

## Оригинальная статья

УДК 538.935, 958, 975

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-60-74

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Sb}_3$ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ И ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2025 г. Р. У. Сиддиков, Х. М. Сулаймонов, Н. Х. Юлдашев

Ферганский государственный технический университет (150107, Узбекистан, Фергана, ул. Ферганская, 86)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования диэлектрических и электрических свойств поликристаллических пленок твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Sb}_3$  под действием микроволнового поля и механической деформации с целью определения механизмов влияния точечных и протяженных неоднородностей. Рассмотрены спектры диэлектрической проницаемости в зависимости от состава, температурные зависимости удельной проводимости и импеданса пленок при одноосной статической деформации. Обнаруженные СВЧ и деформационные явления в поликристаллических пленках качественно проанализированы на основе модели эффективной среды. Показано, что инфракрасные спектры диэлектрической проницаемости ( $\text{Im} \epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$ ), удельной электропроводности ( $\text{Im} \sigma_{\text{эфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re} \sigma_{\text{эфф}}(\omega)$ ) и коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  твердого раствора  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  в зависимости от значения  $0 < x < 0,5$  и деформации коррелируются. Причем теоретические значения  $\alpha(\omega)$  в области энергии фотонов  $\hbar\omega < E_g$  несколько меньше, чем экспериментальных, а при  $\hbar\omega > E_g$  имеет место обратная ситуация. Во всех спектрах наблюдаются пороговые значения частоты с характерными максимумами в области примесного поглощения  $\hbar\omega < E_g$ , связанных коллективными возбуждениями электрон-плазменного взаимодействия. Экспериментально установлено, что для свежеприготовленных пленок под действием умеренной деформации растяжения зависимость импеданса от температуры  $\text{Re}Z(T)$  испытывает радикальное изменение с деформацией до  $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-3}$  при температуре  $T \leq T_k$  и наблюдается лишь металлическая проводимость, а затем в интервале температур  $T_k < T < T_k'$  происходит инверсия знака температурного коэффициента импеданса  $\gamma(\varepsilon)$ . Критические значения температуры  $T_k$ ,  $T_k'$  и их разность уменьшаются с ростом величины  $\varepsilon$ . При деформациях  $\varepsilon > 4 \cdot 10^{-3}$  наступает условие  $T_k = T_k'$  и исчезает падающий участок кривой  $\text{Re}Z(T)$ . Тензочувствительность  $\text{Re}K(\varepsilon)$ ,  $\text{Im}K(\varepsilon)$  пленок в СВЧ поле сильно зависят от температуры и времени термической обработки, причем при температуре  $T_{\text{отж}} \approx 500$  К и времени  $t_{\text{отж}} \approx 2 - 3$  ч приобретает наиболее оптимальные и стабильные значения.

**Ключевые слова:** поликристаллическая пленка, теллурид висмута-сурьмы, электропроводность, тензочувствительность, микроволновое поле, импеданс, комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент поглощения

**Для цитирования:** Сиддиков Р.У., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Диэлектрические свойства и электропроводность поликристаллических пленок  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Sb}_3$  в микроволновом поле и при механической деформации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;4(54):60–74. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-60-74](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-60-74)

*Original article*

**DIELECTRIC PROPERTIES AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF  
POLYCRYSTALLINE  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Sb}_3$  FILMS IN A MICROWAVE FIELD AND UNDER  
MECHANICAL DEFORMATION**

© 2025 R. U. Siddikov, H. M. Sulaymonov, N. Kh. Yuldashev

Fergana State Technical University (86 Ferghanskaya St., Ferghana, Uzbekistan, 150107)

**Abstract.** The results of a study of the dielectric and electrical properties of polycrystalline films of a  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  –  $\text{Bi}_2\text{Sb}_3$  solid solution under the influence of a microwave field and mechanical deformation are presented in order to determine the mechanisms of influence of point and extended inhomogeneities. The spectra of dielectric permittivity depending on the composition, temperature dependences of the specific conductivity and impedance of films under uniaxial static deformation are considered. The detected microwave and deformation phenomena in polycrystalline films are qualitatively analyzed based on the effective medium model. It is shown that the infrared spectra of dielectric permittivity ( $\text{Im}\epsilon_{\text{зфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re}\epsilon_{\text{зфф}}(\omega)$ ), electrical conductivity ( $\text{Im}\sigma_{\text{зфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re}\sigma_{\text{зфф}}(\omega)$ ) and absorption coefficient of a solid solution  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ , depending on the value  $0 < x < 0.5$ , and deformations are correlated. Moreover, the theoretical values in the field of photon energy are somewhat lower than the experimental ones, and the opposite situation occurs. Threshold frequency values with characteristic maxima in the impurity absorption region associated with collective excitations of the electron-plasma interaction are observed in all spectra. It has been experimentally established that for freshly prepared films, under the influence of moderate tensile strain, the impedance dependence on temperature undergoes a radical change with deformation up to at the same temperature and only metallic conductivity is observed, and then the sign of the temperature coefficient of the impedance  $\gamma(\epsilon)$  inverts in the temperature range. The critical values of the  $T_c$  temperature and their difference decrease with an increase in the value of  $\epsilon$ . During deformations, a condition occurs and the falling section of the curve disappears. The strain sensitivity of films in the microwave field strongly depends on the temperature and time of thermal treatment, and at a temperature of about  $T \approx 500$  K and a time of about  $t \approx 2$ –3 hours, it acquires the most optimal and stable values.

**Keywords** polycrystalline film, bismuth-antimony telluride, electrical conductivity, strain sensitivity, microwave field, impedance, complex dielectric constant, absorption coefficient

**For citation:** Siddikov R.U., Sulaymonov H.M., Yuldashev N.Kh. Dielectric properties and electrical conductivity of polycrystalline  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  –  $\text{Bi}_2\text{Sb}_3$  films in a microwave field and under mechanical deformation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;4(54):60–74. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-60-74](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-60-74)

**Введение**

Твердые растворы халькогенидов висмута и сурьмы являются эффективными термоэлектрическими [1 – 6] и тензоэлектрическими [7; 8] материалами. Они используются не только для термоэлектрического охлаждения и нагрева, преобразования тепловой энергии в электрическую, в качестве топологического изолятора, эффективно экранирующих от электромагнитных помех, а также для создания датчиков накопления усталостных повреждений с высокой тензочувствительностью [7 – 10]. В настоящее время достаточно внимание уделяется установлению закономерностей формирования структуры, фазового состава поликристаллических пленок на основе твердого раствора  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  и исследованию их механизмов электропроводности и диэлектрических свойств. В работах [6; 8] обнаружены «металлический» и «полупроводниковый» характеры электропроводности в зависимости от температуры. В работе [7] показано, что

электрическое сопротивление пористой поликристаллической  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  пленки, выращенной термовакуумным испарением при температуре подложки  $T_{\text{п}} \leq 363$  К, резко уменьшается вблизи пороговой частоты  $\omega_0 \approx 10^5$  Гц переменного тока до значений сопротивления плотных пленок с температурой  $T_{\text{п}} \approx 423$  К. После воздействия  $N \approx 10^5$  циклов механической деформации с амплитудой  $\epsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$  отн. ед. сопротивление пленки увеличивается в 1,5 раза, а критическое значение  $\omega_0$ , определяемое неоднородностью пленки, уменьшается почти в  $10^2$  раз.

В отличие от объемных кристаллов и поликристаллов в тонких полупроводниковых поликристаллических пленках по мере уменьшения толщины пленок электрофизические свойства их изменяются вследствие заметного вклада поверхностной и приповерхностной проводимости носителей за счет мелко дисперсности зерен, адсорбции и диффузии примесей, приводящих к образованию специфических поверхностных

электронных состояний. Существенно проявляется роль переходного слоя между пленкой и подложкой, структурной неоднородности, обусловленной технологией получения, и квантовых размерных эффектов при малых толщинах пленок ( $d < 1$  мкм). До сих пор недостаточно рассмотрены свойства пористых пленок, связанных с наличием полифазных включений, многочисленных точечных и протяженных дефектов. Поэтому с учетом этих факторов исследование диэлектрических и тензоэлектрических свойств твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  в микроволновом (СВЧ) поле несомненно актуально в областях физики полупроводников и диэлектриков, электроники и техники измерительных систем в материаловедении.

Целью настоящей работы является изучение диэлектрических свойств и электропроводности поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  в актуальной области температур 280 – 520 К под действием микроволнового поля и механической деформации для установления механизмов влияния неоднородностей на рабочие параметры образцов. Рассмотрены спектры диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности и коэффициента поглощения твердого раствора  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  в зависимости от значений  $0 < x < 0,5$  и деформации, температурные зависимости удельной проводимости, импеданса и диэлектрической проницаемости под действием СВЧ поля и одноосной статической деформации, а также влияния на них термической обработки пленок. Обнаруженные оптические и деформационные явления в поликристаллических пленках  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  качественно проанализированы на основе теории модели эффективной среды.

### Методика эксперимента.

Импеданс является величиной, характеризующей электрические свойства поликристаллических пленок на определенной частоте переменного поля ( $\tilde{Z} = R + iR_{LC}$ , где  $R$  и  $R_{LC} = \omega L - (1/\omega C)$  – активное и реактивное сопротивления;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота;  $L$  и  $C$  – индуктивность и электроемкость пленки в целом). Поэтому измерение этой величины с высокой точностью имеет немаловажное значение для фиксирования тензометрических характеристик образцов в переменном поле. В частности, исследование импеданса неоднородных пленок на основе твердого раствора  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  в зависимости от уровня относительной деформации растяжения  $\varepsilon = \Delta\ell/\ell_0$  позволяет определить комплексный коэффициент тензочувствительности в микроволновом поле:

$$K = \frac{\Delta Z}{Z_0 \varepsilon} = K_R + iK_{LC}, \quad (1)$$

$$K_R = \text{Re } K = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} \quad , \quad K_{LC} = \text{Im } K = \frac{\Delta R_{LC}}{R_{LC}^0 \varepsilon} \quad , \quad (2)$$

где  $K_R$  и  $K_{LC}$  – коэффициенты тензочувствительности по активным и реактивным сопротивлениям;  $\Delta R = R(\varepsilon) - R_0$ ;  $R(\varepsilon)$  и  $R_0$  – активные сопротивления пленки при деформации и без нее.

Поликристаллические пленки  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  толщиной 3 – 4 мкм и размерами 5 × 30 мм на полиамидной подложке изготавливали методом термического испарения в вакууме  $P \cdot 10^{-2}$  Па при температуре подложки  $T_p = 363$  К и скорости напыления  $W \approx 200$  Å/с [9; 10]. Наиболее устойчивыми параметрами обладали пленочные образцы с составом  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ . Выбор пленки именно такого состава обусловлен еще и тем, что в системе твердых растворов  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  наибольшей тензочувствительностью обладает пленка с составом  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  [7 – 10].

Исследуемые поликристаллические пленки помещали в измерительную ячейку с волноводной секцией, которая была обеспечена нагревателем, позволяющим изменять температуру от 77 до 480 К и частоту микроволнового поля в интервале  $10^8 - 10^{10}$  Гц. Использована методика измерения импедансной спектроскопии [11; 12].

Удельная электропроводность определяли по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{\ell}{bd} \frac{I}{V_\sigma}, \quad (3)$$

где  $\ell$ ,  $b$ ,  $d$  – длина, ширина и толщина образца;  $I$  – сила тока через образец;  $V_\sigma$  – падение напряжения между электродами для измерения электропроводности.

Деформацию создавали изгибом консольной пластины обычного деформационного устройства равного сопротивления из титанового сплава. Наклеенные на него с помощью специального клея пленочные образцы подвергали деформации одностороннего растяжения путем изгиба подложки. Относительную деформацию  $\varepsilon$  вычисляли по известному выражению [13]:

$$\varepsilon = \frac{4d}{\ell^2} y, \quad (4)$$

где  $y$  – прогиб свободного конца пластиинки в точке приложения силы.

**Основные электрофизические параметры пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  в зависимости от состава**  
**Basic electrophysical parameters of films  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  depending on the composition**

Образец		Избыток компоненты, мас. %	$N \cdot 10^{-17}$ , см	$R_x\sigma$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\sigma$ , $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$
Избыток $Bi_2Te_3$	1	0	4,3	2,4	0,26
	4	0,2	8,3	2,78	0,37
	8	1,2	18,8	2,91	0,84
	11	2,2	20,8	2,78	0,90
	14	24,7	24,7	2,37	0,99
Избыток $Sb_2Te_3$	1	0	4,3	2,4	0,26
	21	0,8	3,1	3,3	0,2
	26	1,8	2,9	4,3	0,20
	31	2,8	2,7	3,4	0,14
	42	3,8	2,2	3,0	0,11

Значения деформации  $\epsilon$  варьировали в интервале от 0 до  $6 \cdot 10^{-3}$  отн. ед. Исследование диэлектрической проницаемости под действием механической деформации проводили преимущественно на фиксированной частоте  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц.

Пленки твердого раствора  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  можно рассматривать как состоящий из двух компонент  $Bi_2Te_3$  и  $Bi_2Sb_3$  с избытком одного из этих компонентов (при  $x \neq 0,5$ ). Низкие значения концентрации  $N$  и холловской подвижности  $\mu_x = R_x\sigma$  носителей заряда, а также удельной электропроводности  $\sigma$  (см. таблицу), показывают, что материал пленки представляет собой сильно неоднородную среду. Особенностью таких неоднородных сред является зависимость эффективной комплексной диэлектрической проницаемости  $(\epsilon_{\text{эфф}}^*)$  и удельной электропроводности  $(\sigma_{\text{эфф}}^*)$  от частоты переменного поля. Кроме того, значение  $\epsilon_{\text{эфф}}^*$  и  $\sigma_{\text{эфф}}^*$  есть функция относительной объемной доли, формы, диэлектрической проницаемости и электропроводности каждого компонента, составляющего неоднородную среду.

**Расчет диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности и коэффициента поглощения неоднородных пленок в области микроволновых частот**

На основе теории эффективной среды [14 – 18] было исследовано влияние объемных долей компонентов и их геометрической конфигурации на реальную  $(\text{Re } \epsilon_{\text{эфф}}^*)$ , минимую  $(\text{Im } \epsilon_{\text{эфф}}^*)$  части  $\epsilon_{\text{эфф}}^*$ , реальную  $\text{Re } \sigma_{\text{эфф}}^*$  части  $\sigma_{\text{эфф}}^*$  пленок теллурида висмута-сурьмы с нарушенной стехиометрией в микроволновом диапазоне частот.

Эффективные параметры пленки определяли методом самосогласованного локального поля [17]. Согласно этой идее можно найти распределение поля вокруг отдельного элемента многокомпонентной среды, взятого в качестве ее представителя. При этом предполагается, что

отмеченный элемент окружен эффективной средой, определяемой из условий обращения в ноль суммарного возмущения поля, обусловленного статически не зависящими скоростными компонентами.

Для двухкомпонентных гетерогенных сред усредненное по объему среды электрическое поле  $E$  определяется по следующему уравнению:

$$E = \frac{1}{V} \int_V EdV = \frac{1}{V} \sum_{\kappa} \int_{V_{\kappa}} E_{\kappa} dV_{\kappa}. \quad (5)$$

Для неоднородной среды, помещенной в однородное поле  $E$ , поле  $E_{\kappa}$  является однородным, но различным для каждого компонента. Поэтому формулу (5) можно представить в следующем виде:

$$E = \sum_{\kappa} \theta_{\kappa} E_{\kappa}. \quad (6)$$

Поле  $E_{\kappa}$  связано с однородным полем среды следующей зависимостью:

$$E_{\kappa} = \frac{\epsilon_{\text{эфф}}^*}{\beta_{\kappa} \epsilon_{\kappa}^* + (1 - \beta_{\kappa}) \epsilon_{\text{эфф}}^*} E_{\text{ср}}. \quad (7)$$

Заметим, что в выражениях (5) – (7)  $V$  – объем пленки;  $\theta_{\kappa} = V_{\kappa}/V$  – объемная доля компонента;  $\epsilon_{\kappa}^*$  – комплексная диэлектрическая проницаемость;  $\beta_{\kappa}$  – фактор деполяризации каждого компонента.

Подставляя уравнение (7) в формулу (6) и учитывая, что компоненты среды имеют одинаковую геометрическую форму ( $\beta_2 = \beta_1 = \beta$ ), получим

$$\theta_1 \frac{\epsilon_{\text{эфф}}^*}{\beta_1 \epsilon_1^* + (1 - \beta) \epsilon_{\text{эфф}}^*} + \theta_2 \frac{\epsilon_{\text{эфф}}^*}{\beta_2 \epsilon_2^* + (1 - \beta) \epsilon_{\text{эфф}}^*} = 1. \quad (8)$$

В выражении (8), принимая  $\beta = 1/3$  (шаровые включения) и решая относительно параметра  $\epsilon_{\text{эфф}}^*$ , имеем

$$\epsilon_{\text{эфф}}^* = A^* \pm \sqrt{A^{*2} + B^{*2}}; \quad (9)$$

$$A^* = [2(\epsilon_1^* + \epsilon_2^*) - 3(\theta_1 \epsilon_2^* + \theta_2 \epsilon_1^*)]/4; \quad (10)$$

$$B^* = \epsilon_1^* \epsilon_2^* / 2, \quad \epsilon_1^* = \epsilon_1 + i4\pi\sigma_1/\omega, \quad (11)$$

$$\epsilon_2^* = \epsilon_2 + i4\pi\sigma_2/\omega,$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – вещественные части диэлектрической проницаемости  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Sb}_3$ ;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – электропроводности в переменном поле этих компонентов;  $\omega$  – частота поля.

В переменном поле комплексную электропроводность можно представить в следующем виде:

$$\sigma^* = \sigma_0 \frac{1 - i\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_0 = N \frac{e^2\tau}{m^*}$  – электропроводность в постоянном токе;  $N$  – концентрация носителей зарядов;  $e$  – заряд электрона;  $\tau$  – время релаксации;  $m^*$  – эффективная масса свободных носителей.

Учитывая соотношение  $\epsilon^* = (n - i\kappa)^2$ ; здесь  $n$  – показатель преломления;  $\kappa$  – показатель поглощения; и подставляя уравнение (12) в формулу (11) находим

$$\epsilon_1^* = \epsilon_1 - 4\pi\sigma'_0\tau_1(1 + \omega^2\tau_1^2)^{-1} + i4\pi\sigma''_0[\omega(1 + \omega^2\tau_1^2)]^{-1};$$

$$\epsilon_2^* = \epsilon_2 - 4\pi\sigma'_0\tau_2(1 + \omega^2\tau_2^2)^{-1} + i4\pi\sigma''_0[\omega(1 + \omega^2\tau_2^2)]^{-1}.$$

Разделяя вещественные и мнимые части в последних уравнениях, получим

$$\text{Re } \epsilon_1^* = n_1^2 - \kappa_1^2 = \epsilon_1 - 4\pi\omega^{-1} \text{Im } \sigma_1; \quad (13)$$

$$\text{Im } \epsilon_1^* = 2n_1\kappa = \frac{4\pi \text{Re } \sigma_1}{\omega}; \quad (14)$$

$$\text{Re } \epsilon_2^* = \epsilon_2 - \frac{4\pi}{\omega} \text{Im } \sigma_2; \quad (15)$$

$$\text{Im } \epsilon_2^* = 2n_2\kappa_2 = \frac{4\pi \text{Re } \sigma_2}{\omega}. \quad (16)$$

Подставляя их в формулы (12) и (11), получим выражение для нахождения вещественной и мнимой части  $A^*$  и  $B^*$ :

$$\text{Re } A^* = [2(\epsilon_1 + \epsilon_2) - 3(\theta_1 \epsilon_2 + \theta_2 \epsilon_1)]/4 +$$

$$+ \frac{\pi}{\omega} [3(\theta_1 \text{Im } \sigma_2 + \theta_2 \text{Im } \sigma_1) - 2(\text{Im } \sigma_1 + \text{Im } \sigma_2)]; \quad (17)$$

$$\text{Im } A^* = \frac{2\pi}{\omega} \text{Re } (\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{3\pi}{\omega} (\theta_1 \text{Re } \sigma_2 + \theta_2 \text{Re } \sigma_1); \quad (18)$$

$$\text{Re } B^* = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{2} - \frac{2\pi}{\omega} (\epsilon_1 \text{Im } \sigma_2 + \epsilon_2 \text{Im } \sigma_1) + \\ + \frac{8\pi^2}{\omega^2} (\text{Im } \sigma_1 \text{Im } \sigma_2 - \text{Re } \sigma_1 \text{Re } \sigma_2); \quad (19)$$

$$\text{Im } B^* = \frac{2\pi}{\omega} (\epsilon_1 \text{Re } \sigma_2 + \epsilon_2 \text{Re } \sigma_1) - \\ - \frac{8\pi^2}{\omega^2} (\text{Im } \sigma_1 \text{Re } \sigma_2 + \text{Re } \sigma_1 \text{Im } \sigma_2). \quad (20)$$

Введем обозначение  $\sqrt{A^{*2} + B^{*2}} = \sqrt{a + ib}$ . Отсюда

$$a = \text{Re } A^2 - \text{Im } A^2 + \text{Re } B; \quad (21)$$

$$b = 2\text{Re } A \text{Im } A - \text{Im } B \quad (22)$$

и из соотношения  $\sqrt{a + ib} = c + id$  находим

$$c = \sqrt{\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} + \frac{b^2}{4}}}, \quad (23)$$

где  $d = b/2c$ .

Учитывая вышеизложенное, нетрудно определить реальную и мнимую части эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\text{Re } \epsilon_{\text{эфф}} = \text{Re } A + c; \quad (24)$$

$$\text{Im } \epsilon_{\text{эфф}} = \text{Im } A + d. \quad (25)$$

Эти результаты позволяют записывать реальную часть эффективной проводимости пленок в виде

$$\text{Re } \sigma_{\text{эфф}} = \frac{\omega}{4\pi} \text{Im } \epsilon_{\text{эфф}}. \quad (26)$$

Используя для коэффициента поглощения соотношением  $\alpha = 2\omega\kappa/c$  (где  $c$  – скорость света), находим реальную часть проводимости компонентов пленки:

$$\text{Re } \sigma_1 = \frac{\alpha_1 n_1 c}{4\pi} \quad \text{и} \quad \text{Re } \sigma_2 = \frac{\alpha_2 n_2 c}{4\pi}. \quad (27)$$

Мнимую часть можно определить из уравнений (13) и (15). Параметры  $\epsilon_{\text{эфф}}$ ,  $\sigma_{\text{эфф}}$  можно считать определенными, если известны значения

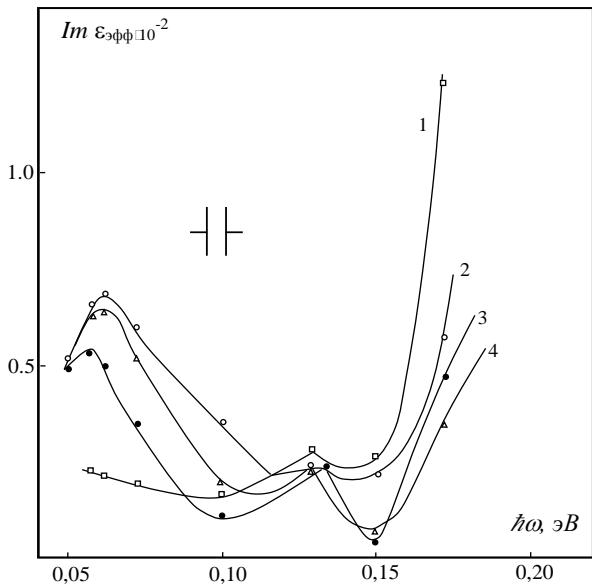


Рис. 1. Спектры  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  с избытком теллурида сурьмы (1 – 4 – 0,8; 1,8; 2,8; 3,8 мас. %) при  $T = 300$  К  
Fig. 1. Spectra of  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  for  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  films with excess antimony telluride (1 – 4 – 0,8; 1,8; 2,8; 3,8 mas. %) at  $T = 300$  K

*n*, *k* и *d*. Для поликристаллических пленок эти коэффициенты определяются по экспериментальным данным.

При теоретическом вычислении коэффициента поглощения  $\alpha$  использовали соотношение, связывающее параметры  $\alpha(\omega)$  и  $\sigma(\omega)$  [23]:

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi}{c\sqrt{\epsilon_1}} \sigma(\omega), \quad (28)$$

здесь  $\epsilon_1, \sigma(\omega)$  – реальные части диэлектрической проницаемости, удельной проводимости.

Известно, что величина  $Im \epsilon = \frac{4\pi \text{Re} \sigma}{\omega}$ , тогда для коэффициента поглощения имеем

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega \text{Im} \epsilon_{\text{эфф}}}{c \sqrt{\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}}}}. \quad (29)$$

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектральные зависимости  $Im \epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$  для пленки  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  с избытками теллурида сурьмы и теллурида висмута приведены на рис. 1, 2. Теоретические кривые (сплошные линии) построены на основе формулы (25). Численные расчеты проводили при следующих значениях подгоночных параметров:

$$\sigma'_0 = 5,7 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}, \epsilon_1 = 55,$$

$$\sigma''_0 = 3,25 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}, \epsilon_2 = 45.$$

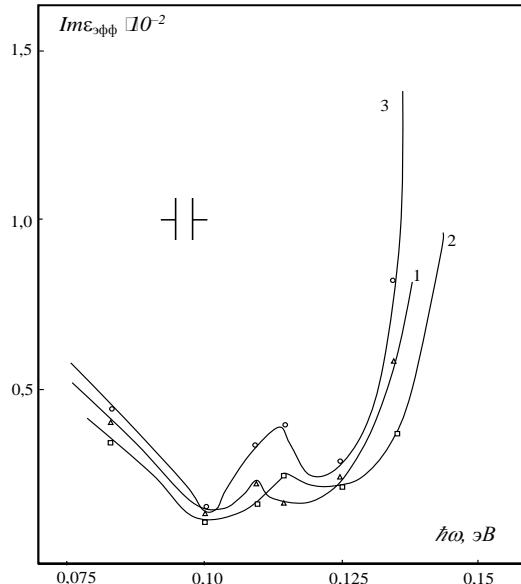


Рис. 2. Спектры  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  с избытком теллурида висмута (1 – 3 – 0,2; 1,2; 2,2 мас. %) при  $T = 300$  К  
Fig. 2. Spectra  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  of  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  films with excess bismuth telluride (1 – 3 – 0,2; 1,2; 2,2 mas. %) at  $T = 300$  K

Частотные зависимости  $\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$  и  $\text{Re} \sigma_{\text{эфф}}(\omega)$ , рассчитанные по формулам (24) и (25), аналогичны ходу изменения параметра  $Im \epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$ . Для всех исследованных пленок эти спектры в зависимости от объемного параметра  $\theta$  испытывают сдвиг, как по энергетической шкале, так и по интенсивностям.

Величина  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  (а также  $\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}}$ ,  $\text{Re} \sigma_{\text{эфф}}$ ) в окрестности частоты собственного поглощения  $\hbar\omega \approx E_g$  ( $E_g = 0,13$  эВ  $E_g = 0,13$  эВ для  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $E_g = 0,21$  эВ для  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  при температуре примерно 77 К [19; 20]) достигают наибольших значений ( $\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}} > \epsilon_1 > \epsilon_2$ ,  $\text{Re} \sigma_{\text{эфф}} > \sigma'_0 > \sigma''_0$ ). В этом случае вся энергия кванта света затрачивается для перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости, что определяет мнимую часть эффективной диэлектрической проницаемости пленок.

Зависимость  $Im \epsilon_{\text{эфф}}$  и  $\text{Re} \epsilon_{\text{эфф}}$  от состава пленок в микроволновом диапазоне, (рис. 3) были исследованы в работе [19]. Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Под действием переменного поля свободные носители заряда смещаются на микроскопическое расстояние, которое превышает проводящую область образца. Вследствие этого каждый проводящий фазовый участок превращается в электрическую диполь. Следовательно, образец поляризуется. При определенных пороговых частотах  $\hbar\omega < E_g$  (рис. 1 –  $\hbar\omega_1 \approx 0,056$  эВ,

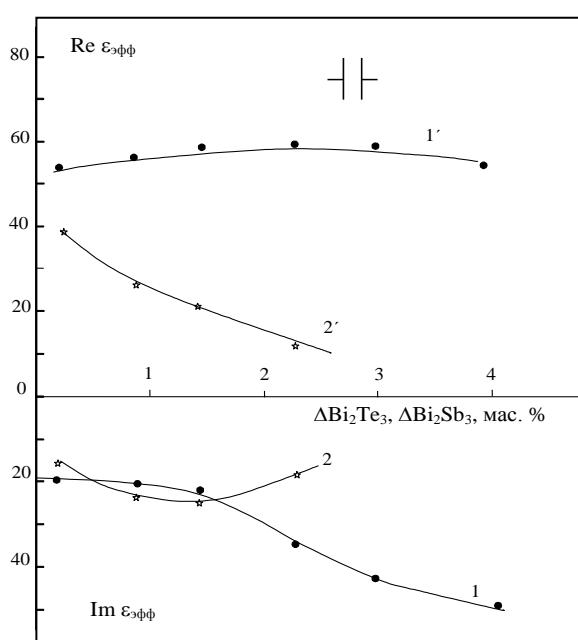


Рис. 3. Зависимость  $Im\epsilon_{\text{эфф}}$  и  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$  от состава пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ : 1, 1' и 2, 2' – с избытком теллурида сурьмы и теллурида висмута при  $T = 300$  К

Fig. 3. Dependence of  $Im\epsilon_{\text{эфф}}$  and  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$  on the composition of  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  films:  
1, 1' and 2, 2' – with excess antimony telluride and bismuth telluride at  $T = 300$  K

$\hbar\omega_2 \approx 0,13$  эВ и рис. 2 –  $\hbar\omega_1 \approx 0,07$  эВ,  $\hbar\omega_2 \approx 0,115$  эВ) все участки образца успевают полностью поляризоваться, что и приводит к росту параметров  $Im\epsilon_{\text{эфф}}$  и  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$ . Относительно большое значение  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$  и рост ее с увеличением в составе пленки доли теллурида сурьмы связано с изменениями фактора деполяризации из-за кристаллических подрешеток  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ . Однако, с ростом добавки теллурида висмута  $Im\epsilon_{\text{эфф}}$  увеличивается (рис. 3, кривая 2), а  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$  уменьшается (рис. 3, кривая 2'). Это заведомо связано с образованием металлических прослойек. Как показывают расчеты, дисперсия величин  $Im\epsilon_{\text{эфф}}$ ,  $Re\epsilon_{\text{эфф}}$  для шаровых включений наименьшая, а для включений в форме сплюснутого эллипсоида – наибольшая. При высоких частотах  $\hbar\omega > E_g$  за короткое время электронная система не успевает поляризоваться (за счет малых значений максвелловского времени), что приводит к уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости пленок [19; 20]. Как показывает опыт параметр  $Re\sigma_{\text{эфф}}$  для пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  превышает соответствующие значения для каждого из материалов  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ . Это связано с параллельными соединениями кристаллитов в исследованных пленках.

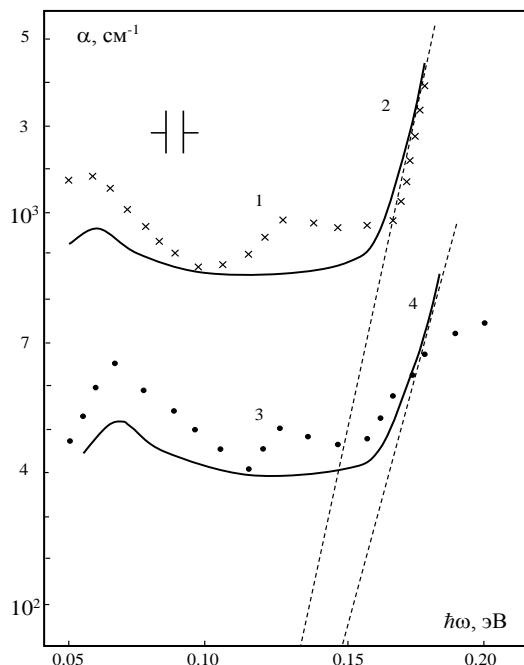


Рис. 4. Спектры поглощения пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  с избытком теллурида сурьмы (1,8 (1, 2) и 3,8 мас. % (3, 4)): 1, 3 – эксперимент при  $T = 300$  К; 2, 4 – теория

Fig. 4. Absorption spectra of  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  films with excess antimony telluride (1.8 (1, 2) and 3.8 wt. % (3, 4)): 1, 3 – experiment at  $T = 300$  K; 2, 4 – theory

На рис. 4 приведены экспериментальные 1, 3 и теоретические 2, 4 (рассчитанные по формуле (29)) спектры коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  для образцов  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  с избытком теллурида сурьмы 1,8 (1, 2) и 3,8 мас. % (3, 4). Во-первых, спектр  $\alpha(\omega)$  качественно похожи спектрам  $Im\epsilon_{\text{эфф}}(\omega)$  на рис. 1 и, во-вторых, теоретические кривые качественно соответствуют экспериментальным кривым, причем теоретические значения в области частот  $\hbar\omega < E_g$  несколько меньше, чем в экспериментальных, а при  $\hbar\omega > E_g$  может наблюдаться и обратная ситуация. Следует отметить, что подобные соответствия имеют место для всех исследованных образцов  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ .

Проведенные выше спектральные исследования показывают, что сверхстехиометрические добавки  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  в пределах растворимости способствуют образования в широком интервале концентраций электрически активных примесей, вызывающих коллективных возбуждений электрон-плазмонного взаимодействия. Это обуславливает росту параметров пленки  $\epsilon_{\text{эфф}}$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$ . Более того, избытки этих сверхрастворимых примесей могут выпадать в отдельную фазу, распределение которой может быть неодинаковым по объему пленки, что в сильной степени влияет на величину поляризации и, следовательно, на параметр  $\epsilon_{\text{эфф}}$ . Все эти факторы в со-

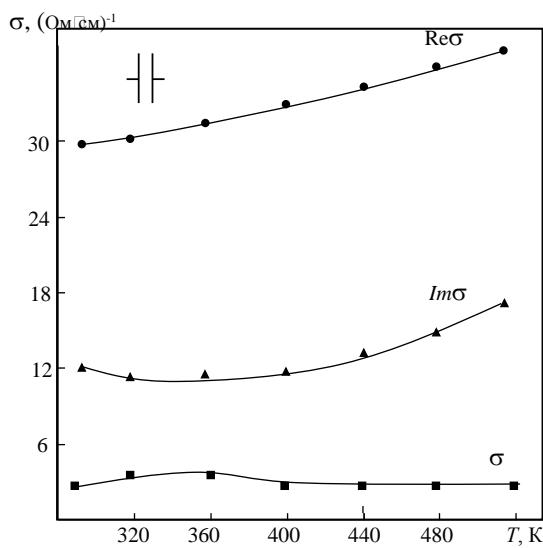


Рис. 5. Экспериментальная зависимость удельной электропроводности пленки  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  от температуры в постоянном и микроволновом ( $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц) поле  
Fig. 5. Experimental dependence of the specific electrical conductivity of the  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  film on temperature in constant and microwave ( $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz) fields

вокупности приводят к изменению коэффициента поглощения  $\alpha$ .

Температурная зависимость удельной проводимости пленки  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  приведена на рис. 5. Вещественная часть электропроводности  $\text{Re}\sigma$  в микроволновом поле с ростом температуры монотонно возрастает, то есть носит «полупроводниковый» характер с постоянным температурным коэффициентом, а мнимая часть  $\text{Im}\sigma$  до температуры 340 К уменьшается (как у металлов), затем нелинейно увеличивается. В то же время электропроводность на постоянном токе  $\sigma$  по значению почти на порядок меньше, чем  $\text{Re}\sigma$  и до температуры 360 К проявляется полупроводниковая зависимость, переходящая далее в металлическую, при температуре более 400 К практически не обнаруживает температурную зависимость. Эти особенности указывают на то, что проводимость поликристаллических слоев  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  на микроволновом поле в основном обуславливается экранированием электронных и структурных неоднородностей пленки. Сравнение величины электропроводности, измеренных в микроволновом поле и на постоянном токе, подтверждает наличия существенных протяженных неоднородностей в исследуемых образцах.

Поликристаллические пленки  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  представляют собой неоднородную систему, состоящую из отдельных кристаллических зерен с различными локальными электропроводностями на резкой границе кристаллитов. Такие гетерогенные системы обладают высокой ди-

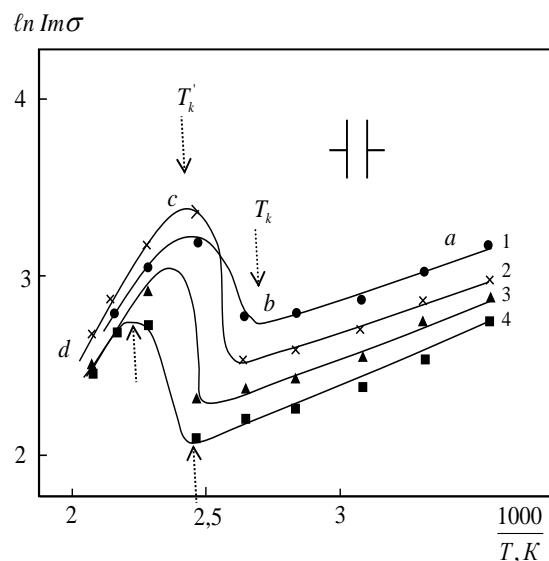


Рис. 6. Зависимость  $\ln \text{Im}\sigma$  от  $1/T$  пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  при различных уровнях относительной деформации  $\varepsilon \cdot 10^3$ :  
1 – 4 – 0,7; 1,4; 2,8; 4,2;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц  
Fig. 6. Dependence of  $\ln \text{Im}\sigma$  on  $1/T$  of  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  films at different levels of relative deformation  $\varepsilon \cdot 10^3$ :  
1 – 4 – 0,7; 1,4; 2,8; 4,2%;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz

электрической проницаемостью, измеряя которых, можно вычислить эффективные и истинные значения электрофизических параметров компонентов. В работе [13] рассмотрен вопрос о шунтировании барьерных областей на границах микрокристаллов емкостями при высоких частотах. Однако это не было проверено при исследовании тензосвойств поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  в микроволновом диапазоне.

Микроволновой метод измерения параметров поликристаллических пленок имеет ряд преимуществ по отношению с измерениями на постоянном токе. На микроволновой частоте некоторые объемные свойства полупроводника обладают рядом интересных особенностей, связанных с тем, что период микроволновых колебаний имеет величину порядка частоты столкновений носителей заряда. Такие измерения дают возможность получить дополнительные сведения об их свойствах, которые не могут быть установлены при измерениях на постоянном токе, а также позволяют определить вещественную и мнимую части импеданса, при помощи которых возможно рассмотреть их вклад в тензочувствительность пленок.

Зависимость мнимой части удельной проводимости неоднородных пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$   $n$ -типа от температуры при различных уровнях одноосной деформации растяжения в координатах  $\ln \text{Im}\sigma - 1/T$  представлена на рис. 6. На кривой  $\text{Im}\sigma(1/T)$  при фиксированном значении деформации  $\varepsilon$  наблюдается три характерные участки (как и на кривой  $\text{Re}Z(T)$  рис. 7): на экс-

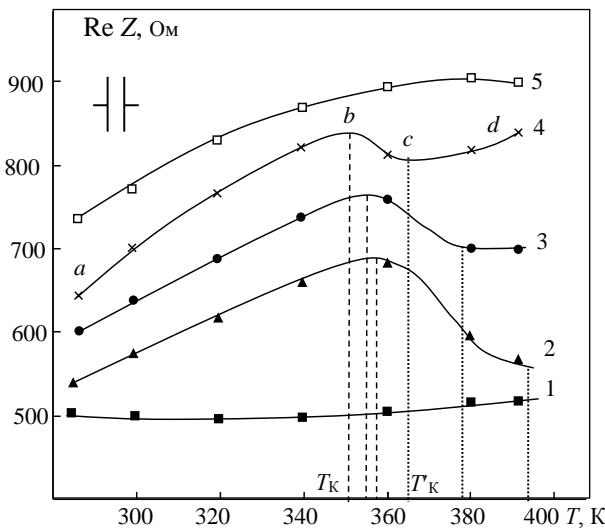


Рис. 7. Зависимость вещественной части импеданса  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  от температуры при значениях деформации растяжения  $\varepsilon \cdot 10^3$ :

1 – 5 – 0; 1,12; 2,27; 3,4; 4,52;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц

Fig. 7. Dependence of the real part of the impedance of  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  on temperature at tensile strain values  $\varepsilon \cdot 10^3$ : 1 – 5 – 0; 1,12; 2,27; 3,4; 4,52;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz

поненциальных  $\sigma = \exp(\Delta E_{ai} / kT)$  участках  $ab$  ( $i = 1$ ;  $T < T_k \approx 360$  K) и  $cd$  ( $i = 3$ ;  $T > T'_k$ ) энергия активации  $\Delta E_a$  имеет разные значения  $\Delta E_{a3} > \Delta E_{a1}$ , то есть в более высокотемпературной области  $cd$  проводимость уменьшается быстрее с ростом температуры. Переходная область  $bc$  ( $i = 2$ ;  $T_k < T < T'_k$ ) характеризуется полупроводниковой проводимостью  $\sigma = \exp(-\Delta E_{a2} / kT)$ , причем  $\Delta E_{a2} > E_{a3} > \Delta E_{a1}$ . Энергии активации  $\Delta E_{a1}$ ,  $\Delta E_{a2}$  не зависят от величины  $\varepsilon$ , а параметры  $E_{a3}$ ,  $T_k$ ,  $T'_k$  существенно меняются от уровня одноосной деформации растяжения. Эти особенности величины  $\text{Im}\sigma(1/T, \varepsilon)$  обусловлены пористой структурой и двухкомпонентной гетерогенностью пленки  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ , а также их вариацией под действием СВЧ поля. Рассматриваемая композиционная пленка при температуре примерно 360 K испытывает фазовый переход второго порядка (рис. 5 – 11).

На рис. 7 приведена зависимость вещественной части импеданса  $R_e Z$  поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$   $n$ -типа проводимости от температуры при различных уровнях относительной деформации растяжения  $\varepsilon$ . Видно, что величина  $R_e Z$  недеформированной пленки слабо зависит от температуры (рис. 5, кривая 1) также, как и кривая  $\sigma$  на постоянном токе. Под действием умеренной деформации растяжения кривая  $\text{Re}Z(T)$  испытывает радикальное изменение (рис. 7, кривые 2 – 4). С увеличением относительной деформации до  $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-3}$  и температу-

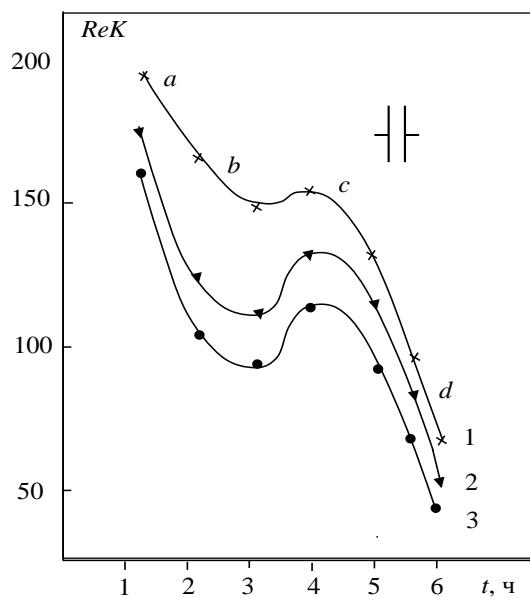


Рис. 8. Зависимость  $\text{Re}K$  ( $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ ) от времени отжига ( $t_{\text{отж}} = 500$  K) при уровнях относительной деформации  $\varepsilon \cdot 10^3$ :

1 – 3 – 3,3; 4,5; 5,6;  $T = 300$  K;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц

Fig. 8. Dependence of  $\text{Re}K$  for  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  on the annealing time ( $t_{\text{cut}} = 500$  K) at different levels of relative strain  $\varepsilon \cdot 10^3$ : 1 – 3 – 3,3; 4,5; 5,6;  $T = 300$  K;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz

ры до  $T = T_k \approx 350$  K импеданс  $\text{Re}Z$  пленки монотонно возрастает (участки  $ab$ ), причем в отличие от кривой 1 ( $\varepsilon = 0$ ) обнаруживается лишь металлическая проводимость  $\text{Re}Z(\varepsilon, T) = Z_0(\varepsilon, T_0) [1 + \gamma(\varepsilon)(T - T_0)]$ , а затем в интервале температур  $T_k < T < T'_k$  (участки  $bc$ ) происходит инверсия знака температурного коэффициента импеданса  $\gamma(\varepsilon)$ , абсолютное значение которого, а также критические значения  $T_k$ ,  $T'_k$  и их разность уменьшаются с ростом  $\varepsilon$ . При деформациях  $\varepsilon > 4 \cdot 10^{-3}$  становится  $T_k = T'_k$  и исчезает падающий «полупроводниковый» участок  $bc$  кривой  $\text{Re}Z(T)$  и далее с ростом параметра  $\varepsilon$  доминирует металлическая проводимость (кривая 5). Заметим, что характерный участок  $cd$  ( $T > T'_k$ ) на кривых 2 – 5 в зависимости от величины  $\varepsilon$  ведет себя сложным образом при  $T > T_k$  практически  $\gamma \rightarrow 0$ .

Чувствительность импеданса пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  в микроволновом диапазоне к внешним механическим деформациям позволяет судить о тензосвойствах этих пленок. Исследования тензоэффекта в поликристаллических пленках микроволновым методом позволяют определить механизм большой тензочувствительности. Анализируя экспериментальные данные, можно заметить, что аномально большая тензочувствительность наблюдается не во всех поликристаллических пленочных образцах.

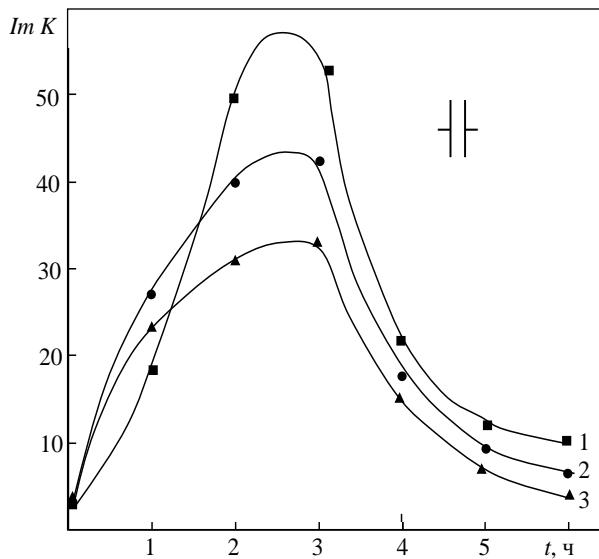


Рис. 9. Зависимость мнимой части коэффициента тензочувствительности  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  от времени отжига ( $t_{\text{отж}} = 500$  К) при различных уровнях относительной деформации  $\varepsilon \cdot 10^3$ :

1 – 3 – 1,12; 2,27; 3,30;  $T = 300$  К;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц  
 Fig. 9. Dependence of the imaginary part of the gauge-sensitivity coefficient for  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  on the annealing time ( $t_{\text{отж}} = 500$  К) different levels of relative strain  $\varepsilon \cdot 10^3$ :  
 1 – 3 – 1,12; 2,27; 3,30;  $T = 300$  К;  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz

В самом простом случае пленочные образцы, используемые в качестве тензодатчиков, должны состоять из двух фаз, проводимость которых отличается в определенных отношениях. Эффективная проводимость неоднородной среды является функцией проводимости компонентов и их доли объема. С ростом доли объема второй фазы эффективная электропроводность будет меняться определенной закономерностью (из  $\sigma_1$  к  $\sigma_2$ ). Если наблюдается плавное изменение эффективной электропроводности с ростом доли объема второй фазы, то эти образцы будут обладать тензосвойством, но не высокой чувствительностью. Если наблюдается скачкообразное изменение эффективной электропроводности в определенном интервале доли объема второй фазы, то в этих образцах тензочувствительность может достичь максимального значения. В этой узкой области доли объема второй фазы флюктуации поляризуемости кристаллитов под действием одноосной деформации растяжения достигают максимального значения.

Бесконтактный микроволновой метод служит мощным инструментом для исследования комплексной тензочувствительности пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ , термообработанных на воздухе. Поэтому были исследованы закономерности изменения действительной и мнимой частей тензочувствительности пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  при различных температурах и времени отжига.

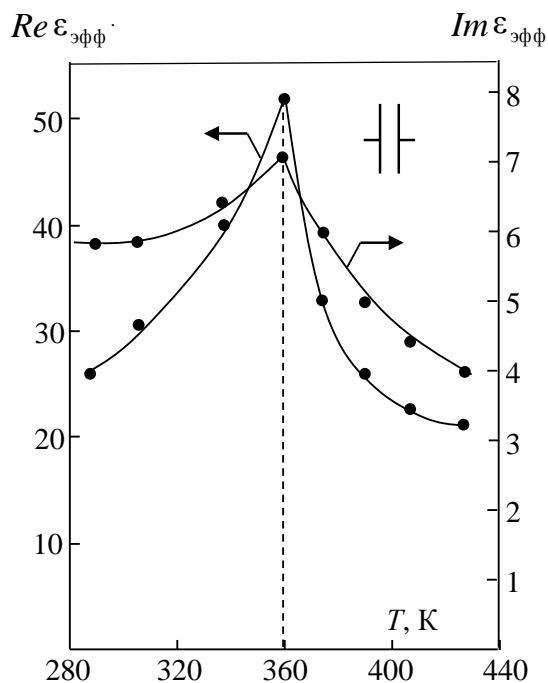


Рис. 10. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}$  и  $\text{Im } \varepsilon_{\text{эфф}}$  свежеприготовленных пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  ( $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц)

Fig. 10. Temperature dependence of the dielectric permittivity  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}$  and  $\text{Im } \varepsilon_{\text{эфф}}$  of freshly prepared  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  films ( $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz)

На рис. 8 приведена зависимость  $\text{Re}K$  пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  от времени  $t_{\text{отж}}$  отжига в атмосферном воздухе при температуре  $T_{\text{отж}} = 500$  К и различных уровнях деформации. Видно, что с увеличением времени отжига и деформации растяжения  $\text{Re}K$  неравномерно уменьшается, причем оно почти линейно при величине  $t_{\text{отж}}$  менее 2,5 (ab) и более 4,5 ч (cd), а в интервале от 2,5 до 4,5 ч (bc) наблюдается сильно нелинейная зависимость  $\text{Re}K(t_{\text{отж}})$  с минимумом и максимумом при величине  $t_{\text{отж}}$  примерно 3 и 4 ч. В отличие от параметра  $\text{Re}K(t_{\text{отж}})$  с увеличением времени отжига величина  $\text{Im}K$  сначала почти экспоненциально увеличивается ( $t_{\text{отж}}$  менее 2,5 ч), а после достижения максимума при величине  $t_{\text{отж}} = 2,5$  ч экспоненциально уменьшается ( $t_{\text{отж}}$  более 3 ч, рис. 9). Заметим, что величина  $\text{Im}K$  положительна во всем диапазоне времени отжига. При величине  $t_{\text{отж}} = 1,0 - 1,5$  ч и  $T_{\text{отж}} = 500$  К устанавливаются стабильные рабочие параметры пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ . Предполагается, что выявленные особенности коэффициента тензочувствительности в микроволновом поле под действием деформации обусловлены изменением структуры и концентрации носителей заряда в пленках после термической обработки на воздухе. Такой метод может служить одним из способов регистрации

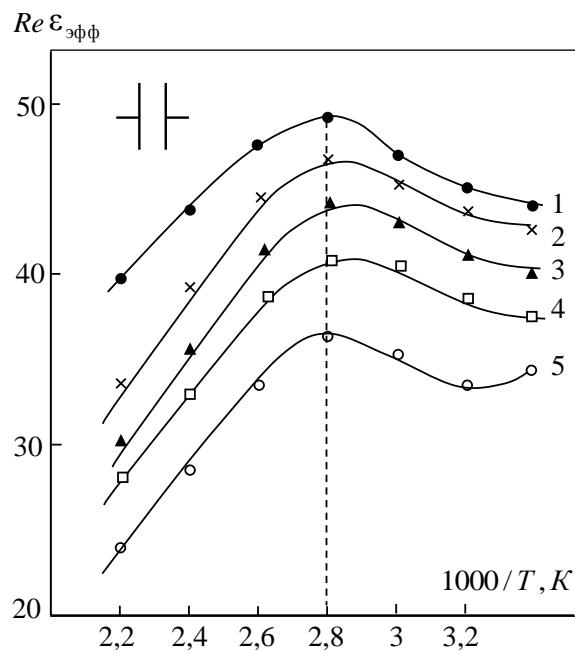


Рис. 11. Зависимость  $Re \epsilon_{\text{эфф}}$  термообработанных пленок  $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$  от обратной температуры при различных уровнях деформации  $\epsilon \cdot 10^3$ :  
 1 – 5 – 0; 0,68; 1,36; 2,04; 3,4;  $t_{\text{отж}} = 2,5$  ч;  $T_{\text{отж}} = 500$  К;  
 $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц

Fig. 11. Dependence of  $Re \epsilon_{\text{эфф}}$  for thermally treated  $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$  films on the reciprocal temperature at different strain levels  $\epsilon \cdot 10^3$ :  
 1 – 5 – 0; 0,68; 1,36; 2,04; 3,4;  $t_{\text{отж}} = 2,5$  hour;  $T_{\text{отж}} = 500$  K;  
 $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Hz

изменения концентрации носителей заряда в неоднородных полупроводниковых структурах.

Рассмотрим качественно на основе теории эффективной среды деформационные явления в поликристаллических пленках  $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$  при воздействии микроволнового поля [14 – 18]. При термической обработке пленок на воздухе будет меняться концентрация носителей тока в приграничных областях кристаллитов. Когда размеры кристаллитов соизмеримы с диффузионной длиной кислорода, то среда, в основном, состоит из второй фазы. В таких пленках нельзя ожидать аномально высокие тензочувствительности как при величине  $ReK \approx 10^3$  [8; 9]. В работах [9 – 11] показано, что более совершенные полупроводниковые пленки без различных неоднородностей или подвергавшиеся термической обработке обладают более умеренной тензочувствительностью ( $K < 10^2$ ), слабо зависящей от внешних факторов.

Резкое уменьшение параметра  $ReK$  и увеличение  $ImK$  при  $t_{\text{отж}} < 2,5$  ч, обусловлены изменением пространственной флюктуации плотности тока через пленки в процессе термической обработки. За счет различных неоднородностей

(поры, интерфейс на границах кристаллитов или гетерофаз) возникает поверхностная проводимость кристаллитов по природе, существенно отличающейся от объемной проводимости. Она скорее всего является функцией от диффузионной длины кислорода, проникающего в приповерхностную область кристаллитов во время отжига. Если объем этих прослоек становится сравним с объемом основного материала, то эффективная комплексная проводимость значительно быстро изменяется, следовательно, флюктуация плотности тока через пленки достигает максимального значения. Это и объясняет наблюдения характерного максимума мнимой части коэффициента тензочувствительности с ростом времени отжига.

Диэлектрические свойства теллуридов висмута характеризуются большими статическими и высокочастотными диэлектрическими постоянными  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ , низкими частотами поперечных оптических (ТО) фононов [20; 21]. Диэлектрическая проницаемость пленок  $Bi_2Te_3$  достигает  $\epsilon_\infty \approx 45$  (для  $Sb_2Te_3 \epsilon_\infty \approx 55$ ) и при величине  $T = 193 – 400$  К слабо зависит от температуры.

На рис. 10 и 11 представлены экспериментальные кривые температурной зависимости  $Re \epsilon_{\text{эфф}}(T)$ ,  $Im \epsilon_{\text{эфф}}(T)$  и  $Re \epsilon_{\text{эфф}}(1/T)$  термообработанных пленок  $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$  в СВЧ поле при различных уровнях деформации растяжения. С ростом температуры до критического значения  $T_k = 360$  К диэлектрическая проницаемость возрастает, а затем резко уменьшается (рис. 10). Максимальное значение  $Im \epsilon_{\text{эфф}} = 7,1$  почти на порядок меньше значения  $Re \epsilon_{\text{эфф}} = 53$  при одной и той же температуре  $T = T_k$ . Критическое значение  $T_k = 360$  К существенно проявлялось ранее при температурных зависимостях  $\sigma(T)$  и  $Z(T)$  (рис. 5 – 7). Это означает, что природа и механизм образования поляризации и электропроводности исследуемых поликристаллических пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  в СВЧ поле имеют одинаковый характер (электронный) и существенно определяются структурными параметрами (точечными и протяженными неоднородностями). При величине  $T_k = 360$  К в состоянии электронно-плазменного возбуждения для пленок характерно резонансное возмущение с энергией активации  $\Delta E_a = \hbar\omega + kT_k \approx 0,031 \text{ eV}$ .

Механическая деформация (рис. 11) качественно сильно не меняет характер зависимости  $Re \epsilon_{\text{эфф}}(1/T)$ : положение максимума остается постоянной при значении  $T_{\text{мак}} = T_k = 360$  К, однако значения  $Re \epsilon_{\text{эфф}}$  с увеличением деформации существенно уменьшаются неравномерно

(кривые 2 – 5), то есть роль деформации не одинаково проявляется при температуре  $T < T_k$  и  $T > T_k$ . При больших деформациях температурный коэффициент  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}$  при  $T < T_k$  может испытывать инверсию знака (кривая 5).

Рассмотренные выше особенности характера изменения диэлектрической проницаемости обусловлены взаимодействием пленки с кислородом во время термической обработки при совместном влиянии СВЧ поля, температуры и деформации. При этом следует учесть особую роль локализованных состояний, образующихся по границам кристаллитов. Согласно модели эффективной среды, динамика локальных неоднородностей и включения второй фазы с ростом температуры приводит к существенному изменению диэлектрической проницаемости поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ . Напряженность микроволнового поля принимает случайные значения за счет неоднородности исследуемого материала. Это связано с тем, что на каждом участке исследуемых пленок могут располагаться компоненты гетерогенной среды с различными электрическими и диэлектрическими свойствами. При этом флуктуация электрических полей в пространственно-случайных областях отличается от нуля. Одноосная деформация, действуя на неоднородную среду, приводит к перераспределению локализованных и изменению концентрации свободных носителей тока. Следовательно, электронная часть диэлектрической проницаемости уменьшается с деформацией и качественно совпадает с полученными экспериментальными результатами (рис. 11).

Большое значение диэлектрической проницаемости может быть обусловлено образованием гетерогенных систем при конденсации пленок в вакууме. В поликристаллических пленках  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  вещественная часть импеданса ответственна за непроводящую область, а мнимая часть – проводящую. На основе теории эффективных сред, которая качественно описывает электропроводность и диэлектрическую проницаемость проводящих и непроводящих систем, получаем, что значения  $R_e\sigma$  и  $I_m\sigma$  отличаются друг от друга не более, чем на порядок. Если исследуемая гетерогенная среда состоит из двух фаз, то в случае  $\sigma_1 \gg \sigma_2$  теория эффективной среды дает корректные результаты не для всех значений объемной доли низкоомного компонента, а лишь начиная с тех, которые соответствуют порогу протекания  $\theta = \theta_k$  [19].

Следует отметить, что при фиксированной частоте СВЧ поля полученная в настоящей работе зависимость диэлектрической проницаемости и электропроводности  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  от об-

ратной температуры в пределах погрешности 0,5 % совпадает с результатами работы [22 – 24]. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что, изменяя относительные доли объема включений  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , возможно попасть в область порога протекания.

## Выводы

Инфракрасные спектры диэлектрической проницаемости  $\text{Im } \varepsilon_{\text{эфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}(\omega)$ , удельной электропроводности  $\text{Im } \sigma_{\text{эфф}}(\omega)$ ,  $\text{Re } \sigma_{\text{эфф}}(\omega)$  и коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  твердого раствора  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  при разной деформации  $\varepsilon$  коррелируются. В области примесного поглощения  $\hbar\omega < E_g$  присутствуют характерные максимумы, связанные с коллективными возбуждениями электрон-плазменного взаимодействия.

Экспериментально наблюдаемый рост  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}$  с увеличением доли теллурида сурьмы в составе пленки  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  объясняется изменением фактора деполяризации из-за кристаллических подрешеток  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , а увеличение  $\text{Im } \varepsilon_{\text{эфф}}$  и уменьшение  $\text{Re } \varepsilon_{\text{эфф}}$  при избыточных добавках теллурида висмута связаны с образованием металлических фазовых доменов.

Сравнение температурных зависимостей удельной электропроводности поликристаллических пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ , измеренных в микроволновом поле и на постоянном токе, подтверждает наличия существенных электронных и структурных протяженных неоднородностей, экранирование которых СВЧ полем обуславливает особенности  $\text{Re } \sigma(T)$  и  $\text{Im } \sigma(T)$ .

Под действием умеренной деформации растяжения кривая  $\text{Re } Z(T)$  испытывает радикальное изменение: с увеличением относительной деформации до  $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-3}$  и температуры до  $T = T_k$  импеданс  $\text{Re } Z$  пленки монотонно возрастает, причем в отличие от величины  $\varepsilon = 0$  наблюдается лишь металлическая проводимость, далее в интервале температур  $T_k < T < T_k'$  происходит инверсия знака температурного коэффициента импеданса  $\gamma(\varepsilon)$ , абсолютное значение которого, а также критические значения  $T_k = T_k'$  и их разность уменьшаются с ростом величины  $\varepsilon$ . При деформациях  $\varepsilon > 4 \cdot 10^{-3}$  получаем  $T_k = T_k'$ , исчезает падающий участок кривой  $\text{Re } Z(T)$ .

Коэффициенты тензочувствительности в микроволновом поле  $\text{Re } K$  и  $I_m K$  при деформации растяжения существенно зависят от времени  $t_{\text{отж}}$  и температуры  $T_{\text{отж}}$  отжига пленок в атмосфере воздуха. При значениях  $t_{\text{отж}} = 1,0 - 1,5$  ч и

$T_{\text{отж}}$  = 500 К достигаются стабильные параметры пленки  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$ . Выявленные особенности  $\text{Re}K(t_{\text{отж}})$  и  $\text{Im}K(t_{\text{отж}})$  обусловлены изменением микроструктуры и концентрации носителей заряда в пленках  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  после термической обработки. Такой подход может служить один из способов регистрации изменения концентрации носителей заряда в неоднородных полупроводниковых структурах.

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\text{Re} \varepsilon_{\text{эфф}}(T)$ ,  $\text{Im} \varepsilon_{\text{эфф}}(T)$  и  $\text{Re} \varepsilon_{\text{эфф}}(1/T)$  отожженных пленок  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  при различных уровнях деформации растяжения выявило ряд особенностей в виде смены знака температурного коэффициента  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ , максимума и минимума, также как и у параметров  $\text{Im} \sigma(1/T)$ ,  $\text{Re} Z(T)$  в области температуры 360 К и частоты  $\omega = 5,1 \cdot 10^{10}$  Гц СВЧ поля. Эти особенности взаимосвязаны и обусловлены независимыми резонансными механизмами: совпадением частоты измерительного переменного напряжения с частотой перескоков электронов при реализации прыжковой проводимости; близостью периода измерительного сигнала к характерному времени формирования зарядов барьера слоя на границе зерен; приближением частоты внешнего микроволнового поля к собственной частоте структурных элементов пористого поликристаллического образца.

Полученные результаты могут быть использованы при создании функциональных устройств микроэлектроники, СВЧ техники, в частности, пленочных тензодатчиков на основе твердых растворов  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khalid Bin Masood, Umar Farooq, Jai Singh. Evolution of the structural, dielectric and electrical transport properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  nano-sticks synthesized via polyol and solvothermal routes. *Physica B: Physics of Condensed Matter*. 2020;588:412183. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412183>
2. Дыбов В.А., Сериков Д.В., Федорова Е.Н., Синецкая Д.А., Мозговой П.С., Дяки М.С. Структура и механические свойства компактированных полупроводников на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ , полученных в процессе горячего прессования и последующих обработок поверхности. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018;18(6):191–197.
3. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostyuchenko A.V., Kushchev S.B., Sanin V.N., Serikov D.V., Soldatenko S.A. Surface modification of thermoelectric branches based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$  solid solution by the method of pulsed photon processing. *Condensed media and interphase boundaries*. 2017;19(4):479.
4. Tasi C.-H., Tseng Y.-C., Jian S.-R., Liao Y.-Y., Lin C.-M., Yang P.-F., Chen D.-L., Chen H.-J., Luo C.-W., Juang J.-Y. Nanomechanical properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  thin films by nanoindentation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;619:834–838.
5. Wang Z.-L., Matsuoka K., Araki T., Akao T., Onda T., Chen Z.-C. Extrusion behavior and thermoelectric properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.85}\text{Se}_{0.15}$  thermoelectric materials. *Procedia Engineering*. 2014;81:616–621.
6. Абдуллаев Н.А., Абдуллаев Н.М., Алигулиева Х.В., Керимова А.М., Мустафаева К.М. и др. Механизм переноса заряда в тонких пленках твердых растворов  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$ . *ФТП*. 2013;47(5):586–590.
7. Sulaymonov, K. M. The effect of cycle deformation on the AC conductivity of  $(\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{0,7})_2\text{Te}_3$  films. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2017;87(3):471–472.
8. Sulaymonov H.M., Yuldashev N.K. 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*. 2016;10(4):878–882.
9. Юлдашев Н.Х., Сулаймонов Х.М. *Пьезосопротивление кристаллов и поликристаллических пленок узкозонных полупроводников тиана PbS*. Фергана, “Фаргона”. 2021:132.
10. Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh. The deformation properties of films under the influence of unilateral cyclic sign variable pressure. In: *The Third European Conference on Physics and Mathematics*, 12th September, Vienna, Austria, 2015:1926.
11. Гаджиев Г.М., Гамзатов А.Г., Алиев Р.А., Абакарова Н.С., Эмирасланова Л.Л., Маркелова М.Н., Кауль А.Р. Температурно-частотная зависимость диэлектрического отклика в мультиферронике  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ . *ФТП*. 2020;62(5):678–682.
12. Алиев Р.А., Гамзатов А.Г., Гаджиев Г.М., Абакарова Н.С., Кауль А.Р., Маркелова М., Эмирасланова Л.Л. Влияние частоты переменного электрического поля на температурные спектры импеданса керамического мультиферроика  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ . *ФТП*. 2018;60(6):1062–1066.
13. Siddikov R.U., Sulaymonov K.M., Yuldashev N.K. Strain-Resistive Properties of  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  Films at One-Sided Cyclic Alternating Strains. *East European Journal of Physics*. 2025;1:190–196.
14. Степанов Н.П., Калашников А.А., Улашкевич Ю.В. Оптические функции кристаллов твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 -$

- Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> в области возбуждения плазмонов и межзонных переходов. *Оптика и спектроскопия*. 2010;109(6):1138–1143.
15. Лавров И.В. Методы вычисления эффективных электрофизических свойств неоднородных сред с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор. *Известия вузов. Электроника*. 2023;28(4):403–430.  
<https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430>
16. Юрас А.Н., Яшин М.М. Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокомпозитов. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):56–66.  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
17. Kovalyuk V., Sheveleva E., Auslender M., Goltsman G., Shneck R., Dashevsky Z. Polycrystalline PbTe: In Films on Amorphous Substrate: Structure and Physical Properties. *Materials*. 2022;15(23):8383.  
<https://doi.org/10.3390/ma15238383>
18. Jun Zhou, Yuanyuan Wang, Jeff Sharp, and Ronggui Yang. Optimal thermoelectric figure of merit in Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> quantum dot nanocomposites. *Physical Review B*. 2012;85(11):12–17.
19. Stepanov N.P., Kalashnikov A.A. Features in reflection spectra of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> solid solution single crystals in the region of plasma effects. *Semiconductors*. 2010;44(9):1129–1133.
20. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*. Москва: Наука, 1972:141.
21. Степанов Н.П., Гильфанов А.К., Трубицына Е.Н. Корреляция оптических и магнитных свойств кристаллов Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. *Физика и техника полупроводников*. 2019;53(6):774–776.
22. Кулешов Г.Е., Сусляев В.И. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур. *Доклады ТУСУРа*. 2014;1(31):84–87.
23. Грабов В.М., Комаров В.А., Демидов Е.В. *Гальваномагнитные и термоэлектрические явления в тонких пленках висмута и сплавов висмут-сурыма*. Санкт-Петербург: Изд-во Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена, 2011:124.
24. Daliev K.S., Ahmedov M.M., Onarkulov M.K. Influence of the Temperature and Cyclic Deformations of (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Films on Their Resistance. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94:1369–1373.
- synthesized via polyol and solvothermal routes. *Physica B: Physics of Condensed Matt.* 2020;588:412183.  
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412183>
2. Dybov V.A., Serikov D.V., Fedorova E.N., Sinetskaya D.A., Mozgovoi P.S., Dyaki M.S. Structure and mechanical properties of compact semiconductors based on a solid solution of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> obtained during hot pressing and subsequent surface treatments. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018;18(6):191–197. (In Russ.).
3. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostyuchenko A.V., Kushchev S.B., Sanin V.N., Serikov D.V., Soldatenko S.A. Surface modification of thermoelectric branches based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> solid solution by the method of pulsed photon processing. *Condensed media and interphase boundaries*. 2017;19:(4):479.
4. Tasi C.-H., Tseng Y.-C., Jian S.-R., Liao Y.-Y., Lin C.-M., Yang P.-F., Chen D.-L., Chen H.-J., Luo C.-W., Juang J.-Y. Nanomechanical properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films by nanoindentation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;619:834–838.
5. Wang Z.-L., Matsuoka K., Araki T., Akao T., Onda T., Chen Z.-C. Extrusion Behavior and Thermoelectric Properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.85</sub>Se<sub>0.15</sub> Thermoelectric Materials. *Procedia Engineering*. 2014;81:616–621.
6. Abdullaev N.A., Abdullaev N.M., Aligulieva K.H.V., Kerimova A.M., Mustafaeva K.M. etc. The mechanism of charge transfer in thin films of solid solutions of Bi<sub>2</sub>(Te<sub>0.9</sub>Se<sub>0.1</sub>)<sub>3</sub>. *FTP*. 2013;47(5):586–590. (In Russ.).
7. Sulaymonov K.M. The effect of cycle deformation on the AC conductivity of (Bi<sub>0.3</sub>Sb<sub>0.7</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2017;87(3):471–472.
8. Sulaymonov H.M., Yuldashev N.K. Effect of internal stresses on the static strain characteristics of p-(Bi<sub>0.3</sub>Sb<sub>0.7</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> composite films. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016;10(4):878–882.
9. Yuldashev N.Kh., Sulaimonov K.H.M. *Piezoelectric resistance of crystals and polycrystalline films of narrow-band semiconductors of the PbS type*. Fergana, “Farrona”. 2021:132.
10. Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh. The deformation properties of films under the influence of unilateral cyclic sign variable pressure. In: *The Third European Conference on Physics and Mathematics*, 12th September, Vienna, Austria, 2015:1926.
11. Gadzhiev G.M., Gamzatov A.G., Aliev R.A., Abakarova N.S., Emiraslanova L.L., Markelova M.N., Kaul' A.R. Temperature-frequency de-

## REFERENCES

1. Khalid Bin Masood, Umar Farooq, Jai Singh. Evolution of the structural, dielectric and electrical transport properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nano-sticks

- pendence of the dielectric response in LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *FTT*. 2020;62(5):678–682. (In Russ.).
12. Aliev R.A., Gamzatov A.G., Gadzhiev G.M., Abakarova N.S., Kaul' A.R., Markelova M., Emiraslanova L.L. Influence of the frequency of an alternating electric field on the temperature impedance spectra of ceramic multiferroic LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *FTT*. 2018;60(6):1062–1066. (In Russ.).
13. Siddikov R.U., Sulaymonov K.M., Yuldashev N.K. Strain-Resistive Properties of (Bi<sub>0.25</sub>Sb<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Films at One-Sided Cyclic Alternating Strains. *East European Journal of Physics*. 2025;1:190–196.
14. Stepanov H.P., Kalashnikov A.A., Ulashkevich Yu.V. Optical functions of crystals of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> solid solutions in the field of plasmon excitation and interband transitions. *Optika i spektroskopiya*. 2010;109(6):1138–1143. (In Russ.).
15. Lavrov I.V. Methods for calculating effective electrophysical properties of inhomogeneous media, taking into account diverse structural features. *Obzor. Izvestiya vuzov. Elektronika*. 2023;28(4):403–430. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430> (In Russ.).
16. Yuras A.N., Yashin M.M. Theory of effective medium as a tool for analyzing optical properties of nanocomposites. *Rossiiskikh tekhnologicheskikh zhurnal*. 2018;6(2):56–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66> (In Russ.).
17. Kovalyuk V., Sheveleva E., Auslender M., Goltsman G., Shneck R., Dashevsky Z. Polycrystalline PbTe: In Films on Amorphous Substrate: Structure and Physical Properties. *Materials*. 2022;15(23):8383. <https://doi.org/10.3390/ma15238383>
18. Jun Zhou, Yuanyuan Wang, Jeff Sharp, and Ronggui Yang. Optimal thermoelectric figure of merit in Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> quantum dot nanocomposites. *Physical Review B*. 2012;85(11):12–17.
19. Stepanov N.P., Kalashnikov A.A. Features in reflection spectra of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> solid solution single crystals in the region of plasma effects. *Semiconductors*. 2010;44(9):1129–1133.
20. Gol'tsman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I.A. *Semiconductor thermoelectric materials based on I2TE3*. Moscow: Nauka, 1972:141. (In Russ.).
21. Stepanov N.P., Gil'fanov A.K., Trubitsyna E.N. Correlation of optical and magnetic properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> crystals. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2019;53(6):774–776. (In Russ.).
22. Kuleshov G.E., Suslyakov V.I. Dielectric constant and electrical conductivity of composite materials based on carbon nanostructures. *TUSUR Reports*. 2014;1(31):84–87. (In Russ.).
23. Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V. *Galvanomagnetic and thermoelectric phenomena in thin films of bismuth and bismuth-antimony alloys*. St. Petersburg: Publishing house of the Russian state pedagogical University named after A.I. Herzen, 2011:124 p. (In Russ.).
24. Daliev K.S., Ahmedov M.M., Onarkulov M.K. Influence of the Temperature and Cyclic Deformations of (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Films on Their Resistance. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94:1369–1373.

**Сведения об авторах:**

**Рустамжон Уктамович Сиддиков**, старший преподаватель, Кокандский государственный университет  
**E-mail**: sidrus1073@mail.ru  
**ORCID**: 0000-0001-9350-9284

**Хусанбой Маннапович Суляймонов**, Dsc, докторант кафедры физики, Ферганский политехнический институт

**E-mail**: xusanboy.sulaymonov@gmail.com  
**ORCID**: 0000-0003-0790-1584

**Носиржон Хайдарович Юлдашев**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, Ферганский политехнический институт

**E-mail**: uzferfizika@mail.ru  
**ORCID**: 0000-0003-0226-3528  
**SPIN-код**: 6884-1461

**Information about authors:**

**Rustamjon Uk. Siddikov**, head teacher, Kokand State Universität  
**E-mail**: sidrus1073@mail.ru  
**ORCID**: 0000-0001-9350-9284

**Xusanboy M. Sulaymonov**, DSc doctorand, Fergana State Technical University

**E-mail**: xusanboy.sulaymonov@gmail.com  
**ORCID**: 0000-0003-0790-1584

**Nosirjon Kh. Yuldashev**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Physics, Fergana State Technical University

**E-mail**: uzferfizika@mail.ru  
**ORCID**: 0000-0003-0226-3528  
**SPIN-код**: 6884-1461

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*  
*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 12.05.2025

После доработки 13.07.2025

Принята к публикации 20.07.2025

Received 12.05.2025

Revised 13.07.2025

Accepted 20.07.2025