

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-50-59

УДК 535.372, 535.354, 538.915

Спектро-кинетические характеристики излучения самоформирующихся Ge(Si)-наноструктур в двумерных фотонных кристаллах с различной глубиной отверстий

А. Н. Яблонский¹✉, Д. В. Юрасов², В. Е. Захаров³,
А. В. Перетокин⁴, М. В. Степихова⁵, М. В. Шалеев⁶,
Д. В. Шенгуров⁷, Е. Е. Родякина⁸, Ж. В. Смагина⁹, А. В. Новиков¹⁰

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10}Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

^{8, 9}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

⁸Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация

Предмет исследования. SiGe-гетероструктуры с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами, встроенными в двумерные фотонные кристаллы. **Цель работы.** Установление зависимости спектральных и временных характеристик излучения структур с Ge(Si)-островками в двумерных фотонных кристаллах от глубины отверстий, формирующих фотонный кристалл. Определение характерных времён спада люминесценции островков в фотонных кристаллах и основных механизмов, определяющих их зависимость от глубины травления отверстий фотонных кристаллов. **Метод.** Исследуемые структуры были получены с использованием методов молекулярно-пучковой эпитаксии, электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления. Исследование оптических свойств полученных структур осуществлялось методом спектроскопии микрофотолюминесценции с высоким спектральным (0,5 нм) и временным (50 пс) разрешением. **Основные результаты.** Определены зависимости интенсивности, вида спектров и характерных времён спада фотолюминесценции самоформирующихся Ge(Si)-островков в двумерных фотонных кристаллах с гексагональной решёткой от глубины травления отверстий фотонного кристалла. Обнаружено монотонное падение характерного времени спада люминесценции островков в фотонных кристаллах при комнатной температуре с увеличением глубины отверстий от 9 нс для исходной структуры без фотонных кристаллов до 0,6 нс при травлении отверстий на всю глубину выращенной структуры (335 нм), которое связывается с возрастанием безызлучательной рекомбинации носителей заряда на границах отверстий. Определено оптимальное соотношение глубины отверстий и толщины активной области структуры, позволяющее получить максимальное увеличение интенсивности люминесценции Ge(Si)-островков в двумерных фотонных кристаллах по сравнению с планарными структурами без фотонных кристаллов. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут иметь существенную значимость для разработки эффективных источников излучения ближнего инфракрасного диапазона для кремниевой интегральной оптоэлектроники.

Ключевые слова: SiGe-гетероструктуры, Ge(Si)-островки, двумерные фотонные кристаллы, спектроскопия микро-фотолюминесценции, кинетика люминесценции, безызлучательная рекомбинация

Благодарность: работа поддержана Российским научным фондом, проект № 19-72-10011.

Ссылка для цитирования: Яблонский А.Н., Юрасов Д.В., Захаров В.Е., Перетокин А.В., Степихова М.В., Шалеев М.В., Шенгуров Д.В., Родякина Е.Е., Смагина Ж.В., Новиков А.В. Спектро-кинетические характеристики излучения самоформирующихся Ge(Si)-наноостровков в двумерных фотонных кристаллах с различной глубиной отверстий // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 50–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-50-59>

Коды OCIS: 310.6628, 300.6470, 050.5298, 250.5230.

Spectral and kinetic properties of radiation of self-assembled Ge(Si) nanoislands in two-dimensional photonic crystals with different hole depths

A. N. YABLONSKIY¹✉, D. V. YURASOV², V. E. ZAKHAROV³,
A. V. PERETOKIN⁴, M. V. STEPikHOVA⁵, M. V. SHALEEV⁶,
D. V. SHENGUROV⁷, E. E. RODYAKINA⁸, Z. V. SMAGINA⁹, A. V. NOVIKOV¹⁰

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10}*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

^{8, 9}*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

⁸*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

Abstract

Subject of study. SiGe heterostructures with self-assembled Ge(Si) nanoislands embedded in two-dimensional photonic crystals. **Aim of study.** Determination the dependence of the spectral and temporal characteristics of the radiation of structures with Ge(Si) islands in two-dimensional photonic crystals on the depth of the holes forming the photonic crystal. Determination of the characteristic decay times of the luminescence of islands in photonic crystals and the main mechanisms that determine their dependence on the depth of etching of the holes of photonic crystals. **Method.** The structures under study were obtained using the methods of molecular beam epitaxy electron beam lithography and plasma-chemical etching. The study of the optical properties of the obtained structures was carried out by microphotoluminescence spectroscopy with high spectral (0.5 nm) and temporal (50 ps) resolution. **Main results.** The dependences of the intensity, spectral shape, and characteristic decay times of photoluminescence of self-assembled Ge(Si) islands in two-dimensional photonic crystals with a hexagonal lattice on the etching depth of the photonic crystal holes have been determined. A monotonic decrease in the characteristic decay time of the luminescence of islands in photonic crystals at room temperature with increasing hole depth from 9 ns for the initial structure without photonic crystals to 0.6 ns for the sample with holes etched to the entire depth of the grown structure (335 nm), has been observed, which is associated with an increase in nonradiative recombination of charge carriers at the boundaries of the holes. The optimal ratio of the hole depth to the thickness of the active region of the structure has been determined, which makes it possible to obtain a maximum increase in the luminescence intensity of Ge(Si) islands in two-dimensional photonic crystals compared to planar structures without photonic crystals. **Practical significance.** The obtained results can be important for the development of efficient light-sources of near-infrared range for silicon integrated optoelectronics.

Keywords: SiGe heterostructures, Ge(Si) islands, two-dimensional photonic crystals, microphotoluminescence spectroscopy, time-resolved luminescence spectroscopy, non-radiative recombination

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, Project № 19-72-10011.

For citation: Yablonskiy A.N., Yurasov D. V., Zakharov V E., Peretokin A.V., Stepikhova M. V., Shaleev M.V., Shengurov D. V., Rodyakina E.E., Smagina Z.V., Novikov A. V. Spectral and kinetic properties of radiation of self-assembled Ge(Si) nanoislands in two-dimensional photonic crystals with different hole depths [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 50–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-50-59>

OCIS codes: 310.6628, 300.6470, 050.5298, 250.5230.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время резкий рост объёма генерируемой и передаваемой информации требует существенного повышения скорости передачи данных. Основным способом решения этой задачи считается разработка фотонных компонентов, интегрированных с современной полупроводниковой микроэлектроникой. Несмотря на значительный прогресс в данной области, создание компактного и эффективного источника оптического излучения, совместимого с технологиями кремниевой микроэлектроники, остаётся сложной задачей. С точки зрения интеграции наиболее привлекательным подходом является создание таких источников на основе элементов IV группы, таких как Si и Ge. К сожалению, поскольку данные материалы являются непрямозонными полупроводниками, они характеризуются довольно низкой излучательной эффективностью при комнатной температуре. Одним из подходов к решению этой проблемы является изменение свойств полупроводниковых материалов за счёт создания на их основе микрорезонаторов различного типа, в частности фотонных кристаллов (ФК), представляющих собой периодическую решётку отверстий с периодом, близким к длине волны излучения в среде [1–5]. Среди рассматриваемых в качестве активной среды материалов большой интерес вызывают SiGe-структуры, в том числе структуры с Ge(Si)-островками, совместимые с технологиями кремниевой интегральной оптоэлектроники [6, 7]. Показано, что такие структуры демонстрируют сигнал фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (1,3–1,6 мкм) при комнатной температуре [8, 9]. Большое количество работ направлено на создание и исследование структур с фотонными кристаллами и фотонно-кристаллическими микрорезонаторами на основе гетероструктур с Ge(Si)-островками [10–14]. Структуры с ФК без микрорезонатора [13, 14] могут обладать значительными преимуществами, состоящими в достаточно узкой диаграмме направленности излучения, а также в отсутствии ограничения на размеры активной (излучающей) области структуры. Значительное повышение излучательной эффективности таких структур может достигаться вследствие возрастания вероятности излучательной ре-

комбинации (эффект Парселла [15]), улучшения вывода излучения из структур и его направленности.

В настоящей работе проведено исследование люминесцентных свойств двумерных фотонных кристаллов с Ge(Si)-островками. Ранее было показано, что в таких структурах наблюдается значительное возрастание интенсивности ФЛ на длинах волн, соответствующих модам ФК [14] и зависящих от различных параметров ФК, в частности от периода, диаметра и симметрии расположения отверстий, формирующих ФК [16]. Наряду с указанными параметрами, существенное влияние на свойства ФК может оказывать глубина отверстий, формирующих ФК. В работе [17] на примере трёх структур с различной глубиной отверстий ФК было показано, что при увеличении глубины отверстий наблюдается значительное сокращение характерного времени спада ФЛ Ge(Si)-островков, которое связывалось с возрастанием влияния поверхностной безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда на боковых стенках отверстий ФК. Это приводило к возникновению немонотонной зависимости интенсивности ФЛ островков в ФК при увеличении глубины травления отверстий.

Целью представляемой работы являлось установление зависимости спектральных и временных характеристик излучения структур с Ge(Si)-островками в двумерных фотонных кристаллах от глубины отверстий, формирующих фотонный кристалл, и определение характерных времён спада люминесценции островков в фотонных кристаллах и основных механизмов, определяющих их зависимость от глубины травления отверстий фотонных кристаллов. Полученные в работе результаты могут иметь существенную значимость для создания эффективных источников излучения ближнего инфракрасного диапазона для кремниевой интегральной оптоэлектроники.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структуры SiGe с Ge(Si)-островками были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии при температуре 600 °C на подложке «кремний-на-изоляторе» (“silicon-on-insulator”, SOI) с захороненным слоем SiO₂ толщиной

2 мкм и верхним слоем Si толщиной 70 нм. Выращенные структуры состояли из буферного слоя Si (50 нм), пяти слоёв Ge(Si)-островков и покровного слоя Si (135 нм) (рис. 1а). На полученных структурах методами электронной литографии и плазмохимического травления были изготовлены массивы фотонных кристаллов размером 50×50 мкм с гексагональной решёткой, период (a) которой в каждом массиве варьировался от 500 до 700 нм, а отношение радиуса отверстий ФК (r) к периоду (a) составляло 0,2 и 0,25 (рис. 1а). Более подробно условия получения структур с Ge(Si)-островками в ФК, а также зависимости ФЛ таких структур от периода и радиуса отверстий ФК приведены в работах [17, 18]. Для исследования влияния глубины отверстий, формирующих ФК, на интенсивность и вид спектров ФЛ в данной работе за счёт варьирования времени травления были получены структуры со следующими значениями глубины отверстий ФК (h): 80 нм, 130 нм, 190 нм, 250 нм и 335 нм (рис. 1а). Последнее значение соответствовало травлению на всю глубину активного слоя, до слоя SiO₂. Контроль глубины отверстий ФК осуществлялся с помощью методов травления сфокусированным ионным пучком и сканирующей электронной микроскопии. Наличие в каждом массиве ФК с различными периодами и радиусами отверстий позволяло для каждого образца (с разной глубиной травления отверстий) подобрать ФК с линиями ФЛ, попадающими в область максимальной интенсивности излучения Ge(Si)-островков в исходной структуре.

Исследование излучательных свойств полученных структур с ФК осуществлялось методом спектроскопии микро-ФЛ ближнего ИК диапазона. Возбуждение сигнала ФЛ осуществлялось импульсным излучением с длиной волны 532 нм. При этом схема фокусировки излучения накачки и сбора излучения исследуемых структур может быть реализована двумя способами. В первом случае фокусировка возбуждающего излучения (в пятно размером порядка 5 мкм) и сбор излучения из структуры осуществляется с помощью объектива с 10-кратным оптическим увеличением. Во втором случае объектив используется только для сбора излучения ФК, в то время как возбуждающее излучение фокусируется с помощью более длиннофокусной линзы с фокус-

ным расстоянием 20 см. При этом размер области возбуждения носителей заряда составляет приблизительно 50 мкм, что приводит к однородному распределению концентрации неравновесных носителей заряда по площади рассматриваемых ФК и позволяет существенно снизить плотность оптической накачки. Регистрация спектров ФЛ и временных зависимостей интенсивности ФЛ (с временным разрешением порядка 50 пс) осуществлялась при комнатной температуре с помощью решёточного монохроматора, сверхпроводящего фотоприёмника ближнего ИК диапазона («Сконтел») и платы счёта фотонов [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1б приведены спектры ФЛ Ge(Si)-островков в исходной структуре и в ФК с различной глубиной отверстий h . Для каждой структуры из массива полученных ФК с различными параметрами было выбрано по одному ФК, для которого наблюдалось максимальное увеличение интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков по сравнению с исходной структурой без ФК. Как видно из рис. 1б, даже при небольшой глубине отверстий ФК (80 нм, спектр 2), меньшей толщины верхнего (покровного) слоя Si, интенсивность ФЛ островков в ФК возрастает более чем на порядок, по сравнению с исходной структурой без ФК, несмотря на то, что вид спектров ФЛ таких ФК слабо отличается от спектра ФЛ исходной структуры, и в них практически отсутствуют узкие линии, связанные с модами ФК. Возрастание интенсивности ФЛ в таких ФК связывается с нарушением полного внутреннего отражения и, как следствие, с улучшением эффективности вывода излучения из структуры. При увеличении глубины отверстий происходит формирование в ФК модовой структуры, что приводит к улучшению вывода излучения на определённых длинах волн, соответствующих модам ФК, и, как следствие, к возникновению в спектрах ФЛ характерных узких линий, связанных с этими модами (спектры 3–5 на рис. 1б). Наибольшая интенсивность ФЛ (как интегральная по спектру в диапазоне 750–1000 нм, так и для отдельных линий в спектрах ФЛ) была получена для глубины травления отверстий ФК $h = 130$ нм (спектр 3), т.е. для глубины отверстий, близкой

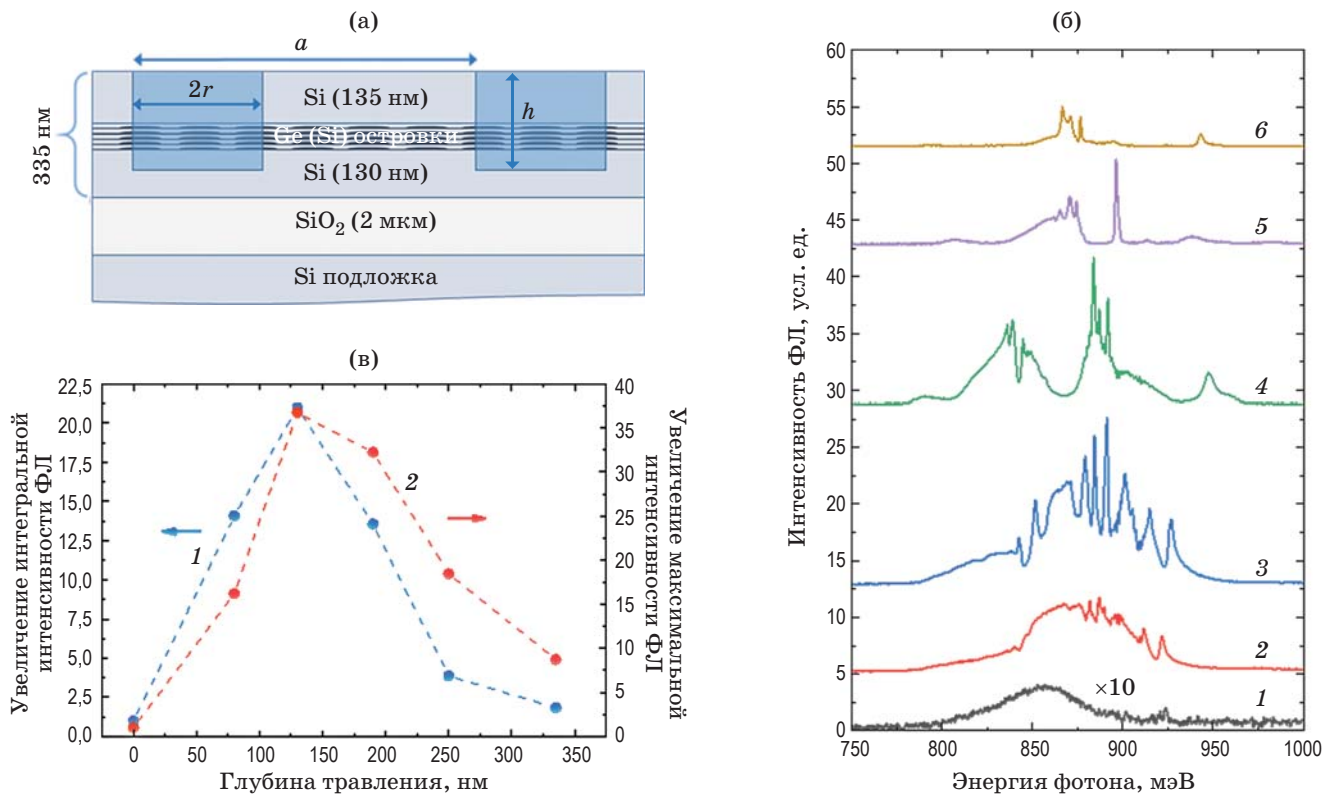


Рис. 1. (а) Схематичное изображение исследуемых структур с Ge(Si)-островками в ФК (a — период ФК, r — радиус отверстий ФК, h — глубина отверстий ФК). (б) Спектры ФЛ Ge(Si)-островков в исходной структуре без ФК (1) и в ФК с различной глубиной отверстий h : $h = 80$ нм, $a = 550$ нм, $r/a = 0,25$ (2); $h = 130$ нм, $a = 550$ нм, $r/a = 0,2$ (3); $h = 190$ нм, $a = 575$ нм, $r/a = 0,25$ (4); $h = 250$ нм, $a = 575$ нм, $r/a = 0,25$ (5); $h = 335$ нм, $a = 600$ нм, $r/a = 0,25$ (6). Спектры измерены при 300 К. (в) Возрастание интегральной по спектру (1) и максимальной (пиковой) (2) интенсивности ФЛ островков в ФК по сравнению с исходной структурой в зависимости от глубины травления отверстий ФК

Fig. 1. (a) Schematic representation of the structures with Ge(Si) islands in PhCs (a is the PhC period, r is the radius of the PhC holes, h is the depth of the PC holes). (b) PL spectra of Ge(Si) islands in the initial structure without PhCs (1) and in the PhCs with different hole depths h : $h = 80$ nm, $a = 550$ nm, $r/a = 0.25$ (2); $h = 130$ nm, $a = 550$ nm, $r/a = 0.2$ (3); $h = 190$ nm, $a = 575$ nm, $r/a = 0.25$ (4); $h = 250$ nm, $a = 575$ nm, $r/a = 0.25$ (5); $h = 335$ nm, $a = 600$ nm, $r/a = 0.25$ (6). The spectra were measured at 300 K. (v) An increase in the spectrum-integrated (1) and maximum (peak) (2) PL intensity of the islands in the PhCs compared to the initial structure, as a function of the etching depth of the PhC holes

к толщине покровного слоя Si в рассматриваемых структурах (135 нм). Дальнейшее увеличение глубины травления отверстий приводит к падению как интегральной, так и пиковой интенсивности ФЛ островков в ФК (спектры 4–6). Полученные зависимости интегральной по спектру и максимальной (пиковой) интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков в наиболее интенсивно излучающих ФК от глубины травления отверстий представлены на рис. 1в. Как видно из рисунка, падение интенсивности ФЛ начинается, когда глубина травления отверстий превышает толщину покровного слоя Si, и отверстия ФК частично проникают в слой

с Ge(Si)-островками. В частности, глубина 190 нм (спектр 4) соответствует травлению отверстий ФК приблизительно до середины слоя с островками, тогда как при глубине 250 нм (спектр 5) отверстия ФК полностью проходят сквозь слой Ge(Si)-островков и частично затрагивают буферный слой Si, расположенный ниже слоя с островками.

Необходимо отметить, что как видно из рис. 1б, наблюдается некоторое расхождение между спектральным положением максимума излучения исходной структуры с Ge(Si)-островками (850–860 мэВ) и положением максимального сигнала ФЛ фотонных кристаллов

в данной структуре (870–890 мЭВ). Данное расхождение связано со значительным искажением формы измеряемых спектров ФЛ исходной планарной структуры с Ge(Si)-островками вследствие интерференции при отражении излучения от поверхности структуры (граница Si/воздух), а также от нижней границы слоя SiO₂, т.е. от границы раздела SiO₂/Si в SOI-подложке. В действительности, для структуры, рассмотренной в данной работе, максимум излучения Ge(Si)-островков расположен в области 870–890 мЭВ, что соответствует спектральному положению наиболее интенсивных линий ФЛ фотонных кристаллов, полученных в данной структуре.

Среди причин, способных приводить к падению интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков с увеличением глубины отверстий ФК, можно выделить два основных фактора. Во-первых, проникновение отверстий в слой с островками приводит к полному или частичному разрушению части островков, т.е. к уменьшению количества островков, дающих вклад в сигнал ФЛ в спектральном диапазоне 750–1000 мЭВ. Во-вторых, даже для оставшихся неповреждёнными островков возникновение в непосредственной близости от них (на расстоянии нескольких сотен или десятков нм) границ отверстий ФК с развитой поверхностью может приводить к существенному возрастанию на этих границах безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда, находящихся в островках или в их окрестности.

Для выяснения вклада второго механизма в снижение интенсивности ФЛ в данной работе было проведено исследование временных зависимостей ФЛ Ge(Si)-островков в ФК с различной глубиной отверстий.

Как было показано ранее [18], условия оптического возбуждения структур оказывают значительное влияние на вид спектров ФЛ и временных зависимостей интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков, встроенных в ФК. При фокусировке излучения накачки с помощью объективов с большим оптическим увеличением размер области возбуждения составляет 1–10 мкм. В условиях импульсного возбуждения это приводит к высокой концентрации неравновесных носителей заряда и, как следствие, к существенному вкладу процессов безызлучательной оже-рекомбинации. В результате временные зависимости интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков оказываются немонотонными (рис. 2а). При этом кривые в спектро-кинетических зависимостях ФЛ ФК имеют несимметричную форму с быстрым коротковолновым плечом (рис. 2б), что связано с зависимостью их спектрального положения от концентрации неравновесных носителей заряда [18]. В данной работе для снижения влияния оже-рекомбинации размер пятна возбуждения ФЛ был увеличен до 50 мкм за счёт использования длиннофокусной линзы для фокусировки лазерного луча, что позволило получить относительно однородное возбуждение по площади ФК

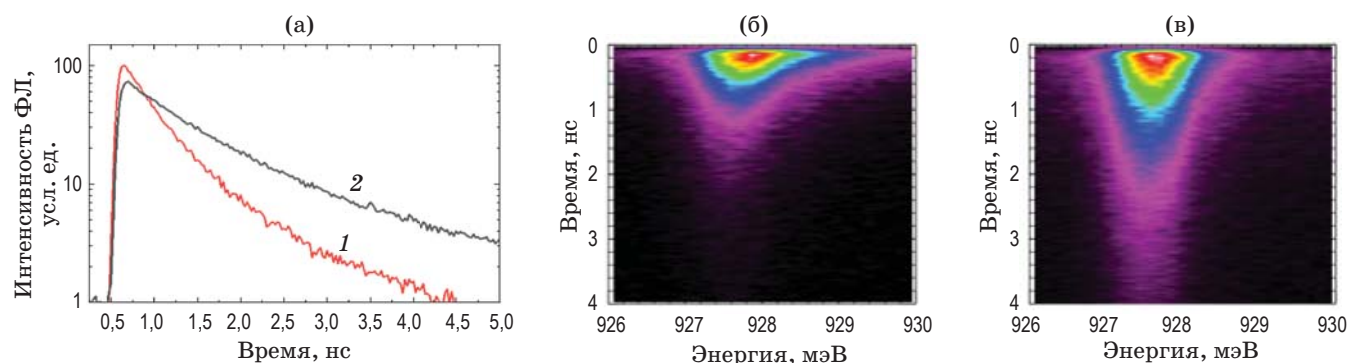


Рис. 2. Временные зависимости интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков в ФК при различных условиях оптического возбуждения ((1) — размер пятна — 5 мкм, мощность — 5 мВт; (2) — размер пятна 50 мкм, мощность — 20 мВт) (а) и спектро-кинетические зависимости интенсивности ФЛ островков в ФК (для одной из линий ФК) в первом (б) и во втором (в) случаях

Fig. 2. Time dependences of the PL intensity of Ge(Si) islands in the PhCs under different optical excitation conditions (1 — spot size — 5 μm , pump power — 5 mW; 2 — spot size 50 μm , pump power — 20 mW) (a) and time-resolved PL spectra of the islands in PhCs (for one of the PhC lines) in the first (b) and second (v) cases

(размером 50×50 мкм), а также снизить плотность возбуждения примерно на 2 порядка при той же средней мощности оптической накачки. При этом были получены практически моноэкспоненциальные временные зависимости интенсивности ФЛ островков в ФК (рис. 2а) с временами спада, зависящими от параметров ФК (в первую очередь от глубины травления отверстий), а в спектро-кинетических зависимостях ФЛ наблюдались симметричные линии ФК с положением максимума ФЛ, слабо зависящим от времени (рис. 2в).

На рис. 3 приведены временные зависимости интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков в ФК с различной глубиной отверстий и в исходной структуре без ФК в условиях однородного возбуждения. Как и для спектров ФЛ (на рис. 16), на временных зависимостях сигнала ФЛ островков в ФК даже при минимальной глубине отверстий (80 нм) наблюдается увеличение максимального по времени сигнала ФЛ более, чем в 50 раз по сравнению с исходной структурой с островками без ФК (кривые 2 и 1 на

рис. 3а). Наблюдаемое возрастание интенсивности ФЛ связывается с улучшением эффективности вывода излучения Ge(Si)-островков из структуры вследствие нарушения полного внутреннего отражения от внешней границы структуры. Как было указано выше, формирование модовой структуры ФК при увеличении глубины отверстий приводит к дополнительному улучшению вывода излучения на определённых длинах волн, соответствующих модам ФК, и, как следствие, к дальнейшему возрастанию интенсивности ФЛ (кривые 3 и 4 на рис. 3а). Зависимость максимальной по времени интенсивности ФЛ островков в ФК (относительно исходной структуры) от глубины отверстий ФК приведена на вставке к рис. 3а. Следует отметить, что именно максимальная по времени интенсивность ФЛ, наблюдаемая на начальном участке измеренных временных зависимостей (амплитуда сигнала ФЛ), характеризует увеличение эффективности вывода излучения из исследуемых структур, тогда как изменение времени спада

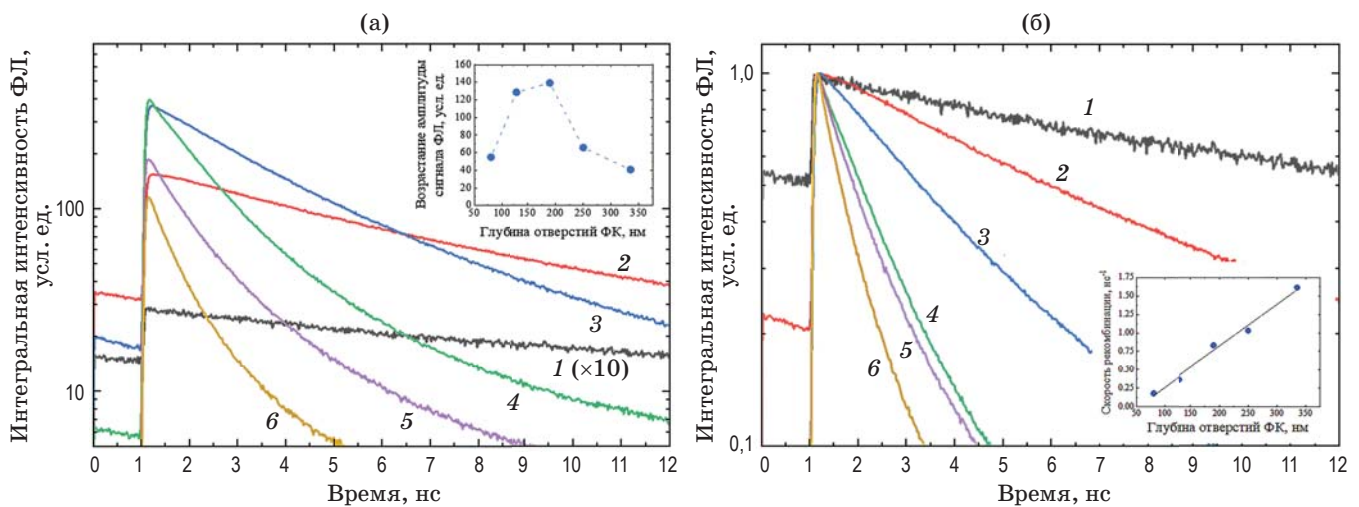


Рис. 3. (а) Временные зависимости интенсивности ФЛ Ge(Si)-островков в исходной структуре без ФК (1) и в ФК с различной глубиной отверстий h : $h = 80$ нм (2); $h = 130$ нм (3); $h = 190$ нм (4); $h = 250$ нм (5); $h = 335$ нм (6). Кривая 1 умножена на 10 для удобства восприятия. На вставке — зависимость максимальной по времени интенсивности ФЛ от глубины отверстий ФК. (б) Те же временные зависимости интенсивности ФЛ, нормированные на максимальное значение. На вставке — зависимость скорости рекомбинации носителей заряда от глубины отверстий ФК, полученная из характерных времён спада ФЛ Ge(Si)-островков в ФК с различной глубиной травления отверстий

Fig. 3. (a) Time dependences of the PL intensity of Ge(Si) islands in the initial structure without PhCs (1) and in the PhCs with different hole depths h : $h = 80$ nm (2); $h = 130$ nm (3); $h = 190$ nm (4); $h = 250$ nm (5); $h = 335$ nm (6). Curve 1 is multiplied by 10 for readability. The inset shows the amplitude of the PL signal as a function of the depth of the PhC holes. (b) The same time dependences of the PL intensity, normalized by the maximum values. The inset shows the charge carrier recombination rate in the PhCs obtained from the characteristic decay times of the island-related PL, as a function of the depth of the PhC holes

интенсивности ФЛ отражает вклад дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации, связанных с формированием ФК. Таким образом, из зависимости, приведённой на вставке к рис. 3а, следует, что наибольшая эффективность вывода излучения Ge(Si)-островков в исследованных структурах наблюдается при глубине травления отверстий ФК в интервале 130–190 нм. Дальнейшее увеличение глубины отверстий ФК приводит к падению интенсивности ФЛ (кривые 5 и 6 на рис. 3а), что, по-видимому, связано с разрушением части островков при проникновении отверстий ФК в активный слой с Ge(Si)-островками.

На рис. 3б приведены те же временные зависимости интенсивности ФЛ, нормированные на максимальное значение. При увеличении глубины отверстий наблюдается монотонное уменьшение времени спада ФЛ (с 9 нс для исходной структуры ($h = 0$) до 0,6 нс при $h = 335$ нм, т.е. при травлении отверстий на всю глубину активного слоя). На вставке к рис. 3б приведена зависимость темпа рекомбинации носителей заряда в ФК от глубины отверстий ФК. Значения темпа рекомбинации были определены как обратные величины от измеренных значений характерного времени спада ФЛ. Как видно из рисунка, полученная зависимость темпа рекомбинации от глубины отверстий ФК имеет линейный характер, что подтверждает основной вклад поверхностной безызлучательной рекомбинации носителей заряда на границах отверстий ФК в сокращение характерных времён спада ФЛ Ge(Si)-островков в ФК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе впервые проведено детальное исследование зависимости спектральных и временных характеристик излучения Ge(Si)-наноостровков в двумерных ФК от глубины отверстий, формирующих ФК. С этой целью была получена и исследована серия структур с различной глубиной травления отверстий, каждая из которых содержала массив ФК с гексагональной решёткой с различными периодами и радиусами от-

верстий. Для полученных структур измерены спектры и временные зависимости интенсивности ФЛ. Показано, что при небольшой глубине отверстий ФК возрастание интенсивности излучения островков, встроенных в ФК, осуществляется во всём спектральном диапазоне излучения островков за счёт нарушения эффекта полного внутреннего отражения, тогда как при увеличении глубины травления отверстий возрастание интенсивности ФЛ осуществляется на определённых длинах волн, соответствующих модам ФК, вследствие улучшения направленности вывода излучения из исследуемых структур. При этом существует оптимальная глубина отверстий, после превышения которой наблюдается падение интенсивности ФЛ, связанное как с разрушением части островков в процессе травления отверстий ФК, так и с вкладом дополнительной безызлучательной рекомбинации носителей заряда на поверхности отверстий. При увеличении глубины отверстий наблюдается монотонное падение характерных времён спада ФЛ островков при комнатной температуре с 9 нс для исходной структуры без ФК до 0,6 нс при травлении отверстий ФК на всю глубину выращенной структуры.

Таким образом, установлено оптимальное соотношение глубины отверстий и толщины активной области структуры, позволяющее достигнуть максимального увеличения интенсивности люминесценции Ge(Si)-островков в двумерных ФК по сравнению с исходными планарными структурами без ФК.

Дальнейшая оптимизация структур может быть связана с существенным снижением вклада безызлучательной рекомбинации носителей заряда в островках за счёт увеличения глубины залегания активного слоя с Ge(Si)-островками и толщины покровного слоя Si и формирования ФК в этом слое, а также за счёт выбора условий пассивации границ отверстий с целью уменьшения вклада процессов безызлучательной рекомбинации. Полученные в работе результаты могут иметь существенную значимость для разработки эффективных источников излучения ближнего инфракрасного диапазона для кремниевой интегральной оптоэлектроники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Wang J., Long Y. On-chip silicon photonic signaling and processing: a review // *Science Bulletin*. 2018. V. 68. P. 1267–1310. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.05.038>
- Fan S., Villeneuve P.R., Joannopoulos J.D., Schubert E.F. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78. № 17. P. 3294–3297. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.3294>
- Boroditsky M., Vrijen R., Krauss T.F., Coccioli R., Bhat R., Yablonovitch E. Spontaneous emission extraction and Purcell enhancement from thin-film 2D photonic crystals // *J. Lightwave Technol.* 1999. V. 17. № 11. P. 2096–2112. <https://doi.org/10.1109/50.803000>
- Rutckaia V., Heyroth F., Novikov A., Shaleev M., Petrov M., Schilling J. Quantum dot emission driven by mie resonances in silicon nanostructures // *Nano Lett.* 2017. V. 17. № 11. P. 6886–6892. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03248>
- Mengtao Liu, Qingchun Zhou. Absorption characteristics of one-dimensional graphene photonic crystals (Характеристики поглощения в одномерном фотонном кристалле на основе графена) [на англ. яз.] // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 3. С. 3–9. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-03-03-09>
- Liu M., Zhou Q. Absorption characteristics of one-dimensional graphene photonic crystals // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88. № 3. P. 116–120. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000116>
- Saito S., Al-Attili A., Oda K., Ishikawa Y. Towards monolithic integration of germanium light sources on silicon chips // *Semicond. Sci. Technol.* 2016. V. 31. P. 043002. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/4/043002>
- Reboud V., Gassenq A., Hartmann J., Widiez J., Virot L., Aubin J., Guillois K., Tardif S., Fedeli J., Pauc N., Chelnokov A., Calvo V. Germanium based photonic components toward a full silicon/germanium photonic platform // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2017. V. 63. № 2. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2017.04.004>
- Vescan L., Stoica T., Chretien O., Goryll M., Mateeva E., Muck A. Size distribution and electroluminescence of self-assembled Ge dots // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 7275. <https://doi.org/10.1063/1.372980>
- Krasilnik Z.F., Novikov A.V., Lobanov D.N., Kudryavtsev K.E., Antonov A.V., Obolenskiy S.V., Zakharov N.D., Werner P. SiGe nanostructures with self-assembled islands for Si-based optoelectronics // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. V. 26. P. 014029. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/1/014029>
- David S., El Kurdi M., Boucaud P., Chelnokov A., Le Thanh V., Bouchier D., Lourtioz J.-M. Two-dimensional photonic crystals with Ge/Si self-assembled islands // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. P. 2509–2511. <https://doi.org/10.1063/1.1612892>
- Shiraki Y., Xu X., Xia J., Tsuboi T., Maruizumi T. Electroluminescence from microcavities of photonic crystals, microdisks and -rings including Ge dots formed on SOI substrates // *ECS Transactions*. 2012. V. 45. № 5. P. 235–246. <https://doi.org/10.1149/1.3700432>
- Schatzl M., Hackl F., Glaser M., Rauter P., Brehm M., Spindlberger L., Simbula A., Galli M., Fromherz T., Schäffler, F. Enhanced telecom emission from single group-IV quantum dots by precise CMOS-compatible positioning in photonic crystal cavities // *ACS Photon.* 2017. V. 4. P. 665–673. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.6b01045>
- Jannesari R., Schatzl M., Hackl, F., Glaser M., Hingerl K., Fromherz T., Schäffler F. Commensurate germanium light emitters in silicon-on-insulator photonic crystal slabs // *Optics Express*. 2014. V. 22. № 21. P. 25426. <https://doi.org/10.1364/OE.22.025426>
- Dyakov S.A., Stepikhova M.V., Bogdanov A.A., Novikov A.V., Yurasov D.V., Shaleev M.V., Krasilnik Z.F., Tikhodeev S.G., Gippius N.A. Photonic bound states in the continuum in Si structures with the self-assembled Ge nanoislands // *Laser Photonics Rev.* 2021. V. 15. P. 2000242. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000242>
- Purcell E.M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies // *Phys. Rev.* 1946. V. 69. P. 681. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.674.2>
- Joannopoulos J., Johnson S.G., Meade R., Winn J. Photonic crystals: molding the flow of light. 2nd ed. N.J: Princeton University Press, 2007. 286 p.
- Юрасов Д.В., Яблонский А.Н., Шалеев М.В., Шенгуров Д.В., Родякина Е.Е., Смагина Ж.В., Вербус В.А., Новиков А.В. Люминесцентный отклик фотонных кристаллов со встроенными Ge nanoостровками с различной глубиной травления отверстий // *Письма в ЖТФ*. 2023. Т. 49. № 10. С. 29–32. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.10.55431.19511>
- Yurasov D.V., Yablonskiy A.N., Shaleev M.V., Shengurov D.V., Rodyakina E.E., Smagina Zh.V., Verbus V.A., Novikov A.V. Luminescent response of photonic crystals with embedded Ge nanoislands with different hole etching depths // *Technical Physics Letters*. 2023. V. 49. № 5. P. 68–72. <http://dx.doi.org/10.21883/TPL.2023.05.56033.19511>
- Яблонский А.Н., Юрасов Д.В., Захаров В.Е., Перетокин А.В., Степихова М.В., Шалеев М.В., Шенгуров Д.В., Родякина Е.Е., Смагина Ж.В., Дьяков С.А., Новиков А.В. Влияние условий оптического возбуждения на спектральные и временные характеристики излучения двумерных фотонных кристаллов с Ge(Si) nanoостровками // *Физика и техника полупроводников*. 2023. Т. 57. № 4. С. 251–258. <https://doi.org/10.21883/FTP.2023.04.55894.08k>
- Yablonskiy A.N., Yurasov D.V., Zakharov V.E., Peretokin A.V., Stepikhova M.V., Shaleev M.V., Shengurov D.V., Rodyakina E.E., Smagina Zh.V., Dyakov S.A., Novikov A.V. Effect of optical excitation conditions on the spectral and temporal characteristics of the radiation from two-dimensional photonic crystals with Ge(Si) nanoislands // *Semiconductors*. 2023. V. 57. № 4. P. 248–255. <https://doi.org/10.61011/SC.2023.04.56421.08k>

АВТОРЫ

Артём Николаевич Яблонский — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 7801340485; <https://orcid.org/0000-0001-9053-1857>; yablonsk@ipmras.ru

AUTHORS

Artem N. Yablonskiy — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 7801340485; <https://orcid.org/0000-0001-9053-1857>; yablonsk@ipmras.ru

Дмитрий Владимирович Юрасов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 24177726700; <https://orcid.org/0000-0003-2186-9218>; inquisitor@ipmras.ru

Всеволод Евгеньевич Захаров — младший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-6003-6791>; zakharov@ipmras.ru

Артем Викторович Перетокин — младший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 57218400285; <https://orcid.org/0000-0003-4729-5646>; aperetokin@ipmras.ru

Маргарита Владимировна Степихова — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 7004073421; <https://orcid.org/0000-0001-8269-0348>; mst@ipmras.ru

Михаил Владимирович Шалеев — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 6507456922; <https://orcid.org/0000-0002-1947-8886>; shalеев@ipmras.ru

Дмитрий Владимирович Шенгуров — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 6603621485; <https://orcid.org/0000-0001-8269-0348>; shen@ipmras.ru

Екатерина Евгеньевна Родякина — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 603090, Россия; Scopus ID: 6508030193; <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>; rodyakina@isp.nsc.ru

Жанна Викторовна Смагина — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 603090, Россия; Scopus ID: 7801695134; <https://orcid.org/0000-0003-0778-5894>; smagina@isp.nsc.ru

Алексей Витальевич Новиков — доктор физ.-мат. наук, доцент, директор Института физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 55943194700; <https://orcid.org/0000-0002-6667-8098>; anov@ipmras.ru

Dmitry V. Yurasov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 24177726700; <https://orcid.org/0000-0003-2186-9218>; inquisitor@ipmras.ru

Vsevolod E. Zakharov — Junior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-6003-6791>; zakharov@ipmras.ru

Artem V. Peretokin — Junior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 57218400285; <https://orcid.org/0000-0003-4729-5646>; aperetokin@ipmras.ru

Margarita V. Stepikhova — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 7004073421; <https://orcid.org/0000-0001-8269-0348>; mst@ipmras.ru

Mikhail V. Shaleev — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 6507456922; <https://orcid.org/0000-0002-1947-8886>; shaleev@ipmras.ru

Dmitry V. Shengurov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 6603621485; <https://orcid.org/0000-0001-8269-0348>; shen@ipmras.ru

Ekaterina E. Rodyakina — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics of SBRAS, Novosibirsk, 603090, Russia; Scopus ID: 6508030193; <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>; rodyakina@isp.nsc.ru

Zhanna V. Smagina — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics of SBRAS, Novosibirsk, 603090, Russia; Scopus ID: 7801695134; <https://orcid.org/0000-0003-0778-5894>; smagina@isp.nsc.ru

Alexey V. Novikov — D.Sci. in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Director, Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 55943194700; <https://orcid.org/0000-0002-6667-8098>; anov@ipmras.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2024
Одобрена после рецензирования 24.04.2024
Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 06.03.2024
Approved after review 24.04.2024
Accepted for publication 30.08.2024