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 Генин[1], Андрей Валерьевич Самолов[2]

[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. Genin[1], Andrey V. Samolov[2]

[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

© Д.Е. Генин, А.В. Самолов, 2024

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 zhiznedeyatelnosti – 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 сверхлюминесценции центров NV^- алмазного лазера при нагреве кристалла от 100 до 300 К. Показано, что полоса сверхлюминесценции 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, содержавший центры окраски H3. 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 H3 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 полувысоте. 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.

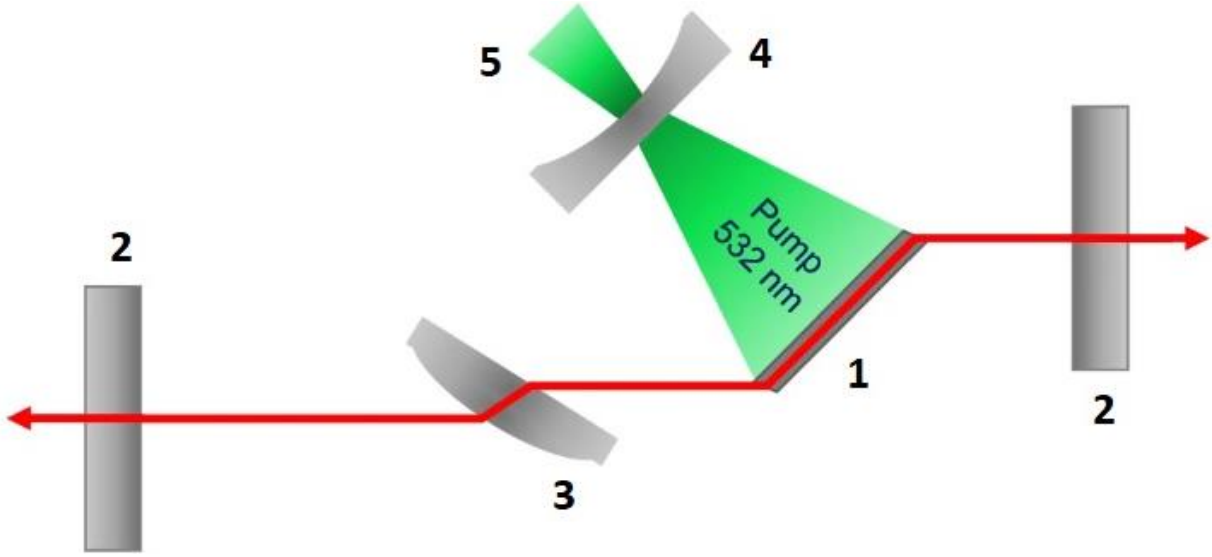


Рис. 1. Схема установки для получения лазерной генерации на алмазе с центрами NV^- [8]: *1* – алмазный образец; *2* – зеркало (R = 0,95); *3* – цилиндрическая линза (F = 15 мм); *4* – цилиндрическая линза; *5* – излучение накачки

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

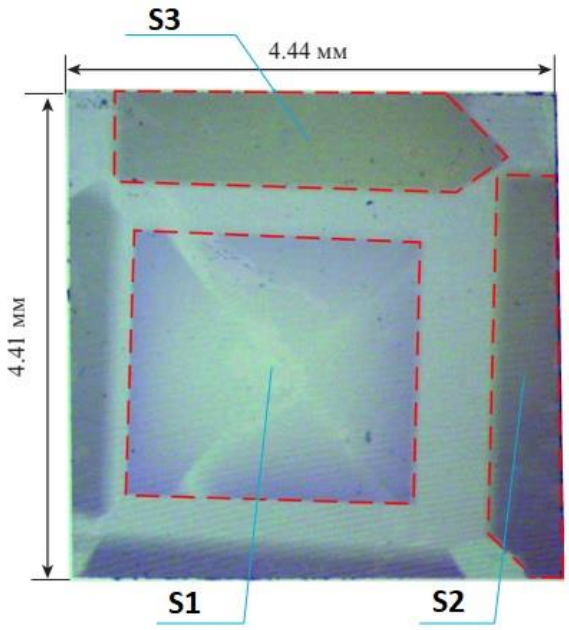


Рис. 2. Фотография алмазного образца с выраженной секторальностью [9]

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

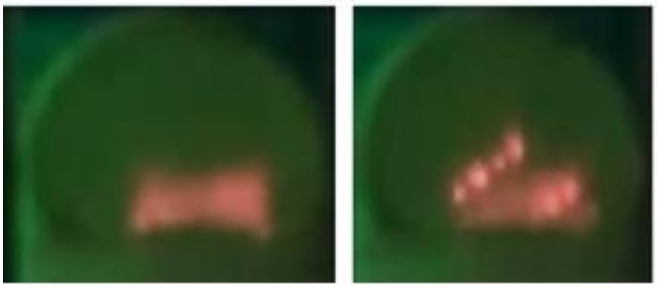
Накачка производилась по поперечной схеме импульсами лазерного излучения на длине волны 532 нм с длительностью на полувысоте около 10 нс. Во всех зонах наблюдалась люминесценция NV-центров. Однако в зонах S1 и S2 повышение интенсивности накачки даже до десятков МВт/см^2 приводило лишь к увеличению интенсивности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



a *b*

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

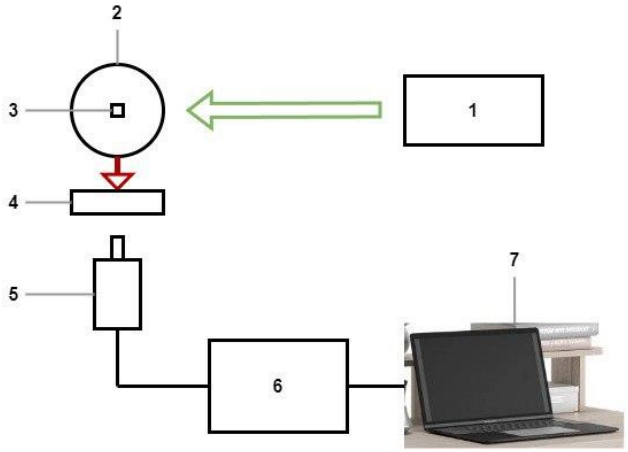


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: *1* – лазер накачки 532 нм; *2* – камера криостата; *3* – алмазный образец; *4* – фильтры; *5* – оптический волновод; *6* – спектрометр OceanOptics HR-2000; *7* – ПК

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/см^2 (т.е. на несколько порядков более слабое), то интенсивность ла-

зерной генерации на NV-центрах значительно возрастала. 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 см^2. 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 сверхлюминесценции (СЛ) алмазного образца С104, размеры которого составляют 3,8×3,3×1,1 мм^3, этот же кристалл использовался ранее в работе [11], где продемонстрировал лазерную генерацию с энергией импульса до 48 мкДж. В данной работе энергия импульсов накачки, наоборот, подбиралась таким образом, чтобы генерация осуществлялась в припороговом режиме, фактически можно говорить о работе в режиме сверхлюминесценции. 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. Сверхлюминесценция 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 сверхлюминесценции на две компоненты. Спектр, демонстрирующий данное явление, представлен на рис. 5.

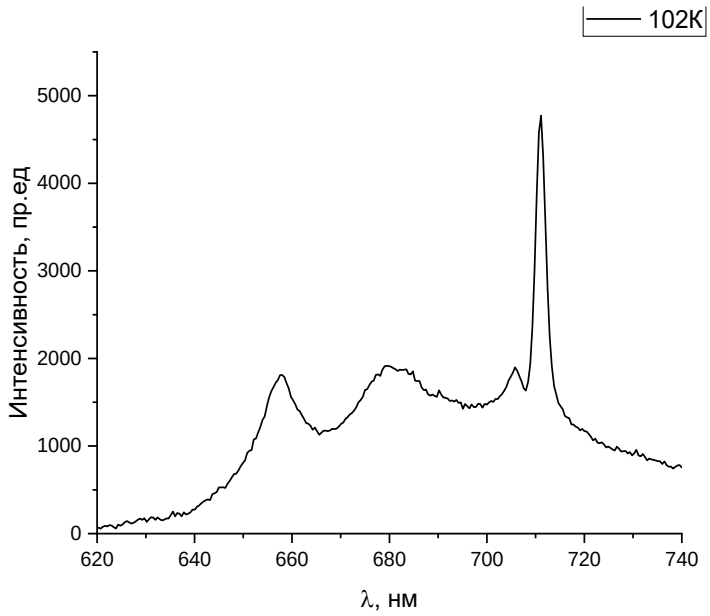


Рис. 5. Спектр сверхлюминесценции образца С104 при температуре 102 К

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 выдвинуто 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.

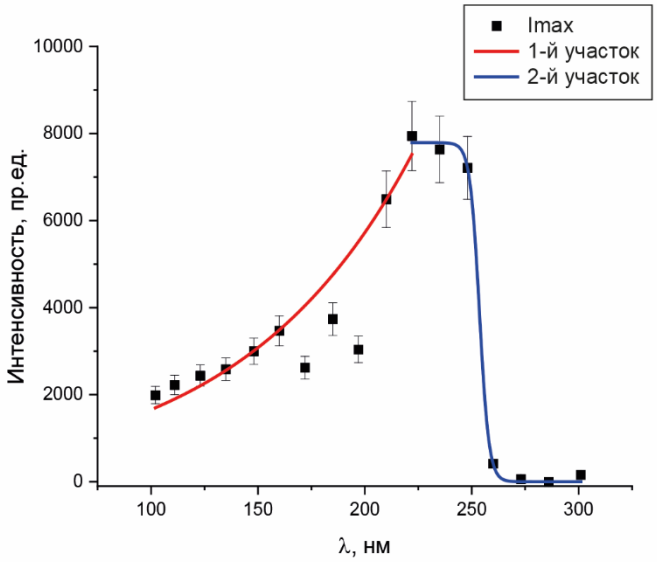


Рис. 6. Зависимость интенсивности длинноволновой компоненты сверхлюминесценции от температуры

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.

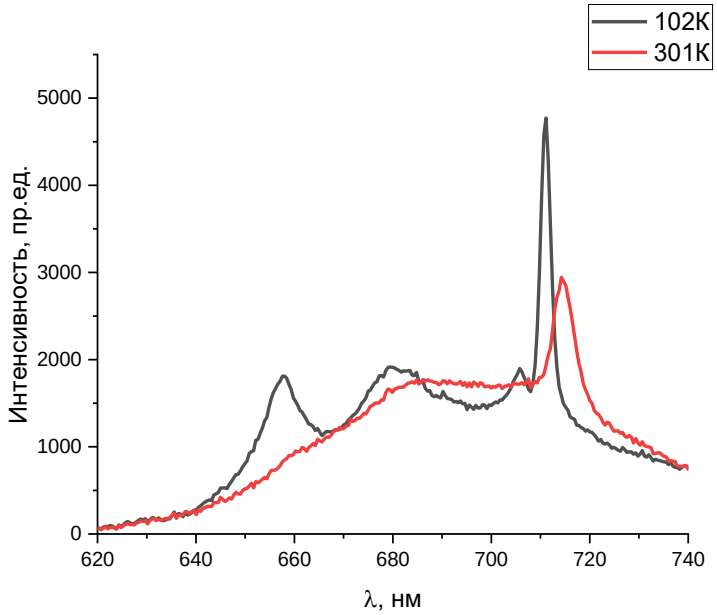


Рис. 7. Спектры сверхлюминесценции алмазного образца С104 при температурах 102 К и 301 К

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

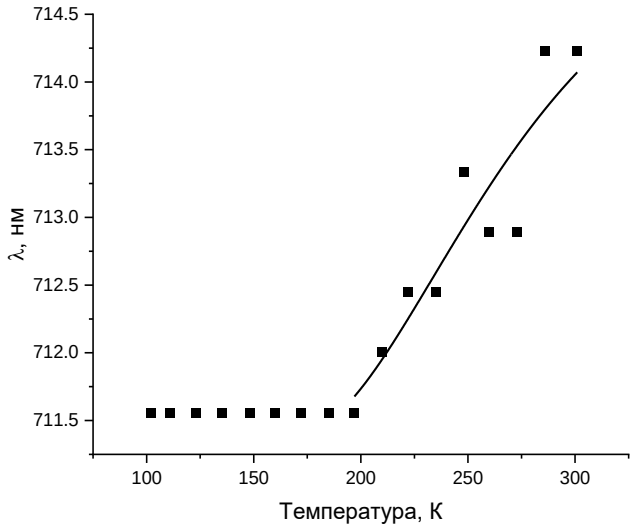


Рис. 8. Зависимость положения максимума полосы сверхлюминесценции от температуры

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

Заключение

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 полоса 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., Yelisseyev 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 фононном крыле спектра фотолюминесценции NV-центров в алмазе при оптической накачке на λ = 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., Yelisseyev 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., Yelisseyev 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