

## МОРФОЛОГИЯ "КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОК" ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*В.А.Караванский, М.А.Качалов\*, А.П.Маслов, Ю.Н.Петров,  
В.Н.Селезнев\*, А.О.Шувалов*

*Институт общей физики РАН  
117924 Москва, Россия*

*\*Физический институт им. И.Н.Лебедева РАН  
117333 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 января 1993 г.

Методом сканирующей туннельной микроскопии наблюдалась морфология отдельных пор в пористом кремнии. Обнаружено квазирегулярное расположение пор и определены размеры образующихся "квантовых проволок" ( $30\text{--}100\text{\AA}$ ).

Большое внимание в настоящее время уделяется исследованию слоев пористого кремния (ПК). Интерес к их изучению стимулирован наблюдением интенсивной фотolumинесценции, полученной на слоях ПК в видимом диапазоне спектра с энергиями квантов  $1,3 - 1,8\text{ эВ}$ <sup>1,2</sup>. В работах<sup>1-5</sup> высказано предположение, что за люминесценцию ответственно размерное квантование. Согласно теоретическим расчетам эффект должен наблюдаться при сечениях квантового провода не превышающих  $30\text{\AA}$ <sup>5</sup>. Из-за малых размеров наблюдение структуры образующихся "квантовых проволок" и соотнесение их свойств с предложенными механизмами связано с определенными экспериментальными трудностями. Для этой задачи перспективным может оказаться метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), допускающей атомное разрешение.

В настоящей работе нами использовался метод СТМ для непосредственного наблюдения реальной поверхности и структуры индивидуальных пор ПК. Оценены размеры образующихся "квантовых проволок".

Эксперименты проводились на образцах, приготовленных на подложках кремния *n*-типа марки КЭС-0,01, с ориентацией (111). Слой ПК формировался методом анодного травления в спиртовом растворе фтористо-водородной кислоты ( $\text{HF}\text{-H}_2\text{O-C}_2\text{H}_5\text{OH}$  в соотношении 1:1:2). Травление выполнялось в течение 60 мин во фторопластовой ячейке с платиновыми электродами при плотности тока в направлении, перпендикулярном поверхности,  $\simeq 30\text{ mA/cm}^2$  в течение 60 мин (без внешней засветки). Толщина слоя ПК составляла  $\simeq 50\text{ мкм}$ .

На рис.1 представлен спектр фотolumинесценции с поверхности полученных слоев. В качестве источника накачки использовался аргоновый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 457,9\text{ нм}$ . Видно, что наблюдается характерный для ПК широкий пик люминесценции. Для наших образцов максимум спектра соответствует длине волны излучения  $\lambda \simeq 696\text{ нм}$ . Ширина пика на полувысоте составляет  $\simeq 140\text{ нм}$ .

Рельеф поверхности пористого кремния (рис.2) наблюдался с использованием сканирующего туннельного микроскопа "Скан-8"<sup>6</sup>. Измерения проводились на воздухе при комнатной температуре. Использовались Ni-Cr-острия, изготовленные методом механического среза. На образце пиролитического графита, используемого в качестве эталона, острия обеспечивали атомное разрешение.

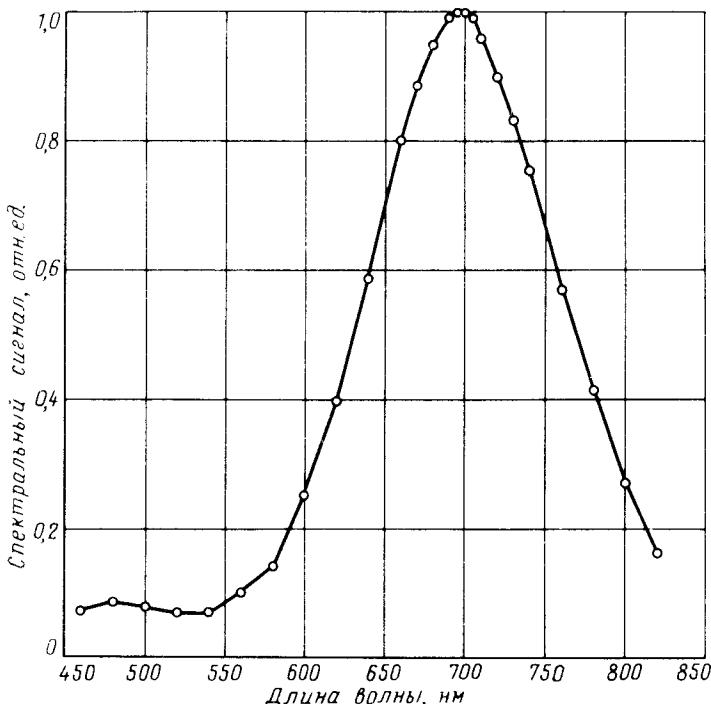
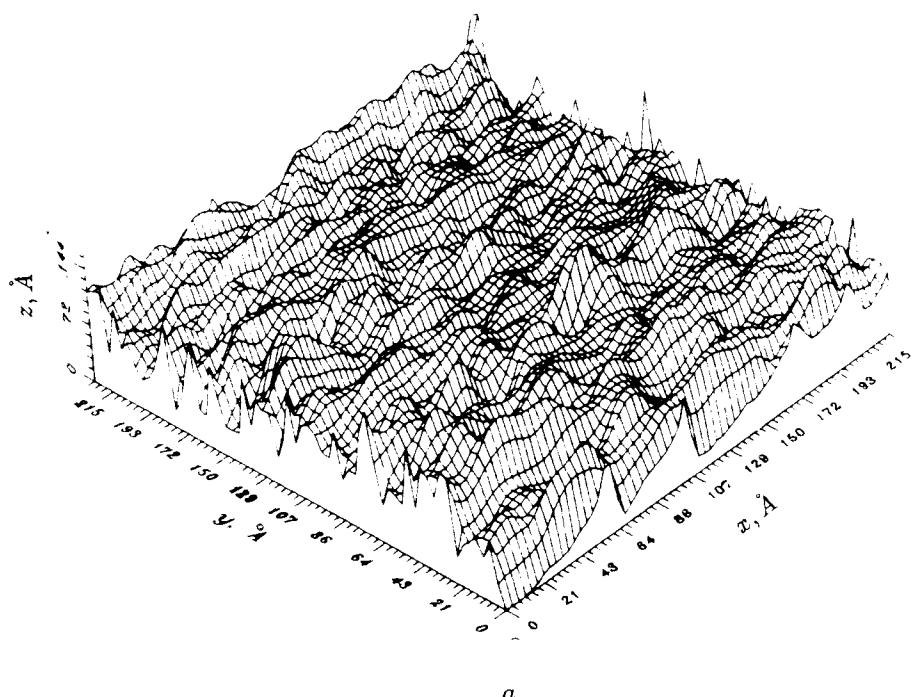


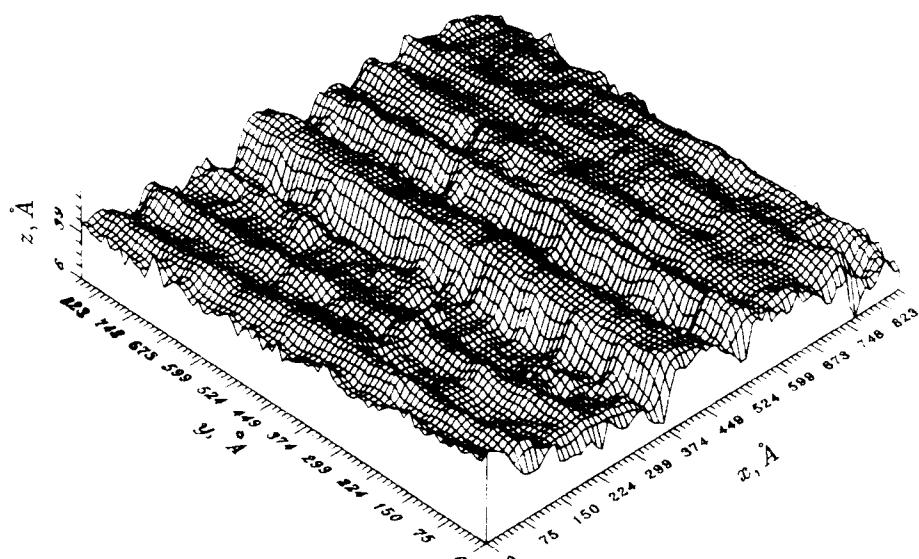
Рис.1. Спектр люминесценции ПК

На рис.2а показано СТМ изображение поверхности ПК, на рис.2б – скола ПК. Изображения получены в режиме постоянного тока. Наблюдение изображений поверхности ПК при различных увеличениях позволяет предположить, что поверхность слоя ПК при указанных режимах травления имеет фрактальный характер. На поверхности различается рельеф с высотой до 100-130 Å и шириной пиков на полувысоте 20-30 Å. Проследить глубже реальную структуру пор вблизи поверхности ПК не представляется возможным из-за больших по сравнению с порами размеров туннельного зонда. Морфологию пор можно наблюдать на сколе образца. На рис.2б поверхность скола показана в изометрии. Рост пор происходит в направлении протекания тока перпендикулярно поверхности (по оси Y). Наблюдаются квазирегулярное расположение пор, хотя размеры индивидуальных пор имеют значительные флуктуации. Причем диаметр пор также изменяется по глубине поры. На рис.3 показаны профили сечений наблюдаемой поверхности скола, выполненные на различной глубине. В соответствии с представленными результатами размеры образующихся "квантовых проволок" составляют от 30 до 100 Å. Таким образом наблюдаемые размеры превышают ожидаемые из модельных расчетов<sup>5</sup>. Расхождение может быть объяснено тем, что в нашем случае фотoluminesценция регистрировалась с поверхности ПК, где, как отмечалось выше, имеются особенности с размерами < 30 Å (рис.2а). Отметим, что интенсивная фотoluminesценция связывается также с эффектом гидрирования поверхности<sup>7</sup> и указывается, например, что спектры люминесценции у поверхности и по глубине пор подобны. Однако размеры пор в работе<sup>7</sup> не приводятся и, как следует из других работ, свойства ПК сильно зависят от характеристик кремния, времени и особенностей процедуры травления. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо проводить непосредственные исследования структуры ПК.

Таким образом, представленные результаты показывают, что метод скани-



*a*



*b*

Рис.2. СТМ изображения ПК: *a* – поверхность, *б* – скол

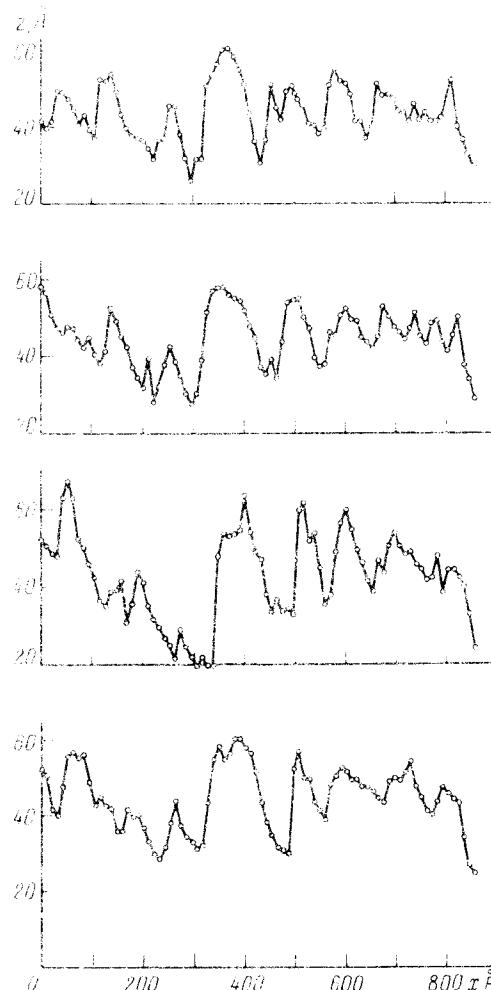


Рис.2. Профили сечений по оси  $X$  скана НК (рис.2б). Профили сдвинуты друг от друга по оси  $Y$  на  $60\text{ \AA}$ .

рующей туннельной микроскопии позволяет наблюдать в деталях поверхность пористого кремния, оценивать реальные размеры образующихся "квантовых проволок", которые могут использоваться для количественных оценок и для сравнения экспериментальных и теоретических результатов.

Авторы признательны Ю.В.Копаеву за проявленный интерес к работе.

- 
1. L.T.Canham, Appl. Phys. Lett. **57**, 1046 (1990).
  2. A.G.Cullis and L.T.Canham, Nature, **353**, 335 (1991).
  3. A.Bsiesy, J.C.Viel, F.Gaspard et al., Surface Science **254**, 195 (1991).
  4. N.S.Averkiev, V.M.Asnin, I.I.Markov et al., JETP Lett. **55**, 3168 (1991).
  5. Ю.В.Копаев, С.Н.Молотков, С.С.Назин, Письма в ЖЭТФ, **55**, 696 (1992).
  6. С.И.Васильев, Ю.Н.Моисеев, Н.И.Никитин и др., Электронная промышленность **3**, 36 (1991).
  7. S.M.Prokes, J.A.Freitas, and P.C.Searson, Appl. Phys. Lett. **60**, 3925 (1992).