

Упорядоченные массивы квантовых точек Ge(Si), встроенные в двумерные фотонные кристаллы

© Ж.В. Смагина¹, В.А. Зиновьев¹, Е.Е. Родякина^{1,2}, Б.И. Фомин¹, М.В. Степихова³,
А.Н. Яблонский³, С.А. Гусев³, А.В. Новиков³, А.В. Двуреченский^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: smagina@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Рассмотрены различные подходы к встраиванию самоформирующихся квантовых точек Ge(Si) в двумерные фотонные кристаллы. Первый подход включает в себя синтез на структурированной поверхности подложки упорядоченного массива квантовых точек Ge(Si), на котором затем формируется фотонный кристалл. Во втором подходе сам фотонный кристалл служит основой для упорядоченного роста квантовых точек. Показано, что в рамках второго подхода, меняя диаметр отверстий фотонного кристалла, можно реализовать два режима роста квантовых точек, при которых они формируются внутри или снаружи отверстий фотонного кристалла. Для структур с упорядоченными квантовыми точками, встроенными в фотонный кристалл, обнаружен рост интенсивности сигнала фотолюминесценции при комнатной температуре в спектральном диапазоне 0,9–1,2 эВ, который связывается с взаимодействием излучения структуры с радиационными модами фотонного кристалла.

Ключевые слова: гетероструктуры, квантовые точки, фотонный кристалл, микрофотолюминесценция.

DOI: 10.21883/FTP.2019.10.48291.37

1. Введение

В последнее время наблюдается заметный прогресс на пути создания источников излучения на базе материалов IV группы, совместимых с существующей кремниевой интегральной технологией [1–10]. Эти источники являются одним из ключевых элементов быстродействующих схем оптической передачи данных, которые разрабатываются для современных процессоров и компьютеров нового поколения. Несмотря на значительные успехи, задача создания эффективных источников излучения, совместимых с кремниевой технологией, остается нерешенной.

Гетероструктуры Ge/Si с самоформирующимися квантовыми точками (КТ) рассматриваются сегодня как один из объектов для решения этой задачи. Привлекательностью этих структур является относительная простота их формирования и наличие в их спектрах люминесценции при комнатной температуре сигнала в области длин волн 1,3–1,6 мкм [8–16]. Однако существенным недостатком данного типа светоизлучающих структур является относительно низкая эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в них. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является встраивание КТ Ge(Si) в различные микрорезонаторы [10,11], в том числе на базе двумерных

фотонных кристаллов (ФК) [12–15], где за счет взаимодействия излучения КТ с модами резонатора можно достичь увеличения скорости излучательной рекомбинации носителей заряда. Для повышения эффективности такого взаимодействия необходимо позиционирование КТ в местах концентрации электромагнитного поля [15], что делает необходимым развитие методов прецизионного встраивания упорядоченных массивов КТ в микрорезонаторы. В данной работе рассматриваются различные подходы к встраиванию упорядоченных массивов самоформирующихся КТ Ge(Si) в резонаторы на основе двумерных фотонных структур и приводятся результаты исследований их люминесцентных свойств.

2. Методика эксперимента

Для получения структур с пространственно упорядоченными КТ Ge(Si), встроенными в ФК, использовались подложки кремния на изоляторе (silicon-on-insulator, SOI). Для пространственного упорядочения КТ поверхность подложек предварительно структурировалась с помощью электронной литографии и плазмохимического травления [15–18]. В работе рассмотрены два подхода для получения упорядоченного массива КТ, встроенных в ФК.

В первом подходе вначале выращивалась структура с массивом упорядоченных КТ, на которой затем формировался ФК. Данный подход ранее использовался для точного позиционирования КТ в фотонно-кристаллическом микрорезонаторе ФК [15]. Создание структур по этой методике проводилось в три этапа. На первом этапе методами электронной литографии и плазмохимического травления проводилось структурирование поверхности подложки путем создания на ней периодической последовательности ямок, расположенных в виде квадратных решеток с периодом от 0.5 до 6 мкм. Для управления зарождением КТ варьировались глубина и форма ямок за счет изменения условий их экспонирования при электронно-лучевой литографии. На втором этапе методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на структурированных подложках SOI было проведено формирование пространственно упорядоченных массивов КТ Ge(Si). Перед ростом структурированная подложка проходила двойную очистку поверхности: химическую обработку, заканчивающуюся формированием защитного слоя окисла Si, и удаление этого защитного слоя в установке МЛЭ при температуре 750°C в слабом потоке Si. Рост структур начинался с осаждения буферного слоя кремния толщиной 40 нм при постепенном повышении температуры роста от 250 до 500°C и последующего отжига выращенного буфера при 700°C в течение 10 мин. Далее на структурированную поверхность с буферным слоем Si при 700°C осаждался слой Ge толщиной ~ 4.5 монослоя (1 монослой = 0.136 нм), достаточной для зарождения трехмерных наноструктур (квантовых точек) внутри или вблизи ямок, но меньшей, чем критическая толщина зарождения наноструктур на плоской поверхности между ямками. В результате зарождение наноструктур Ge(Si) происходило только на затравках в виде ямок [18,19]. Описанным выше способом были выращены структуры, содержащие 4 слоя вертикально и латерально упорядоченных КТ Ge(Si). Толщина прослойки Si между слоями с наноструктурами составляла ~ 15 нм, что обеспечивало вертикальное упорядочение островков. Температура формирования всех слоев КТ и разделяющих прослоек кремния составляла 700°C. Последний слой КТ Ge(Si) не закрывался кремнием, что позволяло контролировать расположение КТ на плоскости структуры. На заключительном этапе на выращенной структуре методами электронной литографии и плазмохимического травления выполнялось формирование фотонных кристаллов. Пространственное совмещение массива КТ и ФК проводилось по предварительно созданному литографическим меткам.

Второй использованный в работе подход к встраиванию КТ Ge(Si) в ФК отличался от первого сменой очередности этапов формирования ФК и упорядоченного массива КТ Ge(Si). В этом подходе формирование ФК проводилось непосредственно на подложке SOI, до роста структуры с островками. Далее проводилась очистка подложки и осуществлялся рост многослойной

структуры с КТ Ge(Si) с аналогичными параметрами и при условиях, как в первом, описанном выше, подходе к встраиванию КТ в ФК. Во втором подходе местами для зарождения КТ служили сами ямки (отверстия), образующие ФК, или их окрестности.

Параметры ФК для обоих подходов были одинаковыми: гексагональная решетка отверстий с периодом 500 нм. Диаметр отверстий ФК варьировался от 150 до 400 нм. Рассмотрены ФК с различными типами дефектов (L или H) в качестве микрорезонаторов.

Морфология выращенных структур с упорядоченными КТ Ge(Si), встроенными в ФК, была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Излучательные свойства структур исследовались методом микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) с высоким пространственным и спектральным разрешением. Сигнал ФЛ возбуждался непрерывным лазерным излучением с длиной волны 532 нм мощностью до 10 мВт. Лазерное излучение фокусировалось на образце в пятно диаметром ~ 2 мкм с помощью объектива $\times 50$. 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 Bruker IFS 125HR.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Ранее выполненные исследования [18,19] позволили определить параметры ямок, необходимые для зарождения единичного островка на дне ямки или группы островков на периферии ямки. Использование описанного выше первого подхода к встраиванию КТ Ge(Si) в ФК позволило встраивать в микрорезонатор ФК единичный наноструктур с высокой точностью его позиционирования (рис. 1). Ранее с использованием подобного подхода была показана возможность реализации условий эффективного взаимодействия излучения КТ с различными модами ФК-микрорезонатора, показана возможность многократного увеличения сигнала ФЛ от КТ Ge(Si) при низких температурах [15]. Недостатком использования метода зарождения КТ в ямках структурированной подложки является относительно низкая поверхностная плотность КТ и увеличение доли Si в них по сравнению с КТ, сформированными на планарной поверхности Si [20,21]. Низкая поверхностная плотность упорядоченных КТ приводит к тому, что в спектрах ФЛ структур с упорядоченными КТ преобладает сигнал от смачивающего слоя Ge [20,21]. Рост же доли Si в КТ Ge(Si) ведет к уменьшению глубины потенциальной ямы для дырок в них и, как следствие, к уменьшению интенсивности сигнала ФЛ от КТ при комнатной температуре [8].

В структурах, в которых ФК создавался после формирования упорядоченного в квадратную решетку массива

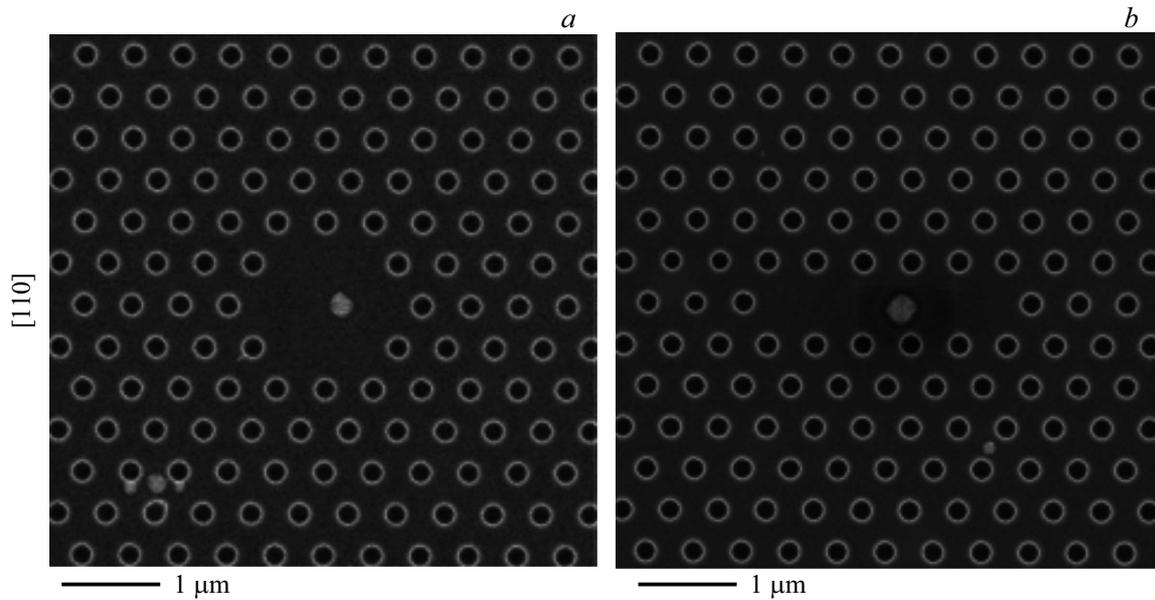


Рис. 1. СЭМ-изображения двумерного ФК с дефектами типа $H5$ (a) и $L5$ (b) со встроенными латерально-упорядоченными одиночными КТ GeSi, полученными осаждением 4.5 монослоев Ge при температуре 700°C на структурированную подложку Si(100), представляющую собой периодическую последовательность ямок в виде квадратной решетки с периодом 6 мкм.

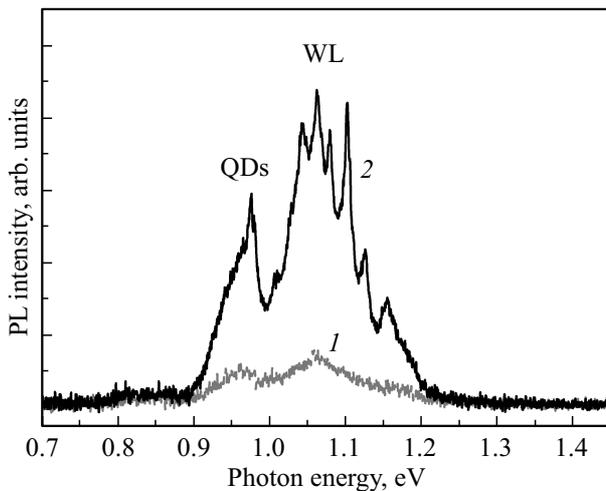


Рис. 2. Спектры микро-ФЛ структуры с упорядоченными в квадратную решетку КТ Ge(Si) с периодом 6 мкм, измеренные в области вне ФК (1) и в области ФК с дефектом типа $L3$ (2). Отмечены области сигналов фотолуминесценции от смачивающего слоя Ge (WL) и квантовых точек (QDs). Измерения выполнены при комнатной температуре.

КТ Ge(Si), обнаружен рост сигнала микро-ФЛ при комнатной температуре в спектральном диапазоне от 0.9 до 1.2 эВ в области ФК, по сравнению с сигналом от области вне ФК (рис. 2). При этом для структур с упорядоченными КТ, встроенными в ФК, наблюдается интенсивный сигнал ФЛ с тонкой структурой спектра, представленного серией узких линий (рис. 2). Для областей с периодом упорядочения островков ≥ 2 мкм наи-

более интенсивный сигнал ФЛ наблюдался в спектральной области, соответствующей смачивающему слою Ge. Это связано с отмеченной выше малой поверхностной плотностью КТ при больших периодах их упорядочения. В частности, для используемых в работе условий измерения в структурах с периодом упорядочения КТ ≥ 2 мкм в область возбуждения сигнала микро-ФЛ (прямо диаметром ~ 2 мкм) попадает не более одной КТ.

Было установлено, что обнаруженные узкие пики ФЛ от области ФК не связаны с взаимодействием излучения структуры с модами ФК-резонатора, поскольку они наблюдались при фокусировке излучения в любую область ФК, в том числе в область ФК, не содержащую микро-резонатор. Ранее подобный эффект усиления излучения структур с КТ Ge(Si) на ФК без резонатора наблюдался в работе [14], где при определенных параметрах ФК реализовывалось взаимодействие излучающей среды с излучательными модами ФК, локализованными вблизи Γ точки зоны Бриллюэна. Предварительные расчеты параметров ФК, исследованных в настоящей работе, показывают, что такое взаимодействие может иметь место и в исследованных структурах с упорядоченными КТ, встроенными в ФК. Однако из-за отмеченной выше низкой поверхностной плотности упорядоченных КТ основной рост интенсивности сигнала ФЛ наблюдается от смачивающего слоя.

Использование второго подхода, в котором формирование ФК проводится до роста структуры с КТ Ge(Si), позволяет за счет варьирования размера отверстий ФК при фиксированном его периоде реализовывать различные режимы упорядочения КТ (рис. 3). В случае, когда радиус отверстий ФК (r), измеренный до осаждения

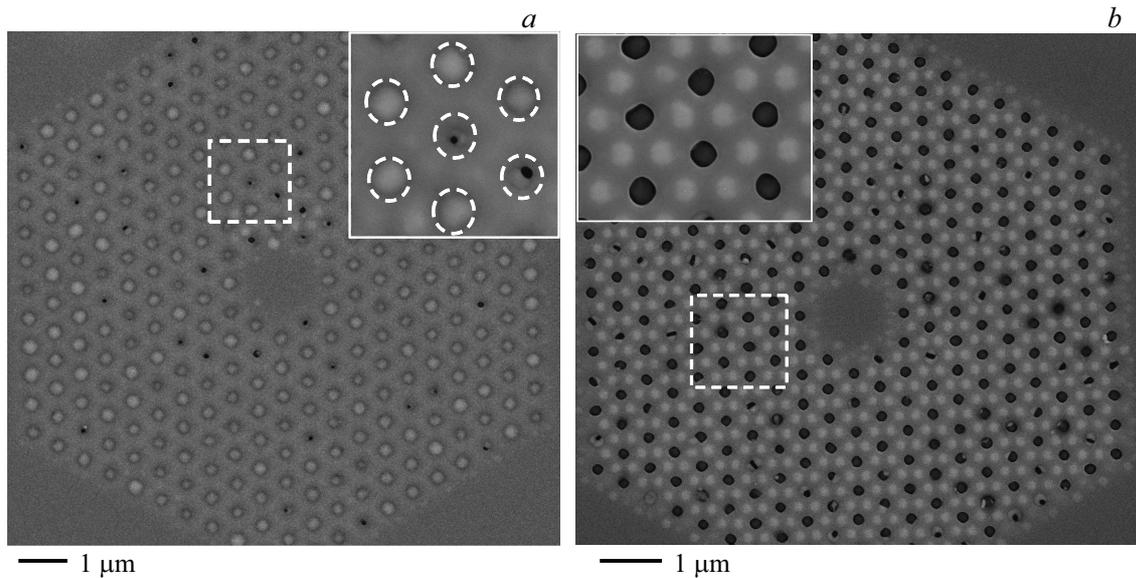


Рис. 3. СЭМ-изображения ФК с КТ Ge(Si), сформированными внутри ямок ФК (*a*) и между отверстиями ФК (*b*). *a*: на вставке — увеличенное изображение выделенной на снимке области, окружностями показано положение отверстий ФК до формирования в них КТ Ge(Si). *b*: темные области соответствуют отверстиям ФК, светлые — КТ Ge(Si), на вставке — увеличенное изображение выделенной на снимке области.

структуры с КТ Ge(Si), соотносится с периодом ФК (*a*) как $r/a = 0.3$, формирование КТ происходит преимущественно в ямках ФК (рис. 3, *a*). Подобное упорядочение КТ аналогично упорядочению КТ на поверхности подложки, структурированной до формирования ФК (см. рис. 1). Однако при этом КТ образуются в самих отверстиях ФК, что ухудшает как параметры самих ФК, так и условия взаимодействия излучения КТ с модами ФК. С практической точки зрения более интересным является случай упорядочения КТ между отверстиями ФК (рис. 3, *b*), который может быть реализован при соотношении $r/a = 0.35$. Изменение места зарождения КТ Ge(Si) с увеличением размеров отверстий при фиксированном периоде между ними связывается с увеличением угла наклона стенок отверстий. Так, для ФК с $r/a = 0.3$ при закрытии их буферным слоем Si формируются отверстия с достаточно пологими боковыми стенками, что обеспечивает условия для формирования КТ преимущественно в ямках ФК (рис. 3, *a*). В то же время для ФК с $r/a = 0.35$ угол наклона стенок по отношению к поверхности подложки оказывается большим и реализуются условия для зарождения КТ между отверстиями ФК (рис. 3, *b*). Это согласуется с результатами работы [22], где было показано, что при превышении некоторого угла наклона стенок ямок, используемых для упорядочения КТ, формирование КТ становится энергетически выгодным не внутри ямок, а по их периметру. В этих условиях при использовании ФК для упорядочения КТ Ge(Si) вокруг одного отверстия может формироваться несколько КТ (рис. 3, *b*). В результате поверхностная плотность КТ в области ФК оказывается значительно больше, чем в случае формирования ФК на структуре

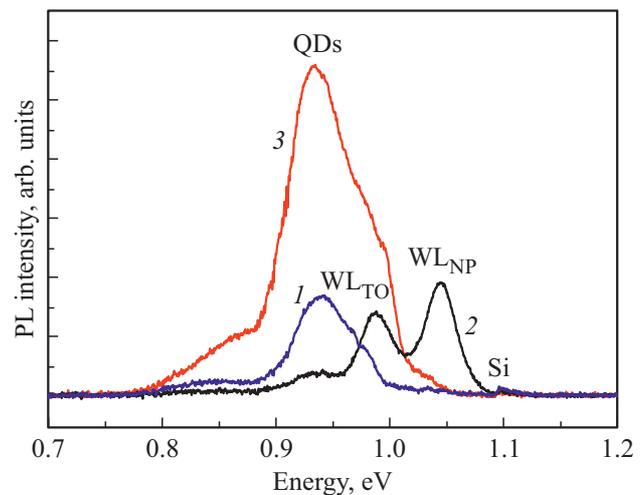


Рис. 4. Спектры микро-ФЛ: 1 — область структуры с КТ Ge(Si), упорядоченными в квадратную решетку с периодом 0.5 мкм; 2 — область структуры с планарной, не структурированной поверхностью; 3 — ФК, СЭМ-снимок которого приведен на рис. 3, *b* и в котором КТ упорядочены между отверстиями ФК. В спектрах отмечены сигналы от Si, квантовых точек (QDs) и смачивающего слоя — две линии, связанные с рекомбинацией носителей заряда без участия фононов (WL_{NP}) и с участием поперечного оптического фонона (WL_{TO}). Температура измерений 77 К.

с упорядоченным массивом одиночных КТ внутри ямок. В то же время при упорядочении КТ на отверстиях ФК в области микрорезонатора (дефекта ФК) в обоих случаях наблюдается низкая плотность КТ (рис. 3). В связи с

этим данный способ упорядочения подходит для ФК без резонатора, в которых используется взаимодействие излучения активной среды с излучающими модами ФК вблизи точки Г зоны Бриллюэна, характеризующимися малой групповой скоростью [14,23].

Сравнительные исследования спектров микро-ФЛ различных областей структуры, проведенные при 77 К, показали значительный рост интенсивности сигнала ФЛ от наноостровков в областях, в которых их упорядочение происходило между отверстиями ФК (см. рис. 3, *b*), по сравнению с планарной, не структурированной, поверхностью, и областью структуры с наиболее плотным из исследованных массивов КТ, упорядоченным в квадратную решетку (с периодом 0.5 мкм) (рис. 4). Данный рост относительно области с неструктурированной поверхностью вызван отсутствием КТ на этой поверхности вследствие того, что осажденное количество Ge было меньше критической толщины двумерного роста Ge на планарной поверхности Si(001) (см. разд. 2). Рост же интенсивности сигнала ФЛ от островков, упорядоченных между отверстиями ФК, по сравнению с сигналом от массива КТ, упорядоченных в квадратную решетку с периодом 0.5 мкм, связывается с отмеченной выше высокой поверхностной плотностью КТ при их упорядочении между отверстиями ФК. Необходимо отметить, что при комнатной температуре интенсивность сигнала ФЛ от областей, в которых для упорядочения КТ Ge(Si) использовались отверстия ФК, мала. Это указывает на то, что оптимальные условия формирования, необходимые для достижения максимальной интенсивности сигнала ФЛ от КТ Ge(Si) при комнатной температуре, могут существенно отличаться для различных методов встраивания КТ в двумерные фотонные кристаллы.

4. Заключение

В работе рассмотрены различные подходы к встраиванию упорядоченных самоформирующихся массивов КТ Ge(Si) в микрезонаторы на основе двумерных ФК. Первый подход включает в себя синтез на структурированной поверхности подложки упорядоченного массива КТ Ge(Si), на котором затем формируется фотонный кристалл. Во втором подходе сам фотонный кристалл служит основой для упорядоченного роста квантовых точек. Показано, что в рамках второго подхода меняя диаметр отверстий фотонного кристалла, можно реализовать два режима роста КТ, при которых КТ формируются внутри или снаружи отверстий ФК. В последнем случае возможно встраивание в ФК упорядоченного массива Ge(Si) КТ. Для структур, в которых ФК формировался на массиве упорядоченных КТ, в области ФК обнаружен рост интенсивности сигнала фотолуминесценции при комнатной температуре в спектральном диапазоне 0.9–1.2 эВ, который связывается с взаимодействием излучения структуры с радиационными модами ФК.

Благодарности

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

Финансирование работы

Работа финансировалась из средств грантов РФФИ № 16-29-14031 и 19-42-540002-р_а и Правительства Новосибирской области в части создания структур с КТ, встроенными в фотонные кристаллы, и гранта РФФИ № 18-29-20016-мк в части люминесцентных измерений. Электронно-лучевая литография проводилась на оборудовании ЦКП „Наноструктуры“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L.C. Kimerling, J. Michel. *Optics Lett.*, **35**, 679 (2010).
- [2] R. E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J.T. Bessette, M. Romagnoli, L.C. Kimerling, J. Michel. *Opt. Express*, **20**, 11316 (2012).
- [3] R. Koerner, M. Oehme, M. Gollhofer, M. Schmid, K. Kostecky, S. Bechler, D. Widmann, E. Kasper, J. Schulze. *Opt. Express*, **23**, 14815 (2015).
- [4] S. Bao, D. Kim, C. Onwukaeme, S. Gupta, K. Saraswat, K.H. Lee, Y. Kim, D. Min, Y. Jung, H. Qiu, H. Wang, E.A. Fitzgerald, C.S. Tan, D. Nam. *Nature Commun.*, **8**, 1845 (2017).
- [5] A. Elbaz, M. El Kurdi, A. Aassime, S. Sauvage, X. Checoury, I. Sagnes, C. Baudot, F. Boeuf, P. Boucaud. *APL Photon.*, **3**, 106102 (2018).
- [6] S. Wirths, R. Geiger, N. von den Driesch, G. Mussler, T. Stoica, S. Mantl, Z. Ikonik, M. Luysberg, S. Chiussi, J.M. Hartmann, H. Sigg, J. Faist, D. Buca, D. Grützmacher. *Nature Photonics*, **9**, 88 (2015).
- [7] Q.M. Thai, N. Pauc, J. Aubin, M. Bertrand, J. Chrétien, A. Chelnokov, J.M. Hartmann, V. Reboud, V. Calvo. *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 051104 (2018).
- [8] 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).
- [9] P. Rauter, L. Spindlberger, F. Schäffler, Th. Fromherz, J. Freund, M. Brehm. *ACS Photonics*, **5**, 431 (2018).
- [10] M. Grydlik, F. Hackl, H. Groiss, M. Glaser, A. Halilovic, T. Fromherz, W. Jantsch, F. Schäffler, M. Brehm. *ACS Photonics*, **3**, 298 (2016).
- [11] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling. *Nano Lett.*, **17**, 6886 (2017).
- [12] X. Xu, T. Chiba, T. Nakama, T. Maruizumi, Y. Shiraki. *Appl. Phys. Express*, **5**, 102101 (2012).
- [13] Y. Shiraki, X. Xu, J. Xia, T. Tsuboi, T. Maruizumi. *ECS Trans.*, **45**, 235 (2012).

- [14] M.V. Stepikhova, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, M.V. Shaaleev, D.E. Utkin, V.V. Rutckaia, E.V. Skorokhodov, S.M. Sergeev, D.V. Yurasov, Z.F. Krasilnik. *Semicond. Sci. Technol.*, **34**, 024003 (2019).
- [15] 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).
- [16] C. Dais, G. Mussler, H. Sigg, T. Fromherz, V. Auzelyte, H.H. Solak, D. Grützmacher. *Europhys. Lett.*, **84**, 67017 (2008).
- [17] S. Kiravittaya, A. Rastelli, O.G. Schmidt. *Rep. Progr. Phys.*, **72**, 046502 (2009).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] F. Hackl, M. Grydlik, M. Brehm, H. Groiss, F. Schaffler, Th. Fromherz, G. Bauer. *Nanotechnology*, **22**, 165302 (2011).
- [21] M. Brehm, M. Grydlik, T. Tayagaki, G. Langer, F. Schäffler, O.G. Schmidt. *Nanotechnology*, **26**, 225202 (2015).
- [22] G. Vastola, M. Grydlik, M. Brehm, T. Fromherz, G. Bauer, F. Boioli, L. Miglio, F. Montalenti. *Phys. Rev. B*, **84**, 155415 (2011).
- [23] K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, S. Noda. *Nature Photonics*, **8**, 406 (2014).

Редактор Л.В. Шаронова

Ordered arrays of Ge(Si) quantum dots embedded in two-dimensional photonic crystals

Zh.V. Smagina¹, V.A. Zinovyev¹, E.E. Rodyakina^{1,2},
B.I. Fomin¹, A.N. Yablonskiy³, M.V. Stepikhova³,
S.A. Gusev³, A.V. Novikov³, A.V. Dvurechenskii^{1,2}

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

² Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

³ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Two approaches to the integration of ordered Ge(Si) self-assembled quantum dots (QDs) into two-dimensional photonic crystals (PhC) are considered in the paper. The first approach involves the synthesis on the structured silicon surface of the ordered Ge(Si) QD array, on which PhC is then formed. In the second approach, the PhC itself serves as the template for the ordered QD growth. It is shown that varying the diameter of PhC holes in the framework of the second approach, two growth modes of QDs can be realized, when they are formed inside or outside PhC holes. For structures with ordered QDs built into PhC, an increase in the intensity of the photoluminescence signal was detected at room temperature in the spectral range of 0.9–1.2 eV, which is associated with the interaction of the emission with the radiation modes of PhC.