

Высокодобротные состояния в спектрах излучения линейных периодических цепочек Si-нанодисков со встроенными GeSi-квантовыми точками

© В.А. Зиновьев¹, Ж.В. Смагина¹, А.Ф. Зиновьева^{1,2}, Е.Е. Родякина^{1,2}, А.В. Кацюба¹,
П.А. Кучинская¹, К.Н. Астанкова¹, К.В. Барышникова³, М.И. Петров³,
М.С. Михайловский³, В.А. Вербус^{4,5}, М.В. Степихова⁴, А.В. Новиков^{4,6}

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

² Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

³ Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁶ Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: zinoviev@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2024 г.

Принята к публикации 27 апреля 2024 г.

Исследованы люминесцентные свойства структур с линейными периодическими цепочками Si-нанодисков со встроенными GeSi-квантовыми точками. Получено, что формирование линейных цепочек резонаторов приводит к изменению интенсивности и направленности излучения квантовых точек. В спектре появляются узкие высокодобротные пики, связанные с коллективными модами в линейных цепочках. Теоретический анализ зависимости добротности мод от параметров линейных цепочек показал, что при определенных параметрах могут реализоваться состояния, близкие по природе к симметрично-защищенным связанным состояниям в континууме.

Ключевые слова: люминесценция, квантовые точки, кремний, германий, нанодиски, линейные цепочки, коллективные моды.

DOI: 10.61011/FTP.2024.05.58758.6351H

1. Введение

В настоящее время получено множество результатов, свидетельствующих о том, что модификация оптических свойств материалов с помощью различных типов микро- и нанорезонаторов может быть успешно применена для создания эффективных источников фотонного излучения [1,2]. Одним из перспективных вариантов являются структуры с массивами упорядоченных диэлектрических частиц субволновых размеров, поддерживающих коллективные резонансы Ми, позволяющие эффективно управлять взаимодействием света с веществом [3,4]. Усиление интенсивности излучения в таких структурах достигается за счет увеличения вероятности оптических переходов, когда излучатели размещаются в максимумах электрического поля внутри резонатора (эффект Парселла [5,6]). В данной работе было показано, что линейные периодические цепочки Si-нанодисков со встроенными в них GeSi-квантовыми точками (КТ) могут быть использованы для управления интенсивностью и направленностью излучения КТ.

2. Методика эксперимента

Для изготовления линейных цепочек дисковых резонаторов со встроенными GeSi КТ использовалась подложка кремний-на-изоляторе (КНИ) с верхним слоем Si толщиной 180 нм и подслоем SiO₂ толщиной 3 мкм. На первом этапе методом молекулярно-лучевой эпитаксии при 500°C со скоростью 0.6 Å/с выращивался буферный слой Si толщиной 110 нм. На следующем этапе при температуре 600°C были выращены 10 слоев GeSi КТ, разделенных кремниевыми промежуточными слоями толщиной 15 нм. Каждый слой КТ был сформирован путем осаждения 7 монослоев Ge со скоростью роста 0.05 Å/с. На заключительном этапе структура была покрыта слоем Si толщиной 15 нм. Si-спейсеры и верхний слой выращивались со скоростью 1 Å/с. Общая толщина многослойной структуры составила 440 нм. На втором этапе с помощью электронной литографии и плазмо-химического травления через металлическую маску на поверхности слоя SiO₂ были сформированы линейные периодические цепочки дисковых резонаторов

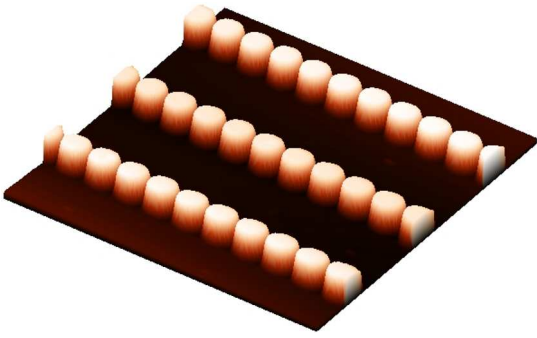


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности структуры с линейными периодическими цепочками кремниевых дисковых резонаторов со встроенными в них GeSi КТ. Размер области сканирования составляет 10×10 мкм². Диаметр дисков — 770 нм, высота — 440 нм, период — 1 мкм, расстояние между цепочками — 3 мкм. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

(рис. 1) с различными геометрическими параметрами. Диаметр резонаторов в различных цепочках менялся от 660 до 770 нм, а период — от 1 до 3 мкм. Люминесцентные свойства структур исследовались методом микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ). Сигнал микро-ФЛ возбуждался непрерывным лазером на длине волны 532 нм. Лазерное излучение фокусировалось в пятно размером ~ 2 мкм объективом Mitutoyo M Plan Apo 50x (числовая апертура $NA = 0.42$). Мощность возбуждения составляла 5 мВт. Спектры микро-ФЛ измерялись с разрешением 4 см^{-1} . Измерения проводились при температуре 77 К. Распределения компонент ближнего и дальнего полей, а также дисперсионные зависимости собственных мод были численно рассчитаны с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

3. Результаты и обсуждение

Исследование методом микро-ФЛ показало, что формирование линейных цепочек Si-дисков со встроенными GeSi КТ приводит к модификации спектров микро-ФЛ по сравнению с исходной, необработанной областью структуры. Наиболее существенные изменения наблюдались для цепочек с периодом 1 мкм и диаметром диска 770 нм. В этом случае в спектрах ФЛ наблюдались два узких пика при ≈ 827 и ≈ 849 мэВ (рис. 2). Тогда, как при периодах ≥ 2 мкм, наблюдались широкие пики ФЛ с положением максимумов, зависящих от диаметра диска. Установлено, что узкие пики присутствуют в спектрах ФЛ даже для очень коротких цепочек, например при числе резонаторов в цепочке $N = 2$. С увеличением N эти пики становятся уже и интенсивнее. При максимальной длине цепочки ($N = 51$) добротность пиков составила $Q \approx 190$ (пик при 827 мэВ) и $Q \approx 340$ (пик при 849 мэВ). Эти значения были получены на основе аппроксимации

спектра микро-ФЛ набором функций Лоренца (рис. 2). Для того чтобы понять природу наблюдаемых узких пиков, был проведен расчет электрических полей и дисперсионных зависимостей собственных мод для модельных структур, соответствующих экспериментальным. Моделирование показало, что для одиночного резонатора с диаметром 770 нм в области 790–870 мэВ существует двукратно-вырожденная высокодобротная мода с азимутальным числом $m = 3$ (магнитный октуполь). Уже при $N = 2$ происходит снятие вырождения этой моды и образуются две коллективные моды с различным направлением электрического поля относительно линии цепочки. Одна из мод, с большей амплитудой электрического поля в зазоре между дисками, смещается по шкале энергии вниз, а другая — вверх. В дальнейшем мы будем называть первую моду с преимущественным распространением электрического поля вдоль цепочки — „продольной“ (см. верхнюю вставку на рис. 3), а вторую моду с преимущественным распространением электрического поля поперек цепочки — „поперечной“ (см. нижнюю вставку на рис. 3). Согласно расчету для цепочки бесконечной длины, „продольная“ мода имела энергию ≈ 827 мэВ, а „поперечная“ мода ≈ 847 мэВ, что достаточно хорошо согласуется с положением двух узких пиков, наблюдаемых в спектрах микро-ФЛ (рис. 2). Было получено, что добротность „поперечной“ моды возрастает с увеличением длины цепочки, в то время как добротность „продольной“ моды имеет тенденцию стабилизироваться на уровне 200 после начального роста. Для „поперечной“ моды расчетная добротность достигает значения ~ 2900 при $N = 51$.

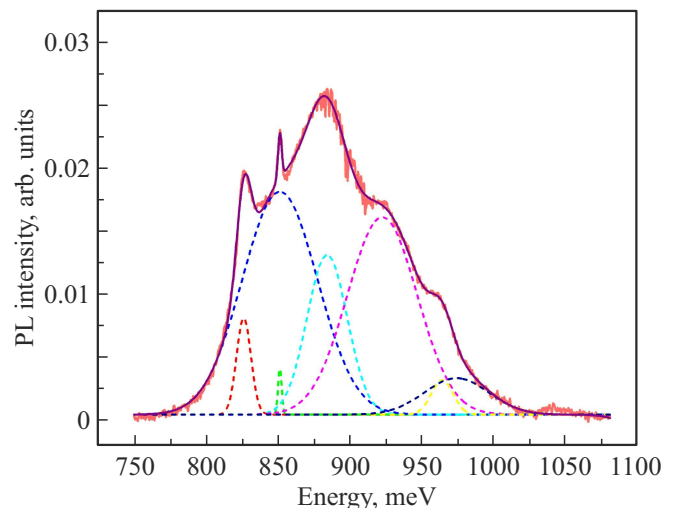


Рис. 2. Спектр микро-ФЛ, измеренный при 77 К на образце с линейными цепочками дисковых резонаторов со встроенными в них GeSi КТ. Диаметр дисков — 770 нм и период — 1 мкм, количество дисков в цепочке $N = 51$. Пунктирными линиями показана аппроксимация спектра микро-ФЛ набором функций Лоренца, которые использовались для определения экспериментальных значений добротности наблюдаемых пиков ФЛ.

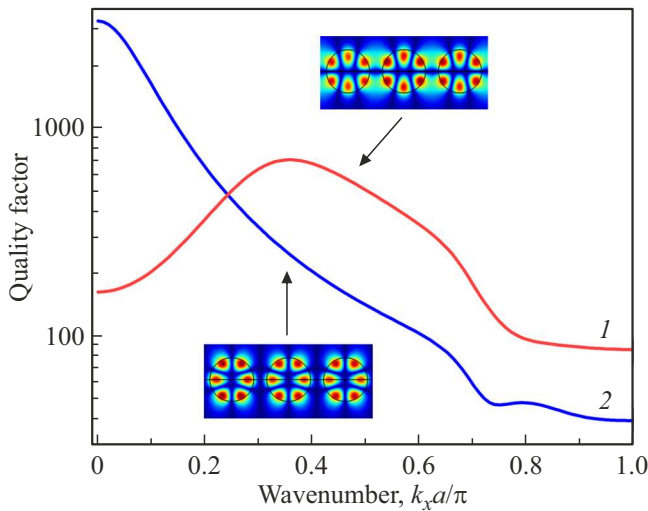


Рис. 3. Зависимости добротности от волнового вектора k_x (вдоль линии цепочки), рассчитанные для „продольной“ моды (кривая 1) и „поперечной“ моды (кривая 2) для случая бесконечной цепочки Si-нанодисков. Радиус дисков составлял 385 нм, период — 1 мкм. Расчеты проводились без учета подложки, а показатель преломления окружающей среды принимался равным 1. Показатель преломления и коэффициент экстинкции Si выбирались согласно данным работы [9]. На верхней вставке рисунка показано характерное распределение электрического поля для „продольной“ коллективной моды, на нижней вставке — для „поперечной“ моды.

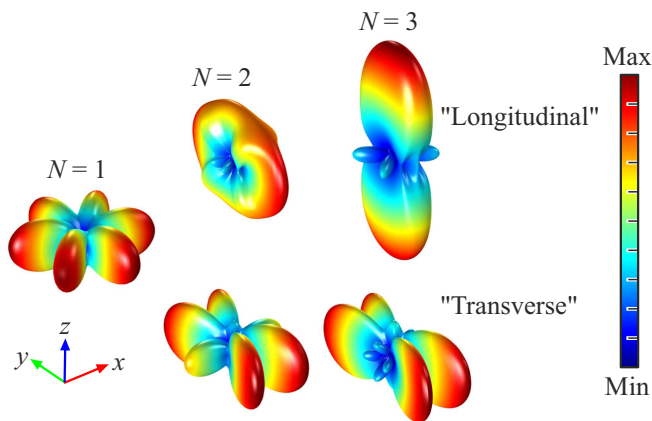


Рис. 4. Распределение излучения в дальнее поле для цепочки из двух ($N = 2$) и трех ($N = 3$) дисков. Картины в верхней части рисунка соответствуют „продольной“ коллективной моде, в нижней части рисунка — „поперечной“ моде. Распределение с $N = 1$ соответствует случаю одиночного изолированного диска (основная мода — магнитный октуполь).

Для случая бесконечной цепочки дисковых резонаторов был проведен расчет теоретических значений добротности „продольной“ (рис. 3, кривая 1) и „поперечной“ (рис. 3, кривая 2), коллективных мод в зависимости от волнового числа $k_x a / \pi$, где k_x — проекция волнового вектора на ось x , направленную вдоль цепочки и проходящую через центры дисков на

их полувысоте, a — период цепочки. Из полученных зависимостей следует, что „поперечная“ мода ведет себя подобно симметрично-защищенному связанному состоянию в континууме (ССК) [7], поскольку добротность этой моды достигает максимума ($\sim 10^4$) при нулевом значении волнового вектора ($k_x = 0$). Тогда как „продольная“ мода оказалась подобна другому типу ССК, а именно параметрическому ССК [8], поскольку добротность этой моды достигает максимума при ненулевом значении волнового вектора. Однако необходимо отметить, что данные коллективные моды нельзя в полной мере отнести к ССК, поскольку они, даже в случае отсутствия потерь в среде, имеют большое, но конечное значение добротности в особых точках. При варьировании параметров цепочек резонаторов было получено, что значение добротности может возрасти на несколько порядков по сравнению с экспериментальными. В частности, для диаметра диска 632 нм и периода 804 нм величина добротности может достигнуть $\sim 10^7$. Следует отметить, что в этом случае коллективная мода в бесконечной цепочке близка по конфигурации поля к магнитному квадруполью ($m = 2$).

Интересным результатом теоретического исследования является изменение картины излучения в дальнее поле с увеличением длины цепочки. Для обеих мод было получено, что доля излучения, направленного вверх (по нормали к поверхности структуры), заметно возрастает с увеличением N (рис. 4). Тогда как для $N = 1$ излучение вверх практически отсутствует, что согласуется с результатами измерений методом микро-ФЛ.

4. Заключение

Полученные результаты продемонстрировали, что линейные периодические цепочки дисковых резонаторов со встроенными в них GeSi КТ могут быть использованы для управления интенсивностью и направленностью излучения КТ. Теоретический анализ показал, что при определенных параметрах структуры могут реализоваться высокодобротные состояния, близкие по своей природе к симметрично-защищенным связанным состояниям в континууме.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-20184) в части создания структур, измерения спектров микро-ФЛ и теоретического моделирования и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в части характеристики морфологии поверхности формируемых структур методом атомно-силовой микроскопии (государственное задание № FWGW-2022-0011, ИФП СО РАН) и в части численной обработки спектров микро-ФЛ для получения данных о зависимости добротностей пиков излучения от геометрических пара-

метров исследуемых структур (государственное задание № 0030-2021-0019, ИФМ РАН).

Благодарности

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Joseph, S. Pandey, S. Swagato, J. Joseph. *Nanophotonics*, **10**, 14175 (2021).
- [2] M. Rybin, Y. Kivshar. *Nature*, **541**, 164 (2017).
- [3] E.N. Bulgakov, D.N. Maksimov. *Opt. Express*, **25**, 14134 (2017).
- [4] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling. *APS Photonics*, **8**, 209 (2021).
- [5] E.M. Purcell. *Phys. Rev.*, **69**, 681 (1946).
- [6] K.J. Vahala. *Nature*, **424**, 839 (2003).
- [7] Z.F. Sadrieva, M.A. Belyakov, M.A. Balezin, P.V. Kapitanova, E.A. Nenasheva, A.F. Sadreev, A.A. Bogdanov. *Phys. Rev. A*, **99**, 053804 (2019).
- [8] M.S. Sidorenko, O.N. Sergaeva, Z.F. Sadrieva, C. Roques-Carnes, P.S. Muraev, D.N. Maksimov, A.A. Bogdanov. *Phys. Rev. A*, **15**, 034041 (2021).
- [9] C. Schinke, P. C. Peest, J. Schmidt, R. Brendel, K. Bothe, M.R. Vogt, I. Kröger, S. Winter, A. Schirmacher, S. Lim, H.T. Nguyen, D. MacDonald. *AIP Advances*, **5**, 67168 (2015).

Редактор Г.А. Оганесян

High-Q states in the emission spectra of linear periodic chains of Si nanodisks with embedded GeSi quantum dots

V.A. Zinovyev¹, Zh.V. Smagina¹, A.F. Zinovieva^{1,2}, E.E. Rodyakina^{1,2}, A.V. Kacyuba¹, P.A. Kuchinskaya¹, K.N. Astankova¹, K.V. Baryshnikova³, M.I. Petrov³, M.S. Mikhailovskii³, V.A. Verbus^{4,5}, M.V. Stepikhova⁴, A.V. Novikov^{4,6}

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

² Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

³ ITMO University, 197101 St. Petersburg, Russia

⁴ Institute for Physics of Microstructures of Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁵ National Research University Higher School of Economics, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁶ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The luminescent properties of structures with linear periodic chains of Si nanodisks with embedded GeSi quantum dots were studied. It was found that the formation of linear chains of resonators leads to a change in the intensity and directivity of quantum dots emission. Narrow high-Q peaks that are associated with collective modes in linear chains appear in the spectrum. A theoretical analysis of the dependence of the mode quality factor on the parameters of linear chains has shown that, under certain parameters, states that are close in nature to symmetry-protected bound states in the continuum can be realized.