

## Анизотропные фотонные кристаллы и микрорезонаторы на основе мезопористого кремния

© О.А. Акципетров, Т.В. Долгова, И.В. Соболева, А.А. Федянин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия

E-mail: fedyanin@shg.ru

Разработана методика изготовления одномерных анизотропных фотонных кристаллов и микрорезонаторов на основе анизотропного пористого кремния с оптическим двулучепреломлением. Спектры коэффициентов отражения света демонстрируют наличие фотонной запрещенной зоны и разрешенной микрорезонаторной моды в центре фотонной зоны, спектральное положение которых изменяется при повороте образца вокруг своей нормали и/или вращении плоскости поляризации падающего излучения. Исследована зависимость величины сдвига спектрального положения краев фотонной запрещенной зоны и микрорезонаторной моды от ориентации вектора поляризации падающего электромагнитного излучения относительно оптической оси фотонных кристаллов и микрорезонаторов.

Работа выполнена при поддержке гранта ведущих научных школ (1604.2003.2) и программы „Университеты России“.

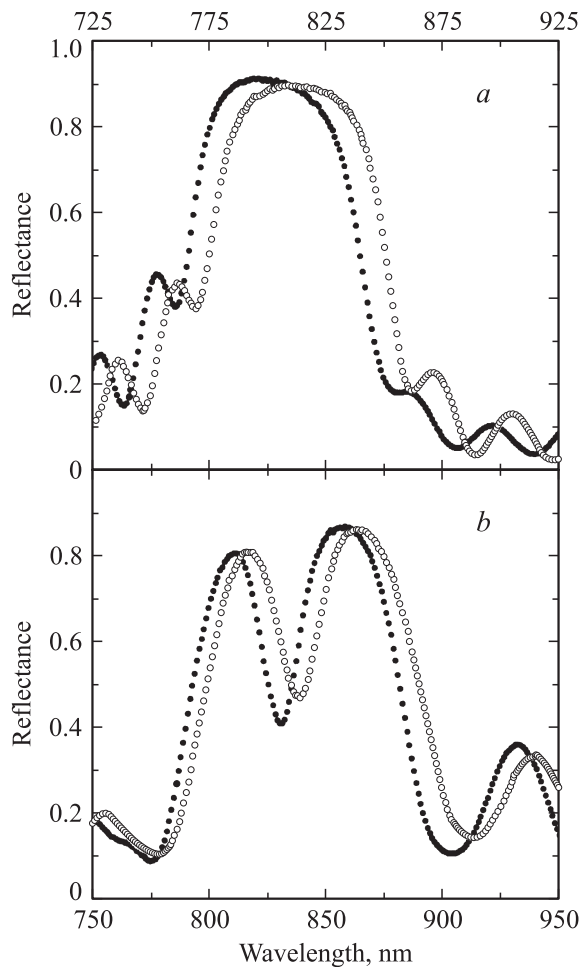
Интерес к созданию микроструктур с запрещенной фотонной зоной — фотонных кристаллов и микрорезонаторов [1] на основе кремния — обусловлен возможностью управлять оптическим откликом кремния, контролируемо усиливать в определенном спектральном диапазоне сечения фотолуминесценции [2] или рамановского рассеяния [3], а также увеличивать эффективность нелинейно-оптического отклика кремния, например генерации второй [4] и третьей [5] гармоник. Прикладной интерес к фотонным кристаллам на основе кремния связан с перспективой изготовления на их основе устройств современной фотоники и оптоэлектроники — оптических транзисторов, переключателей, мультиплексоров и т.д. В настоящее время разработаны методики изготовления одномерных (1D), двумерных (2D) и трехмерных (3D) фотонных кристаллов на основе кремния, т.е. структур, обладающих периодичностью диэлектрической проницаемости с периодом порядка длины волны в видимой или инфракрасной частях спектра в одном, двух или трех направлениях. Одномерные фотонные кристаллы (брэгговские зеркала) изготавливаются из мезопористого кремния [6], двумерные фотонные кристаллы — из макропористого кремния [7], а трехмерные — на основе композитов опал-кремний [8]. Одной из задач в рамках этой проблематики является создание анизотропных фотонных кристаллов на основе анизотропного мезопористого кремния, обладающего оптическим двулучепреломлением [9].

Цель данной работы — создание одномерных фотонных кристаллов и микрорезонаторов на основе анизотропного мезопористого кремния и исследование зависимости перестройки спектрального положения фотонной запрещенной зоны и микрорезонаторной моды от ориентации вектора поляризации относительно оптической оси образца.

Образцы изготовлены из высоколегированного кремния с ориентацией поверхности (110) с сопротивлением  $50 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$  методом электрохимического травле-

ния [6,10] в растворе плавиковой кислоты и этилового спирта в пропорции 1:7. В обычных условиях кремний устойчив к воздействию плавиковой кислоты. Однако при приложении электрического напряжения происходит электрохимическое травление с выделением  $\text{SiF}_4$  и водорода, в результате которого в приповерхностном слое монокристаллического кремния образуются углубления, которые затем развиваются в каналы-поры. Выделяющийся в ходе реакции водород пассивирует боковые стенки пор, оставляя активным только дно пор. Благодаря этому диаметр пор остается практически постоянным на всей толщине образца. Плотность тока, текущего через поверхность кремния, определяет пористость кремния и соответственно его эффективный показатель преломления, а время травления определяет толщину слоя пористого кремния. Таким образом, периодическое изменение параметров травления — плотности тока и времени травления каждого слоя — позволяет получать одномерные фотонные кристаллы и микрорезонаторы со спектральными положениями фотонной запрещенной зоны и разрешенной моды, определяемыми оптическими толщинами слоев. Для мезопористого кремния, получаемого из пластин высоколегированного кремния, размер пор составляет от 10 до 100 nm, при этом наибольшая скорость травления и роста пор достигаются в направлениях типа {100}, что приводит к направленному росту пор. В случае кремния с кристаллографической ориентацией поверхности направления [100] и [010] лежат под углом  $45^\circ$  к поверхности. В этом случае поры также ориентированы под углом  $45^\circ$  к поверхности, благодаря чему возникает анизотропия показателя преломления образца как в плоскости падения, так и в плоскости поверхности образца [11].

Фотонные кристаллы состоят из 25 пар чередующихся слоев мезопористого кремния с эффективными показателями преломления  $n_1 = 1.39$  и  $n_2 = 1.58$  и оптической толщиной  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$  совпадает с центром фотонной запрещенной зоны при нормальном



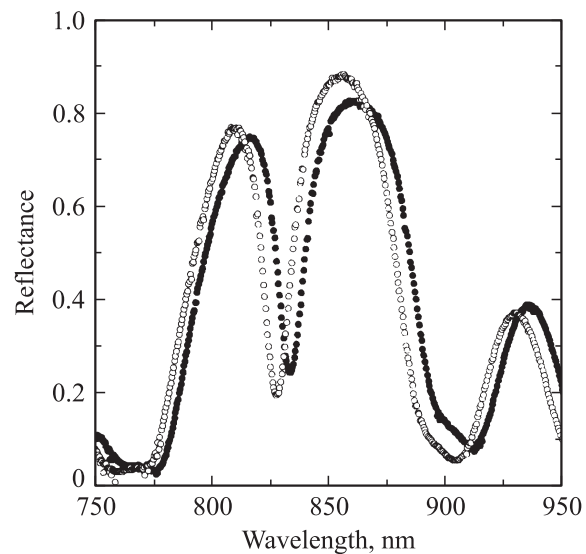
**Рис. 1.** Спектры отражения  $s$ -поляризованного излучения от фотонного кристалла ( $a$ ) и микрорезонатора ( $b$ ), измеренные при угле падения  $20^\circ$  при значениях азимутального угла поворота образца  $\psi = 0^\circ$  (светлые кружки) и  $\psi = 90^\circ$  (темные кружки).

падении света. Пористости слоев составляют порядка 0.7 и 0.8. Микрорезонаторы состоят из двух фотонных кристаллов, каждый из которых образован двенадцатью парами слоев мезопористого кремния, разделенных микрорезонаторным слоем с оптической толщиной  $\lambda_0/2$ . Аппроксимация спектров отражения одиночных слоев анизотропного мезопористого кремния позволила определить величину анизотропии показателей преломления, составившую  $\Delta n_1 = 0.07$  и  $\Delta n_2 = 0.08$  на длине волны 800 nm.

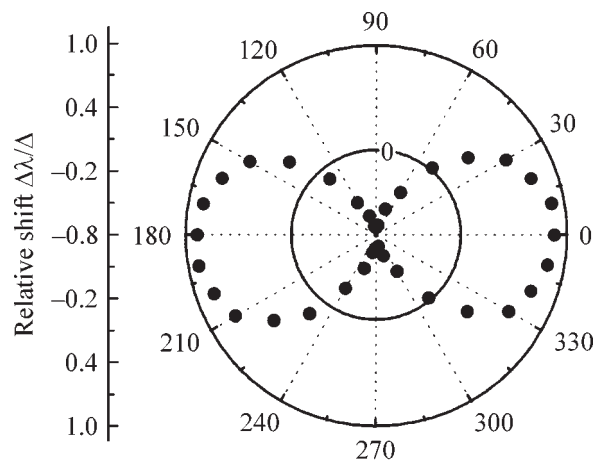
На рис. 1 представлены спектры отражения  $s$ -поляризованного света от фотонного кристалла (рис. 1,  $a$ ) и микрорезонатора (рис. 1,  $b$ ), измеренные при угле падения  $20^\circ$  для двух значений азимутального угла поворота образца, задающего угол между плоскостью падения и плоскостью (001). Спектры коэффициента отражения демонстрируют наличие фотонной запрещенной зоны с коэффициентом отражения порядка 0.9 в диапазоне длин волн 770–850 nm для фотонного кристалла, а также наличие фотонной запрещенной зоны с коэффициентом

отражения порядка 0.85 в диапазоне длин волн 780–900 nm и микрорезонаторной моды на длине волны  $\lambda_0 = 830$  nm для случая микрорезонатора. Кроме того, спектры демонстрируют сдвиг спектрального положения запрещенной зоны при изменении азимутального угла. Наибольший сдвиг, составивший порядка 20 nm, наблюдается при повороте образца на  $90^\circ$ .

На рис. 2 представлены спектры отражения света от микрорезонатора  $s$ - и  $p$ -поляризованного света. Спектры демонстрируют наличие фотонной запрещенной зоны и микрорезонаторной моды для обеих поляризаций. Наблюдается изменение спектрального положения микрорезонаторной моды при смене поляризации падающего излучения, причем величина сдвига превышает



**Рис. 2.** Спектры отражения  $p$ - (светлые кружки) и  $s$ -поляризованного (темные кружки) излучения от микрорезонатора, измеренные при угле падения  $20^\circ$  при значении азимутального угла поворота образца  $\psi = 0^\circ$ .



**Рис. 3.** Зависимость величины относительного спектрального сдвига микрорезонаторных мод  $\Delta\lambda/\lambda$  (см. в тексте) от азимутального угла поворота микрорезонатора. Угол падения  $20^\circ$ .

полуширину моды. Для случая  $p$ -поляризованного излучения и больших углов падения (порядка  $55^\circ$ ) сдвиг микрорезонаторной моды увеличился до 30 nm.

Другим проявлением анизотропии является наличие спектрального сдвига микрорезонаторной моды при изменении поляризации входного излучения. На рис. 3 представлена зависимость величины спектрального сдвига микрорезонаторных мод, измеренных при  $s$ - и  $p$ -поляризации падающего излучения,  $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_s$ , отнесенной к полуширине моды  $\Delta$ , от азимутального угла поворота микрорезонатора  $\psi$ , измеренная при угле падения  $20^\circ$ . Зависимость имеет два максимума — при  $\psi = 0^\circ$  и  $180^\circ$  и два минимума — при  $\psi = 90^\circ$  и  $270^\circ$ . При значениях азимутального угла  $\psi = 45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$  спектральные положения мод для  $s$ - и  $p$ -поляризованных излучений совпадают.

Таким образом, изготовлены одномерные фотонные кристаллы и микрорезонаторы на основе анизотропного мезопористого кремния. Спектры их коэффициентов отражения демонстрируют наличие фотонной запрещенной зоны и разрешенной микрорезонаторной моды, перестраиваемых по длине волны при повороте образца вокруг нормали. Исследована зависимость величины сдвига спектрального положения моды от параметров, определяющих взаимную ориентацию вектора поляризации электромагнитного поля и оптической оси фотонного кристалла — угла падения излучения, угла азимутального поворота образца и от угла поворота плоскости поляризации падающего света.

## Список литературы

- [1] K. Sakoda. Optical Properties of Photonic Crystals. Springer (2001).
- [2] V. Pellegrini, A. Tredicucci, C. Mazzoleni, L. Pavesi. Phys. Rev. B **52**, R14328 (1995).
- [3] L.A. Kuzik, V.A. Yakovlev, G. Mattei. Appl. Phys. Lett. **75**, 1830 (1999).
- [4] T.V. Dolgova, A.I. Maidykovski, M.G. Martemyanov, A.A. Fedyanin, O.A. Aktsipetrov, G. Marowsky, V.A. Yakovlev, G. Mattei. Appl. Phys. Lett. **81**, 2725 (2002).
- [5] Т.В. Долгова, А.И. Майдыковский, М.Г. Мартемьянов, А.А. Федянин, О.А. Акципетров. Письма в ЖЭТФ **75**, 17 (2002).
- [6] O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi. Surf. Sci. Rep. **38**, 1 (2000).
- [7] S.W. Leonard, J.P. Mondia, H.M. van Driel, O. Toader, S. John, K. Busch, A. Birner, U. Gösele, V. Lehmann. Phys. Rev. B **61**, R2389 (2000).
- [8] В.Г. Голубев, В.А. Кособукин, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов. ФТП **35**, 710 (2001).
- [9] P.K. Kashkarov, L.A. Golovan, A.B. Fedotov, A.I. Efimova, L.P. Kuznetsova, V.Yu. Timoshenko, D.A. Sidorov-Biryukov, A.M. Zheltikov, J.W. Haus. J. Opt. Soc. Am. B **19**, 2273 (2002).
- [10] W. Theiss. Surf. Sci. Rep. **29**, 91 (1997).
- [11] D. Kovalev, G. Polisski, J. Diener, H. Heckler, N. Kunzner, V.Yu. Timoshenko, F. Koch. Appl. Phys. Lett. **78**, 916 (2001).