

УДК 539.21+539.216.2

## Гальваномагнитные и термоэлектрические свойства пленок висмута, легированного оловом

*Д.Ю. Матвеев*

Астраханский государственный университет (Астрахань, Россия)

## Galvanomagnetic and Thermoelectric Properties of Bismuth Films Doped with Tin

*D.Yu. Matveev*

Astrakhan State University (Astrakhan, Russia)

В работе проведено исследование гальваномагнитных и термоэлектрических свойств тонких пленок висмута, легированного оловом в количестве 0,06 ат. %, толщиной 250–800 нм осажденных на подложки из слюды-мусковит в вакууме до  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Гальваномагнитные и термоэлектрические коэффициенты всех представленных пленок были измерены в температурном интервале 77–300 К и магнитном поле до 0,65 Тл. Установлено проявление классического размерного эффекта, заключающееся в ограничении подвижности электронов толщиной пленки. Обнаружен характерный максимум зависимости магнетосопротивления в области температур 150–200 К. Обнаружена смена знака коэффициента Зеебека при температуре 175 К, которая может быть связана с температурой изменения соотношения вкладов электронной и дырочной компонент в гальваномагнитные и термоэлектрические явления, а также проявлением вклада дырок в L, T-точках зоны Бриллюэна. Положительные значения дифференциальной термо-ЭДС в пленках висмута, легированного оловом, могут стать основанием для поиска возможности создания p-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур. Полученные результаты исследований могут быть использованы при создании низкоразмерных структур на основе висмута с контролируемой концентрацией дырок.

**Ключевые слова:** висмут, олово, акцепторная примесь, тонкие пленки, удельное сопротивление, магнетосопротивление, коэффициент Холла, коэффициент Зеебека.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-05

### Введение

Полуметаллическим пленкам висмута посвящено немало работ. В одних работах изучается влияние структуры поверхности на гальваномагнитные свойства пленок [1]. В других приводятся механизмы расчета концентрации на основании моделей законов

This paper presents the experimental study of the galvanomagnetic and thermoelectric properties of thin bismuth films doped with tin. The amount of tin is 0.06 at. % with the thickness ranged within 250–800 nm, and it is deposited on mica-muscovite substrates in vacuum up to  $1 \cdot 10^{-5}$  mm Hg. The galvanomagnetic and thermoelectric coefficients of all presented films are measured in the temperature range of 77–300 K in a magnetic field of up to 0.65 T. It is found that the classical size effect in the films occurs due to mobility of electrons being restricted by the thickness of the film. A characteristic maximum of temperature dependence of relative transverse magnetoresistance in the temperature range of 150–200 K is observed. A change in the sign of the Seebeck coefficient at the temperature of 175 K is found. It can be explained by the temperature change ratio of the electron and hole components contributions to galvanomagnetic and thermoelectric phenomena, and the contribution of holes at the L, T points of the Brillouin zone. The positive values of differential thermoelectric power in bismuth films doped with tin can become the basis for searching for the possibility of creating a p-branch of thermoelectric energy converters in the low-temperature area. The obtained results of measurements can be used for creation of a low-dimensional bismuth-based structures with a controlled hole concentration.

**Key words:** bismuth, tin, acceptor impurity, thin films, resistivity, magnetoresistance, Hall coefficient, Seebeck coefficient.

дисперсии, а также расчет подвижности носителей заряда в зависимости от механизмов их рассеяния в исследуемых пленках [2].

Существует ряд работ, в которых изучается влияние легирования донорной примеси теллура на структуру поверхности и гальваномагнитные явления

в пленках висмута, притом в вопросах об изменении концентрации носителей заряда в таких пленках существует не одна точка зрения, если сравнить работы [3] и [4].

Несмотря на обширные исследования структуры и свойств пленок висмута, легированного донорными примесями, которые были получены методом термического испарения в глубоком вакууме, вопросы поведения коэффициента термоЭДС в пленках остаются открытыми [5]. И это ключевой момент. С одной стороны, от коэффициента термоЭДС зависит величина показателя термоэлектрической эффективности пленок и возможность их использования в первичных термоэлектрических тонкопленочных преобразователях энергии при необходимых температурах [6, 7].

С другой стороны, проблему влияния акцепторных примесей на структуру поверхности, гальваномагнитные и термоэлектрические свойства пленок висмута, полученных термическим осаждением на кристаллические подложки, фактически также никто не затрагивал.

Вышеуказанная проблема является актуальной задачей современной физики твердого тела как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Изучение кристаллической структуры, гальваномагнитных и термоэлектрических свойств пленок висмута, легированного акцепторными примесями, поможет получить более детальную информацию о зонной структуре таких пленок, особенностях электронной подсистемы, показателе термоэлектрической эффективности, а также о его возможном изменении при увеличении легирующей примеси акцептора.

Кроме того, имеющиеся данные по легированию висмута донорными и акцепторными примесями дадут общую картину закономерностей изменения гальваномагнитных и термоэлектрических свойств пленок висмута, что представляет значительный интерес и позволит иметь полные сведения об изменении зонной структуры пленок висмута различной толщины и концентрации легирующих примесей.

Таким образом, в работе приводятся результаты исследований гальваномагнитных и термоэлектрических свойств пленок висмута, легированного акцепторной примесью олова в количестве 0.06 ат. % толщиной 250–800 нм, осажденных на подложки из слюды-мусковит в вакууме до  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. и температурном интервале 77–300 К.

### Эксперимент

Пленки висмута, легированного оловом, получали путем распыления кусочков монокристалла  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  методом дискретного термического испарения на подложки из слюды-мусковит при давлении остаточных газов в камере  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., скорости напыления 7–9 нм/с, температуре подложки 120 °С и температуре отжига 240 °С продолжительностью 30 минут.

Перечисленные технологические режимы получения пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  соответствовали режимам получения пленок висмута, легированного теллуром, при которых наблюдались наибольшие размеры кристаллитов [8].

Измерение толщины получаемых пленок осуществлялось при помощи интерферометра Линника МИИ-5.

Исследование структуры всех полученных пленок производилось с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver компании NT-MDT методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме и контролировалось методом вращения кристалла на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 по схеме  $\Theta$ - $2\Theta$  сканирования в излучении медного анода [9].

Экспериментально измеряемые гальваномагнитные коэффициенты для пленок висмута, легированного оловом, при индукции магнитного поля, параллельной нормали к плоскости пленки  $\mathbf{B} \parallel \mathbf{n}$  соответствовали компонентам удельного сопротивления —  $\rho_{11}$ , относительного поперечного магнетосопротивления —  $\rho_{11,33}$ , коэффициента Холла —  $R_{12,3}$  монокристалла висмута.

Экспериментально измеряемая величина термоэлектрического коэффициента — коэффициента дифференциальной термоЭДС (коэффициент Зеебека) соответствовала ее компоненте  $\alpha_{11}$  монокристалла висмута.

Измерения гальваномагнитных и термоэлектрических коэффициентов пленок проходили на специализированной автоматизированной установке в стационарных условиях по классической методике: при фиксированных значениях температуры в интервале 77–300 К, постоянном электрическом токе и магнитном поле до 0,65 Тл.

Другими словами, установка позволяла проводить измерения гальваномагнитных и термоэлектрических коэффициентов при постоянном токе в постоянном магнитном поле до 0,65 Тл со стабилизацией температуры в четырнадцати температурных точках в интервале 77–300 К.

Относительная погрешность при измерении удельного сопротивления составляла около 12 % коэффициента Холла, Зеебека — около 14 %, магнетосопротивления — около 5 %.

Измерения всех исследованных гальваномагнитных и термоэлектрических коэффициентов тонкопленочных образцов на специализированной автоматизированной установке проводились на одном и том же образце в едином технологическом цикле.

Установка была устроена таким образом, что исследуемый образец с подведенными к нему контактами располагался внутри медного криостата. В объеме криостата создавался вакуум, что увеличивало однородность и стабильность температуры и повышало точность измерений, исключая взаимодействие

образца и подведенных к нему контактов с внешней средой.

Ввиду того что термоэлектрические свойства носителей заряда тонких пленок висмута существенно зависят от механических деформаций, в криостате было реализовано крепление образца, обеспечивающее отсутствие жесткого механического контакта между системой пленка — подложка и телом криостата для исключения деформации пленки элементами криостата в процессе измерений и как следствие более точного измерения коэффициента термоЭДС [10].

Дело в том, что различие коэффициентов температурного расширения (ТКР) градиентной пластины

и подложки существенно, поэтому возникающая деформация пленки преимущественно в низкотемпературной области может в реальности сильно исказить результаты измерений коэффициента термоЭДС.

#### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 приведено АСМ-изображение пленки состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$ .

По результатам АСМ-исследования структуры поверхности полученных пленок висмута, легированного оловом, согласно рисунку 1, можно сделать вывод, что их кристаллографическая ориентация одинакова.

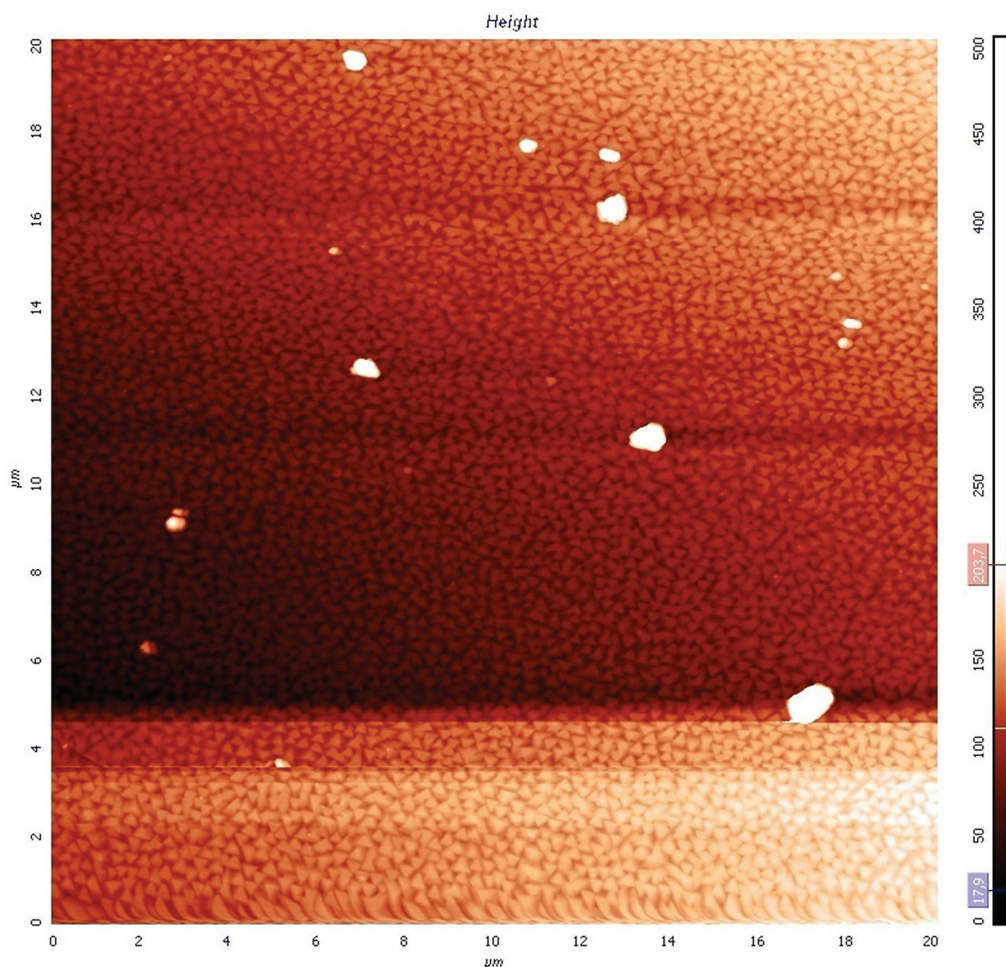


Рис. 1. Изображение пленки висмута, легированного оловом в количестве 0,06 ат. %, полученное с помощью АСМ. Площадь скана ( $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ ). Размер кристаллита  $1,45 \text{ мкм} \pm 0,19 \text{ мкм}$

Из представленного (рис. 1) видно, что треугольные фигуры роста упорядоченно расположены на поверхности пленки. Эта упорядоченность проявляется в ориентации тригональной оси перпендикулярно подложке, а также в согласованной ориентации бинарной и биссекторной кристаллографических осей в соседних фигурах роста.

Разработанная Е.В. Демидовым технология выявления межкристаллитных границ и определения среднего размера кристаллита на поверхности пленок чистого висмута применялась в настоящей работе к пленкам висмута, легированного оловом [9].

Средний размер кристаллитов пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  примерно от 1 до 1,5 мкм, т.е. для всех пле-

нок этого состава размер кристаллитов превосходит толщину пленки примерно в 2 раза для более толстых и примерно в 6 раз для более тонких пленок.

По сравнению с пленками чистого висмута тех же толщин и режимов получения размеры кристаллитов пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  существенно меньше по размеру величины, но соизмеримы с размером кристаллитов пленок висмута, легированного теллуром в количестве 0,05–0,06 ат. % Te [9, 11].

Таким образом, легирование висмута акцепторной примесью олова аналогично легированию висмута донорной примесью теллура приводит к уменьшению размеров кристаллитов в исследуемых пленках

состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$ , что позволяет говорить об определенной стабильности структуры поверхности пленок.

Результаты измерений удельного сопротивления —  $\rho_{11}$ , относительного поперечного магнетосопротивления —  $\rho_{11,33}$ , коэффициента Холла —  $R_{12,3}$  и коэффициента дифференциальной термоЭДС —  $\alpha_{11}$  по 14 температурным точкам в температурном интервале 77–300 К были обработаны и построены в программе Origin 2018 [12].

На рисунке 2 приведена температурная зависимость компоненты  $\rho_{11}$  удельного сопротивления пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины.

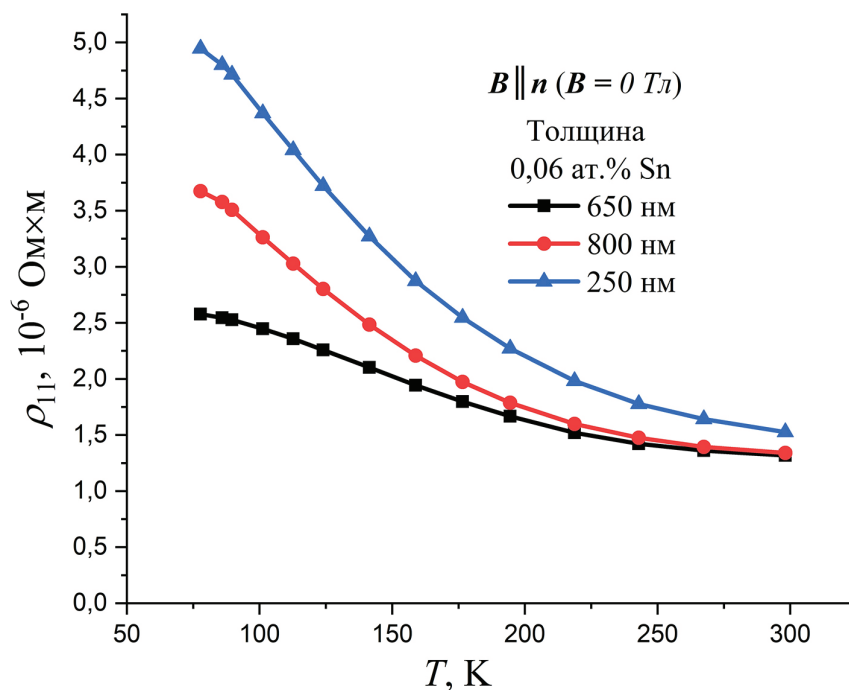


Рис. 2. Температурная зависимость компоненты  $\rho_{11}$  удельного сопротивления пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины

Из рисунка 2 видно, что с понижением температуры удельное сопротивление всех пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  возрастает, демонстрируя «полупроводниковый ход» зависимости, который отличен от «полупроводникового хода» температурной зависимости удельного сопротивления пленок чистого висмута [11, 13, 14].

Изменение удельного сопротивления с толщиной пленки особенно заметно в области азотных температур, что говорит о проявлении классического размерного эффекта.

Стоит отметить, что при любых одинаковых толщинах и уровнях легирования висмута теллуром и оловом удельное сопротивление пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  при азотных температурах выше, чем для пленок состава  $\text{Bi}_{99,5}\text{Te}_{0,05}$ . Общий характер температурных

кривых для пленок висмута с разным типом легирующей примеси различается между собой существенным образом.

Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что при азотных температурах для пленок висмута, легированного оловом при любых толщинах, не наблюдается характерного «выполживания» температурной зависимости удельного сопротивления по сравнению с легированием теллуром тех же концентраций [14].

На рисунке 3 приведена температурная зависимость компоненты  $\rho_{11,33}$  относительного поперечного магнетосопротивления пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины.

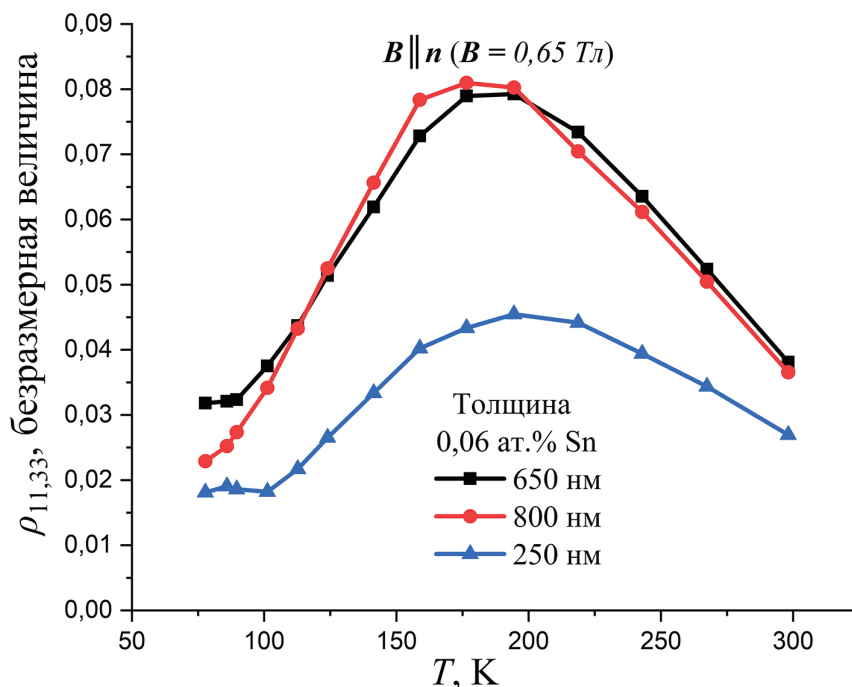


Рис. 3. Температурная зависимость компоненты  $\rho_{11,33}$  магнетосопротивления пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины

Из рисунка 3 видно, что относительное поперечное магнетосопротивление пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  имеет неоднозначный характер, отличный от пленок чистого висмута и висмута, легированного теллуром [1, 8, 15].

Можно заметить, что на всех графиках (рис. 3) наблюдается характерный максимум зависимости при температурах примерно 150–200 К, притом у более толстых пленок смещение максимума происходит в область более низких температур.

Как следует из рисунка 3, относительное поперечное магнетосопротивление, а следовательно, и подвижности носителей заряда в пленках висмута, легированного оловом, содержащего 0,06 ат. % Sn в интервале температур 150–200 К, принимают максимальные значения.

При температурах ниже 150 К относительное магнетосопротивление начинает убывать с понижением температуры, причем для более толстых пленок значения магнетосопротивления при азотных температурах и температурах наблюдения максимума отличаются более чем в 2 раза.

Эффекты Холла и Зеебека имеют разностный характер, т.е. сильно зависят от соотношения вкладов электронной и дырочной компонент.

В тригональной плоскости кристаллов чистого висмута компонента коэффициента Холла отрицательна и достаточно мала, что делает ее чувствительной к различным факторам, поэтому в тонких пленках наблюдается широкий разброс как по ее абсолютному значению, так и по знаку.

В висмуте вследствие анизотропии наименьшая подвижность дырок наблюдается вдоль тригональной оси, а электронов — в перпендикулярном ей направлении, поэтому при интерпретации результатов измерений необходимо учитывать различные ограничения подвижностей носителей зарядов на поверхности и границах кристаллитов. Однако изменение соотношения вкладов может быть обусловлено и другими причинами, в том числе влиянием поверхностных состояний и деформаций.

На рисунке 4 приведена температурная зависимость компоненты  $R_{12,3}$  коэффициента Холла пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины.

Коэффициент Холла пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  положителен и увеличивается по абсолютной величине с понижением температуры, как и у пленок чистого висмута, однако, как следует из рисунка 4, характер температурной зависимости пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  не экспоненциальный по сравнению с пленками чистого висмута.

Положительный коэффициент Холла наблюдался и в поликристаллических пленках висмута на слюдяной подложке толщиной порядка микрометра, размеры блоков которых превосходили толщину самой пленки.

В таких пленках ограничение электронной составляющей толщиной проявляется существеннее, чем ограничение дырочной составляющей размерами кристаллитов [16].

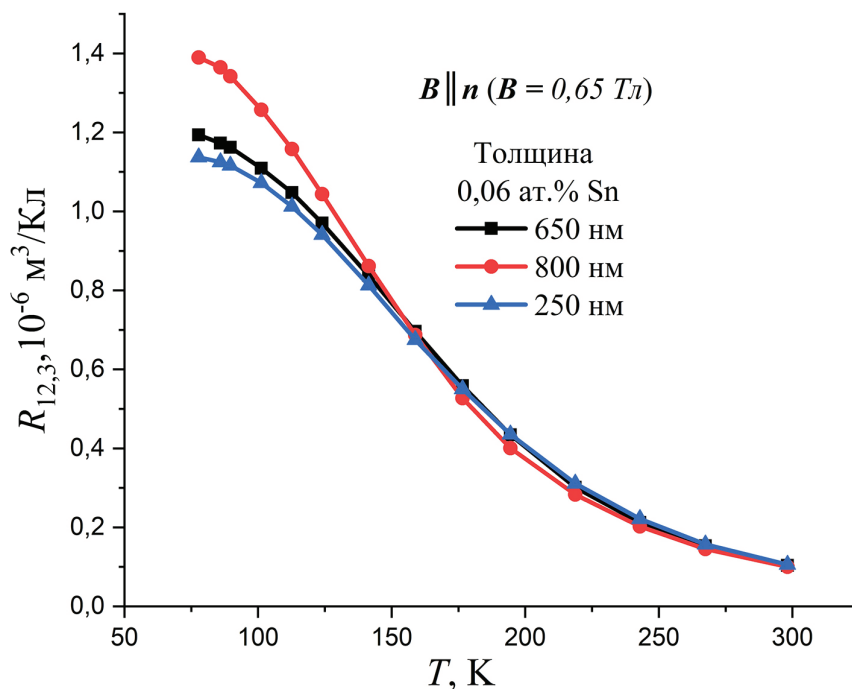


Рис. 4. Температурная зависимость компоненты  $R_{12,3}$  коэффициента Холла пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины

Аналогично из рисунка 4 следует тот факт, что при уменьшении толщины образцов значение коэффициента Холла в среднем уменьшается.

С увеличением толщины пленки коэффициент Холла увеличивается по абсолютной величине особым образом в области низких температур, что, во-первых, отражает проявление классического размерного эффекта, во-вторых, указывает на то, что вклад дырок в гальваномагнитные явления будет преобладающим.

Уменьшение удельного сопротивления и абсолютной величины коэффициента Холла пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  при повышении температуры выше 77 К может указывать на увеличение концентрации носителей заряда вследствие температурного возбуждения электронно-дырочных пар, хотя поведение величины относительного поперечного магнетосопротивления не является постоянным в исследуемой температурной области.

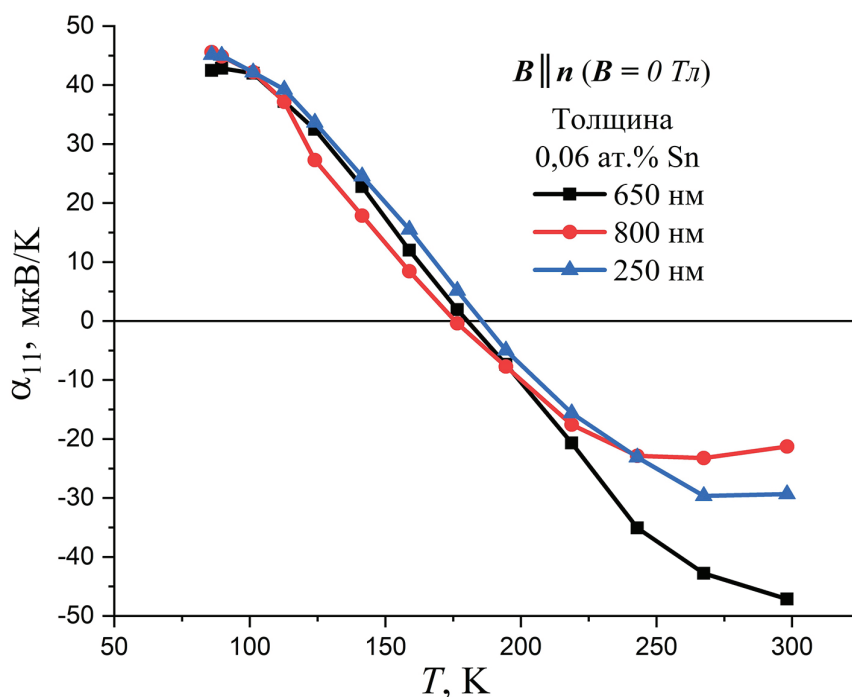


Рис. 5. Температурная зависимость компоненты  $\alpha_{11}$  коэффициента Зеебека пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины

На рисунке 5 приведена температурная зависимость компоненты  $\alpha_{11}$  коэффициента дифференциальной термоЭДС (коэффициент Зеебека) пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  различной толщины.

Видно, что на температурных зависимостях термоЭДС пленок состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  наблюдается изменение знака коэффициента Зеебека с положительного на отрицательный при повышении температуры (рис. 5), причем его значение при комнатных и азотных температурах весьма велико. Температура смены знака составляет примерно 175 К, что приходится на характерный максимум температурной зависимости магнетосопротивления в интервале 150–200 К, который связан с изменением соотношения вкладов электронной и дырочной компонент термоЭДС в указанном интервале.

Для пленок данных составов также существен разброс значений термоЭДС при высоких температурах.

Представленная зависимость абсолютно нехарактерна для пленок чистого висмута на подложках из слюды, у которых коэффициент Зеебека отрицателен во всем интервале температур и при понижении температуры уменьшается по абсолютному значению для пленок толщинами менее 800 нм.

Сравнивая рисунки 4 и 5, можно сделать вывод об одинаковой закономерности поведения разностных коэффициентов, однако, в отличие от коэффициента Зеебека, коэффициент Холла положителен во всем интервале температур, что говорит о заметном вкладе дырок в гальваномагнитные явления при низких температурах и ограничении подвижности электронов толщиной пленки.

Для детального анализа поведения коэффициента Зеебека с температурой необходимо учитывать вклады парциальных составляющих термоЭДС электронов и дырок ввиду изменения знака дифференциальной термоЭДС [12].

Как показывает анализ экспериментальных результатов, значения термоЭДС и коэффициента Холла между собой не согласуются.

Большее влияние толщина пленки оказывает на эффект Холла: уменьшение толщины смещает баланс электронного и дырочного вкладов в электронную область.

Обнаружение положительного значения термоЭДС в пленках состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  представляет интерес для создания р-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур [17].

Поэтому изменение знака термоЭДС в пленках состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  обусловлено не только существенным ограничением подвижности электронов, но и возможным проявлением вклада дырок, локализованных в L, T-точках зоны Бриллюэна, что требует дальнейшего детального анализа представленных зависимостей.

### Заключение

В работе были исследованы температурные зависимости удельного сопротивления, магнетосопротивления, коэффициента Холла и коэффициента Зеебека пленок висмута, легированного оловом, в количестве 0,06 ат. % толщиной 250–800 нм.

Характер зависимостей  $\rho_{11}(T)$ ,  $\rho_{11,33}(T)$ ,  $R_{12,3}(T)$  для пленок  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  существенно отличается от пленок чистого и легированного теллуром висмута.

Для всех исследованных образцов характерно уменьшение удельного сопротивления, относительного магнетосопротивления и коэффициента Холла при уменьшении толщины, что в сочетании с уменьшением подвижности носителей заряда, о которой говорит малое магнетосопротивление, свидетельствует о возбуждении электронно-дырочных пар.

На температурной зависимости магнетосопротивления обнаружен характерный максимум в области температур 150–200 К, который связан с изменением соотношения вкладов электронов и дырок в гальваномагнитные и термоэлектрические явления.

Наблюдается проявление классического размерного эффекта, усиливающегося при понижении температуры на температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла.

Вклад дырочной составляющей носителей заряда является преобладающим на основании поведения коэффициента Холла в исследуемых пленках.

Обнаруженная положительная термоЭДС в тонких пленках состава  $\text{Bi}_{99,4}\text{Sn}_{0,06}$  может стать важным фактором для поиска возможности создания р-ветви термоэлектрических преобразователей энергии в области низких температур.

Полученные в настоящей работе результаты дополняют систему закономерностей проявления размерных эффектов ограничения подвижности носителей заряда при переходе от массивных монокристаллов к низкоразмерным объектам в виде пленок висмута, легированного оловом различной толщины, и могут быть использованы при создании низкоразмерных структур на основе висмута с контролируемой концентрацией дырок.

### Библиографический список

1. Cho S., Kim Y., Freeman A.J., Wong G.K.L., Ketterson J.B., Olafsen L.J., Vurgaftman I., Meyer J.R., Hoffman C.A. Large magnetoresistance in postannealed Bi thin films // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79. № 22. DOI: 10.1063/1.1416157.

2. Hattab H., Zubkov E., Bernhart A., Jnawali G., Bobisch C., Krenzer B., Acet M., Möller R., Horn-von Hoegen M. Epitaxial Bi (111) films on Si (001): Strain state, surface morphology, and defect structure // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516. № 23. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.02.038.
3. Dilner U., Schnelle W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. II. Analysis in an anisotropic one-carrier model // *Physica Status Solidi A*. 1989. Vol. 116. № 1. DOI: 10.1002/pssa.2211160131.
4. Орлова Д.С., Рогачева Е. И. Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута, легированного теллуром // *ИМФ, наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. 2009. Т. 7. № 2.
5. Гранаткина Ю.В., Дашевский З.М. Термоэлектрические свойства пленок  $p\text{-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  на гибкой подложке // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56. № 1. DOI: 10.21883/FTP.2022.01.51803.05.
6. Марков О.И. Вклад распределенного эффекта Пельтье в эффективность ветви термоэлектрического охладителя // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56. № 1. DOI: 10.21883/FTP.2022.01.51811.27.
7. Savelli G. Étude et développement de composants thermoélectriques à base de couches minces: *Matiere Condensee [cond-mat]* // *Université Joseph Fourier de Grenoble I*. 2007.
8. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A., Matveev D.Yu., Markushevs D., Konstantinov E.V., Konstantinova E.E., Nikolaeva A.A. The size effect in galvanomagnetic phenomena in a in bismuth films, doped with tellurium // *Semiconductors*. 2014. Vol. 48. № 5. DOI: 10.1134/S106378261405008X.
9. Matveev D.Yu. Structural Surface Features of Tellurium-Doped Bismuth Films // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019. Vol. 13. № 6. DOI: 10.1134/S1027451019060132.
10. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates // *Journal of Physics: Conference Series (13th International Conference on Films and Coatings)*. 2017. Vol. 857. DOI: 10.1088/1742-6596/857/1/012006.
11. Kumari L., Lin S.-J., Lin J.-H., Ma Y.-R., Lee P.-C., Liou Y. Effects of deposition temperature and thickness on the structural properties of thermal evaporated bismuth thin films // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253. № 14. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.12.125.
12. Komarov V.A., Grabov V.M., Suslov A.V., Kablukova N.S., Suslov M.V. The Hall and Seebeck effects in bismuth thin films on mica substrates in the temperature range of 77–300 K // *Semiconductors*. 2019. Vol. 53. № 5. DOI: 10.1134/S1063782619050105.
13. Матвеев Д.Ю., Кухалов А.Ю. Особенности поведения удельного сопротивления в тонких пленках висмута, легированного теллуром // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2021. Т. 18. № 1. DOI: 10.31429/vestnik-18-1-55-62.
14. Duan X., Yang J., Zhu W., Fan X., Xiao C. Structure and electrical properties of bismuth thin films prepared by flash evaporation method // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. № 22. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.01.098.
15. Chang J., Kim H., Han J., Jeon M. H., Lee W. Y. Microstructure and magnetoresistance of sputtered bismuth thin films upon annealing // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 98, № 2. DOI: 10.1063/1.1989433.
16. Syslov A.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V., Senkevich S.V., Syslov M.V. The band-structure parameters of  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.15$ ) thin films on substrates with different thermal-expansion coefficients // *Semiconductors*. 2019. Vol. 53. № 5. DOI: 10.1134/S1063782619050269.
17. Федотов А.С., Мазаник А.В., Позняк С.К., Шепелевич В.Г., Федотов А.К. Влияние отжига на термоэлектрические и гальваномагнитные свойства поликристаллических пленок висмута // *Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. VI Междунар. науч. конф. Минск, 2014.*