

Люминесцентные свойства упорядоченных массивов кремниевых дисковых резонаторов со встроенными в них GeSi квантовыми точками

© Ж.В. Смагина¹, М.В. Степихова², В.А. Зиновьев¹, С.А. Дьяков³, Е.Е. Родякина^{1,4},
Д.В. Шенгуров², А.В. Кацюба¹, А.В. Новиков^{2,5}

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 Сколковский институт науки и технологий, 143005 Москва, Россия

⁴ Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

⁵ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: smagina@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 25 августа 2023 г.

В окончательной редакции 1 сентября 2023 г.

Принята к публикации 1 сентября 2023 г.

Исследованы излучающие свойства упорядоченных массивов кремниевых резонаторов в форме дисков со встроенными в них GeSi квантовыми точками. Показано, что в зависимости от расстояния между резонаторами структуры могут проявлять свойства либо одиночных резонаторов, либо фотонных кристаллов, характеризующихся наличием в спектре фотолюминесценции вклада от фотонно-кристаллических мод. Формирование фотонных кристаллов на основе дисковых резонаторов позволяет значительно увеличить люминесцентный отклик структур с GeSi квантовыми точками в диапазоне длин волн 1.2–1.6 мкм, в том числе и при комнатной температуре.

Ключевые слова: GeSi квантовые точки, фотонные кристаллы, резонансы Ми, люминесценция.

DOI: 10.61011/FTP.2023.06.56467.30k

1. Введение

В настоящее время для управления оптическими свойствами различных структур широко используются диэлектрические резонаторы, отличительной особенностью которых являются низкие потери [1–3]. Одним из наиболее актуальных направлений использования диэлектрических резонаторов является модификация с их помощью излучательных свойств активной среды, встроенной в резонатор [4–9]. При этом, в зависимости от конкретной решаемой задачи, рассматриваются как отдельные резонаторы [4,5], так и их массивы в качестве метаповерхностей [1,3,6,7]. Работы в данном направлении привели к созданию на прямозонных материалах семейства $A^{III}B^V$ лазеров на одиночных дисковых резонаторах [8] и массивах таких резонаторов [9,10].

Однако, с точки зрения совместимости с интегральной кремниевой технологией и развития кремниевой оптоэлектроники, перспективным представляется использование диэлектрических резонаторов для улучшения излучательных свойств структур на основе кремния и его сплавов с германием. Это, в частности, относится к структурам с GeSi самоформирующимися наноструктурами и квантовыми точками (КТ), демонстрирующим при комнатной температуре сигнал люминесцен-

ции в области длин волн от 1.2 до 1.6 мкм [11–14], используемой в кремниевых оптоэлектронных устройствах и волоконно-оптических системах связи [14]. Данные структуры относительно просты в формировании, компактны и совместимы с современной интегральной кремниевой технологией [12,14]. Эти качества сделали структуры с GeSi КТ удобным объектом для исследования взаимодействия активной среды с модами различных диэлектрических резонаторов, такими как моды микрорезонаторов в двумерных фотонных кристаллах (ФК) [15,16], моды самих ФК [17–21], а также моды одиночных и связанных в линейные цепочки дисковых резонаторов [5,22]. Взаимодействие с модами резонаторов приводило к росту интегральной интенсивности сигнала люминесценции и появлению узких пиков в спектрах излучения структур с GeSi КТ вследствие взаимодействия КТ с высокодобротными модами резонаторов [5,7,15–22].

Работы, посвященные взаимодействию GeSi КТ с различными диэлектрическими резонаторами, можно условно разбить на две группы. В одной из них рассмотрено взаимодействие КТ с модами одиночного резонатора [5] или ансамбля из их небольшого числа [5,22]. К другой относятся работы по исследованию ФК [15–21] и метаповерхностей [7], которые можно рассматривать

как массив большого числа взаимодействующих резонаторов. В этом случае взаимодействие GeSi КТ происходит с коллективными модами массива резонаторов. При этом остается недостаточно исследованным переход от взаимодействия GeSi КТ с модами одиночного резонатора к их взаимодействию с коллективными модами массива взаимодействующих резонаторов при увеличении числа КТ или уменьшении расстояния между ними.

В настоящей работе представлены результаты формирования одиночных и массивов дисковых резонаторов с Ge(Si) квантовыми точками и исследования их люминесцентных свойств. В зависимости от расстояния между резонаторами продемонстрирован переход от взаимодействия КТ с модами одиночных резонаторов к взаимодействию с высокочастотными коллективными модами ФК, образованного квадратной решеткой дисковых резонаторов.

2. Методика эксперимента

Массивы дисковых резонаторов были сформированы на основе многослойных структур с GeSi КТ, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках „кремний-на-изоляторе“ (КНИ). Толщина верхнего слоя кремния в подложках КНИ составляла 170 нм, а скрытого слоя SiO₂ — 3 мкм. Предварительно на поверхности КНИ подложки выращивался буферный слой Si толщиной 110 нм при постепенном повышении температуры роста от 250 до 500°С, с последующим отжигом при 700°С в течение 10 мин. Далее выращивалась многослойная структура, содержащая 10 слоев GeSi КТ (каждый слой КТ формировался осаждением ~ 1 нм германия), чередующихся со слоями Si толщиной 15 нм. Малая толщина слоев Si, разделяющих соседние слои с GeSi КТ, обеспечивала вертикальное совмещение КТ. Температура роста GeSi КТ, промежуточных слоев Si, а также покровного слоя Si толщиной 20 нм составляла 600°С. По данным эллипсометрии, суммарная толщина структуры над слоем SiO₂ составляла ~ 450 нм.

Формирование дисковых резонаторов выполнялось в несколько этапов. На первом этапе с помощью электронно-лучевой литографии в позитивном резисте ПММА-950К толщиной ~ 200 нм создавалась маска, представляющая собой массивы круглых отверстий, расположенных в узлах квадратной решетки с периодом от 1 мкм до 6 мкм. Радиус отверстий в маске резиста варьировался в диапазоне от 300 ± 10 нм до 360 ± 10 нм с шагом 20 нм. Далее поверх маски с отверстиями методом магнетронного напыления осаждался тонкий слой хрома (~ 20 нм). После удаления резиста на поверхности многослойной структуры с GeSi КТ были получены периодические массивы Cr-дисков, которые служили маской для создания резонаторов. На следующем этапе через маску Cr проводилось анизотропное плазмохимическое травление Ge/Si-структур в смеси газов SF₆:CHF₃ до скрытого слоя SiO₂. На последнем

этапе хром удалялся с поверхности структуры посредством жидкостного травления.

Таким образом, были созданы массивы дисковых резонаторов в виде кремниевых нанополостей с радиусами в диапазоне от 320 ± 10 до 390 ± 10 нм, расположенных в узлах квадратных решеток с периодом от 1 до 6 мкм (см. вставки на рис. 1). Согласно исследованию полученных дисковых резонаторов с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), они имели вертикальные боковые стенки с малой шероховатостью, а их высота ~ 450 нм соответствовала суммарной толщине структуры над слоем скрытого окисла. Сигнал фотолюминесценции (ФЛ) резонаторов сравнивался с сигналом от исходной структуры. Для этого на образце были созданы прямоугольные области 100 × 30 мкм, которые не подвергались плазмохимическому травлению (непроцессированные области). Они, как и дисковые резонаторы, имели вертикальные боковые стенки.

Люминесцентные измерения полученных дисковых резонаторов выполнялись с использованием стандартной методики микрофотолюминесценции (микро-ФЛ) в геометрии нормального падения возбуждающего излучения и детектируемого сигнала [20]. Сигнал ФЛ возбуждался твердотельным лазером на длине волны 532 нм. Для прецизионной фокусировки лазерного луча на образец в работе использовался объектив Mitutoyo M Plan Apo NIR с 50-кратным увеличением (числовая апертура NA = 0.42). Объектив обеспечивал возможность фокусировки лазерного луча в пятно диаметром ~ 2 мкм. Спектральные измерения с разрешением 4 см⁻¹ проводились на фурье-спектрометре Bruker IF 125 HR. Сигнал ФЛ регистрировался охлаждаемым Ge-фотодетектором. Измерения проводились при комнатной температуре и температуре жидкого азота (77 К) в проточном криостате.

Теоретические расчеты зонных диаграмм фотонных кристаллов, представленных квадратными решетками дисковых резонаторов, выполнялись фурье-модальным методом в приближении матрицы рассеяния [23].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры микро-ФЛ структур с резонаторами, упорядоченными в квадратные решетки с периодами 1 мкм (а) и 2 мкм (б), в зависимости от их радиуса. Измерения проводились при температуре 77 К. Как видно из рисунка, по мере увеличения радиуса резонаторов изменяется спектральное положение и интенсивность пиков ФЛ в диапазоне энергий от 750 до 1050 мэВ. При этом эффект усиления интенсивности сигнала тем больше, чем больше радиус резонаторов. Для структуры с периодом 1 мкм в спектрах микро-ФЛ наблюдается появление узких интенсивных пиков как в области излучения GeSi КТ, так и в области излучения смачивающего слоя Ge (рис. 1,а) [24]. В массивах резонаторов с периодом 2 мкм наблюдаются только

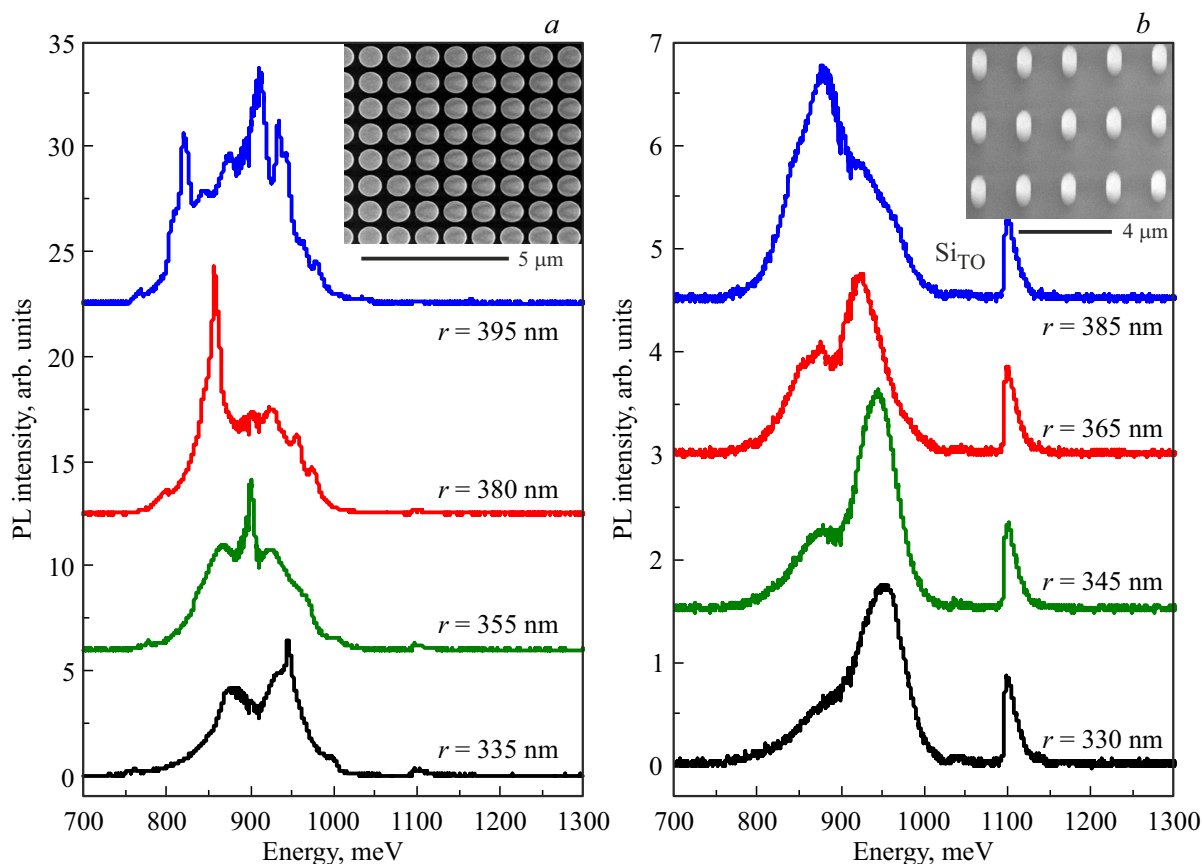


Рис. 1. Измеренные при температуре 77 К спектры микро-ФЛ структуры с дисковыми резонаторами, упорядоченными в квадратные решетки, периоды квадратных решеток: 1 мкм (*a*) и 2 мкм (*b*). Радиусы дисковых резонаторов, полученные из данных СЭМ, приведены возле соответствующего спектра. Пик „SiTO“ на рисунке — сигнал ФЛ от кремниевой подложки. На вставках приведены СЭМ-изображения дисковых резонаторов, упорядоченных в квадратные решетки с соответствующими периодами: *a* — период решетки 1 мкм, радиус дисков 385 ± 10 нм; *b* — период решетки 2 мкм, радиус дисков 320 ± 10 нм. Для наглядности спектры разнесены по вертикали. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

уширенные пики ФЛ с шириной ~ 50 мэВ (рис. 1, *b*). В обоих случаях спектральное положение максимумов интенсивности ФЛ зависит от радиуса резонаторов и смещается, по мере увеличения радиуса, в область меньших энергий фотонов. Последнее свидетельствует о взаимосвязи наблюдаемых сигналов с излучательными модами исследуемых резонаторов. Отметим, что в спектрах ФЛ исследованных массивов резонаторов при температуре 77 К наблюдается сигнал ФЛ, связываемый с кремниевой подложкой (пик SiTO на рис. 1, *b*). Интенсивность этого сигнала зависит от условий фокусировки лазерного луча на дисковом резонаторе и возрастает по мере уменьшения размера и плотности резонаторов в структуре.

Предельным случаем массивов дисковых резонаторов с большими периодами, когда взаимодействием между резонаторами можно пренебречь, являются массивы резонаторов с периодом 6 мкм. Спектры микро-ФЛ таких массивов демонстрируют широкие пики, положение которых смещается в область малых энергий фотонов по мере увеличения радиуса резонатора. Расстояние между

резонаторами в этом случае существенно превышает как их собственный размер, так и характерную длину волны излучения, на которой наблюдается сигнал. Поэтому резонаторы можно рассматривать как одиночные, невзаимосвязанные объекты. В этом случае наблюдаемые пики в спектрах ФЛ естественно связать с резонансами Ми, имеющими место в таких структурах [5]. Ранее резонансы Ми в структурах с GeSi КТ наблюдались в кремниевых цилиндрических столбиках диаметрами 280–660 нм. Авторы работы [5] показали, что при диаметре резонаторов 600 нм резонансы Ми при энергиях, близких к 900 мэВ, имеют характер электрического квадрупольного поля и по мере увеличения размера резонатора положение резонанса смещается в область меньших энергий. Аналогичное смещение спектрального положения пиков наблюдается и в нашем эксперименте.

По мере уменьшения расстояния между резонаторами от 6 до 2 мкм наблюдается рост сигнала ФЛ, при этом вид спектров практически не меняется. Можно высказать предположение, что рост сигнала ФЛ, наблюдаемый в массивах с периодами 6, 4, 3 и 2 мкм,

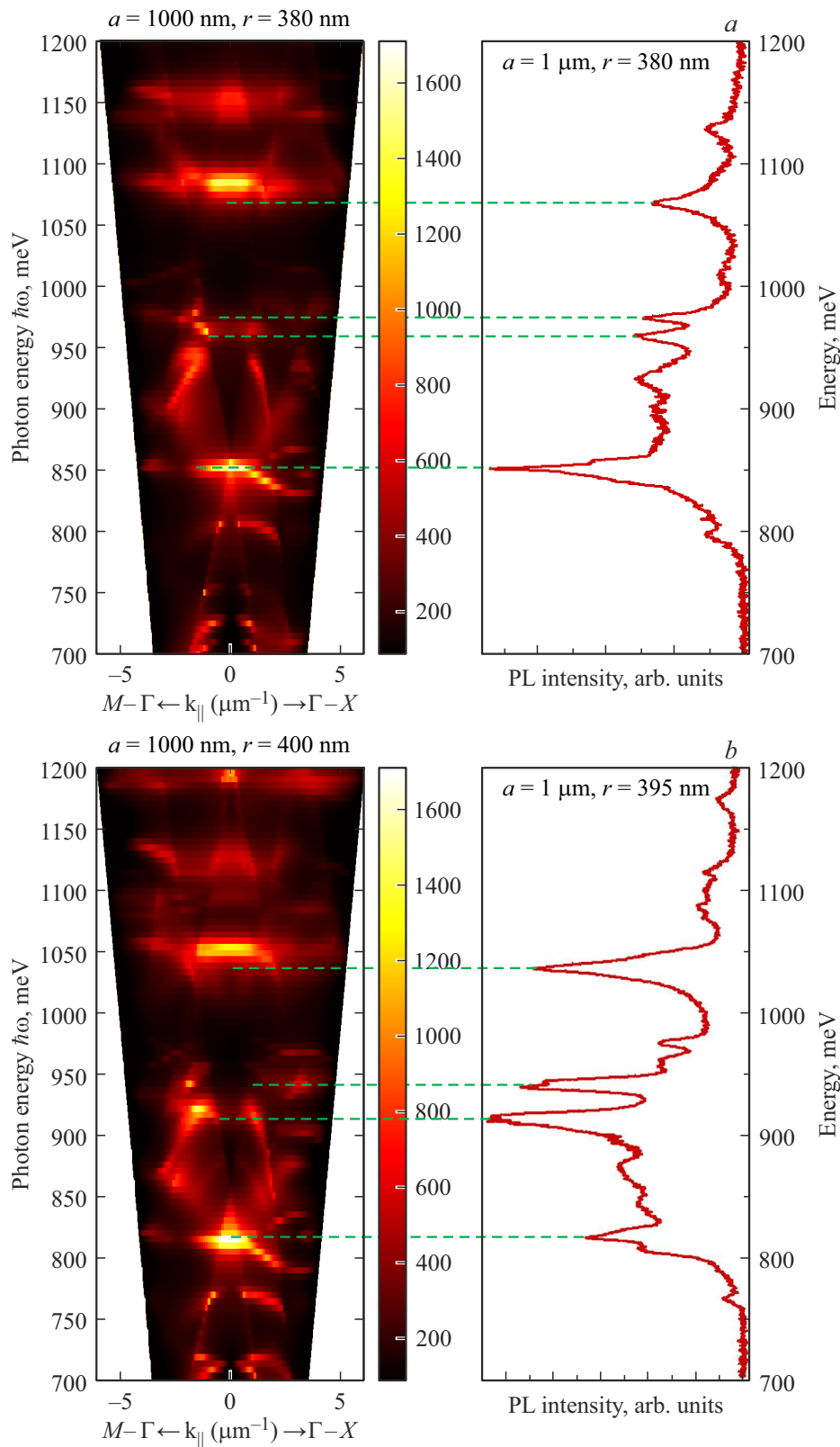


Рис. 2. Рассчитанные дисперсионные зависимости излучательной способности в дальнем поле для ФК, представленных квадратными решетками цилиндрических кремниевых столбиков с периодом 1 мкм, с радиусами: 380 (*a*) и 400 нм (*b*). Справа на рисунках *a* и *b* приведены спектры микро-ФЛ структур с квадратными решетками дисковых резонаторов, параметры которых близки к параметрам, использованным в расчетах. Пунктирными линиями на рисунках показано соответствие наблюдаемых максимумов в спектрах микро-ФЛ с модами ФК. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

обусловлен процессами рассеяния лазерного излучения на решетке резонаторов и вовлеченностью все большего числа резонаторов в сигнал, что и приводит к его росту. Таким образом, в исследованных массивах дисковых резонаторов с разными радиусами и расстоянием между ними можно выделить случай одиночных, не взаимодействующих друг с другом, резонаторов, в спектрах ФЛ которых проявляются особенности резонансов Ми. Этот случай для исследованных резонаторов реализуется при расстояниях между ними в диапазоне от 2 до 6 мкм.

Кардинальные изменения наблюдаются в спектрах микро-ФЛ массивов дисковых резонаторов с расстоянием между резонаторами 1 мкм (рис. 1). Наряду с ростом интенсивности сигнала, в спектрах ФЛ таких массивов появляются узкие линии, спектральное положение которых зависит от радиуса резонатора (рис. 1, *a*). Резкое изменение спектров и появление в спектрах узких линий высокой добротности свидетельствуют об изменении природы наблюдаемых резонансных явлений. Возможным объяснением здесь является то, что при периодах 1 мкм расстояние между резонаторами мало и рассматриваемая нами квадратная решетка из дисковых резонаторов функционирует как фотонный кристалл. Действительно, фотонные кристаллы могут быть реализованы как на базе отверстий, формируемых в полупроводниковом материале, так и столбиков самого полупроводникового материала, упорядоченных в квадратную или гексагональную решетку [6,25].

Для проверки данного предположения были проведены теоретические расчеты зонной структуры фотонных кристаллов с параметрами, соответствующими параметрам исследуемых массивов дисковых резонаторов. На рис. 2, *a* и *b* показаны результаты расчетов дисперсионных зависимостей излучательной способности в дальнем поле фотонных мод структур с цилиндрическими столбиками кремния, упорядоченными в квадратную решетку с периодом 1 мкм, с радиусами столбиков 380 и 400 нм соответственно. На тех же рисунках справа приведены измеренные спектры микро-ФЛ квадратных решеток дисковых резонаторов. Спектры совмещены по энергии с данными теоретических расчетов. Из рис. 2 видно, что положение узких пиков в спектрах ФЛ хорошо согласуется с рассчитанным энергетическим положением мод ФК. Это указывает на то, что имеет место взаимодействие излучающей среды (квантовые точки, смачивающий слой) с модами фотонного кристалла. Таким образом, в случае малых периодов (малого расстояния между соседними резонаторами) упорядоченные массивы дисковых резонаторов функционируют как фотонные кристаллы, демонстрируя интенсивный сигнал ФЛ, спектр которого определяется зонной структурой ФК.

Сравним люминесцентный отклик от полученных массивов дисковых резонаторов с сигналом, наблюдаемым в исходной, непроцессированной области образца (рис. 3). Сразу отметим, что сигнал от КТ в непроцессированных областях модулирован с периодом 6–8 мЭВ (кривая 3).

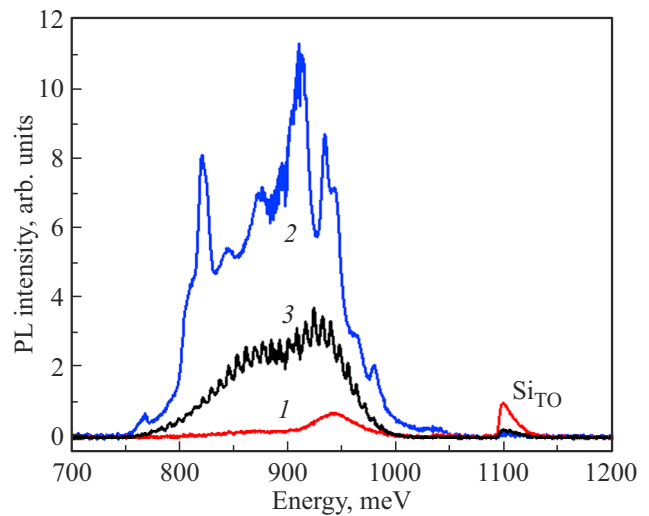


Рис. 3. Спектры микро-ФЛ: одиночного дискового резонатора радиусом 365 ± 10 нм (1), массива дисковых резонаторов радиусом 395 ± 10 нм, упорядоченных в квадратную решетку с периодом 1 мкм (2) и непроцессированной области образца (3). Спектры измерены при температуре 77 К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

Модуляция сигнала ФЛ, по-видимому, связана с резонансами Фабри-Перо, возникающими на боковых стенках областей. Как видно из рисунка, при $T = 77$ К сигнал ФЛ массива с периодом 1 мкм, спектр которого контролируется взаимодействием GeSi КТ с модами ФК (кривая 2), значительно превосходит сигнал, наблюдаемый в непроцессированной области образца (кривая 3). Так, увеличение интенсивности пиков ФЛ при энергиях 820 и 910 мЭВ по отношению к сигналу на этих энергиях в непроцессированной области образца составляет, соответственно, ~ 6.5 и ~ 3.4 раза. При этом интегральная интенсивность сигнала ФЛ от структуры с массивами резонаторов с периодом 1 мкм в энергетическом диапазоне от 750 до 1050 мЭВ превышает интегральную интенсивность сигнала ФЛ в непроцессированной области в ~ 3 раза. Для одиночных резонаторов (массив резонаторов с периодом 6 мкм, кривая 1) ситуация обратная. Здесь сигнал ФЛ резонатора в максимуме в 4 раза меньше сигнала, измеряемого при том же значении энергии в непроцессированной области образца. Интегральная интенсивность сигнала ФЛ одиночного резонатора в 8 раз меньше интегральной интенсивности сигнала, измеряемого в непроцессированной области. Это примерно соответствует соотношению излучающих объемов резонатора и непроцессированной области. Для оценки соотношения излучающих объемов использовались реальный размер резонатора и размер возбуждаемой непроцессированной области образца. Диаметр фокусируемого лазерного пучка составлял ~ 2 мкм.

Массивы дисковых резонаторов, расположенных с периодом 1 мкм, со встроенными в них GeSi КТ также достаточно эффективно излучают и при комнатной

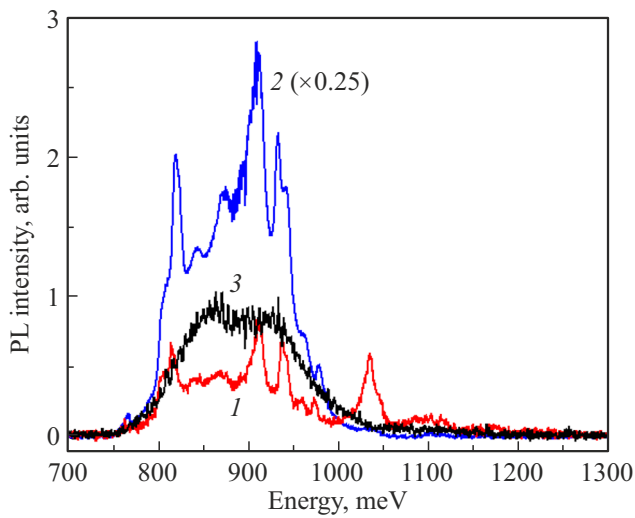


Рис. 4. Спектры микро-ФЛ упорядоченного массива резонаторов с радиусами дисков 395 ± 10 нм и периодом 1 мкм, измеренные при температурах 300 К (1) и 77 К (2), а также спектр микро-ФЛ непроцессированной области образца, измеренный при 300 К (3). Для наглядности, спектр микро-ФЛ массива дисковых резонаторов, измеренный при температуре 77 К, умножен на 0.25. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

температуре. На рис. 4 приведены спектры микро-ФЛ массива дисковых резонаторов с радиусами 395 нм и периодом 1 мкм, измеренные при температурах 77 и 300 К. Интенсивность сигнала ФЛ этого массива уменьшается с ростом температуры от 77 до 300 К в ~ 13.5 раза (соотношение интенсивностей в максимуме сигнала). При этом сигнал ФЛ остается достаточно интенсивным и хорошо детектируемым при комнатной температуре. Однако здесь следует заметить, что сигнал ФЛ, измеряемый в непроцессированной области образца, уменьшается при увеличении температуры от 77 до 300 К лишь в 4.2 раза, что существенно меньше падения интенсивности сигнала в резонаторе (сигнал от непроцессированной области при 300 К, как и в случае 77 К, модулирован вследствие резонансов Фабри-Перо на боковых стенках области). Более ярко выраженное падение интенсивности сигнала ФЛ в резонаторе с ростом температуры, по-видимому, связано с возрастанием вклада безызлучательных каналов рекомбинации в гашение фотолуминесценции из-за более развитой поверхности резонаторов по сравнению с непроцессированной областью. В результате различного температурного гашения интенсивности сигналов ФЛ от массивов дисковых резонаторов с периодом 1 мкм и непроцессированной области образца, измеренные при комнатной температуре, оказываются сравнимы (рис. 4). Однако в спектре ФЛ от массива резонаторов с периодом 1 мкм при комнатной температуре начинают проявляться моды, локализованные в диапазоне энергий излучения смачивающего слоя исследуемой структуры (см. на рис. 4

диапазон энергий ~ 1035 мэВ), интенсивность которых в 7 раз превышает интенсивность сигнала ФЛ от непроцессированной области в этой области энергий. Таким образом, выбор параметров решетки резонаторов и их размеров позволяет в широких пределах контролировать излучающие свойства таких структур, контролируя не только интенсивность, но и их спектральный отклик.

4. Заключение

В работе исследованы люминесцентные свойства массивов дисковых резонаторов с GeSi КТ, упорядоченных в квадратную решетку с периодами от 1 до 6 мкм, с радиусами резонаторов, варьируемыми от 320 до 395 нм. Показано, что при периодах решетки в диапазоне от 2 до 6 мкм дисковые резонаторы проявляют себя как одиночные резонаторы с характерным спектром излучения, в котором положение пиков ФЛ зависит только от размеров резонатора. С уменьшением периода от 6 до 2 мкм в массивах резонаторов, упорядоченных в квадратную решетку, наблюдается рост интенсивности сигнала ФЛ, объясняемый процессами рассеяния возбуждающего лазерного излучения в плотном массиве резонаторов и, как следствие, ростом числа резонаторов, дающих вклад в детектируемый сигнал ФЛ. При периодах решетки 1 мкм массивы дисковых резонаторов, упорядоченных в квадратную решетку, представляют собой фотонный кристалл, и наблюдаемая в таких массивах тонкая структура линий сигнала ФЛ хорошо согласуется с особенностями зонной структуры фотонного кристалла, рассчитанной теоретически. В исследованных массивах резонаторов имеет место увеличение интенсивности сигнала ФЛ GeSi КТ, которое может быть связано взаимодействием КТ как с резонансами Ми, так и с коллективными модами ФК. Для определенных мод ФК сигнал ФЛ возрос в 6.5 раз при температуре 77 К и в 7 раз при температуре 300 К. Рассмотренные структуры представляют интерес с точки зрения возможности создания на их основе источников излучения ближнего инфракрасного диапазона для кремниевых интегральных схем с оптической обработкой сигнала.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Армбристеру за выращивание структур Ge/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии, ЦКП „ВТАН“ НГУ и ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН за предоставление измерительного оборудования.

Финансирование

Работа финансировалась в рамках государственного задания № 0242-2022-0011 (ИФП СО РАН) в части создания структур с КТ, встроенными в фотонные кристаллы, и государственного задания № 0030-2021-0019 (ИФМ РАН) в части люминесцентных измерений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Liu, R. Xu, P. Yu, Zh. Wang, J. Takahara. *Nanophotonics*, **9** (5), 1115 (2020).
- [2] K. Koshelev, Yu. Kivshar. *ACS Photonics*, **8** (1), 102 (2021)
- [3] O.A.M. Abdelraouf, Z. Wang, H. Liu, Zh. Dong, Q. Wang, M. Ye, X.R. Wang, Qi J. Wang, H. Liu. *ACS Nano*, **16** (9), 13339 (2022).
- [4] M.V. Rybin, K.L. Koshelev, Z.F. Sadrieva, K.B. Samusev, A.A. Bogdanov, M.F. Limonov, Yu.S. Kivshar. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 243901 (2017).
- [5] V.V. Rutckaia, F. Heyroth, M.V. Shaleev, M.I. Petrov, J. Schilling. *Nano Lett.*, **17**, 6886 (2017).
- [6] B. Kalinic, T. Cesca, I.G. Balasa, M. Trevisani, A. Jacassi, S.A. Maier, R. Sapienza, G. Mattei. *ACS Photonics*, **10** (2), 534 (2023).
- [7] C. Cui, C. Zhou, S. Yuan, X. Qiu, L. Zhu, Y. Wang, Y. Li, J. Song, Q. Huang, Y. Wang, C. Zeng, J. Xia. *ACS Photonics*, **5**, 4074 (2018).
- [8] V. Mylnikov, S.T. Ha, Z. Pan, V. Valuckas, R. Paniagua-Domínguez, H.V. Demir, A.I. Kuznetsov. *ACS Nano*, **14**, 7338 (2020).
- [9] A. Kodigala, Th. Lepetit, Q. Gu, B. Bahari, Y. Fainman, B. Kanté. *Nature*, **541**, 196 (2017).
- [10] K. Fan, I.V. Shadrivov, W.J. Padilla. *Optica*, **6**, 169 (2019).
- [11] A.A. Tonkikh, G.E. Cirilin, V.G. Talalaev, N.D. Zakharov, P. Werner. *Phys. Status Solidi A*, **203**, 1390 (2006).
- [12] 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**, 014209 (2011).
- [13] M. Grydlik, M. Brehm. *Nanotechnology*, **28**, 392001 (2017).
- [14] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. *Письма ЖЭТФ*, **67** (1), 46 (1998).
- [15] X. Li, P. Boucaud, X. Checoury, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahel. *J. Appl. Phys.*, **99**, 023103 (2006).
- [16] M. El Kurdi, X. Checoury, S. David, T.P. Ngo, N. Zerounian, P. Boucaud, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahel. *Opt. Express*, **16**, 8780 (2008).
- [17] M. Grydlik, F. Hackl, H. Groiss, A. Halilovic, T. Fromherz, T. Fromherz, W. Jantsch, F. Schäfoer, M. Brehm. *ACS Photonics*, **3**, 298 (2016).
- [18] 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).
- [19] A.V. Peretokin, M.V. Stepikhova, A.V. Novikov, S.A. Dyakov, A.F. Zinovieva, Zh.V. Smagina, D.A. Nasimov, E.E. Rodyakina, V.A. Zinovyev. *Photonics and Nanostructures — Fundam. Appl.*, **53**, 101093 (2023).
- [20] A.V. Novikov, Z.V. Smagina, M.V. Stepikhova, V.A. Zinovyev, S.A. Rudin, S.A. Dyakov, E.E. Rodyakina, A.V. Nenashev, S.M. Sergeev, A.V. Peretokin, A.V. Dvurechenskii. *Nanomaterials*, **11**, 909 (2021).
- [21] Ж.В. Смагина, А.В. Новиков, М.В. Степихова, В.А. Зиновьев, Е.Е. Родякина, А.В. Ненасhev, С.М. Сергеев, А.В. Перетокин, П.А. Кучинская, М.В. Шалеев, С.А. Гусев, А.В. Двуреченский. *ФТП*, **54** (8), 708 (2020).
- [22] V. Rutckaia, F. Heyroth, G. Schmidt, A. Novikov, M. Shaleev, R.S. Savelev, J. Schilling, M. Petrov. *ACS Photonics*, **8** (1), 209 (2020).
- [23] S.G. Tikhodeev, A.L. Yablonskii, E.A. Muljarov, N.A. Gippius, T. Ishihara. *Phys. Rev. B*, **66** (64), 045102 (2002).
- [24] 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. *ФТП*, **52** (9), 1028 (2018).
- [25] J.D. Joannopoulos. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, ed. by J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade (Princeton University Press, 2007).

Редактор А.Н. Смирнов

Luminescent properties of ordered arrays of silicon disk-like resonators with embedded GeSi quantum dots

Zh.V Smagina¹, M.V Stepikhova², V.A Zinovyev¹, S.A Dyakov³, E.E Rodyakina^{1,4}, D.V Shengurov², A.V Kacyuba¹, A.V Novikov^{2,5}

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 Skolkovo Institute of Science and Technology, 143026 Moscow, Russia

⁴ Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

⁵ Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The emission properties of ordered arrays of silicon disk-like resonators with embedded GeSi quantum dots are studied. It is shown that, depending on the distance between the resonators, the structures can exhibit the properties of isolated Mie resonators or photonic crystals characterized by the presence of a contribution from photonic crystal modes in the photoluminescence spectrum. The formation of photonic crystals based on the disk-like resonators makes it possible to significantly increase the luminescence response in the wavelength range of 1.2–1.6 μm, even at room temperature.