

# Технология создания рисунка в макропористом кремнии и получение полос двумерных фотонных кристаллов с вертикальными стенками

© Е.В. Астрова<sup>¶</sup>, Т.Н. Боровинская, В.А. Толмачев, Т.С. Перова\*

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

\* Университет Дублина, Тринити Колледж,  
Дублин 2, Ирландия

(Получена 9 февраля 2004 г. Принята к печати 11 февраля 2004 г.)

Сообщается о новом процессе получения структур с вертикальными стенками в толстом слое макропористого кремния на подложке. Проблема фотолитографии решается путем создания рисунка с обратной стороны пластины. В результате кремниевая подложка сама служит маской, через которую удаляются определенные участки пористого слоя. Изготовлены узкие и высокие полосы макропористого кремния, ориентированные вдоль рядов макропор. Полученные структуры двумерного фотонного кристалла использовались для введения света в направлении, перпендикулярном оси каналов, и регистрации ИК спектров отражения.

## 1. Введение

Технология получения упорядоченной „решетки“ глубоких каналов с вертикальными стенками была впервые предложена в работе [1]. Процесс включает в себя создание с помощью фотолитографии окон в окисной маске на поверхности  $n$ -Si(100), щелочное травление затравочных ямок через маску и анодирование в растворе HF при подсветке с обратной стороны пластины. Получаемый при этом слой макропористого кремния ( $ma$ -Si) содержит цилиндрические или квадратные в сечении каналы (макропоры) диаметром от 1 до 10 мкм и глубиной до 300 мкм, образованные на месте затравок. Необходимым условием их получения является равномерное распределение затравочных центров по всей площади анодирования и правильное соотношение между удельным сопротивлением подложки и периодом решетки фотошаблона [2]. На границе между макропористой областью и не подвергшимся анодированию участком пластины образуется довольно широкий переходной слой, где регулярная структура нарушена (поры ветвятся, имеют разную глубину и т. д.).

Разнообразные области применения  $ma$ -Si [3] зачастую требуют создания на подложке отдельных участков макроскопического кремния с резким краем и вертикальными стенками. В частности, для введения излучения в среду двумерного фотонного кристалла требуются узкие полосы, определенным образом ориентированные относительно „решетки“ исходного  $ma$ -Si. Первая работа, посвященная этой проблеме [4], показала, что попытка создать рисунок в  $ma$ -Si с помощью позитивного или негативного фоторезиста, не приводит к успеху. Поэтому предложенная в вышеуказанной работе технология включала сложный процесс, предусматривающий нанесение нитрида кремния на внутреннюю поверхность каналов, заполнение пор поликристаллическим кремнием или алюминием и формирование рисунка с

лицевой стороны пластины. В дальнейшем этот процесс, получивший название метода Отто, позволил удалять определенные области слоя  $ma$ -Si и получать на подложке узкие полосы с вертикальными стенками. Такие структуры использовались в [5,6] для исследования оптических свойств фотонных кристаллов.

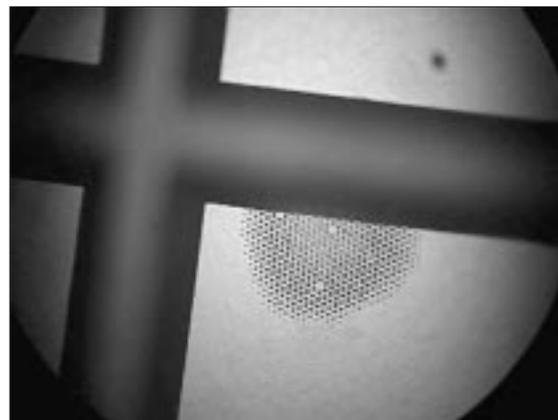
В настоящей работе сообщается о более простом процессе создания областей  $ma$ -Si с вертикальными стенками, основанном на маскировании пор только термическим окислом и формировании рисунка с обратной стороны пластины. В отличие от метода Отто, образовавшиеся структуры не имеют общей подложки, которая тоже подвергается структурированию. Изготовленные полосы макропористого кремния были использованы для введения света перпендикулярно оси каналов, что позволило снять спектры отражения с помощью ИК микроскопа и найти положение запрещенной фотонной зоны.

## 2. Технологический процесс получения полос макропористого кремния

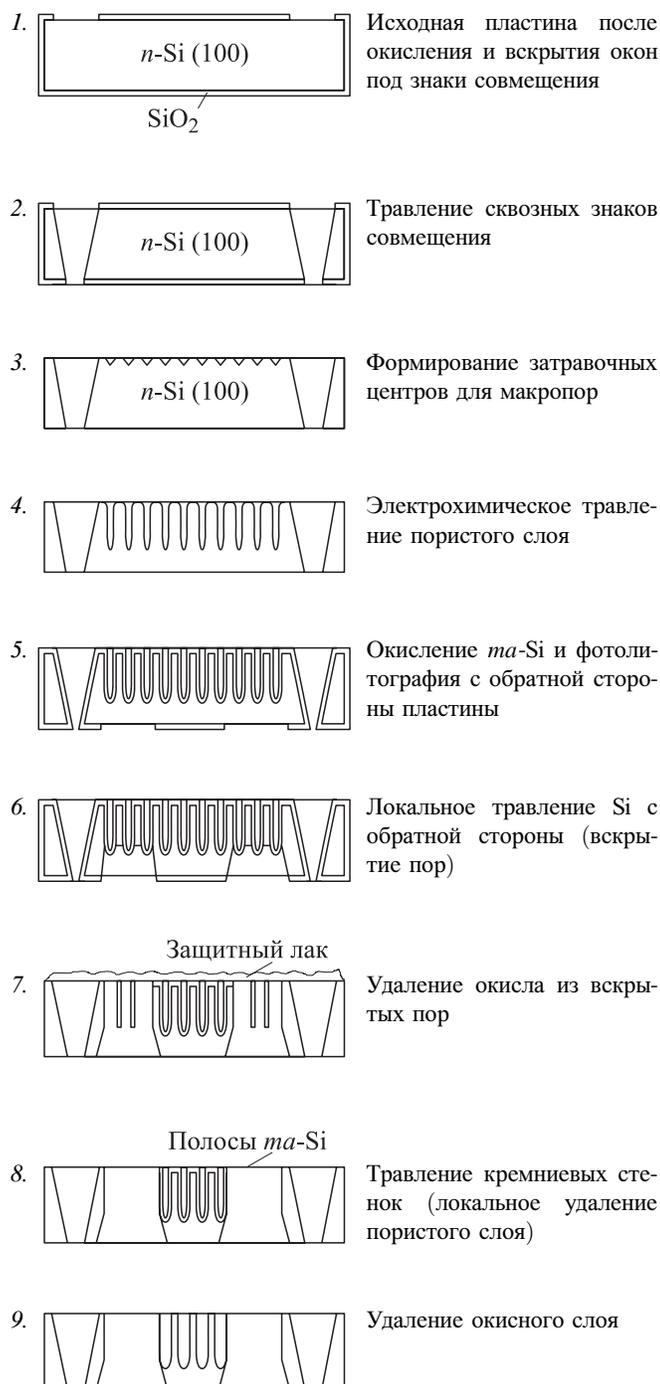
Исходные пластины Si  $n$ -типа проводимости ( $\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), ориентированные в плоскости (100), разрезались на квадраты размером  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ , утоньшались до 200 мкм и полировались с обеих сторон. Дальнейшие операции ясны из схемы процесса, приведенной далее. После термического окисления проводилось сквозное щелочное травление знаков совмещения (этап 2). Затем формировалась треугольная „решетка“ затравочных ямок с периодом  $A = 4 \text{ мкм}$ , и осуществлялось фотоэлектрохимическое травление на глубину 170–180 мкм (этапы 3, 4). Затравки удалялись путем полировки лицевой стороны, и образец окислялся в парах воды при  $T = 1200^\circ\text{C}$  в течение 70 мин. С помощью фотолитографии по обратной стороне пластины в окисле вскрывались квадратные окна, ориентированные

<sup>¶</sup> E-mail: east@mail.ioffe.ru

вдоль рядов макропор (этап 5). Небольшой изгиб окисленной пластины был упругим и устранялся с помощью присоса к столику в установке совмещения и экспонирования. Через вскрытые окна проводилось щелочное анизотропное травление, обеспечивавшее локальное удаление подложки на глубину, необходимую для достижения пористого слоя (этап 6). Использовалось свойство термического окисла защищать внутреннюю поверхность пор при травлении в растворе КОН. Начальный этап вскрытия пор виден на рис. 1. Дальнейшие



**Рис. 1.** Изображение обратной стороны пластины на начальном этапе вскрытия пор. Виден небольшой участок, где открылись доньшки пор. Оптический микроскоп.



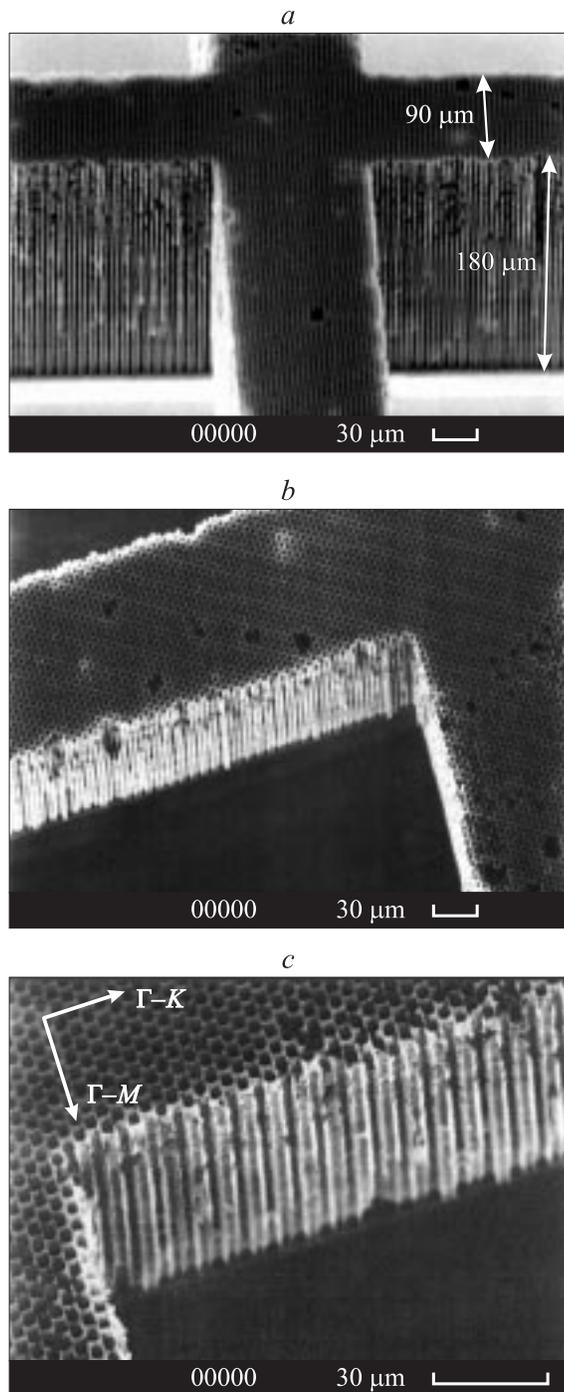
операции сводились к удалению окисла из внутренней поверхности пор через вскрытые квадраты с обратной стороны пластины (этап 7), а затем растворению в разбавленной щелочи тонких кремниевых промежутков между порами в области окна (этап 8). На заключительном этапе в растворе HF удалялся окисел из пор. При необходимости увеличить пористость использовалось дополнительное окисление с последующим растворением  $\text{SiO}_2$ . При этом узкие полоски *ma*-Si в отличие от сплошного слоя не претерпевали заметной деформации.

В результате в пластине получались сквозные квадратные окна, разделенные крестиками узких полосок макропористого слоя на подложке. Их изображение в электронном микроскопе под разными углами зрения и с разным увеличением показано на рис. 2, *a-c*. Как видно, формируемые полоски *ma*-Si имеют вертикальные стенки и ориентированы вдоль рядов макропор. Их ширина составляет около 90 мкм (22–26 рядов в зависимости от направления в решетке), а высота равна 200 мкм (180 мкм пористый слой + 20 мкм подложка).

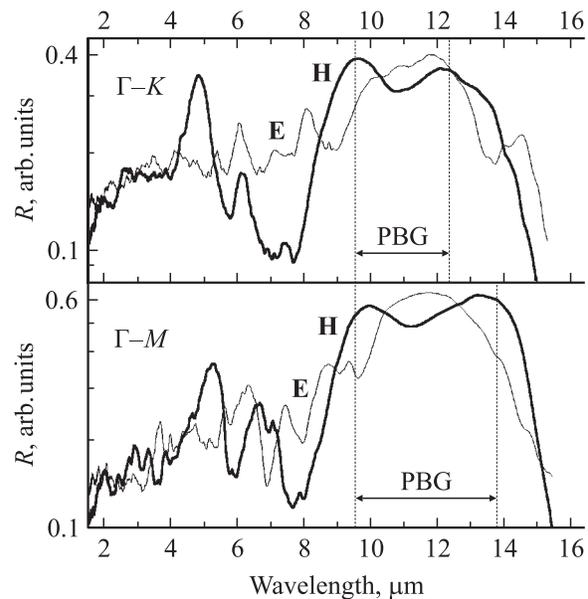
### 3. Спектры фотонных кристаллов

Полученные полоски *ma*-Si ориентированы во взаимно перпендикулярных направлениях, что соответствует  $\Gamma-K$  и  $\Gamma-M$  направлениям обратного пространства двумерной треугольной решетки *ma*-Si (рис. 2, *c*). Они хорошо подходят для проведения оптических измерений фотонного кристалла. Полоски *ma*-Si трижды окислялись, и столько же раз растворялся окисел, в результате чего диаметр каналов был увеличен от 1.7 до 3.4 мкм, при этом отношение радиуса канала к периоду решетки достигло  $r/A = 0.425$ , что позволяло надеяться на формирование полной фотонной зоны [7]. Спектры отражения измерялись на фурье-спектрометре Bio-Rad 6000, оснащенной ИК микроскопом UMA-500 при апертуре  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. С помощью микроскопа световое

пятно фокусировалось на боковую поверхность полосы *ta*-Si, при этом волновой вектор света был направлен перпендикулярно оси каналов. Измерения проводились со спектральным разрешением  $8 \text{ см}^{-1}$  при числе сканирований 64. Для получения спектров в поляризованном свете поляризатор устанавливался перед входным окном фотоприемника.



**Рис. 2.** Полоски макропористого кремния с вертикальными стенками: *a* и *b* — SEM-изображения под разными углами зрения, *c* — основные направления в треугольной решетке фотонного кристалла.



**Рис. 3.** Спектральные зависимости отражения для двух направлений в фотонном кристалле  $\Gamma$ - $K$  и  $\Gamma$ - $M$  и двух поляризаций света: **H** — перпендикулярно и **E** — параллельно оси каналов.

На рис. 3 приведены спектры, записанные для разных направлений в кристалле при двух ортогональных поляризациях света. На них видны широкие области высокого отражения (до  $\sim 60\%$ ) с центром вблизи 11 мкм, соответствующие основной запрещенной фотонной зоне (PBG). Зоны для света, поляризованного перпендикулярно каналам (**H**-поляризация), несколько шире, чем для света, поляризованного вдоль каналов (**E**-поляризация), что согласуется с расчетными данными [7], выполненными для треугольной решетки цилиндрических каналов в материале с близким к нашему значению диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 11.4$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, разработан технологический процесс получения структур на основе упорядоченной решетки макропористого кремния, который не требует сложной процедуры заполнения пор и планаризации поверхности для проведения фотолитографии. Вместо этого фотолитография проводится по обратной стороне пластины. Получаемые с помощью предлагаемого метода структуры с глубокими вертикальными стенками могут быть использованы для изготовления элементов микромеханики и микрофотоники. Применение технологии продемонстрировано на примере изготовления узких полос двумерного фотонного кристалла, на которых были проведены исследования ИК спектров отражения.

Авторы благодарят А. Нашекина и Ю. Пилугину за помощь в получении SEM-изображений и подготовке иллюстративного материала.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 01-0642), Программы Министерства промышленности и технологий „Физика твердотельных наноструктур“, Программы РАН „Оптика и лазерная физика“ и Президентской программы поддержки научных школ (НШ 758-2003.2).

## Список литературы

- [1] V. Lehmann, H. Foll. *J. Electrochem. Soc.*, **137**, 653 (1990).
- [2] V. Lehmann, U. Gruning. *Thin Sol. Films*, **297**, 13 (1997).
- [3] H. Foll, M. Christophersen, J. Carstensen, G. Haase. *Mater. Sci. Eng.*, **R39**, 93 (2002).
- [4] S. Ottow, V. Lehmann, H. Foll. *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 385 (1996).
- [5] U. Gruning, V. Lehmann, S. Ottow, K. Busch. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 747 (1996).
- [6] S.W. Leonard, H.M. van Driel, K. Busch, S. John, A. Birner, A.-P. Li, F. Muller, U. Gosele, V. Lahmann. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3063 (1999).
- [7] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, R.D. Winn. *Photonic Crystals. Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, 1995) Appendix C, p. 125.

Редактор Л.В. Беляков

## Technique of pattern formation in macroporous silicon and its application to obtain bars of two dimensional photonic crystals with vertical walls

*E.V. Astrova, T.N. Borovinskaya, V.A. Tolmachev, T.S. Perova\**

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

\* University of Dublin, Trinity College,  
Dublin 2, Ireland

**Abstract** We report a novel process to obtain structures of vertical walls in a thick layer of macroporous silicon on a substrate. Photolithography problem is solved by formation of a pattern from the back side of the wafer. As a result the silicon substrate itself serves as a mask which is used to remove certain areas of the porous layer. Narrow and high bars of macroporous silicon aligned along the pore rows form photonic crystal structures. They were used to couple with light propagating perpendicular to the pore axis and to register IR reflection spectra.