16,17

Управляемый фазовым переходом резонанс Фано в гибридных структурах опал VO_2

© С.А. Грудинкин[1], В.А. Климов[1], А.А. Кутузова[2], А.Б. Певцов[1], М.В. Рыбин[1], Е.Б. Шадрин[1], В.Г. Голубев[1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: grudink.gvg@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 8 сентября 2026 г.
В окончательной 23 сентября 2026 г.
Принята к публикации 23 сентября 2026 г.

Синтезированы и исследованы структурные и оптические свойства трехмерных фотонно-кристаллических гибридных структур, представляющих собой пленки синтетических опалов, покрытые слоем диоксида ванадия. Экспериментально продемонстрирована возможность управления оптическим откликом синтезированных структур за счет изменения диэлектрических констант VO_2 при фазовом переходе полупроводник–металл. При этом глубина модуляции коэффициента отражения в спектральной области фотонной стоп-зоны синтезированных структур достигала 13 dB. Показано, что концепция резонанса Фано позволяет объяснить наблюдаемую трансформацию спектров.

Ключевые слова: фотонный кристалл, оптический отклик, опал, диоксид ванадия, фазовый переход полупроводник–металл.

DOI: 10.61011/FTT.2026.10.64102.10618

1. Введение

Синтетические опалы широко используются в качестве модельных объектов для исследования фундаментальных особенностей распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах (ФК) [1–3]. Благодаря периодической модуляции диэлектрической проницаемости в опалоподобных ФК формируются энергетические запрещенные зоны для фотонов в определенном направлении (стоп-зоны), наличие которых позволяет реализовать контроль и управление световыми потоками внутри ФК и открывает пути их применения в приложениях [2–6]. Управление фотонно-кристаллическими характеристиками опалов возможно как введением в опаловые поры различных функциональных материалов [3,7], так и нанесением на поверхность опала металлических или диэлектрических пленок [8].

В настоящей работе показано, что управление оптическим откликом ФК реализуется в гибридной структуре, состоящей из пленки опала, покрытой 100-нанометровым слоем VO_2, в котором происходит фазовый переход полупроводник–металл.

Ранее [9,10] было установлено, что естественная неупорядоченность опалоподобных ФК приводит к дополнительному светорассеянию, которое создает оптический фон. В результате узкие полосы стоп-зон ФК накладываются на этот фон, вызывая резонанс Фано, форма которого определяется геометрическими характеристиками и диэлектрическими константами ФК. Нанесение диэлектрической пленки на поверхность ФК обеспечивает дополнительную степень свободы в выборе параметров гибридной структуры и, тем самым, влияет на форму оптического резонанса.

Диоксид ванадия рассматривается как перспективный материал для управления свойствами ФК и метаповерхностей при воздействии нагрева, давления, электрического поля, электромагнитного излучения и т. п. [11–13]. Поскольку VO_2 обладает обратимым фазовым переходом полупроводник–металл при температуре 67 °C [14,15], который сопровождается значительным изменением его диэлектрической проницаемости, то термическое воздействие приводит к радикальному изменению формы резонанса Фано в спектральной области стоп-зоны гибридной структуры опал|VO_2. Подчеркнем, что уникальность фазового перехода в VO_2 заключается, помимо прочего, в сверхбыстрой кинетике его совершения: время перехода в металлическую фазу из полупроводниковой при фотоиндуцированном возбуждении составляет сотни фемтосекунд [7,16].

Настоящее исследование посвящено изучению специфики оптического отклика пространственно-периодических гибридных структур „пленка опала + пленка VO_2“ при фазовом переходе полупроводник–металл.

2. Образцы и методика эксперимента

Процесс формирования гибридной структуры опал|VO_2 состоял из двух этапов.

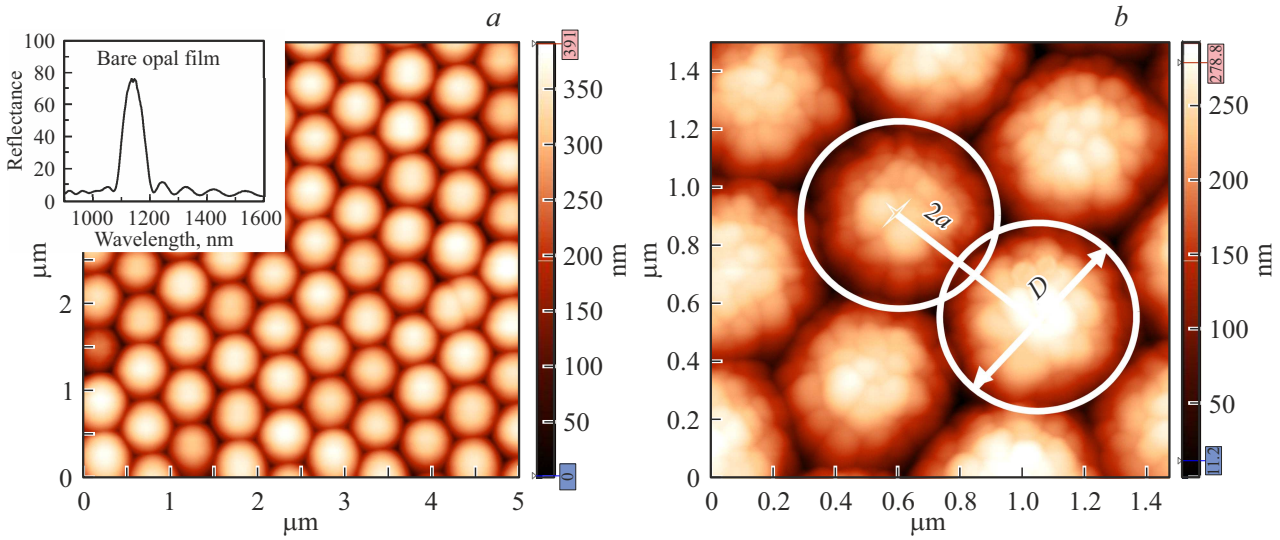


Рис. 1. *a* — АСМ-изображение поверхности исходной пленки опала после двухстадийной термобарической обработки, вставка — спектр отражения в области стоп-зоны; *b* — АСМ-изображение поверхности гибридной структуры опал|VO_2, белые окружности — диаграмма, поясняющая определение коэффициента спекания χ [20].

На первом этапе для уменьшения влияния термических воздействий на структурное совершенство пленок опала в работе использовался метод их двустадийной термообработки [17]. На первой стадии проводился отжиг сфер аморфного кремнезема (a-SiO_2) с их последующим редиспергированием до получения золя из термообработанных частиц. Температура отжига выбиралась в диапазоне 700–750 °C. Далее проводилось восстановление ионной атмосферы частиц путем обработки в аммиачно-спиртовой среде с добавлением воды и тетраэтоксисила́на. Затем полученный алкозоль использовался для выращивания пленки опала методом жидкофазной коллоидной эпитаксии отожженных сфер a-SiO_2 на вертикально ориентированной кварцевой подложке [1,3]. На второй стадии в атмосфере паров H_2O при температуре 350–450 °C и давлении в диапазоне 300–400 atm проводился термобарический отжиг выращенных пленок в течение 3–4 h. После проведения двустадийной термообработки структурное совершенство матрицы опала и, соответственно, его фотонно-кристаллические свойства сохранялись вплоть до температуры нагрева $\sim$ 850 °C [18].

На втором этапе методом лазерной абляции (ЛА) на поверхности опаловой пленки был синтезирован слой диоксида ванадия толщиной 100 nm [19]. При синтезе использовался импульсный лазер на YAG:Nd с длительностью импульса 50 ns и частотой повторений 2 Hz. Луч лазера расщеплялся на две компоненты, фокусируемые на поверхности двух вращающихся мишеней из металлического ванадия 10 mm диаметром.

Каждый лазерный импульс формировал два факела микрочастиц металлического ванадия, распространявшихся в направлении мишени под углом 30° к вертикали. Факелы сталкивались на высоте 15 cm от плоскости расположения, формируя строго вертикальный поток наночастиц металлического ванадия.

На расстоянии 3 cm от зоны столкновения факелов горизонтально располагалась нагретая до 750 °C пленка опала, на поверхности которой формировался слой диоксида ванадия толщиной 100 nm.

В результате примененных модификаций метода ЛА удалось для сферических элементов пленки опала с диаметром $\sim$ 500 nm обеспечить их покрытие несоединенными друг с другом нанокристаллитами диоксида ванадия со средним диаметром 90 nm.

Спектральный отклик образцов измерялся в диапазоне 900–1700 nm автоматизированным мини-спектрометром фирмы „OceanOptics“ NIR512, снабженным фотоприемной CCD-линейкой (charge-coupled device) на основе InGaAs. Измерения проводились при угле падения света $\varphi = 10°$ в конфигурации, при которой плоскость падения света перпендикулярна плоскости (111) опала. Азимутальная ориентация образцов контролировалась по картине оптической дифракции от регулярной решетки опаловой пленки.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, *a* представлены данные атомно-силовой микроскопии (АСМ) для исходной пленки опала после двухстадийной термической обработки. Коэффициент спекания $\chi = 1.1\,\%$ определялся из соотношения [20]:

$$\chi = \frac{D}{2a} - 1, \qquad (1)$$

где D — диаметр опаловых сфер, $2a$ — расстояние между центрами сфер после спекания (рис. 1, *b*). На вставке (рис. 1, *a*) представлен спектр отражения пленки

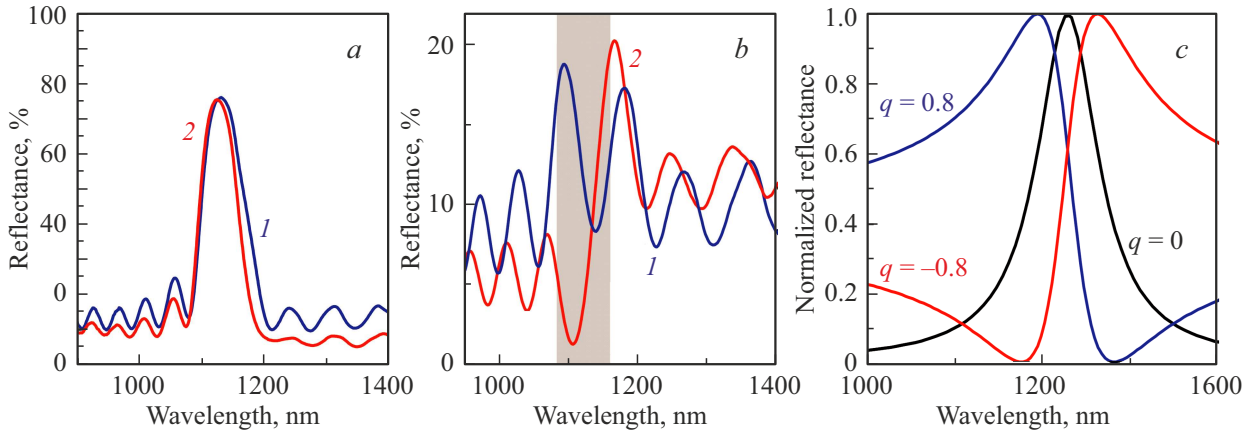


Рис. 2. Спектры отражения гибридной структуры опал|VO_2, измеренные под углом падения 10° *a* — со стороны подложки и *b* — со стороны пленки, при комнатной температуре (кривые *1*) и при $T = 86\,^{\circ}$C (кривые *2*); серый прямоугольник на панели (*b*) выделяет спектральную область, которая анализировалась с помощью формулы Фано (см. текст). *c* — контур резонанса Фано при различных значениях параметра асимметрии q (без учета диссипативных потерь).

опала, подвергнутой двухстадийной термической процедуре. Значение коэффициента отражения ($R \approx 80\,\%$) в спектральной области стоп-зоны опалоподобного ФК свидетельствует о высоком совершенстве синтезированных образцов гибридных структур, причем рентгеноструктурный анализ показывает, что пленки VO_2 являются нанокристаллическими со средним размером кристаллитов 90 ± 4 nm, что согласуется с данными АСМ.

На рис. 2, *a* и *b* представлены спектры отражения гибридной структуры опал|VO_2, измеренные при двух температурах: 26 °C, VO_2 в полупроводниковой фазе (кривая *1*) и 86 °C, VO_2 в металлической фазе (кривая *2*). Измерения проведены как со стороны подложки (*a*), так и со стороны пленки (*b*). Рис. 2 показывает, что спектр отражения (кривая *1*) гибридной структуры, измеренный со стороны подложки, соответствует спектру чистой опаловой пленки. Количество слоев, рассчитанное из анализа интерференционной картины, составило 16 единиц. При таком числе слоев свет практически не достигает противоположной стороны структуры [21], и пленка VO_2 не вносит вклада в конструктивную интерференцию, формирующую стоп-зону ФК. Наблюдаемые незначительные изменения в интенсивности спектров при фазовом переходе (рис. 2, *a*), по-видимому, связаны со смещением образца при нагреве. При измерении спектра со стороны пленки VO_2 (рис. 2, *b*, спектр *2*) его форма претерпевает радикальные изменения, которые интерпретируются как проявление резонанса Фано в исследуемой структуре [2,10,22]. Отметим, что наличие диссипации энергии, обусловленной поглощением излучения в пленке VO_2, приводит к существенной модификации классической формы контура резонанса Фано, детально описанной в [23,24]. На рис. 2, *c* показаны контуры Фано без учета диссипации для отрицательного (синий), положительного (красный) параметра асимметрии q и для симметричной квазилоренцевской кривой $q = 0$ (черный).

Рассмотрим далее детально (рис. 3) трансформацию спектров отражения гибридной структуры опал|VO_2 при изменении температуры в диапазоне 26–86 °C, перекрывающем область фазового перехода полупроводник–металл в VO_2.

Представленные данные демонстрируют качественное согласие с кривыми, построенными по классической формуле Фано (без учета диссипации) для разных значений параметра асимметрии q:

$$I(\omega) = \frac{(q + \Omega)^2}{(1 + q^2)(1 + \Omega^2)}, \qquad (2)$$

где $\Omega = (\omega - \omega_0)/(\gamma/2)$, а ω_0 и γ — спектральное положение центра и ширина стоп-зоны ФК соответственно. Рисунок показывает, что при фазовом переходе спектр в спектральной области стоп-зоны полностью опрокидывается: максимум превращается в минимум. Амплитуда модуляции коэффициента отражения достигает ~ 13 dB. Также отчетливо наблюдается гистерезис изменения формы спектров, проявляющийся в виде сдвига в низкотемпературную сторону при охлаждении образца, характерный для фазового перехода в диоксиде ванадия.

Теоретическое описание представленных результатов является весьма сложной задачей, поскольку исследуемая гибридная структура является существенно неоднородной. Численное моделирование спектров может быть эффективно выполнено лишь с учетом реальных деталей пространственного распределения VO_2 по поверхности опаловых сфер (рис. 1). Поэтому мы ограничиваемся анализом, основанным на использовании формулы Фано, который, тем не менее, позволяет дать хотя и качественную, но наглядную интерпретацию экспериментальных результатов.

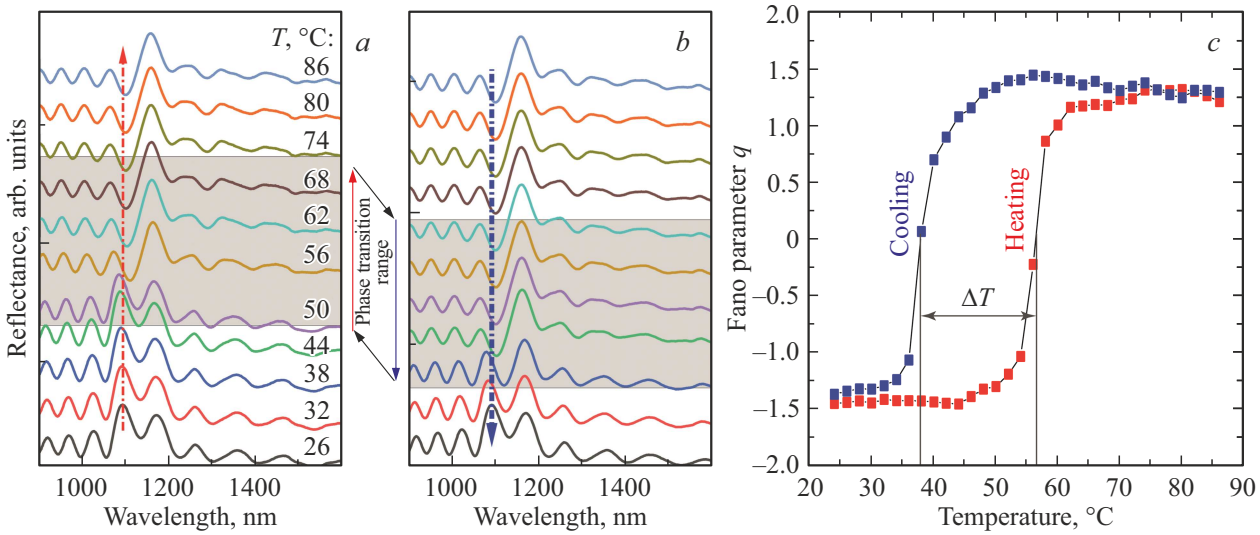


Рис. 3. Спектры отражения гибридной структуры опал|VO_2, измеренные в диапазоне температур 25–90 °C: *a* — нагревание, *b* — охлаждение. Все спектры сдвинуты по оси ординат для удобства сравнения. Серым цветом выделены области температурного интервала фазового перехода полупроводник–металл в исследуемой структуре. *c* — термический гистерезис параметра асимметрии $q(T)$, полученный путем сопоставления экспериментальных кривых $R(T)$ с данными, получаемыми на основе формулы Фано.

Изменение формы спектральной линии измеренных спектров отражения в диапазоне от 26 до 86 °C при нагреве и последующем охлаждении было проанализировано с помощью аппроксимации спектрального пика формулой Фано. После каждого шага изменения температуры величиной $\Delta T = 2\,^{\circ}\mathrm{C}$ извлекался параметр Фано q, построенная температурная зависимость которого демонстрирует симметричную петлю термического гистерезиса.

Рассмотрим характерные особенности петли термического гистерезиса параметра Фано (рис. 3, *c*): i) середина нагревной ветви петли сдвинута от температуры фазового перехода в монокристалле диоксида ванадия $T_c = 67\,^{\circ}\mathrm{C}$ до температуры 57 °C в сторону низких температур на 10 °C; ii) петля гистерезиса симметрична, т. е. нагревная и охладительная ветви петли гистерезиса располагаются строго параллельно друг другу; iii) ширина петли значительная и составляет $\Delta T = 19\,^{\circ}\mathrm{C}$; iv) ширина близких к вертикальным участкам ветвей петли мала и составляет 4 °C. Зависимость $q(T)$ согласуется с изменением формы резонансных особенностей в спектрах отражения.

Значительный сдвиг петли гистерезиса в сторону низких температур по отношению к петле стехиометричного монокристалла VO_2 свидетельствует о наличии в пленке VO_2 большой концентрации дефектов донорного типа, эффективно понижающих температуру равновесия фаз элементарных петель гистерезиса, формирующих главную петлю [25]. Наиболее вероятное предположение о природе дефектов донорного типа, сдвигающих суммарную петлю в сторону низких температур, сводится к утверждению о наличии в пленке VO_2 дефектов нестехиометрии в виде кислородных вакансий, выполняющих функцию доноров [26]. Их возникновение и распределение по энергии обусловлено активным взаимодействием диоксида ванадия в процессе его осаждения с поверхностью сфер a-SiO_2, формирующих пространственно-упорядоченную пленку опала. Детальный анализ возникновения описанных особенностей выходит за рамки настоящей работы и будет рассмотрен в отдельной публикации.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе развит усовершенствованный вариант технологии синтеза гибридных термостойких высокоупорядоченных фотонно-кристаллических структур, представляющих собой пленки опала, покрытые слоем нанокристаллитов диоксида ванадия. Поскольку слой диоксида ванадия синтезировался методом лазерной абляции путем облучения опаловой мишени узким потоком плазменных V-факелов, это обусловило пренебрежимо малый разброс нанокристаллитов VO_2 по их диаметрам. Что, в свою очередь, обеспечило предельно малую температурную протяженность ветвей петли гистерезиса параметра Фано, предоставляя возможность высокоточного термического управления параметрами отклика гибридной структуры опал|VO_2 на внешнее оптическое воздействие.

Также экспериментально продемонстрирована возможность использования гибридных структур опал|VO_2 для модуляции световых потоков в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. Установлено, что управление параметрами оптического отклика в процессе модуляции достигается за счет вариации оптических

констант при совершении термического фазового перехода полупроводник–металл в слое VO_2.

Наблюдаемые эффекты хорошо описываются в рамках квазиодномерной теоретической модели. Изменения при фазовом переходе показателя преломления слоя VO_2 вносят значительные изменения в разность фаз между электромагнитными колебаниями, порождаемыми брэгговским отражением оптического излучения от пленки опала и отражением от слоя VO_2. Это обуславливает существенную модификацию спектрального профиля, описываемого резонансом Фано. В результате, при использованной в экспериментах толщине пленки VO_2 (100 nm), параметр асимметрии q демонстрирует изменение знака как на этапе нагревания, так и на этапе охлаждения в процессе фазового перехода в нанокристаллитах диоксида ванадия. Это приводит к радикальной модификации спектрального профиля, вызванного интерференцией Фано. Достигнутая глубина модуляции сигнала оптического отклика составила ~ 13 dB.

Необходимо особо отметить важные в практическом отношении особенности гибридных структур опал|VO_2: 1) масштабируемость фотонно-кристаллических свойств [27], обеспечивающую удобство перестроения спектральной области стоп-зоны в диапазоне 500–2000 nm за счет вариации диаметра опаловых сфер; 2) фемтосекундный временной масштаб совершения фазового перехода в VO_2, что позволяет рассматривать структуры опал|VO_2 как перспективную платформу для развития высокоскоростной нанофотоники.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFUG-2024-0017.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D.J. Norris, E.G. Arlinghaus, L. Meng, R. Heiny, L.E. Scriven. Adv. Mater. **16**, *16*, 1393 (2004).
[2] Optical Properties Of Photonic Structures: Interplay of Order and Disorder / Eds M.F. Limonov, R.M. De La Rue. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA (2012). 514 p.
[3] E. Armstrong, C. O'Dwyer. J. Mater. Chem. C **3**, *24*, 6109 (2015).
[4] X. Lv, B. Zhong, Y. Huang, Z. Xing, H. Wang, W. Guo, X. Chang, Zh. Zhang. Chin. J. Mech. Eng. **36**, *1*, 39 (2023).
[5] Z. Qian, L. Shan, X. Zhang, Q. Liu, Y. Ma, Q. Gong, Y. Gu. PhotoniX **2**, *1*, 21 (2021).
[6] A.I. Kuznetsov, M.L. Brongersma, J. Yao, M.K. Chen, U. Levy, D.P. Tsai, N.I. Zheludev, A. Faraon, A. Arbabi, N. Yu, D. Chanda, K.B. Crozier, A.V. Kildishev, H. Wang, J.K.W. Yang, J.G. Valentine, P. Genevet, J.A. Fan, O.D. Miller, A. Majumdar, J.E. Fröch, D. Brady, F. Heide, A. Veeraraghavan, N. Engheta, A. Aluù, A. Polman, H.A. Atwater, P. Thureja, R. Paniagua-Dominguez, S.T. Ha, A.I. Barreda, J.A. Schuller, I. Staude, G. Grinblat, Y. Kivshar, S. Peana, S.F. Yelin, A. Senichev, V.M. Shalaev, S. Saha, A. Boltasseva, J. Rho, D.K. Oh, J. Kim, J. Park, R. Devlin, R.A. Pala. ACS Photonics **11**, *3*, 816 (2024).
[7] A.B. Pevtsov, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev, A.V. Akimov, A.M. Meluchev, A.V. Sel'kin, A.A. Kaplyanskii, D.R. Yakovlev, M. Bayer. Phys. Rev. B **75**, *15*, 153101 (2007).
[8] L. Landstrō m, N. Arnold, D. Brodoceanu, K. Piglmayer, D. Bäuerle. Appl. Phys. A **83**, *2*, 271 (2006).
[9] M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, A.K. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov. Phot. Nano. Fund. Appl. **8**, *2*, 86 (2010).
[10] M.F. Limonov, M.V. Rybin, A.N. Poddubny, Y.S. Kivshar. Nature Photon. **11**, *9*, 543 (2017).
[11] Y. Wu, W. Tao, F. Zhao, C. Li, B. Fang, P. Zhang, Z. Hong, X. Jing, M. Yu. Opt. Laser Technol. **179**, 111376 (2024).
[12] I.O. Oguntoye, S. Padmanabha, M. Hinkle, T. Koutsougeras, A.J. Ollanik, M.D. Escarra. ACS Appl. Mater. Interfaces **15**, *34*, 41141 (2023).
[13] J. Zhu, R. Zeng, Y. Yang, Y. Zhou, Z. Gao, Q. Wang, R. Hong, D. Zhang. Crystals **14**, *12*, 1096 (2024).
[14] F.J. Morin. Phys. Rev. Lett. **3**, *1*, 34 (1959).
[15] H.V. Verleur, A.S. Barker Jr, C.N. Berglund. Phys. Rev. **172**, *3*, 788 (1968).
[16] A. Cavalleri, C. Tóth, C.W. Siders, J.A. Squier, F. Ráksi, P. Forget, J.C. Kieffer. Phys. Rev. Lett. **87**, *23*, 237401 (2001).
[17] А.Б. Певцов, С.А. Грудинкин, Н.А. Поддубный, С.Ф. Каплан, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. ФТП **44**, *12*, 1585 (2010). [A.B. Pevtsov, S.A. Grudinkin, A.N. Poddubny, S.F. Kaplan, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Semiconductors **44**, *12*, 1537 (2010).]
[18] S.A. Grudinkin, S.F. Kaplan, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. J. Phys. Chem. C **112**, *46*, 17855 (2008).
[19] А.В. Ильинский, Е.Б. Шадрин. ФТТ **65**, *3*, 460 (2023). [A.V. Ilinskiy, E.B. Shadrin. Phys. Solid State **65**, *3*, 450 (2023).]
[20] G.M. Gajiev, V.G. Golubev, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin, V.V. Travnikov. Phys. Rev. B **72**, *20*, 205115 (2005).
[21] P. Jiang, J.F. Bertone, K.S. Hwang, V.L. Colvin. Chem. Mater. **11**, *8*, 2132 (1999).
[22] W. Zhou, D. Zhao, Y.-C. Shuai, H. Yang, S. Chuwongin, A. Chadha, J.-H. Seo, K.X. Wang, V. Liu, Z. Ma, S. Fan. Prog. Quantum Electron. **38**, *1*, 1 (2014).
[23] N. Caselli, F. Intonti, F. La China, F. Biccari, F. Riboli, A. Gerardino, L. Li, E.H. Linfield, F. Pagliano, A. Fiore, M. Gurioli. Nature Commun. **9**, *1*, 396 (2018).
[24] S. Chen, Y. Gao, K. Sun, Q. Zhang, Z. Ye, Q. Fu, Y. Fan, F. Zhang. Discov. Appl. Sci. **6**, *1*, 6 (2024).
[25] О.П. Виноградова, А.И. Сидоров, В.А. Климов, Е.Б. Шадрин, А.В. Нащекин, С.Д. Ханин, В.Ю. Любимов. ФТТ **50**, *7*, 1177 (2008). [O.P. Vinogradova, A.I. Sidorov, V.A. Klimov, E.B. Shadrin, A.V. Nashchekin, S.D. Khanin, V.Yu. Lyubimov. Phys. Solid State **50**, *7*, 1227 (2008).]
[26] A.V. Ilinskiy, O.E. Kvashenkina, E.B. Shadrin. Smart Nanocomposites **7**, *1*, 69 (2016).
[27] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton, NJ (2008). 285 p.

Редактор Е.В. Толстякова