

05.2;06.1;13.1

## Резистивное переключение в мемристорах на основе гетероструктур Ag/Ge/Si

© О.Н. Горшков, В.Г. Шенгуров, С.А. Денисов, В.Ю. Чалков, И.Н. Антонов, А.В. Круглов, М.Е. Шенина<sup>¶</sup>, В.Е. Котомина, Д.О. Филатов, Д.А. Серов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>¶</sup> E-mail: epsilonbox@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2019 г.

В окончательной редакции 14 октября 2019 г.

Принято к публикации 24 октября 2019 г.

Показано, что структурам Ag/Ge/Si с прорастающими дислокациями в слое Ge свойственны два режима резистивного переключения: биполярный и энергозависимый униполярный. В обоих режимах структуры обладают стабильными токовыми состояниями с отношением силы тока в низкоомном и высокоомном состояниях от 1.5 до 2.7. Энергозависимый униполярный тип переключений может быть обусловлен захватом носителей заряда на глубокие уровни, связанные с дислокациями несоответствия на границе Ge/Si, в то время как биполярное переключение связано с дрейфом ионов Ag<sup>+</sup> по прорастающим дислокациям.

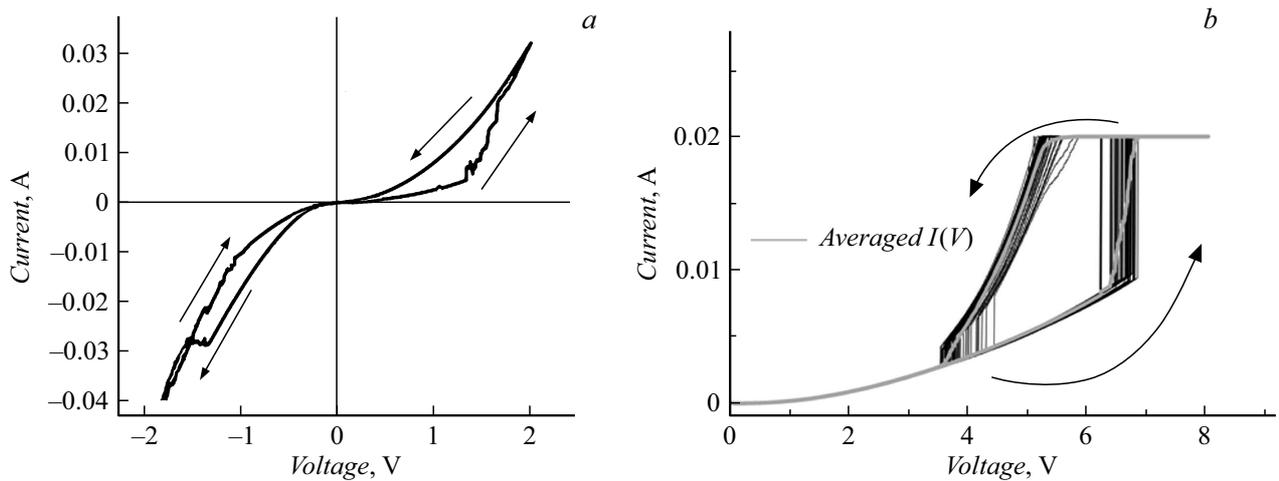
**Ключевые слова:** пленки Ge, мемристор, резистивное переключение, дислокации, полупроводник.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.02.48953.18075

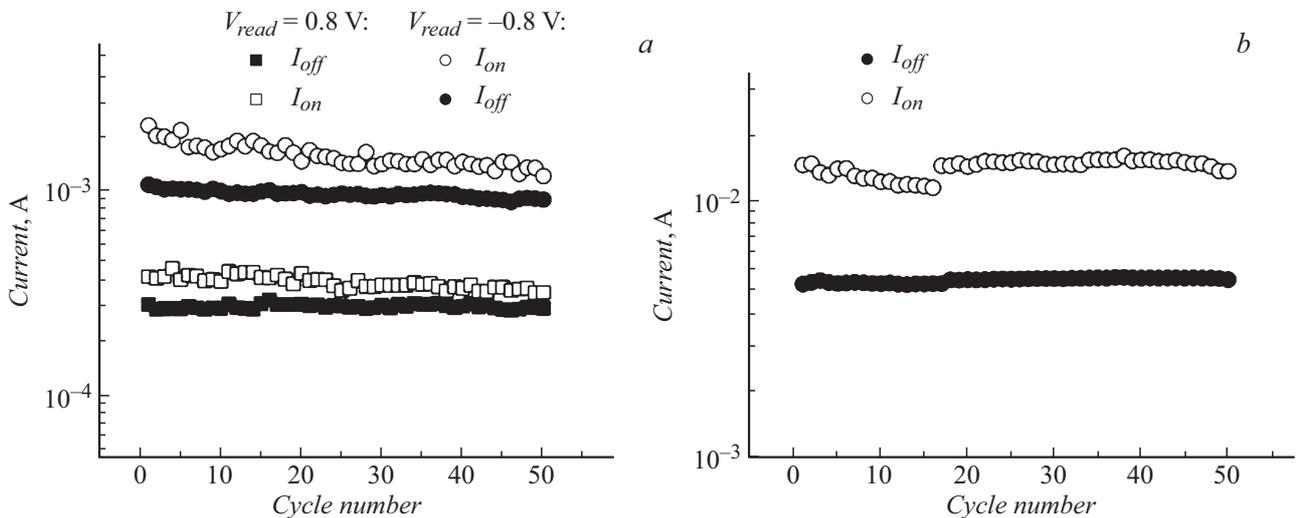
В последние годы интенсивно ведутся комплексные исследования физико-химических процессов, лежащих в основе эффекта резистивного переключения (РП) в структурах металл–диэлектрик–металл (полупроводник) с тонким диэлектрическим переключающим слоем (~ 5–100 nm). Электронные приборы, основанные на этом эффекте, называются мемристорами. В настоящее время известен обширный класс таких устройств на основе диэлектриков, где реализуется филаментарный механизм РП [1], продемонстрированы возможности их применения для энергонезависимой памяти, нейроморфных вычислений и других приложений современной нанoeлектроники [2]. Однако до сих пор широкому практическому применению препятствуют разброс рабочих параметров мемристоров и их деградация в ходе эксплуатации. Нестабильность обусловлена тем, что разрушение/восстановление филаментов носит стохастический характер, так как в переключениях участвует ограниченное (счетное) число активных атомов (ионов) филамента. Понимание механизмов, сопровождающих РП, в том числе на границах с проводящими контактами, могло бы помочь существенно продвинуться в решении вопроса невоспроизводимости параметров РП. Пространственное ограничение формы и латеральных размеров филаментов является одним из возможных решений для стабилизации параметров РП. В литературе предлагались разные способы ограничения формы и размеров филаментов, например введение в мемристорную структуру дополнительного слоя из пористого Si [3] или использование в качестве филаментов дислокаций в монокристаллической пленке SrTiO<sub>3</sub>, в том числе и с внедренными ионами железа [4,5]. Так, авторами [5] методом атомно-силовой микроскопии с проводящим зондом удалось определить диаметр проводящего канала

(2–10 nm), идентифицировать его с ямкой травления дислокации, а также осуществить локальное переключение проводимости внутри такого филамента. Недавно в работе [6] предложен новый тип мемристоров на основе неоксидного релаксированного эпитаксиального слоя (ЭС) твердого раствора Si<sub>0.9</sub>Ge<sub>0.1</sub>/Si(001) (авторы указанной работы назвали такие мемристоры структуры epitaxial random access memory — epiRAM). В данном типе мемристоров филаменты представляли собой цепочки атомов металла (Ag), сосредоточенные в ядре прорастающих дислокаций в ЭС SiGe. Использование дислокаций в качестве каналов проводимости представляет большой интерес, поскольку их параметры можно контролировать, изменяя условия роста ЭС SiGe (толщину и состав слоя SiGe, температуру и скорость роста и т.д.), а также применяя послеростовое селективное растравливание дислокаций. Авторам этой работы удалось добиться высокой временной стабильности параметров РП, малого разброса параметров мемристоров от устройства к устройству и достаточно длительного времени хранения информации (до 48 h при 85°C), что свидетельствует о перспективности данного подхода к решению проблемы деградации мемристивных устройств.

В настоящей работе исследовались мемристоры структуры epiRAM на основе эпитаксиальных гетероструктур Ge/Si(001), выращивание которых проводилось методом разложения моногермана (GeH<sub>4</sub>) на „горячей проволоке“ в высоком вакууме при низкой температуре роста  $T_g = 325–350^\circ\text{C}$  (hotwire chemical vapor deposition, HW CVD) [7]. Данный метод позволяет контролировать варьировать плотность прорастающих дислокаций в эпитаксиальной структуре в пределах  $10^5–10^{10}\text{ cm}^{-2}$  путем изменения условий роста.



**Рис. 1.** Характерные вольт-амперные характеристики структуры на основе Ag/Ge/Si биполярного (a) и униполярного порогового (b) типов.

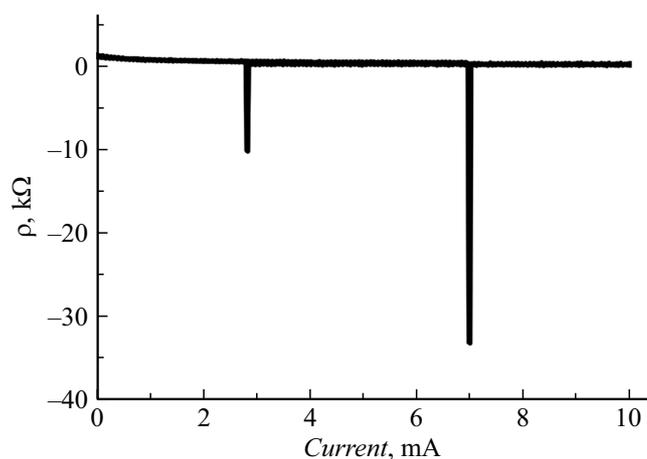


**Рис. 2.** Токковые состояния при напряжении чтения 0.8 и  $-0.8$  В для структуры с биполярным типом РП (a) и при 4.8 В для структуры с переключениями униполярного порогового типа (b).

Рабочий мемристивный ЭС структуры представляет собой монокристаллическую пленку германия толщиной  $\sim 100$  нм с характерными дислокациями. Перед магнетронным осаждением верхних серебряных электродов (толщиной  $\sim 40$  нм) для части образцов проводилось химическое травление лунок выхода дислокаций на поверхность слоя германия. Согласно данным атомно-силовой микроскопии, глубина лунок травления выходов дислокаций достигала 5 нм, ширина растрова на поверхности составляла  $\sim 200$  нм, а поверхностная плотность  $N_d$  была равна  $\sim 3 \cdot 10^7$  см $^{-2}$ . Ямки травления дислокаций стимулируют электродиффузию ионов серебра в слой германия по дислокациям за счет концентрации электрического поля. Резистивный эффект обеспечивается в результате металлизации дислокаций [6]. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов проводились на анализаторе параметров полупроводнико-

вых приборов Agilent B1500 A. Напряжение подавалось на верхний электрод относительно нижнего в режиме dc-развертки в диапазонах от 0 до  $\pm 2$  В и от 0 до 8 В с шагом 0.002 В.

Исследуемым структурам оказались присущи два типа ВАХ: гистерезисная ВАХ (рис. 1, a), характерная для энергонезависимого биполярного РП, и униполярная ВАХ порогового типа с энергозависимыми состояниями сопротивления (рис. 1, b). Первый вариант оказался характерен для слоев Ge с лунками травления выходов дислокаций, а второй — для структур с нерастравленными выходами дислокаций на поверхность. Режим биполярных переключений реализуется в диапазоне напряжений от  $-2$  до 2 В, а униполярное энергозависимое РП — в диапазоне от 0 до 8 В. Для исследованных структур с биполярным типом РП характерны два токковых состояния (далее  $I_{on}$  и  $I_{off}$ ) с малым отноше-



**Рис. 3.** Токовая зависимость дифференциального сопротивления структуры Ag/Ge/Si с переключениями униполярного порогового типа.

нием ( $I_{on}/I_{off} \sim 1.5$ ) при напряжении чтения  $\pm 0.8$  V (рис. 2, a). Структуры с униполярным режимом РП демонстрируют стабильное энергозависимое переключение при разнице токовых состояний ( $I_{on}/I_{off} \sim 2.7$ ) при напряжении чтения 4.8 V (рис. 2, b). Дополнительно для униполярных структур измерялись ампер-вольтные характеристики, дифференцирование которых показало наличие двух диапазонов токов, при которых структура обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) (рис. 3). При прямом проходе характеристики диапазон ОДС находится при  $\sim 7$  mA, зависимость ОДС от тока представляет собой узкий отрицательный пик с амплитудой  $\sim 33$  kΩ. При обратном проходе в диапазоне  $\sim 2.8$  mA наблюдается второй пик ОДС с амплитудой  $\sim 10$  kΩ.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что биполярный механизм РП реализуется в результате электрофизической металлизации дислокаций при электростимулированном дрейфе ионов  $Ag^+$  [6]. Энергозависимый гистерезис униполярного типа в ВАХ может быть обусловлен процессами захвата носителей заряда на глубокие уровни, связанные с дефектами кристаллической решетки в активной области мемристора. Как было установлено в [8], гетероструктуры Ge/Si(001), выращенные методом горячей проволоки при низких температурах роста, характеризуются высокой плотностью дислокаций несоответствия, сосредоточенных в тонком слое вблизи границы раздела Ge/Si. С дислокациями в Si и Ge связано значительное количество дефектных комплексов, порождающих глубокие уровни вблизи середины запрещенной зоны полупроводника [9]. Таким образом, можно предположить, что наблюдавшийся нами униполярный энергозависимый гистерезис обусловлен захватом и эмиссией носителей заряда на глубоких уровнях, связанных с дислокациями несоответствия на границе раздела Ge/Si. В структурах с ямками травления доминирует биполярное переключение, обусловленное

дрейфом ионов  $Ag^+$  по прорастающим дислокациям, которое маскирует эффект захвата носителей на ловушки, поскольку возникающие металлические филаменты шунтируют ЭС германия.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-29-03026).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Resistive switching: from fundamentals of nanoionic redox processes to memristive device applications / Eds D. Ielmini, R. Waser. Wiley-VCH, 2016. 784 p.
- [2] Memristor and memristive neural networks / Ed. A. James. Rijeka: IntechOpen, 2018. 314 p.
- [3] Tsai T.-M., Chang K.-C., Zhang R., Chang T.-C., Lou J.C., Chen J.-H., Young T.-F., Tseng B.-H., Shih C.-C., Pan Y.-C., Chen M.-C., Pan J.-H., Syu Y.-E., Sze S.M. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 253509.
- [4] Szot K., Speier W., Bihlmayer G., Waser R. // Nature Mater. 2006. V. 5. P. 312–320.
- [5] Szot K., Bihlmayer G., Speier W. // Solid State Phys. 2014. V. 65. P. 353–559. DOI: 10.1016/B978-0-12-800175-2.00004-2
- [6] Choi S., Tan S.H., Li Z., Kim Y., Choi C., Chen P.-Y., Yeon H., Yu S., Kim J. // Nature Mater. 2018. V. 17. P. 335–340.
- [7] Denisov S.A., Matveev S.A., Chalkov V.Yu., Shengurov V.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 690. P. 012014.
- [8] Шенгуров В.Г., Чалков В.Ю., Денисов С.А., Алябина Н.А., Гусейнов Д.В., Трушин В.Н., Горшков А.П., Волкова Н.С., Иванова М.М., Круглов А.В., Филатов Д.О. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 10. С. 1411–1414.
- [9] Kveder V., Badylevich M., Schröter W., Seibt M., Steinman E., Izotov A. // Phys. Status Solidi A. 2005. V. 202. P. 901–910.