

УДК 546.34.882.4.536.361

Осконбаев Маралбек Чотоевич¹,
 кандидат физико-математических наук, доцент
Хасанова Гүлкан Абдураимовна¹,
 PhD докторант
Ахмадалиев Бозорбой Жоборалиевич²,
 PhD доктор философии
Сиддиков Рустамжон Уктамович³,
 старший преподаватель
Сулаймонов Хусанбой Маннопович²,
 PhD доктор философии
Юлдашев Носиржон Хайдарович²,
 доктор физико-математических наук, профессор

НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПЛЕНОЧНОГО ТЕНЗОДАТЧИКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $(\text{Bi}_x \text{Sb}_{1-x})_2 \text{Te}_3$

Осконбаев Маралбек Чотоевич¹,
 физика-математика илимдеринин кандидаты, доцент
Хасанова Гүлкан Абдураимовна¹,
 PhD докторант
Ахмадалиев Бозорбой Жоборалиевич²,
 философия илимдеринин PhD доктору
Сиддиков Рустамжон Уктамович³,
 ага окутуучу
Сулаймонов Хусанбой Маннопович²,
 философия илимдеринин PhD доктору
Юлдашев Носиржон Хайдарович²,
 физика-математика илимдеринин доктору, профессор

$(\text{Bi}_x \text{Sb}_{1-x})_2 \text{Te}_3$ КАТУУ ЭРИТМЕСИНИН НЕГИЗИНДЕ ЧАРЧОО ЗЫЯНЫН ТОПТООҮЧҮН ТЕНЗОДАТЧИК ПЛЕНКАСЫН ТҮЗҮҮНҮН АЙРЫМ ПРИНЦИПТЕРИ

Oskonbaev Maralbek Chotoevich¹,
 Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Hasanova Gulkan Abduraimovna¹,
 PhD doctoral student
Akhmadaliev Bozorboy Zhoboralievich²,
 PhD Doctor of Philosophy
Siddikov Rustamzhon Uktamovich³,
 Senior Lecturer
Sulaimonov Khusanboy Mannopovich²,
 PhD Doctor of Philosophy
Yuldashev Nosirzhon Khaidarovich²,
 Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

SOME PRINCIPLES OF CREATING A FILM STRAIN CELL FOR ACCUMULATION OF FATIGUE DAMAGE BASED ON A SOLID SOLUTION $(\text{Bi}_x \text{Sb}_{1-x})_2 \text{Te}_3$

¹Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика

²Ферганский государственный технический университет, Фергана, Республика Узбекистан

³Кокандский государственный университет, Коканд, Республика Узбекистан

¹Osh mamlekettik universiteti, Osh, Kyrgyz Respublikasy

²Fergana mamlekettik texnika tekhnika universiteti, Fergana, O'zbekiston Respublikasy

³Kokon mamlekettik universiteti, Fergana, O'zbekiston Respublikasy

¹Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic

²Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan Republic

³Kokon State University, Kokon, Uzbekistan Republic

Аннотация. Приводятся результаты исследования деформационных характеристик поликристаллических пленок $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ при односторонних циклических механических напряжениях. Пленки получались на полиамидной подложке методом термовакуумной конденсации молекулярных пучков и обладали столбчатой пористой структурой с размерами отдельных кристаллических зерен 2,0-2,5 мкм. Изучалось влияние статических и циклических деформаций на электрическое сопротивление и вольт-амперные характеристики тензорезистивных пленок с целью изготовления на их основе тензодатчиков накопления усталостных повреждений. Показано, что при комнатной температуре в таких пленках обнаруживается высокая статическая тензочувствительность $\approx 10^3$ отн. ед. и наблюдается существенный гистерезис изменения сопротивления при малых количествах циклов знакопеременных деформаций.

Ключевые слова: узкозонный полупроводник $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$, пористые поликристаллические пленки, тензочувствительность, циклическая знакопеременная деформация, гистерезис изменения электрического сопротивления с деформаций, тензодатчик накопления усталостных повреждений.

Аннотация. Поликристаллдык пленкалардын $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ бир тараптуу циклдик механикалык чыңалуудагы деформациялык мүнөздөмөлөрүн изилдөөнүн натыйжалары берилген. Пленкалар молекулярдык нурлардын термикалык вакуумдук конденсациясы ыкмасын колдонуу менен полиамиддик субстраттан алынган жана 2,0–2,5 мкм жеке кристаллдык бүртүкчөлөрү менен мамычалык тешиктүү түзүлүшкө ээ болгон. Алардын негизинде чарчоо зыянын топтоо үчүн тензометрлерди алуу максатында статикалык жана циклдик деформациялардын электр каршылыгына жана вольт-ампер мүнөздөмөлөрүнө тийгизген таасири изилденген. Бөлмө температурасында мындай пленкалар $\approx 10^3$ салыштырмалуу бирдиктин статикалык деформацияга жогорку сезгичтигин көрсөтөөрү жана алмашкан деформациялардын аз сандагы циклдеринде каршылыктын өзгөрүшүнүн олуттуу гистерезиси байкалаары көрсөтүлгөн.

Ачкыч сөздөр: кууш тилкелүү жарым өткөргүч $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$, тешиктүү поликристаллдык пленкалар, деформация сезгичтиги, циклдик алмашып туруучу деформация, деформация менен электр каршылыгынын өзгөрүү гистерезиси, чарчоо зыянын топтоо тензомери.

Abstract. The results of a study of the deformation characteristics of polycrystalline films $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ under one-sided cyclic mechanical stresses are presented. The films were obtained on a polyamide substrate using the method of thermal vacuum condensation of molecular beams and had a columnar porous structure with individual crystalline grain sizes of 2.0–2.5 μm . The influence of static and cyclic deformations on the electrical resistance and volt-ampere characteristics of strain gauge films was studied with the aim of producing strain gauges for fatigue damage accumulation based on them. It has been shown that at room temperature, such films exhibit high static strain sensitivity $\approx 10^3$ relative units and a significant hysteresis in resistance changes is observed with a small number of cycles of alternating deformations.

Key words: narrow-band semiconductor $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$, porous polycrystalline films, strain sensitivity, cyclic alternating deformation, hysteresis of change in electrical resistance with deformation, fatigue damage accumulation strain gauge.

Введение

В настоящее время одним из наиболее распространенных и информативных способов изучения тонкопленочных структур является тензорезистивный метод исследования свойств полупроводниковых материалов, широко применяющийся при изготовлении электрических сенсоров [1-4], датчиков давления и перемещений [5-7]. С точки зрения технического применения тонких полупроводниковых пленок в качестве тензочувствительного элемента вольтамперная характеристика (ВАХ) играет особую роль, в частности, она позволяет судить об их энергетических возможностях и пригодности для тензометрического измерения. При этом важным параметром является максимально допустимая потребляемая мощность тензорезистора в заданных условиях эксплуатации. Это связано с тем, что полупроводниковые пленки очень чувствительны к различным излучениям и изменениям температуры, а при пропускании больших токов через пленочные образцы может происходить их лишней джоуле нагрев, отражающийся соответствующим образом на их рабочих параметрах. Так, он может приводит к нелинейной ВАХ и, тем самым, к увеличению погрешности в показаниях приборов. Кроме того, для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций, типа летательных аппаратов, и предотвращения их разрушения в процессе работы необходимо знать количество циклов деформации, которых испытала данная конструкция. При этом успешно используются пленочные тензодатчики накопления усталостного повреждения (ТНУП) на основе узкозонных полупроводников [5-10], изменяющие свои характеристики с увеличением числа действующих на них деформационных циклов.

Известно [7-11], что основными электрофизическими характеристиками тензодатчиков являются исходные величины электрического сопротивления R_0 , тензочувствительности K_0 и изменения их при воздействии внешних факторов, как циклическая механическая деформация ε , температура T , частота питающего переменного напряжения f и т.п. В последнее время должное внимание уделяется изучению мало- и многоциклового усталости тензодатчиков из низкоразмерных структур при различных амплитудах деформации [12-16].

К сегодняшнему дню показано [9-11], что природа аномально высокой тензочувствительности $K \approx 10^4$ *отн. ед.* пористых пленок $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ связана с образованием микротрещин при высоких амплитудах деформации $\varepsilon \approx 10^{-3}$, однако механизмы циклических деформаций при произвольных амплитудах и количествах напряжений до сих пор остается до конца неясными.

Настоящая работа посвящена изучению влияния количества циклов N и амплитуды ε знакопеременной деформации на характеристики пленок из твердого раствора $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ по изменению величины ее электросопротивления и коэффициента тензочувствительности (КТЧ), определяемой формулой

$$K = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \varepsilon}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \Delta \ell / \ell_0$ и $\Delta \ell = \ell(\varepsilon) - \ell_0$ - величины относительной и абсолютной деформации, $\Delta R = R(\varepsilon) - R_0$, а R_0 - электрическое сопротивление образца при $\varepsilon = 0$. Рассматривается ВАХ и температурная зависимость сопротивления тензорезистивных пленок $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ под действием статических и циклических знакопеременных деформаций (ЦЗПД) с целью изготовления на их основе ТНУП [17-21].

1. Технология и методика измерения

Поликристаллические пленки из $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ с площадью 5×20 мм² получались методом термического испарения в вакууме с давлением остаточных паров $(1 - 3) \cdot 10^{-2}$ Па из смеси порошков Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 в соотношении x и $(1 - x)$ мол %. Температура подложки из полиамида ПМ-1 варьировалась в интервале $T_s = 323 - 423$ К, а скорость роста пленок $-W = 150 - 450$ Å/с. Наиболее тензочувствительные ($K \approx 10^3$ *отн. ед.*) пленки с оптимальными рабочими характеристиками получались при толщинах $d \approx 3 - 5$ мкм, $T_s = 363$ К, $W = 200$ Å/с и при значении $x = 0.25$. Методика измерения деформационных характеристик пленок была выбрана также, как и в работе [1,7-9]. Образцы не подвергались предварительной термической обработке. Свежеприготовленные пленки обладали нестабильным КТЧ, обусловленном наличием сильных неравновесных внутренних механических напряжений (ВМН) [11]. С ростом числа N ЦЗПД величина K монотонно уменьшается, что говорит о возможности использования изготовленных пленок в качестве ТНУП.

Электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования [3,7] показали, что выращенные слои $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ обладали поликристаллической столбчатой и пористой структурой. Размеры отдельных кристаллических зерен составляли 2 – 2.5 мкм.

Для снятия деформационных характеристик (Δx) исследуемые пленки из $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ наклеивались на балку равного сопротивления из титанового сплава. Деформирование пленок проводилось изгибом балки. При этом значение относительной деформации ε рассчитывалось по величине изгиба консольно-закрепленной балки по известному выражению

$$\varepsilon = 3ab\Delta x/\ell^3, \quad (2)$$

где a - расстояние от нейтральной оси консольной балки до пленки, b - расстояние от точки приложения силы до середины пленочного образца, Δx - изгиб свободного конца пластинки в точке приложения силы, ℓ - длина пластинки между опорной точкой и точкой приложения силы. Значение деформации варьировалось в интервале от $\varepsilon = +2 \cdot 10^{-3}$ до $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.

Тензометрические измерения производились при различных интервалах температур окружающей его среды. С целью уменьшения погрешности измерения требуется изготовить тензодатчики с минимальными температурными коэффициентами сопротивления и тензочувствительности

$$\alpha = dR/R^0 dT, \quad \alpha' = dK/K^0 dT, \quad (3)$$

где R^0 и K^0 - сопротивление и КТЧ при температуре $T_0 = 273^0 K$ в заданном механическом состоянии пленок. Изучение этих параметров полупроводниковых тензодатчиков в определенной степени помогут объяснить природу физических процессов, происходящих в такой неоднородной структуре, как пористая поликристаллическая пленка, подвергающаяся механической деформации [5].

Температурная зависимость тензометрических параметров изготовленных пленок $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ была исследована в диапазоне 293-455 К. Оказалось, что при высоких температурах подложки $T_s \approx 413 K$ и больших скоростях конденсации $W \approx 400 \text{ Å}/c$ получаются более плотные пленки с небольшим КТЧ. Сопротивление таких пленок имеет металлическую зависимость с температурой ($\alpha = 0,85 \cdot 10^{-4} K^{-1}$) и оно практически не изменялось после воздействия ЦЗПД.

2. Результаты эксперимента и их обсуждений

2.1. Область малых значений N

Здесь приводятся результаты изучения абсолютного $\Delta R = R(\varepsilon) - R_0$ и относительного $\Delta R(\varepsilon)/R_0$ изменения электросопротивления свежеприготовленных образцов при малом числе цикла механических нагружений с изменением его не только по значению, но и по знаку. Например, на первом этапе рассмотрим область деформации растяжения от $\varepsilon = 0$ до $\varepsilon = \varepsilon_0$, во втором этапе получим в направлении снятия деформаций, т.е. при изменении ε от ε_0 до 0, в третьем и четвертом этапах излучаем область деформаций сжатия, сначала от $\varepsilon = 0$ до $\varepsilon = -\varepsilon_0$, а затем от $\varepsilon = -\varepsilon_0$ до $\varepsilon = 0$ и завершаем один цикл знакопеременных деформаций. Изготовленные тензочувствительные пленки из $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ выдержали достаточно большие числа циклических знакопеременных деформаций (ЦЗПД). Очевидно, что представляет интерес изучать ΔR пленок в предельно малом и большом количествах N ЦЗПД.

На рис. 1а,б представлены ΔR при малых значениях N , причем, здесь сначала изучалось изменение R пленки только при 4-х циклах деформаций растяжения ($0 \leq \varepsilon \leq 0.9 \cdot 10^{-2}$ отн.ед.), а потом при 4-х циклах деформаций сжатия ($-0.9 \cdot 10^{-2} \leq \varepsilon \leq 0$). Видно, что когда сначала нагрузку плавно увеличиваем до ε_0 и затем также плавно снимаем ее до 0, то наблюдаем остаточного изменения относительного сопротивления $\Delta R_{ост}^0(N)/R_0$. Эта величина различна для растяжения и сжатия, что отражает наличия внутреннего механического напряжения (BMH) в пленке. Видно, что в данном случае BMH является отрицательной (сжатое $\varepsilon_0 < 0$ [2]), кроме того, она монотонно уменьшается с ростом N .

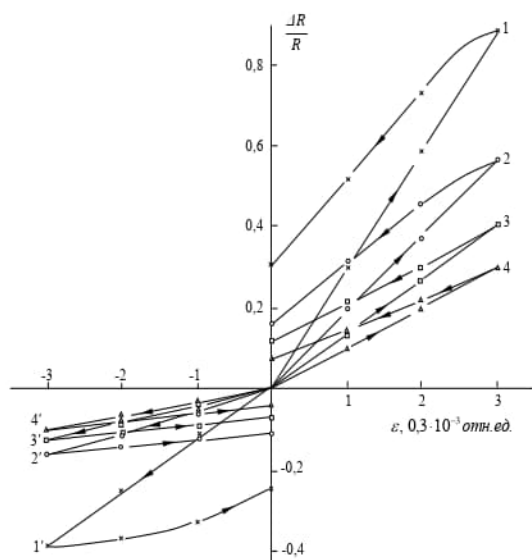


Рис.1а. Деформационная характеристика свежеприготовленной пленки $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$ при 4-х циклах деформации растяжения (кривые 1-4 со стрелками направления нагрузений) и сжатия (кривые 1'-4') при комнатной температуре.

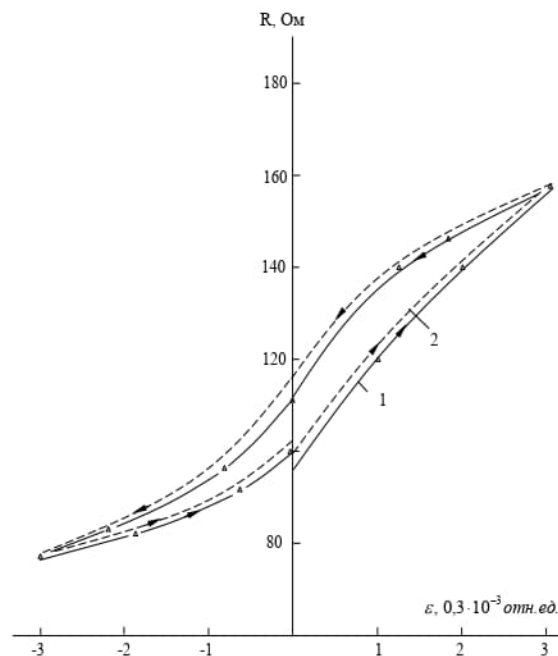


Рис. 1б. Гистерезис изменения сопротивления пленки из $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$ под действием ЦЗПД. Незамкнутый гистерезис со штрихованными линиями соответствует второму ЦЗПД ($N=1$).

Таким образом, в пленках $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$ наблюдается существенный гистерезис изменения сопротивления $R_N(\varepsilon)$ при одном ЦЗПД ($N = 1$) с незамкнутым концом. Следующие гистерезисные петли непосредственно продолжают предыдущий и смещаются в область больших значений R (рис.1б).

На рис. 2 приведена зависимость изменения сопротивления и KTC от числа ЦЗПД в области $1 \leq N \leq 4$. Видно, что величина K резко уменьшается, а R -увеличивается, с ростом количества ЦЗПД при малом N , а затем переходят к плавному монотонному спаду. По-видимому, начальные участки зависимости $R_\varepsilon(N)$ и $K_\varepsilon(N)$ обусловлены сильно неравновесными ВМН не подвергнутых к термической обработке пленок $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$.

2.2. Область больших значений количества циклов деформаций. Стабилизация тензометрических параметров пленок

На рис. 3 приведены статические деформационные характеристики пленок до и после воздействия циклической знакопеременной нагрузки в больших количествах ($N \gg 1$). Видно, что до воздействия деформационных циклов сопротивление пленки практически линейно возрастает под действием деформации растяжения, в то время как зависимость сопротивления от деформации сжатия нелинейна, и величина коэффициента тензочувствительности при деформации сжатия заметно меньше, чем при деформации растяжения (кривая 1).

После воздействия деформационных циклов ($N \cong 5 \cdot 10^5$) нелинейность статической $ДХ$ пленки уменьшается, ее тензочувствительность при деформации сжатии увеличивается, а при растяжении падает (кривая 2), т.е. несимметричность практически исчезает.

На рис. 4а и рис. 4б приведены зависимость относительного изменения сопротивления $\Delta R/R_0$ и коэффициента тензочувствительности K от числа циклов деформации при разных ее амплитудах ε . Видно, что с увеличением числа циклов знакопеременной деформации и ее амплитуды относительное изменение сопротивления растет, а их тензочувствительность K уменьшается и при значениях ($N = 5 \cdot 10^5$) в зависимостях $R(N), K(N)$ наблюдается тенденция к насыщению.

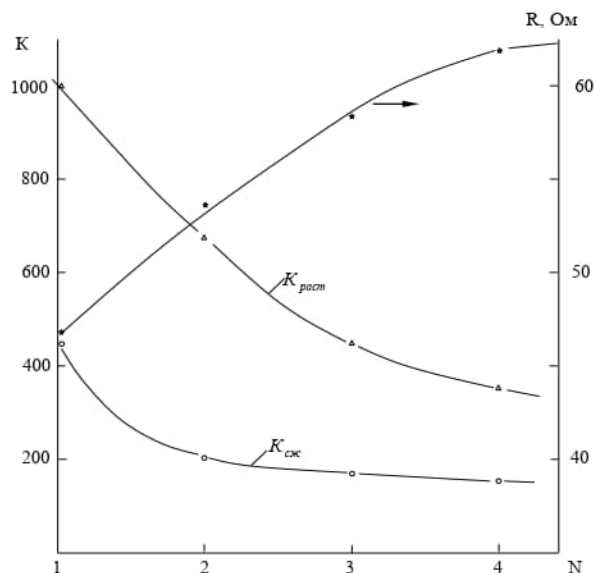


Рис.2. Изменение сопротивления R и КТЧ с ростом числа ЦЗПД в области $1 \leq N \leq 4$.

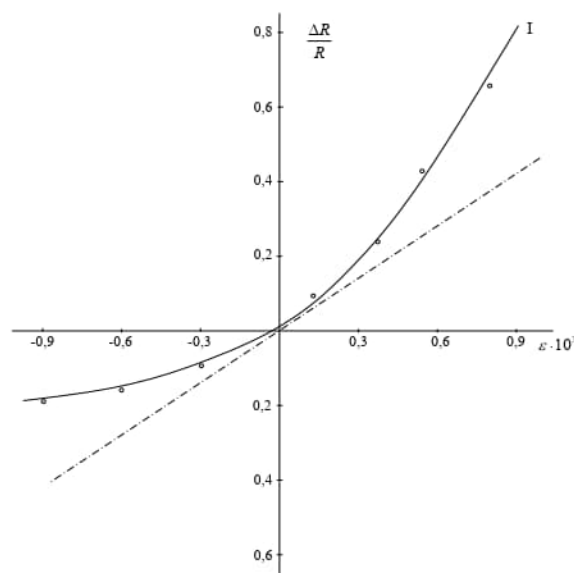


Рис. 3. Деформационная характеристика относительного изменения сопротивления пленок из $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ до (кривая 1) и после (2) циклической деформации. Для кривой 2 $N = 5 \cdot 10^5$.

На наш взгляд, полученные здесь экспериментальные факты могут быть объяснены на основе модели пленки как системы из микроконтактирующих проводящих зерен, диэлектрический зазор между которыми изменяется с деформацией. Действительно, после воздействия необходимого количества циклов знакопеременной деформации ширина зазора между кристаллическими зернами увеличивается в результате истирания контактирующих поверхностей зерен, приводящего к росту сопротивления пленки и снятию в той или иной степени предварительных BMH . Последнее, в свою очередь, обуславливает стремление к линейному и симметричному виду $ДХ$ пленки при действии циклов деформации.

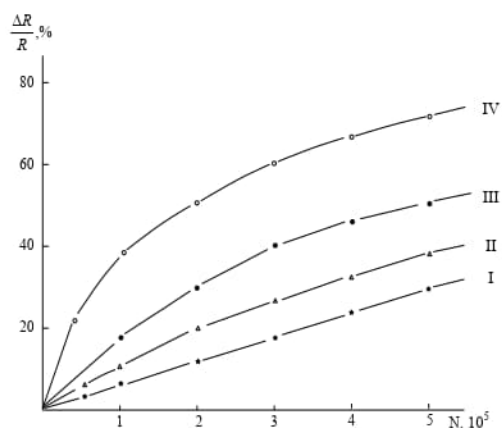


Рис. 4а. Относительное изменение сопротивления тензопленок $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ от числа циклов знакопеременных деформаций N , при разных амплитудах деформаций $\varepsilon \cdot 10^{-3}$: I - ± 0.25 , II - ± 0.5 , III - ± 0.75 и IV - ± 1.0 .

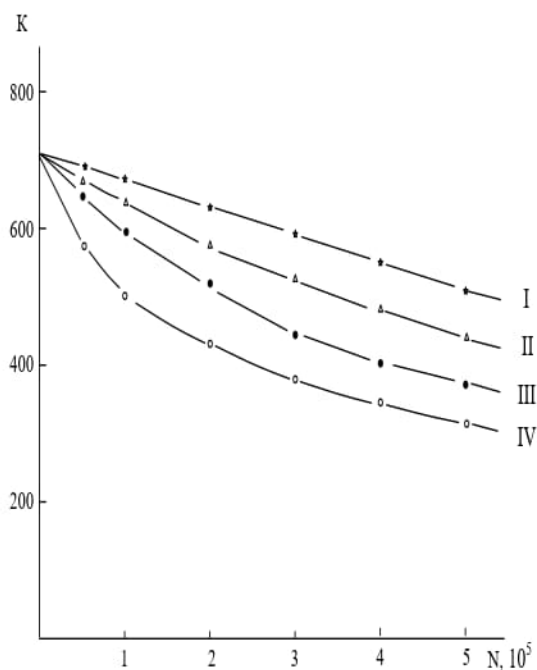


Рис. 4б. Зависимость K пленок от числа деформационных циклов при амплитудах относительных деформаций $\varepsilon \cdot 10^{-3}$: I - ± 0.25 , II - ± 0.5 , III - ± 0.75 и IV - ± 1.0 .

Поэтому можно полагать, что в изготовленных пленках $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$ высокие значения сопротивления и коэффициента тензочувствительности их коррелированы с величиной BMH , диэлектрического зазора и размером кристаллитов. Действие ЦЗПД приводит к росту изменения величины сопротивления и коэффициента тензочувствительности при сжатии, и к уменьшению значения K при растяжении, а также изменению формы статической деформационной характеристики.

2.3. Влияние циклических деформаций на вольтамперную

характеристику пленок $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$

С точки зрения технического применения пленок в качестве тензочувствительного элемента (ВАХ) позволяет судить об энергетических возможностях тензорезисторов, если под этим понимать ту максимальную мощность, которую можно выделить на тензорезисторе при заданных условиях их эксплуатации. Это связано с тем, что поликристаллические пленки полупроводников очень чувствительны к изменениям температуры, а при пропускании больших токов через пленочные образцы может происходить их джоуле нагрев, что соответствующим образом отразится на их рабочих параметрах, в частности, приведет к нелинейной ВАХ и тем самым – к увеличению погрешности в показаниях приборов.

Влияние статической деформации на ВАХ пленки изучалось нами [13] в интервале значений относительных деформаций до $0,9 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., соответствующие кривые показаны на рис. 5а. Из них видно, что ВАХ образцов линейна в области малых напряжений. С увеличением напряжения линейность зависимости тока от напряжения нарушается, что происходит, например, в недеформированном состоянии при $U=5$ В (кривая 4). Это напряжение, при котором возникает нелинейность ВАХ, существенно зависит от знака и уровня деформации.

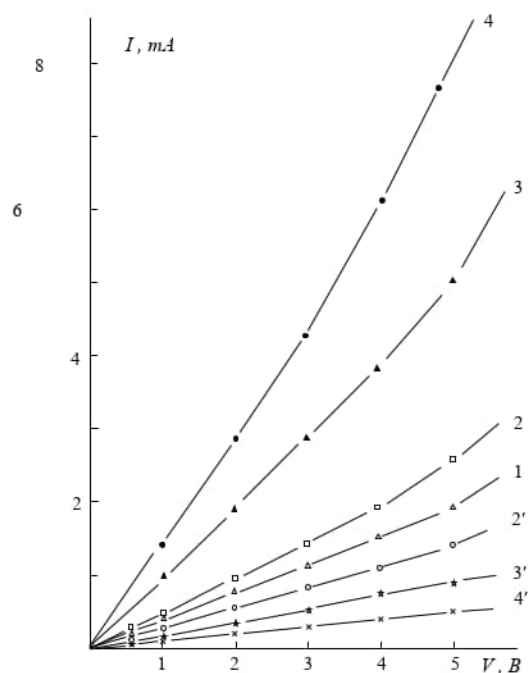


Рис. 5а. Вольт-амперная характеристика пленки $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ на подложке полиимида ПМ-1, под действием статической деформации: $\varepsilon=0$ (кривая 1), $\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$ (2,2'), $\pm 0,6$ (3,3'), $\pm 0,9$ (4,4'),. Кривые 2-4 сняты при сжатии, а 2'-4'- при растяжении.

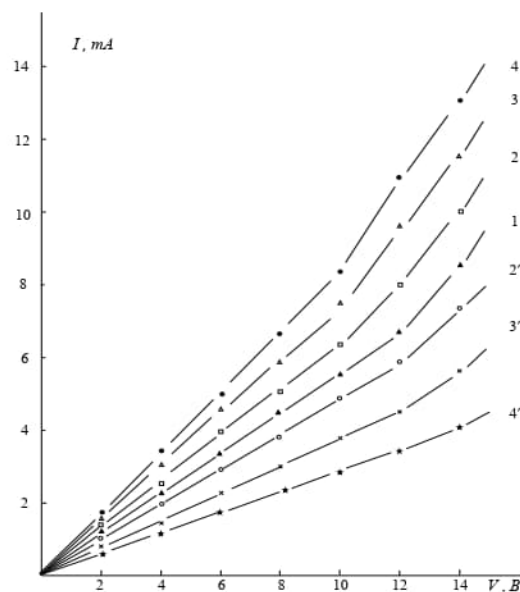


Рис. 5б. Вольтамперная характеристика пленки $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$ после воздействия $N = 5 \cdot 10^5$ циклов знакопеременных нагружений. Кривые 1-4 и 2'-4' соответствуют кривым 1-4 и 2'-4' рис. 7.21.

Исследования ВАХ пленок $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$, подвергавшихся ЦЗПД, показаны на рис. 5б. Из рисунка видно, что ВАХ пленки существенно изменяются после воздействия циклических деформаций ($= 5 \cdot 10^5$). На всех кривых, снятых при различных значениях относительной деформации ε , четко отражены увеличения сопротивления пленки. Действие $N = 5 \cdot 10^5$ циклов знакопеременных деформаций приводит к увеличению падения напряжения на пленки при постоянном источнике почти до 10 В, т.е. в два раза.

Поскольку при действии циклических деформаций в результате истирания контактирующих поверхностей кристаллических зерен увеличиваются расстояния между ними, это и приводит к расширению линейного участка ВАХ пленки. Известно, что тензометрические измерения необходимо производить в линейной области ВАХ. При этом следует учитывать возможность возникновения погрешности, связанной тем, что в приборах может идти ток довольно большой величины,

который разогревает тензорезистор и обуславливает появление также участка нелинейной ВАХ. При этом измеряется не номинальное сопротивление, а статическое, соответствующее определенной точке ВАХ. Для снижения тока через тензорезистор может включаться добавочное сопротивление, предварительно измеренное с достаточной точностью.

Измерительный ток через тензорезистор при этом должен быть на порядок ниже тока, вызывающего изменение механизма электропроводности в пленке или разогрев тела тензодатчика. Величину этого тока можно грубо определить по ВАХ. Обычно это то значение тока, где ВАХ начинает отклоняться от линейной зависимости.

Заключение

Характеры изменения величины сопротивления, КТЧ плёнок с ростом числа циклов деформации можно объяснить ростом величины диэлектрического зазора между кристаллитами плёнки. Предлагаемая модель, описывающая электропроводность через микро контактирующие поверхности кристаллитов, на основе теории протекания объясняет высокие значения величины КТЧ плёнок и нелинейность их статической деформационной характеристики. Исследованные пористые пленки из соединения $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$, которые получались методом термического испарения в вакууме при указанных выше оптимальных технологических параметрах, могут быть применены в качестве ТНУП различных конструкций.

Список литературы:

1. Абдуллаев Э.А., Юлдашев Н.Х. Эффект пьезосопротивления в халькогенидах свинца и висмута. Ч.1- Ташкент, «Фан», 1989, 182 с.
2. Kazi I.H., Wild P.M., Moore T.M. Characterization of sputtered nichrome (80/20 wt.%) films for strain gauge applications. Thin Sol. Films, vol. 515, P. 2602 (2006).
3. Pazukha, I. M., Makukha, Z. M., Shabelnyk, Y. M., & Protsenko, I. Y. (2012). Tensoresistive properties of thin film systems based on Ag and Co. Journal of Nano-and Electronic Physics, 4(3), 3020-1.
4. Gerasimenko A.Yu., Ichkitidze L.P., Podgaetsky V.M., Selishchev S.V. Layers with the Tensoresistive Properties and their Possible Applications in Medicine. // Materials Physics and Mechanics 37 (2018). P. 153-158.
5. Ltidier Elbrecht and Josef Binder. The Mechanical Properties of Thin Polycrystalline Silicon Films as Function of Deposition and Doping Conditions. Sensors and Materials, Vol. 11, No. 3 (1999) 163-179.
6. Маматкаримов О.О., Зайнабидинов С.З., Абдураимов А., Хамидов Р.Х., Туйчиев

У.А. Динамические тензохарактеристики диодов с барьером Шоттки при импульсном всестороннем гидростатическом давлении // ФТП, 34 (1), 67 (2000).

7. Абдуллаев Э.А., Юлдашев Н.Х. Эффект пьезосопротивления в халькогенидах свинца и висмута. Ч.2 - Фергана, «Техника», 2008. 116 с.

8. Сулаймонов Х.М. Влияние циклической деформации на электропроводность пленок $p-(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ на переменном токе. // Журнал технической физики. 2017. -Т. 87, № 3, с. 471-472.

9. Shavkat Sh. Abdullaev, Nosirjon Kh. Yuldashev, Khusanboy M. Sulaymonov. Tensoresistive Properties of Thin Polycrystalline $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ Films at Static and Cyclic Deformations. International Journal of Modern Physics and Application. Vol. 3, No. 4, 2016, pp. 52-56.

10. Сулаймонов Х.М., Умаров М.Г., Юлдашев Н.Х. Тензочувствительность поликристаллических пористых пленок // Актуальные проблемы современной науки-Россия. 2015, №4.

11. Sulaymonov, H. M., & Yuldashev, N. K. (2016). Effect of internal stresses on the static strain characteristics of $p-(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ composite films. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 10(4), 878-882.

12. Xu, Z., Huang, C., Tan, C., Wan, M., Zhao, Y., Ye, J., & Zeng, W. (2021). Influence of microstructure on cyclic deformation response and micromechanics of Ti-55531 alloy. Materials Science and Engineering: A, 803, 140505.

13. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140505>

14. Chao He, Yujuan Wu, Liming Peng, Ning Su, Xue Li, Kun Yang, Yongjie Liu, Shucheng Yuan and Renhui Tian. (2018). Cyclic Deformation and Correspondent Crack Initiation at Low-Stress Amplitudes in Mg-Gd-Y-Zr Alloy. Materials, 11(12):2429. doi:10.3390/ma11122429 www.mdpi.com/journal/materials

15. Pengfei Wang, Toshiyuki Takagi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki. Early fatigue damage detecting sensors—A review and prospects // Sensors and Actuators A: Physical. Volume 198, 15 August 2013, Pages 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.03.025>

16. Корякин А.А., Лещенко Е.Д., Дубровский В.Г. Влияние упругих напряжений на формирование осевых гетеропереходов в трехкомпонентных нитевидных нанокристаллах $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ // Физика твердого тела, 2019, том 61, вып. С.2437-2441.

17. Бурый И.П., Воробьев С.И., Одиногорец Л.В. Тензорезистивные свойства пленочных материалов на основе Ni и Mo или Cr // ФИП, 7 (1,2), 115 (2009).

18. Yuldashev, N. K., Mamadiyeva, D. T., Nurmatov, O. R., Raxmonov, T. I., & Sulaymonov, X. M. (2019). The effect of mechanical deformation on the photovoltaic properties of semiconductor polycrystalline film structures CdTe: Sn. Scientific-technical journal, 23(3), 9-14.

19. Sulaymonov, Kh.M., Yuldashev, N. Kh. The Third European Conference on Physics and Mathematics, 12th September, Vienna, Austria. p.19 (2015).

20. Tokhirbek Imomaliyevich Rakhmonov. Photosensitivity Spectra of Thin Films from a $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ Solid Solution // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. Vol.10 No.12, P.3676-3683. (JIF, IF:0.71). <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.1012245>

21. Rakhmonov T.I., Mamadiyeva D.T., Yuldashev N.Kh. Photoelectric phenomena in thin Polycrystalline CdTe, CdSe, CdS films under mechanical deformation // European Science Review. – 2021. – No 11-12. – P. 40-49. (05.00.00, №3). (GIF, IF:1.47).

22. Nurmatov O., Rahmonov T., Sulaymonov Kh., Yuldashev N. Phototenzoelectric properties of polycrystalline films of chalcogenides of cadmium and zinc, produced by portional evaporation in vacuum // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020. Vol. 2. Iss. 5. P.40-45. (01.00.00, №16).