

МЕМРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ В СЭНДВИЧ-СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ОЛОВА

© 2012 С. В. Рябцев, А. Е. Попов, Ф. М. Чернышов, Н. С. Рябцева, Э. П. Домашевская

Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Россия

Аннотация. Методом контролируемого термического окисления слоев металлического олова получены тонкие пленки нестехиометрического оксида олова. На его основе изготовлены планарная структура Pt-SnO_{2-x}-Pt и сэндвич-структура Si-SnO_{2-x}-Au. Вольт-амперные характеристики планарной структуры Pt-SnO_{2-x}-Pt имеют гистерезис на частотах тестового сигнала ниже 10 Гц, который обусловлен подвижностью кислородных вакансий в SnO_{2-x}. При поляризации сэндвич-структуры Si-SnO_{2-x}-Au обнаружен мемристорный эффект. Изучены временная устойчивость мемристорного эффекта и его обратимость.

Ключевые слова: мемристорный эффект, нестехиометрический оксид олова, вакансии кислорода, сэндвич-структура Si-SnO_{2-x}-Au, вольт-амперные характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых компонентов вычислительной техники являются элементы твердотельной энергонезависимой перезаписываемой памяти. Большие перспективы в этой области имеет подход, основанный на использовании мемристорного эффекта [1—6]. Такие элементы памяти получили название ReRAM (resistive random-access memory). Мемристоры — это электронные устройства резистивного типа, которые имеют гистерезисную нелинейную вольт-амперную характеристику. Впечатляющие успехи в разработке мемристоров достигнуты в HP Labs — научно-исследовательском подразделении фирмы Hewlett Packard. В HP Labs изготовлены прототипы ReRAM с размерами функциональной области 5 нм, что существенно меньше, чем размеры современных кремниевых транзисторных устройств. Быстродействие мемристоров ожидается на уровне 50 нс. Кроме хранения информации мемристоры могут осуществлять и ее обработку. Скоммутированные определенным образом мемристоры, функционирующие в аналоговом режиме, могут моделировать нейроны головного мозга [7, 8]. Такие нейроноподобные мемристорные сети способны к обучению и адаптивным вычислениям.

Приведенный здесь перечень возможностей и преимуществ мемристорных устройств является далеко не полным, что и определяет актуальность исследований в этом направлении, особенно в области поиска новых материалов для мемристоров.

Подавляющая часть исследований мемристорного эффекта проведена на оксидных материалах,

в частности, на тонких пленках нестехиометрического оксида титана. Переключательные свойства TiO_{2-x} пленок обусловлены миграцией кислородных вакансий под действием электрического поля. Большую роль в функционировании мемристоров играют металлические контакты к оксиду. Мемристорный эффект может возникать благодаря изменению характеристик барьера Шоттки на границе металл-полупроводник, которое обеспечивается миграцией в электрическом поле заряженных кислородных вакансий к межфазной границе [9]. В литературе обсуждаются и другие механизмы, которые определяют гистерезис и нелинейность ВАХ мемристоров, но все они, так или иначе, связаны с нестехиометрией оксидного материала и подвижностью ионов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Нестехиометрией, необходимой для проявления мемристорного эффекта, могут обладать и другие оксиды. Наши исследования показали, что при определенных технологических условиях пленки оксида олова имеют выраженную дефектность по кислородной подрешетке [10, 11]. Пленки SnO_{2-x} были приготовлены путем окисления на воздухе тонких слоев металлического олова, распыленных магнетронным методом на подложки из поликора (Al₂O₃) с готовыми Pt электродами или монокристаллического кремния КЭФ-4,5. После окисления олова, нанесенного на кремниевые подложки, на его поверхность распылялись золотые электроды. В первом случае мы получили планарную структуру Pt-SnO_{2-x}-Pt с расстоянием между

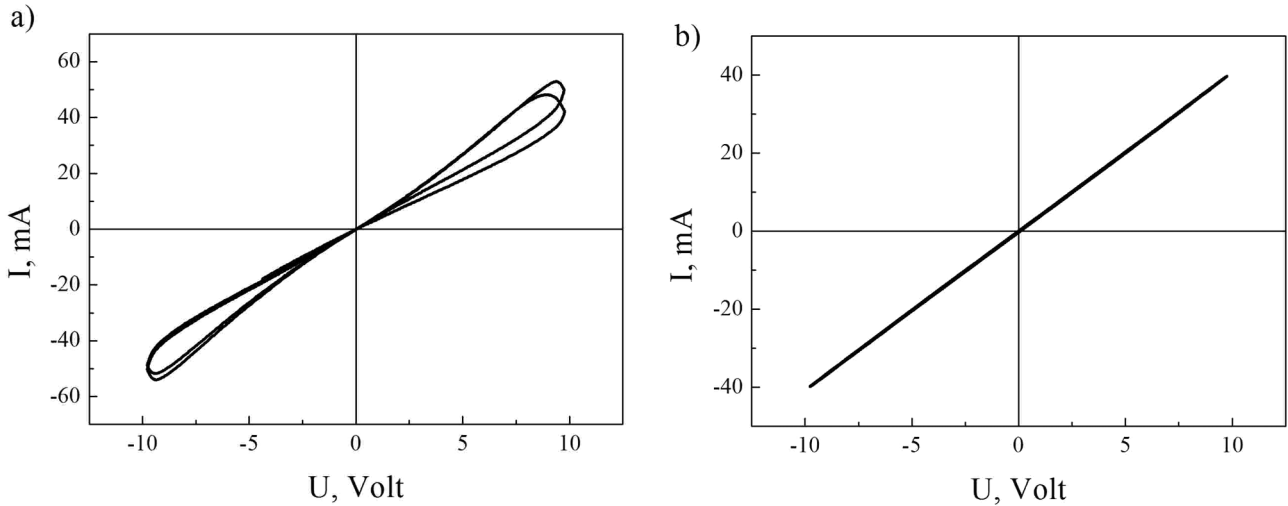


Рис. 1. ВАХ планарной структуры Pt-SnO_{2-x}-Pt, измеренные на различных частотах тестового синусоидального напряжения: *a* — 0.01 Гц; *b* — 100 Гц

Pt электродами ~200 мкм, во втором — сэндвич структуру Si-SnO_{2-x}-Au с расстоянием между верхним и нижним электродами, равным толщине пленки SnO_{2-x} (~100 нм).

Контроль температуры и времени окисления металлических пленок олова позволяет управлять стехиометрией получаемых пленок. Оптимальной для формирования нестехиометрических пленок была температура 350—450 °С при временах окисления ~ 30 мин. Нестехиометрия полученных пленок SnO₂ была подтверждена оптическими и электрофизическими методами [11].

Мемристорный эффект исследовался путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на различных частотах: от 10⁻² до 10³ Гц при амплитуде синусоидального сигнала 10 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ВАХ, измеренные на планарной структуре Pt-SnO_{2-x}-Pt, представлены на рис. 1. На частоте 10⁻² Гц наблюдается гистерезис ВАХ в виде симметричных петель (рис. 1 *a*), который постепенно вырождается в прямую линию на частотах более 10 Гц (рис. 1 *b*).

В данном случае гистерезис можно объяснить миграцией ионов (вакансий кислорода). Частоты, на которых проявляется гистерезис, свидетельствуют о малой подвижности вакансий кислорода в электрическом поле. Это соответствует результатам, которые были получены ранее при исследовании импеданса пленок SnO_{2-x} [11]. Предположение о природе гистерезиса планарной структуры на низких частотах подтверждается работой [12].

Авторы работы рассмотрели и смоделировали процессы (рис. 3), происходящие в полупроводниковой пленке с подвижными ионами на различных частотах тестового напряжения.

Сравнение рис. 1 и 2 показывает полное соответствие реального поведения ВАХ структуры Pt-SnO_{2-x}-Pt и результатов моделирования для системы с ионной подвижностью.

Другой значительный результат, полученный в работе [12], заключается в установлении закономерностей, которые показывают, что мемристорный эффект возрастает по абсолютному значению для больших значений подвижности примесей и меньших толщин полупроводниковых пленок. Последняя зависимость подчиняется

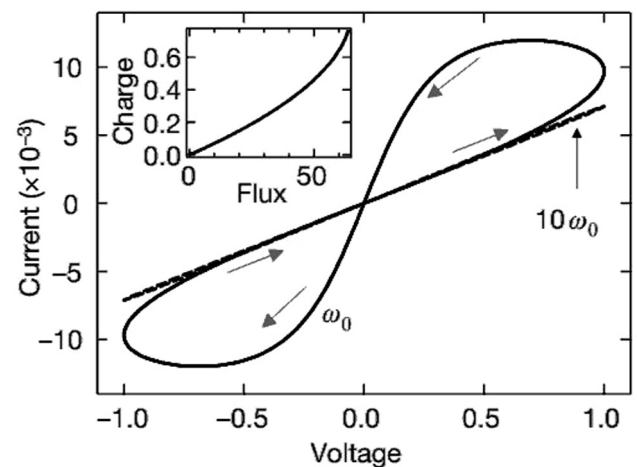


Рис. 2 Результаты моделирования ВАХ полупроводника с ионной подвижностью на различных частотах: ω_0 и $10\omega_0$ [12]

квадратичному закону, т.е. мемристорный эффект для нанометровой пленки больше в миллион раз, чем для микронной. В полном соответствии с этим выводом в планарной структуре Pt-SnO_{2-x}-Pt с расстоянием между электродами ~200 мкм эффект переключения сопротивления не наблюдался. Попытки поляризовать эту структуру напряжением смещения ±30 В не привели к заметному изменению вольт-амперных характеристик, т.е. ее сопротивления.

Дальнейшие исследования проводились на сэндвич структуре Si-SnO_{2-x}-Au, где расстояние между электродами составляло ~100 нм. ВАХ структуры, измеренные на частоте 10 Гц, представлены на рис. 3. Нелинейный график 1 (рис. 3) соответствует ВАХ исходного образца, который характерен для структур с энергетическими барьерами на фазовых границах. В настоящее время мы не обсуждаем, какими барьерами обусловлена нелинейность ВАХ: границей Si-SnO_{2-x} или SnO_{2-x}-Au. В области ±2 В наблюдается гистерезис ВАХ, который мы связываем с миграцией кислородных вакансий в SnO_{2-x} под действием поля.

Затем структура была поляризована напряжением +30 В, приложенным к золотому электроду в течение 30 мин. После этой процедуры произошло переключение сопротивления структуры, что наблюдается по изменению правой части ВАХ (график 2).

График 3 соответствует ВАХ структуры после приложения обратного по знаку смещения -30 В

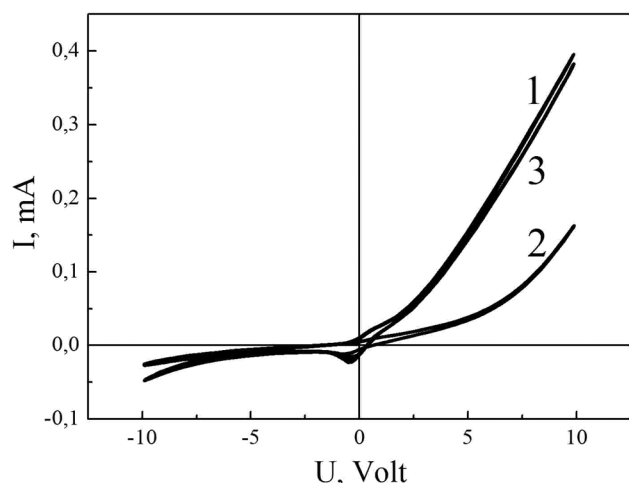


Рис. 3. ВАХ структуры Si-SnO_{2-x}-Au: 1 — до воздействия смещения; 2 — после приложенного смещения +30 В; 3 — после приложенного обратного смещения -30 В

напряжения к золотому электроду. ВАХ структуры при этом практически полностью восстановилась до начального состояния.

Следующий вопрос, который возникает при изучении мемристорного эффекта, это его временная устойчивость. Ионы, сдвинутые полем к одному из электродов, после выключения поля могут диффундировать в объем полупроводника против градиента концентрации.

На рис. 4 показаны результаты таких исследований. Сравнение графиков 1 (до воздействия смещения) и 2—5 (после выключения смещения) показывает, что резистивное переключение в системе Si-SnO_{2-x}-Au устойчиво, по крайней мере, при комнатной температуре.

ВЫВОДЫ

Обнаруженный эффект резистивного переключения в сэндвич-структуре на основе нестехиометрического оксида олова позволяет сделать вывод о перспективности этого материала для разработки устройств твердотельной перезаписываемой энергонезависимой памяти — мемристоров.

Работа выполнена при поддержке грантов ФЦП (ГК 14.740.11.0599 и №2012-1.1-12-000-2003-120).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pershin Y. V., Ventra M. D. // *Advances in Physics*. 2011. V. 60. № 2. P. 145.
2. Ярмаркин В. К., Шульман С. Г., Леманов В. В // *ФТТ*. 2008. Т. 50. В.10. С. 1767.

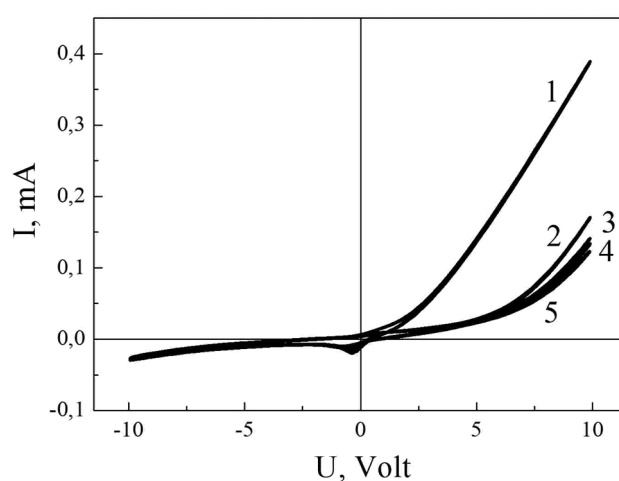


Рис. 4. ВАХ структуры Si-SnO_{2-x}-Au: 1 — до воздействия смещения; 2 — непосредственно после приложенного смещения +30 В; 3 — через 10 минут после выключения смещения; 4 — через 60 минут после выключения смещения; 5 — через 120 минут после выключения смещения

3. Jeong D. S., Schroeder H., Waser R. // Phys. Rev. 2009. V. 79. P. 195317.
4. Pickett M. D., Strukov D. B., Borghetti J. L., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 074508.
5. Strukov D. B., Borghetti J. L., Williams R. S. // Small. 2009. V. 5. № 9. P. 1058.
6. Wua J., McCreery R. L. // J. Electrochem. Soc. 2009. V. 156 (1). P. 29.
7. Jo S. H., Chang T., Ebong I., et al. // Nano Lett. 2010. V. 10. P. 1297.
8. Sah M. Pd., Yang C., Kim H., et al. // Sensors. 2012. V. 12. P. 3587.
9. Song J., Zhang Y., Xu C., et al. // Nano Lett. 2011. V. 11. P. 2829.
10. Рябцев С. В., Чувенкова О. А., Попов А. Е. и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 14. № 3. С. 328 -333.
11. Рябцев С. В. Дисс. д.ф.-м.н. Воронеж, 2011. 273 с.
12. Strukov D. B., Snider G. S, Stewart D. R., et al. // Nature. 2008. V. 453. P. 80.

Рябцев С. В. — д.ф.-мат.н., Воронежский государственный университет; e-mail: ryabtsev@niif.vsu.ru

Попов А. Е. — аспирант, Воронежский государственный университет; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Чернышов Ф. М. — аспирант, Воронежский государственный университет; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Рябцева Н. С. — студентка, Воронежский государственный университет; e-mail: RNS77@yandex.ru

Домашевская Э. П. — д.ф.-мат.н., профессор, Воронежский государственный университет; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Ryabtsev S. V. — grand PhD (Phys.-Math.), Voronezh State University; e-mail: ryabtsev@niif.vsu.ru

Popov A. E. — the post graduate student, Voronezh State University; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Chernyshov F. M. — the post graduate student, Voronezh State University; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Ryabtseva N. S. — the student, Voronezh State University; e-mail: RNS77@yandex.ru

Domashevskaya E. P. — grand PhD (Phys.-Math.), professor, Voronezh State University; e-mail: ftt@phys.vsu.ru