

## ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$

Ш.Д. Султонов, Н.Х. Юлдашев

Ферганский политехнический институт

Узбекистан

Поступила в редакцию 21.04.2009

Исследованы тензорезистивные свойства поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  при статических и циклических деформациях. Показано, что линейный участок ВАХ по напряжению (0; 5) В в результате действия  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов деформаций расширяется до (0; 12) В, а ТКС – изменяется от  $\alpha = -5,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при  $N = 0$  до  $\alpha = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Согласно феноменологическому расчету значение  $T_{\text{min}}$ , при котором  $\alpha = 0$ , увеличивается с ростом  $N$ .

### ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения технического применения тонких пленок в качестве тензочувствительного элемента их вольт-амперная характеристика (ВАХ) позволяет судить об энергетических возможностях тензорезисторов, если под этим понимать ту максимальную мощность, которую допустимо выделить на тензорезисторе при заданных условиях их эксплуатации. Это обусловлено тем, что полупроводниковые поликристаллические пленки очень чувствительны к свету и изменениям температуры [1], а при пропускании больших токов через пленочные образцы может происходить их джоулев нагрев, что соответствующим образом отразится на их рабочих параметрах. В частности, он приводит к нелинейной ВАХ и, тем самым, к увеличению погрешности в показаниях приборов. В настоящей работе исследовано влияние статических и циклических знакопеременных деформаций (ЦЗПД) на ВАХ и температурную зависимость сопротивления тензорезистивных пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ , применяемых как датчика накопления усталостных повреждений (ДНУП) [2 – 4].

### МЕТОДИКА

Поликристаллические пленки  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  с площадью  $5 \times 20 \text{ мм}^2$  получались методом термического испарения в вакууме с давлением остаточных паров  $(1 \div 3) \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  из смеси порошков  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  в соотношении  $x:(1-x)$  моль%. Температура подложки из полиимида ПМ-1 варьировалась в интервале  $T_{\text{п}} = 323 \div 423 \text{ К}$ , а скорость роста

пленок –  $W = 150 \div 450 \text{ Å/с}$ . Наиболее тензочувствительные ( $K \approx 10^3$  отн. ед.) пленки получались при толщинах  $d = 3 \div 5 \text{ мкм}$ ,  $T_{\text{п}} = 363 \text{ К}$ ,  $W = 200 \text{ Å/с}$  и при значении  $x = 0,3$ . Методика измерения деформационных характеристик пленок была выбрана также как и в работах [2, 3]. Образцы не подвергались предварительной термической обработке. Свежеприготовленные пленки обладали неустойчивым коэффициентом  $K$  тензочувствительности, обусловленном наличием сильных неравновесных внутренних механических напряжений (ВМН) [3]. С ростом циклов  $N$  ЦЗПД величина  $K$  монотонно уменьшается, что говорит о возможности использования изготовленных пленок в качестве ДНУП. Электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования [1, 2] показали, что выращенные слои обладают поликристаллической столбчатой структурой. Размеры отдельных кристаллитов составили  $1 \div 1,5 \text{ мкм}$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

#### 1. ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ЦЗПД НА ВАХ ПЛЕНОК $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$

Влияние статической деформации на ВАХ пленки в интервале значений относительных деформаций от 0 до  $\pm 10^{-3}$  отн. ед. показано на рис. 1. Видно, что ВАХ исследуемых образцов линейны в области относительно малых напряжений. С увеличением механического напряжения линейность зависимости

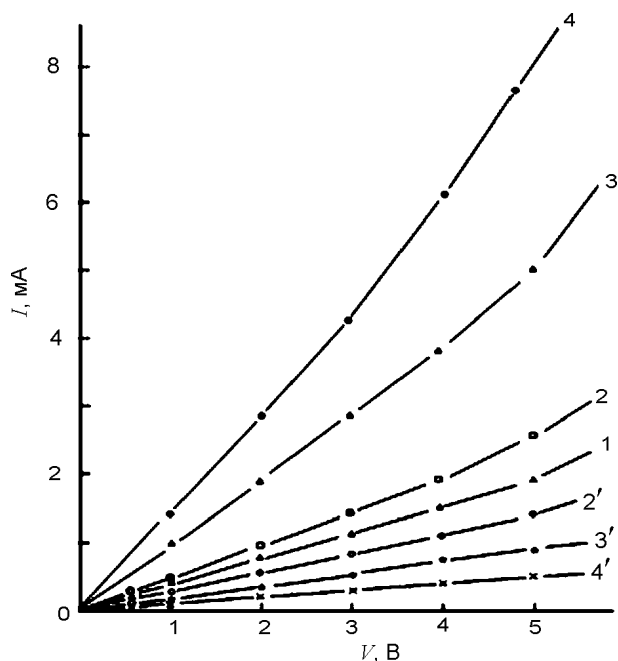


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  на подложке полиимида ПМ-I, под действием статической деформации:  $\epsilon \cdot 10^3 = 0$  (кривая 1),  $\pm 0,3$  (2, 2'),  $\pm 0,6$  (3, 3'),  $\pm 0,9$  (4, 4'). Кривые 2 – 4 сняты при сжатии, 2' – 4' – при растяжении.  $T = 300$  К.

тока от напряжения нарушается, что происходит, например, в недеформированном состоянии при  $V_n = (4 \div 5)$  В (кривая 1). Это минимальное – пороговое напряжение, при котором начинается нелинейность ВАХ, существенно зависит от знака и амплитуды относительной деформации: с ростом  $\epsilon$  при деформации сжатия  $V_n$  уменьшается до  $(2 \div 3)$  В (кривые 2 – 4), а при растяжении – увеличивается до  $(5 \div 6)$  В (кривые 2' – 4'), что обусловлено наличием предварительных ВМН [4].

Результаты исследования ВАХ пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ , подвергавшихся ЦЗПД, представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что ВАХ пленки существенно изменяются после воздействия циклических деформаций ( $N = 5 \cdot 10^5$ ). На всех кривых, снятых при различных значениях относительной деформации  $\epsilon$ , четко прослеживается увеличение сопротивления пленки и значения напряжения  $V_n$  перехода к нелинейному участку ВАХ. Действие  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов знакопеременных деформаций приводит к увеличению  $V_n$  при отсутствии деформации на пленке до  $(10 \div 12)$  В (ср. кривые 1 на рис. 1 и 2), т.е. почти в 2 – 3 раза.

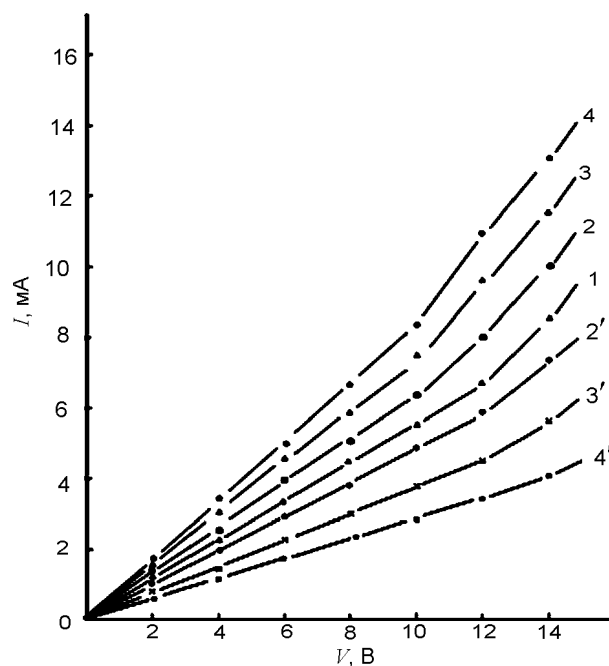


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  после воздействия  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов знакопеременных нагружений. Кривые 1 – 4 и 2' – 4' соответствуют кривым 1 – 4 и 2' – 4' рис. 1.

Поскольку при действии циклических деформаций в результате истирания контактирующих поверхностей кристаллических зерен увеличиваются расстояния между ними, то это и приводит к расширению линейного участка ВАХ пленки до значений напряжения  $(8 \div 10)$  В при растяжении (кривые 2 – 4 на рис. 2) и  $(12 \div 14)$  В при сжатии (2' – 4'). Естественно, что тензометрические измерения необходимо производить в линейной области ВАХ. Следует учитывать возможности возникновения погрешности, связанной с тем, что в приборах может идти электрический ток довольно большой величины, который разогревает тензорезистор и обуславливает появления также участка нелинейной ВАХ. При этом измеряется не номинальное сопротивление, а статическое, соответствующее определенной точке ВАХ. Для снижения тока через тензорезистор можно включать добавочное сопротивление, предварительно измеренное с достаточной точностью. Допустимая сила тока через тензорезистор при этом должна быть практически на порядок ниже силы тока, вызывающего изменение механизма электропроводности в пленке или разогрев тела тензодатчика. Величину этого тока можно грубо определить

по ВАХ. Обычно это то значение тока, при котором ВАХ начинает отклоняться от линейной зависимости, что и отчетливо видно из рис. 1 и 2.

## 2. ВЛИЯНИЕ ЦЗПД НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОК $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$

Тензометрические измерения производятся при различных интервалах температур исследуемого объекта и окружающей его среды. С целью уменьшения погрешности измерения необходимо изготовить тензорезисторы с минимальным по абсолютной величине температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и температурным коэффициентом тензочувствительности (ТКК), которые определяются по формулам:

$$\alpha' = \frac{dK}{K_0 dT}, \quad (1)$$

где  $R_0$  и  $K_0$  – сопротивление и тензочувствительность при температуре  $T_0 = 273$  К в заданном механическом состоянии пленок. Поэтому изучение этих параметров полупроводниковых тензодатчиков представляет собой интерес с точки зрения условий практического применения. Кроме того, такие исследования в определенной степени помогут объяснить природу физических процессов, происходящих в такой неоднородной структуре, как несплошная поликристаллическая пленка, подвергающаяся механической деформации.

Температурная зависимость тензометрических параметров изготовленных пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  была исследована в диапазоне температур от 293 до 455 К. Оказалось, что при высоких температурах испарения или больших скоростях конденсации ( $W = 400 \text{ \AA}/\text{с}$ ) и температурах подложки ( $T_n \approx 413$  К) получаются более плотные пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  с небольшим коэффициентом тензочувствительности. Изменение их сопротивления с температурой имеет зависимость, аналогичную массивным материалам ( $\alpha = 0,8510^{-4} \text{ град}^{-1}$ ) и оно практически не изменялось после воздействия ЦЗПД (кривая 1' на рис. 3).

На рис. 3 представлены зависимости сопротивления пористой пленки (т.е. пленки,

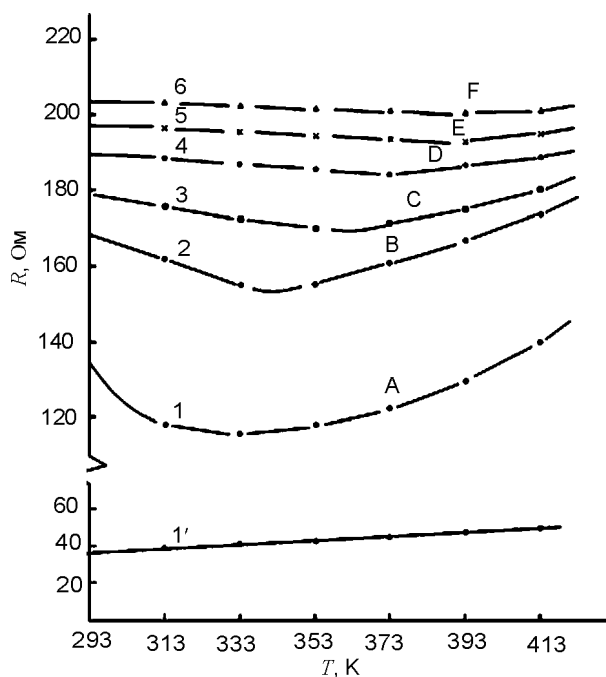


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления пленок из  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ , полученных на полиимидных подложках при температурах  $T_n$  413 К (кривая 1) и  $T_n$  363 К (1 – 6) до (кривая 1) и после воздействия циклических деформаций: для кривых 2 – 6,  $N \cdot 10^{-5} = 1$ ; 2; 4 и 5, соответственно.

имеющей коэффициент тензочувствительности  $K > 1000$ ) от температуры до (кривая 1) и после воздействия деформационных циклов (кривые 2 – 6). При исследовании температурной зависимости сопротивления этих пленочных элементов в интервале температур 293 – 413 К обнаружено, что в приведенном интервале температур имеется участок с минимальным значением сопротивления. С увеличением числа циклов знакопеременной деформации этот участок смещается в область более высоких температур. Например, участку, имеющему минимальное значение сопротивления, до действия циклических деформаций соответствовала температура  $T_{\min} = 333$  К (точка А на кривой 1). После воздействия  $1 \cdot 10^5$  циклов знакопеременных деформаций этот участок сместился вправо, и соответствующее значение температуры стало 348 К (точка В на кривой 2), после воздействия  $2 \cdot 10^5$  циклов – 363 К (точка С на кривой 3), а после  $5 \cdot 10^5$  циклов деформации этому участку стала соответствовать температура  $T_{\min} = 408$  К (точка F на кривой 6).

Таким образом, с ростом числа циклов нагружения положение минимума на темпера-

турной зависимости сопротивления смещается в область высоких температур. Следовательно, зная смещение участка с минимальным значением сопротивления на температурной зависимости, можно оценить число циклов знакопеременной деформации, т.е. пленочные элементы можно применять в качестве датчика усталости деталей.

Из рис. 3 видно, что сопротивление пленки с увеличением температуры сначала уменьшается ( $\alpha < 0$ ), проходит через минимум ( $\alpha = 0$ ), а затем начинает возрастать ( $\alpha > 0$ ). После воздействия деформационных циклов положение минимума  $T_{\min}$  для кривых 2–6 не только сдвигается в область более высоких температур, но и ТКС пленки существенно изменяется. С ростом  $N$  температура  $T_{\min}$  монотонно увеличивается и выходит к насыщению, а ТКС – монотонно уменьшается, падая от ( $\alpha = -5,6 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$  при  $N = 0$  до  $\alpha = -2,56 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$  при  $N = 5 \cdot 10^5$ ). Таким образом, ЦЗПД уменьшает по модулю ТКС пленок ( $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7}\text{Te}_3$ ).

Температурную зависимость сопротивления пленки и изменение ее под действием ЦЗПД можно описать качественно на основе модельного представления [4, 5], согласно которой сопротивление пленки рассматривается как совокупность последовательно соединенных сопротивлений зазоров  $R_{\text{пор},i}$  и отдельных кристаллических зерен (микроблоков)  $R_{\text{к.з},i}$

$$R_{\text{пл}} = \sum_i (R_{\text{к.з},i} + R_{\text{пор},i}) = R_{\text{кр}} + R_{\text{пор}} \quad (2)$$

Сопротивление пленки, обусловленное только кристаллическими зернами  $R_{\text{кр}}$ , зависит от температуры как

$$R_{\text{кр}} = R_{\text{кр}}^0 [1 + \alpha_{\text{кр}} (T - T_0)], \quad (3)$$

характерной для резисторов из массивного монокристаллического материала, где  $R_{\text{кр}}^0$  – сопротивление плотной пленки при  $T_0 = 273$  К,  $T$  – абсолютная температура.

Для пленки, полученной при оптимальных технологических условиях ( $T_n = 363$  К,  $W = 200$  Å/с), микропоры в направлении прохождения электрического тока имеют достаточно малые линейные размеры, толщина их  $d \leq (30 \div 50)$  Å [3]. Они образуют для

электронов микропотенциальные барьеры с конечной шириной  $d_{\text{пор}}$  и энергетической высотой  $E_{\text{пор}}$ . Тогда токопрохождение через такие барьеры определяется в основном туннельным или надбарьерным (шоттковским) механизмом и соответственно сопротивление пленки, обусловленное наличием пор (потенциальных барьеров), будет изменяться с температурой как

$$R_{\text{пор}} \approx R_{\text{пор}}^0 \cdot \exp \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa T}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{пор}}^0$  – некоторое характерное сопротивление пористой пленки, слабо зависящее от температуры,  $\kappa$  – постоянная Больцмана.

С учетом (2), (3) и (4) температурную зависимость сопротивления пористой пленки можем записать в виде

$$R_{\text{пл}}(T) = R_{\text{кр}}^0 [1 + \alpha_{\text{кр}} (T - T_0)] + R_{\text{пор}}^0 \exp \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa T}. \quad (5)$$

Температурный коэффициент сопротивления пленки определим согласно (1) и (5)

$$\alpha_{\text{пл}} = \frac{\alpha_{\text{кр}} \cdot R_{\text{кр}}^0 - \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa T^2} \cdot R_{\text{пор}}(T)}{R_{\text{кр}}^0 + R_{\text{пор}}^0}. \quad (6)$$

Отсюда, действительно, в соответствии с результатами рис. 3 следует, что, если например, при  $T = T_0$  выполняется условие

$$\alpha_{\text{кр}} R_{\text{кр}}^0 < \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa T_0^2} \cdot R_{\text{пл}}(T_0),$$

то пленка обладает сначала отрицательным ТКС, который с увеличением температуры монотонно убывает и при некотором  $T_{\min}$  обращается в нуль, а затем меняет знак. Из (6) находим, что  $T_{\min}$  определяется из следующей трансцендентной формулы

$$T_{\min} = \left( \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa \alpha_{\text{кр}}} \cdot \frac{R_{\text{пор}}(T_{\min})}{R_{\text{кр}}^0} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

или приближенно из

$$T_{\min} = \left( \frac{E_{\text{пор}}}{\kappa \alpha_{\text{кр}}} \cdot \frac{R_{\text{пор}}(T_0)}{R_{\text{кр}}^0} \right)^{1/2}. \quad (7')$$

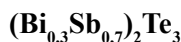
Поскольку величины  $E_{\text{пор}}$ ,  $\alpha_{\text{кр}}$ ,  $R_{\text{кр}}^0$  практически не зависят от ЦЗПД, а сопротивление

межкристаллитных областей  $R_{\text{пор}}(T_0)$  увеличивается с ростом  $N$ , то в соответствии с рис. 3 и формулой (7') значение  $T_{\text{min}}$  растет как  $T_{\text{min}} \sim (R_{\text{пор}}(T_0, N))^{1/2}$  и при больших  $N \sim 5 \cdot 10^5$  испытывает тенденции к насыщению (точки  $A, B, C, D, F$  на кривых 2 – 6). Таким образом, ТКС пленки в области температур  $T < T_{\text{min}}$  определяется в основном температурной зависимостью сопротивления пленок, обусловленное ее сильно неоднородной структурой, а при  $T > T_{\text{min}}$  – температурной зависимостью сопротивления кристаллических зерен пленки, т.е. массивного материала. При воздействии деформационных циклов толщина диэлектрических прослоек в результате истирания контактирующих кристаллитов возрастает, приводя заведомо к возрастанию  $E_{\text{пор}}$  и  $R_{\text{пор}}$ , следовательно, к изменению положения  $T_{\text{min}}$  на температурной зависимости сопротивления.

## ВЫВОДЫ

В заключение лишний раз отметим, что пористые поликристаллические пленки из тройного соединения  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  с успехом могут быть использованы в качестве ДНУП в интервале температур  $T = 273 \div 413$  К и значении ЦЗПД  $N = 0 \div 5 \cdot 10^5$ .

## ВПЛИВ ЦИКЛІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ПЛІВОК



Ш.Д. Султонов, Н.Х. Юлдашев

Досліджені тензорезистивні властивості полікристалічних плівок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  при статичних і циклічних деформаціях. Показано, що лінійна ділянка ВАХ по напрузі (0; 5) В у результаті дії  $N = 5 \cdot 10^5$  циклів деформацій розширюється до (0; 12) В, а ТКС – змінюється від  $\alpha = -5,6 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  при  $N = 0$  до  $\alpha = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ . Згідно феноменологічному розрахунку значення  $T_{\text{min}}$ , при якому  $\alpha = 0$ , збільшується з ростом  $N$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов М., Хайдаров А., Юлдашев Н. Роль границ раздела зерен в люкс-амперной характеристике поликристаллической пленки твердого раствора  $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ //Поверхность. – 2006. – № 5. – С. 88-93.
2. Султонов Ш.Д. Зависимость электропроводности композитных пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  от частоты переменного тока. Влияние циклических деформаций//Мат. 28 Меж. конф. “Композиционные материалы в промышленности”, Ялта, (Крым). – 2008. – С. 501-504.
3. Атакулов Б., Абдуллаев Э.А., Ахмедов М.М., Юлдашев Н.Х. Получение и исследование состава, структуры и тензометрических свойств полупроводниковых пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ //Рус. Деп. В ВИНТИ Дек. – 1986. № 10985.
4. Абдуллаев Э., Султонов Ш., Юлдашев Н. Эффект пьезосопротивления в халькогенидах свинца и висмута. Часть II. – Фергана: “Фаргона”, 2006. – 118 с.
5. Ахмедов М.М. Температурная зависимость сопротивления теллурида висмута и сурьмы при циклических деформациях//Проблемы автоматизации в прочностном эксперименте. М.: ЦНТЛ “Волна”, 1986. – С. 171-175.

## THE INFLUENCE OF CYCLIC DEFORMATIONS ON THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE THIN FILMS



Sh.D. Sultonov, N.Kh. Yuldashev

The tensor resistance properties of polycrystalline films  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  at static and cyclic deformations have been researched. It is shown, that a linear site volt-ampere the characteristic on a voltage (0; 5) V as a result of action  $N = 5 \cdot 10^5$  cycles of deformations extends up to (0; 12) V, and temperature factor of re-sistance – changes from  $\alpha = -5,610^{-3} \text{K}^{-1}$  at  $N = 0$  up to  $\alpha = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ . According to phenomenological calculation value  $T_{\text{min}}$ , at which  $\alpha = 0$ , it is increased with growth of  $N$ .