

УДК 537.312.9:621.315.59

АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ВЕЛИЧКО

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
velichko@petrsu.ru

АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ ЧЕРЕМИСИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexiii1982@mail.ru

ВАДИМ АНДРЕЕВИЧ КУРОПТЕВ

аспирант, преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuroptev@petrsu.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gstef@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АНОДНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ*

Одним из перспективных способов управления фазовым переходом металл – изолятор в оксидных материалах, открывающих доступ к его практическому использованию, является приложение давления или механических напряжений. В работе исследуется влияние одноосного давления на параметры электронного переключения в тонкопленочных сэндвич-структурах на основе анодного оксида ванадия. В полученных образцах зафиксирован эффект переключения с S-образной вольт-амперной характеристикой, исследована зависимость пороговых напряжений включения и выключения от приложенного давления. Показано, что пороговое напряжение переключения (и, соответственно, температура перехода металл – изолятор) уменьшается с ростом давления. Полученные результаты сопоставлены с аналогичными для структур на основе ксерогеля $V_2O_5 \times nH_2O$. Обсуждена возможность использования обнаруженного эффекта для разработки тонкопленочных микросенсоров температуры и механических напряжений.

Ключевые слова: переход металл – изолятор, одноосное сжатие, анодные оксиды ванадия

Исследования влияния давления и механических напряжений на фазовый переход металл – изолятор (ПМИ) в диоксиде ванадия являются весьма информативными с точки зрения определения механизма перехода [2], [8], [10], [12], [14]. С другой стороны, возможность управлять свойствами материала с ПМИ (например, изменяя температуру фазового перехода T_i под действием давления) представляет интерес для возможных технических приложений, в частности в микро-электромеханических системах (МЭМС). Необходимо отметить, что имеющиеся в литературе [2], [8], [14] данные о зависимости параметров ПМИ в VO_2 от P достаточно противоречивы. Величина и даже знак $\frac{\partial T_i}{\partial P}$ существенным образом зависят от качества образцов (пленки, монокри-

сталлы) и способа измерения (всестороннее или одноосное сжатие) [8], [14]. Кроме того, исследование зависимости T_i от P является важным для понимания механизмов изоструктурных кристаллографических переходов в полупроводниковой моноклинной (M1–M2) фазе VO_2 [11].

В сэндвич-структурах V– VO_2 -металл на основе анодных пленок оксида ванадия наблюдается эффект переключения с S-образной вольт-амперной характеристикой [6], [13], характеризующейся пороговыми напряжениями включения U_{th} и выключения U_{off} (рис. 1). Эффект отрицательного дифференциального сопротивления также потенциально перспективен для создания различных электронных устройств: переключателей, генераторов, чувствительных

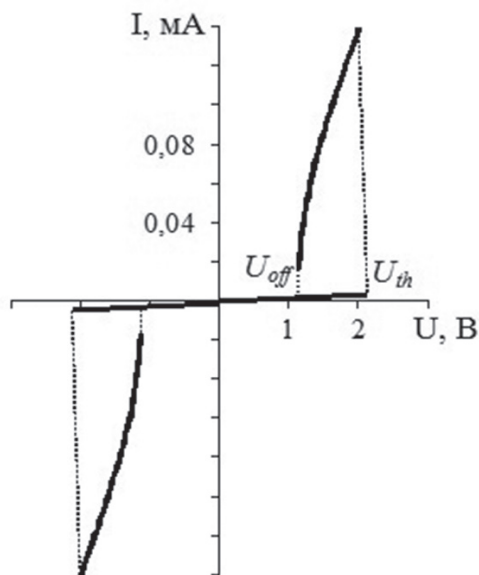


Рис. 1. ВАХ исследуемой структуры металл / анодная окисная пленка ванадия / металл

элементов сенсорных систем и т. д. [5], [6], [7], [12]. Во многих случаях для технических приложений более перспективными оказываются именно не планарные, а сэндвич-структуры типа металл – диэлектрик – металл, что объясняется общей тенденцией к миниатюризации.

Пороговое напряжение U_{th} зависит от температуры, уменьшаясь с ростом T [6]. В сэндвич-структурах на основе VO_2 зависимость $U_{th}(T)$ удовлетворительно описывается моделью критической температуры ($U_{th} \sim \sqrt{T_c - T}$) [2] при комнатных температурах, тогда как при низких температурах переключение имеет более сложную природу [9]. Так как T_c зависит от P , то можно предположить, что U_{th} будет также зависеть от давления.

В настоящей работе мы исследовали влияние одноосного сжатия на параметры переключения в структурах на основе анодных пленок оксида ванадия. Исследуемые образцы изготавливались по методике, описанной в [13]. Давление на образец создавалось приложением нагрузки к прижимному контакту с помощью специальной электромагнитной системы [3]. Была найдена зависимость прикладываемой нагрузки (F) от постоянного тока, проходящего через электромагнит. Такая система позволяла реализовать прецизионное изменение и измерение давления по величине тока после соответствующей калибровки. Полная площадь контакта прижимного электрода (позолоченная проволока диаметром 0,5 мм, закругленная на конце) с поверхностью пленки была оценена по диаметру следа с помощью микроскопа [7] и составляла $S \sim 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$. Эффективное значение давления рассчитывалось как $P = \frac{F}{S}$.

Измеренные зависимости U_{th} и U_{off} при $T = 293 \text{ К}$ показаны на рис. 2; при $P = P_c \approx 100 \text{ МПа}$ переключение исчезает (ввиду разных масштабов осей ординат для U_{th} и U_{off} соответствующая точка пересечения кривых 1 и 2 не указана). Зависимость $U_{th}(P)$ (рис. 2, кривая 1) качественно подобна аналогичной зависимости для сэндвич-переключателя на основе V_2O_5 -геля [7], в котором переключение также обусловлено развитием ПМИ в VO_2 -канале [7]. Однако количественные характеристики в этих двух случаях резко различны: в [7] $P_c \approx 1500 \text{ МПа}$, то есть почти на порядок больше. По нашему мнению, это может быть связано с тем, что поверхность прижимного контакта (и в меньшей степени самой пленки) не является идеально плоской. В случае анодной пленки эффективная площадь физического контакта будет при этом несколько меньше вышеприведенной оценки S и реальное давление, соответственно, больше (в нашем случае в 10 раз) расчетной величины P . В отличие от плотного анодного оксида, ксерогель $V_2O_5 \times nH_2O$, являясь полимероподобным пористым материалом [1], более пластичен, что обеспечивает сплошной контакт даже со слегка шероховатой поверхностью электрода.

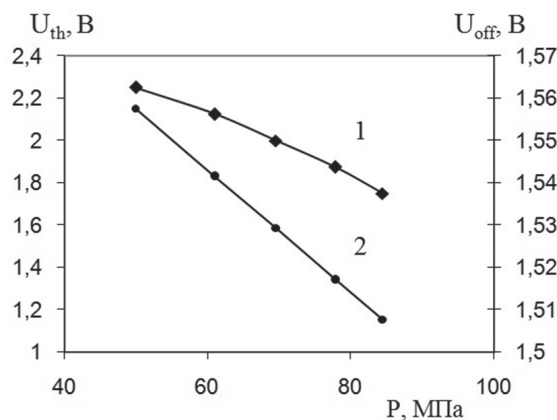


Рис. 2. Зависимость пороговых параметров ВАХ (U_{th} – 1, U_{off} – 2) от давления P

Важно подчеркнуть, что с точки зрения технических приложений (например, в качестве датчиков и преобразователей механических величин в МЭМС) структуры на основе анодных пленок оксида ванадия могут оказаться в некоторых случаях более эффективными по сравнению со структурами на основе геля [7]. Дело в том, что толщина анодной пленки составляет $\sim 100 \text{ нм}$, в отличие от типичной толщины пленки ксерогеля (1–10 мкм), что значительно увеличивает возможную плотность размещения элементов. Кроме того, отмеченная выше разница в эффективных величинах давлений имеет положительную сторону в том смысле, что эти два типа датчиков, работающие по сути

на одном и том же материале (VO_2) и на одном эффекте (ПМИ), дополняют друг друга по охватываемому диапазону рабочих усилий (давлений). При этом максимальная относительная чувствительность датчика на основе анодного оксида будет выше: $\frac{1}{U_{th}} \cdot \frac{\partial U_{th}}{\partial P} \approx -7 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$ (при $P = 70 \text{ МПа}$, см. рис. 2), тогда как для структуры на основе гидратированного пентаоксида ванадия [7] соответствующий показатель составляет $\sim -9 \times 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ при том же давлении.

Отметим, что проблема расширения диапазона измеряемых механических напряжений (или увеличения чувствительности) путем простейшего на первый взгляд технического решения – уменьшения площади прижимного контакта и тем самым увеличения P – не является тривиальной. Дело в том, что уменьшение S ниже определенного предела приведет, очевидно, просто к прокалыванию пленки. В нашем же случае, несмотря на отмеченную выше неоднородность рельефа металлического электрода в зоне контакта, этого не происходит. Это подтверждается полной обратимостью кривых на рис. 2 и воспроизводимостью результатов для каждого образца.

В заключение отметим, что полученный результат $\frac{\partial U_{th}}{\partial P} < 0$ подтверждает данные работы [7]

и свидетельствует о том, что в данных условиях для VO_2 $\frac{\partial T_t}{\partial P} < 0$ (температура ПМИ уменьшается с ростом P), что согласуется с результатами [14]. Что касается возможных технических приложений данного эффекта, то здесь следует еще раз подчеркнуть, что проблема поиска новых материалов для создания микросенсоров весьма актуальна в последнее время [5]. Зависимость пороговых характеристик сэндвич-переключателей от T и P указывает на возможность их использования в качестве тонкопленочных микросенсоров температуры и механических напряжений. Кроме того, генерация релаксационных колебаний в схемах, содержащих такие элементы, позволяет реализовать датчики с частотным выходом [5], [6], обладающие целым рядом преимуществ по сравнению с преобразователями типа «измеряемая величина \rightarrow напряжение». При этом важно подчеркнуть, что разработанные методы литографии по оксидам ванадия [4] предоставляют возможность формирования сенсорных систем на основе VO_2 в микро- и наномасштабах.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)» (государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14.В37.21.0755, № 14.В37.21.0747, № 14.В37.21.1066), АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (государственные контракты № 2.3282.2011, № 2.2774.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина О. Я., Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Сергеева О. В. Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 77–85.
2. Бугаев А. А., Захарченко Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
3. Величко А. А. Переключение в тонкопленочных микро- и наноструктурах на основе оксидов переходных металлов с переходом металл – изолятор: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2002. 155 с.
4. Величко А. А., Дутиков Д. А., Кулдин Н. А., Кундозерова Т. В., Параничев Д. К., Пергамент А. Л., Путролайнен В. В., Стефанович Г. Б., Черемисин А. Б. Разработка методов микро- и нанолитографии по оксидным пленкам переходных металлов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 11 (105). С. 82–94.
5. Пергамент А. Л., Казакова Е. Л., Артюхин Д. В., Ольшанников Д. И., Савченко М. В. Физические основы разработки датчиков на основе эффекта переключения в диоксиде ванадия // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 101–105.
6. Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и переключение в VO_2 в сильном электрическом поле // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 20. С. 69–73.
7. Стефанович Г. Б., Пергамент А. Л., Казакова Е. Л. Электрическое переключение в структурах металл – диэлектрик – металл на основе гидратированного пентаоксида ванадия // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 11. С. 6–12.
8. Berglund C. N., Jayaraman A. Hydrostatic-pressure dependence of the electronic properties of VO_2 near the semiconductor-metal transition temperature // Phys. Rev. 1969. Vol. 185. P. 1034–1039.
9. Gu Y., Cao J., Wu J., Chen L.-Q. Thermodynamics of strained vanadium dioxide single crystals // Journal of applied physics. 2010. Vol. 108. 083517.
10. Lazarovits B., Kim K., Haule K., Kotliar G. Effects of strain on the electronic structure of VO_2 // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. 115117.
11. Mitran M., Maroni B. et al. Anisotropic compression in the high-pressure regime of pure and chromium-doped vanadium dioxide // Phys. Rev. B – Condensed matter and materials physics. 2012. Vol. 85. № 18. 184108.
12. Pergament A. L., Boriskov P. P., Velichko A. A., Kuldin N. A. Switching effect and the metal-insulator transition in electric field // Journal of physics and chemistry of solids. 2010. Vol. 71. P. 874–879.
13. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich L. A. Anodic oxidation of vanadium and properties of vanadium oxide films // Journal of physics: condensed matter. 2004. Vol. 16. Is. 23. P. 4013–4024.
14. Ufert D.-K. Stress induced switching in VO_2 thin films // Phys. Stat. Solidi (a). 1976. Vol. 34. P. 1083–1086.

Velichko A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Cheremisin A. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Kuroptev V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Stefanovich G. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

UNIAXIAL COMPRESSION INFLUENCE ON SWITCHING PARAMETERS OF STRUCTURES BASED ON VANADIUM ANODIC OXIDE FILMS

The application of pressure or mechanical strain is one of the promising ways to control metal-insulator transition in oxide materials, which makes its practical use possible. The article is concerned with the study of uniaxial compression influence on electronic switching parameters of the thin film sandwich structures based on vanadium anodic oxide films. The switching effect with S-shaped current-voltage characteristics was obtained for analyzed samples. Pressure dependence of the threshold on-off voltage was investigated. The study showed that the threshold voltage of switching (and, accordingly, metal-insulator transition temperature) decreases together with pressure elevation. The obtained results were compared to similar ones for structures based on xerogel $V_2O_5 \times nH_2O$. A possible use of the discovered effect to design temperature and mechanical pressure for thin film microsensors was discussed.

Key words: metal-insulator switching, uniaxial compression, vanadium anodic oxides

REFERENCES

1. Berezina O. Ya., Kazakova E. L., Pergament A. L., Sergeeva O. V. Modification of electrical and optical properties of thin layers of hydrated vanadium oxide doped with hydrogen and tungsten [Modifikatsiya elektricheskikh i opticheskikh svoystv tonkikh sloev gidratirovannogo oksida vanadiya pri legirovani vodorodom i vol'framom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 6 (111). P. 77–85.
2. Bugaev A. A., Zakharchenya B. P., Chudnovskiy F. A. *Fazovyy perekhod metall – poluprovodnik i ego primeneniye* [Semiconductor-to-metal phase transition and its application]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 183 p.
3. Velichko A. A. *Pereklyucheniye v tonkoplennoknykh mikro- i nanostrukturakh na osnove perekhodnykh metallov s perekhodom metall – izolator. Diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Switching in thin film micro- and nanostructures based on transitional metals' oxides with the metal-to-insulator transition. Cand. phys. and math. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2002. 155 p.
4. Velichko A. A., Dutikov D. A., Kuldin N. A., Kundozerova T. V., Paranichev D. K., Pergament A. L., Putrolaynen V. V., Stefanovich G. B., Cheremisin A. B. Development of methods micro- and nanolithography on oxide films of transitional metals [Razrabotka metodov mikro- i nanolitografii po oksidnym plenkam perekhodnykh metallov]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 11 (105). P. 82–94.
5. Pergament A. L., Kazakova E. L., Artyukhin D. V., Ol'shannikov L. I., Savchenko M. V. The physical bases for the development of sensors based on the switching effect in vanadium dioxide [Fizicheskie osnovy razrabotki datchikov na osnove effekta pereklyucheniya v dioksida vanadiya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 7 (101). P. 101–105.
6. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Chudnovskiy F. A. Semiconductor-to-metal phase transition and switching in VO_2 in strong electrical field [Fazovyy perekhod metall – poluprovodnik i pereklyucheniye v sil'nom elektricheskom pole]. *Pis'ma v GTF*. 1993. Vol. 19, Is. 20. P. 69–73.
7. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Kazakova E. L. Electrical switching in metal – semiconductor – metal structures based on hydrated vanadium pentaoxide [Elektricheskoe pereklyucheniye v strukturakh metall – dielektrik – metall na osnove gidratirovannogo pentaoksida vanadiya]. *Pis'ma v GTF*. 2000. Vol. 26, Is. 11. P. 6–12.
8. Berglund C. N., Jayaraman A. Hydrostatic-pressure dependence of the electronic properties of VO_2 near the semiconductor-metal transition temperature // *Phys. Rev.* 1969. Vol. 185. P. 1034–1039.
9. Gu Y., Cao J., Wu J., Chen L.-Q. Thermodynamics of strained vanadium dioxide single crystals // *Journal of applied physics*. 2010. Vol. 108. 083517.
10. Lazarovits B., Kim K., Haule K., Kotliar G. Effects of strain on the electronic structure of VO_2 // *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 81. 115117.
11. Mitranò M., Maroni B. et al. Anisotropic compression in the high-pressure regime of pure and chromium-doped vanadium dioxide // *Phys. Rev. B – Condensed matter and materials physics*. 2012. Vol. 85. № 18. 184108.
12. Pergament A. L., Boriskov P. P., Velichko A. A., Kuldin N. A. Switching effect and the metal-insulator transition in electric field // *Journal of physics and chemistry of solids*. 2010. Vol. 71. P. 874–879.
13. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich L. A. Anodic oxidation of vanadium and properties of vanadium oxide films // *Journal of physics: condensed matter*. 2004. Vol. 16, Is. 23. P. 4013–4024.
14. Ufert D.-K. Stress induced switching in VO_2 thin films // *Phys. Stat. Solidi (a)*. 1976. Vol. 34. P. 1083–1086.

Поступила в редакцию 29.12.2012