

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.

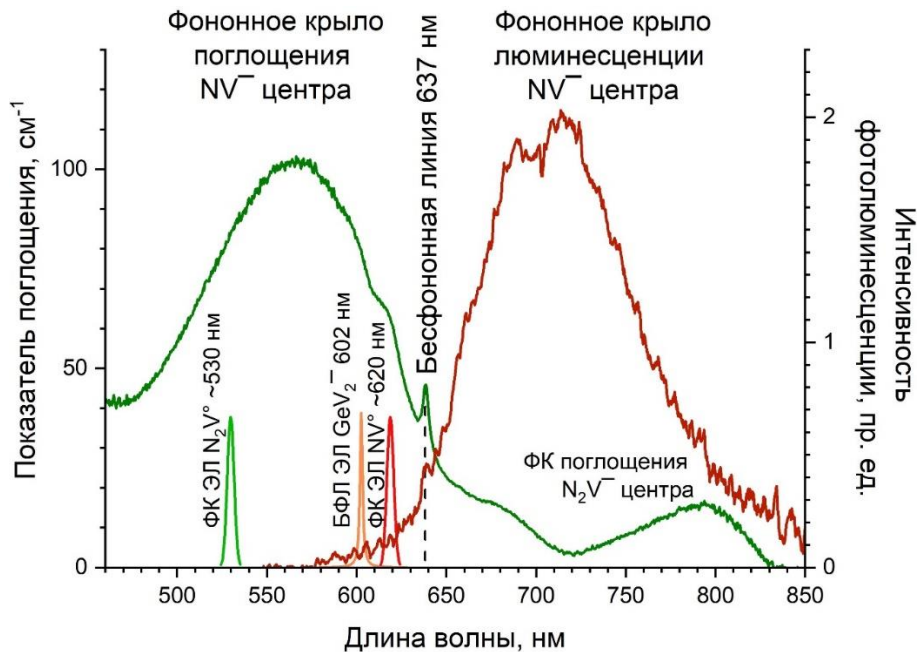


Рис. 1. Спектр оптического поглощения (слева) и спектр фотолюминесценции (справа) центра NV^- окраски алмаза с бесфононной линией на длине волны 637 нм. В области 520–640 нм показаны положения полос предполагаемой лазерной генерации центров окраски N_2V^+ (~530 нм), GeV_2^- (602 нм) и NV^0 (~620 нм),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

- Wiesner, S.J. (1983) Conjugate coding. *SIGACT News*. 15 (1). pp. 78–88.
- Feynman, R.P. (1982) Simulating physics with computers. *International journal of theoretical physics*. 21 (6/7). pp. 467–488.
- Gerck, Ed. Quantum computing (QC) has become a reality // LimledIn. URL: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7125215279688601600/> (date of access 01/13/2024)/
- 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).
- 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).
- Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin : Springer-Verlag. 502 p.
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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: 10.1117/12.3009421
- 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
- 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.
- 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
- 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
- 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
- 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.
- 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
- 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
- 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
- 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