

07

## Электрофизические свойства наноструктур Si/SiO<sub>2</sub>, полученных методом прямого сращивания

© А.А. Гисматулин<sup>1</sup>, Г.Н. Камаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск  
E-mail: anjgis@yandex.ru, kamaev@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2016 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований диодных структур  $n^{++}-p^{++}$ -Si со встроенным на границу раздела туннельно-тонким SiO<sub>2</sub> с нанокластерами Si, полученных методом прямого сращивания. Выявлено наличие мемристорного эффекта с биполярным режимом переключения. Введение в диэлектрик нанокластеров Si понижает случайный характер возникновения проводящего канала. На ВАХ наблюдаются промежуточные метастабильные состояния, что может оказаться важным для мультибитного хранения данных.

В последние годы внимание исследователей привлекают перспективные компоненты наноэлектроники, получившие название мемристоры. Свойство мемристоров изменять свое сопротивление находит применение в аналоговой технике для обработки сигналов [1], построения нейронных сетей, генераторов шума [2], в перспективных резистивных элементах памяти ReRAM [3]. В результате исследований были установлены основные классы материалов с эффектом памяти: халькогениды, твердые электролиты, оксиды и пр. [4]. Все эти классы материалов обладают свойством переключений сопротивления, которые могут достигаться за счет различных механизмов [5].

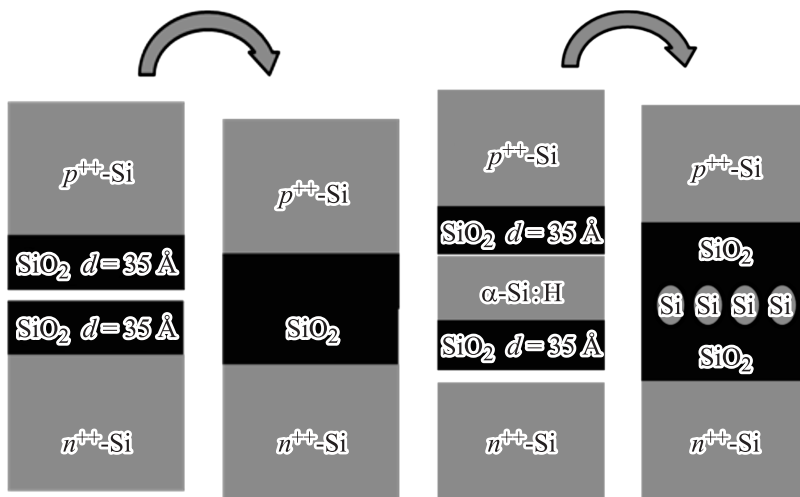
Для элементов на основе оксидов характерны высокие скорости переключения, возможность получения промежуточных значений сопротивления, а также достаточно стабильные мультиуровневые переключения. В зависимости от архитектуры структуры, материала оксида и материала контакта переключения в оксидах могут происходить в основном по двум механизмам: за счет проводящей нити из ионов электрода или за счет присутствия в объеме диэлектрика различных

дефектов и примесей, которые изменяют электронный транспорт [5]. Тонкие проводящие каналы могут быть не сквозными, но достаточными для проявления механизма многоступенчатого туннелирования с участием ловушек [6]. Возможность формирования различных дефектов с глубокими уровнями позволяет использовать эти элементы как в цифровых, так и в аналоговых схемах, а также в качестве синапсов искусственных нейронных сетей. Некоторые элементы на основе оксидов имеют низкую устойчивость электрофизических свойств при многократных циклических переключениях: в оксидах металлов за счет самопроизвольной диффузии, в оксидах полупроводников за счет случайного характера формирования канала [7].

Мемристорные структуры в диодном исполнении имеют ряд преимуществ, среди которых возможность обратного переключения сопротивления без протекания тока [8] и нелинейность ВАХ. Нелинейность ВАХ мемристоров используется для реализации диодно-резисторной логики, где КМОП подсистема используется только для восстановления сигнала и его инверсии [2]. При этом мемристоры в составе матриц должны пропускать ток плотностью  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup> для достижения стабильной работы отдельных элементов без влияния соседних ячеек [7].

В данной работе исследуются диодные структуры  $n^{++}$ – $p^{++}$ -Si со встроенным на границу  $p$ – $n$ -перехода туннельным SiO<sub>2</sub>. Введение нанокластеров Si в окисел должно способствовать структурированию проводящих каналов, уменьшая случайный характер их возникновения. Кроме того, применение нанокластеров Si в оксиде должно уменьшать температуру и электрическое поле для переключения сопротивления.

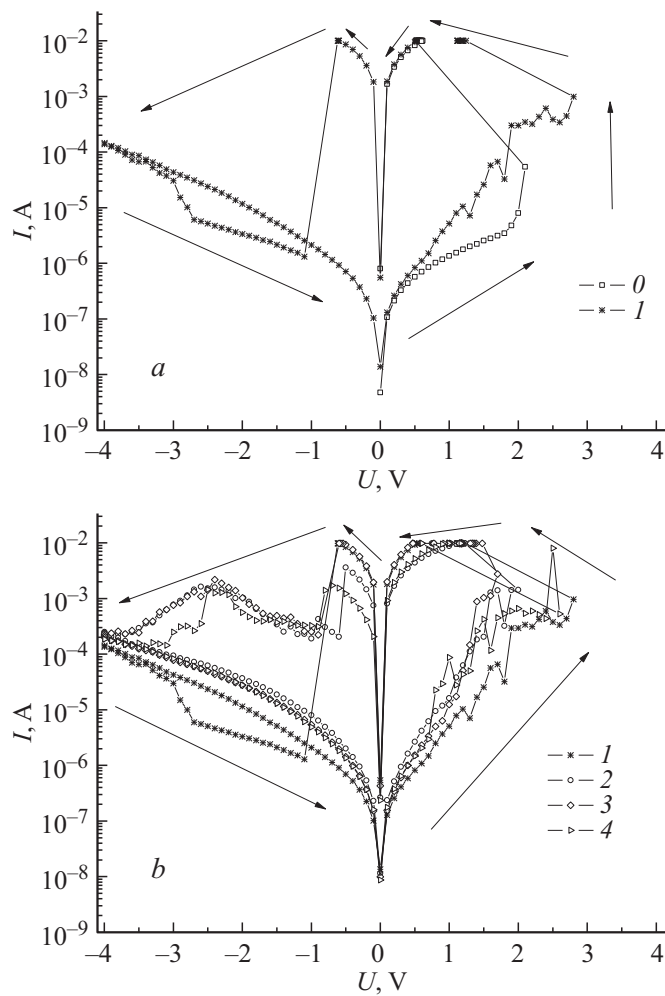
Структуры, состоящие из чередующихся слоев  $\alpha$ -Si:H и SiO<sub>2</sub> были изготовлены на высоколегированных подложках кремния  $n$ -типа (КЭМ-0.002) и  $p$ -типа (КДБ-0.003) на установке плазмохимического осаждения с широкоапертурным источником и индуктивным возбуждением [9]. На подложке кремния создавался слой оксида кремния толщиной 30–35 Å путем прямой обработки в плазме кислорода [10]. Затем проводилось осаждение пленки аморфного кремния толщиной  $\sim 90$  Å из моносилана. Далее пленка  $\alpha$ -Si:H прокислялась с поверхности на заданную глубину в плазме кислорода [11]. В дальнейшем пластины с нанесенными слоями после стандартных процессов очистки поверхности и гидрофилизации попарно соединялись в деионизованной воде и проходили многостадийные термообработки. Заключительный этап прямого сращивания проходил при 1050°С. В результате были получены



**Рис. 1.** Схематичное изображение формирования диодных структур  $n^{++}-p^{++}-Si$  со встроенным на границу сращивания туннельным  $SiO_2$  без нанокластеров (слева) и с нанокластерами  $Si$  (справа).

диодные структуры как со встроенными в диэлектрик нанокластерами кремния, так и без них (рис. 1). После сращивания структуры разрезались и формировались мезы площадью  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . На полученных структурах снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) в диапазоне температур  $25-200^\circ\text{C}$ . Измерения проводились с использованием оборудования аналитико-технологического инновационного центра НГУ „Высокие технологии и новые материалы“.

На рис. 2 приведены ВАХ структуры  $n^{++}-p^{++}-Si$  со встроенным на границу туннельным  $SiO_2$ , измеренные в диапазоне температур  $25-150^\circ\text{C}$  при развертке напряжения смещения в диапазоне  $\pm 4 \text{ V}$ . При подаче последовательности циклических разверток напряжения вид ВАХ менялся. Первоначально на структуру подавалось положительное смещение от 0 до  $+4 \text{ V}$  при комнатной температуре (рис. 2, а, кривая 0). При достижении напряжения  $+2 \text{ V}$  происходит резкий скачок тока, источник переходит в токовый режим из-за ограничения величины тока (в нашем случае  $10 \text{ mA}$ ). Структура находится при этом



**Рис. 2.** ВАХ структуры  $n^{++}-p^{++}-\text{Si}$  со встроенным туннельным  $\text{SiO}_2$ ; *a* — первая развертка и 1 цикл; *b* — 4 последовательных цикла развертки; *c* — циклы развертки при разных температурах. Температура измерения,  $^{\circ}\text{C}$ : 0-4 — 25, 5 — 50, 6 — 100, 7 — 150.

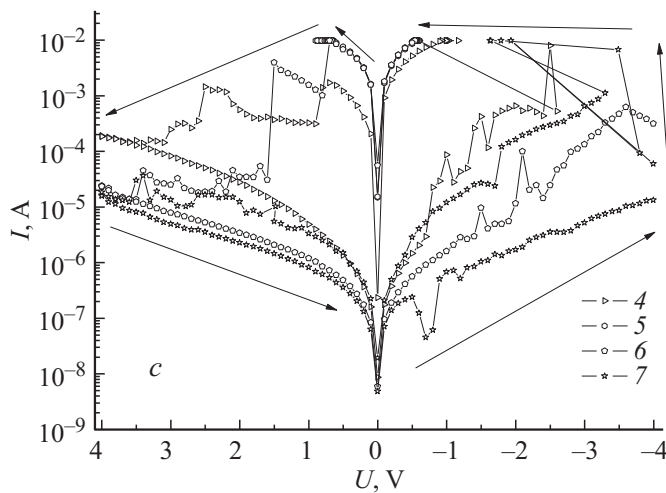


Рис. 2 (продолжение).

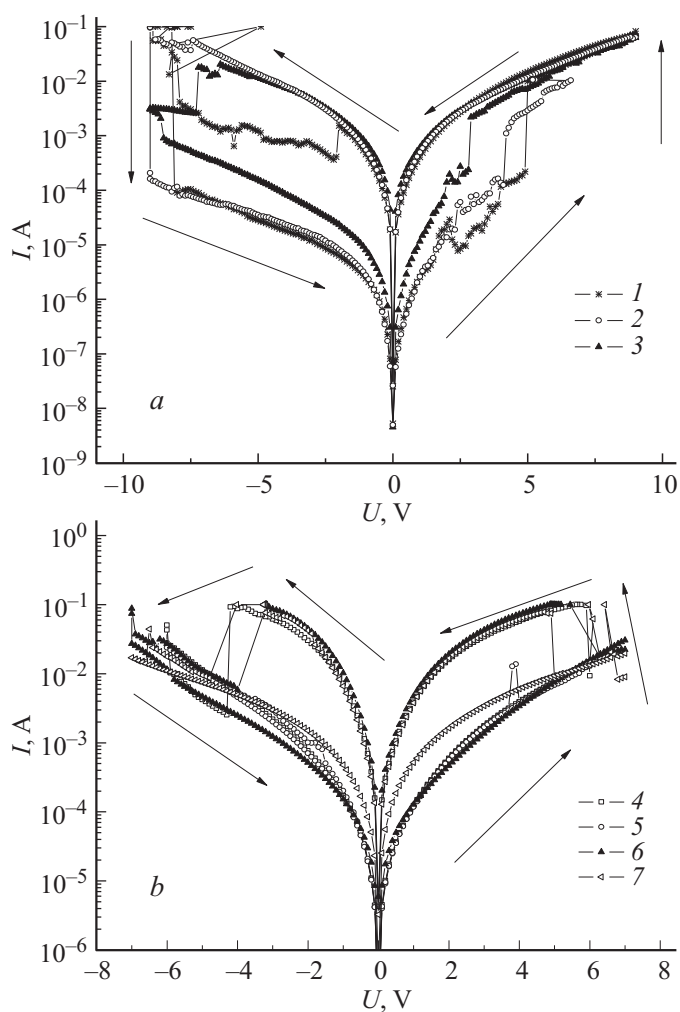
ограничении по току вплоть до  $+4\text{ V}$  и при обратном ходе от  $+4$  до  $+0.6\text{ V}$ , при котором значение тока становится ниже ограничения, т.е. при  $+2\text{ V}$  произошел переход из высокоомного (ВО) состояния в низкоомное (НО) состояние. Далее снимались циклы при развертке напряжений от  $+4$  до  $-4\text{ V}$ . Первый цикл представлен на рис. 2, *a* (кривая 2). При установке начального напряжения в  $+4\text{ V}$  структура остается в НО-состоянии. С понижением приложенного напряжения до  $0\text{ V}$  кривая 1 описывает ход кривой 0. При дальнейшей развертке от  $0$  до  $-1\text{ V}$  структура остается в состоянии НО. При напряжении около  $-1\text{ V}$  произошел обратный переход из НО- в ВО-состояние, в котором структура остается до полной развертки в  $-4\text{ V}$  и при обратном ходе от  $-4$  до  $0\text{ V}$ . При этом при обратном ходе от  $-4$  до  $0\text{ V}$  наблюдается небольшой гистерезис. При переходе в положительную область кривая 1 идет немного выше кривой 0. Переход из ВО- в НО-состояние происходит при  $-3\text{ V}$ . Таким образом наблюдается переключение структуры по биполярному режиму, т.е. есть подобные структуры обладают обратимым эффектом памяти.

На рис. 2, *b* показаны 4 последовательных цикла развертки при комнатной температуре. При всех 4 циклах при положительных смещениях

кривые качественно ведут себя одинаково: происходит переключение из ВО в НО, однако напряжение включения плавают в диапазоне от +1.5 до +3 V. А вот переключения из НО в ВО (включение) хоть и начинаются в более узком диапазоне от -0.5 до -1 V, но происходят через промежуточные состояния, в том числе наблюдаются участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (кривые 2, 3, 4). Отношение величины сопротивления НО к ВО составляет до трех порядков.

На рис. 2, с показаны циклы развертки при различных температурах. Нагрев до 50°C не меняет состояние структуры: при установке начального напряжения в +4 V структура остается в НО-состоянии, при отрицательных смещениях не выключается в заданном диапазоне измерений. Повышение температуры до 100°C приводит к тому, что выключение происходит скачкообразно через промежуточные состояния и значения тока в ВО-состоянии становятся близки к 1 циклу, но включения не происходит. При температуре 150°C в начале цикла наблюдаются неустойчивости: происходит попеременное включение и выключение структуры. При понижении напряжения до +3.5 V структура переходит в ВО-состояние и остается в нем в течение всего цикла развертки. Плавающее пороговое напряжение включения и выключения может быть связано со случайным характером создания проводящего канала и затрудняет использование подобных структур в матричных элементах.

Для уменьшения случайного характера возникновения проводящего канала вводят дефекты в слой окисла. В нашем случае были получены структуры с введенными в SiO<sub>2</sub> нанокластерами Si. На рис. 3, а представлены ВАХ таких структур при полном цикле резистивного переключения, измеренные при комнатной температуре. Первоначально на структуру подавалось отрицательное смещение от 0 до -9 V. Далее снимались циклы при развертке напряжений от -9 до +9 V. При развертке напряжения от -9 до +4.9 V структура находилась в ВО-состоянии. Далее структура переходила в НО-состояние и оставалась в нем до +9 V. При обратной развертке от +9 до -2 V структура находилась в НО-состоянии. При напряжении -2 V начиналось выключение через промежуточные состояния и полное выключение произошло при -8.1 V. При дальнейших циклах разверток переключение структуры из ВО- в НО-состояние происходит при напряжении от +3 до +5 V. Полное выключение в ВО-состояние происходит при напряжении приблизительно -9 V.



**Рис. 3.** ВАХ структуры  $n^{++}-p^{++}$ -Si со встроенным туннельным SiO<sub>2</sub> с нанокластерами Si; *a* — 3 последовательных цикла развертки при 25°С; *b* — 4 последовательных цикла развертки при 100°С; *c* — циклы развертки при разных температурах. Температура измерения, °С: 1–3 — 25, 4–7 — 100, 8 — 25, 9 — 150, 10 — 200.

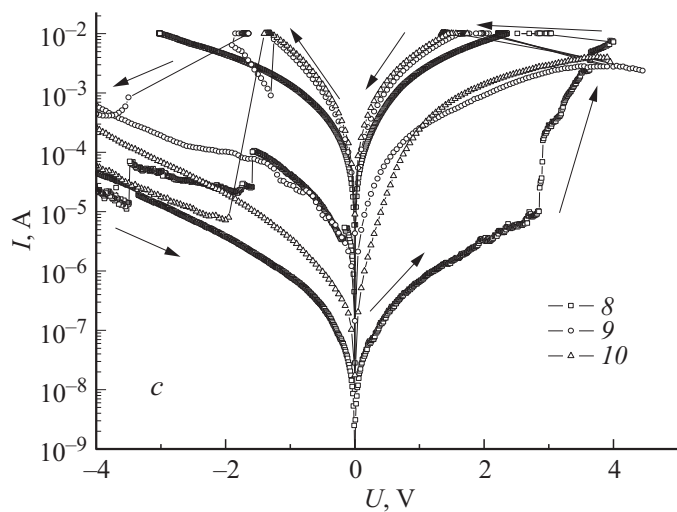


Рис. 3 (продолжение).

На рис. 3, *b* представлены ВАХ при полном цикле резистивного переключения, измеренные при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ . Увеличение рабочей температуры приводит к повышению напряжения включения с уменьшением разброса напряжения, а напряжение выключения уменьшается. Однако отношение ВО- к НО-состоянию уменьшается до 1 порядка.

На рис. 3, *c* представлены ВАХ при полном цикле резистивного переключения, измеренные при различных температурах. Переключение структуры из ВО- в НО-состояние при температуре  $25^{\circ}\text{C}$  происходит при напряжении  $\sim 4\text{V}$ . Обратного переключения в ВО-состояние в данном диапазоне напряжений не наблюдается при данной температуре. А при рабочей температуре  $150^{\circ}\text{C}$  переключение из НО в ВО уже происходит, но через промежуточное состояние. При температуре  $200^{\circ}\text{C}$  виден полный цикл резистивного переключения в биполярном режиме без промежуточных состояний. Напряжение для перехода НО–ВО уменьшается с  $-3.5$  до  $-2\text{V}$  с увеличением температуры.

Таким образом, в диодных структурах  $n^{++}-p^{++}\text{-Si}$  со встроенным на границу перехода туннельным  $\text{SiO}_2$  с нанокластерами  $\text{Si}$  наблюдается эффект резистивного переключения в биполярном режиме. Введение



в диэлектрик нанокластеров Si понижает случайный характер возникновения проводящего канала. На ВАХ наблюдаются промежуточные метастабильные состояния в процессе вкл./выкл., что может оказаться важным для получения промежуточных значений сопротивления (мультитбитное хранение данных) и при разработке адаптивных нейроморфных систем. Изучаемые структуры могут быть изготовлены в рамках существующих технологических процессов микро/нанoeлектроники и использованы при разработке ячеек энергонезависимой памяти.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-07-90403).

## Список литературы

- [1] *Borghetti J., Snider G.S., Kuekes P.J., Yang J.J., Stewart D.R., Williams R.S.* // Nature. 2010. V. 464. P. 873–876.
- [2] *Joshua J. Yang, Dmitri B. Strukov, Duncan R. Stewart* // Nature Nanotechnol. 2013. V. 8. P. 13–24.
- [3] *Chua L.O.* // Appl. Phys. A. 2011. V. 102. P. 765–783.
- [4] *Храповицкая Ю.В., Маслова Н.Е., Занавескин М.Л.* // Наука и образование. 2013. № 12. С. 329–366.
- [5] *Jae Sung Lee, Shinbuhm Lee, Tae Won Noh* // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. P. 031303.
- [6] *Chen J.-Y., Hsin C.-L., Huang C.W., Chiu C.-H., Huang Y.-T., Lin S.-J., Wu W.-W., Chen L.-J.* // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 3671.
- [7] *Gun Hwan Kim, Jong Ho Lee, Jeong Hwan Han et al.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 213508.
- [8] *O'Kelly C., Fairfield J.A., Boland J.J.* / ACS Nano. 2014. V. 8. Iss. 11. P. 11724–11729.
- [9] *Аверкин С.Н., Валиев К.А., Мьяконьких А.В. и др.* // Труды Физико-технологического института РАН. 2005. Т. 18. С. 121–137.
- [10] *Антоненко А.Х., Володин В.А., Ефремов М.Д., Зазуля П.С., Камаев Г.Н., Марин Д.В.* // Автометрия. 2011. Т. 45. № 5. С. 52–58.
- [11] *Камаев Г.Н., Ефремов М.Д., Антоненко А.Х., Володин В.А., Аржанникова С.А., Марин Д.В., Гисматулин А.А.* // Вестник НГУ. Сер.: Физика. 2011. Т. 6. В. 4. С. 107–114.