

05.3;06.2

©1993

## ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ПОЛУПРОВОДНИК–МЕТАЛЛ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В $VO_2$ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*А.Л.Пергамент, Г.Б.Стефанович, Ф.А.Чудновский*

Материалы, обладающие фазовым переходом металл-полупроводник (ФПМП), например, соединения  $3d$ -,  $4d$ - и  $5f$ -элементов [1], представляют значительный интерес, в том числе с точки зрения возможности создания на их основе переключающих элементов с вольт-амперной характеристикой (ВАХ)  $S$ -типа, в которых внутренняя положительная обратная связь по току обеспечивается увеличением электропроводности при переходе в металлическую фазу. В частности, в двуокиси ванадия температура ФПМП  $T_t = 68^\circ \text{C}$ , а скачок проводимости  $\sigma$  при переходе достигает пяти порядков. Именно резкий рост  $\sigma$  при джоулевым нагреве образца протекающим током до  $T = T_t$  является причиной переключения в тонкопленочных планарных элементах на основе  $VO_2$  [1].

В [2,3] сообщалось о наблюдении ФПМП в аморфных пленках  $VO_2$ , получаемых анодным окислением, а в [4] показано, что в них может быть реализован эффект переключения в сэндвич-структурах  $V-VO_2$  — металл. При переключении в таких структурах ФПМП развивается в существенно неравновесных условиях — в сильном электрическом поле. Поэтому в данном случае можно ожидать проявления влияния электронных эффектов на переход. Таким образом, исследование переключения в сэндвич-структурах на основе анодных окисных пленок (АОП)  $VO_2$  может дать дополнительную информацию о природе перехода металл-полупроводник в диоксиде ванадия.

В данной работе исследовано переключение в сэндвич-структурах  $V$  — АОП  $VO_2$  — металл в широком диапазоне температур. Толщина пленок, полученных по методике [2], составляла  $d = 1000-2000 \text{ \AA}$ , а верхний электрод формировался напылением  $Al$  через маску. В такой структуре электрической формовкой [2] создавался канал переключения, представляющий собой кристаллическую  $VO_2$  с  $S$ -образной ВАХ (рис. 1,а). Сопротивление канала при комнатной температуре различается для разных образцов и лежит в пре-

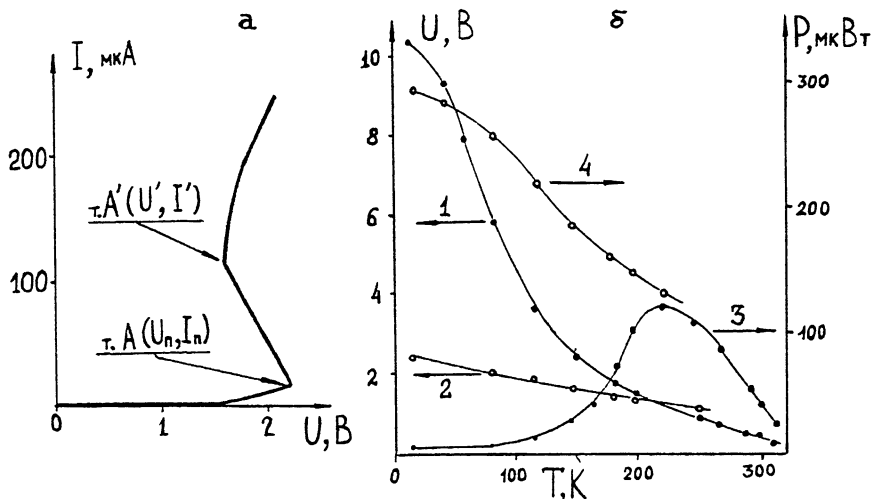


Рис. 1. (а) ВАХ структуры V-V<sub>2</sub>-Al, T = 152 К; (б) — температурные зависимости порогового напряжения U<sub>n</sub> (1), U' (2), пороговой мощности P<sub>n</sub> = U<sub>n</sub> · I<sub>n</sub> (3) и P' = U' · I' (4).

делах 10–200 кОм. Оценка радиуса канала переключения, исходя из его сопротивления, дает r<sub>к</sub> = 0.5 – 2 мкм (если d = 1500 Å, σ = 10<sup>-2</sup> Ом<sup>-1</sup> · см<sup>-1</sup> [1]).

На рис. 1, б изображены температурные зависимости параметров переключения для одного из образцов. Анализ этих зависимостей позволяет выделить следующие характерные моменты.

1) Пороговое напряжение уменьшается с ростом температуры и при  $T \sim T_t U_n \rightarrow 0$ . Необходимо отметить, что для некоторых образцов при определенной  $T < T_t$  наблюдалось вырождение на ВАХ участка отрицательного дифференциального сопротивления (хотя высокоомный и низкоомный участки были различимы), что снижало точность определения U<sub>n</sub> в данной области температур. В тех случаях, когда U<sub>n</sub>(T) можно было измерить с достаточной точностью, данная зависимость при T > 300 К удовлетворительно описывалась соотношением

$$U_n^2 = \lambda \cdot (T_m - T), \quad (1)$$

где λ = const, а T<sub>m</sub> = 320–340 К, т.е. совпадает с T<sub>t</sub> VO<sub>2</sub>. Это указывает на связь переключения с ФПМП, а соотношение (1) является следствием уравнения теплового баланса и характерно для теплового механизма переключения в модели критической температуры [1].

2) Пороговый ток падает с 100 до 0.5 мкА, а  $I'$  увеличивается от  $\sim 100$  до 130 мкА при понижении  $T$  от 300 до 15 К.

3)  $P'$  растет с понижением температуры, а зависимость  $P_n(T)$  немонотонная: в высокотемпературной области  $P_n$  почти линейно зависит от  $T$ , а затем, проходя через максимум (при  $T = 200 - 250$  К для разных образцов), резко падает.

4) Сопротивление высокоомного состояния суперлинейно растет при охлаждении, однако зависимость  $R(T)$  не линеаризуется в координатах  $\ln R - T^{-1}$ . Наклон этой зависимости при  $T \sim 300$  К дает "энергию активации"  $W_R \approx 0.2$  эВ. Сопротивление токового шнура металлической фазы (т.е. дифференциальное сопротивление низкоомного состояния в т.  $A'$  ВАХ) составляет 2-4 кОм и слабо зависит от  $T$ .

Рассмотрим теперь возможность реализации в сэндвич-структурах  $V-V)_2$  — металл того или иного механизма переключения. При  $T \rightarrow T_t$  справедлива модель критической температуры. Однако в этом случае  $U_n$ , а следовательно, и поле в образце стремится к нулю, т.е. условия развития ФМПП приближаются к равновесным. Поэтому нет оснований утверждать, что чисто тепловой механизм переключения реализуется и при низких температурах, когда  $E \sim 10^6$  В/см (для  $U = U_n \approx 10$  В и  $d = 100 \text{ \AA}$ ). Отклонения в температурных зависимостях параметров переключения от поведения, описываемого простой тепловой моделью, можно было бы (хотя бы качественно) объяснить неоднородным распределением  $T$  в канале и зависимостью от температуры коэффициента  $\lambda$ . Однако соотношение между  $P_n$  и  $P'$  при низких температурах не может быть обосновано количественно без выхода за рамки тепловой модели. Дело в том, что при переходе на ВАХ от т.  $A$  к т.  $A'$  величина теплоотода не должна существенно изменяться, т.к. теплопроводность  $\kappa$   $\text{VO}_2$  при переходе из полупроводниковой в металлическую фазу изменяется не более чем на 10% [1]. Аналогично (1), для мощности можно записать:

$$P_n = \alpha \cdot (T_n - T)$$

$$P' = \alpha \cdot (T' - T), \quad (2)$$

где  $T_n$  и  $T'$  — температуры в центре канала при переключении в полупроводниковой и металлической фазах соответственно (т.е. в точках  $A$  и  $A'$ ), а параметр  $\alpha$  пропорционален объему области тепловыделения  $V = \pi \cdot r_k^2 d$  и коэффициенту теплопередачи ( $\sim \kappa$ ). Из (2):

$$T' = T + \frac{P'}{P_n} (T_n - T). \quad (3)$$

Если считать, что  $T_n = T_t = 340$  К, то для  $T = 15$  К из данных рис. 1 ( $P' = 300$ ,  $P_n = 5$  мкВт) получим  $T' \sim 2 \cdot 10^4$  К. Очевидно, что такая ситуация совершенно нереальна. Численные оценки показывают, что учет распределения температуры в канале несколько понизит (а учет шнурования тока в открытом состоянии, т.е. эффективного уменьшения  $V$  в (2) для  $P'$  — повысит) полученное значение  $T'$ , но незначительно. Если же взять  $T' \sim T_t = 340$  К, то для  $T$  канала перед переключением (т. А) получим из (2):  $T_n \sim 20$  К, т.е. в поле  $10^6$  В/см переключение развивается уже при достижении температуры в канале  $T_n \ll 340$  К. Можно предположить, что это является следствием понижения температуры ФПМП в  $\text{VO}_2$  в сильных полях.

Необходимо отметить, что электрическое поле вряд ли может непосредственно воздействовать на ФПМП, но при переключении оно может быть причиной генерации избыточной концентрации неравновесных носителей заряда, например, за счет сильнополевой ионизации типа эффекта Пула-Френкеля (с этим же, кстати, может быть связано и то, что  $W_R$  меньше энергии активации  $\text{VO}_2$ , определенной из  $\sigma(T)$  в слабых полях  $\sim 0.5$  эВ [1]). А влияние концентрации

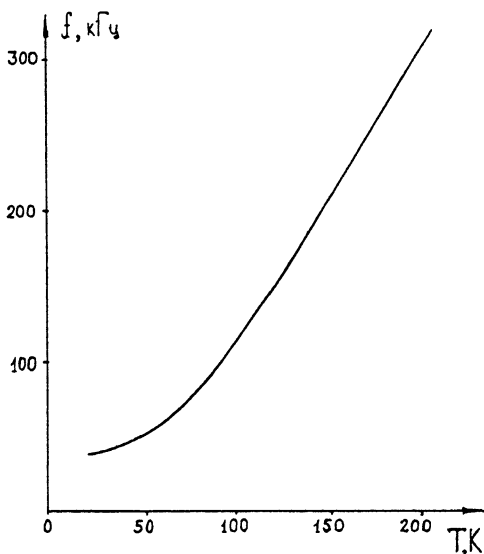


Рис. 2. Зависимость частоты генерации  $\text{VO}_2$  — сэндвич-переключателя ( $U_n = 3.15$  В при  $T = 15$  К) от температуры. Нагрузочное сопротивление — 600 кОм, постоянное смещение — 40 В. Эквивалентная параллельная емкость, включающая собственную емкость структуры и емкость измерительного тракта, составляет порядка  $10^{-9}$  Ф.

онных эффектов на ФПМП представляется не только вполне возможным теоретически (особенно если межэлектронные корреляции Мотта-Хаббарда играют важную роль в механизме перехода в  $\text{VO}_2$  [3]), но и экспериментально подтверждается селективностью фотовозбуждения ФПМП при инициировании его пикосекундными лазерными импульсами [5].

В заключение остановимся на прикладном аспекте данной работы. В [4] указывалось на перспективность структур на основе АОП  $\text{VO}_2$  в качестве переключателей,  $S$ -диодов и элементов памяти ввиду их низкой пороговой мощности и высокого быстродействия. Представленные результаты показывают, что такие структуры могут работать вплоть до гелиевых температур. При этом их временные параметры не ухудшаются, а  $P_n$  существенно снижается (рис. 1). Кроме того, работа переключателей в режиме генерации релаксационных колебаний позволяет реализовать тонкопленочный миниатюрный ( $\tau_k \sim 1$  мкм) датчик температуры с частотным выходом. Рабочий диапазон температур такого датчика будет от 10 (а может быть, и меньше) до 200–300 К, а чувствительность  $\sim 10^3$  Гц/К (см. рис. 2).

Таким образом, показано, что эффект переключения в сэндвич-структурах на основе  $\text{VO}_2$  (в отличие от планарных переключателей) реализуется при низких температурах. На основе анализа температурных зависимостей параметров переключения сделан вывод о возможном влиянии полевых (концентрационных) эффектов на ФПМП в двуокиси ванадия. Показана возможность практического использования данных структур в качестве датчика температуры.

### Список литературы

- [1] Бугаев А.А., Затарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1978. 183 с.
- [2] Малиненко В.П., Стефанович Г.Б., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 12. С. 754–756.
- [3] Chudnovskii F.A., Stefanovich G.B. // J. Sol. State Chem. 1992. V. 98. P. 137–145.
- [4] Затарченя Б.П., Малиненко В.П., Стефанович Г.Б., Терман М.Ю., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 2. С. 108–110.
- [5] Бугаев А.А., Гудялис В.В., Затарченя Б.П., Чудновский Ф.А. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. В. 8. С. 452–455.

Петрозаводский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
7 августа 1993 г.