

Ф И З И К А

УДК 538.975

DOI: 10.31429/vestnik-18-1-55-62

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННОГО ТЕЛЛУРОМ

Матвеев Д. Ю., Кухалов А. Ю.

BEHAVIOR PECULIARITIES OF RESISTIVITY IN THIN FILMS OF BISMUTH DOPED
WITH TELLURIUM

D. Yu. Matveev, A. Yu. Kukhalov

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

e-mail: danila200586@mail.ru

Abstract. In this article, the results of complex experimental investigation of the temperature dependences of the resistivity in thin tellurium-doped bismuth films in the impurity range of 0.005–0.15 at.%, thicknesses range of 0.06–1.1 μm and in the temperature range of 77–300 K are presented. A shift of the characteristic minimum towards high temperatures for films $\text{Bi}_{99,995}\text{Te}_{0,005}$ and $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ was discovered on the temperature dependence of the resistivity due to the decrease in the mean free path of charge carriers. The saturation on the temperature dependence of the resistivity at temperatures below 125 K for films $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ was discovered, but for films $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$ a characteristic maximum was observed on the temperature dependence, which shifts to high temperatures with increasing film thickness. The behavior of the temperature dependence of the resistivity of these films is due to the contribution of both L-electrons in the conduction band and T-holes in the valence band in the framework of the two-band model. The characteristic “metallic form” of the temperature dependence of the resistivity of $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ films and single crystals is associated with the predominant contribution of the one-band model of L-electrons to the values of the resistivity coefficients. The results obtained can be widely used for the manufacture of thin-film bolometers, the temperature coefficient of resistance (TCR) of which can be significantly improved by appropriate doping with donor impurities, such as the tellurium.

Keywords: bismuth, tellurium, impurity, alloying, thin films, resistivity, magnetic field.

Введение

Последние достижения в микро- и оптоэлектронике, термоэлектричестве, оптике и в других областях физики и техники непосредственно связаны с развитием тонкопленочных технологий [1–3].

Свойства вещества в виде пленки могут существенно отличаться от свойств этого же материала в массивном состоянии [4]. В частности, толщина пленки и ее структура в сильной степени зависящая от условий получения, обусловленных технологическим процессом, оказывают большое влияние на электрические и термоэлектрические характеристики пленок, такие как удельное сопротивление и термоэдс [5].

Эти обстоятельства создают огромное разнообразие в путях применения тонких пленок, особенно пленок висмута, где ввиду высоких значений подвижности носителей заряда и

коэффициента термоэдс [6] они представляются наиболее перспективными для создания первичных термоэлектрических преобразователей энергии [7].

Кроме того, изменение количественного состава пленок путем легирования аналогичным образом приводит к изменению электрических и термоэлектрических характеристик пленок [8, 9].

Изучению электрических свойств пленок висмута и висмута, легированного теллуром, посвящено немало работ, данные которых имеют неоднозначный характер. Например в работе [4] характер температурной зависимости удельного сопротивления блочных и монокристаллических пленок висмута $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ (0,15 ат. % — содержание теллура) такой же, как для монокристаллов того же состава. Характерная для металлов, близкая к линейной, температурная зависимость удельного сопро-

Матвеев Даниил Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики Астраханского государственного университета; e-mail: danila200586@mail.ru.

Кухалов Айдар Юсупович, студент магистратуры факультета физики, математики и инженерных технологий Астраханского государственного университета; e-mail: 9275550200@mail.ru.

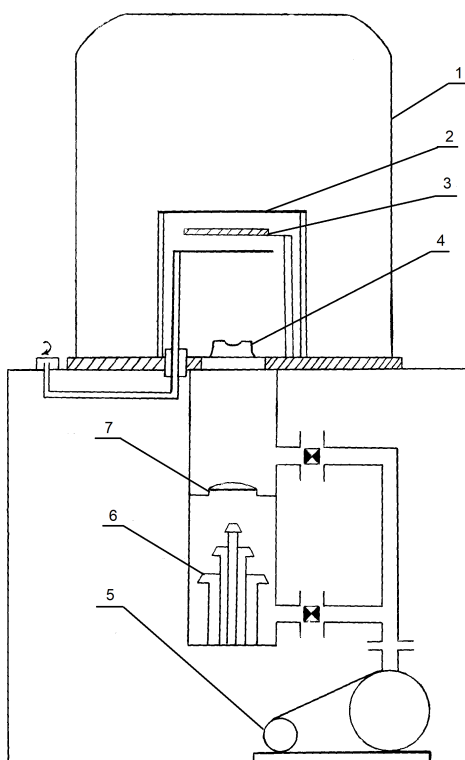


Рис. 1. Вакуумная установка УВН-3: 1 — вакуумный колпак; 2 — нагреватель; 3 — подложкодержатель; 4 — испаритель; 5 — форвакуумный насос; 6 — диффузионный насос

тивления в монокристаллах, монокристаллических и блочных пленках указывают на то, что носителями заряда являются только электроны зоны проводимости, концентрация которых одинакова в пленках и монокристаллах и не зависит от температуры в исследованном интервале [4, 9]. В работе [8] экспериментальные данные свидетельствуют о том, что можно осуществить более глубокое легирование висмута в плёночном состоянии по сравнению с массивом. Вопрос об измерении концентрации в легированных пленках висмута методом времяпролетной масс-спектрометрии и электронной микроскопии был рассмотрен в работе [10].

Однако в перечисленных работах детального исследования температурной зависимости удельного сопротивления пленок висмута, легированного теллуром, не представлялось возможным ввиду недостаточного набора толщин и концентрации легирующей примеси теллура. Поэтому целью работы является исследование температурной зависимости удельного сопротивления пленок висмута с различным содержанием теллура, полученных термическим осаждением в высоком ва-

кууме на подложки из слюды, которая оказывает ориентирующее действие на осаждаемую пленку висмута: ось C_3 всех кристаллитов ориентирована перпендикулярно плоскости подложки [4, 5]. Научная новизна работы заключается в том, что представлено детальное исследование поведения температурной зависимости удельного сопротивления пленок висмута, легированного теллуром, в диапазоне концентраций теллура 0,005–0,15 ат. % в интервале температур 77–300 К.

1. Технология изготовления тонких легированных пленок

Пленки висмута, легированного теллуром с различной концентрацией примеси теллура, получались методом дискретного вакуумного термического испарения в установке вакуумного напыления УВР-3, изображенной на рис. 1. Установка состоит из вакуумного колпака — 1, внутрь которого помещается подложкодержатель — 3, поверх которого прикреплен нагреватель — 2. Для испарения исходного монокристалла $Bi_{1-x}Te_x$ служил лодочный испаритель — 4, изготовленный

из молибденовой фольги толщиной 0,08 мм. В нижней части установки под колпаком размещена система откачки, которая состоит из форвакуумного насоса — 5, трехступенчатого диффузионного паромасляного насоса — 6 и затвора — 7, соединяющего диффузионный насос с камерой вакуумного колпака.

Над лодочным испарителем на расстоянии 12 см от него устанавливался подложкодержатель, на котором закреплялась специальная медная маска толщиной 0,2 мм. Прямоугольные окошечки маски размером 10×2 мм, через которые производилось напыление, содержали 4 зондовых прореза, расстояние между которыми составляло 3 мм. Окошечки были вырезаны с помощью электропроволочной резки в искровом разряде. Таким образом, с помощью маски задавалась геометрия напыляемой пленки для дальнейшего исследования удельного сопротивления.

В подложкодержатель была вмонтирована хромель-алюмелевая термопара для измерения температуры подложки, сигнал с которой подавался на потенциометр ПП-63 класса точности 0,05, разброс температуры по нагревателю не превышал 1 °С.

Перед непосредственным напылением подложкодержатель вместе с подложкой из слюды и маской нагревался до температуры 120–140 °С, так как при этой температуре все пленки имели наиболее совершенную субструктуру блоков [11]. Предварительный вакуум $3 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. создавался форвакуумным пластинчато-роторным насосом 2НВР-5ДМ. Подъем и опускание вакуумного колпака производились вручную. Рабочий вакуум во время напыления создавался трёхступенчатым диффузионным паромасляным насосом НД-250 и составлял порядка $1,2\text{--}1,5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. ($2 \cdot 10^{-3}$ Па).

В данной конструкции напыление пленок производилось методом вспышки [4]. Этот метод позволял получить равномерное распределение теллура по объему плёнки. В процессе напыления температура молибденового испарителя достигала примерно 2000 °С. Скорость осаждения составляла 10 нм/с, отжиг производился при температуре 240 °С с продолжительностью 30 мин.

Для измерения удельного сопротивления пленок к зондовым участкам пленки напылялись контактные площадки из манганина. Толщина получаемых пленок контролировалась как по массе загрузки исходного кри-

сталла $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$, так и интерференционными методами. Концентрация теллура в пленках считалась равной концентрации в исходном кристалле.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно, чистый висмут является полуметаллом, в котором концентрации электронов и дырок малы, в сравнении с металлами, и практически равны друг другу. Следует отметить, что в отличие от полупроводников, в полуметаллах, даже при 0 К, концентрация носителей заряда отлична от нуля. Явления переноса обуславливаются как электронами, так и дырками. Введение донорной примеси приводит к увеличению концентрации электронов и уменьшению концентрации дырок. В результате в пленках висмута, легированных теллуrom, вклад дырок в явлениях переноса может стать очень малым. Рассматривая эти явления, можно считать, что они обусловлены только вкладом электронов. Следует также отметить, что активные примеси в полуметаллах ведут себя несколько differently от полупроводников. В терминах легированных полупроводников можно сказать, что температура истощения примеси в полуметаллах равна 0 К. Это означает, что при температуре ниже температуры перехода к собственной проводимости концентрация свободных носителей заряда остается постоянной.

С помощью автоматизированной установки, созданной на базе управляющего вычислительного устройства «Электроника ДЗ-28», блок-схема которой приведена в работе [12], были измерены температурные зависимости компоненты ρ_{11} удельного сопротивления при индукции магнитного поля B , параллельной нормали к плоскости пленки.

На рис. 2, 3. представлены температурные зависимости удельного сопротивления плёнок висмута $\text{Bi}_{99,995}\text{Te}_{0,005}$ и $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ различной толщины. Для сравнения на одном из рисунков приведена температурная зависимость удельного сопротивления пленки чистого висмута.

Как видно из рис. 2, 3, плёнки $\text{Bi}_{99,995}\text{Te}_{0,005}$ и $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ имеют ярко выраженный полупроводниковый ход сопротивления, характерный для тонких плёнок чистого висмута: с понижением температуры сопротивление пленок увеличивается. С ростом

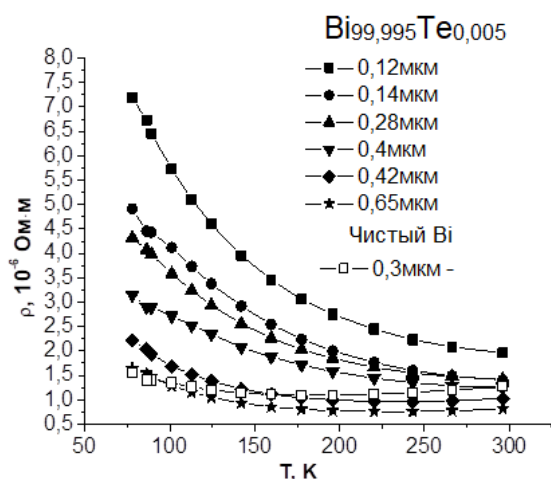


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{99,995}\text{Te}_{0,005}$ различной толщины и пленки чистого Bi

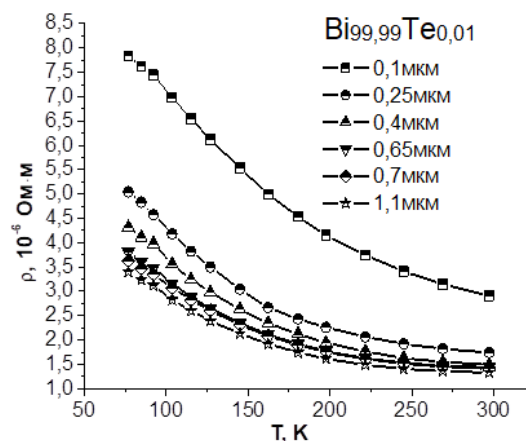


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ различной толщины

толщины пленки ее удельное сопротивление при температуре жидкого азота уменьшается.

В пленках $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ в области температур жидкого азота скорость изменения удельного сопротивления замедляется. Рост удельного сопротивления с уменьшением толщины пленок обусловлен возрастанием ограничения длины свободного пробега носителей заряда, что соответствует проявлению классического размерного эффекта [4, 12].

Следует отметить, что у пленок $\text{Bi}_{99,995}\text{Te}_{0,005}$ и $\text{Bi}_{99,99}\text{Te}_{0,01}$ минимум на зависимости $\rho = f(T)$, очевидно, смещен в область более высокой температуры по сравнению с пленками чистого висмута такой же толщины [11]. Это, вероятно, связано с тем, что поскольку добавки теллура в висмут приводят к сокращению длины свободного пробега носителей заряда, то для тонких пленок она станет сравнимой с толщиной при более высоких температурах, поэтому минимум сопротивления будет наблюдаться при более высоких температурах.

Температурные зависимости удельного сопротивления пленок висмута $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ и $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$ различной толщины приведены на рис. 4, 5. Температурные зависимости сопротивления для пленок $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ качественно отличаются от зависимостей, представленных на рис. 2, 3.

При понижении температуры удельное сопротивление пленок $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ сначала нарастает, а затем в области низких температур,

начиная от 125 К, переходит в насыщение. Температура перехода зависит от толщины пленки. Чем тоньше пленка, тем ниже температура перехода в насыщение. Для самой толстой пленки 0,71 мкм переход к насыщению удельного сопротивления сменяется его уменьшением в области низких температур.

Для пленок $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$, результаты для которых приведены на рис. 5, с понижением температуры удельное сопротивление сначала возрастает, проходит через максимум, а затем, начиная с интервала температур примерно 200–250 К, уменьшается, переходя к температурной зависимости, больше характерной для металлов. Причем, чем толще пленка, тем максимум смещается в область более высоких температур.

Поведение температурной зависимости пленок $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ и $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$ не может быть интерпретировано только вкладом L-электронов зоны проводимости, так как заметную роль будут играть и T-дырки валентной зоны в рамках двухзонной модели [4].

Обращает на себя внимание и разброс в значениях удельного сопротивления в зависимости от толщины пленки. Например, сопротивление пленки толщиной 0,33 мкм больше во всем температурном интервале по сравнению с пленкой 0,23 мкм. Так как электрические свойства пленок в основном определяются качеством структуры их поверхности, то методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) была исследована поверхность плен-

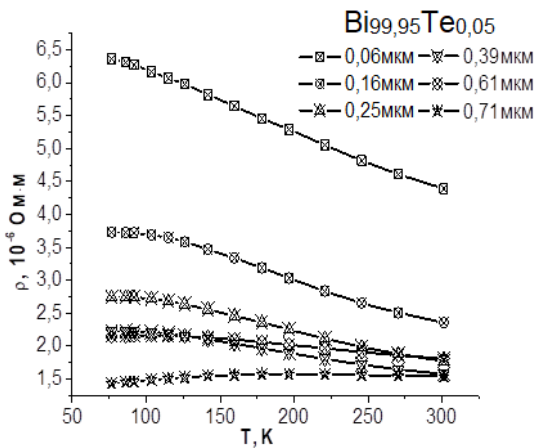


Рис. 4. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{99,95}\text{Te}_{0,05}$ различной толщины

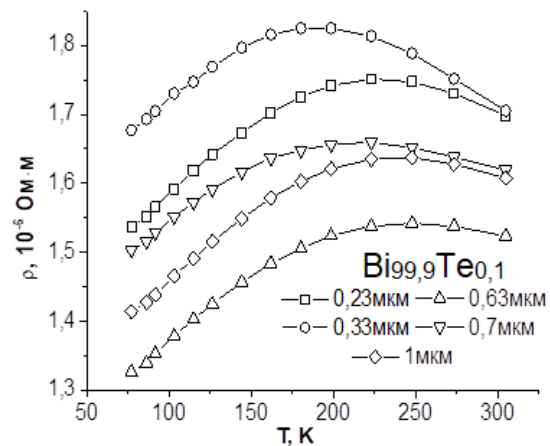


Рис. 5. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$ различной толщины

ки 0,33 мкм. Как следует из рис. 6, высокие значения удельного сопротивления в исследуемом интервале температур обусловлены тем, что фигуры роста этой пленки в пределах одного кристаллита имеют произвольную ориентацию в плоскости подложки, следовательно, произвольную ориентацию бинарных осей. Различие по абсолютной величине удельного сопротивления близких по толщине плёнок 0,63 мкм и 0,7 мкм обусловлено большой концентрацией хиллоков на поверхности последней и более неупорядоченной структурой.

Увеличение концентрации теллура в висмуте до 0,15 ат.% приводит к переходу температурной зависимости удельного сопротивления пленок $\rho = f(T)$ к характерной для металлов (рис. 7), при повышении температуры удельное сопротивление увеличивается.

С увеличением толщины удельное сопротивление плёнок уменьшается во всем температурном интервале. Подобное поведение температурной зависимости удельного сопротивления характерно для монокристаллов висмута, чистого и легированного теллуrom того же состава, представленных на рис. 7. Однако значения удельного сопротивления для монокристаллов $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ в исследуемом температурном интервале гораздо ниже, чем в блочных плёнках (по данным для монокристалла $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ при 77K $\rho = 2,4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м [4]). В интервале температур 77-300 K для кристаллов висмута, нелегированного и легированного донорны-

ми примесями теллура линейная зависимость сопротивления (рис. 7) рассматривается как одно из основных доказательств фононного механизма рассеяния носителей заряда и не обусловлена рассеянием на примесях. Кроме того, для пленок $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ вклад однозонной модели для L-электронов в значения коэффициентов удельного сопротивления, как и для монокристаллов того же состава, будет преобладающим.

Для плёнок 0,27 мкм и 0,28 мкм значения удельного сопротивления практически совпадают во всем интервале температур, что говорит об идентичной кристаллической структуре этих плёнок в отличие от плёнки толщиной 0,3 мкм, удельное сопротивление которой выше во всём температурном интервале ввиду разориентации кристаллографических осей в плоскости плёнки. В области низких температур скорость уменьшения удельного сопротивления замедляется, постепенно переходя к насыщению.

Заключение

Проведено комплексное целенаправленное исследование поведения температурной зависимости удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$. Из проведенных исследований можно заключить, что:

- зависимости $\rho(T)$ тонких пленок $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$ в значительной степени отличны от свойств пленок чистого висмута, что и демонстрируют полученные температурные

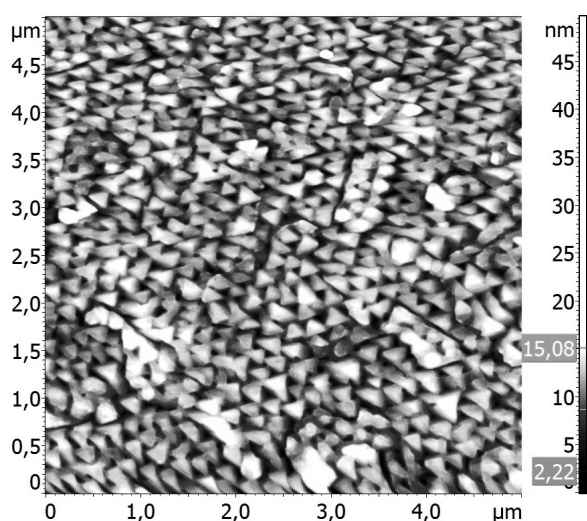


Рис. 6. АСМ — изображения поверхности пленки: $\text{Bi}_{99,9}\text{Te}_{0,1}$. Толщина плёнки 330 нм, размер скана — 5×5 мкм²

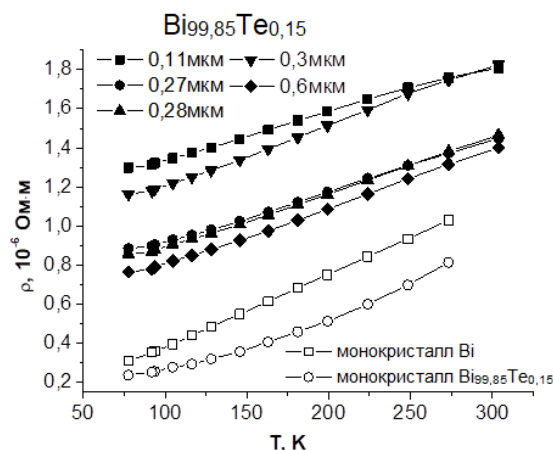


Рис. 7. Температурная зависимость удельного сопротивления монокристаллов Bi , монокристаллов и пленок $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$

зависимости, имеющие совершенно иное поведение, нежели для беспримесных пленок.

– в плёнках висмута $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$ оказывают существенное влияние не только концентрация примеси теллура, но и толщина плёнок, уменьшение которой приводит к увеличению удельного сопротивления во всём интервале температур по абсолютной величине.

– полученные результаты можно широко использовать для изготовления тонкоплёночных болометров, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) которых может быть значительно улучшен с помощью соответствующего легирования донорными примесями. Следовательно, возможность улучшить ТКС без увеличения шумового напряжения откроет перспективный путь повышения пороговой чувствительности тонкоплёночного болометра, пропорциональной абсолютной величине ТКС. Поэтому вопрос о влиянии легирования на величину удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$, а также их термоэлектрические свойства имеет очень актуальное значение.

Авторы выражают признательность профессору В.М. Грабову и доценту Комарову В.А. Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена за внимание к работе и возможность использования необходимых экспериментальных установок.

Литература

1. Sharma A., Tripathi J., Kumar Y., Chandrawat G.S., Bisen R., Tripathi S. Effect of annealing on magnetic and structural properties of FeNi thin films // Journal of nano-and electronic physics. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 02040 (4 pp). DOI: 10.21272/jnep.12(2).02040
2. Грабов В.М., Герега В.А., Демидов Е.В., Старицын М.В., Суслов А.В., Суслов М.В., Комаров В.А. Атомно-силовая микроскопия и электрические свойства монокристаллических пленок висмута // Журнал Поверхности. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 9. С. 55–60. DOI: 10.31857/S1028096020090058
3. Суслов М.В., Грабов В.М., Комаров В.А., Демидов Е.В., Сенкевич С.В., Суслов А.В. Термоэдс тонких пленок $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) на подложках из слюды и полиимида в температурном интервале 77–300 К // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 5. С. 593–596. DOI: 10.21883/FTP.2019.05.47544.02
4. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А., Матвеев Д.Ю., Николаева А.А., Маркушев Д., Константинов Е.В., Константинова Е.Е. Размерный эффект в гальваномагнитных явлениях плёнок висмута, легированного теллуrom // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 5. С. 648–653. DOI: 10.1134/S106378261405008X
5. Грабов В.М., Комаров В.А., Демидов Е.В., Климантов М.М. Явления переноса в монокристаллических пленках висмута // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2010.

- № 122. С. 22–31.
6. Грабов В.М., Демидов, Е.В., Комаров В.А. Ограничение подвижности носителей заряда в плёнках висмута, обусловленное их блочной структурой // Журнал Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 2. С. 81–85.
 7. Исмаилов Т.А., Мустафаев А.Г., Рамазанова Д.К., Сулин А.Б. Термоэлектрические полупроводниковые преобразователи энергии для выпрямления переменного напряжения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. № 3 (34) С. 82–87.
 8. Орлова Д.С., Рогачева Е.И. Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута, легированного теллуром // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2009. Т. 7. № 2. С. 487–493.
 9. Schnelle W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. I. Preparation and experimental characterization // Phys. Stat. Sol. A. 1989. Vol. 115. Iss. 2. P. 505–513. DOI: 10.1002/pssa.2211150218
 10. Matveev D.Yu., Starov D.V. The concentration measurements of tellurium donor impurity in lamellar bismuth samples by the time-of-flight mass spectrometry method // Journal of nano and electronic physics. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 02017 (4 pp). DOI: 10.21272/jnep.11(2).02017
 11. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А., Климантов М.М., Матвеев Д.Ю., Слепнев С.В., Усынин Е.В., Христич Е.Е., Константинов Е.В. Особенности структуры плёнок висмута, полученных методом термического испарения в вакууме // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Естественные и точные науки: Научный журнал. 2009. № 95. С. 105–120.
 12. Матвеев Д.Ю., Влияние магнитного поля на гальваномагнитные коэффициенты пленок висмута, легированного теллуром // Международный научно-практический журнал «Эпоха науки». 2018. № 16. С. 352–360. DOI: 10.24411/2409-3203-2018-11684
 3. Suslov, M.V., Grabov, V.M., Komarov, V.A., Demidov, E.V., Senkevich, S.V., Suslov, A.V. Termojeeds tonkih plenok $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) na podlozhkah iz sljudy i poliimida v temperaturnom intervale 77–300 K [The thermoelectric power of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.15$) on mica and polyimide substrates in the temperature range of 77–300 K]. *Semiconductors*, 2019, vol. 53, iss. 5. pp. 589–592. DOI: 10.1134/S1063782619050257 (In Russian)
 4. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Matveev, D.Yu., Nikolaeva, A.A., Markushevs, D., Konstantinov, E.V., Konstantinova, E.E. Razmernyj jeffekt v gal'vanomagnitnyh javleniyah pljonok vismута, legirovannogo tellurom [Size effect in galvanomagnetic phenomena in bismuth films doped with tellurium]. *Semiconductors*, 2020, vol. 48, no. 5, pp. 630–635. DOI: 10.1134/S106378261405008X (In Russian)
 5. Grabov, V.M., Komarov, V.A., Demidov, E.V., Klimantov, M.M. Yavleniya perenosa v monokristallicheskih plenках vismута [Transport phenomena in thin films of bismuth doped with tellurium]. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena* [Izvestia of the Russian State Pedagogical University. A.I. Herzen], 2010, no. 122, pp. 22–31. (In Russian)
 6. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A. Ogranichenie podvizhnosti nositelej zarjada v pljonkah vismута, obuslovennoe ih blochnoj strukturoj [Mobility restriction of charge carriers in bismuth films due to film block structure]. *Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2011, iss. 5, pp. 177–181. DOI: 10.1134/S1027451011020108 (In Russian)
 7. Ismailov, T.A., Mustafaev, A.G., Ramazanova, D.K., Sulin, A.B. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye preobrazovateli energii dlya vupryamleniya peremennogo napryazheniya [Thermoelectric semiconductor converters for AC voltage rectification]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science], 2014, no. 3 (34), pp. 82–87. (In Russian)
 8. Orlova, D.S., Rogacheva, E.I. Gal'vano-magnitnyye svoystva tonkikh plenok vismута, legirovannogo tellurom [Galvanomagnetic properties of tellurium-doped bismuth thin films]. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology], 2009, vol. 7, no. 2, pp. 487–493.

References

1. Sharma, A., Tripathi, J., Kumar, Y., Chandawat, G.S., Bisen, R., Tripathi, S. Effect of annealing on magnetic and structural properties of FeNi thin films. *Journal of nano and electronic physics*, 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 02040-1-02040-4. DOI: 10.21272/jnep.12(2).02040
2. Grabov, V.M., Gerega, V.A., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Starytsin, M.V., Suslov, A.V., Suslov, M.V. Atomno-silovaya mikroskopija i jelektricheskie svojstva monokristallicheskih

9. Schnelle, W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. I. Preparation and experimental characterization. *Phys. Stat. Sol. A*, 1989, vol. 115, iss. 2, pp. 505–513. DOI: 10.1002/pssa.2211150218
10. Matveev, D.Yu., Starov, D.V. The concentration measurements of tellurium donor impurity in lamellar bismuth samples by the time-of-flight mass spectrometry method. *Journal of nano-and electronic physics*, 2019, vol. 11, iss. 2, pp. 02017-1–02017-4. DOI: 10.21272/jnep.11(2).02017
11. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Klimantov, M.M., Matveev, D.Yu., Slepnev, S.V., Usynin, E.V., Khristich, E.E., Konstantinov, E.V. Osobennosti struktury plonok vismuta, poluchennykh metodom termicheskogo ispareniya v vakuume [Peculiarities of bismuth film structure made by the method of thermal spraying in vacuum]. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena. Yestestvennyye i tochnyye nauki: Nauchnyy zhurnal* [Izvestia of the Russian State Pedagogical University A.I. Herzen. Natural and Exact Sciences: Scientific Journal], 2009, no. 95, pp. 105–120. (In Russian)
12. Matveev, D.Yu. Vliyaniye magnitnogo polya na gal'vanomagnitnyye koeffitsiyenty plenok vismuta, legirovannogo tellurom [The influence of a magnetic field on the galvanomagnetic coefficients of bismuth films doped with tellurium]. *Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal "Epokha nauki"* [International scientific and practical journal "Epoch of Science"], 2018, no. 16, pp. 352–360. DOI: 10.24411/2409-3203-2018-11684 (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2021

© Матвеев Д. Ю., Кухалов А. Ю., 2021

Статья поступила 24 февраля 2021 г.