

## Перенос носителей заряда в структуре с кремниевыми нанокристаллами, внедренными в оксидную матрицу

© Ю.В. Рябчиков<sup>¶</sup>, П.А. Форш, Э.А. Лебедев\*, В.Ю. Тимошенко,  
П.К. Кашкаров, В.В. Kamenev<sup>+</sup>, L. Tsybeskov<sup>+</sup>

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),  
119992 Москва, Россия

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

<sup>+</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology,  
07102, Newark, New Jersey, USA

(Получена 11 января 2006 г. Принята к печати 24 января 2006 г.)

Исследованы в широком температурном интервале вольт-амперные характеристики структур Al/SiO<sub>2</sub>/c-Si с кремниевыми нанокристаллами (nc-Si) в оксидном слое. Выполненный на основе полученных экспериментальных данных анализ показал, что наиболее вероятным механизмом переноса носителей заряда в таких структурах является термоактивированное туннелирование через электронные состояния в nc-Si.

PACS: 73.60.Bd; 72.80.Jc; 73.40.Gk.

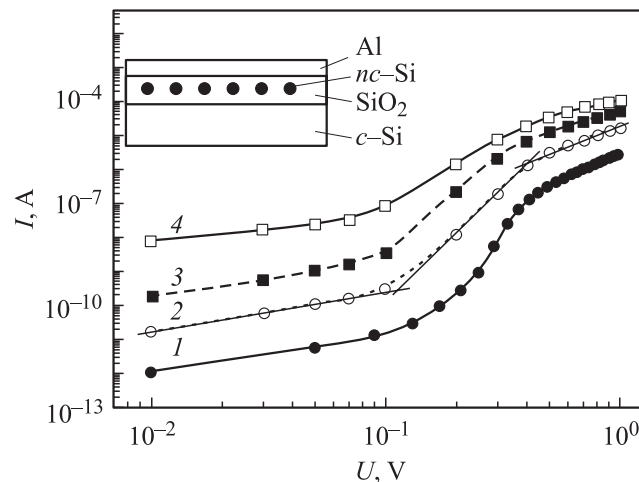
Структуры с кремниевыми нанокристаллами, внедренными в диэлектрическую матрицу, в последнее время вызывают значительный интерес с связи с перспективами создания на их основе электронных и оптоэлектронных приборов, в частности светоизлучающих диодов, одноэлектронных транзисторов и устройств памяти [1–4]. Для создания устройств на основе структур, содержащих кремниевые нанокристаллы, необходимо знание их оптических и электрических свойств. На данный момент наибольшее число работ посвящено исследованию оптических свойств подобных структур (см. например, работы [5–7]). Механизмы переноса носителей заряда в системах, содержащих nc-Si, изучены в значительно меньшей степени. До настоящего времени работа в основном проводилась по исследованию эффектов резонансного туннелирования и кулоновской блокады в nc-Si-структурах [8–11].

В данной работе в широком температурном интервале исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) в структурах Al/SiO<sub>2</sub>/c-Si с нанокристаллами кремния в слое SiO<sub>2</sub>, что дало возможность судить о механизме электрического транспорта в таких структурах.

Образцы, исследованные в работе, получались на подложке c-Si n-типа методом высокотемпературной кристаллизации слоев a-Si/SiO<sub>2</sub> [12]. Полученные образцы содержали один слой нанокристаллов кремния, находящихся в оксидной матрице. Диаметр полученных кремниевых нанокристаллов составлял примерно 5 нм, а толщина оксидного слоя была порядка 10 нм, что подтверждается данными рамановской спектроскопии, туннельной микроскопии и дифракции электронов. Для проведения исследования электрического транспорта в данных структурах на поверхность образцов напылялись алюминиевые контакты. Нижний электрод формировался нанесением InGa-пасты на обратную сторону

Si-подложки. Схематично структура исследованных образцов показана на вставке к рис. 1. Площадь верхнего контакта  $S \approx 10^{-2}$  см<sup>2</sup>. Измерения электрических характеристик проводились в интервале температур  $T = 100–350$  К.

Полученные структуры обладают несимметричными ВАХ. Величина тока при подаче на c-Si отрицательного напряжения значительно превышает ток при обратной полярности. Это может указывать на наличие потенциального барьера между подложкой c-Si и слоем SiO<sub>2</sub>. На рис. 1 в двойном логарифмическом масштабе представлены ВАХ, измеренные в прямом направлении при различных температурах. На ВАХ можно выделить три характерных участка зависимости тока от напряжения.



**Рис. 1.** Прямая ветвь ВАХ исследованных образцов. Цифры на рисунке соответствуют различным температурам  $T$ , К: 1 — 107, 2 — 190, 3 — 260, 4 — 317. Кривая 2 на рисунке аппроксимирована прямыми линиями, соответствующими трем характерным участкам на ВАХ. На вставке к рисунку показана структура исследованных в работе образцов.

<sup>¶</sup> E-mail: yuri\_r@vega.phys.msu.ru

Первый участок (при малых напряжениях  $U < 0.1$  В) близок к линейной зависимости тока от напряжения в соответствии с законом Ома. Второй участок, при напряжениях  $0.1 < U < 0.6$  В, соответствует нелинейной зависимости  $I(U)$ . В области напряжений  $0.3 < U < 0.6$  В зависимость тока от напряжения можно описать степенным законом  $I \propto U^n$  с показателем степени  $n > 2$ . При этом показатель степени сильно зависит от температуры. Наконец, третий участок наблюдается при напряжениях  $U > 0.6$  В и описывается зависимостью  $I \propto U^n$  с показателем степени  $n \approx 2$ . Следует, однако, отметить, что на этом участке при низких температурах ( $T < 130$  К) наблюдается некоторое отклонение показателя степени от значения 2.

Хорошо известно, что квадратичная зависимость тока от напряжения является типичной для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) [13]. В случае ТОПЗ, когда наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения, можно оценить дрейфовую подвижность носителей заряда по формуле [13]

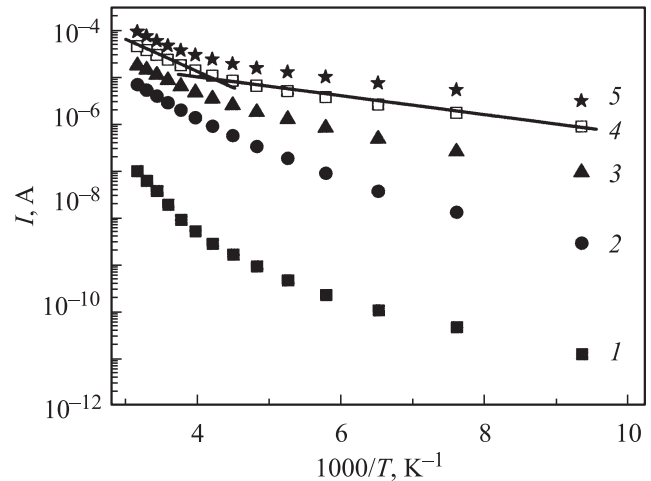
$$\mu = \frac{JL^3}{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — дрейфовая подвижность,  $L$  — толщина образца,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость образца,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная,  $J$  — плотность тока, равная  $I/S$ . Полагая, что ток ограничивается пространственным зарядом в окисном слое, получим величину подвижности при комнатной температуре, равной около  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>.

Проведенные оценки показали, что на температурной зависимости рассчитанной подвижности имеется два активационных участка: с энергиями активации  $E_\mu \approx 0.12$  эВ в области высоких температур ( $T > 230$  К) и  $E_\mu \approx 0.04$  эВ в области  $T < 230$  К. Можно предположить, что перенос носителей заряда через слой SiO<sub>2</sub> при  $T > 230$  К осуществляется посредством прыжков по локализованным электронным состояниям. При прыжковом переносе величина дрейфовой подвижности определяется формулой

$$\mu = \frac{evR^2}{6kT} \exp\left(-\frac{E_\mu}{kT} - \frac{R}{r}\right), \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота фононов,  $R$  — длина прыжка,  $r$  — радиус локализации. При полученных значениях подвижности и ее энергии активации величина предэкспоненциального множителя составляет около  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>, что на 3–4 порядка ниже значения, которое он должен иметь при прыжке на межатомное расстояние [14,15]. Такое низкое значение может быть обусловлено большой величиной соотношения длины прыжка к радиусу локализации. Длина прыжка, составляя почти половину слоя оксида, становится сравнимой с ней по величине, что вызывает сомнения в возможности объяснения ВАХ прыжковым переносом и токами, ограниченными пространственным зарядом. В связи с этим более вероят-



**Рис. 2.** Температурная зависимость тока исследованных образцов. Цифры на рисунке соответствуют различным приложенным к образцу напряжениям, В: 1 — 0.1, 2 — 0.3, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.9. Линиями показаны участки с различной энергией активации для кривой 4.

ным является перенос носителей заряда путем термоактивированного туннельного эффекта от Si-подложки на электронные состояния в *nc*-Si и с них далее на алюминиевый электрод, подобно тому, как это было рассмотрено в работе [16]. Отклонение ВАХ от вида, характерного для туннельного эффекта, может быть в этом случае обусловлено влиянием потенциального барьера на границе Si-подложки с оксидным слоем. Этот потенциальный барьер, по-видимому, приводит к нелинейной зависимости  $I(U)$  и на втором участке ВАХ (в области  $0.1 < U < 0.6$  В).

Температурные зависимости тока для исследованных структур Al/SiO<sub>2</sub>/*c*-Si (с *nc*-Si в SiO<sub>2</sub>), измеренные при различных приложенных напряжениях в пропускном направлении, представлены на рис. 2. На температурной зависимости можно выделить два экспоненциальных участка, на которых ток описывается выражением

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_I}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $E_I$  — энергия активации для тока,  $I_0$  — предэкспоненциальный множитель. На обоих участках энергия  $E_I$  уменьшается с увеличением приложенного напряжения. При увеличении напряжения от 0.1 до 1 В энергия активации уменьшается от  $E_I \approx 0.14$  эВ до  $E_I \approx 0.04$  эВ в области низких температур и от  $E_I \approx 0.33$  эВ до  $E_I \approx 0.12$  эВ в области высоких температур. Такое поведение значения  $E_I$  может объясняться зависимостью высоты и ширины потенциального барьера на границе *c*-Si/SiO<sub>2</sub> от приложенного напряжения.

Таким образом, исследования ВАХ структур Al/SiO<sub>2</sub>/*c*-Si с кремниевыми нанокристаллами в оксидном слое показали, что в области напряжений  $U > 0.6$  В ток квадратично зависит от приложенного напряжения.

Квадратичная зависимость тока от напряжения характерна для ТОПЗ. Из анализа ВАХ, в предположении ТОПЗ и прыжкового переноса носителей заряда через слой SiO<sub>2</sub>, было показано, что длина прыжка носителей заряда становится сравнимой по величине с толщиной слоя оксида. Последнее ставит под сомнение возможность объяснения ВАХ прыжковым переносом и токами, ограниченными пространственным зарядом. В связи с этим более вероятным является перенос носителей заряда путем термоактивированного туннелирования через электронные состояния нанокристаллов кремния.

## Список литературы

- [1] F. Koch, V. Petrova-Koch. *J. Non-Cryst. Sol.*, **198-200**, 840 (1996).
- [2] H. Hanafi, S. Tiwari, I. Khan. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **43** (9), 1553 (1996).
- [3] S. Tiwari, F. Rana, H. Hanafi, A. Hartstein, E.F. Crabbe, K. Chan. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1377 (1996).
- [4] I. Kim, H. Han, H. Kim, J. Lee, B. Choi, S. Hwang, D. Ahn, H. Shin. *Proc. IEDM Conf. (USA, 1998)* v. 98, p. 111.
- [5] M.L. Brongersma, A. Polman, K.S. Min, E. Boer, T. Tambo, H.A. Atwater. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2577 (1998).
- [6] K.S. Zhuravlev, A.M. Gilinsky, A.Yu. Kobitsky. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2962 (1998).
- [7] T. Shimizu-Iwayama, D.E. Hole, I.W. Boyd. *J. Phys.: Condens. Matter*, **11**, 6595 (1999).
- [8] L. Tsybeskov, G.F. Grom, R. Krishnan, L. Montes, P.M. Fauchet, D. Kovalev, J. Diener, V. Timoshenko, F. Koch, J.P. McCaffrey, J.-M. Baribeau, G.I. Sproule, D.J. Lockwood, Y.M. Niquet, C. Delerue, G. Allan. *Europhys. Lett.*, **55**, 552 (2001).
- [9] Y. Fu, M. Willander, A. Dutta, S. Oda. *Superlatt. Microstruct.*, **28**, 177 (2000).
- [10] T. Baron, P. Gentile, N. Magnea, P. Mur. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1175 (2001).
- [11] Y. Inoue, A. Tanaka, M. Fujii, S. Hayashi, K. Yamamoto. *J. Appl. Phys.*, **92**, 3199 (1999).
- [12] L. Tsybeskov, K.D. Hirschman, S.P. Duttagupta, M. Zacharias, P.M. Fauchet, J.P. McCaffrey, D.J. Lockwood. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 43 (1998).
- [13] А. Роуз. *Основы теории фотопроводимости* (М., Мир, 1966).
- [14] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1974).
- [15] M.H. Cohen. *J. Non-Cryst. Solids*, **2**, 432 (1970); *J. Non-Cryst. Sol.*, **4**, 391 (1970).
- [16] B. De Salvo, P. Luthereau, T. Baron, G. Ghibaudo, F. Martin, D. Fraboulet, G. Reimbold, J. Gautier. *Microelectronics Reliability*, **40**, 863 (2000).

Редактор Л.В. Беляков

## Charge carrier transfer in the structure with silicon nanocrystals embedded in oxide matrix

Yu.V. Ryabchikov, P.A. Forsh, E.A. Lebedev\*, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov, B.V. Kamenev<sup>+</sup>, L. Tsybeskov<sup>+</sup>

Lomonosov Moscow State University,  
Physics Department,  
119992 Moscow, Russia

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

<sup>+</sup> Department of Electrical and Computer Engineering,  
New Jersey Institute of Technology,  
07102 Newark, New Jersey, USA

**Abstract** The current-voltage characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/c-Si structures with silicon nanocrystals (nc-Si) in oxide layer were investigated in a wide temperature range. Based on experimental data, the thermostimulated tunneling through electron states in nc-Si is considered to be a probable mechanism of the charge carrier migration in these structures.