

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.293:537

ВЛИЯНИЕ АДсорбЦИИ ВОДЫ НА ИМПЕДАНС СИСТЕМЫ  
КРЕМНИЙ–ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ–МЕТАЛЛ

С. Н. Козлов, А. Н. Невзоров, А. А. Петров

(кафедра общей физики и молекулярной электроники)

Изучено влияние адсорбции воды на проводимость и емкость структур кремний–пористый кремний–металл в диапазоне частот  $10^2$ – $2 \cdot 10^3$  Гц. Показано, что чувствительность исследованных структур к адсорбционному воздействию по импедансу максимальна в области частот от нескольких сотен герц до 1 кГц.

В последние несколько лет пористый кремний (ПК) привлекает значительное внимание исследователей во всем мире в основном в связи с перспективами создания на его базе оптоэлектронных устройств (см. обзоры [1, 2]). В то же время огромная удельная поверхность этого материала, а также возможность в широких пределах варьировать его фрактальную структуру и размеры микропор создают хорошие предпосылки для использования ПК в химической сенсорике. Некоторые обнадеживающие достижения в этом направлении уже имеются (см., напр., [3, 4]), однако возможности этой системы раскрыты пока далеко не полностью. В частности, недостаточно изучено влияние адсорбционных воздействий на частотную зависимость импеданса структур, содержащих слой ПК. Настоящая работа имела целью выяснить, сколь сильно изменение импеданса системы при адсорбции зависит от частоты измерительного сигнала и существует ли оптимальная для данного адсорбата частота, на которой целесообразно регистрировать «адсорбционный отклик» системы по импедансу.

Структуры Si–ПК–металл изготавливались на базе *p*-Si с удельным сопротивлением 12 Ом·см. Слой ПК толщиной 7 мкм и пористостью около 70% формировались на поверхности Si (100) путем анодирования в смеси 48% раствора HF с 96% этиловым спиртом (1:1) при плотности тока 20 мА·см<sup>-2</sup>. После этого структуры дополнительно окислялись в кислороде для стабилизации и гидрофилизации поверхности пористого слоя. Газопроницаемые металлические контакты к слою ПК площадью 1 мм<sup>2</sup> создавались путем термического распыления сначала никрома (толщина слоя 5 нм), а затем серебра (3 мкм). Измерение импеданса структур проводилось с помощью моста переменного тока в диапазоне частот от 100 Гц до 200 кГц. В качестве модельного адсорбата в наших экспериментах использовалась вода. Эксперименты выполнены при температуре 300 К.

На рис. 1 показаны типичные зависимости проводимости (а) и емкости (б) структур кремний–ПК–металл от частоты измерительного сигнала в исходном

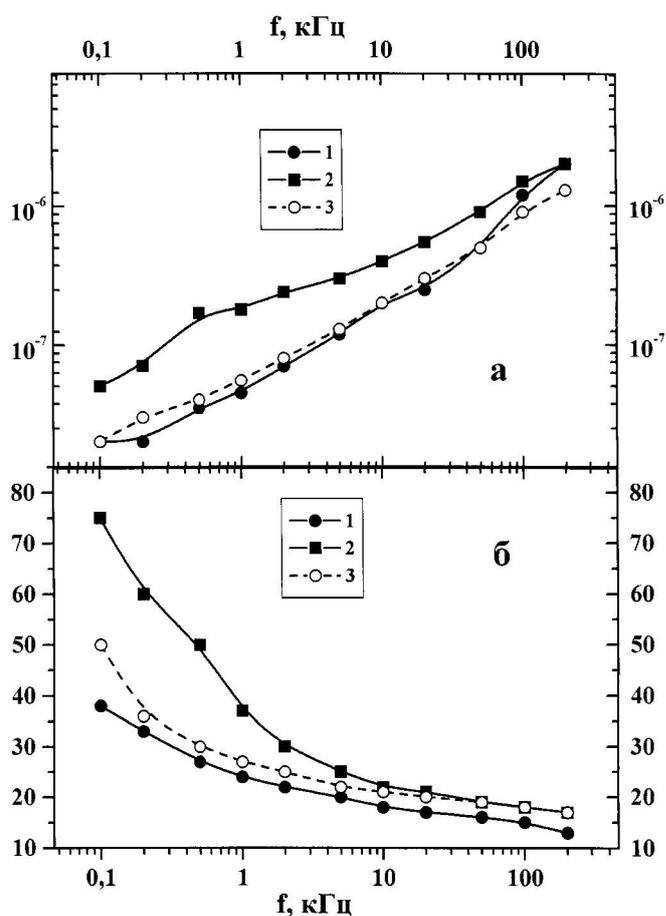


Рис. 1. Частотные зависимости проводимости (а) и емкости (б) структуры Si–ПК–металл в исходном состоянии (1), после термовакuumной обработки (2) и после выдерживания в насыщенных парах воды (3)

состоянии, после термовакuumной обработки (ТВО) при температуре 450 К и давлении  $10^{-5}$  мм рт. ст. в течение двух часов, а также после выдерживания в насыщенных парах воды (несколько минут). Видно, что в результате ТВО проводимость и емкость структуры растут, причем наиболее сильно в области низких частот. После взаимодействия структуры

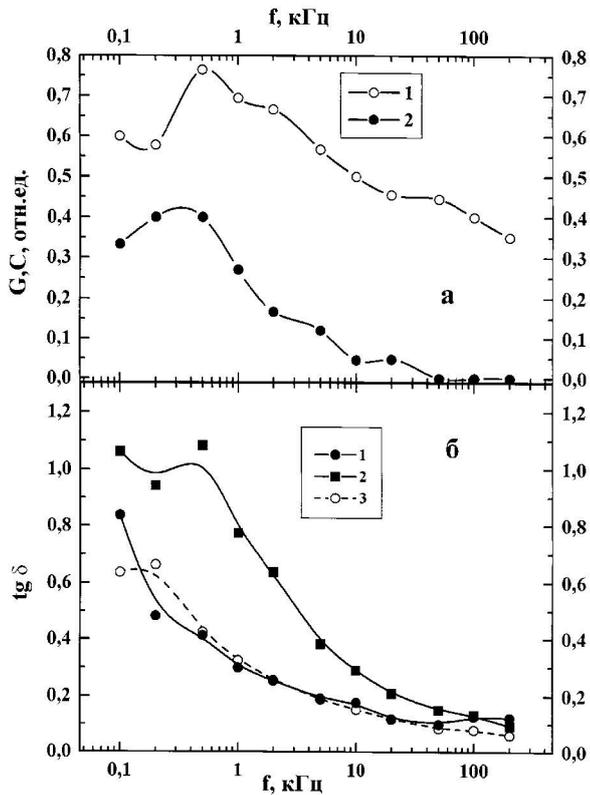


Рис. 2. Относительные изменения проводимости (1) и емкости (2) структуры Si-ПК-металл на разных частотах в результате воздействия насыщенных паров воды (а) и зависимость тангенса угла потерь этой структуры от частоты (б) в вакууме (1), после ТВО (2) и в насыщенных парах воды (3)

с насыщенными парами воды зависимости  $G(\omega)$  и  $C(\omega)$  постепенно возвращаются к исходному виду. Очевидно, в процессе ТВО с поверхности кремниевых «нитей» ПК удаляются прочносвязанные молекулы воды, являющиеся основой медленных электронных состояний донорного типа [5]; в результате заряд поверхности «нитей» сдвигается в отрицательную сторону и «сердцевина» этих нитей обогащается основными носителями заряда (дырками), т. е. происходит «молекулярное легирование» слоя ПК [6]. При этом растет не только проводимость, но и емкость структуры Si-ПК-металл, так как увеличивается количество проводящих кремниевых «нитей» и соответственно возрастает эффективная площадь контактов на границах раздела Si-ПК и ПК-металл. Адсорбция молекул воды в слое ПК приводит к обратному эффекту. Изменения емкости и проводимости структуры наиболее заметны в области

низких частот, поскольку при более высоких частотах значительную роль играет прыжковый перенос по поверхности кремниевых «проволок» [7], который, видимо, меньше подвержен влиянию адсорбции, чем квазиобъемный электронный транспорт.

Максимальная относительная чувствительность исследуемых структур к адсорбции паров воды как по проводимости, так и по емкости, достигалась в области частот от нескольких сотен герц до 1 кГц (см. рис. 2, а). Видимо, существование «оптимальной» частоты измерений адсорбционного отклика системы Si-ПК-металл по импедансу обусловлено тем, что адсорбция может оказывать влияние сразу на несколько факторов, определяющих условия зарядового транспорта по структуре: квазиобъемный перенос по «сердцевине» кремниевых нитей, прыжковый транспорт по их поверхности, а также темп прохождения потенциальных барьеров на границах раздела Si-ПК и ПК-металл. Частотные зависимости соответствующих эффектов могут быть разными, и именно их комбинация определяет немонотонный характер зависимостей  $\Delta C/C(\omega)$  и  $\Delta G/G(\omega)$ . В заключение отметим, что наши экспериментальные данные (см. рис. 2, б) не подтверждают интригующий вывод авторов работы [8] о существовании максимумов диэлектрических потерь в области частот 1–10 кГц, связанных со спецификой диэлектрической релаксации жидких адсорбатов в микропорах ПК.

#### Литература

1. Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.D.J. // J. Appl. Phys. 1997. 2. P. 909.
2. Kanemitsu Y. // Phys. Reports. 1995. 263. P. 1.
3. Демидович Г.Б., Добренкова Е.И., Козлов С.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. 18. С. 57.
4. O'Halloran G.M., Kuhl M., Trimp P.J. // Sensors and Actuators. 1997. A61. P. 415.
5. Киселев В.Ф., Крылов О.В. Электронные явления в адсорбции и катализе на полупроводниках и диэлектриках. М., 1979. Гл. 2.
6. Демидович В.М., Демидович Г.Б., Козлов С.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 4. С. 99.
7. Ben-Chorin M., Moller F., Koch F. // Phys. Rev. 1995. B51. P. 2199.
8. Motohashi A., Kawakami M., Aoyagi H. et. al. // Japan. J. Appl. Phys. 1995. 34. P. 5840.

Поступила в редакцию  
01.07.98