

## Двулучепреломление пористого кремния

© О.Г. Сарбей, Е.К. Фролова, Р.Д. Федорович, Д.Б. Данько

Институт физики Академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина

E-mail: sarbey@iop.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 20 сентября 1999 г.  
В окончательной редакции 30 декабря 1999 г.)

В работе сообщается о наблюдении и исследовании двулучепреломления в образцах пористого кремния, полученных на разных кристаллографических плоскостях монокристалла кремния.

Настоящая работа частично поддержана грантом CRDF UP1-368.

Хотя оптические свойства пористого кремния изучались в нескольких работах [1–5], нам неизвестно, чтобы где-то сообщалось о наблюдении в нем анизотропии показателя преломления. Это кажется естественным, поскольку, с одной стороны, сам кремний относится к кубической сингонии и не обладает оптической анизотропией, а с другой стороны, кораллоподобная структура пористого Si сама по себе, казалось, должна обладать усредненными изотропными свойствами.<sup>1</sup> Тем не менее мы обнаружили, что в образцах, выращенных на некоторых кристаллографических плоскостях, в видимой области спектра наблюдается достаточно хорошо выраженная анизотропия показателя преломления. Результаты измерений этой анизотропии и их интерпретация будут приведены далее.

Образцы пористого кремния в виде тонких пластин получались электрохимическим травлением (плотность тока около 60 мА/см<sup>2</sup>) монокристаллов *p*-Si с удельным сопротивлением 0.02 Ω · см в растворе концентрированной плавиковой кислоты с этиловым спиртом в соотношении 1 : 1 при комнатной температуре. Время травления изменялось от 0.5 до 2 min. Толщина образцов *d* при таких временах травления составляла от 1.5 до 7.5 μm. При более длительном травлении пластины получались дефектными и непригодными для оптических исследований. Отделение образцов от монокристалла происходило в результате резкого изменения плотности тока. Затем они тщательно промывались в дистиллированной воде и вылавливались на стеклянную подложку. Все дальнейшие измерения относятся к образцам, находящимся на оптическом контакте с подложкой.

Исследовались пластины пористого Si, полученные путем электротравления {211}, {110}, {100} и {111} кристаллографических плоскостей одного и того же слитка кристаллического Si, выращенного в ⟨111⟩ направлении. Толщины образцов измерялись либо на интерферометре Линника, либо на электронном микроскопе с точностью порядка 15%. Для исследования анизотропии показателя

преломления и ее спектральной зависимости образцы между скрещенными поляризаторами поворачивались на угол 45° по отношению к положению полного затемнения. Все измерения проводились при комнатной температуре порядка 20°С.

Качественное изучение образцов пористого кремния в поляризационном микроскопе показало, что в образцах, полученных на плоскостях {211} и {110}, наблюдается хорошо выраженное двулучепреломление, в то время как в образцах, полученных на {100} и {111} плоскостях, никаких намеков на анизотропию показателя преломления нет. Спектральная зависимость двулучепреломления измерялась для образцов, выращенных на {211} кристаллографической плоскости.

На рисунке представлена прозрачность  $T_{\perp}$  трех таких образцов разной толщины, расположенных между скрещенными поляризаторами и повернутых на угол 45° по отношению к положению полного затемнения, отнесенная к прозрачности  $T_{\parallel}$  этих же образцов между параллельными поляризаторами. Как видно из рисунка, в области 0.6–0.8 μm отношение  $T_{\perp}/T_{\parallel}$  увеличивается с увеличением толщины образца. Такое поведение  $T_{\perp}/T_{\parallel}$  обусловлено наличием в образцах двулучепреломления.<sup>2</sup>

Известно, что интенсивность  $J$  зарегистрированного светового сигнала в этом случае есть результат интерференции двух лучей с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  и описывается выражением

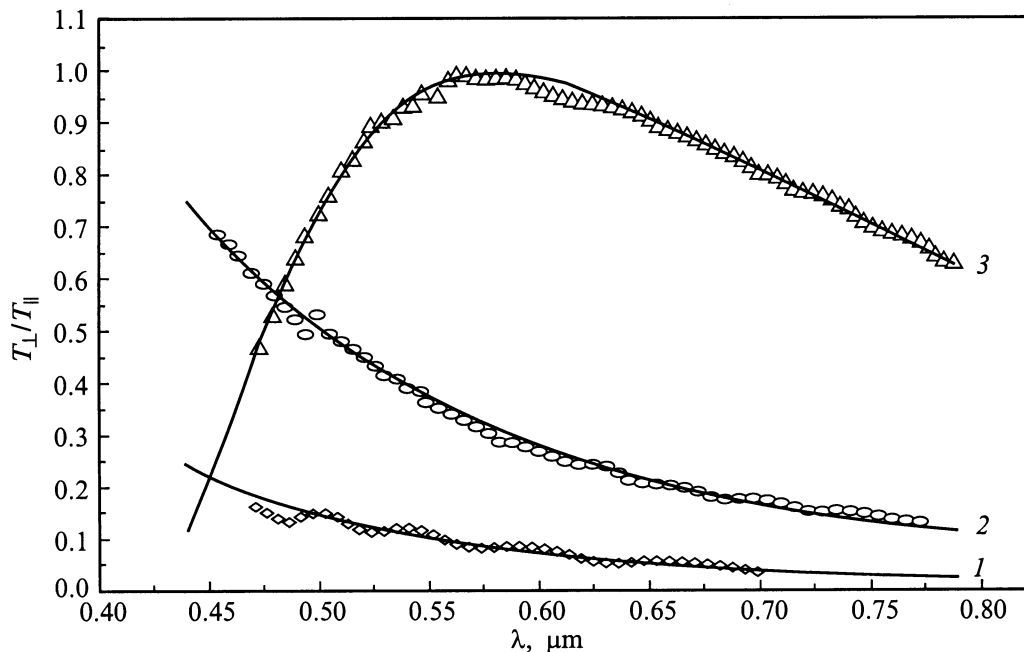
$$J \approx \sin^2 \left( \frac{\pi(n_1 - n_2)d}{\lambda} \right),$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего света,  $d$  — толщина образца.

Действительно, все экспериментальные точки можно аппроксимировать этой формулой, если принять во внимание, что данные на рисунке измерены в области поглощения света пластинами. В этой области существенна

<sup>1</sup> Двулучепреломление, иногда наблюдающееся в кристаллическом Si в ИК-области, связано с механическими напряжениями, вызванными неоднородным распределением примеси по объему кристалла.

<sup>2</sup> Измеренные спектры поглощения образцов пористого кремния для обыкновенного и необыкновенного пучков в пределах точности эксперимента совпадают.



Прозрачность пористого Si между скрещенными поляризаторами ( $T_{\perp}$ ), отнесенная к прозрачности между параллельными поляризаторами ( $T_{\parallel}$ );  $d$ ,  $\mu\text{m}$ : 1 — 1.325, 2 — 2.68, 3 — 7.2. (Точки — эксперимент; сплошная линия — расчет).

дисперсия показателя преломления, следовательно, и дисперсия его анизотропии. В первом приближении ее можно учесть в виде

$$n_1 - n_2 = A \left( 1 + \frac{B}{\lambda^2} \right),$$

где  $A$  и  $B$  — константы.

Результаты расчета при  $A = 0.022$  и  $B = 0.287$ , показанные сплошными линиями на рисунке, демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными данными. Заметим, что анизотропия показателя преломления довольно велика и при  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$  всего примерно в 4 раза меньше анизотропии исландского шпата ( $n_1 - n_2 = 0.0472$  и  $0.186$  соответственно).

Наблюдаемую анизотропию авторы связывают с анизотропным травлением монокристаллов Si. Скорость травления различна в разных кристаллографических направлениях, вследствие чего поры в пористом кремнии вытянуты в направлении большей скорости травления и преимущественно ориентированы в перпендикулярном плоскости травления направлении. Это обстоятельство приводит к нарушению кубической симметрии, характерной для монокристалла кремния, на размерах, превышающих размеры элемента структуры пористого кремния. При травлении  $\{111\}$  и  $\{100\}$  плоскостей образца получающаяся структура должна обладать осями симметрии 3-го и 4-го порядков соответственно. Сле-

довательно, показатель преломления, будучи тензором 2-го ранга, должен быть изотропен в плоскости таких образцов. При травлении  $\{112\}$  и  $\{110\}$  плоскостей получающаяся структура обладает только осью второго порядка и показатель преломления может быть анизотропным.

## Список литературы

- [1] Y.H. Xie, M.S. Hybertsen, W.L. Wilson. Phys. Rev. **B49**, 8, 5386 (1994).
- [2] V.P. Bondarenko, V.E. Borisenko, A.M. Dorofeev. J. Appl. Phys. **75**, 5, 2727 (1994).
- [3] А.В. Андрианов, Д.И. Ковалев, Н.Н. Зинкевич, И.Д. Ярошецкий. Письма в ЖЭТФ **58**, 6, 417 (1993).
- [4] Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto. Phys. Rev. **B48**, 4, 2827 (1993).
- [5] S.V. Gaponenko, V.K. Kononenko, E.P. Petrov, J.N. Germanenko. Appl. Phys. Lett. **67**, 20, 3019 (1995).