

Одномерный фотонный кристалл, полученный с помощью вертикального анизотропного травления кремния

© В.А. Толмачев[¶], Л.С. Границына, Е.Н. Власова*, Б.З. Волчек*,
А.В. Нащекин, А.Д. Ременюк, Е.В. Астрова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук,
199004 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 февраля 2002 г. Принята к печати 14 февраля 2002 г.)

Исследованы возможности технологии вертикального анизотропного травления кремния ориентации (110) для изготовления одномерного фотонного кристалла с высоким контрастом показателя преломления. Показано, что продвижение в ближний инфракрасный диапазон ограничивается механической прочностью тонких кремниевых стенок. Получены приборные структуры, состоящие из 50 канавок глубиной 114 мкм и толщиной кремниевых стенок 1.8 мкм (период структуры 8 мкм). Проведенные измерения их спектров отражения в области длин волн 2.5–16.5 мкм показали хорошее согласие с результатами расчета, хотя основная фотонная зона, расположенная при $\lambda \approx 28 \pm 10$ мкм, осталась вне пределов измерений.

Многослойные диэлектрические зеркала и резонаторы Фабри–Перо являются хорошо известными оптическими элементами. Последнее время к ним проявляется особый интерес в связи с исследованиями в области фотонных кристаллов [1]. Одномерные фотонные кристаллы (1DPC) могут быть получены в виде структур с чередующимися слоями, обладающими высоким и низким показателями преломления N_H и N_L , оптимальное соотношение оптических толщин которых равно $\lambda/4$, где λ — заданная длина волны. Однако, как традиционные технологии нанесения тонких пленок, так и новая, основанная на создании слоев микропористого кремния с различной пористостью путем электрохимического травления [2,3], не позволяют получить высокий контраст по показателю преломления N_H/N_L , в то время как высокий контраст является важным параметром фотонных кристаллов. Он дает возможность сократить число слоев, необходимых для формирования широкой запрещенной зоны с резкими краями, а также обладает преимуществами при создании композитных материалов, поскольку введение наполнителя с $N > 1$ уменьшает контраст.

Технология травления канавок с вертикальными стенками в монокристаллическом Si ориентации (110) разработана достаточно давно [4], однако использование ее для создания оптических элементов не получило широкого распространения, несмотря на возможность получить периодические структуры с высоким $N_H/N_L = 3.42$ и зеркально-гладкой поверхностью стенок в области прозрачности кремния ($\lambda > 1.1$ мкм). Основные проблемы связаны с формированием структур с малым периодом и введением излучения в боковую грань структуры. Настоящая работа ставила своей целью исследовать возможности технологии глубокого анизотропного травления Si для изготовления 1DPC.

Анизотропное травление кремния, ориентированного в плоскости (110), с удельным сопротивлением

100 Ом·см проводилось в 44% водном растворе KOH при 70°C в течение 1–4 ч в зависимости от требуемой глубины. Маской при травлении служил слой термического окисла толщиной 0.8–0.9 мкм, в котором с помощью обычной фотолитографии с позитивным фоторезистом создавался рисунок приборных структур. На фотошаблоне имелось 3 типа приборных структур, состоящих из чередующихся светлых и темных полос равной ширины, длина которых равнялась 2 мм. Период чередования полос был разным (см. таблицу), но в каждом типе приборов общее число периодов составляло 50. Для прецизионной ориентации полос вдоль направления $\langle 111 \rangle$ в плоскости пластины использовалось предварительное глубокое травление специальных знаков совмещения, расположенных веером под разными углами [5]. Ширина темных полос D_0 была разной в каждом из типов приборных структур и составляла соответственно 8, 4 и 2 мкм. На рис. 1,а показан вид сверху одного из готовых приборов типа 1. Глубина травления канавок и толщина кремниевых стенок измерялись на поперечном срезе

Параметры приборных структур

Тип прибора	Период структуры, a , мкм	Ширина темной полосы на фотошаблоне, D_0 , мкм	Глубина канавок, L , мкм	Толщина Si стенки в готовом приборе, D_H , мкм
1	16	8	43	5.6
			114	5.3
			232	4.8
2	8	4	43	2.5
			114	1.8
			232	0
3	4	2	43	0.25
			114	0
			232	0

[¶] E-mail: tva@pop.ioffe.rssi.ru

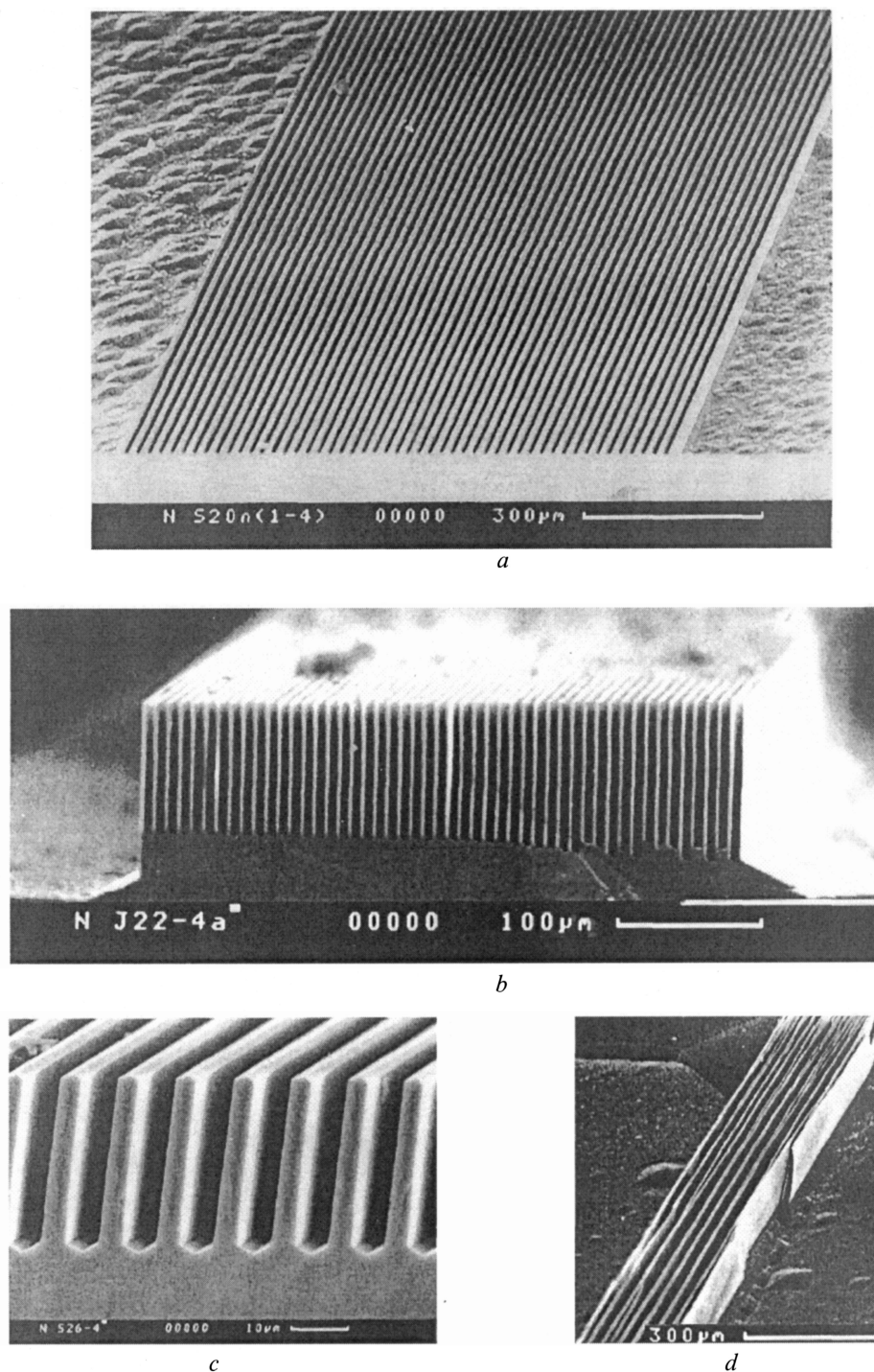


Рис. 1. Изображение структуры 1D PC в сканирующем электронном микроскопе: *a* — вид сверху приборной структуры типа 1 с периодом 16 мкм; *b* — поперечное сечение 1D PC типа 2 с периодом 8 мкм и глубиной канавок 114 мкм; *c* — поперечное сечение структуры типа 2 с периодом 8 мкм и глубиной канавок 28 мкм; *d* — структура типа 3 с периодом 4 мкм.

с помощью оптического и растрового электронного микроскопов. На рис. 1, *b* и *c* показаны изображения поперечных сечений, полученных в сканирующем электронном микроскопе для структур типа 2 разной глубины. Следует отметить, что получение приборов

с малым периодом ограничивается боковым подтравом и механической прочностью кремниевых стенок. Утоньшение стенок происходит как за счет бокового подтравки под фоторезист в буферном травителе на этапе вскрытия окон в окисле, так и за счет некото-

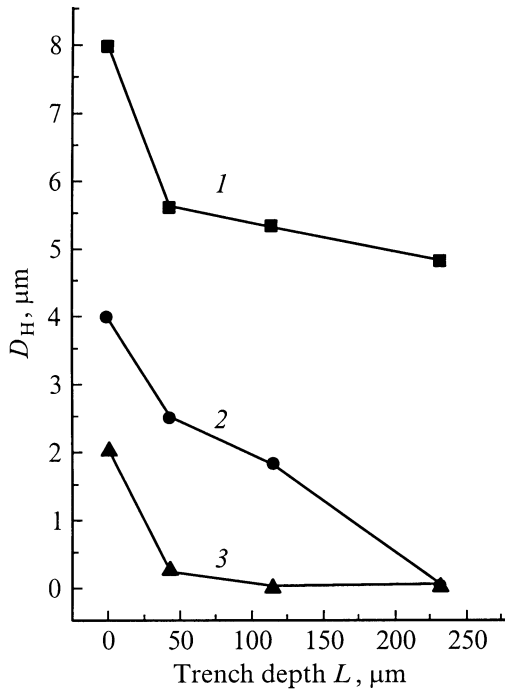


Рис. 2. Зависимость толщины кремниевых стенок D_H от глубины анизотропного травления L для разных типов приборных структур. D_0 , мкм: 1 — 8, 2 — 4, 3 — 2.

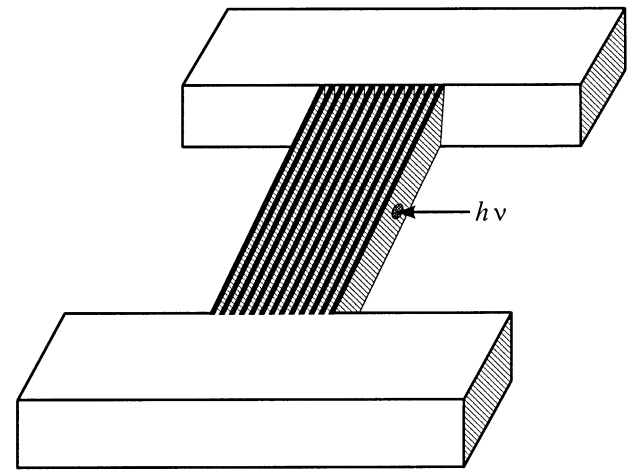


Рис. 3. Схема оптических измерений одномерного фотонного кристалла.

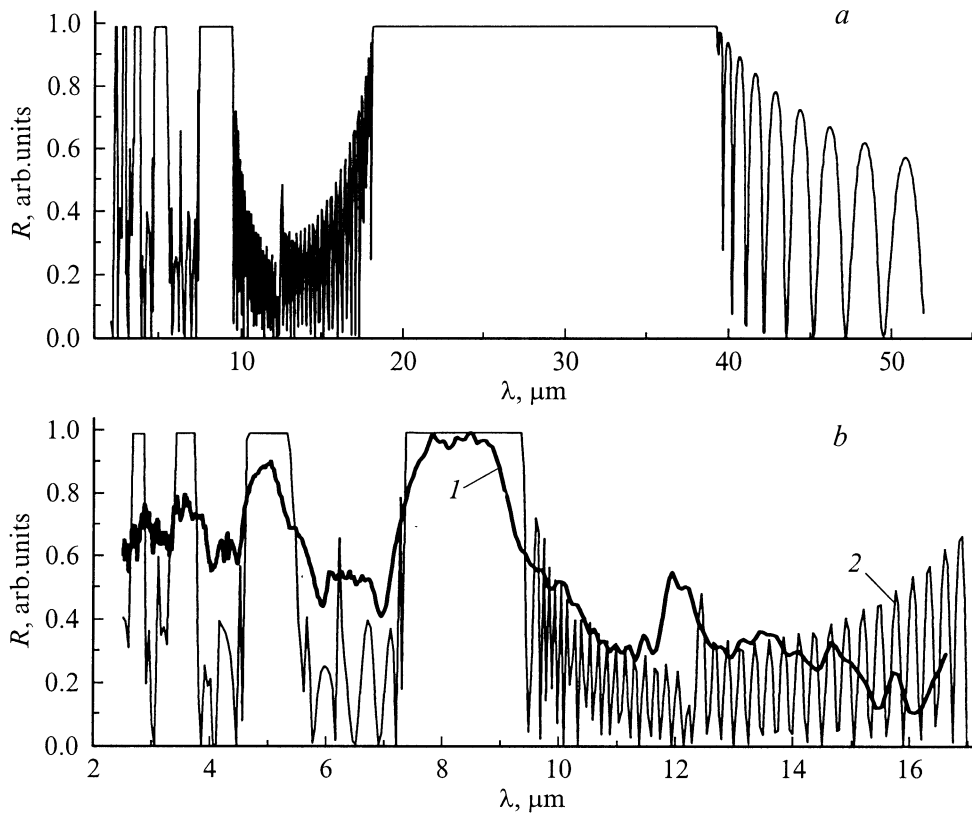


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента отражения R для 1DPC с периодом $a = 8$ мкм и толщиной Si стенок $D_H = 1.8$ мкм: a — полный расчетный спектр, b — экспериментальная зависимость (1) и часть расчетной зависимости (2).

рого отклонения от вертикали при глубоком травлении кремния. В результате стенки сохранялись в приборах типа 3 лишь при травлении на глубину < 50 мкм, типа 2 — на глубину < 150 мкм, что видно из рис. 2, демонстрирующего изменение толщины кремниевых стенок для приборов с разной исходной шириной темной полосы на фотошаблоне D_0 . Значения толщин кремниевых стенок D_H , приведенные в таблице и на рис. 2 и использованные для расчетов спектров отражения, соответствуют толщинам, измеренным в средней по глубине части структур. В приборах типа 3 с наиболее тонкими стенками наблюдалось частичное разрушение стенок и их прогиб, приводящий к слипанию смежных плоскостей (рис. 1, *d*).

На одной из боковых стенок структуры были проведены измерения параметров Δ и ψ с помощью многоугловой эллипсометрии на эллипсометре ЛЭФ-3м ($\lambda = 0.63$ мкм). При этом использовался нулевой метод регистрации, который позволяет оценить степень депolarизации отраженного пучка. Для всех использованных углов падения пучка ($\varphi = 60\text{--}78$ градусов) наблюдалось отсутствие депolarизации, что свидетельствует о высоком совершенстве поверхности вертикальных стенок, полученных в процессе анизотропного травления. Измеренные величины Δ и ψ соответствовали оптическим константам Si.

Для исследования оптических характеристик 1D PC использовался фурье-спектрометр фирмы Bruker. Световой пучок фокусировался в пятно диаметром 60 мкм с помощью микроскопа и направлялся на боковую грань приборной структуры, как показано на рис. 3. При этом регистрировались спектры отражения в диапазоне $\lambda = 2.5\text{--}16.5$ мкм. Из набора изготовленных структур пригодными для измерений были структуры с глубиной $L > 100$ мкм. Воспроизводимые результаты с близкими к оптимальным толщинам стенок были получены для структуры с периодом $a = 8$ мкм и глубиной 114 мкм, показанной на рис. 1, *b*.

Расчет спектров отражения такого 1D PC проводился с помощью метода характеристических матриц [6] для $N_H = 3.42$, $N_L = 1$ при показателе поглощения для обоих слоев $k = 0$. Толщины слоев, взятые для расчета, соответствовали изготовленной структуре и составляли $D_H = 1.8$ мкм и $D_L = 6.2$ мкм. На рис. 4, *a* приведен расчетный спектр отражения, на котором хорошо видна широкая область высокого отражения при $\lambda = 18\text{--}39$ мкм (основная фотонная зона) и несколько вторичных более узких полос вблизи $\lambda = 8$ и 5 мкм. На рис. 4, *b* приведен нормированный экспериментальный спектр отражения и фрагмент расчетного спектра. Видно, что в доступном спектральном диапазоне имеется хорошее совпадение между расчетной и экспериментальной зависимостями, что позволяет сделать вывод об успешном решении поставленной задачи.

Для смещения основной фотонной зоны в ближнюю инфракрасную область следует уменьшить период структуры. Неиспользованным резервом в этом направлении

являются уменьшение длины щелей, что повысит их механическую прочность, а также снижение бокового подтравива путем использования сухого травления окисной маски. Разрабатываемые микрооптические приборы хорошо совместимы со стандартной кремниевой технологией и могут быть изготовлены в одном чипе с электронными компонентами интегральной схемы. Более того, $p\text{--}n$ -переходы можно формировать прямо в их монокристаллических стенках. В отличие от приборов на микропористом кремнии они не подвержены процессам старения. Таким образом, вышеперечисленные свойства свидетельствуют о перспективности технологии жидкостного анизотропного травления для создания таких микрооптических приборов, как фильтры, диэлектрические зеркала, волноводы, антиотражающие элементы, резонаторы и т. п.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 00-15-96770), Программы СПб НЦ „Низкоразмерные квантовые структуры“ и Программ Министерства промышленности, науки и технологий „Физика наноструктур“ и „Создание компонент сетей связи, программного обеспечения и базы данных фундаментальной науки и образования“.

Список литературы

- [1] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, R.D. Winn. *Photonic Crystals* (Princeton University Press, 1995).
- [2] M.G. Berger, M. Thonissen, R. Arens-Fisher, H. Munder, H. Luth, M. Arntzen, W. Theiss. *Thin Sol. Films*, **255**, 313 (1995).
- [3] L. Pavesi, V. Mulloni. *J. Luminesc.* **80**, 43 (1999).
- [4] D.L. Kendall. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **9**, 373 (1979).
- [5] Е.Г. Гук, А.Г. Ткаченко, Н.А. Токранова, Л.С. Границына, Е.В. Астрова, Б.Г. Подласкин, А.В. Нашекин, И.Л. Шульпина, С.В. Рутковский. *Письма ЖТФ*, **27** (9), 64 (2001).
- [6] Р. Аззам, Н. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).

Редактор Л.В. Беляков

1D-photonic crystal obtained by vertical anisotropic etching of silicon

V.A. Tolmachev, L.S. Granitsyna, E.N. Vlasova, B.Z. Volchek*, A.V. Nashchekin, A.D. Remenyuk, E.V. Astrova*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

* Institute of Macromolecular Compounds,
Russian Academy of Sciences,
199004 St.Petersburg, Russia

Abstract Perspectives of vertical anisotropic etch technique to form one dimensional photonic crystal with high refractive index contrast from (110)-oriented silicon have been studied. It has been shown that the mechanical strength of thin silicon walls slows down the advancement towards the near infrared spectrum region. The device structures obtained consist of 50 trenches of $114\mu\text{m}$ depth, and Si walls of $1.8\mu\text{m}$ thick, period of the structure being $8\mu\text{m}$. Examination of their reflectance spectra in the wave length range $2.5\text{--}16.5\mu\text{m}$ has shown a good agreement with the simulation results, though the main photonic band at $\lambda \approx 28 \pm 10\mu\text{m}$ has left out the available spectral region.