе для защиты в условиях воздействия электромагнитного излучения. Разработанные модели также могут снизить затраты на производство экспериментальных образцов и ускорить процесс тестирования материалов, предназначенных для обеспечения безопасности в критических условиях.

Список источников

1. Moussy F. Biomaterials for the developing world // Journal of Biomedical Materials Research Part A. 2010. Vol. 94, № 4. P. 1001–1003. doi: 10.1002/jbm.a.32866
2. Lahiri D., Ghosh S., Agarwal A. Carbon nanotube reinforced hydroxyapatite composite for orthopedic application: a review // Materials Science and Engineering: C. 2012. Vol. 32, № 7. P. 1727–1758. doi: 10.1016/j.msec.2012.05.010

3. Han Y., Wei Q., Chang P., Hu K., Okoro O.V., Shavandi A., Nie L. Three-dimensional printing of hydroxyapatite composites for biomedical application // *Crystals*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 353. doi: 10.3390/cryst11040353
4. Díaz M., Barba F., Miranda M., Guitián F., Torrecillas R., Moya J.S. Synthesis and Antimicrobial Activity of a Silver-Hydroxyapatite Nanocomposite // *Journal of Nanomaterials*. 2009. № 2009. P. 1–6. doi: 10.1155/2009/498505
5. Zhang T., Cai W., Chu F., Zhou F., Liang S., Ma C., Hu Y. Hydroxyapatite/polyurea nanocomposite: Preparation and multiple performance enhancements // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. № 128. P. 105681. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105681
6. Fiume E., Magnaterra G., Rahdar A., Verne E., Bairo F. Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview // *Ceramics*. 2021. Vol. 4, № 4. P. 542–563. doi: 10.3390/ceramics4040039
7. Zhao X., Zheng J., Zhang, W., Chen X., Gui Z. Preparation of silicon coated-carbon fiber reinforced HA bio-ceramics for application of load-bearing bone // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, № 6. P. 7903–7911. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.12.010
8. Khalid P., Suman V.B. Carbon nanotube-hydroxyapatite composite for bone tissue engineering and their interaction with mouse fibroblast L929 In Vitro // *Journal of Bionanoscience*. 2017. Vol. 11, № 3. P. 233–240. doi: 10.1166/jbns.2017.1431
9. Ferreira C.R.D., Santiago A.A.G., Vasconcelos R.C., Paiva D.F.F., Pirihi F.Q., Araújo A.A., Motta F.V., Bomio M.R.D. Study of microstructural, mechanical, and biomedical properties of zirconia/hydroxyapatite ceramic composites // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, № 9. P. 12376–12386. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.102
10. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, Surface Area and Porosity. London : Academic Press, 1982.
11. Cox S.C., Thornby J.A., Gibbons G.J., Williams M.A., Mallick K.K. 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. № 47. P. 237–247. doi: 10.1016/j.msec.2014.11.024
12. Akinribide O.J., Mekgwe G.N., Akinwamide S.O., Gamaoun F., Abeykoon C., Johnson O.T., Olubambi P.A. A review on optical properties and application of transparent ceramics // *Journal of materials research and technology*. 2022. № 21. P. 712–738. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.027
13. Wagner A., Ratzker B., Kalabukhov S., Sokol M., Frage N. Residual porosity and optical properties of spark plasma sintered transparent polycrystalline cerium-doped YAG // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39, № 4. P. 1436–1442. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.006
14. Shahmiri R., Standard O.C., Hart J.N., Sorrell C.C. Optical properties of zirconia ceramics for esthetic dental restorations: A systematic review // *The Journal of prosthetic dentistry*. 2018. Vol. 119, № 1. P. 36–46. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.07.009
15. Faingold A., Cohen S.R., Shahar R., Weiner S., Rapoport L., Wagner H.D. The effect of hydration on mechanical anisotropy, topography and fibril organization of the osteonal lamellae // *Journal of Biomechanics*. 2014. Vol. 47, № 2. P. 367–372. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.11.022
16. Veljović Đ., Vuković G.D., Steins I., Palcevskis E., Uskoković P., Petrović R., Janačković Đ. Improvement of the mechanical properties of spark plasma sintered hap bioceramics by decreasing the grain size and by adding multi-walled carbon nanotubes // *Science of Sintering*. 2013, Vol. 45, № 2. P. 33–243. doi: 10.2298/SOS1302233V
17. Barabashko M.S., Tkachenko M.V., Neiman A.A., Ponomarev A.N., Rezvanova A.E. Variation of Vickers microhardness and compression strength of the bioceramics based on hydroxyapatite by adding the multi-walled carbon nanotubes // *Applied Nanoscience*. 2019. Vol. 10, № 8. P. 2601–2608. doi: 10.1007/s13204-019-01019-z
18. Barabashko M.S., Tkachenko M.V., Rezvanova A.E., Ponomarev A.N. Analysis of temperature gradients in the hydroxyapatite ceramics with the additives of multi-walled carbon nanotubes // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95, № 5. P. 1017–1022. doi: 10.1134/S0036024421050058
19. Mukherjee S., Kundu B., Chanda A., Sen S. Effect of functionalisation of CNT in the preparation of HAp–CNT biocomposites // *Ceramics international*. 2015. Vol. 41, № 3. P. 3766–3774. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.11.052
20. Lahiri D., Singh V., Keshri A.K., Seal S., Agarwal A. Carbon nanotube toughened hydroxyapatite by spark plasma sintering: Microstructural evolution and multiscale tribological properties // *Carbon*. 2010. Vol. 48, № 11. P. 3103–3120. doi: 10.1016/j.carbon.2010.04.047
21. Nikoghosyan A.S., Ting H., Shen J., Martirosyan R.M., Tunyan M.Y., Papikyan A.V., Papikyan A.A. Optical properties of human jawbone and human bone substitute Cerabone® in the terahertz range // *J. Contemp. Phys*. 2016. Vol. 51, № 3. P. 256–264. doi: 10.3103/S1068337216030087
22. Bawuah P., Ervasti T., Tan N., Zeitler J.A., Ketolainen J., Peiponen K.E. Noninvasive porosity measurement of biconvex tablets using terahertz pulses // *International journal of pharmaceutics*. 2016. Vol. 509, № 1–2. P. 439–443. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.06.023
23. Kistenev Yu.V., Nikolaev V.V., Kurochkina O.S., Borisov A.V., Sandykova E.A., Krivova N.A., Tuchina D.K., Timoshina P.A. Use of terahertz spectroscopy for in vivo studies of lymphedema development dynamics // *Optics and Spectroscopy*. 2019. № 126. P. 523–529. doi: 10.1134/S0030400X19050138
24. Bawuah P., Markl D., Farrell D., Evans M., Portieri A., Anderson A., Goodwin D., Lucas R., Zeitler J.A. Terahertz-based porosity measurement of pharmaceutical tablets: A tutorial // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2020. Vol. 41, № 4. P. 450–469. doi: 10.1007/s10762-019-00659-0
25. Безмельницкий Д.С., Лизункова Д.А., Шишкин И.А. Оптические свойства наноструктурированного кремния // *Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета*. 2020. Т. 1, № 16. С. 261–266.
26. COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru> (accessed: 1 July 2024).
27. Fish J., Belytschko T. A First Course in Finite Elements. John Wiley & Sons, 2017.
28. Сизин П.Е. Теоретическое и численное моделирование электрической проводимости пористых сред // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023. Т. 5. С. 43–56. doi: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_43
29. Fiocchi S., Chiamarello E., Marrella A., Suarato G., Bonato M., Parazzini M., Ravazzani P. Modeling of core-shell magneto-electric nanoparticles for biomedical applications: Effect of composition, dimension, and magnetic field features on magnetoelectric response // *PLoS one*. 2022. Vol. 17, № 9. P. e0274676. doi: 10.1371/journal.pone.0274676
30. Rezvanova A.E., Kudryashov B.S., Ponomarev A.N., Knyazkova A.I., Nikolaev V.V., Kistenev Y.V. Composite hydroxyapatite-multi-walled carbon nanotubes: study of porosity by terahertz time domain spectroscopy // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2023. Vol. 14, № 5. P. 530–538. doi: 10.1371/journal.pone.0274676

31. Barabashko M., Ponomarev A., Rezvanova A., Kuznetsov V., Moseenkov S. Young's modulus and vickers hardness of the hydroxyapatite bio-ceramics with a small amount of the multi-walled carbon nanotubes // *Materials*. 2022. Vol. 15, № 15. P. 5304. doi: 10.3390/ma15155304
32. Резванова А.Е. Кудряшов Б.С., Скоробогатов Д.Д., Пономарев А.Н. Модель распространения терагерцового импульса через керамику на основе гидроксиапатита // *Журнал технической физики*. 2024. Т. 94, № 3. С. 358–365. doi: 10.61011/JTF.2024.03.57372.18-24
33. Ray Optics Module User's Guide. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.roptics> (accessed: 1 July 2024).
34. Borisenko S.I., Revinskaya O.G., Kravchenko N.S., Chernov A.V. The refractive index of light and methods for its experimental determination. Tomsk : Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2014. P. 142.
35. Huang P., Zhou B., Zheng Q., Tian Y., Wang M., Wang L., Li J., Jiang W. Nano wave plates structuring and index matching in transparent hydroxyapatite-YAG: Ce composite ceramics for high luminous efficiency white light-emitting diodes // *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32, № 1. P. 905951. doi: 10.1002/adma.201905951
36. Plazanet M., Tasseva J., Bartolini P., Taschin A., Torre R., Combes C., Rey C., Michele A.Di., Verezhak M., Gourrier A. Time-domain THz spectroscopy of the characteristics of hydroxyapatite provides a signature of heating in bone tissue // *PLoS One*. 2018. Vol. 13, № 8. P. e0201745. doi: 10.1371/journal.pone.0201745
37. Bessou M., Chassagne B., Caumes J.-P., Pradère C., Maire P., Tondusson M., Abraham E. Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones // *Applied optics*. 2012. Vol. 51, № 28. P. 6738–6744. doi: 10.1364/AO.51.006738

References

1. Moussy, F. (2010) Biomaterials for the developing world. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 94 (4). pp. 1001–1003. doi: 10.1002/jbm.a.32866
2. Lahiri, D., Ghosh, S. & Agarwal, A. (2012) Carbon nanotube reinforced hydroxyapatite composite for orthopedic application: a review. *Materials Science and Engineering: C*. 32 (7). pp. 1727–1758. doi: 10.1016/j.msec.2012.05.010
3. Han, Y., Wei, Q., Chang, P., Hu, K., Okoro, O.V., Shavandi, A. & Nie, L. (2021) Three-dimensional printing of hydroxyapatite composites for biomedical application. *Crystals*. (11) 4. p. 353. doi: 10.3390/cryst11040353
4. Díaz, M., Barba, F., Miranda, M., Guitián, F., Torrecillas, R. & Moya, J.S. (2009) Synthesis and Antimicrobial Activity of a Silver-Hydroxyapatite Nanocomposite. *Journal of Nanomaterials*. 2009 (2009). pp. 1–6. doi: 10.1155/2009/498505
5. Zhang, T., Cai, W., Chu, F., Zhou, F., Liang, S., Ma, C. & Hu, Y. (2020) Hydroxyapatite/polyurea nanocomposite: Preparation and multiple performance enhancements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 128. p. 105681. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105681
6. Fiume, E., Magnaterra, G., Rahdar, A., Verne, E. & Baino, F. (2021) Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview. *Ceramics*. 4 (4). pp. 542–563. doi: 10.3390/ceramics4040039
7. Zhao, X., Zheng, J., Zhang, W., Chen, X. & Gui, Z. (2020) Preparation of silicon coated-carbon fiber reinforced HA bio-ceramics for application of load-bearing bone. *Ceramics International*. 46 (6). pp. 7903–7911. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.12.010
8. Khalid, P. & Suman, V.B. (2017) Carbon nanotube-hydroxyapatite composite for bone tissue engineering and their interaction with mouse fibroblast L929 In Vitro. *Journal of Bionanoscience*. 11 (3). pp. 233–240. doi: 10.1166/jbns.2017.1431
9. Ferreira, C. R. D., Santiago, A.A.G., Vasconcelos, R.C., Paiva, D.F.F., Pirihi, F.Q., Araújo, A.A., Motta F.V. & Bomio M.R.D. (2022) Study of microstructural, mechanical, and biomedical properties of zirconia/hydroxyapatite ceramic composites. *Ceramics International*. 48 (9). pp. 12376–12386. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.102
10. Gregg, S.J. & Sing, K.S.W. (1982) *Adsorption, Surface Area and Porosity*. London: Academic Press.
11. Cox, S.C., Thornby, J.A., Gibbons, G.J., Williams, M.A. & Mallick, K.K. (2015) 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering: C*. 47. pp. 237–247. doi: 10.1016/j.msec.2014.11.024
12. Akinribide, O.J., Mekgwe, G.N., Akinwamide, S.O., Gamaoun, F., Abeykoon, C., Johnson, O.T. & Olubambi, P.A. (2022) A review on optical properties and application of transparent ceramics. *Journal of materials research and technology*. 21. pp. 712–738. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.027
13. Wagner, A., Ratzker, B., Kalabukhov, S., Sokol, M. & Frage, N. (2019) Residual porosity and optical properties of spark plasma sintered transparent polycrystalline cerium-doped YAG. *Journal of the European Ceramic Society*. 39 (4). pp. 1436–1442. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.006
14. Shahmiri, R., Standard, O.C., Hart, J.N. & Sorrell, C.C. (2018) Optical properties of zirconia ceramics for esthetic dental restorations: A systematic review. *The Journal of prosthetic dentistry*. 119 (1). pp. 36–46. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.07.009
15. Faingold, A., Cohen, S.R., Shahar, R., Weiner, S., Rapoport, L. & Wagner, H.D. (2014) The effect of hydration on mechanical anisotropy, topography and fibril organization of the osteonal lamellae. *Journal of Biomechanics*. 47 (2). pp. 367–372. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.11.022
16. Veljović, Đ., Vuković, G.D., Steins, I., Palcevskis, E., Uskoković, P., Petrović, R. & Janačković, Đ. (2013) Improvement of the mechanical properties of spark plasma sintered hap bioceramics by decreasing the grain size and by adding multi-walled carbon nanotubes. *Science of Sintering*. 45 (2). pp. 33–243. doi: 10.2298/SOS1302233V
17. Barabashko, M.S., Tkachenko, M.V., Neiman, A.A., Ponomarev, A.N. & Rezvanova, A.E. (2019) Variation of Vickers microhardness and compression strength of the bioceramics based on hydroxyapatite by adding the multi-walled carbon nanotubes. *Applied Nanoscience*. 10 (8). pp. 2601–2608. doi: 10.1007/s13204-019-01019-z
18. Barabashko, M.S., Tkachenko, M.V., Rezvanova, A.E. & Ponomarev, A.N. (2021) Analysis of temperature gradients in the hydroxyapatite ceramics with the additives of multi-walled carbon nanotubes. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 95 (5). pp. 1017–1022. doi: 10.1134/S0036024421050058
19. Mukherjee, S., Kundu, B., Chanda, A. & Sen, S. (2015) Effect of functionalisation of CNT in the preparation of HAp–CNT biocomposites. *Ceramics international*. 41 (3). pp. 3766–3774. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.11.052
20. Lahiri, D., Singh, V., Keshri, A.K., Seal, S. & Agarwal, A. (2010) Carbon nanotube toughened hydroxyapatite by spark plasma sintering: Microstructural evolution and multiscale tribological properties. *Carbon*. 48 (11). pp. 3103–3120. doi: 10.1016/j.carbon.2010.04.047

21. Nikoghosyan, A.S., Ting, H., Shen, J., Martirosyan, R.M., Tunyan, M.Y., Papikyan, A.V. & Papikyan, A.A. (2016) Optical properties of human jawbone and human bone substitute Cerabone® in the terahertz range. *J. Contemp. Phys.* 51 (3). pp. 256–264. doi: 10.3103/S1068337216030087
22. Bawuah, P., Ervasti, T., Tan, N., Zeitler, J.A., Ketolainen, J. & Peiponen, K.E. (2016) Noninvasive porosity measurement of biconvex tablets using terahertz pulses. *International journal of pharmaceutics*. 509 (1–2). pp. 439–443. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.06.023
23. Kistenev, Yu.V., Nikolaev, V.V., Kurochkina, O.S., Borisov, A.V., Sandykova, E.A., Krivova, N.A., Tuchina, D.K. & Timoshina, P.A. (2019) Use of terahertz spectroscopy for in vivo studies of lymphedema development dynamics. *Optics and Spectroscopy*. 126. pp. 523–529. doi: 10.1134/S0030400X19050138
24. Bawuah, P., Markl, D., Farrell, D., Evans, M., Portieri, A., Anderson, A., Goodwin, D., Lucas, R. & Zeitler, J.A. (2020) Terahertz-based porosity measurement of pharmaceutical tablets: A tutorial. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 41 (4). pp. 450–469. doi: 10.1007/s10762-019-00659-0
25. Bezmelnitsin, D.S., Lizunkova, D.A. & Shishkin, I.A. (2020) Opticheskiye svoystva nanostrukturirovannogo kremniya [Nanostructured silicon optical properties]. *Vestnik molodykh uchonykh i spetsialistov Samarskogo universiteta [Bulletin of young scientists and specialists of Samara University]*. 1 (16). pp. 261–266.
26. COMSOL. URL <https://www.comsol.ru>. Accessed 1 July 2024.
27. Fish, J. & Belytschko T. (2017) *A First Course in Finite Elements*. John Wiley & Sons.
28. Sizin, P.E. (2023) Teoreticheskoye i chislennoye modelirovaniye elektricheskoy provodimosti poristyykh sred [Theoretical and numerical modeling of electric conductance in porous media]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 5. pp. 43–56. (in Russian). doi: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_43
29. Focchi, S., Chiaramello, E., Marrella, G., Bonato, M., Parazzini, M. & Ravazzani, P. (2022) Modeling of core-shell magneto-electric nanoparticles for biomedical applications: Effect of composition, dimension, and magnetic field features on magnetoelectric response. *PLoS one*. 17 (9). p. e0274676. doi: 10.1371/journal.pone.0274676
30. Rezvanova, A.E., Kudryashov, B.S., Ponomarev, A.N., Knyazkova, A.I., Nikolaev, V.V. & Kistenev, Y.V. (2023) Composite hydroxyapatite-multi-walled carbon nanotubes: study of porosity by terahertz time domain spectroscopy. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 14 (5). pp. 530–538. doi: 10.1371/journal.pone.0274676
31. Barabashko M., Ponomarev A., Rezvanova A., Kuznetsov V. & Moseenkov S. (2022) Young's modulus and vickers hardness of the hydroxyapatite bioce-ramics with a small amount of the multi-walled carbon nanotubes. *Materials*. 15 (15). p. 5304. doi: 10.3390/ma15155304
32. Rezvanova, A.E., Kudryashov, B.S., Skorobogatov, D.D. & Ponomarev, A.N. (2024) A model of the propagation of a terahertz pulse through ceramics based on hydroxyapatite. *Technical Physics*. 94 (3). p. 339. doi: 10.61011/JTF.2024.03.57372.18-24
33. Ray Optics Module User's Guide. URL <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.roptics>. Accessed 1 July 2024.
34. Borisenko, S.I., Revinskaya, O.G., Kravchenko, N.S. & Chernov, A.V. (2014) The refractive index of light and methods for its experimental determination. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University.
35. Huang, P., Zhou, B., Zheng, Q., Tian, Y., Wang, M., Wang, L., Li, J. & Jiang, W. (2020) Nano wave plates structuring and index matching in transparent hydroxyapatite-YAG: Ce composite ceramics for high luminous efficiency white light-emitting diodes. *Advanced Material*. 32 (1). p. 905951. doi: 10.1002/adma.201905951
36. Plazanet, M., Tasseva, J., Bartolini, P., Taschin, A., Torre, R., Combes, C., Rey, C., Michele, A.Di., Verezhak, M. & Gourrier, A. (2018) Time-domain THz spectroscopy of the characteristics of hydroxyapatite provides a signature of heating in bone tissue. *PLoS One*. 13 (8). p. e0201745. doi: 10.1371/journal.pone.0201745
37. Bessou, M., Chassagne, B., Caumes, J.-P., Pradère, C., Maire, P., Tondusson, M. & Abraham, E. (2012) Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones. *Applied optics*. 51 (28). pp. 6738–6744. doi: 10.1364/AO.51.006738

Информация об авторах:

Резванова Анастасия Евгеньевна, младший научный сотрудник лаборатории молекулярного имиджинга и фотоакустики Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия). E-mail: ranast@ispms.ru. ORCID ID: 0000-0002-7067-7979

Кудряшов Борис Сергеевич, инженер-исследователь лаборатории молекулярного имиджинга и фотоакустики Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0009-0000-5133-4893

Пономарёв Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией молекулярного имиджинга и фотоакустики Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия); Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0003-1524-7842

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Rezvanova Anastasia E., Junior researcher at the laboratory of molecular imaging and photoacoustics, Institute of Strength Physics and Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ranast@ispms.ru. ORCID ID: 0000-0002-7067-7979

Kudryashov Boris S., Research engineer at the laboratory of molecular imaging and photoacoustics, Institute of Strength Physics and Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0009-0000-5133-4893

Ponomarev Alexander N., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, head of the laboratory of molecular imaging and photoacoustics, Institute of Strength Physics and Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0003-1524-7842

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научная статья

УДК 537.86

doi: 10.17223/29491665/8/9

Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок

Александра Андреевна Павлова¹, Валентин Иванович Сусяев²,
Евгений Юрьевич Коровин³, Дмитрий Артурович Мазиллов⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ sandy.surname@gmail.com

² susl@mail.tsu.ru

³ korovin_ey@mail.tsu.ru

⁴ dmitrijmazilov20@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты решения актуальной физической задачи – исследование материалов с управляемыми электромагнитными характеристиками. Методом импедансной спектроскопии измерены спектры комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) магнитных жидкостей следующего состава: керосин + синтетическое масло + оксид железа. В состав добавлялись многослойные углеродные нанотрубки массовая доля которых составляла 1 мас.%. Рассмотрено влияние магнитного поля различной ориентации по отношению к силовым линиям электрической составляющей электромагнитного поля на величины КДП. Показано, что при параллельной ориентации электрического и магнитного полей величины комплексной диэлектрической проницаемости существенно возрастают. Методом математического моделирования [1] рассчитаны спектры коэффициента отражения для различных толщин слоев МЖ в микроволновой области частот. Получены новые результаты, доказывающие перспективность использования относительно тонких слоев магнитных жидкостей для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности при использовании современных высокочастотных радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: магнитные жидкости, диэлектрическая проницаемость, математическое моделирование, технология обеспечения безопасности жизнедеятельности, электромагнитный отклик, МУНТ

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития ТГУ «Приоритет 2030».

Для цитирования: Павлова А.А., Сусяев В.И., Коровин Е.Ю., Мазиллов Д.А. Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 67–74. doi: 10.17223/29491665/8/9

Original article

doi: 10.17223/29491665/8/9

Ferrofluids with controlled shielding characteristics based on magnetite and multi-walled carbon nanotubes

Alexandra A. Pavlova¹, Valentine I. Suslyaev², Evgeniy Yu. Korovin³,
Dmitriy A. Mazilov⁴

^{1, 2, 3, 4} National research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ sandy.surname@gmail.com

² susl@mail.tsu.ru

³ korovin_ey@mail.tsu.ru

⁴ dmitrijmazilov20@gmail.com

Abstract. Studying materials with controlled electromagnetic characteristics is presented in the article. The complex permittivity spectra of ferrofluids of the following compositions were measured by impedance spectroscopy: kerosene + synthetic oil + iron oxide. Multiwall carbon nanotubes (1 wt. %) were added to composition. The effect of different orientation of a magnetic field with respect to the electric component of the electromagnetic field on the complex permittivity values is considered. It is shown that the values of the complex permittivity increase significantly with parallel orientation of the electric and magnetic fields. The spectra of the reflection coefficient for different thicknesses of ferrofluid layers in the microwave frequency range were calculated using the method of mathematical modeling. New results proving the promise of using relatively thin ferrofluid layers for solving problems of ensuring life safety when using modern high-frequency radio-electronic devices were obtained.

Keywords: ferrofluids, permittivity, mathematical modeling, life safety technology, electromagnetic response, MWCNT

Acknowledgements: This study was supported by the Tomsk State University Development Program («Priority-2030»).

For citation: Pavlova, A.A., Suslyayev, V.I., Korovin, E.Yu. & Mazilov, D.A. (2024) Ferrofluids with controlled shielding characteristics based on magnetite and multi-walled carbon nanotubes. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeятельности – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 67–74. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/9

Введение

Магнитные жидкости (МЖ) входят в широкий класс гетерогенных веществ, свойства которых определяются наноразмерными частицами магнито-мягких (например, магнетита) [2, 3] или магнито-жестких (например, бариевого феррита) [4] материалов. Магнитные жидкости относятся к разряду «умных» (smart materials) материалов с управляемыми характеристиками, что обусловило широкое применение их в различных областях науки и промышленного производства: в системах регулирования температуры [5], в устройствах герметизации [6, 7], в акустических системах [8], в устройствах водоочистки [9], медицине [10] и других приложениях. Магнитные жидкости являются уникальными материалами, сочетающими текучесть, присущую жидкостям, и чувствительность к магнитным полям.

Магнитные жидкости представляют собой коллоидные растворы, состоящие из жидкости-носителя и частиц ферромагнитных веществ. В качестве жидкости-носителя используются вода, керосин, органические основы (в том числе ароматические углеводороды) и эфиры [11]. Для стабилизации МЖ применяют поверхностно-активные вещества (олеиновая кислота). Выбор материала активной фазы определяется величинами электромагнитных параметров и назначением МЖ. Наличие магнитных частиц позволяет управлять электромагнитными характеристиками композита, что отмечается во всех перечисленных публикациях.

В области электроники МЖ используются в качестве модуляторов оптического излучения [12] и микроволновых переключателей [13]. Относительно недавно МЖ стали применять для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности, важность решения которых обострилась в связи со стремительным развитием высокочастотной радиоэлектроники, которая, кроме повышения качества жизни, подвергла людей вредному воздействию микроволнового излучения. На основе МЖ создаются экранирующие устройства [14] и поглотители [4]. Композиты, к которым относится МЖ, исследуются в том числе и в микроволновом диапазоне [15–17]. Данная сфера применения МЖ в радиоэлектронике освоена слабо [4], хотя и наблюдается рост интереса к этой проблеме. Целью данной работы является математиче-

ское моделирование спектров коэффициента отражения в диапазоне сверхвысоких частот от плоских слоев МЖ разной толщины при воздействии магнитного поля. Кроме того, представляет интерес оценка влияния углеродных нанотрубок, которые в настоящее время активно применяются для экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот от 10 МГц до 30 ГГц [8, 18, 19], на электромагнитные свойства магнитных жидкостей.

Материалы и методы исследования

Исследуемая жидкость представляет собой коммерческую МЖ марки МЖК, состав ее приведен в табл. 1.

Для исследования влияния МУНТ на электромагнитные свойства МЖ в неё механическим способом вносили 1 мас.% нанотрубок. В качестве жидкости-носителя использовали технический керосин, полученный путем ректификации нефти и её вторичной переработки.

Таблица 1
Состав и пропорции компонентов МЖК

Керосин	58 мас.% ±
Оксид железа	18 мас.% ±
Масло синтетическое	22 мас.% ±
Стабилизатор полимерный	2 мас.%

Для исследования свойств магнитных жидкостей применяли экспериментальные методы: рентгеновскую дифракционную спектроскопию – для определения состава, импедансную спектроскопию – для измерения частотной зависимости диэлектрической проницаемости, кроме того, использовали и метод математического моделирования [1] электромагнитного отклика от образцов из МЖ.

Для получения величин диэлектрической проницаемости использован конденсаторный метод измерения на установке, построенной на основе высокоточного измерителя LCR 4980A фирмы Agilent Technologies.

В [11] описано исследование зависимости диэлектрической проницаемости от ориентации магнитного поля по отношению к силовым линиям электрического поля. Установлено, что магнитное поле привело к росту диэлектрической проницаемости, но

влияние ориентации оказалось различным для разных величин его напряженностей. Приложение магнитного поля формирует определенную конфигурацию расположения магнитных частиц жидкости-носителя, образуя из них цепочки в направлении магнитного поля [20–22]. Этот эффект положен нами в основу гипотезы, что можно использовать такую структуру для формирования структуры проводящих частиц с большим аспектным соотношением (например, для углеродных нанотрубок).

Для исследования влияния магнитного поля на ДП магнитной жидкости измерительная ячейка помещалась в систему магнитов с напряжённостью поля 1 кЭ (рис. 1).

Измерительная ячейка была изготовлена в виде конденсатора, в котором расположены пластины плоскопараллельного конденсатора; пространство между ними заполнялось исследуемой МЖ. Было предусмотрено, что размеры данной ячейки позволяли разместить ее в магнитном поле двумя способами: перпендикулярно и параллельно силовым линиям магнитного поля.

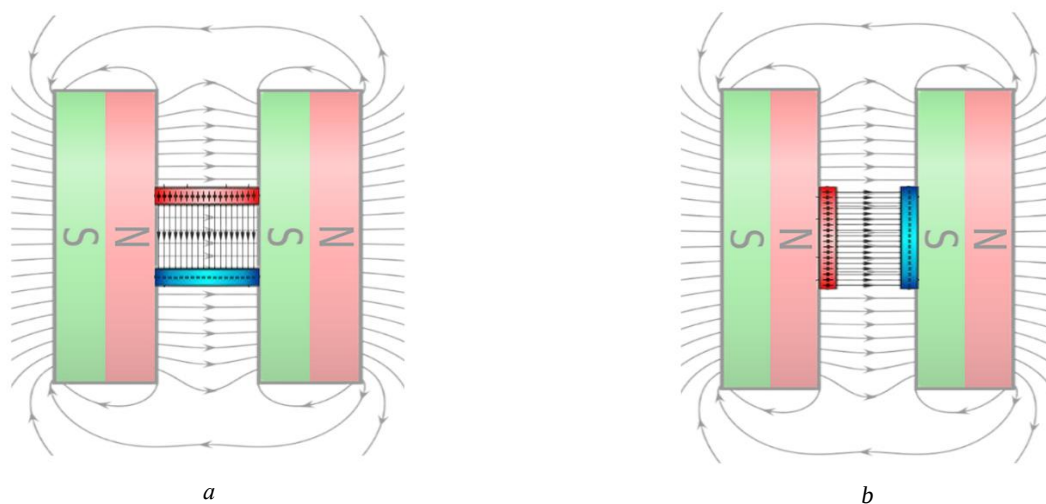


Рис. 1. Размещение ячейки с образцом в системе магнитов: *a* – перпендикулярное размещение, *b* – параллельное размещение

Fig. 1. The placing of the sample cell into the magnetic system: *a* – perpendicular, *b* – parallel

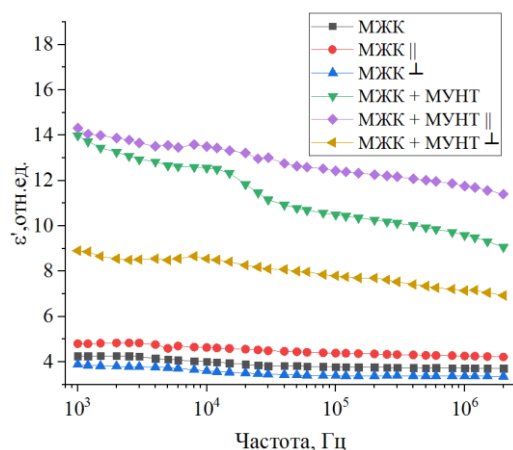


Рис. 2. Частотные зависимости действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости

Fig. 2. Frequency dependences of the real component of the complex permittivity

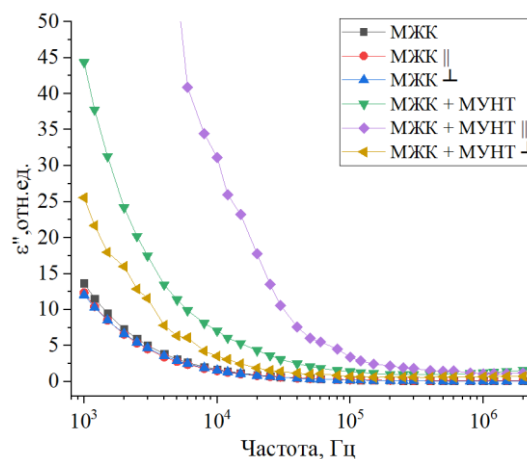


Рис. 3. Частотные зависимости мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости

Fig. 3. Frequency dependences of the imaginary component of the complex permittivity

На рис. 2, 3 приведены спектры диэлектрической проницаемости коммерческой МЖ для разных ориентаций магнитного поля. Представленные результаты сравниваются с величинами КДП магнитной жидкости без приложенного поля. Приложение магнитного поля разной ориентации привело к тому же резуль-

тату, что и в работе [11]: для параллельной ориентации силовых линий электрического и магнитного полей действительная составляющая выросла примерно на 20%, а при перпендикулярной ориентации несколько снизилась. Мнимые составляющие практически не изменились

При наличии в МЖ углеродных нанотрубок обе составляющие КДП заметно выросли, причем влияние взаимной ориентации оказалось более значительным.

В рамках высказанной нами гипотезы это различие можно объяснить тем, что при параллельной ориентации МУНТ образуют цепочки, «замыкающие» пластины конденсатора. Пока результат позволяет лишь зафиксировать эффект. Чтобы материал действительно можно было считать управляемым, требуются дополнительные исследования, направленные на определение связи с интенсивностью напряженности магнитного поля, видом МУНТ, длиной проводящих нитей. Есть и другие проблемы. В ходе проведения эксперимента выяснилось, что электрофизические характеристики жидкости существенно зависят от времени ультразвукового диспергирования нанотрубок в синтетическом масле.

В исследуемой полосе частот для всех рассмотренных ситуаций наблюдается слабая дисперсия диэлектрической проницаемости, которая связана с процессами запаздывания (см. рис. 2) [4].

Результаты и обсуждение

Для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности наиболее интересен сверхвысокочастотный диапазон электромагнитного излучения, который в настоящее время все более активно используется во всех сферах человеческой деятельности, включая бытовую. Снижение вредного воздействия электромагнитного излучения достигается применением экранирующих устройств, которые характеризуются электромагнитным откликом – коэффициенты отражения, прохождения и поглощения. Математическое моделирование спектров коэффициента отражения от плоских слоев МЖ разной толщины проведено на основе экспериментальных исследований частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости при воздействии

магнитных полей различной ориентации по отношению к силовым линиям электрического поля. Основанием для правомерности применения метода моделирования для оценки электромагнитного отклика в высокочастотном диапазоне по результатам, полученным на низких частотах, является слабая диэлектрическая дисперсия, характерная для неполярных веществ, к которым относится жидкость-носитель. Эти материалы, кроме того, на высоких частотах имеют малые значения тангенса угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость частиц активной фазы также существенно снижается в результате размельчения и малого содержания частиц в МЖ. Это позволяет использовать измеренные значения для моделирования электромагнитного отклика в сверхвысокочастотном диапазоне. Коэффициент отражения рассчитывался в плосковолновом приближении для расположения слоя магнитной жидкости на проводящей поверхности. Представляет интерес эффект объемного резонанса, когда в толще образца реализуется режим стоячих волн, при этом в толщина образца кратна длине волны в веществе. В данном случае наблюдаются наиболее эффективное взаимодействие образца материала с электромагнитным излучением и существенное уменьшение коэффициента отражения.

На рис. 4–9 представлены зависимости коэффициента отражения слоя МЖК на металле для различного состава МЖ и ориентации магнитного и электрического полей. В табл. 2 приведены данные, положенные в основу расчета коэффициента отражения.

Результаты, представленные на рис. 4–9, показывают, что существуют области частот, в которых отражение снижается более чем в 100 раз.

Таблица 2

Значения КДП для образцов МЖ

	МЖК	МЖК	МЖК ⊥	МЖК+МУНТ	МЖК+МУНТ	МЖК+МУНТ ⊥
ϵ'	3,7	4,3	3,36	9,5	11,8	7,3
ϵ''	0,13	0,16	0,1	1,3	1,2	0,7

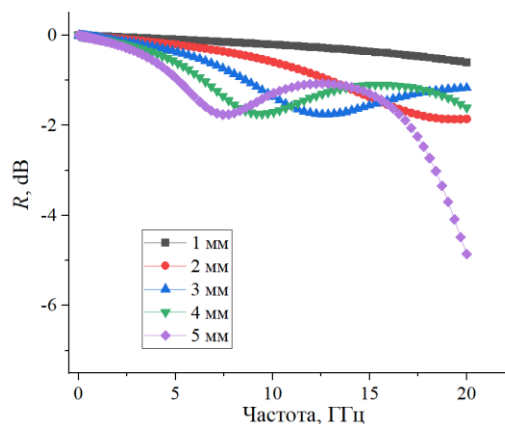


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ

Fig. 4. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs

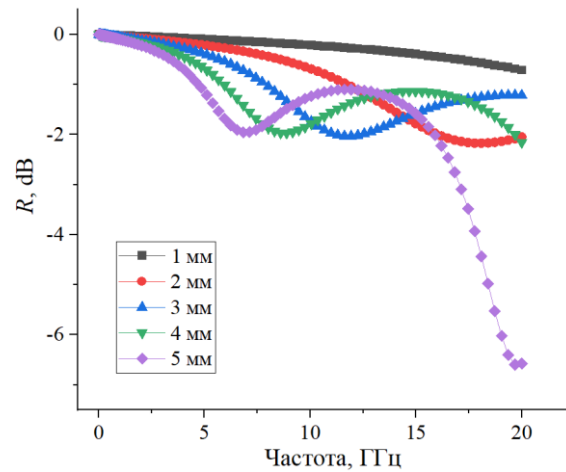


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ в параллельном поле

Fig. 5. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs in a parallel field

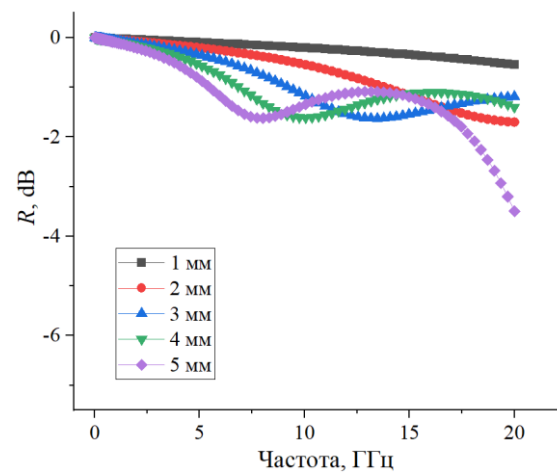


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ в перпендикулярном поле

Fig. 6. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs in a perpendicular field

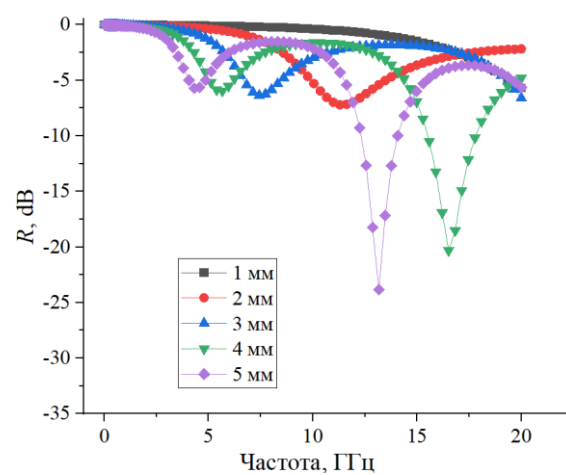


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ

Fig. 7. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNTs

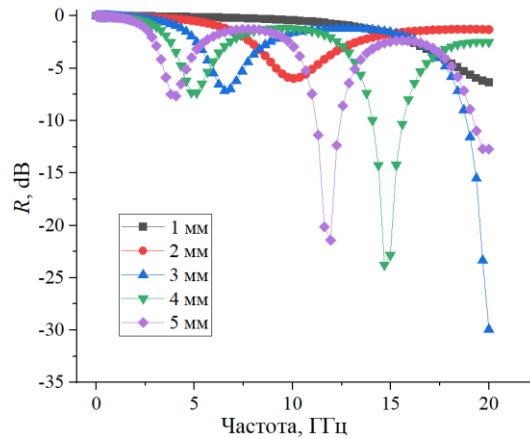


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ в параллельном поле

Fig. 8. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNT in a parallel field

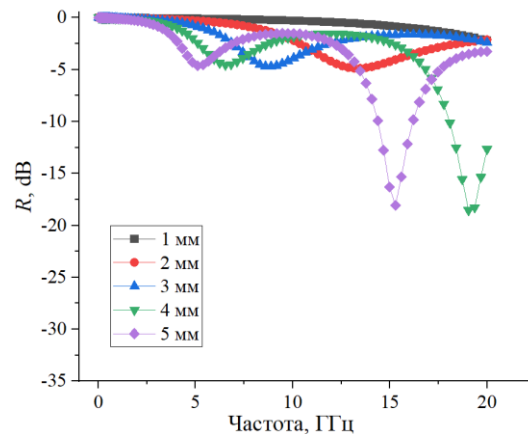


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ в перпендикулярном поле

Fig. 9. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNT in a perpendicular field

Графики демонстрируют возможность перестройки экранирующего устройства на другую частоту простым изменением толщины покрытия, что для жидких материалов осуществляется наиболее простым методом.

Заключение

Проведенное исследование показало, что магнитные жидкости перспективны для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности в качестве

экранирующих устройств с электромагнитными свойствами, управляемыми приложенными магнитными полями.

Поглотители на основе магнитных жидкостей сочетают свойства текучести и эффективность поглощения электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах, что может быть использовано для снижения вредного влияния микроволнового излучения на биологические объекты.

Список источников

1. Kazakova M.A., Semikolenova N.V., Korovin E.Y., Zhuravlev V.A., Selyutin A.G., Velikanov D.A., Moseenkov S.I., Andreev A.S., Lapina O.B., Suslyayev V.I., Matsko M.A., Zakharov V.A., D'Espinose De Lacaille J.B. Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: Tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio // *Composites Science and Technology*. 2021. Vol. 207. P. 108731-1–108731-11
2. Ryapolov P., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Churaev A., Sokolov E., Shel'deshova E. Magnetic Fluids: The Interaction between the Microstructure, Macroscopic Properties, and Dynamics under Different Combinations of External Influences // *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14. P. 222. doi: 10.3390/nano14020222
3. Dotsenko O.A., Pavlova A.A., Dotsenko V.S. The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids // *Russian Physics Journal*. 2018. Vol. 60, № 11. P. 955–960. doi: 10.1007/s11182-018-13087
4. Archana V.N., Manoj M., Jacob J., Vinayasee S., Mohanan P., Garza-Navarro Marco A., Shaji Sadasivan, Anantharaman M. R. On the microwave absorption of magnetic nanofluids based on barium hexaferrite in the S and X bands prepared by pulsed laser ablation in liquid // *AIP Advances*. 2019. Vol. 9. P. 035035. doi: 10.1063/1.5088080

5. Abbas K., Wang X., Rasool G., Sun T., Yin G., Razzaq I. Recent developments in the application of ferrofluids with an emphasis on thermal performance and energy harvesting // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023. Vol. 587. P. 171311. doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171311
6. Li D., Li Y., Li Z., Wang Y. Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing // *Friction*. 2023. Vol. 11. P. 1771–1793. doi: 10.1007/s40544-022-0676-8
7. Emmerson J.O., Shateri A., Xie J. Use of magnetic fluids in process system for pipe isolations // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. 35221. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35221
8. Rosensweig R.E., Hirota Y., Tsuda S., Raj K. Study of audio speakers containing ferrofluid // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008. Vol. 20. P. 204147. doi: 10.1088/0953-8984/20/20/204147
9. Rajput S., Pittman C.U.Jr., Mohan D. Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 468. P. 334–346. doi: 10.1016/j.jcis.2015.12.008
10. Герасимчук Н.А., Дваденко М.В., Капустянская Ж.В., Мельник И.А., Чудовский Р.Л. Магнитные жидкости в современном обществе // *Успехи современного естествознания*. 2006. № 10. С. 60–66.
11. Anjitha B., Maria J., Archana V. N., Navya J., Anantharaman M. R. High Dielectric Constant Liquid Dielectrics Based on Magnetic Nanofluids // *Journal of Nanofluids*. 2023. Vol. 12. P. 1141–1150. doi: 10.1166/jon.2023.1973
12. Chieh J.J., Yang S.Y., Horng H.E., Hong C.-Y., Yang H.C. Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation // *Applied physics letters*. 2007. Vol. 90. P. 133505. doi: 10.1063/1.2716365
13. Sharma P., Tripathi A.M., Shukla R., Shukla A. Colloidal Microwave Absorber based on Magnetic Fluid of Iron Oxide Nanoparticles // *Research & Development in Material science*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 000860. doi: 10.31031/RDMS.2021.15.000860
14. Dolnik B., Rajnak M., Clmbala R., Kolcunova I. Kurimskv J., Dzmura J., Petras J., Zbojovsky J., Kosterec M., KopCansk P., Timko M. The Shielding Effectiveness of a Magnetic Fluid in Radio Frequency Range // *Acta physica polonica*. 2018. Vol. 133, № 3. doi: 10.12693/APliysPolA. 133.585
15. Xu H., Anlage S.M., Hu L., Gruner G. Pezzagna S., Meijer J. Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films // *Applied physics letters*. 2007. Vol. 90. P. 183119. doi: 10.1063/1.2734897
16. Chahar M., Sharma V., Thakur O.P. Conductive network structure of MWCNTs-incorporated cobalt-zinc ferrite nanocomposite for enhanced electromagnetic shielding applications // *Journal of Nanoparticle Research*. 2022. Vol. 24. P. 195 doi: 10.1007/s11051-022-05578-1
17. Yuan H., Zvonkina I.J., Al-Enizi A.M., Elzatahry A.A., Pyun J., Karim A. Facile Assembly of Aligned Magnetic Nanoparticle Chains in Polymer Nanocomposite Films by Magnetic Flow Coating // *ACS applied materials & interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 11290–11298. doi: 10.1021/acsami.7b02186
18. Кужир П.П., Letellier M., Быченко, Д.С., Поддубская О.Г., Сусляев В.И., Коровин Е.Ю., Батуркин С.А., Ferro V., Celzard A. Электрофизические характеристики углеродного пеноматериала в СВЧ диапазоне // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. Т. 59, № 10. С. 160–166.
19. Krasnikov D.V., Dorofeev I.O., Smirnova T.E., Suslyayev V.I., Kazakova M.A., Moseenkov S.I., Kuznetsov V.L. Electromagnetic Inter-action Between Spherical Aerogels of Multi-Walled Carbon Nanotubes // *Physica Status Solidi B: Basic Research*. 2017. Vol. 254. P. 1700256-1–1700256-6.
20. Мазиллов Д.А., Павлова А.А., Сусляев В.И. Исследование низкочастотных спектров диэлектрической проницаемости магнитных жидкостей при приложении магнитного поля // *Современные наука и практика: закономерности, прорывной характер, возможности и перспективы*. СПб. : Изд-во СПбГЦСА, 2024. С. 107–111.
21. Pavlova A., Suslyayev V., Mazilov D. Electrophysical characteristics of magnetic fluids with multiwalled carbon nanotubes // *The 8th International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials – 2024*. Moscow, Russia 26–30 August, 2024.
22. Sithara V., John P. Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 307. P. 102729. doi: 10.1016/j.cis.2022.102729

References

1. Kazakova, M.A., Semikolenova, N.V., Korovin, E.Y., Zhuravlev, V.A., Selyutin, A.G., Velikanov, D.A., Moseenkov, S.I., Andreev, A.S., Lapina, O.B., Suslyayev, V.I., Matsko, M.A., Zakharov, V.A., D'Espinose & De Lacaille, J.B. (2021) Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: Tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio. *Composites Science and Technology*. 207. pp. 108731-1-108731-11
2. Ryapolov, P., Vasilyeva, A., Kalyuzhnaya, D., Churaev, A., Sokolov, E. & Shel'deshova, E. (2024) Magnetic Fluids: The Interaction between the Microstructure, Macroscopic Properties, and Dynamics under Different Combinations of External Influences. *Nanomaterials*. 14. pp. 222. doi: 10.3390/nano14020222
3. Dotsenko, O.A., Pavlova, A.A. & Docenko, V.S. (2018) The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids: *Russian Physics Journal*. 60. 11. pp. 955–960. doi: 10.1007/s11182-018-13087
4. Archana, V.N., Manoj, M., Jacob, J., Vinayasee, S., Mohanan, P., Garza-Navarro Marco, A., Shaji Sadasivan & Anantharaman, M.R. (2019) On the microwave absorption of magnetic nanofluids based on barium hexaferrite in the S and X bands prepared by pulsed laser ablation in liquid. *AIP Advances*. 9. pp. 035035. doi: 10.1063/1.5088080
5. Abbas, K., Wang, X., Rasool, G., Sun, T., Yin, G. & Razzaq, I. (2023) Recent developments in the application of ferrofluids with an emphasis on thermal performance and energy harvesting. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 587. pp. 171311. doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171311
6. Li, D., Li, Y., Li, Z. & Wang, Y. (2023) Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing. *Friction*. 11. pp. 1771–1793. doi: 10.1007/s40544-022-0676-8
7. Emmerson, J.O., Shateri, A. & Xie, J. (2024) Use of magnetic fluids in process system for pipe isolations. *Heliyon*. 10. pp. 35221. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35221

8. Rosensweig, R.E., Hirota, Y., Tsuda, S. & Raj, K. (2008) Study of audio speakers containing ferrofluid. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 20. pp. 204147. doi: 10.1088/0953-8984/20/20/204147
9. Rajput, S., Pittman, C.U. Jr. & Mohan, D. (2016) Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*. 468. pp. 334–346. doi: 10.1016/j.jcis.2015.12.008
10. Gerasimchuk, N.A., Dvadenko, M.V., Kapustianskaya, Zh.V., Mel'nik, I.A. & Chudovskij, R.L. (2006) Magnitnye zhidkosti v sovremennom obshchestve [Magnetic fluids in modern society]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 10. pp. 60–66.
11. Anjitha, B., Maria, J., Archana, V.N., Navya, J. & Anantharaman, M.R. (2023) High Dielectric Constant Liquid Dielectrics Based on Magnetic Nanofluids. *Journal of Nanofluids*. 12. pp. 1141–1150. doi:10.1166/jon.2023.1973
12. Chieh, J.J., Yang, S.Y., Horng, H.E., Hong, C.-Y. & Yang, H.C. (2007) Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation. *Applied physics letters*. 90. pp. 133505. doi: 10.1063/1.2716365
13. Sharma, P., Tripathi, A.M., Shukla, R. & Shukla, A. (2021) Colloidal Microwave Absorber based on Magnetic Fluid of Iron Oxide Nanoparticles. *Research & Development in Material science*. 15. pp. 000860. doi: 10.31031/RDMS.2021.15.000860
14. Dolnik, B., Rajnak, M., Clmbala, R., Kolcunova, I., Kurimskv, J., Dzmura, J., Petras, J., Zbojovsky, J., Kostelec, M., KopCansk, P. & Timko, M. (2018) The Shielding Effectiveness of a Magnetic Fluid in Radio Frequency Range. *Acta physica polonica*. 133. pp. 3. doi: 10.12693/APhysPolA. 133.585
15. Xu, H., Anlage, S.M., Hu, L., Gruner, G., Pezzagna, S. & Meijer, J. (2007) Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films. *Applied physics letters*. 90. pp. 183119. doi: 10.1063/1.2734897
16. Chahar, M., Sharma, V. & Thakur, O.P. (2022) Conductive network structure of MWCNTs-incorporated cobalt-zinc ferrite nanocomposite for enhanced electromagnetic shielding applications. *Journal of Nanoparticle Research*. 24. pp. 195 doi: 10.1007/s11051-022-05578-1
17. Yuan, H., Zvonkina, I.J., Al-Enizi, A.M., Elzatahy, A.A., Pyun, J. & Karim, A. (2017) Facile Assembly of Aligned Magnetic Nanoparticle Chains in Polymer Nanocomposite Films by Magnetic Flow Coating. *ACS applied materials & interfaces*. 9. pp. 11290–11298. doi: 10.1021/acsami.7b02186
18. Kuzhir, P.P., Letelier, M., Bychenok, D.S., Poddubskaya, O.G., Suslyaev, V.I., Korovin, E. Yu., Baturkin, S.A., Ferro, V. & Celzard, A. (2016) Elektrofizicheskie karakteristiki uglerodnogo penomateriala v SVCh diapazone. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 59. pp. 160–166.
19. Krasnikov, D.V., Dorofeev, I.O., Smirnova, T.E., Suslyaev, V.I., Kazakova, M.A., Moseenkov, S.I. & Kuznetsov, V.L. (2017) Electromagnetic Interaction Between Spherical Aerogels of Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Physica Status Solidi B: Basic Research*. 254. pp. 1700256-1-1700256-6.
20. Mazilov, D.A., Pavlova, A.A. & Suslyaev, V.I. (2024) Issledovanie nizkochastotnykh spektrov dielektricheskoy pronicaemosti magnitnykh zhidkostej pri prilozhenii magnitnogo polya. *Sovremennye nauka i praktika: zakonomernosti, proryvnoj harakter, vozmozhnosti i perspektivy*. pp. 107–111.
21. Pavlova, A., Suslyaev, V. & Mazilov, D. (2024) Electrophysical characteristics of magnetic fluids with multiwalled carbon nanotubes. *The 8th International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials*
22. Sithara, V. & John, P. (2022) Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 307. pp. 102729. doi: 10.1016/j.cis.2022.102729

Информация об авторах:

Павлова Александра Андреевна – старший преподаватель кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sandy.surname@gmail.com

Сусляев Валентин Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: susl@mail.tsu.ru. ORCID ID: 0000-0003-0935-975X. Researcher ID: A-4262-2014

Коровин Евгений Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru

Мазилов Дмитрий Артурович – магистрант радиотехнического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dmitrijmazilov20@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Pavlova Alexandra A., Senior lecturer, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sandy.surname@gmail.com

Suslyaev Valentine I., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: susl@mail.tsu.ru

Korovin Evgeny Yu., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru

Mazilov Dmitry A., Master's student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dmitrijmazilov20@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024
ok

Научная статья

УДК 331.556, 332.152, 332.055.2, 334.716, 338.2, 378.4

doi: 10.17223/29491665/8/10

От стартапа – к промышленному предприятию: совместная деятельность вузов и промышленных партнёров

Евгений Игоревич Липатов¹, Юлия Валентиновна Маслова², Юлия Владимировна Ходова³,
Александр Григорьевич Коротаев⁴, Ольга Александровна Доценко⁵,
Александр Владимирович Васильев⁶, Глеб Ильдарович Садыков⁷

^{1, 2, 4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

³ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

⁶ АО «НИИПП», Томск, Россия

⁷ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

¹ evlip@mail2000.ru

² yulya_maslova_86@inbox.ru

Аннотация. Рассматриваются возможные варианты создания новых высокотехнологических производств с использованием студенческих стартапов и совершенствования образовательных программ под задачи промышленности на примере пилотной образовательной программы Томского государственного университета. Предлагаются варианты создания высокотехнологических предприятий на основе студенческих стартапов.

Ключевые слова: стартап, университет, высшее образование, высокотехнологическое производство, треугольник Лаврентьева

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы «Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете. Авторы благодарят Бориса Николаевича Пойзнера, Руслана Магомедтахировича Гадирова, Николая Николаевича Юдина, Игоря Вячеславовича Клепикова, Алексея Борисовича Лысенко за участие в обсуждении данной статьи.

Для цитирования: Липатов Е.И., Маслова Ю.В., Ходова Ю.В., Коротаев А.Г., Доценко О.А., Васильев А.В., Садыков Г.И. От стартапа – к промышленному предприятию: совместная деятельность вузов и промышленных партнёров // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 75–83. doi: 10.17223/29491665/8/10

Original article

doi: 10.17223/29491665/8/10

From Startup to Industrial Enterprise: Joint Activities of Universities and Industrial Partners

Evgeny I. Lipatov¹, Yulia V. Maslova², Yulia V. Khodova³, Alexander G. Korotaev⁴,
Olga A. Dotsenko⁵, Alexander V. Vasilyev⁶, Gleb I. Sadykov⁷

^{1, 2, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ Institute of High-Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

³ Omsk State University named after F.M. Dostoevsky, Omsk, Russian Federation

⁶ JSC «NIIPP», Tomsk, Russian Federation

⁷ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

¹ evlip@mail2000.ru

² yulya_maslova_86@inbox.ru

Abstract. The issues of the relationship between high-tech industrial partners and universities of Tomsk for the training of in-demand specialists are considered on the example of the pilot educational program «Cyberphysical systems, applied electronics and quantum technologies» developed by lecturers of the Radiophysics Faculty of Tomsk State University. It is noted that one of the ways to improve the well-being of the Tomsk citizens may be the creation of new high-tech enterprises, using the natural migration influx of young people, students at universities, and the existing ecosystem of scientific organizations, high-tech enterprises and startups in the city. Student startups not only shape the entrepreneurial thinking of young people, but also provide a

breeding ground for the potential emergence of new high-tech industries. A concept for the development of a high-tech ecosystem based on the Lavrentiev triangle, but with the addition of a business component, depicted as a tetrahedron, is proposed. The difficulties of existing industrial enterprises in creating fundamentally new products and the tendency of gradual improvement of already created products are pointed out. The necessity of overcoming certification barriers in order to bring solutions to the market that improve the products of high-tech enterprises, for example, through state financing/co-financing of certification, is substantiated. It is proposed to create new high-tech enterprises with a payback horizon of more than 10 years to bring new high-tech products to promising emerging markets with the help of government financing. These issues were the subject of discussion at thematic round tables held within the framework of the International conference on «Materials and technologies of photonics, electronics and nonlinear optics» (MTP 2024).

Keywords: startup, university, higher education, high-tech enterprise Lavrentiev triangle

Acknowledgements: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University. The authors thank Boris N. Poizner, Ruslan M. Gadyrov, Nikolay N. Yudin, Igor V. Klepikov, Alexey B. Lysenko for participating in the discussion of this article.

For citation: Lipatov, E.I., Maslova, Yu.V., Khodova, Yu.V., Korotaev, A.G., Dotsenko, O.A., Vasilyev, A.V. & Sadykov, G.I. (2024) From Startup to Industrial Enterprise: Joint Activities of Universities and Industrial Partners. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 75–83. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/10

Введение

Согласно концепции технологического развития Российской Федерации [1], предполагающей достижение технологического суверенитета, устойчивое интеллектуальное развитие производственных систем и безопасность жизнедеятельности государства, к концу третьего десятилетия XXI в. страна должна иметь собственную научную, кадровую и технологическую базу в области критических и сквозных технологий. Становится наиболее важным создание условий для интенсивной инновационной деятельности, развития и становления предприятий и корпораций, обеспечивающих производство собственной высокотехнологичной продукции. Для каждой из этих целей формируются механизмы достижения, основанные на приоритетах в области развития науки и образования. Для становления и развития высокотехнологического производства требуется кадровый потенциал широкого спектра – ученые для создания новых технологий, инженеры для воплощения разработок в жизнь, менеджеры для продвижения инновационных идей и создания новых предприятий, рабочие, обладающие знаниями и навыками.

Авторы рассматривают возможные варианты создания новых высокотехнологических производств и совершенствования образовательных программ под задачи промышленности на примере формирующейся экосистемы Большого Университета города Томска. Кроме того, анализируются возможности создания высокотехнологических предприятий на основе студенческих стартапов для коммерциализации научных достижений и разработок в области квантовых технологий и углеродной фотоники и увеличения предложений от работодателей на рынке труда.

Томск на технологической карте России

С середины 90-х гг. прошлого века численность населения Томска плавно увеличивалась от 469 000 человек в 1995 г. до 576 000 человек в 2020 г. На 01 января 2024 г. она составляла 545 391 человек [2]. По численности населения Томск занимает 30-е место среди более чем 1 100 городов России.

С учетом частичной деиндустриализации города монотонный прирост населения в течение четверти века имел миграционный характер. Благодаря работе шести государственных вузов Томск является центром демографического притяжения.

Анализ развития ведущих агломераций России подтверждает важную закономерность: рост населения города приводит к росту благосостояния его жителей [3]. Несмотря на приток молодого активного населения, значительная часть молодых людей, получивших высшее образование, покидает Томск; их самореализация в определенной степени способствует усилению экономик других городов и регионов России, ближнего и дальнего зарубежья. Часть молодых людей остаются в вузах и НИИ, вовлекаясь в образовательный процесс как преподаватели и проводя научные исследования. Томская высокотехнологическая промышленность также создает на рынке труда значительный, но явно недостаточный спрос, поскольку не менее 50 % молодых людей покидают Томск после окончания вузов [4].

Во многом данная парадигма сформировалась в советский период. Фактически во второй половине XX в. в Томске был реализован классический треугольник Лаврентьева (рис. 1), который в условиях государства-корпорации справлялся с задачами динамичного развития региона. В современных же условиях треугольника Лаврентьева явно недостаточно.

Принципы создания Новосибирского Академгородка, сформулированные в 1968 г. академиком М.А. Лаврентьевым, в лаконичном изложении:

- 1) синергия главных фундаментальных научных дисциплин на их стыках;
- 2) взаимопотребность науки и промышленности;
- 3) университет – центр образования и науки. Преподаватели – ведущие ученые из академической сферы. Основная масса ученых – молодежь – студенты и аспиранты, работающие на новейшем оборудовании в НИИ



Рис. 1. Треугольник Лаврентьева, символизирующий совместную работу и обмен знаниями между образованием, наукой и производством, адаптированный для Томска

Fig. 1. The Lavrentiev Triangle, symbolizing collaboration and knowledge exchange between education, science and industry, adapted for Tomsk

В Томске успешно работают представители крупного высокотехнологического бизнеса – АО «НИИПП», АО «НПФ «Микран», АО «НПЦ «Полус», ООО НПЦ «Томская электронная компания», АО «ТЭМЗ», АО «Томский завод электроприводов» – с годовой выручкой в несколько миллиардов рублей. Помимо крупного бизнеса, высокотехнологическая промышленность Томска представлена рядом компаний с годовой выручкой десятки–сотни миллионов рублей – ООО «НПК Таир», АО «Томский электротехнический завод», АО «Элеси», ООО «ЛОК», АО «Томский приборный завод», ООО «Кристалл Т» и др.

Молодому специалисту после окончания учёбы в университете и получения технической специальности дополнительную возможность остаться в Томске могут предоставить новые высокотехнологические промышленные предприятия, создаваемые для выпуска импортозамещающей или экспортоориентированной продукции. За последние несколько лет в Томске открылись несколько предприятий электронной промышленности, являющиеся обособленными подразделениями или дочерними предприятиями АО НПЦ «Радар ммс», ГК «ИнфоТеКС», ГК «Элемент». Вузы, готовящие специалистов по инженерным и техническим специальностям, востребованным местными предприятиями, начали активно учитывать их интересы в образовательном процессе.

Одним из преимуществ геополитического расположения Томска с точки зрения создания новых про-

изводств является его удаленность от театров интенсивно протекающих событий. При этом в условиях активно развивающейся транспортной инфраструктуры России его удаленность не создаёт проблем с логистикой поставок.

Перспективные образовательные программы, формируемые вузами

Физико-математическое и инженерное образование в России исторически всегда опиралось на фундаментальные науки, успешные разработки в сфере ИТ, мощную исследовательскую и инфраструктурную базу, а также на высокий уровень запроса со стороны общества и государства. На сегодняшний день именно высокий спрос и кадровый дефицит инженерных специалистов определяет направление изменений в этой области образования. Согласно стратегии, предложенной инфраструктурным центром «Нейронет» при поддержке Национальной технологической инициативы, комплекс мероприятий на 2023–2030 гг., направленный на развитие технологического образования, должен включать новую модель взаимодействия школ, средних образовательных учреждений, вузов и предприятий для создания базы долгосрочного и устойчивого экономического роста страны за счет развития высоких технологий [5].

Однако в данной области существует много нерешенных проблем. Вместе с неуклонным ростом ин-

женерных вакансий на рынке труда отмечается низкий уровень заработной платы (около 80 тысяч рублей в среднем на инженерной должности); кроме того, одно из основных требований работодателя – это опыт работы от 1 до 3 лет даже для выпускников. Требования к имеющимся навыкам также изменились за последние два-три года. Среди необходимых компетенций стоит отметить такие, как знание основ программирования микроконтроллеров, ПЛИС, Python, систем искусственного интеллекта. Зачастую выпускники многих образовательных учреждений пока не обладают такими навыками, поскольку традиционные образовательные программы не могут быстро и гибко подстраиваться под требования современного рынка труда.

С 2023 г. Национальный исследовательский Томский государственный университет вошел в шестерку вузов – участников пилотного проекта по преобразованию высшего образования в РФ. В рамках данного проекта на радиофизическом факультете была разработана образовательная программа «Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии», которая опирается на следующие принципы построения образования:

- внедрение профессиональных стандартов в образовательный процесс вузов;

- получение студентами микроквалификаций и профессионального опыта уже в процессе обучения;
- создание центров независимой оценки квалификации;
- участие промышленных партнеров в образовательной деятельности вуза;
- обновление материальной базы с помощью и с привлечением ресурсов промышленных партнеров.

Уже после 2-го курса студенты, обучающиеся по программе, могут получить две профессиональные квалификации и попробовать себя в профессиональной деятельности на предприятиях-партнерах, приобретая стаж работы, необходимый при дальнейшем трудоустройстве. После окончания 4-го курса и сдачи госэкзамена студенты получают основную профессиональную квалификацию.

При формировании программы была затронута и частично решена проблема нехватки кадров в области основного и дополнительного образования по таким направлениям, как физика, математика, информатика и инженерные кружки. Благодаря включению педагогического трека, студенты могут получить квалификацию «Преподаватель», которая является крайне востребованной в настоящее время.

На рис. 2 представлена схема описанной образовательной программы.

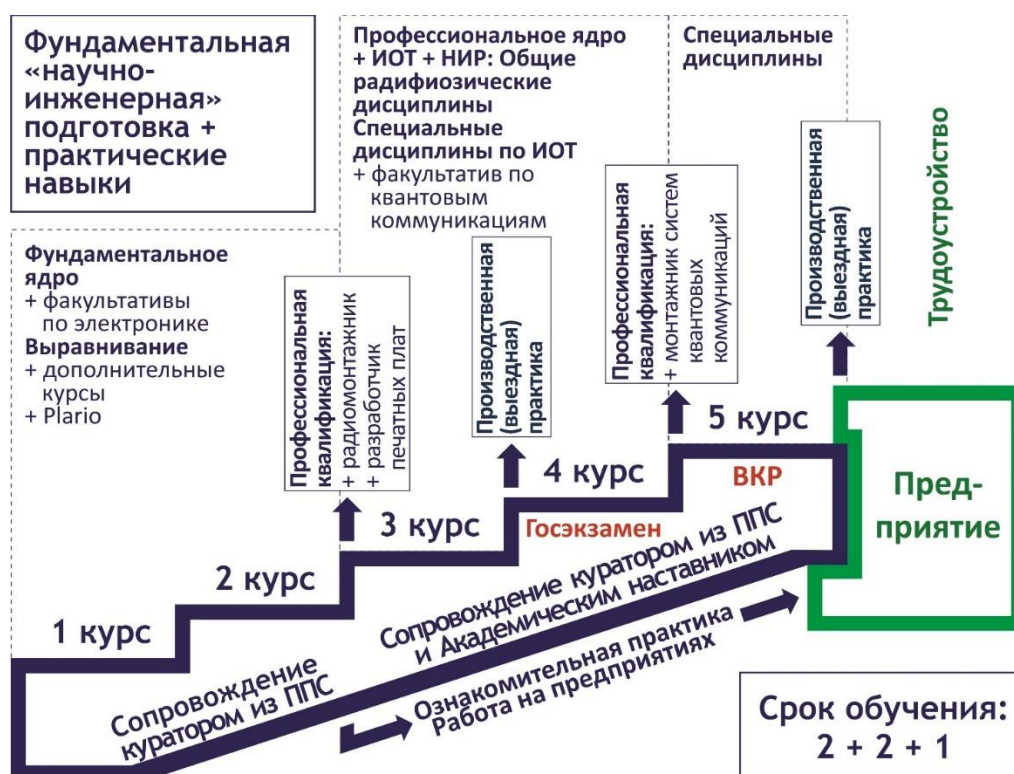


Рис. 2. Блок-схема пилотной образовательной программы «Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии» Томского государственного университета

Fig. 2. The block diagram of the pilot educational program «Cyberphysical systems, applied electronics and quantum technologies» of Tomsk State University

Немаловажной составляющей успешного развития и функционирования таких образовательных программ является работа с будущими абитуриентами уже на уровне младшей и средней школы. Перспективным видится создание профильных классов под эгидой промышленных партнеров и выстраивание единого образовательного трека «школа–вуз–предприятие» или «школа–ссуз–вуз–предприятие».

Запросы вузам от промышленности

Промышленному предприятию в общем случае необходимо в короткие сроки получить специалиста, который будет выполнять ограниченный набор функций. Поэтому предприятия принимают на работу молодых специалистов, получивших среднее профессиональное образование (СПО), и самостоятельно проводят дообучение. В отношении вузов обратная связь от промышленности содержит критику относительно подготовки переобученных специалистов не по профилю предприятия.

В рамках классического университетского образования подготовка кадров для промышленного предприятия не является целью. Только узкоспециализированные вузы работают для конкретных предприятий по моделям целевого обучения. Задача ведущих вузов состоит в подготовке универсального специалиста, работника для любого предприятия, Гражданина, формирующего облик предприятия в стратегической перспективе.

Среди проблем вузовской подготовки специалистов для промышленных предприятий отмечаются недостаточная материальная база для производственной практики и отсутствие / недостаток стажировок преподавателей на промышленных предприятиях для понимания принципов работы и организационной структуры. При этом наметилась тенденция интенсивного развития материальной базы в организациях СПО при участии промышленных предприятий.

Однако в общем случае только вузовский специалист сможет сформировать новое подразделение на предприятии, выступить в роли инноватора, организовать стартап, который станет интересен высокотехнологическому предприятию и бизнесу. В этом случае предприятие включает в штат или в организационную структуру сотрудников, показавших свою эффективность при создании нового предложения, как правило, на стадии минимально жизнеспособного продукта (МЖП).

Стартапы и существующие промышленные предприятия

Согласно концепции голубого океана [6] появление нового продукта происходит при выявлении нового потребительского свойства, которое выгодно отличает новый продукт от предложений конкурентов.

При этом появление новых потребительских свойств продукта не должно ухудшать старые.

Как правило, существующие предприятия стремятся найти участки «голубого океана», т.е. сегменты рынка, свободные от конкуренции, внутри уже существующих «алых» сегментов рынка. Иными словами, предприятия действуют путём поэтапных улучшений уже существующих продуктов, опираясь на обратную связь от заказчиков и потребителей. В реалиях Томска высокотехнологическое предприятие не имеет возможности самостоятельно разрабатывать новый востребованный продукт ввиду ресурсных ограничений. Следовательно, возникает потребность в проведении опытно-конструкторских работ (ОКР) за штатом предприятия, т.е. в обращении к сторонним организациями (НИИ, частные организации) и стартапам. Одновременно весьма распространён отказ от проведения ОКР по разработке конкретных изделий в чётко обозначенные сроки за ограниченную стоимость ввиду весьма вероятных финансовых, репутационных и иных издержек.

Именно по вышеуказанным причинам высокотехнологическим стартапам (не из сферы ИТ) наиболее адекватно работать от потребностей существующих предприятий. В этой связи формируются списки направлений разработок, согласованные с представителями отечественной промышленности.

Чтобы интегрироваться в существующую систему разделения труда, стартапу необходимо не только разработать продукт, улучшающий потребительские свойства более сложного изделия, выпускаемого промышленным предприятием, но и пройти сертификацию или аккредитацию, как правило, имеющие высокую стоимость и/или длительный срок прохождения. Поэтому часто кажущиеся очевидными решения по улучшению изделий, производимых отечественными предприятиями, могут просто иметь высокий входной барьер для реализации. При этом надо создавать равенство возможностей для конкуренции идей, но не ресурсов.

В настоящее время весьма актуальной в России является локализация или создание с нуля предприятий по выпуску современной электронной компонентной базы (ЭКБ), что требует инвестиций в десятки и сотни миллиардов рублей. Глобальный рынок ЭКБ – это высококонкурентный «алый» рынок, поэтому представители промышленности уверены, что реальные стартапы в сфере производства ЭКБ могут возникать лишь при существующих предприятиях.

Стартапы и предпринимательское мышление

В российском определении понятия «стартап» возникли разночтения. Давно отклонившись от классического определения [7], под стартапом понимают

команду людей, являющихся носителем нового знания, на основе которого можно создать и вывести на рынок конкурентоспособный продукт. Часто стартап отождествляют с лидером команды, главным конструктором, вокруг которого кристаллизуется команда проекта. В последнее время под стартапом стали понимать новую технологию, которой владеет команда или организация.

С 2022 г. в России на практике проверяется гипотеза, согласно которой стартапы могут возникать на базе университетов. За прошедшие 2 года создано более 4 000 стартапов на базе российских университетов. Амбициозной целью является развитие 200 из этих стартапов в предприятия малого, а затем и среднего бизнеса по модели спин-офф организаций [8].

В структуре университетов этим направлением деятельности занимаются стартап-студии. Их задача – выявить молодых лидеров, нацеленных на результат, способных сформировать коллективы, направленные на проведение научно-исследовательских работ (НИР) и ОКР, которые приведут к созданию МЖП (например, для задач импортозамещения). Государственная стратегия по импортозамещению, т.е. экономическая политика по замене импорта товарами отечественных производителей, создаёт уникальную возможность для развития стартапов. Необходимо развивать у молодежи, которой свойственны гибкость, адаптивность и способность к легкой перестройке деятельности, предпринимательское мышление.

В этом направлении ещё предстоит многое сделать. Для сравнения: в 2020 г. в России на 1 млн городского населения приходилось 6 высокотехнологических стартапов, в то время как в недружественных странах счёт шел на десятки и сотни. Университетские стартап-студии выступают в роли фильтра, выявляющего потенциальных технологических предпринимателей. В университетах создаются экосистемы предпринимательских компетенций, где технологические предприниматели знакомятся с существующими и перспективными трендами, получают навыки управления организациями, поиска финансирования для развития стартапов, включая стартап-студии, университетские, государственные и иные венчурные фонды. Это правильная долгосрочная стратегия.

Каковы реалии стартапов сейчас?

1) Стартап успешен тогда, когда у команды есть заработок, а её участники параллельно развивают новый продукт. В процессе доработки этого продукта за счёт другого источника дохода может появиться производственный стартап.

2) Если стартап развивается на гранты или господотации, то в определенный момент необходимо, чтобы они закончились. Если в стартап вовлечен инвестор,

то необходимо, чтобы он продвигал стартап в бизнес. Еще лучше, если имеется материнская компания или вуз, где работает подразделение, занимающееся развитием дочернего стартапа.

3) Для стартапа важно непрерывное взаимодействие с рынком, общение с потребителями, чтобы в итоге оторваться от материнской компании. Иначе стартап будет жить НИР/ОКРами, начиная следующий проект/продукт, не доведя до МЖП предыдущий.

4) В нынешних стартап-студиях сначала создают продукт, а потом нанимают команду. Мотивация к эффективной работе управленцев стартапа состоит в получении определенной доли бизнеса в случае достижения запланированных показателей.

5) Успешный стартап работает по модели: стартап разработал МЖП, основатели продали стартап существующему бизнесу, при этом, возможно, сохранили часть доли.

В то же время нельзя не отметить, что университетская стартап-студия Томска пока не продала ни одного стартапа несмотря на то, что уже состоялось несколько раундов инвестиций в 30–40 стартапов по 1–2 млн руб. для первых раундов и 4–6 млн руб. – для вторых. Однако это укладывается в долгосрочную стратегию развития университетских стартапов и развития предпринимательского мышления молодежи.

Справедливости ради следует сказать, что в настоящих условиях в России не всегда создаются новые продукты, конкурентоспособные в рыночных условиях. Для успешной конкуренции необходимы принципиально новые технологические решения. На фактически закрытом рынке нашего государства конкуренция в высокотехнологической сфере практически отсутствует: главное – в срок разработать продукт, который работает.

Создание новых высокотехнологических производств

В текущей обстановке практически любое высокотехнологическое производство в Томске может быть создано только волевым усилием. Но главное в том, что впоследствии такое производство создаёт мультипликативный эффект – рабочие места, запрос на подготовку кадров, улучшение качества образования, усиление научных школ.

Как уже было сказано ранее, треугольника Лаврентьева (см. рис. 1) в современных условиях недостаточно. На сегодняшний день данному треугольнику необходима бизнес-составляющая. Таким образом, треугольник Лаврентьева получает дополнительное измерение и превращается в объемную фигуру – треугольную пирамиду. Данный тетраэдр, назовем его тетраэдром Латура [9], изображен на рис. 3.

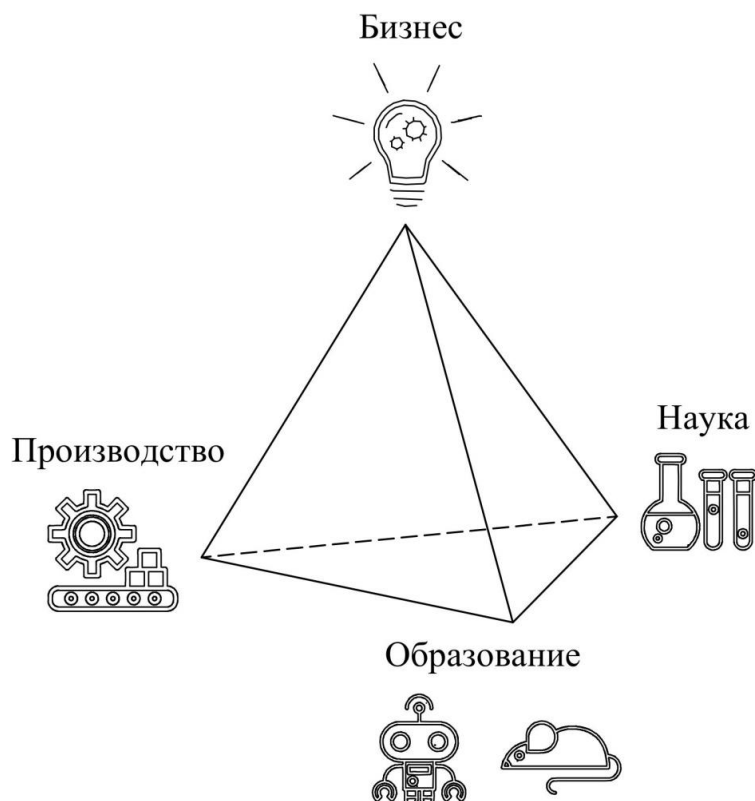


Рис. 3. Тетраэдр, символизирующий совместную работу и обмен знаниями между образованием, наукой и производством для создания и развития успешного бизнеса

Fig. 3. The tetrahedron symbolizing collaboration and knowledge exchange between education, science and industry to create and develop a successful business

Кто может создать новое высокотехнологическое предприятие, не обременённое ограничениями существующих предприятий? Какое направление деятельности будет жизнеспособно? Каков будет источник инвестиций? Каков будет срок их окупаемости?

В качестве ответов на эти вопросы можно привести общие соображения.

Деятельность нового высокотехнологического производства должна исходить из потребностей рынка, но рынок «голубого океана» заранее не существует, он может лишь зародиться в настоящее время. Поэтому необходимо правильно уловить рыночный тренд в ближайшей и среднесрочной перспективах. Необходимо найти команду из ученых и разработчиков, ведущих свою деятельность в прорывной области, подтвердивших свои компетенции высокорейтинговыми публикациями и зарегистрированной интеллектуальной собственностью, ведущих образовательную деятельность по подготовке будущих специалистов в своей области знаний и технологических компетенций, имеющих тесные контакты с бизнес-сообществом и промышленностью, а также демонстрирующих амбиции по выведению на рынок коммерчески успешных рыночных продуктов на основе своих разработок.

Деятельность по созданию такого высокотехнологического производства, начиная от стадии стартапа, не должна пересекаться, но должна быть полезна для деятельности существующих в регионе промышленных предприятий. Поскольку только ведущие вузы готовят специалистов, способных создать новые высокотехнологические предприятия, начальную стадию их деятельности наиболее оптимально проводить на базе Альма Матер.

Срок прохождения точки безубыточности нового высокотехнологического предприятия, как правило, составляет несколько лет, поэтому возврат государственных инвестиций или инвестиций на базе частного-государственного партнерства возможен в перспективе десяти лет и более.

Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы взаимоотношений высокотехнологических предприятий и вузов города Томска по подготовке востребованных специалистов на примере пилотной образовательной программы «Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии», разработанной преподавателями радиофизического факультета Томского государственного университета.

Отмечается, что одним из способов улучшения благосостояния населения Томска может быть создание новых высокотехнологических производств с использованием естественного миграционного притока молодежи, обучающейся в вузах, и существующей экосистемы научных организаций и высокотехнологических предприятий города.

Предложена концепция развития высокотехнологической экосистемы на основе треугольника Лаврентьева, но с добавлением бизнес-составляющей, представленная в виде тетраэдра.

Указывается на затруднения существующих промышленных предприятий по созданию принципиально новых продуктов и тенденцию поэтапного

улучшения уже созданных продуктов. Обосновывается необходимость преодоления барьеров сертификации для выведения на рынок решений, улучшающих продукцию высокотехнологических предприятий (например, с помощью государственного финансирования / софинансирования сертификации).

Показано, что создание университетских стартапов имеет важную функцию по формированию предпринимательского мышления молодежи.

Предлагается создавать новые высокотехнологические предприятия с горизонтом окупаемости более 10 лет для вывода на перспективные формирующиеся рынки новой высокотехнологической продукции с помощью государственного финансирования.

Список источников

1. *Распоряжение* Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 г.».
2. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Томской области. Население Томска. URL: <https://70.rosstat.gov.ru/folder/32175?ysclid=m4oaljw6ln154189586> (дата обращения: 02.12.2024).
3. Павлов Ю.В. Влияние численности населения на экономическую эффективность модели управления городской агломерацией // *Статистика и экономика*. 2017. №3. С. 92–104. doi: 10.21686/2500-3925-2017-3-92-104
4. Абрамова М.О., Рыкун А.Ю., Сухушина Е.В., Южанинов К.М. Образовательные, трудовые и миграционные ориентации студентов Томских университетов // *Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология*. 2014. Т. 25, № 1. С. 5–18.
5. Технологическое образование в России: взгляд на перспективы развития до 2030 года // *Учительская газета*. 28.12.2022. URL: <https://ug.ru/tehnologicheskoe-obrazovanie-v-rossii-vzglyad-na-perspektivy-razvitiya-do-2030-goda> (дата обращения: 10.12.2024).
6. Чан Ким У., Моборн Р. Стратегия голубого океана. / пер. с англ. М. : НІРРО, 2005. 272 с.
7. Бланк С., Дорф Б. Настольная книга основателя / пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. М. : Альпина Паблишер, 2014. 614 с.
8. Козлова О.А., Немчинова Н.А., Яковшиак О.Я. Модели и принципы формирования академических спин-офф: опыт Португалии // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2018. № 2. С. 50–55.
9. Латур Бр. Наука в действии: Следуя за учёными и инженерами внутри общества. СПб. : Издательство Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2013. 416 с.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023 No. 1315-r «On approval of the Concept of technological development for the period up to 2030».
2. Territorial agency of the Federal State Statistics Service for the Tomsk Region / Population of Tomsk. URL: <https://70.rosstat.gov.ru/folder/32175?ysclid=m4oaljw6ln154189586> (date of access 12.02.2024).
3. Pavlov, Yu.V. (2017) *Vliyaniye chislennosti naseleniya na ekonomicheskuyu effektivnost' modeli upravleniya gorodskoy aglomeratsiyey* [The influence of population on the economic efficiency of the metropolitan governance]. *Statistics and Economics*. 3. P. 92–104. (in Russian). doi: 10.21686/2500-3925-2017-3-92-104
4. Abramova, M.O., Rykun, A.U., Sukhushlna, E.V. & Uzhaninov, K.M. (2014) *Obrazovatel'nyye, trudovyye i migratsionnyye oriyentatsii studentov Tomskikh universitetov* [Contemporary regional students and their educational, employment and migration plans]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Sotsiologiya. Politologiya*. 25 (1). pp. 5–18. (in Russian).
5. *Tekhnologicheskoye obrazovaniye v Rossii: vzglyad na perspektivy razvitiya do 2030 goda* [Technological education in Russia: a look at development prospects until 2030] / *Uchitel'skaya gazeta*. URL: <https://ug.ru/tehnologicheskoe-obrazovanie-v-rossii-vzglyad-na-perspektivy-razvitiya-do-2030-goda> (date of access: 12.10.2024).
6. Chan Kim, W. & Mauborgne, R. (2005) *Blue ocean strategy: how to create uncontested market space and make the competition irrelevant*. Boston: Harvard Business School Press. 240 p.
7. Blank, S. & Dorf, B. (2012) *The Startup Owner's Manual: The Step-By-Step Guide for Building a Great Company*. Hoboken : Wiley. 634 p.
8. Kozlova, O.A., Nemchinova, N.A. & Yakovishak, O.Ya. (2018) *Modeli i printsipy formirovaniya akademicheskikh spin-off: opyt Portugali* [Models and principles of formation of academic spin-offs: the experience of Portugal]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2. pp. 50–55. (in Russian).
9. Latour, Br. (1987) *Science in Action: How follow scientists and engineers through society*. Boston: Harvard Business School Press. 274 p.

Информация об авторах:

Липатов Евгений Игоревич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых информационных технологий, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373

Маслова Юлия Валентиновна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yulya_maslova_86@inbox.ru. SPIN-код: 6919-4841

Ходова Юлия Владимировна – студент Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия).

Коротаев Александр Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, декан радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4655-3344

Доценко Ольга Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5598-1581

Васильев Александр Владимирович – заместитель генерального директора по научной работе АО «НИИПП» (Томск, Россия).

Садыков Глеб Ильдарович – старший научный сотрудник, директор Межвузовского бизнес-инкубатора «Дружба» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Lipatov Evgeny I., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory of quantum information technologies, associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); senior researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373

Maslova Yulia V., Cand. Sc. (Pedagogy), associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yulya_maslova_86@inbox.ru. SPIN-code: 6919-4841

Khodova Yulia V., Student of Omsk State University named after F.M. Dostoevsky (Omsk, Russian Federation).

Korotaev Alexander G., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, dean of the faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4655-3344

Dotsenko Olga A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, associate professor of the department of radioelectronics, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5598-1581

Vasiliev Alexander V., Deputy general director for scientific work of JSC NIIPP (Tomsk, Russian Federation).

Sadykov Gleb I., Senior researcher, director of the interuniversity business incubator «Druzhba» [«Friendship»], Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation).

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2024. № 8

Редактор К.Г. Шилько
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Редактор-переводчик А.П. Данилова

Подписано к печати 28.12.2024 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 10,5; усл. печ. л. 9,7.
Тираж 500 экз. Заказ № 6189. Цена свободная.

Дата выхода в свет 22.01.2025 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru