

06;12

Электрическое переключение в структурах металл–диэлектрик–металл на основе гидратированного пентаоксида ванадия

© Г.Б. Стефанович, А.Л. Пергамент, Е.Л. Казакова

Петрозаводский государственный университет

Поступило в Редакцию 14 декабря 1999 г.

Исследован эффект переключения в сэндвич-структурах на основе V_2O_5 -геля. Показано, что переключение с S -образной вольт-амперной характеристикой обусловлено переходом металл-изолятор в диоксиде ванадия. Фаза VO_2 образуется в исходной пленке в процессе электроформовки. Представлены результаты зависимости параметров переключения (в частности, порогового напряжения) от температуры и давления. Показана возможность использования данных переключателей в качестве высокоэффективных микросенсоров.

В последние годы возрос интерес к изучению таких объектов, как пленочные некристаллические полупроводники. В значительной мере это связано с развитием твердотельной электроники, активно использующей аморфные, стеклообразные и полимерные материалы в различных элементах и функциональных устройствах. Одним из способов получения таких материалов является "золь-гель" (sol-gel) технология. Гидратированные соединения ванадия, в том числе V_2O_5 -гель ($V_2O_5 \times nH_2O$), в свою очередь, представляют интерес с точки зрения возможностей их практического применения [1]. В частности, в планарных структурах на основе V_2O_5 -геля наблюдается эффект переключения с S -образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [1,2].

Эффект отрицательного дифференциального сопротивления потенциально перспективен для создания различных электронных устройств: переключателей, генераторов, чувствительных элементов сенсорных систем и др. Во многих случаях для технических приложений более перспективными оказываются не планарные, а сэндвич структуры типа металл/диэлектрик/металл (МДМ), что объясняется общей тенденцией к миниатюризации [3]. Причины данной тенденции очевидны — это повышение степени интеграции, снижение потребляемой (и рассеива-

емой) мощности и увеличение быстродействия. В литературе, однако, отсутствуют данные о реализации эффекта переключения в сэндвич-структурах на основе гидратированного пентаоксида ванадия. Поэтому целью данной работы было исследование переключения в системе M/V_2O_5 -гель/ M , а также изучение влияния внешних факторов (температуры, давления) на параметры переключения.

Разновидность золь-гель метода, используемая для получения оксида ванадия в данной работе, состоит в следующем. Порошок пентаоксида ванадия плавил в алундовом тигле в муфельной печи ($T_m = 670^\circ\text{C}$), расплав нагревали до $T = 900^\circ\text{C}$, выдерживали при данной температуре в течение 1 h и быстро выливали в воду при комнатной температуре. При этом получается однородный гелеобразный раствор, который хорошо смачивает подложку и растекается, образуя относительно однородную по толщине пленку. При высыхании раствора образуется ксерогель, т.е. гель с частично удаленной водой. Высушенные на воздухе слои представляют собой почти рентгеноаморфную фазу с $n = 1.6-1.8$ [1]. Они имеют квазиоднородную слоистую структуру, подобно полимерам, в которой слои V_2O_5 образованы спутанными волокнами и соединены молекулами воды. Толщина пленок ксерогеля V_2O_5 может варьироваться в широких пределах: от ~ 100 nm (при использовании, например, метода центрифугирования) до нескольких десятков μm .

Для получения МДМ-структур пленки геля толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ наносились на металлические слои, осажденные в вакууме на стеклянные подложки. В качестве верхнего электрода использовалась позолоченная проволока (рис. 1, *a*). Было установлено, что большое значение имеет выбор металла подслоя (нижнего электрода). Уже в работе [2] была отмечена деградация переключателей (планарных) при пропускании тока при использовании Al-и Cr-контактов. Мы использовали слои Al, Au (полученные термическим испарением) и V (магнетронное распыление). Для Al и V наблюдались химические реакции V_2O_5 -геля с данными металлами непосредственно при нанесении пленки, о чем свидетельствовало изменение цвета пленки и травление самих металлических подслоев, хотя переключение удавалось реализовать и в этом случае. Наиболее химически инертны были слои Au, которые и использовались в данной работе.

Сопротивление исходных структур составляло $\sim 10 \text{ M}\Omega$. После электроформовки ВАХ структуры становится S-образной (рис. 1, *b*), а сопротивление высокоомного состояния R_{off} уменьшается до $0.5 \text{ M}\Omega$.

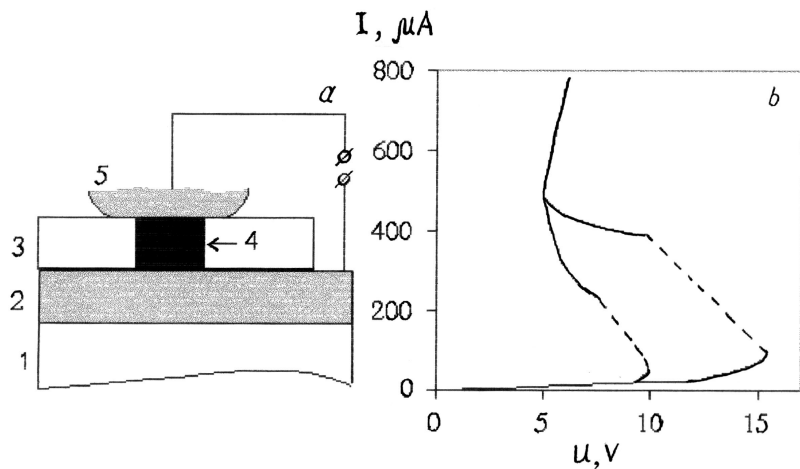


Рис. 1. *a* — МДМ-структура: 1 — стекло; 2 — слой золота; 3 — пленка V_2O_5 -геля; 4 — канал переключения (диоксид ванадия); 5 — прижимной контакт (Au); *b* — ВАХ-структуры после электроформовки; $T = 293$ К.

Процесс формовки качественно подобен аналогичным процессам в аморфных полупроводниках [4], сэндвич-структурах на основе анодных пленок VO_2 [5] и в планарных структурах на основе V_2O_5 -геля [1]. Пороговое напряжение V_{th} составляет 10–20 В при комнатной температуре и уменьшается с ростом температуры. На рис. 2 (кривая 1) показана зависимость $V_{th}(T)$, из которой видно что $V_{th} \rightarrow 0$ при $T \approx 330 - 340$ К. Эта температура практически совпадает с температурой перехода металл-изолятор (ПМИ) в VO_2 $T_i = 341$ К [6]. Таким образом, мы приходим к выводу, что переключение в МДМ-структурах на основе V_2O_5 -геля обусловлено фазовым переходом изолятор-металл в диоксиде ванадия. Зависимость $V_{th}(T)$ удовлетворительно описывается моделью "критической температуры" [6], характерной для материалов с ПМИ.

Канал переключения, полностью или частично состоящий из VO_2 (рис. 1, *a*), образуется в исходной пленке в результате электроформовки [1,2,5]. В отличие от чистых стехиометрических монокристаллов VO_2 , в которых скачок сопротивления при переходе достигает

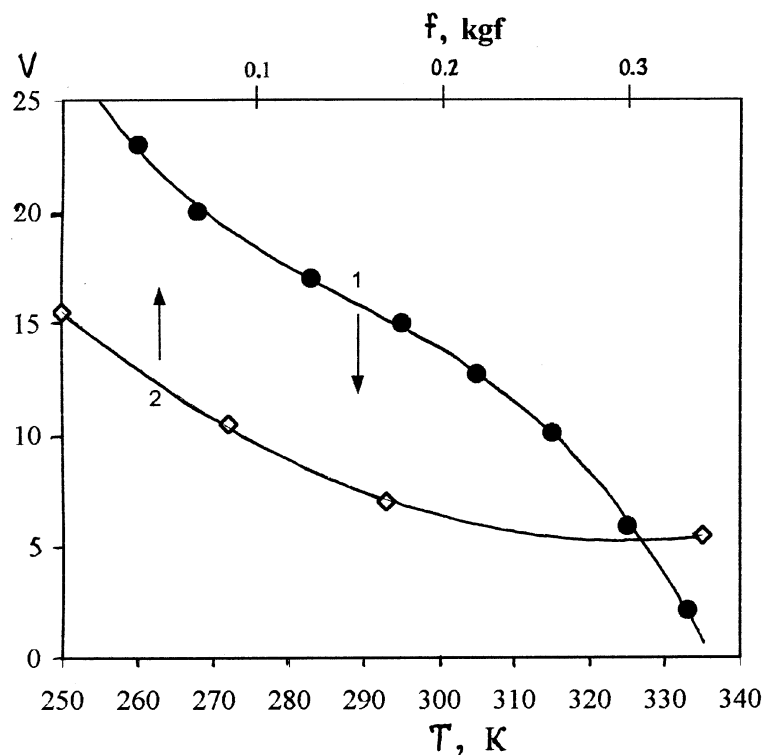


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения от температуры (1) и давления (приложенной нагрузки) при $T = 293\text{ K}$ (2).

5 порядков [6], в исследуемых переключателях скачок сопротивления составляет всего 1–2 порядка. Это говорит о том, что, скорее всего, канал переключения состоит не полностью из VO_2 , а фаза диоксида ванадия образуется при электроформовке в виде отдельных нитей или включений. Кроме того, подавление перехода может быть связано с нестехиометрией VO_2 в канале. Отметим, что процесс электроформовки может быть заменен "лазерной" формовкой [7], т. е. обработкой отдельных участков пленки лазерным излучением, что обеспечивает более стабильные и воспроизводимые параметры переключателей.

Далее мы исследовали влияние одноосного сжатия на параметры переключения. Давление на образец создавалось приложением нагрузки F непосредственно к прижимному контакту (верхнему электроду). Результаты измерений $V_{th}(F)$ представлены кривой 2 на рис. 2. С ростом давления p пороговое напряжение уменьшается; эта зависимость подобна зависимости $V_{th}(p)$ в аморфных полупроводниках [4]. Величина R_{off} тоже уменьшается с ростом F . Точно определить величину p из этих данных сложно, так как неизвестна площадь контакта. Грубая оценка (по диаметру D следа, оставляемого контактом на пленке, наблюдаемому в оптический микроскоп) для максимального значения $F = 0.34 \text{ kgf}$ дает $D \approx 50 \text{ }\mu\text{m}$ и $p_{\text{max}} = 4Fg/\pi D^2 \approx 2 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 20 \text{ kbar}$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

Необходимо отметить, что $T_t \text{VO}_2$ увеличивается с ростом p [6], что должно было бы приводить в общем случае к росту V_{th} . Однако параметры переключения (V_{th} , R_{off} и др.) определяются не только величиной T_t , но и размерами канала переключения, которые тоже изменяются при сжатии. Отметим также, что, как показано в [8], при одноосном сжатии (в отличие от всестороннего давления) температура перехода может и уменьшаться, а не расти. Кроме того, сопротивление полупроводниковой фазы VO_2 также сильно зависит от механических напряжений [9].

В заключение отметим прикладной аспект представленных результатов. Элементы с S -образной ВАХ потенциально перспективны для создания датчиков различных величин. Кроме того, генерация релаксационных колебаний в схемах, содержащих такие элементы, позволяет реализовать датчики с частотным выходом [5], так как частота колебаний зависит от V_{th} и, следовательно, от внешних воздействий. Достоинства метода частотного преобразования очевидны — это: высокая разрешающая способность, стабильность параметров, удобство обработки выходного сигнала и сопряжения с ЭВМ, возможность дистанционного измерения, высокий уровень помехозащищенности при передаче информации.

Зависимость пороговых характеристик сэндвич-переключателей на основе гидратированного пентаоксида от T и p указывает на возможность использования их в качестве тонкопленочных микросенсоров температуры и механических величин, связанных с давлением (сила, перемещение и т. п.). Подчеркнем, что для преобразователей давления "вертикальная" (МДМ) конфигурация более предпочтительна по срав-

нению с планарным вариантом, при котором для регистрации сигнала требуется изгиб подложки [8,9]. Проблема поиска новых материалов для создания микросенсоров весьма актуальна в последнее время (см., например, специальный выпуск журнала *Sensor Review* [10], полностью посвященный этой теме). Важными аспектами этой проблемы являются совместимость с современной интегральной технологией, возможность реализации распределенных сетей (матриц) датчиков и целый ряд других требований, специфических для каждого типа чувствительных элементов сенсорных систем [3,10]. Нам представляется, что соединения с переходом металл-изолятор (в особенности, оксиды ванадия) и переключающие элементы на их основе являются перспективными материалами для создания подобного типа датчиков.

Работа выполнена при поддержке программы "Университеты России — фундаментальные исследования", проект 2613.

Список литературы

- [1] *Бондаренко В., Волков В., Плешановис А.* // ФТТ. 1993. Т. 35. № 12. С. 3189–3195.
- [2] *Zhang J.G., Eklund P.C.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 2. P. 729–733.
- [3] *Pagnia H.* // Int. J. Electronics. 1992. V. 73. N 5. P. 819–825.
- [4] *Walsh P.J., Hall J.E., Nicolaidis R.* et al. // J. Non-Crystal. Solids. 1970. V. 2. P. 107–124.
- [5] *Пергамент А.Л., Стефанович Г.Б., Чудновский Ф.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 20. С. 69–73.
- [6] *Чудновский Ф.А.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. № 8. С. 1561–1583; *Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А.* Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
- [7] *Chudnovskii F.A., Kikalov D.O., Pergament A.L.* et al. // Phys. Status Solidi (a). 1999. V. 172. P. 391–395.
- [8] *Ufert K-D.* // Phys. Status Solidi (a). 1976. V. 34. P. K83–K86.
- [9] *Bowman R.M., Gregg J.M.* // J. Mater. Sci. 1998. V. 9. P. 187–191.
- [10] *Sensor Review.* 1999. V. 19. Issue 1.