



# Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9  
İyun  
June 2005  
Июнь

səhifə  
page 859-862  
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

## ЭФФЕКТ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И МЕХАНИЗМ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Ag<sub>2</sub>Te-Ag

АЛЕКПЕРОВА Ш.М., ГАДЖИЕВА Г.С., АХМЕДОВ И.А.

*Институт Физики НАН Азербайджанской Республики*

*Баку, пр. Г. Джавида, 33.*

*E-mail: [sh\\_alekperova@physcs.ab.az](mailto:sh_alekperova@physcs.ab.az)*

В интервале 77-413К изучены явление полярно-зависимого эффекта переключения и механизм токопрохождения в тонкопленочной структуре Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te-Ag. Вольт -амперные характеристики сняты в статическом, динамическом и импульсном режимах. Из переходных характеристик определены время переключения и задержки:  $10^{-6} \div 10^{-5}$ ; и  $10^{-9} \div 10^{-8}$  .сек, соответственно. Проведен анализ механизма токопрохождения в рамках моделей Шоттки, Фаулера-Нордгейма и Френкеля. Установлено, что до 270 К прохождение тока через данную структуру обусловлено туннелированием, а с 270 К и выше – надбарьерной эмиссией Шоттки.

Исследование эффекта электрического переключения в структурах с туннельно-тонким диэлектриком [1-3] открывает новые пути создания различного рода управляющих и функциональных устройств переключателей, элементов постоянной репрограммируемой памяти. МДП (металл-диэлектрик – полупроводник)- структуры создаются на основе целого ряда диэлектриков и полупроводниковых соединений. В последние годы в технологии МДП-структур наряду с окислами Si, Ti, Ta, Nb применяется окись алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), которая мало чувствительна к внешним воздействиям, химически не реагирует с контактирующими материалами, обладает большой радиационной стойкостью. Благоприятное сочетание свойств Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и параметров Ag<sub>2</sub>Te (сохранение стабильного стехиометрического состава до и после термического напыления, не высокая температура плавления) делает перспективными их использование в МДП – структурах. В качестве подложки для напыления использован ситалл марки СТ 50-I, а трафаретов – танталовые маски, позволяющие получать одновременно от 24 до 48 идентичных образцов с разными рабочими площадями (0,56; 1,07; 3,55; 8,42мм<sup>2</sup>). Напылением в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст получены пленки Al, на которых экспонированием на воздухе создавалась окись алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), толщиной 30÷80Å (в зависимости от длительности экспонирования). Толщина окисла определялась из

ёмкостных измерений Полученный слой окисла был сплошным [4,5]. Затем, на поверхность Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мм..рт.ст напылялся слой Ag<sub>2</sub>Te (0,4-0,5) мк и верхний электрод из серебра Ag - (0,3÷0,5) мк.

На тонкопленочных структурах Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te-Ag изучены: эффект переключения и памяти, явление отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), а также в рамках различных теорий механизм токопрохождения. Исследования проводились в статическом, динамическом и импульсном режимах в интервале 77÷450К Осциллограммы (ВАХ) снимались на характернографе ПНХТ-1. Типичная статическая ВАХ структуры Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te-Ag и её осциллограмма приведены на рис.1а. (Толщины слоёв: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>~60Å, Ag~0,3 мкм, Ag<sub>2</sub>Te~0,35мкм, площадь ~0,7 мм<sup>2</sup>).

Свеженанпыленный образец при полярности (-) на Al электроде находится в низкоомном состоянии до 0,5В, ток в максимуме ~80 мА При увеличении напряжения ток скачком падает до 0! мА .Структура воспроизводимо и многократно переключается из одного состояния в другое и обратно как на постоянном, так и переменном и импульсном напряжениях. Причем конечное состояние сохраняется сколь угодно долго как под напряжением, так и без него. ВАХ симметрична при обоих полярностях приложенного напряжения, что указывает на отсутствие каких-либо, заметно

выраженных контактных явлений на переходах  $Ag_2Te-Ag$  и  $Al_2O_3-Al$ . Поэтому пространственные заряды, возникающие в них при подаче внешнего поля можно считать симметричными.

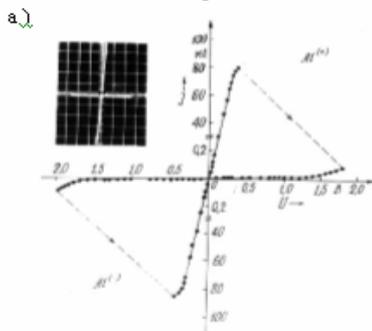


Рис.1(а). ВАХ структуры  $Al-Al_2O_3-Ag_2Te-Ag$  при 300K (вставка (а) - масштаб по горизонтали - 1В/дел, по вертикали - 20 мА/дел)

Исследование температурных зависимостей ВАХ структур (рис.1б) показало, что эффект переключения имеет место в интервале от 77 К до температуры, близкой к температуре фазового перехода  $Ag_2Te$  (~413 К), при которой область ОС на ВАХ полностью исчезает, т.е. МДП - структура выключается. Крутизна низкоомной ветви ВАХ практически с температурой не меняется, так как электроны беспрепятственно туннелируют через тонкий слой  $Al_2O_3$  (30÷60Å). Наклон низкоомной ветви ВАХ обусловлен в основном, последовательным сопротивлением слоя сильнолегированного n-  $Ag_2Te$  ( $n = 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) в МОП структуре, что несколько отличает (по параметрам) эту структуру от МДП структуры на  $Ag_2Se$ .

В области низких температур (77÷270K) зависимость  $U_{вкл}$  от температуры слабая, в то время как при относительно высоких температурах (начиная с 270 К) - эта зависимость экспоненциальна. Температурный коэффициент напряжения включения составляет ~ 0,027 В /град. Во всем интервале температур сопротивление низкоомного состояния практически не меняется.

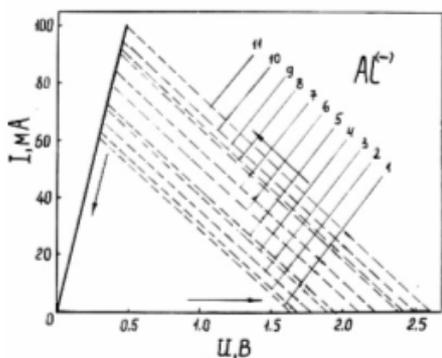


Рис.1(б) ВАХ структур при различных температурах: 1-77; 2-213; 3-273; 4-293; 5-323; 6-348; 7-363, 8-373; 9-393; 10-413 (К).

Из ВАХ (полярность приложенного напряжения минус на Al), представленной в логарифмических

координатах (рис.2), следует, что на высокоомной части ВАХ (кривая 1) при малых напряжениях ( $0 \div 0,2$  В) ток изменяется по закону Ома, далее следует отклонение от линейности, вплоть до напряжения срыва. В области, близкой к точке срыва, наблюдается суперлинейная зависимость  $I \sim U^n$ , где  $n=4 \div 8$ . Низкоомная ветвь ВАХ (кривая 2) состоит из омического участка и малой области с сублинейной зависимостью  $I_f(U)$ , которая переходит в линейную, если образцы выдерживаются под постоянным напряжением.

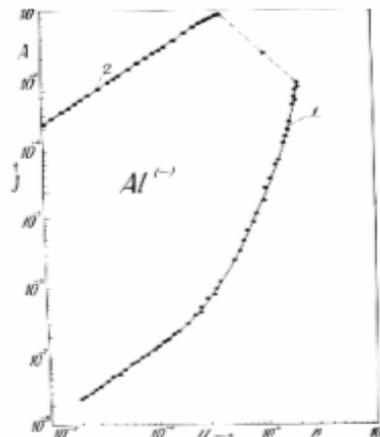


Рис.2. Статические ВАХ структуры в полном логарифмическом масштабе при 270K 1- высокоомная ветвь; 2- низкоомная ветвь ВАХ.

Поскольку толщина окисла мала, то наиболее вероятными механизмами проводимости могут быть как туннельная эмиссия, так и эмиссия Шоттки.. Исходя из этого, низкоомная ветвь ВАХ была представлена как в координатах  $\lg I \sim U^{1/2}$ , характерных для надбарьерной Шоттковской эмиссии, так и в координатах  $\lg I \sim 1/U$  и  $\lg I / U^2 \sim 1/U$ , характерных для туннельной эмиссии через треугольный и трапецидальный барьеры, соответственно (рис.3; кривая 1 соответствует зависимости  $\lg I \sim U^{1/2}$ , 2-  $\lg I \sim 1/U$ , 3-  $\lg I / U^2 \sim 1/U$ ). Как видно, изменение тока через структуру с приложенным напряжением описывается законом  $\exp(U^{1/2})$  лучше, чем зависимостью Фаулера - Нордгейма  $\exp(-1/U)$ , откуда следует, что на высокоомной ветви ВАХ при  $0,12 \div 0,2$ В имеет место шоттковский механизм проводимости, для которого плотность тока имеет вид:

$$j \sim A T^2 \exp \left[ \frac{q(\phi - \sqrt{qE/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d})}{kT} \right] \quad (1)$$

где  $A$  - постоянная Ричардсона, равная  $120 \text{ А/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ;  $T$ - температура (К);  $\epsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость изолятора;  $k$  - постоянная Больцмана;  $\epsilon_0$ -постоянная вакуума;  $d$ -толщина диэлектрика;  $\phi$ - высота барьера на границах диэлектрика;  $E$ -напряженность электрического поля;  $q$ - заряд электрона.

Наклон зависимости  $\lg I \sim U^{1/2}$  ( $\beta_s$ ) (рис.3) оказался равным ~ 3,36  $\text{В}^{-1/2}$ . Вычисление коэффициента  $\beta_s$  по формуле:

$$\beta_s = \frac{0,43q^{3/2}}{kT\sqrt{4\pi\epsilon_r\epsilon_0d}}, \quad (2)$$

которая следует из выражения (1), дало значение  $\beta_s$  около  $3,32 \text{ В}^{-1/2}$ , близкое к его экспериментальному значению, что подтверждает наличие механизма Шоттки.

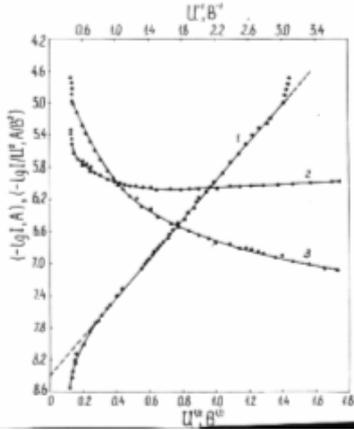


Рис.3. Высокая ветвь ВАХ структуры в координатах  $\lg I \sim U^{1/2}$  (кривая 1),  $\lg I \sim 1/U$  (кривая 2) и  $\lg I \sim U^{-2}$  (кривая 3) при 270К

Это дает возможность из зависимости  $\lg I \sim U^{1/2}$  по формуле:

$$q\phi = -\frac{kT}{0,43} \lg \frac{I}{SAT^2} \quad (3)$$

определить высоту потенциального барьера ( $q\phi = \Phi$ ) на границах окиси алюминия. Здесь  $S$  – площадь контакта,  $I$  – величина тока отсечки, которую можно найти экстраполяцией линейной части ВАХ в координатах  $\lg I \sim U^{1/2}$  (рис.3) к нулевому напряжению до пересечения с осью токов. Подстановка числовых значений величин в формулу (3) дает для  $\Phi$  значения 0,69эВ на границе  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$  и 0, 62эВ на границе  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ag}_2\text{Te}$ . Установленные закономерности токопрохождения имеют место и в структурах с рабочими площадями 0,56; 3,55 и 8,42  $\text{мм}^2$ , а также в структурах, полученных на подложках разных типов (окись кремния).

Одной из важнейших особенностей шоттковской эмиссии, как это следует из соотношения (1), является ее сильная температурная зависимость. Поэтому была исследована и температурная зависимость ВАХ структур (рис.4).

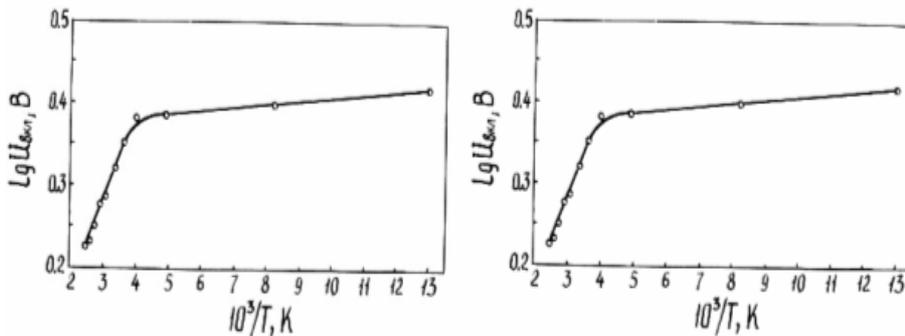


Рис.5. Температурная зависимость  $\beta_s$  наклона графика  $\lg I \sim U^{1/2}$ .

Экстраполяцией прямой  $\beta_s \sim 1/T$  (рис.5) показано, что она проходит через начало координат. Такое температурное изменение  $\beta_s$  хорошо согласуется с теорией Шоттки. Из изложенного следует, что при  $T \geq 270\text{К}$  в структурах наблюдается надбарьерная эмиссия Шоттки в пленку окиси алюминия, тогда как при  $T < 270\text{К}$  наблюдается туннельный механизм прохождения тока.

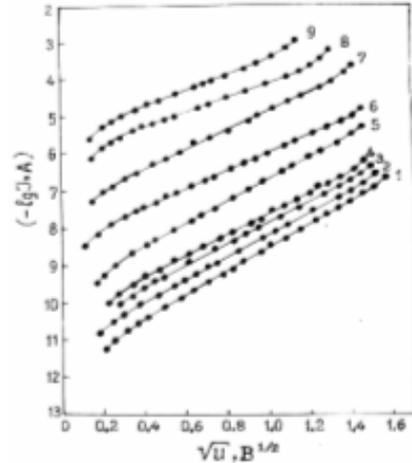


Рис.4. Высокоомная ветвь в координатах Шоттки при Т,К: 1-77; 2-213; 3-273; 4-293; 5-323; 6-348; 7-363, 8-373; 9-393.

Как было показано ранее, в исходном состоянии образцы обладают высоким сопротивлением при любой полярности приложенного напряжения, но после подачи на них напряжения полярностью минус на алюминиевом электроде определенной величины, структуры переключаются из высокоомного состояния в низкоомное. При этом характерные параметры переключения  $U_{\text{вкл}}$ ,  $I_{\text{вкл}}$  – напряжение и ток, при достижении которых происходит переход образца из высокоомного в низкоомное состояние и  $U_{\text{ост}}$ ,  $I_{\text{ост}}$  – напряжение, поддерживающее структуру в низкоомном состоянии, и ток, проходящий через образец в низкоомном состоянии – обычно не превышают – 3,2В; 1,0мА; и 1В; 100мА, соответственно. Для повторного перевода образца в исходное высокоомное состояние достаточно изменить полярность приложенного напряжения (+) на алюминии.

Наблюдаемый эффект переключения является запоминающимся: образцы сохраняют свое конечное состояние сколь угодно долго как при нулевом смещении, так и под напряжением.

Описанный эффект переключения качественно имеет место и в МДП – структурах с верхним электродом из других металлов, например Al, In, Cu, Sn. Однако, стабильность и воспроизводимость переключающих элементов зависит от металла верхнего электрода. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве верхнего электрода серебра, что, по-видимому, обусловлено ещё и тем, что переходное сопротивление халькогенид серебра – серебро значительно меньше, чем с другими металлами. Рассчитаны высоты потенциальных барьеров на границе Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te (0,69 и 0,62 эВ) соответственно. На рис.6. и 7 представлены осциллограммы ВАХ в динамическом и импульсном режимах (частота 50 Гц, длительность импульса - 10 мкс). Из переходных характеристик определены время задержки (~10<sup>-6</sup>–10<sup>-5</sup>с) и время включения (~10<sup>-9</sup>-10<sup>-8</sup>с). Слабая зависимость U<sub>вкл</sub> от температуры в области 77÷270К, а также возможность управления параметрами переключения позволяет предположить, что эффект переключения в исследованных структурах Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te-Ag инициируются электронными процессами.

зависимость U<sub>вкл</sub> от температуры в интервале 270÷415К, по-видимому, обусловлено ударной ионизацией ловушечных уровней, расположенных в запрещенной зоне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Действительно, с увеличением температуры U<sub>вкл</sub>, хотя и уменьшается, соответствующий ток увеличивается. При напряжениях, близких к U<sub>вкл</sub>, благодаря малой толщине окисла (<80Å) электрическое поле становится достаточным для ускорения электронов и ударной ионизации.

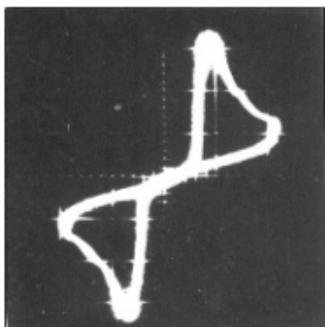


Рис.6 ВАХ структуры в динамическом режиме при 300К (частота 50 Гц).

Установлено, что в интервале 77-413К в тонкопленочных МДП структурах Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>Te-Ag имеет место полярно-зависимый эффект переключения и памяти. Эффект переключения,

модуляция проводимости низкоомного состояния инициированы электронными процессами. Механизм токопрохождения через структуру анализирован в рамках моделей Шоттки, Фаулера-Нордгейма и Френкеля. Установлено, что в температурном интервале 77-270К протекание тока через структуру обусловлено туннелированием, а начиная с ~270К - надбарьерной эмиссией Шоттки. Из переходных характеристик определены время задержки и время включения; 10<sup>-6</sup>-10<sup>-5</sup> сек и ~10<sup>-9</sup>- 10<sup>-8</sup> сек, соответственно (рис.7). Одним из путей накопления зарядов является туннельный переход электронов от (-) электрода (катода) через туннельно-тонкий барьер -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> между металлом и Ag<sub>2</sub>Te. Инжекционный механизм обеспечивает протекание больших токов в включенном состоянии.

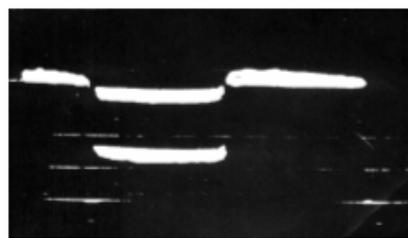


Рис.7 Отклик структуры на прямоугольный импульс (частота- 50 Гц, длительность- 10 мкс при 270К.

Повышение поля в приэлектродных областях приводит к увеличению инжекции и к расширению проводящей зоны (низкоомная ветвь). Переключение наступает, когда ловушки полностью заполнены по всему элементу и заряды нейтрализованы (N-образный участок) При перемене полярности в пограничной области с диэлектриком появляется обедненная область пространственного заряда, которая как бы увеличивает эффективную толщину диэлектрического слоя. В сильном поле ~10<sup>7</sup>В/см элемент переходит в проводящее состояние (S-участок). Барьер мешает возвращению электронов и возникает состояние «запоминания» Образцы находятся в состоянии с высоким сопротивлением (10<sup>4</sup>÷10<sup>5</sup>)Ом пока электрическое напряжение, полярность которого соответствует обеднению поверхности полупроводника основными носителями не превысит пороговое значение. При превышении порогового напряжения происходит резкое уменьшение сопротивления образца и переключение его в низкоомное состояние с сопротивлением (4÷6) Ом.

[1]. Г.А. Филаретов, В.И.Стафеев, Ю.З. Бубнов. ФТП. Том1, в.9(1967)  
 [2]. S.R.Ovshinsky. Phys. Rev.Lett.21. 1450. (1968)  
 [3]. А.А. Рожков,М.Б. Шалимова. ФТП.Том 32, в.11 (1998)  
 [4]. Андреев Г.Б., Дейненко А.С., Малахов И.Я., Сорокин П.В., Таранов А.Я. Получение тонких

пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Приборы и техника эксперимента, N 6, 149, 1961  
 [5]. Hrach R., Hubicke Z, Bohac J, The influence of technological conditions on electrical properties of MIM systems, Czechosl. J.Phys.,B24,12, 1369, 1974.