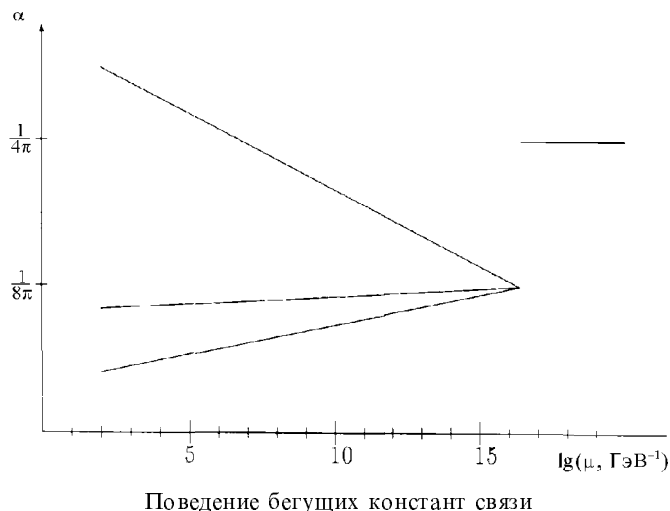


с тем, что магнитный вклад оказывается присутствующим во всем эффективном действии, а не только в петлевых поправках. Замена в эффективном действии  $e \rightarrow \sqrt{\langle e^2 \rangle}$  приводит к поведению бегущих констант, схематически показанному на рисунке.



В заключение отметим, что хотя основные наши положения не являются строго обоснованными и ждут дальнейшего развития, мы считаем, что данная гипотеза

имеет право на существование, тем более что других в настоящее время просто не существует. Возможно также, что некоторые выдвинутые здесь идеи будут полезны для будущих исследований в данном направлении. Однако уже в настоящее время можно говорить о том, что знание точного численного значения  $\alpha_{GUT}$  (при условии знания соответствующей схемы перенормировки) представляет интерес для феноменологических исследований по предсказанию параметров Стандартной модели.

#### Литература

1. Review of Particle Properties // Phys. Rev. 1994. **D50**. P. 1173.
2. Nilles H. // Phys. Rep. 1984. **110**. P. 1.
3. Dienes K. // E-pr. hep-th/ 9602045.
4. Harvey J. // E-pr. hep-th/ 9603086.
5. Montonen C., Olive D. // Phys. Lett. 1977. **72B**. P. 177.
6. Богомольный E. // Ядерная физика. 1976. **24**. С. 861.
7. Seiberg N., Witten E. // Nucl. Phys. 1994. **B426**. P. 19.
8. Bilal A. // E-pr. hep-th/ 9601007.
9. Ashkekar A., Corichi A. // E-pr. hep-th/9701136.
10. Dokos C., Tomaras T. // Phys. Rev. 1980. **D21**. P. 2940.
11. Dimopoulos S., Raby S., Wilczek F. // Phys. Rev. 1979. **D24**. P. 1681; Dimopoulos S., Georgy H. // Nucl. Phys. 1981. **B193**. P. 150.

Поступила в редакцию  
18.06.97

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.293:537

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПОР В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

В. М. Демидович, Г. Б. Демидович, С. Н. Козлов, А. А. Петров

(кафедра общей физики и молекулярной электроники)

Предложен метод оценки размеров пор пористой системы, основанный на измерении ее проводимости при заполнении пор жидким проводящим адсорбатом. В качестве апробации метода проведена оценка размеров пор пористого кремния исходя из данных по проводимости системы в парах воды и спирта. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с оценками размеров пор, полученными адсорбционными методами.

#### Введение

В последние годы в ряде лабораторий мира интенсивно исследуется кристаллический нанопористый кремний — материал, перспективы использования которого в оптоэлектронике и сенсорной технике представляются весьма обнадеживающими [1, 2]. Свойства этого материала в значительной мере определяются структурными факторами, в частности размерами пронизывающих его нанопор. Прямым и наиболее надежным методом определения размеров пор в микропористых объектах является получение низкотемпературных изотерм адсорбции инертных газов [3]. Однако методика эта весьма трудоемкая и, кроме того, требующая достаточно большого количества пористого кремния

для достижения необходимой точности. В настоящей работе предлагается новый способ оценки размеров нанопор в пористом кремнии, основанный на исследовании зависимости его проводимости от давления паров воды или спирта.

#### Эксперимент

В работе исследовались пленки кристаллического пористого кремния, полученные на поверхности (100) монокристаллического кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением 12 Ом·см. Пористый слой на кристаллической подложке создавали анодированием в электролите, содержащем 48%-й раствор HF, смешанный в пропорции 1:1 с 96%-м этиловым спиртом. При плотности

тока  $20 \text{ мА/см}^2$  в течение 5 мин формировалась пленка пористого кремния (ПК) толщиной  $1 \text{ мкм}$  с удельной поверхностью до  $6 \text{ м}^2/\text{г}$ . После получения пористого слоя образцы тщательно промывали дистиллированной водой и помещали в вакуумную камеру для нанесения металлических контактов, проницаемых для молекул газов. Контакты диаметром  $1 \text{ мм}$  к пористому слою создавали методом термического распыления сначала никрома (до образования слоя толщиной  $2\text{--}4 \text{ нм}$ ), а затем серебра (слой толщиной  $20 \text{ нм}$ ). Все измерения проводились при комнатной температуре.

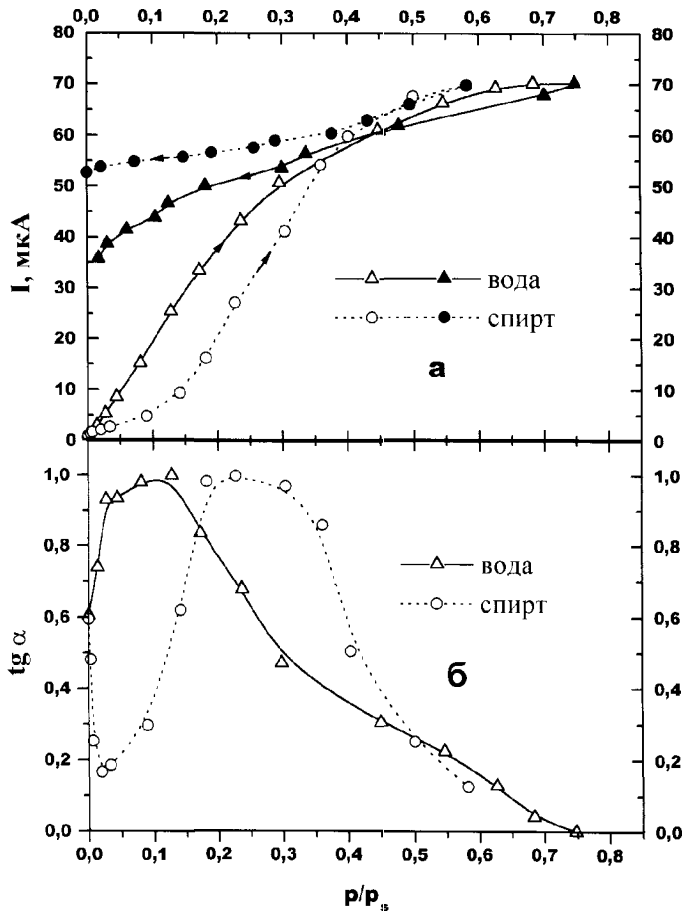


Рис. 1. Зависимость величины обратного тока через структуру кремний-ПК-металл (а) и тангенса угла наклона этой зависимости (б) при постепенном повышении (светлые точки) и понижении (темные точки) давления паров воды и этанола

### Обсуждение результатов

Вольт-амперные характеристики структур кремний-ПК-металл имели вид, типичный для диодов Шоттки; прямому направлению тока соответствовало отрицательное напряжение на металлическом электроде. При напуске паров воды или этанола в экспериментальную ячейку, предварительно откачанную до вакуума  $10^{-5}$  Торр, наблюдалось увеличение обратного тока через структуру. На рис. 1,а показаны типичные зависимости величины обратного тока при постоянном напряжении на металлическом электроде ( $V_g = +5 \text{ В}$ ) от

относительного давления  $p/p_s$  паров воды и этилового спирта. В процессе измерений давление паров постепенно повышалось; при каждом значении давления структуру выдерживали в парах в течение 10 мин, после чего подавали напряжение  $+5 \text{ В}$  на металлический электрод, измеряли ток через структуру и давление паров вновь увеличивали. Наиболее резкое возрастание обратного тока наблюдалось при  $p/p_s \sim 0,1\text{--}0,2$  для воды и  $\sim 0,2\text{--}0,4$  для спирта (рис. 1.). Рост величины обратного тока через структуру в парах диссоциирующих веществ, очевидно, связан с возрастанием ионной проводимости по объему жидкости, конденсирующейся в капиллярах нанопористого слоя. Следует, однако, иметь в виду, что увеличение проводимости системы в этом интервале относительных давлений может быть обусловлено не только увеличением объема проводящей среды в нанопорах ПК, но и ростом подвижности ионов [4]. Нам представляется, что наиболее адекватная информация о размерах нанопор может быть получена из величины относительного давления, при котором начинается «насыщение» зависимости обратного тока от  $p/p_s$ . Очевидно, в этом случае основной объем микропор уже заполнен. Из рис. 1 следует, что в наших экспериментах для воды и спирта это происходит при  $p/p_s \sim 0,6\text{--}0,7$ .

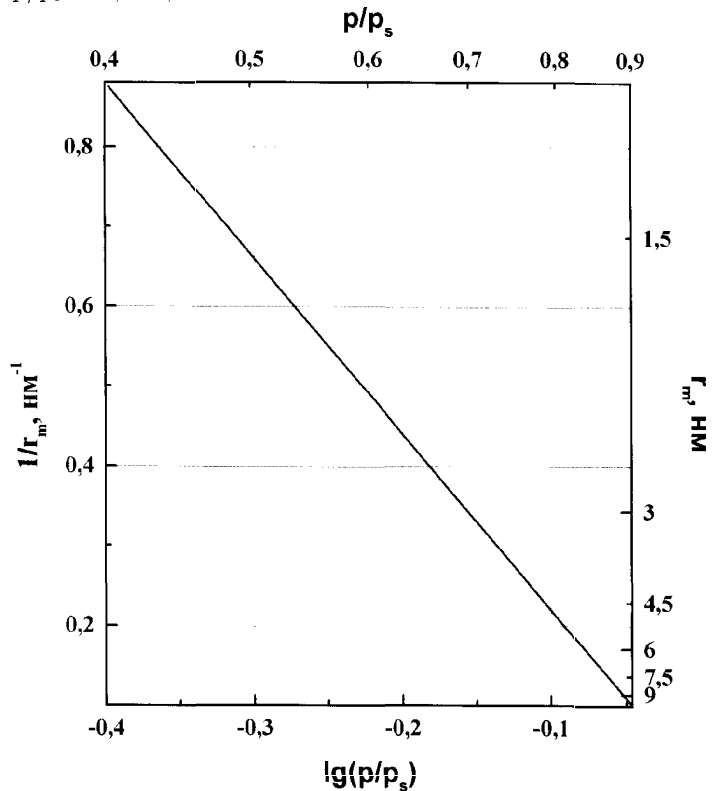


Рис. 2. Теоретическая зависимость радиуса заполняемых пор от относительного давления паров воды или этанола

Как известно, радиус пор  $r_m$ , заполняемых при данном значении  $p/p_s$  и температуре  $T$ , определяется формулой Кельвина-Томсона:

$$r_m = -\frac{2\gamma V_L}{RT \ln(p/p_s)}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — поверхностное натяжение жидкого адсорбата,  $V_L$  — его молярный объем,  $R = 8,314 \cdot 10^7$  эрг/(моль·град) — универсальная газовая постоянная.

В частности, при комнатной температуре для воды  $\gamma^{(w)} = 73$  дин/см,  $V_L^{(w)} = 18$  см<sup>3</sup>/моль; для спирта  $\gamma^{(s)} = 22,8$  дин/см,  $V_L^{(s)} = 57,6$  см<sup>3</sup>/моль. Поскольку  $\gamma^{(w)}V^{(w)} \approx \gamma^{(s)}V^{(s)}$ , для обоих этих веществ из (1) следует общее соотношение:

$$\frac{1}{r_m} = -K \lg(p/p_s), \quad (2)$$

где  $K \cong 2,2$  нм<sup>-1</sup>.

Зависимость (2) показана на рис. 2. Видно, что величинам  $p/p_s \sim 0,6-0,7$  соответствует радиус пор 2–3 нм. Эта величина хорошо согласуется с результатами, полученными «классическим» адсорбционным методом на образцах ПК, изготовленных в аналогичных условиях [3, 5]. Из приведенных данных следует также, что в слое ПК присутствуют поры еще меньшего размера. Этот вывод тоже не противоречит литературным данным [5]. Отметим, что определение размеров нанопор из данных по изменению электропроводности структур при постепенном понижении давления паров оказалось затруднительным из-за длительности процес-

са десорбции паров из нанокapилляров ПК (см. рис. 1).

Таким образом, исследование зависимости проводимости структуры кремний-ПК-металл от относительного давления паров воды или спирта позволяет оценивать размеры пор в слое ПК. Преимуществом метода является то, что измерения могут быть проведены на образцах сколь угодно малых размеров. Методика в принципе может быть использована при исследовании любых нанопористых объектов с низкой собственной проводимостью, а также любых конденсирующихся адсорбатов с заметной проводимостью.

#### Литература

1. Kanemitsu Y. // Phys. Rep. 1995. **263**. P. 1.
2. Демидович В.М., Демидович Г.Б., Козлов С.Н., Лунга С.П., Петров А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 4. С. 99.
3. Bomchil G., Herino R., Barla K., Pfister J.C. // J. Electrochem. Soc. 1983. **130**. P. 1611.
4. Козлов С.Н., Славова М.Л. // Микроэлектроника. 1985. № 14. С. 556.
5. Herino R., Perio A., Barla K., Bomchil G. // Materials Lett. 1984. **2**. P. 519.

Поступила в редакцию  
16.05.97