

07:09

Сферический распределенный брэгговский отражатель на основе $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$

© А.В. Медведев¹, А.А. Дукин¹, Н.А. Феоктистов¹, В.Г. Голубев^{1,2}¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: medvedev@gvg.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 июня 2017 г.

Методом плазмохимического газофазного осаждения создан сферический распределенный брэгговский отражатель (СРБО) на ближний инфракрасный диапазон спектра. СРБО состоит из чередующихся четвертьволновых слоев аморфного гидрогенизированного карбида кремния ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$) и аморфного оксида кремния ($a\text{-SiO}_2$), нанесенных на стеклянную микросферу. Измерены спектры отражения от СРБО в разных точках его поверхности. Во всех спектрах зарегистрирована полоса брэгговского отражения и продемонстрировано, что существует интервал длин волн, в котором полосы брэгговского отражения перекрываются. Это свидетельствует в пользу того, что в СРБО существует полная фотонная запрещенная зона.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.19.45079.16911

Предложенные в работах [1–4] сферические распределенные брэгговские отражатели (СРБО) имеют перспективы применения для управления спонтанной эмиссией [3,5], создания низкопороговых лазеров [6] и однофотонных источников света [6,7]. СРБО состоят из периодически чередующихся четвертьволновых слоев с высоким и низким показателем преломления, которые окружают прозрачную диэлектрическую сферу.

Несмотря на большой потенциал практического применения СРБО, существует мало работ, посвященных созданию и экспериментальному исследованию их оптических свойств. Это обусловлено трудностью воспроизводимого нанесения на микроскопическую сферическую частицу тонких (толщиной порядка нескольких десятков-сотен нанометров)

однородных по химическому составу и толщине слоев. Предложено несколько способов создания СРБО: электронно-лучевое осаждение $\text{ZnS}/\text{Na}_3\text{AlF}_6$ [8], травление в сочетании с химическим газофазным осаждением Si/SiO_2 [3], многостадийная эмульсионная полимеризация полистирола/поли(трифторэтил метакрилата) [9].

В настоящей работе СРБО создан методом плазмохимического газофазного осаждения (plasma-enhanced chemical vapor deposition — PECVD). Показано, что метод обеспечивает контролируемое нанесение на сферическую поверхность однородных по толщине чередующихся слоев из полупроводниковых и диэлектрических материалов заданного состава. В качестве материалов слоев выбраны аморфный гидрогенизированный карбид кремния ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$) и аморфный оксид кремния ($a\text{-SiO}_2$). Они обладают большой разницей (большим контрастом) показателей преломления, что обеспечивает получение широкой полосы брэгговского отражения от СРБО [10]. В работе также исследованы оптические свойства полученного СРБО.

СРБО нанесен на микросферу из силикатного натриево-кальциевого стекла диаметром 0.26 mm. Микросфера приклеивалась силиконовым клеем-герметиком к концу кварцевого волокна диаметром 0.125 mm и длиной 20 mm. Другим концом волокно крепилось в центре нижнего плоского электрода и устанавливалось вертикально по отношению к его поверхности (рис. 1, а).

Слой $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ наносились в едином технологическом цикле без экспозиции на воздухе в промежутках между последовательными стадиями роста отдельных слоев структуры. Чередование слоев обеспечивалось переключением газовых потоков [11,12]. При осаждении $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ выбиралось соотношение газовых потоков $\text{CH}_4/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4] = 0.1$, что по данным работы [13] примерно соответствует составу с $x = 0.1$. Для данного состава величина запрещенной зоны $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, определяемая по величине поглощения на уровне $10\,000\text{ cm}^{-1}$, приблизительно равна 1.9 eV. Рабочее давление в реакторе составило 0.1–0.2 Torr, частота высокочастотного излучения 17 MHz, высокочастотная мощность 0.03–0.1 W/cm², температура подложки 200–250°C, суммарный поток газовой смеси 5–10 sccm. При росте слоев $a\text{-SiO}_2$ соотношение потоков силана и кислорода составляло приблизительно 1:1.

В установке PECVD использована несимметричная схема подключения электродов с заземленным нижним электродом. Расстояние между

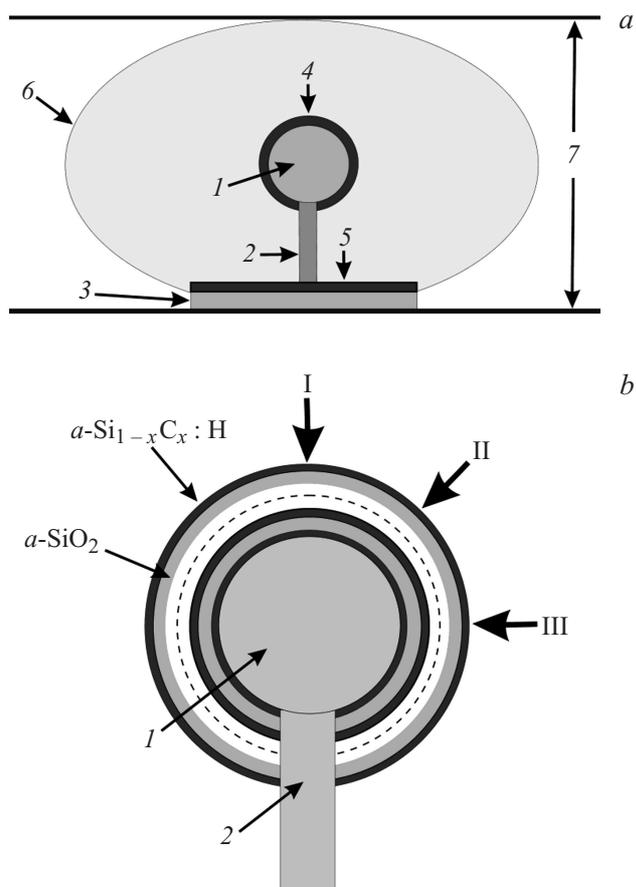


Рис. 1. *a* — схематическое изображение камеры реактора, в которой расположена микросфера: 1 — стеклянная микросфера, 2 — кварцевое волокно, 3 — круглая кварцевая подложка, 4 — осажденный на микросферу слой, 5 — осажденный на подложку слой, 6 — плазменный разряд, 7 — верхний и нижний электроды; *b* — схематическое изображение СРБО: 1 — стеклянная микросфера, 2 — кварцевое волокно. Штриховой линией обозначена часть слоев, которая на рисунке опущена. I, II, III — точки, в которых зарегистрированы спектры отражения, приведенные на рис. 2. Жирными стрелками показаны направления лучей.

плоскими электродами равнялось 50 mm. Для повышения однородности нанесения слоев по толщине в межэлектродной области создавалось однородное температурное поле за счет нагрева как нижнего заземленного электрода, так и верхнего высокочастотного.

Также первоначально устанавливалась корреляция между скоростью осаждения слоев в точке на кварцевой пластинке, установленной вертикально по отношению к нижнему электроду в его центре, соответствующей месту размещения микросферы в разрядном промежутке, и скоростью осаждения на кварцевую пластинку, лежащую на нижнем плоском электроде. Толщины рассчитывались из интерференционных картин в спектрах отражения. В дальнейшем толщины слоев, осаждаемых на микросферу, контролировались методом *in situ* интерферометрии [14] в процессе их нанесения, исходя из сопоставления со скоростью роста и толщинами планарных слоев, осаждаемых на расположенную на горизонтальном электроде кварцевую пластинку.

В результате на микросферу диаметром 0.26 mm было нанесено 11 чередующихся четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (толщина 83 nm) и $a\text{-SiO}_2$ (толщина 141 nm) (рис. 1, b). Толщина слоев выбиралась такой, чтобы центр полосы брэгговского отражения находился в ближней ИК-области спектра на длине волны $\lambda_0 = 820$ nm.

Спектры отражения измерялись на аппаратуре, описанной в [11,15], с использованием микрообъективов с фокусным расстоянием 5 и 50 mm. Последний применялся для измерения спектров отражения от нижней части микросферы. Излучение направлялось и спектры отражения регистрировались по нормали к поверхности СРБО. Спектры регистрировались по экватору микросферы (в плоскости, параллельной подложке) через 90° и по меридиану (в плоскости, перпендикулярной подложке) через 45° . Характерные спектры отражения от разных точек поверхности СРБО приведены на рис. 2. Положение точек, в которых записывались спектры, и направления лучей обозначены на рис. 1, b стрелками I, II, III.

Во всех исследованных спектрах наблюдалась широкая полоса отражения, которая, как и в планарных распределенных брэгговских отражателях [11,12,14–18], возникает за счет брэгговского отражения от группы слоев с периодически меняющимся показателем преломления. Спектральное положение центра полосы брэгговского отражения незначительно смещается при регистрации отражения в разных точках поверхности СРБО. Большой оптический контраст слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$

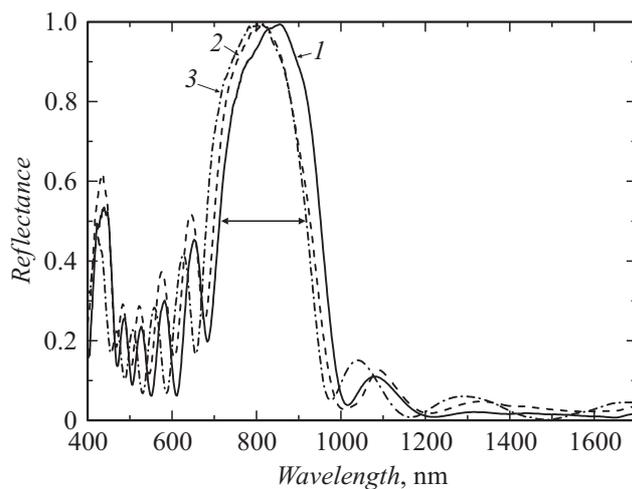


Рис. 2. Спектры отражения излучения от СРБО. Спектры зарегистрированы в точках I (1), II (2) и III (3) на рис. 1, *b*. Спектры нормированы на максимум коэффициента отражения. Горизонтальная двусторонняя стрелка показывает область перекрытия полос брэгговского отражения на уровне половины высоты максимума отражения.

и α -SiO₂ обуславливает большую ширину зарегистрированных полос и тем самым обеспечивает их спектральное перекрытие при измерениях в разных точках на поверхности СРБО. Область перекрытия полос на уровне половины высоты максимума отражения показана горизонтальной двусторонней стрелкой на рис. 2. Таким образом, продемонстрировано, что существует интервал длин волн, в котором наблюдаемые полосы брэгговского отражения перекрываются. Это свидетельствует о том, что в СРБО существует полная фотонная запрещенная зона (complete photonic band gap) [1].

На рис. 3 экспериментальный спектр отражения от СРБО (кривая 1) сопоставлен со спектром, рассчитанным методом матриц переноса [16] при условии, что все оптические толщины слоев точно равны четверти длины волны λ_0 (кривая 2). Расчет проведен в приближении, в котором участок СРБО с малой площадью поверхности описывается системой плоскопараллельных слоев. Такое приближение оправдано,

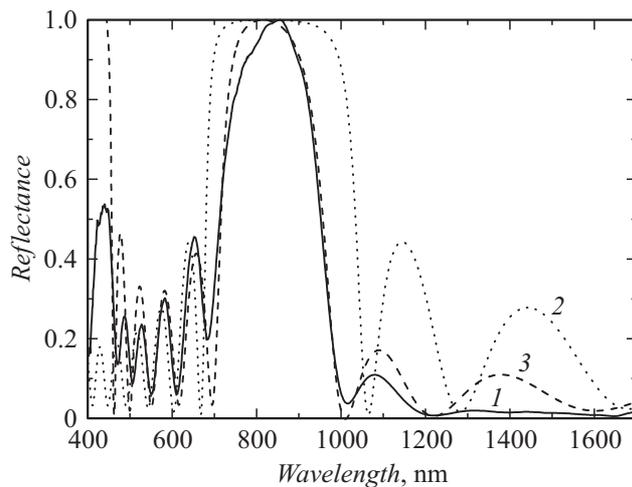


Рис. 3. Спектры отражения излучения от СРБО. 1 — экспериментальный спектр отражения, зарегистрированный в точке I на рис. 1, *b*; 2 — спектр отражения, рассчитанный при условии, что все оптические толщины слоев равны четверти длины волны λ_0 ; 3 — рассчитанный спектр отражения от СРБО, в котором параметры слоев подобраны таким образом, чтобы расчетная форма полосы брэгговского отражения максимально совпала с наблюдаемой экспериментально в спектре 1. Спектры нормированы на максимум коэффициента отражения.

так как сигнал отражения регистрировался от участка поверхности диаметром $1\ \mu\text{m}$, что намного меньше диаметра сферы $0.26\ \text{mm}$, и в этом случае сферичностью поверхности можно пренебречь. Видно, что рассчитанная ширина полосы брэгговского отражения больше, чем регистрируемая экспериментально. Это можно объяснить, если принять во внимание, что вследствие возможных несовершенств технологического процесса оптические толщины слоев отклоняются от заданных четвертьволновых значений. Варьируя параметры слоев, удалось подогнать рассчитанную форму спектра в области полосы к экспериментально наблюдаемой, а также подогнать интерференционную картину в коротковолновой и длинноволновой областях за ее пределами (кривая 3).

Таким образом, отработана технология нанесения методом PECVD тонких слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ на поверхность микросферы. Созданный СРБО на ближний инфракрасный диапазон состоит из 11 чередующихся четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$, нанесенных на стеклянную микросферу диаметром 0.26 mm. Измерены спектры отражения от СРБО в разных точках его поверхности. Спектр отражения от СРБО сопоставлен со спектром, рассчитанным методом матриц переноса, в приближении, когда выбранный участок СРБО с малой площадью поверхности описывается системой плоскопараллельных слоев. Расчет полностью описывает экспериментальный спектр отражения, включая полосу брэгговского отражения и интерференционную картину в коротковолновой и длинноволновой областях за пределами полосы. Продемонстрировано, что СРБО обладает полной фотонной запрещенной зоной.

Список литературы

- [1] *Brady D., Papen G., Sipe J.E.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V. 10. N 4. P. 644.
- [2] *Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Nikolaev V.V.* // J. Mod. Optics. 2001. V. 48. N 9. P. 1503.
- [3] *Xu Y., Liang W., Yariv A., Fleming J.G., Lin S.* // Opt. Lett. 2003. V. 28. N 22. P. 2144.
- [4] *Imakita K., Shibata H., Fujii M., Hayashi S.* // Opt. Express. 2013. V. 21. N 9. P. 10651.
- [5] *Sullivan K.G., Hall D.G.* // Phys. Rev. A. 1994. V. 50. N 3. P. 2708.
- [6] *Xu Y., Liang W., Yariv A., Fleming J.G., Lin S.* // Opt. Lett. 2004. V. 29. N 5. P. 424.
- [7] *Nguyen T.A., Dung H.T.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 76. N 3. P. 033831.
- [8] *Deumié C., Voarino Ph., Amra C.* // Appl. Optics. 2002. V. 41. N 16. P. 3299.
- [9] *Gourevich I., Field L.M., Wei Z., Paquet C., Petukhova A., Alteheld A., Kutacheva E., Saarinen J.J., Sipe J.E.* // Macromolecules. 2006. V. 39. N 4. P. 1449.
- [10] *Breiland W.G., Allerman A.A., Klem J.F., Waldrip K.E.* // MRS Bull. 2002. V. 27. N 7. P. 520.
- [11] *Голубев В.Г., Дукин А.А., Медведев А.В., Певцов А.Б., Селькин А.В., Феоктистов Н.А.* // ФТТ. 2004. Т. 46. В. 10. С. 1756.
- [12] *Rybin M.V., Zherzdev A.V., Feoktistov N.A., Pevtsov A.B.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. N 16. P. 165118.

- [13] *Fu G.-S., Wang X.-Z., Lu W.-B., Dai W.-L., Li X.-K., Yu W.* // Chin. Phys. B. 2012. V. 21. N 10. P. 107802.
- [14] *Dukin A.A., Feoktistov N.A., Golubev V.G., Medvedev A.V., Pevtsov A.B., Sel'kin A.V.* // Phys. Rev. E. 2003. V. 67. N 4. P. 046602.
- [15] *Медведев А.В., Феоктистов Н.А., Грудинкин С.А., Дукин А.А., Голубев В.Г.* // ФТП. 2014. Т. 48. В. 10. С. 1409.
- [16] *Голубев В.Г., Дукин А.А., Медведев А.В., Певцов А.Б., Селькин А.В., Феоктистов Н.А.* // ФТП. 2001. Т. 35. В. 10. С. 1266.
- [17] *Блохин С.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Карповский И.О., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Прасолов Н.Д., Брунков П.Н., Левицкий В.С., Лисак В., Малеев Н.А., Устинов В.М.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 20. С. 57.
- [18] *Блохин С.А., Крыжановская Н.В., Моисеев Э.И., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Карповский И.О., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Неведомский В.Н., Никитина Е.В., Малеев Н.А., Устинов В.М.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 19. С. 70.