

Люминесценция пространственно упорядоченных одиночных и групп самоформирующихся Ge(Si) наноструктур, встроенных в фотонные кристаллы

© Ж.В. Смагина¹, А.В. Новиков², М.В. Степихова², В.А. Зиновьев¹, Е.Е. Родякина^{1,3}, А.В. Ненашев^{1,3}, С.М. Сергеев², А.В. Перетокин^{2,4}, П.А. Кучинская¹, М.В. Шалеев², С.А. Гусев², А.В. Двуреченский^{1,3}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, 603155 Нижний Новгород, Россия

E-mail: smagina@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 9 марта 2020 г.

В окончательной редакции 18 марта 2020 г.

Принята к публикации 18 марта 2020 г.

Проведены исследования люминесцентных свойств массивов пространственно упорядоченных одиночных и групп самоформирующихся наноструктур Ge(Si), в том числе встроенных в двумерные фотонные кристаллы. Показано, что встраивание массива упорядоченных одиночных и групп Ge(Si) островков в фотонные кристаллы приводит к увеличению интенсивности их сигнала фотолюминесценции при температуре жидкого азота. При этом наибольший рост интенсивности (до ~ 30 раз) наблюдается для упорядоченного массива одиночных Ge(Si) островков. Рост интенсивности связывается с взаимодействием излучения островков с радиационными модами фотонного кристалла, которое более эффективно осуществляется для массива одиночных островков. В результате сигнал люминесценции от одиночных упорядоченных островков Ge(Si), встроенных в фотонные кристаллы, наблюдается вплоть до комнатной температуры.

Ключевые слова: SiGe-гетероструктуры, квантовые точки, пространственное упорядочение, люминесценция, фотонный кристалл.

DOI: 10.21883/FTR.2020.08.49639.9392

1. Введение

Встраивание активной, светоизлучающей среды в различные резонаторы является одним из способов повышения ее эффективности и управления направленностью излучения [1–6]. При этом положительный эффект от встраивания активной среды в резонаторы во многом определяется не только параметрами резонатора, но и свойствами самой активной среды. В частности, излучающие свойства активной среды не должны сильно зависеть от поверхностной рекомбинации носителей заряда, так как многие резонаторы (микродиски, фотонные кристаллы, плазмонные и диэлектрические микрорезонаторы) характеризуются развитой поверхностью. Для определения возможностей увеличения эффективности излучательной рекомбинации носителей заряда в активной среде за счет ее встраивания в резонаторы необходимо, чтобы исходная эффективность среды была бы заметно < 100% [5]. При этом максимального эффекта от встраивания в резонатор можно достичь, если имеется возможность контролируемого позиционирования излучателей в нем [6,7].

Всем вышеперечисленным условиям удовлетворяют структуры с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами

(квантовыми точками). В частности, за счет пространственной локализации носителей заряда в наноструктурах во всех трех направлениях их излучательные свойства менее чувствительны к наличию различных дефектов в структуре по сравнению со структурами с меньшей степенью локализации носителей заряда (объемными структурами и структурами с квантовыми ямами) [8,9]. Несмотря на то что Ge(Si) наноструктуры характеризуются наличием сигнала люминесценции вплоть до комнатной температуры, эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в них не высока [10,11], что не накладывает ограничения на ее рост в резонаторах. Одним из преимуществ Ge(Si) островков является тот факт, что они могут быть выращены непосредственно на подложках „кремний-на-изоляторе“, без формирования толстого промежуточного буфера [12,13]. Это позволяет легко реализовать пространственное ограничение распространения излучения в направлении роста. Также к настоящему времени для Ge(Si) наноструктур достаточно хорошо развиты методы их контролируемого пространственного упорядочения за счет роста островков на предварительно структурированной поверхности кремния [7,14,15]. Отмеченные свойства делают структуры с Ge(Si) наноструктурами

одним из удобных модельных объектов для исследования взаимодействия активной среды с различными резонаторами [7,12,16–19].

Одним из направлений исследований в этой области является изучение возможности роста эффективности излучения от Ge(Si) островков за счет их встраивания в двумерные фотонные кристаллы (ФК) [7,16–18,20–22]. При этом можно выделить два различных подхода к решению этой задачи. Первый основан на взаимодействии излучения островков с модами микрорезонатора ФК [7,16,20,21], а второй — с различными радиационными модами самого ФК [17,18,22]. Оба этих подхода позволили продемонстрировать существенный рост интенсивности сигнала люминесценции от островков при комнатной температуре [17,21]. Необходимо отметить, что эти подходы предъявляют различные требования к контролируемому встраиванию островков в ФК. Так, при использовании ФК с микрорезонатором стоит задача прецизионного встраивания одиночного островка [7] или группы островков [18] в микрорезонатор. При этом островки, находящиеся вне резонатора, не оказывают заметного влияния на сигнал люминесценции ФК, т.е. в этом случае важны только локальная плотность островков и их расположение внутри микрорезонатора. В случае ФК без микрорезонаторов важны поверхностная плотность и пространственное расположение островков во всем ФК (или по крайней мере в области накачки). Ранее было показано, что изменение в широких пределах локальной и средней поверхностной плотности Ge(Si) островков, а также их пространственного расположения относительно друг друга, может быть достигнуто за счет формирования массивов одиночных и групп пространственно упорядоченных Ge(Si) островков путем варьирования параметров ямок на структурированной поверхности кремния [12,23–25].

В данной работе представлены результаты сравнительных исследований люминесцентных свойств массивов пространственно упорядоченных одиночных и групп Ge(Si) самоформирующихся наноструктур. Рассмотрены особенности взаимодействия излучения упорядоченных массивов одиночных и групп Ge(Si) островков с радиационными модами двумерных фотонных кристаллов.

2. Методика эксперимента

Для возможности встраивания Ge(Si) наноструктур в двумерные ФК использовались подложки „кремний-на-изоляторе“ („silicon on isolator“, SOI), толщина верхнего („приборного“) слоя Si в которых составляла 80–90 нм, а скрытого окисла SiO₂ — 3 мкм. Для пространственного упорядочения наноструктур поверхность подложек предварительно структурировалась с помощью электронной литографии и плазмохимического травления [12,23,25]. В данной работе исследовалась структура,

на поверхности которой были созданы массивы ямок глубиной ~ 50 нм, расположенных в виде квадратных решеток с периодом 1, 2 и 4 мкм. Формирование упорядоченных Ge(Si) островков на структурированной подложке осуществлялось методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Подробно методика, используемая для формирования упорядоченных Ge(Si) островков на структурированной поверхности Si, описана в работах [15,23,26]. В данной работе формирование островков происходило за счет осаждения слоя Ge толщиной ~ 4.5 монослоя (МС) (1 МС ~ 0.136 нм), что на ~ 0.5 МС больше, чем в ранее опубликованных работах [15,23,26]. Для увеличения интенсивности сигнала люминесценции была сформирована многослойная структура, содержащая 10 слоев Ge(Si) наноструктур. Толщина прослойки Si между соседними слоями с упорядоченными наноструктурами составляла ~ 15 нм, что обеспечивало их вертикальное упорядочение. Последний, десятый, слой островков кремнием не зарастивался, что позволяло контролировать расположение наноструктур в плоскости структуры. Температура роста активной части с островками составляла 700°C, а скорость осаждения Ge — 0.005 нм/с. Суммарная толщина структуры над скрытым окислом составляла ~ 300 нм.

Формирование на выращенной структуре двумерных фотонных кристаллов, представляющих собой гексагональную решетку отверстий, осуществлялось с помощью электронной литографии и анизотропного плазмохимического травления в смеси SF₆/C₄F₈-газов. Использовалась отработанная ранее технология пространственного совмещения ФК с упорядоченными массивами Ge(Si) наноструктур [19]. Период (a) ФК варьировался в диапазоне $a = 525–600$ нм, а отношение радиуса отверстий (r) к периоду ФК было $r/a \sim 0.3$. Выбор параметров ФК определялся условием обеспечения взаимодействия излучения Ge(Si) наноструктур в области длин волн 1.2–1.55 мкм с радиационными модами ФК, расположенными в окрестности Г-точки зоны Бриллюэна [17].

Морфология выращенных структур исследовалась с помощью сканирующей электронной (СЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии. Излучательные свойства структур исследовались методом микрофотолюминесценции (ФЛ) с высоким пространственным и спектральным разрешением. Сигнал ФЛ возбуждался непрерывным лазером на длине волны 532 нм с мощностью ~ 4 мВт. Лазерное излучение фокусировалось на образец в пятно диаметром 2 мкм объективом Mitutoyo M Plan APO 50x (числовая апертура NA=0.42). Измерения проводились в геометрии нормального падения возбуждающего луча лазера и сбора детектируемого сигнала ФЛ. Сигнал микро-ФЛ детектировался охлаждаемым Ge детектором с помощью фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS 125HR. Измерения микро-ФЛ выполнялись при температурах 77 и 300 К. Для охлаждения образца использовался проточный криостат.

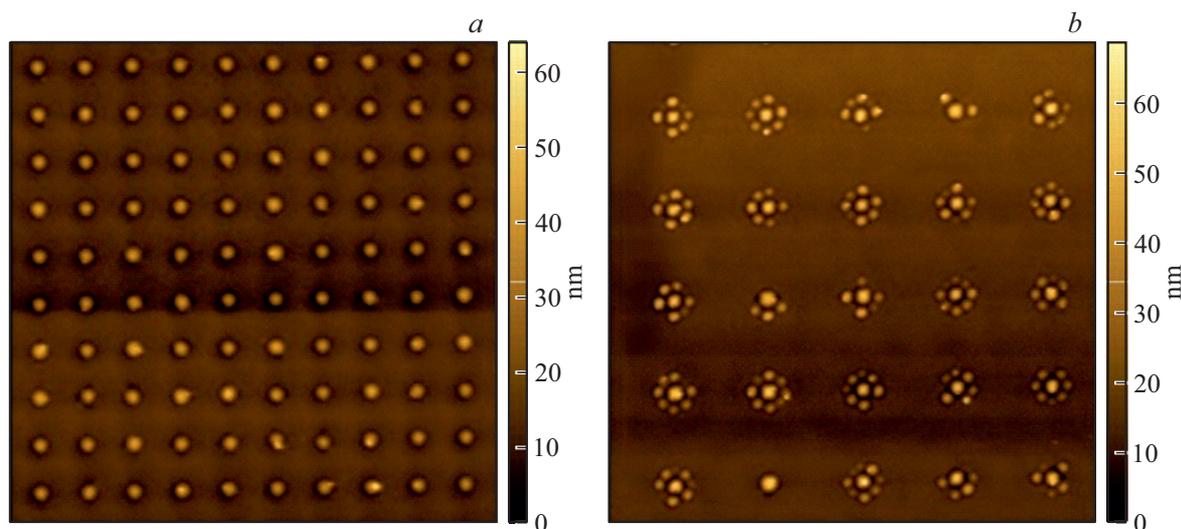


Рис. 1. АСМ-снимки: *a* —упорядоченного массива одиночных Ge(Si) наноструктур, сформированного в области расположения ямок травления с периодом 1 мкм; *b* — упорядоченного массива групп Ge(Si) наноструктур, сформированного в области расположения ямок травления с периодом 2 мкм. Размер снимков — 10×10 мкм.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

3.1. Излучательные свойства пространственно упорядоченных отдельных и групп Ge(Si) наноструктур

Согласно ранее выполненным исследованиям [23,26], глубина и форма ямок, используемых в настоящей работе для упорядочения островков, должны приводить к зарождению единичного островка на дне ямки. Именно такое зарождение островков наблюдается при расположении ямок в виде квадратной решетки с периодом 1 мкм (рис. 1, *a*). В результате формируется массив пространственно упорядоченных Ge(Si) островков с поверхностной плотностью 10^8 см^{-2} , соответствующей поверхностной плотности ямок.

Однако при увеличении периода упорядочения ямок от 1 до 2 и 4 мкм зарождение островков происходит не только внутри ямки, но и вокруг нее (рис. 1, *b*). Это приводит к формированию на поверхности массива упорядоченных групп Ge(Si) наноструктур. При этом количество островков в группе для периодов расположения ямок 2 и 4 мкм варьируется от 1 до 9, а среднее значение составляет 5–6 островков на группу (рис. 1, *b*). В результате образования групп островков усредненная по площади поверхностная плотность островков в области расположения ямок с периодом 2 мкм составляет $1.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, что заметно превосходит плотность ямок ($2.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$). Рост периода расположения ямок до 4 мкм приводит к уменьшению средней плотности островков до $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ при плотности ямок $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Таким образом, формирование групп островков приводит к более слабой зависимости средней поверхностной плотности островков от периода

расположения ямок, чем в случае образования упорядоченных массивов одиночных островков [15]. Образование групп островков также ведет к росту неоднородности распределения островков по поверхности: высокой плотности островков в месте формирования группы (до $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$) и почти полному отсутствию островков между группами.

Формирование групп островков на структурированной поверхности с ямками малой глубины ($< 50 \text{ нм}$), для которых независимо от периода их расположения ранее наблюдалось зарождение одиночных островков [15], вызвано используемым в настоящей работе большим количеством осажденного Ge (4.5 МС вместо 4 МС в работе [15]) и выявленным ранее существенным замедлением роста бездефектных самоформирующихся наноструктур Ge(Si) при достижении ими некоторого предельного размера [27–29]. Следствием этого является то, что при расположении ямок в решетках с периодом 2 и 4 мкм количество осажденного Ge, приходящегося на одну ямку, превышает количество, которое необходимо для достижения островками в ямках своих предельных размеров. Замедление увеличения объема островка внутри ямок ведет к тому, что оставшееся количество атомов Ge идет на зарождение и рост островков вокруг ямки [29]. С уменьшением периода упорядочения ямок уменьшается и количество Ge, приходящегося на одну ямку. В результате для периода 1 мкм осажденного Ge недостаточно, чтобы островки внутри ямок достигли своих предельных размеров.

Необходимо отметить, что при используемых параметрах осаждения Ge (температуре, скорости и его количестве) зарождение островков начинается и на неструктурированной поверхности подложки. Однако поверхностная плотность островков на неструктури-

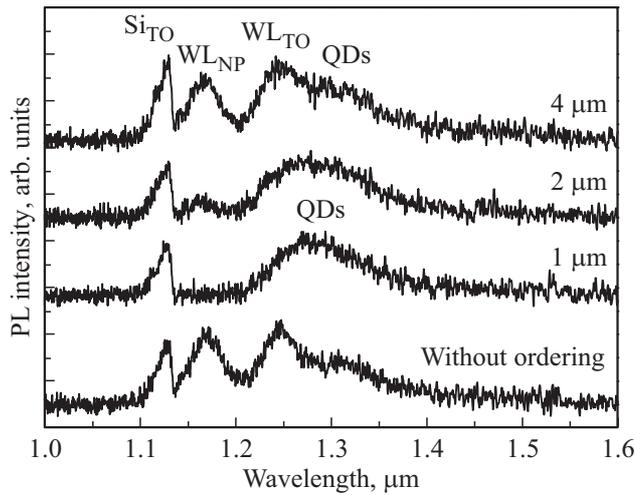


Рис. 2. Спектры микро-ФЛ от неструктурированной области с неупорядоченными островками (without ordering) и структурированных областей с ямками травления, расположенными с различными периодами (период указан рядом с соответствующим спектром). Отмечены пики, связанные с сигналом ФЛ от кремния (Si_{TO}), GeSi смачивающего слоя (WL_{NP} и WL_{TO}) и от островков (QDs). Спектры разнесены по вертикальной оси для наглядности. Спектры измерены при 77 К.

рованной поверхности составляет лишь $\sim 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, что существенно меньше, чем в структурированных областях.

К настоящему времени установлено, что помимо поверхностной плотности состав Ge(Si) островков также оказывает определяющее влияние на их излучающие свойства [30–32]. При этом высокие температуры и малые скорости осаждения Ge, используемые для формирования упорядоченных островков, приводят к росту доли кремния в них до $\sim 65\%$ [15,33]. Одним из следствий роста доли Si в Ge(Si) островках является падение интенсивности сигнала люминесценции от них при комнатной температуре [31]. Поэтому исследования упорядоченных Ge(Si) островков в данной работе выполнялись преимущественно при 77 К.

Спектры микро-ФЛ от различных областей структуры вне ФК, измеренные при 77 К, представлены на рис. 2. В спектре ФЛ от неструктурированной области образца присутствуют: сигнал от кремния, связанный с рекомбинацией носителей заряда с участием поперечного оптического фонона (Si_{TO} -пик), от GeSi смачивающего слоя (пики, связанные с рекомбинацией носителей заряда без участия фонона (WL_{NP} -пик) и с участием поперечного оптического фонона (WL_{TO} -пик)) (рис. 2). Также в спектре ФЛ от неструктурированной части структуры в области 1.3 мкм присутствует слабый сигнал от островков (рис. 2). Малая интенсивность сигнала ФЛ от островков и заметный вклад сигнала от смачивающего слоя объясняется низкой ($\sim 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$) поверхностной плотностью островков в неструктурированной области. Необходимо отметить, что из-за упомянутой выше вы-

сокой доли Si в островках в исследованной структуре их сигнал ФЛ сдвинут в область меньших длин волн по сравнению с островками, выращенными при более низких температурах осаждения Ge и (или) более высоких скоростях осаждения [32]. В результате сигнал ФЛ от островков в исследованной структуре спектрально перекрывается с WL_{TO} -пиком от смачивающего слоя (рис. 2).

Формирование в структурированной области с ямками травления, расположенными с периодом 1 мкм, массива упорядоченных одиночных Ge(Si) островков с поверхностной плотностью почти на порядок больше, чем в неструктурированной области, приводит к росту интенсивности сигнала ФЛ от островков и отсутствию сигнала от смачивающего слоя (рис. 2). В сигнале ФЛ от упорядоченных групп Ge(Si) островков, расположенных с периодом 2 мкм, несмотря на среднюю поверхностную плотность островков, близкую к плотности одиночных упорядоченных островков, расположенных с периодом 1 мкм, помимо сигнала от островков присутствует и слабый сигнал от смачивающего слоя (рис. 2). Появление этого сигнала связывается с неоднородным распределением островков по поверхности в областях, где происходит формирование упорядоченных групп островков (рис. 1, b). Увеличение периода расположения групп островков до 4 мкм приводит как к росту неоднородности распределения островков по поверхности, так и к уменьшению средней поверхностной плотности островков. В результате наблюдается рост сигнала от смачивающего слоя и уменьшение сигнала от островков (рис. 2). При этом необходимо отметить, что интенсивность сигнала ФЛ от групп островков имеет более слабую зависимость от периода расположения ямок травления, чем в случае упорядоченного массива одиночных островков [15], когда плотность островков совпадает с плотностью ямок. Это вызвано тем, что средняя поверхностная плотность островков при формировании их упорядоченных групп может значительно превосходить плотность ямок на структурированной (рис. 1).

3.2. Излучательные свойства пространственно упорядоченных одиночных и групп Ge(Si) наноструктур, встроенных в фотонные кристаллы

Как было указано выше, параметры ФК (период и отношение r/a), в которые встраивались упорядоченные одиночные и группы Ge(Si) островков, выбирались таким образом, чтобы обеспечить взаимодействие излучения активной среды (наноструктур) в диапазоне 1.2–1.55 мкм с радиационными модами ФК [17]. Результатом этого взаимодействия является значительный рост интенсивности сигнала ФЛ от фотонных кристаллов с массивом одиночных Ge(Si) наноструктур, упорядоченных с периодом 1 мкм (рис. 3). Сигнал ФЛ от данных

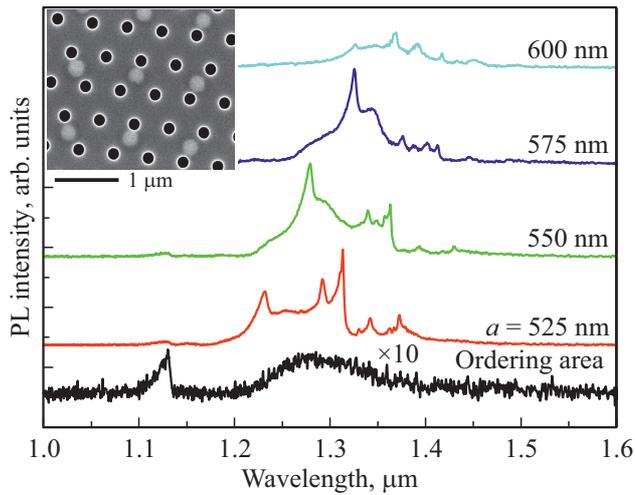


Рис. 3. Спектры микро-ФЛ от массива упорядоченных с периодом 1 мкм одиночных Ge(Si) островков вне ФК (ordering area) и встроенного в ФК с различными периодами. Период ФК указан рядом с соответствующим спектром. Спектры измерены при 77 К. На вставке — СЭМ-снимок части ФК с $a = 575$ нм с встроенным массивом одиночных Ge(Si) островков. Темные области на снимке — отверстия ФК, светлые — Ge(Si) островки.

ФК в спектральной области, где наблюдается взаимодействие с модами ФК, состоит из нескольких узких линий (рис. 3). Каждая из этих линий соответствует радиационным модам ФК, расположенным внутри светового конуса. Так как сбор сигнала в режиме микро-ФЛ осуществляется по нормали к поверхности, наблюдаемое увеличение интенсивности сигнала ФЛ связано с взаимодействием с модами, расположенными вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна, которые имеют малую групповую скорость [2,17,34]. Ширина наблюдаемых линий в спектрах микро-ФЛ структур с островками, встроенными в ФК, определяется добротностью соответствующих мод ФК и числовой апертурой используемого объектива [17].

Из спектров микро-ФЛ видно, что с ростом периода ФК область, в которой наблюдается рост интенсивности сигнала ФЛ островков, смещается в сторону больших длин волн (рис. 3). Это связано с тем, что положение радиационных мод на зонной диаграмме ФК определяется отношением a/λ . Поэтому с ростом периода ФК растет и длина волны, на которой наблюдается взаимодействие излучения среды с соответствующей модой ФК. Изменение периода ФК в диапазоне $a = 525\text{--}600$ нм позволяет достичь роста интенсивности для различных областей сигнала ФЛ от упорядоченного массива отдельных Ge(Si) островков (рис. 3). Максимальный рост интенсивности сигнала ФЛ от упорядоченного массива одиночных Ge(Si) островков наблюдается для ФК с периодом $a = 575$ нм, для которого положение радиационных мод ФК совпадает с максимумом сигнала ФЛ от островков (рис. 3). Для Ge(Si) островков, встроенных в ФК с периодом $a = 575$ нм, наблюдается рост интенсив-

ности сигнала ФЛ в ~ 30 раз по сравнению с Ge(Si) островками вне ФК.

Как было отмечено выше, уменьшение периода ФК ведет к смещению в меньшие длины волн области взаимодействия излучения структуры с модами ФК (рис. 3). В результате для ФК с наименьшим исследованным периодом $a = 525$ нм наблюдается рост интенсивности сигнала ФЛ не только от островков, но и от смачивающего слоя (рис. 3). Это хорошо видно при сравнении спектров ФЛ от фотонного кристалла с данным периодом, сформированных в области упорядочения отдельных островков и в неструктурированной области с неупорядоченными островками (рис. 4). Из-за малой поверхностной плотности неупорядоченных островков в неструктурированной области основной вклад в сигнал ФЛ этой области дает смачивающий слой (рис. 2). Пик на длине волны 1.23 мкм в спектре ФЛ фотонного кристалла с периодом $a = 525$ нм спектрально совпадает с сигналом ФЛ от оптического перехода с участием поперечного оптического фона от смачивающего слоя (WL_{TO}) в неструктурированной области вне ФК (рис. 2). Все это позволяет связать наиболее интенсивный пик ФЛ от ФК с $a = 525$ нм, сформированного в неструктурированной области, с взаимодействием WL_{TO} перехода с модами ФК (рис. 4). Из-за слабого сигнала ФЛ от островков в неструктурированной области, что обусловлено их низкой поверхностной плотностью, мала интенсивность линий ФЛ, связанных с взаимодействием излучения островков с модами ФК в области длин волн > 1.25 мкм (рис. 4).

Различие в упорядочении Ge(Si) островков при увеличении периода расположения ямок на структурированной поверхности подложки находит свое отражение в спектрах микро-ФЛ ФК, сформированных в различ-

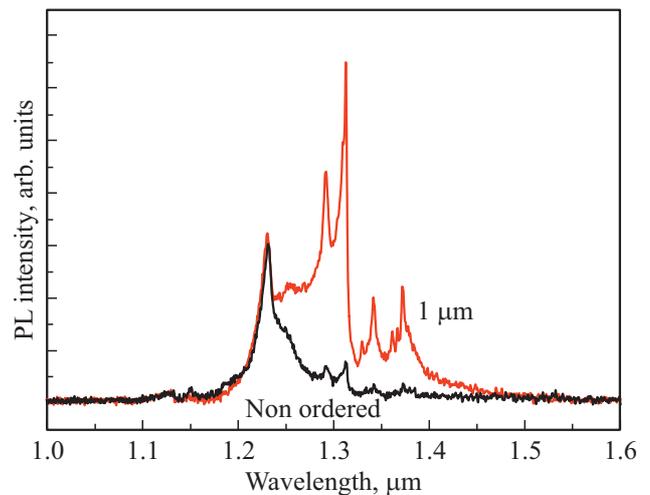


Рис. 4. Спектры микро-ФЛ от ФК с периодом $a = 525$ нм, сформированных в неструктурированной области с неупорядоченными островками (non ordered) и в области формирования упорядоченного с периодом 1 мкм массива одиночных островков (1 мкм). Спектры измерены при 77 К.

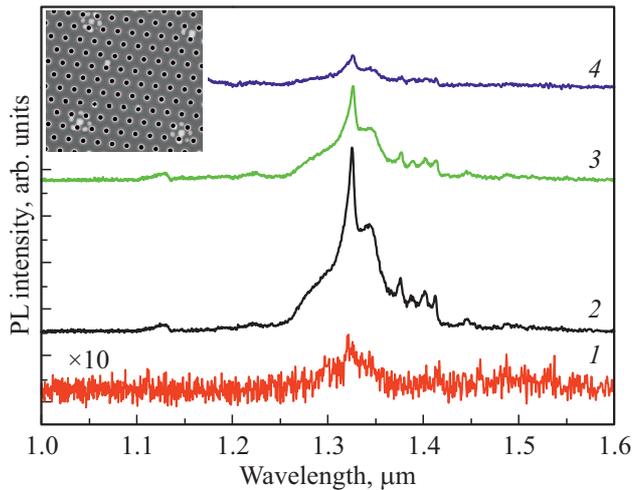


Рис. 5. Спектры микро-ФЛ от ФК с периодом $a = 575$ нм, сформированных в области упорядоченного с периодом 1 мкм массива одиночных островков (спектры 1 и 2) и упорядоченных с периодом 2 мкм (спектр 3) и 4 мкм (спектр 4) массивов групп островков. Спектр 1 измерен при комнатной температуре, а спектры 2, 3 и 4 — при 77 К. На вставке — СЭМ-снимок части ФК с $a = 575$ нм с встроенным массивом упорядоченных с периодом 4 мкм групп Ge(Si) островков. Темные области на снимке — отверстия ФК, светлые — Ge(Si) островки.

ных областях структуры (рис. 5). В частности, рост периода расположения ямок не оказывает влияния на вид сигнала ФЛ, но ведет к существенному уменьшению его интенсивности (рис. 5). Для области с периодом расположения ямок 4 мкм это уменьшение можно связать с падением средней поверхностной плотности островков с ростом периода упорядочения. Однако уменьшение интенсивности сигнала ФЛ наблюдается и от ФК, сформированного в области расположения ямок с периодом 2 мкм, в которой средняя поверхностная плотность островков, сформировавших упорядоченные группы, даже чуть выше, чем плотность упорядоченных одиночных островков в области расположения ямок с периодом 1 мкм (рис. 5). В этом случае уменьшение интенсивности сигнала ФЛ от ФК связывается с уменьшением эффективности взаимодействия излучения упорядоченных групп островков с модами ФК, по сравнению с массивом одиночных островков. Во-первых, это вызвано с тем, что при формировании ФК в области упорядоченных групп островков значительно повышается вероятность того, что отверстия ФК попадут в один или несколько островков из группы (см. вставку на рис. 5). Во-вторых, можно предположить, что при локальной концентрации островков в области формирования группы не обеспечивается эффективного взаимодействия излучения каждого отдельного островка из группы с модами ФК. Можно отметить, что различия в упорядочении островков оказывают влияние только на интенсивность сигнала ФЛ, в то время как вид спектра

и положение отдельных линий в спектрах микро-ФЛ от ФК определяются только параметрами самого ФК. Полученные результаты указывают на то, что для обеспечения эффективного взаимодействия излучения Ge(Si) островков с радиационными модами самого ФК (а не микрорезонатора) более предпочтительно встраивание в них массивов упорядоченных отдельных островков, а не их групп.

Как отмечалось выше, из-за высоких температур и малых скоростей осаждения Ge, используемых для формирования пространственно упорядоченных Ge(Si) островков, сигнал ФЛ от упорядоченных одиночных и групп островков при комнатной температуре не наблюдается. В то же время встраивание массива одиночных островков, упорядоченных с периодом 1 мкм, в ФК позволяет существенно увеличить интенсивность сигнала ФЛ от островков не только при азотных температурах (рис. 5), но и при комнатной температуре. В результате в спектрах микро-ФЛ, измеренных при комнатной температуре от ФК, сформированных в области массива одиночных упорядоченных островков, наблюдается отчетливый сигнал люминесценции (рис. 5).

4. Заключение

Исследования морфологии поверхности эпитаксиальных структур с массивами пространственно упорядоченных одиночных и групп Ge(Si) самоформирующихся наноструктур, полученных на структурированной поверхности кремния, показали, что образование групп Ge(Si) наноструктур приводит к ослаблению зависимости поверхностной плотности островков от плотности ямок травления, используемых для их формирования. В результате интенсивность сигнала ФЛ от групп островков имеет более слабую зависимость от периода упорядочения, чем в случае образования упорядоченного массива одиночных островков. Встраивание массива упорядоченных одиночных и групп Ge(Si) островков в двумерные ФК позволяет существенно увеличить интенсивность сигнала ФЛ от них при азотных температурах. При этом наибольший рост интенсивности сигнала ФЛ (до ~ 30 раз) наблюдается для упорядоченного массива одиночных Ge(Si) островков. Рост интенсивности ФЛ связывается с взаимодействием излучения островков с радиационными модами ФК, которое более эффективно осуществляется для массива одиночных островков за счет их однородного распределения по поверхности. Реализация данного взаимодействия позволяет наблюдать сигнал ФЛ от одиночных упорядоченных Ge(Si) островков, встроенных в ФК, вплоть до комнатной температуры.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Армбристеру за рост Ge/Si-структур методом молекулярно-лучевой

эпитаксии, ЦКП „ВТАН“ НГУ и ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования.

Финансирование работы

Работа финансировалась из средств грантов РФФИ № 16-29-14031, № 19-42-540002-р_а и Правительства Новосибирской области в части создания структур с КТ, встроенными в фотонные кристаллы, государственного задания № 0035-2019-0020 и гранта РФФИ № 18-29-20016-мк в части люминесцентных измерений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.J. Vahala. *Nature*, **424**, 839 (2003).
- [2] K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, S. Noda. *Nature Photonics*, **8**, 406 (2014).
- [3] I. Staude, J. Schilling *Nature Photonics*, **11**, 274 (2017).
- [4] S. Bidault, M. Mivelle, N. Bonod. *J. Appl. Phys.*, **126**, 094104 (2019).
- [5] A. Vaskin, R. Kolkowski, A.F. Koenderink, I. Staude. *Nanophotonics*, **8**, 1151 (2019).
- [6] D.G. Baranov, D.A. Zuev, S.I. Lepeshov, O.V. Kotov, A.E. Krasnok, A.B. Evlyukhin, B.N. Chichkov. *Optica*, **4**, 814 (2017).
- [7] M. Schatzl, F. Hackl, M. Glaser, P. Rauter, M. Brehm, L. Spindlberger, A. Simbula, M. Galli, T. Fromherz, F. Schäffler. *ACS Photonics*, **4**, 665 (2017).
- [8] J.P. Leitao, N.M. Santos, N.A. Sobolev, M.R. Correia, N.P. Stepanina, M.C. Carmo, S. Magalhaes, E. Alves, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik. *Mater. Sci. Engin. B*, **147**, 191 (2008).
- [9] D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev, M.V. Shaleev, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov, P. Werner. *Semiconductors*, **46**, 1418 (2012).
- [10] V.G. Talalaev, G.E. Cirilin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, P. Werner, U. Gösele, J.W. Tomm, T. Elsaesser. *Nanoscale Res. Lett.*, **1**, 137 (2006).
- [11] Z.F. Krasilnik, A.V. Novikov, D.N. Lobanov, K.E. Kudryavtsev, A.V. Antonov, S.V. Obolenskiy, N.D. Zakharov, P. Werner. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 014029 (2011).
- [12] M. Brehm, M. Grydlik. *Nanotechnology*, **28**, 392001 (2017).
- [13] A.N. Yablonskiy, N.A. Baidakova, A.V. Novikov, D.N. Lobanov. *Semiconductors*, **47**, 1496 (2013).
- [14] M. Grydlik, G. Langer, T. Fromherz, F. Schäffler M. Brehm. *Nanotechnology*, **24**, 105601 (2013).
- [15] Ж.В. Смагина, В.А. Зиновьев, Г.К. Кривякин, Е.Е. Родякина, П.А. Кучинская, Б.И. Фомин, А.Н. Яблонский, М.В. Степихова, А.В. Новиков, А.В. Двуреченский. *ФТП*, **52**, 1028 (2018).
- [16] Y. Shiraki, X. Xu, J. Xia, T. Tsuboi, T. Maruizumi. *ECS Transactions*, **45**, 235 (2012).
- [17] M.V. Stepikhova, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, M.V. Shaleev, D.E. Utkin, V.V. Rutckaia, E.V. Skorokhodov, S.M. Sergeev, D.V. Yurasov, Z.F. Krasilnik. *Semicond. Sci. Technol.*, **34**, 024003 (2019).
- [18] Ж.В. Смагина, В.А. Зиновьев, Е.Е. Родякина, Б.И. Фомин, М.В. Степихова, А.Н. Яблонский, С.А. Гусев, А.В. Новиков, А.В. Двуреченский. *ФТП*, **53**, 1366 (2019).
- [19] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling. *Nano Lett.*, **17**, 6886 (2017).
- [20] N. Hauke, S. Lichtmanecker, T. Zabel, F.P. Laussy, A. Laucht, M. Kaniber, D. Bougeard, G. Abstreiter, J.J. Finley, Y. Arakawa. *Phys. Rev. B*, **84**, 085320 (2011).
- [21] Y. Zhang, Ch. Zeng, D. Li, Z. Huang, K. Li, J. Yu, J. Li, X. Xu, T. Maruizumi, J. Xia. *IEEE Photonics J.*, **5**, 4500607 (2013).
- [22] R. Jannesari, M. Schatzl, F. Hackl, M. Glaser, K. Hingerl, T. Fromherz, F. Schäffler. *Opt. Express*, **22**, 25426 (2014).
- [23] Zh.V. Smagina, V.A. Zinovyevev, S.A. Rudin, P.L. Novikov, E.E. Rodyakina, A.V.Dvurechenskii. *J. Appl. Phys.*, **123**, 165302 (2018).
- [24] G. Vastola, M. Grydlik, M. Brehm, T. Fromherz, G. Bauer, F. Boioli, L. Miglio, F. Montalenti. *Phys. Rev. B*, **84**, 155415 (2011).
- [25] C. Dais, G. Mussler, H. Sigg, T. Fromherz, V. Auzelyte, H.H. Solak, D. Grützmacher. *Europhys. Lett.*, **84**, 67017 (2008).
- [26] С.А. Рудин, Ж.В. Смагина, В.А. Зиновьев, П.Л. Новиков, А.В. Ненашев, Е.Е. Родякина, А.В. Двуреченский. *ФТП*, **52**, 1346 (2018).
- [27] D.E. Jesson, G. Chen, K.M. Chen, S.J. Pennycook. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 5156 (1998).
- [28] A.V. Novikov, B.A. Andreev, N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.N. Yablonskiy, M. Miura, N. Usami, Y. Shiraki, M.Ya. Valakh, N. Mesters, J. Pascual. *Mater. Sci. Engin. B*, **89**, 62 (2002).
- [29] Z. Zhong, O.G. Schmidt, G. Bauer. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 133111 (2005).
- [30] J. Wan, Y.H. Luo, Z.M. Jiang, G. Jin, J.L.Liu, K.L. Wang, X.Z. Liao, J. Zou. *J. Appl. Phys.*, **90**, 4290 (2001).
- [31] N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy. *JETP Lett.*, **76**, 365 (2002).
- [32] O.G. Schmidt, U. Denker, S. Christiansen, F. Ernst. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2614 (2002).
- [33] M. Brehm, M. Grydlik, T. Tayagaki, G. Langer, F. Schäffler, O.G. Schmidt. *Nanotechnology*, **26**, 225202 (2015).
- [34] D. Leykam, S. Flach. *APL Photonics*, **3**, 070901 (2018).

Редактор Г.А. Оганесян

Luminescence of spatial ordered single and groups of Ge(Si) nanoislands embedded in photonics crystals

Zh.V. Smagina¹, A.V. Novikov², M.V. Stepikhova²,
V.A. Zinovyev¹, E.E. Rodyakina^{1,3}, A.V. Nenashev^{1,3},
S.M. Sergeev², A.V. Peretokin^{2,4}, P.A. Kuchinskaya¹,
M.V. Shaleev², S.A. Gusev², A.V. Dvurechenskii^{1,3}

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

² Institute for Physics of Microstructures
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

³ Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

⁴ Alekseev State Technical University
of Nizhny Novgorod,
603155 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Photoluminescence (PL) properties of arrays of spatially ordered single Ge(Si) self-assembled islands, including embedded in two-dimensional photonic crystals (PhC), was studied. Incorporation of an array of ordered single islands and their groups into PhC significantly increases the intensity of their PL signal. The most pronounced increase in intensity (up to 30 times at nitrogen temperatures) is observed for an ordered array of single islands. The increase in PL intensity is associated with interaction of island emission with the radiation modes of the PhC, which is more efficient for an array of spatially ordered single islands. As result PL from single ordered Ge(Si) islands embedded in PhC was observed up to room temperature.