Усиление люминесцентного отклика субволновых решеток из Si-дисков со встроенными GeSi-квантовыми точками при переходе от простой решетки к решетке с базисом

© В.А. Зиновьев[1], Ж.В. Смагина[1], С.А. Рудин[1], А.Ф. Зиновьева[1,2], А.В. Ненашев[1,2], Е.Е. Родякина[1,2], С.А. Дьяков[3], И.А. Смагин[3], М.В. Степихова[4], А.В. Новиков[4]

[1] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российский академии наук, 630090 Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия
[3] Центр фотоники и квантовых материалов, Сколковский институт науки и технологий, 143026 Москва, Россия
[4] Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: zinoviev@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 28 октября 2025 г.
В окончательной редакции 26 ноября 2025 г.
Принята к публикации 31 декабря 2025 г.

Исследовано влияние изменения базиса решетки фотонного кристалла на люминесцентные свойства встроенных в них излучателей. Фотонные кристаллы представляли собой субволновые квадратные решетки из Si-дисков со встроенными в них GeSi-квантовыми точками. Базис менялся за счет изменения размера дисков в одной из подрешеток с удвоенным периодом. Исследование методом микро-фотолюминесценции показало, что такое изменение структуры фотонного кристалла приводит к многократному усилению интенсивности отдельных пиков фотолюминесценции в области излучения GeSi-квантовых точек. Теоретический расчет излучательной способности исследуемых структур подтверждает, что в основе обнаруженного эффекта лежит увеличение локальной плотности оптических состояний в модифицированной структуре.

Ключевые слова: люминесценция, квантовые точки, фотонный кристалл, связанные состояния в континууме.

DOI: 10.61011/FTP.2025.10.62343.8707

1. Введение

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в применении фотонных кристаллов (ФК) и метаповерхностей для разработки различных фотонных устройств (лазеров, фотодетекторов, волноводов и других элементов, необходимых для построения оптических схем связи и обработки информации), работающих в телекоммуникационном диапазоне [1–9]. В таких системах могут наблюдаться высокодобротные состояния с очень низкими радиационными потерями, в пределе стремящимися к нулю [1,2,4–7], которые принято называть связанными состояниями в континууме (ССК).

Существуют два основных вида ССК. Первый вид ССК обусловлен запретом на излучение в дальнее поле из-за несовпадения симметрии фотонных состояний (собственных мод) внутри периодической структуры и мод, распространяющихся в свободном пространстве. Такой вид ССК принято называть симметрийно-защищенным. Второй вид ССК реализуется при определенных параметрах системы (например, при определенном угле падения света), когда возникает деструктивная интерференция резонансов, приводящая к образованию „темных“ (неизлучающих) состояний. Понижение симметрии собственных мод ФК может ослабить запрет на излучение в дальнее поле и таким образом сильно модифицировать спектральные характеристики выходящего из структуры излучения. В работах [6,8–10] было показано, что изменение симметрии ФК за счет деформации решетки или модификации формы составляющих элементов ФК сильно меняет зонную структуру ФК, приводя к снятию вырождения и открытию запрещенных зон. В работе [6] продемонстрировано, что такие изменения в структуре ФК приводят к усилению интенсивности фотолюминесценции на определенных длинах волн. В теоретических работах [9,10] для ФК, представляющих собой квадратные решетки из диэлектрических цилиндров, было получено, что модификация структуры ФК за счет изменения размеров цилиндров в двух подрешетках, составляющих фотонный кристалл, приводит к снятию вырождения зон и открытию новых фотонных запрещенных зон, отсутствующих в структуре из одинаковых цилиндров. При переходе от решетки одинаковых цилиндров к структуре из двух подрешеток с цилиндрами разных размеров остается только половина всех элементов симметрии пространственной группы, а именно только те элементы, которые не меняют местами две подрешетки. Можно предположить, что такая модификация структуры ФК окажет значительное влияние на излучательные свойства системы.

В данной работе были исследованы фотонные кристаллы, представляющие собой субволновые квадратные решетки из Si-дисков со встроенными в них GeSi-квантовыми точками. Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния модификации базиса решетки фотонного кристалла за счет изменения диаметра дисков в одной из подрешеток на люминесцентные свойства встроенных излучателей.

2. Методика эксперимента

Рост структур с GeSi-квантовыми точками (КТ) выполнялся на подложке кремний-на-изоляторе с верхним слоем Si толщиной 240 нм и подслоем SiO_2 толщиной 3 мкм. На данной подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии при 500 °C со скоростью 0.6 Å/c выращивался буферный слой Si толщиной 110 нм. Далее при температуре 600 °C были выращены 10 слоев GeSi КТ, разделенных кремниевыми слоями толщиной 15 нм. Каждый слой КТ был сформирован путем осаждения 7 монослоев Ge со скоростью роста 0.15 Å/c. Рост структур заканчивался осаждением покровного слоя Si толщиной 20 нм. Разделительные и покровный слои Si выращивались со скоростью 0.6 Å/c. Общая толщина многослойной структур составляла 480 нм.

Формирование фотонных кристаллов на выращенных структурах включало несколько этапов. На первом этапе с помощью электронной литографии, магнетронного осаждения пленки хрома и взрывной литографии была сформирована металлическая маска. На втором этапе с помощью плазмохимического травления через металлическую маску [11] были сформированы ФК в виде квадратных решеток из кремниевых дисковых резонаторов со встроенными в них GeSi КТ. Заключительный этап включал в себя удаление остатков металлической маски хрома методом жидкостного травления. Были сформированы ФК двух типов: 1) ФК, в которых все дисковые резонаторы имели одинаковый диаметр $D_1 = 900$ нм, 2) ФК с модифицированной кристаллической структурой, которые представляли собой две квадратные решетки дисков с разными диаметрами ($D_1 = 900$ нм и $D_2 = 870$ нм), вставленные друг в друга (см. вставку на рис. 1). Согласно исследованию методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), дисковые резонаторы имели вертикальные боковые стенки с малой шероховатостью, а их высота составляла ≈ 480 нм, что соответствует полной толщине исследуемой структуры над скрытым слоем окисла. Для ФК второго типа относительное несовпадение диаметров дисков $\Delta D = (D_1 - D_2)/D_1$ составило $\sim 3\,\%$. Период обоих типов ФК был равен 1 мкм. Люминесцентные свойства ФК структур исследовались методом микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ). Сигнал микро-ФЛ возбуждался непрерывным лазером на длине волны 532 нм. Лазерное излучение фокусировалось в пятно размером ~ 10 мкм с помощью объектива „Mitutoyo" M Plan APO NIR 10x (NA = 0.26) с десятикратным увеличением. Мощность фотовозбуждения составляла 15 мВт. Спектры микро-ФЛ измерялись с разрешением 4 $см^{-1}$. Все измерения проводились при комнатной температуре. Теоретические расчеты зонных диаграмм и излучательной способности фотонных кристаллов, представленных квадратными решетками дисковых резонаторов, выполнялись Фурье-модальным методом в форме матрицы рассеяния [12,13]. Показатели преломления и коэффициенты экстинкции для Si и SiO_2, используемые при проведении расчетов, выбирались в соответствии с данными работ [14,15].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны спектры микро-ФЛ ФК с одинаковыми диаметрами дисков (синяя сплошная линия) и ФК с модифицированной структурой (красная пунктирная линия), а также спектр исходной структуры без ФК (серая сплошная линия). В спектре микро-ФЛ исходной структуры хорошо видны два пика: пик вблизи 1060 мэВ, связанный с сигналом от кремния, и широкий пик вблизи 800–1000 мэВ, связанный с излучательной рекомбинацией носителей заряда в GeSi КТ [6,7,11]. В спектрах микро-ФЛ немодифицированного ФК наблюдаются три интенсивных пика P_1, P_2 и P_3 при энергиях 864, 947 и 1005 мэВ соответственно. Также наблюдается ряд менее интенсивных пиков S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 при 812,

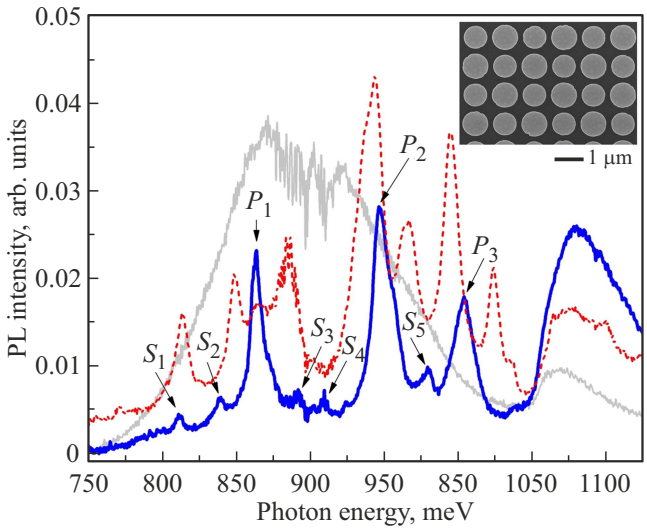


Рис. 1. Спектры микро-ФЛ тестового ФК с решеткой из дисков одного диаметра (синяя сплошная линия), ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров (красная пунктирная линия) и спектр исходной структуры без ФК (серая сплошная линия). Спектры измерены при температуре 300 K. Мощность лазерного фотовозбуждения — 15 мВт. На вставке к рисунку показано СЭМ-изображение (вид сверху) фотонного кристалла с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Диаметры дисков в двух подрешетках, образующих ФК, составляют $D_1 = 900$ нм и $D_2 = 870$ нм.

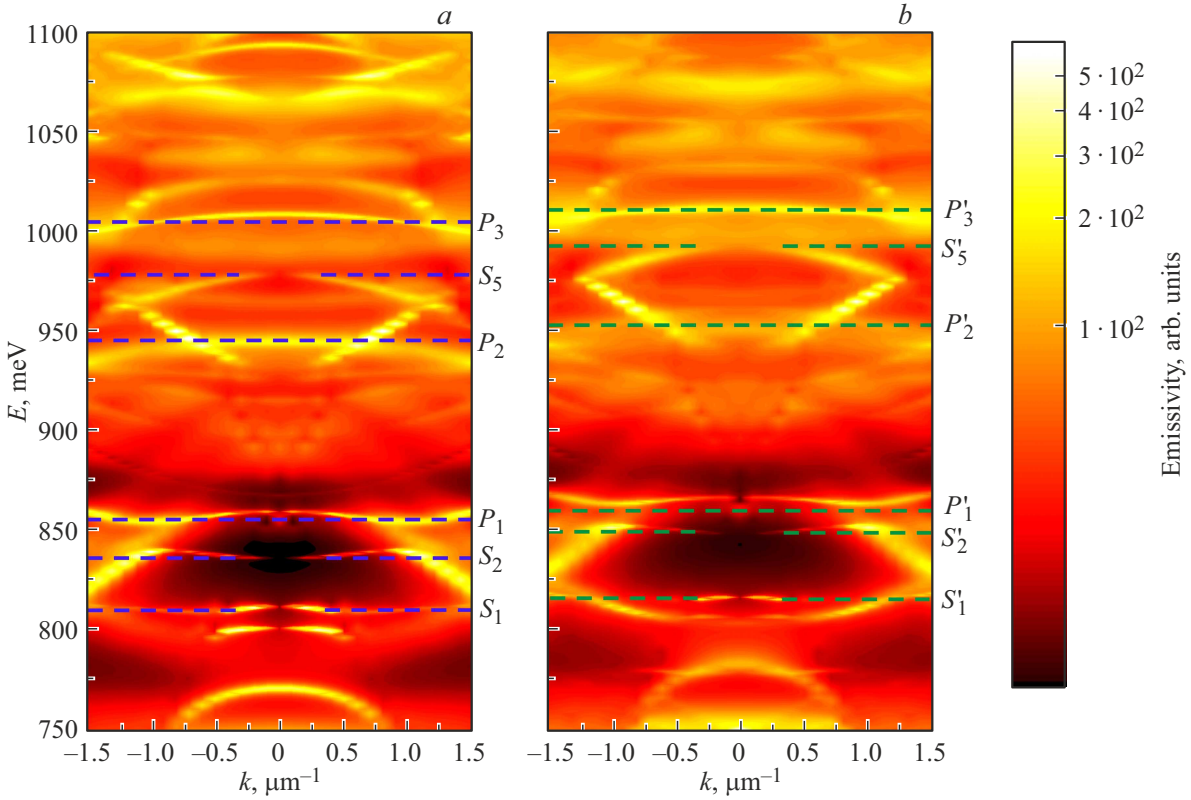


Рис. 2. Дисперсионные зависимости излучательной способности фотонных мод, возбуждаемых в ФК излучением диполей с поляризацией TM. Панель (a) демонстрирует зависимости для мод ФК с решеткой из дисков одного диаметра, панель (b) — для ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Штриховыми линиями отмечены положения экспериментальных пиков ФЛ. Для мод ССК сделан разрыв в линиях в области Г-точки для удобства восприятия информации. Показатели преломления и коэффициенты экстинкции для Si и SiO_2, используемые при проведении расчетов, выбирались в соответствии с данными работ [14,15].

839, 892, 910 и 980 мэВ соответственно. Из сравнения спектров хорошо видно, что изменение диаметров дисков в подрешетках ФК приводит к значительному росту интенсивности ФЛ в окрестности пиков $S_1 - S_5$, которое сопровождается изменением их спектрального положения. Так, например, интенсивность пиков S_1, S_2 и S_5 возрастает почти на порядок, а их спектральное положение смещается в область больших энергий фотонов. Обнаруженное возрастание интенсивности пиков ФЛ в структурах с модифицированным базисом кристаллической решетки можно объяснить увеличением локальной плотности оптических состояний, связанным с изменением дисперсий мод в структуре с уменьшенным размером зоны Бриллюэна.

Для проверки этого предположения были проведены теоретические расчеты зонных диаграмм и излучательной способности фотонных кристаллов с геометрическими параметрами, соответствующими эксперименту. Модельная структура представляла собой две квадратные решетки Si-дисков, вставленные друг в друга, расположенные на слое SiO_2 толщиной 3 мкм, лежащем на полубесконечной Si-подложке. Активная среда из КТ моделировалась излучающими диполями [5], равномерно распределенными внутри Si-дисков на глубине от 20 до 155 нм, что соответствовало экспериментальному положению GeSi КТ в исследуемой структуре. На рис. 2 и 3 показаны рассчитанные дисперсионные зависимости излучательной способности фотонных мод, возбуждаемых в ФК излучением диполей с поляризацией TM и TE соответственно. Панели (a) на рисунках демонстрируют зависимости для мод ФК с решеткой из дисков одного диаметра. Панели (b) — зависимости для мод ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Расчетное положение фотонных мод достаточно хорошо совпадает со спектральным положением основных пиков излучения, наблюдаемых в эксперименте (рис. 1). Из анализа полученных зависимостей следует, что экспериментальные пики $S_1 - S_5$ можно связать с коллективными модами типа симметрийно-защищенных ССК, поскольку отмеченные на рисунке моды характеризуются отсутствием излучения в Г-точке ($k = 0$). Пики P_1, P_2 и P_3 можно отнести к излучающим модам, поскольку они не имеют данной особенности в Г-точке. Необходимо отметить, что моды S_1, S_2, S_5 возбуждаются излучением диполей с TM-поляризацией (рис. 2, a), моды S_3, S_4 соответствуют TE-поляризации (рис. 3, a), а моды P_1, P_2

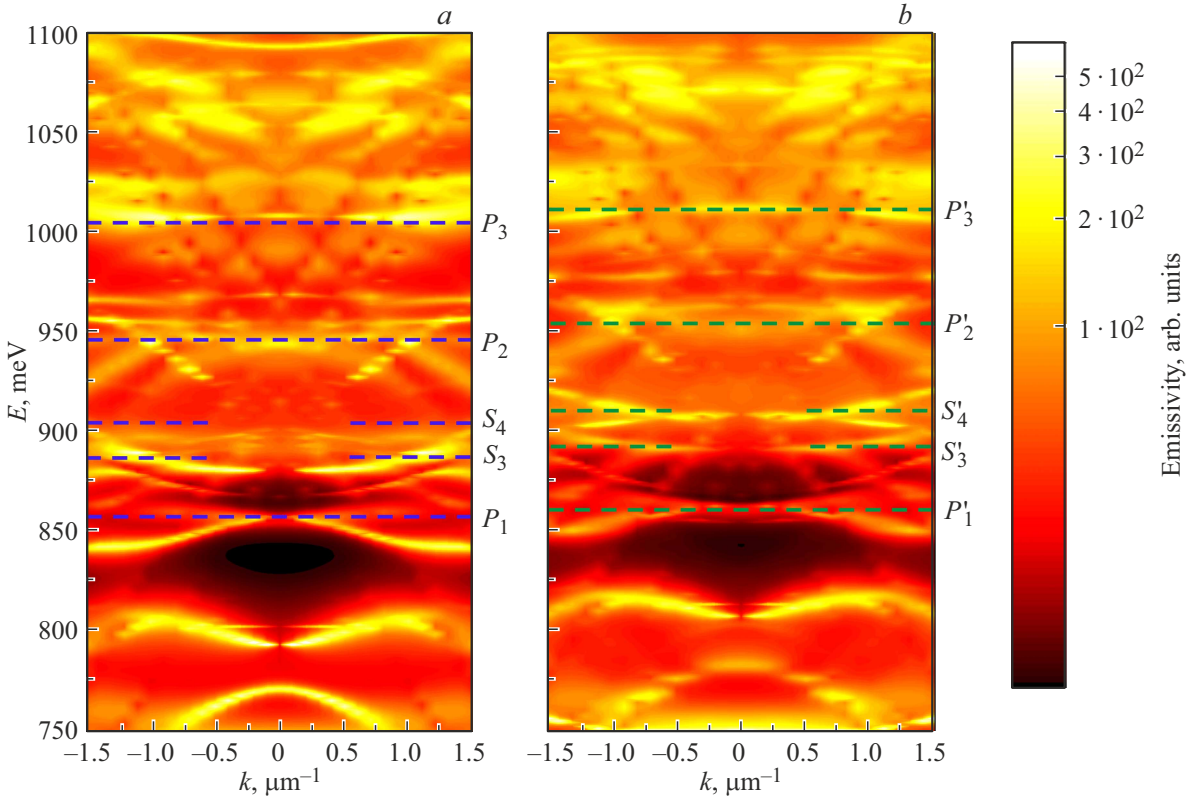


Рис. 3. Дисперсионные зависимости излучательной способности фотонных мод, возбуждаемых в ФК излучением диполей с поляризацией TE. Панель (*a*) демонстрирует зависимости для мод ФК с решеткой из дисков одного диаметра, панель (*b*) — для мод ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Штриховыми линиями отмечены положения экспериментальных пиков ФЛ. Для мод ССК сделан разрыв в линиях в области Г-точки для удобства восприятия информации.

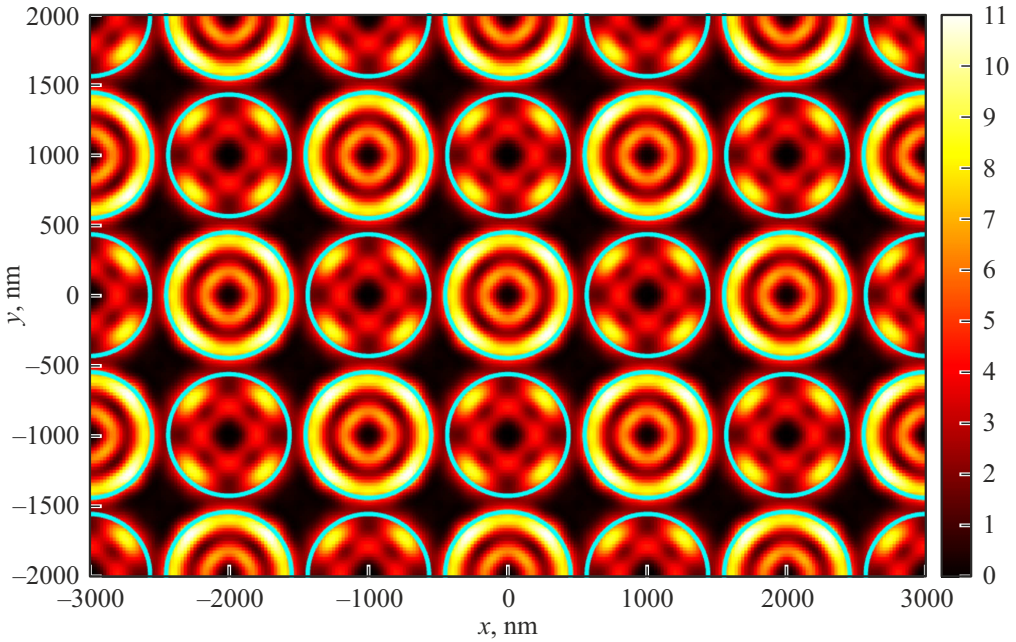


Рис. 4. Пространственное распределение амплитуды электрического поля в плоскости ФК (в *XY*-сечении, проведенном на полувысоте дисков) для ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Распределение поля рассчитано в Г-точке при энергии фотонов 997 мэВ (вблизи пика S_5 в эксперименте). Диаметры дисков в двух подрешетках, образующих ФК, составляют $D_1 = 900$ нм и $D_2 = 870$ нм. Высота дисков — 480 нм.

и P_3 вообще не имеют избирательности к поляризации возбуждающего излучения. Из сравнения панелей (a) и (b) на рис. 2, 3 хорошо видно, что модификация структуры ФК за счет изменения размера дисков в одной из подрешеток ведет к смещению спектрального положения всех мод в область более высоких частот. Практически для всех рассмотренных мод в модифицированной структуре наблюдается более слабая зависимость от волнового вектора (зоны становятся более плоскими), что соответствует увеличению средней по излучающему объему локальной плотности оптических состояний. На рис. 4 приведено распределение электрических полей в ближнем поле для моды S_5 в ФК с решеткой с базисом из дисков разных диаметров. Хорошо видно, что более высокая концентрация поля наблюдается в дисках меньшего диаметра, что является принципиальным отличием от распределения полей в ФК с решеткой из дисков одного диаметра, где амплитуда поля во всех дисках одинакова. Подобная картина наблюдается и для других мод типа ССК. Это приводит к увеличению характерной энергии этих мод и к смещению соответствующих пиков в область высоких частот.

4. Заключение

Полученные в работе результаты демонстрируют, что для двумерных фотонных кристаллов в виде субволновых квадратных решеток из Si-дисков на SiO_2 со встроенными в них GeSi КТ, модификация базиса решетки фотонного кристалла за счет изменения диаметра дисков в одной из подрешеток, может быть использована для управления спектральным положением и интенсивностью пиков выходящего из структуры излучения. Сопоставление результатов теоретических расчетов излучательной способности исследуемых структур и результатов измерений методом микро-ФЛ позволяет заключить, что наблюдаемый в эксперименте эффект усиления интенсивности отдельных пиков ФЛ связан, по-видимому, с увеличением локальной плотности оптических состояний в решетке с модифицированным базисом.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWGW-2025-0023 „Управление функциональными характеристиками компонент нанофотоники и наноэлектроники на основе полупроводниковых наноструктур“). Часть работы, связанная с проведением люминесцентных измерений, была проведена в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № FFUF-2024-0019 „Фундаментальные исследования полупроводников, низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур, метаматериалов для оптоэлектроники и фотоники инфракрасного и терагерцового диапазонов“).

Благодарности

Авторы выражают благодарность ЦКП „ВТАН“ НГУ и ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования. Люминесцентные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Rybin, Y. Kivshar. Nature, **541**, 164 (2017). https://doi.org/10.1038/541164a
[2] H. Xue, J. Niu, C. Wang, S. Chen, C. Lu, P. Zhang, F. Jin, C. Xie, L. Shi. Opt. Laser Techn., **177**, 111103 (2024). https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111103
[3] B. Wang, J. Wang, T. Zhai, R. Salas-Montiel, J. Liu, Y. Li, D. Qiao, J. Zhao, X. Gan. ACS Photonics, **11**, 1456 (2024). https://doi.org/10.1021/acsphotonics.3c01526
[4] К.Л. Кошелев, З.Ф. Садриева, А.А. Щербаков, Ю.С. Кившарь, А.А. Богданов. УФН, **193**, 528 (2023). https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039120
[5] S.A. Dyakov, M.V. Stepikhova, A.A. Bogdanov, A.V. Novikov, D.V. Yurasov, M.V. Shaleev, Z.F. Krasilnik, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius. Laser Photon. Rev., **15**, 2000242 (2021). https://doi.org/10.1002/lpor.202000242
[6] D.V. Yurasov, S.A. Dyakov, I.A. Smagin, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, M.V. Stepikhova, A.V. Peretokin, M.V. Shaleev, Zh.V. Smagina, D.E. Utkin, A.V. Novikov. Appl. Phys. Lett., **125**, 021105 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0213583
[7] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling. APS Photonics, **8**, 209 (2021). https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c01319
[8] C.F. Doiron, I. Brener, A. Cerjan. Nature Commun., **13**, 7534 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-35246-w
[9] C.M. Anderson, K.P. Giapis. Phys. Rev. B, **56**, 7313 (1997). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7313
[10] N. Malkova, S. Kim, V. Gopalan. Phys. Rev. B, **66**, 115113 (2002). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7313
[11] Ж.В. Смагина, М.В. Степихова, В.А. Зиновьев, С.А. Дьяков, Е.Е. Родякина, Д.В. Шенгуров, А.В. Кацюба, А.В. Новиков. ФТП, **57**, 414 (2023). https://doi.org/10.61011/FTP.2023.06.56467.30k
[12] S.G. Tikhodeev, A.L. Yablonskii, E.A. Muljarov, N.A. Gippius, T. Ishihara. Phys. Rev. B, **66**, 045102 (2002). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.045102
[13] S.A. Dyakov, I.M. Fradkin, D.V. Yurasov, V.A. Zinovyev, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius. Phys. Rev. B, **108**, 155416 (2023). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.155416
[14] C. Schinke, P.C. Peest, J. Schmidt, R. Brendel, K. Bothe, M.R. Vogt, I. Kröger, S. Winter, A. Schirmacher, S. Lim, H.T. Nguyen, D. MacDonald. AIP Advances, **5**, 67168 (2015). https://doi.org/10.1063/1.4923379
[15] L.V. Rodríguez-de Marcos, J.I. Larruquert, J.A. Méndez, J.A. Aznárez. Optical Mater. Express, **6**, 3622 (2016). https://doi.org/10.1364/OME.6.003622Pe

Редактор Г.А. Оганесян

Enhancement of the luminescence response of subwavelength lattices of Si disks with embedded GeSi quantum dots when switching from a simple lattice to a lattice with a basis

V.A. Zinovyev[1], *Zh.V. Smagina*[1], *S.A. Rudin*[1], *A.F. Zinovieva*[1,2], *A.V. Nenashev*[1,2], *E.E. Rodyakina*[1,2], *S.A. Dyakov*[3], *I.A. Smagin*[3], *M.V. Stepikhova*[4], *A.V. Novikov*[4]

[1] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia
[2] Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia
[3] Center for Photonics and Quantum Materials, Skolkovo Institute of Science and Technology, 143026 Moscow, Russia
[4] Institute for Physics of Microstructures of Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The effect of the lattice basis modification of photonic crystal on the luminescence properties of emitters embedded in them was studied. The photonic crystals were square lattices of subwavelength Si disks with embedded GeSi quantum dots. The basis was modified by changing the size of the disks in one of the sublattices with a doubled period. A micro-photoluminescence study revealed that this change in the photonic crystal structure leads to a multiple increase in the intensity of individual photoluminescence peaks in the emission region of the GeSi quantum dots. A theoretical calculation of the emissivity of the studied structures confirms that the observed effect is based on an increase in the local density of optical states in the modified structure.