

13,12

Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут–сурьма на подложках с различным температурным расширением

© В.М. Грабов, В.А. Комаров, Н.С. Каблукова

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: va-komar@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 8 июля 2015 г.)

Исследованы температурные зависимости гальваномагнитных свойств пленок висмута и сплавов $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$ ($x \leq 12$) на подложках с различным температурным коэффициентом расширения в интервале температур 77–300 К. Блочные пленки получены методом термического напыления, а монокристаллические пленки $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$ — методом зонной перекристаллизации под покрытием. Установлено существенное влияние температурного коэффициента расширения подложки на гальваномагнитные свойства пленок висмута и $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$. На основе экспериментальных результатов оценено изменение концентрации носителей заряда в пленках висмута и $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$ на различных подложках при 77 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/376 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности, проект № 59.

1. Введение

Последние несколько десятилетий активно исследуются тонкие пленки висмута и сплавов висмут–сурьма [1–3]. При их получении используются подложки из различных материалов: кремний, стекло, ситалл, слюда, кристаллы BaF_2 , CaF_2 , NaCl , KBr и другие. Принято считать, что подложка оказывает влияние только на структуру получаемой пленки: на аморфной подложке пленки висмута и сплавов висмут–сурьма состоят из кристаллитов, значительно меньших по размеру, чем пленки на монокристаллических подложках. Это различие структуры пленок определяет различие их гальваномагнитных и термоэлектрических свойств. Однако существует и другой механизм влияния подложки на свойства пленок висмута и сплавов висмут–сурьма — это деформация пленки подложкой, возникающая вследствие различного температурного расширения материалов пленки и подложки. Эта деформация существует в пленке, если ее температура отличается от температуры формирования (температуры подложки при напылении или температуры отжига). Электронный спектр кристаллов висмута и сплавов висмут–сурьма вблизи уровня Ферми характеризуется малыми энергетическими зазорами и перекрытиями зон, что приводит к значительному изменению электронных свойств кристаллов при их деформации. Существует большое количество работ по исследованию влияния гидростатического сжатия на электронные свойства кристаллов висмута и системы висмут–сурьма [4]. Значительно меньше работ посвящено исследованию влияния одноосной деформации на свойства кристаллов системы висмут–сурьма [5]. Результаты этих исследований указывают на то, что

деформация кристалла приводит к изменению параметров энергетического спектра носителей заряда вблизи энергии Ферми. Выявлено существенное влияние гидростатического давления на свойства пленок висмута, осажденных на плоскости (111) кристалла BaF_2 [6], однако отсутствуют работы, в которых рассматривается влияние на электронные свойства пленки деформации пленки подложкой.

Представленные исследования направлены на установление закономерности влияния деформации в системе пленка–подложка, вызванной различным температурным расширением материалов пленки и подложки, на электронные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут–сурьма.

2. Эксперимент

Пленки висмута толщиной 0.2–2 μm были получены термическим вакуумным напылением на различных подложках. В качестве подложек использовались: окисленный кремний, анодированный тантал, стекло, ситалл, слюда мусковит, алюминий, покрытый полиимидом, полиимид, кристаллы CaF_2 и NaCl . Температурный коэффициент линейного расширения (ТКР) α этих материалов при комнатной температуре приведен в табл. 1.

Все пленки получены при одинаковых технологических режимах: вакуум 10^{-5} Торр, скорость напыления 10 nm/s, температура подложки 440 К, отжиг при температуре 530 К в течение 30 min. Так как в процессе отжига происходит перестройка кристаллической структуры пленки, то температуру отжига можно считать температурой формирования пленки.

Пленки сплавов висмут–сурьма с концентрацией сурьмы 3–12 at.% на подложках из слюды мусковит и

Таблица 1. Относительная концентрация свободных носителей заряда в пленках висмута $n_{\text{film}}/n_{\text{bulk}}$ при 77 К на подложках с различным ТКР (α) и соответствующее изменение перекрытия L - и T -зон на единицу эквивалентной нагрузки вдоль тригональной оси $\Delta E/\sigma$

Материал подложки	Si	Ta	Слюда	Bi (111)	CaF ₂	Al	Полиимид	NaCl
α , 10^{-6} K^{-1}	1.12	5.96	7.5	11.0	18.0	18.3	30	39.0
$n_{\text{film}}/n_{\text{bulk}}$	0.45	0.65	0.8	1	1.6	1.5	2.34	2.9
$\Delta E/\sigma$, 10^{-2} meV/MPa	-4.6	-4.5	-	-4.46 [5]	-4.7	-4.5	-	-3.2

полиимида были получены методом дискретного термического напыления. Этот метод обеспечивает однородное распределение сурьмы по объему пленки. Значения температуры подложки и отжига имели такую же величину, что и при получении пленок висмута. Кроме того, методом зонной перекристаллизации под покрытием были получены монокристаллические пленки сплавов висмут–сурьма тех же составов и толщин на подложках из слюды и полиимида [7]. Толщина пленок висмут–сурьма составляла 0.3–2 μm .

Исследование структуры пленок проводилось с использованием рентгеноструктурного анализа, атомно-силовой микроскопии (АСМ) с применением методик, описанных в [8,9], и оптической микроскопии совместно с выявляющим химическим травлением. Проведенные исследования кристаллической структуры показали, что в монокристаллических пленках и в кристаллитах всех блочных пленок, как висмута, так и сплавов висмут–сурьма, ось C_3 перпендикулярна плоскости подложки [7,10]. В блочных пленках азимутальная ориентация кристаллитов на аморфных подложках произвольная, а на монокристаллических подложках наблюдается согласованная кристаллографическая ориентация: оси C_2 в соседних блоках антипараллельны [11]. Размеры блоков в пленках на аморфных подложках меньше, чем на кристаллических подложках.

Для полученных пленок проведено исследование температурных зависимостей удельного сопротивления, относительного магнетосопротивления и коэффициента Холла в интервале температур 77–300 К в магнитном поле до 0.65 Т.

Измеряемые на пленках висмута и висмут–сурьма удельное сопротивление, магнетосопротивление и коэффициент Холла с учетом кристаллографической ориентации пленок соответствуют компонентам удельного сопротивления ρ_{11} , коэффициента Холла $R_{12,3}$, и магнетосопротивления $\rho_{11}(B_3)$ монокристалла типа висмута.

При монтаже подложки с пленкой в измерительном криостате использовался метод крепления, исключающий деформацию пленки с подложкой элементами криостата.

Процесс исследования температурных зависимостей гальваномагнитных коэффициентов начинался с температурного хода от 300 до 77 К с последующим обратным ходом от 77 до 300 К. Такая последовательность позволила исключить образцы, в которых наблюдалось ча-

стичное снятие возникающих деформаций. Вероятность такого события возрастает с увеличением толщины пленки.

На рис. 1 и 2 приведены температурные зависимости удельного сопротивления и относительного магнетосопротивления пленок висмута на примере пленок толщиной 0.8 μm . Зависимости удельного сопротивления пленок висмута от температуры на различных подложках существенно различаются между собой (рис. 1). Пленки на подложках из полиимида, CaF₂ и NaCl, которые имеют ТКР значительно больший, чем висмут, характеризуются температурной зависимостью удельного сопротивления, свойственной металлу, то есть наблюдается почти линейное уменьшение сопротивления при понижении температуры. Для пленок на подложках с ТКР меньшим, чем у висмута, на температурной зависимости удельного сопротивления появляется минимум. Его положение зависит от ТКР подложки: чем меньше ТКР подложки, тем при большей температуре наблюдается минимум на температурной зависимости.

Среди использованных подложек есть кристаллические и аморфные, однако вид температур-

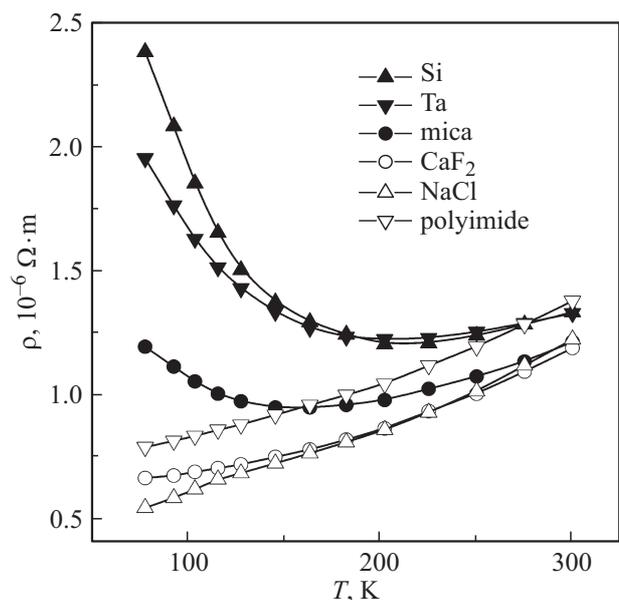


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления от температуры пленок Bi толщиной 0.8 μm на различных подложках.

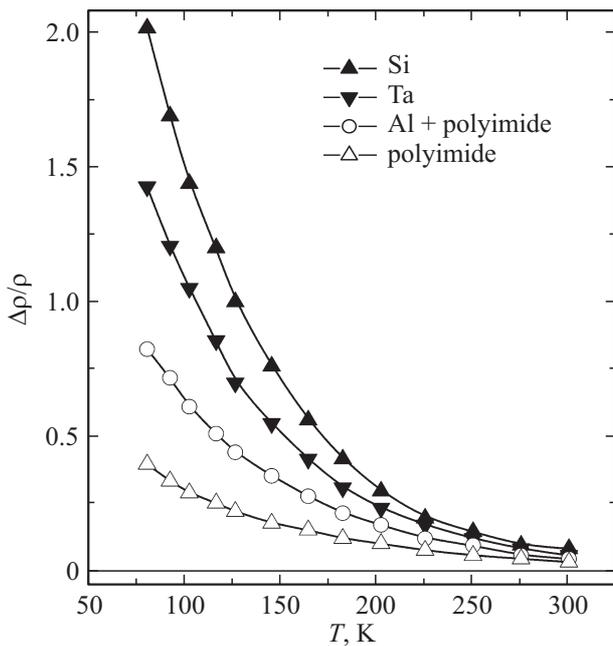


Рис. 2. Зависимость относительного магнетосопротивления от температуры для пленок висмута толщиной $0.8 \mu\text{m}$ на различных подложках. $B = 0.1 \text{ T}$, $\mathbf{B} \parallel \mathbf{n}$.

ной зависимости находится в полном соответствии с ТКР подложки: максимальное значение удельного сопротивления при 77 K соответствует пленке на кремнии ($\alpha = 1.12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$), минимальное — на NaCl ($\alpha = 39 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Пленка на полиимиде ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) имеет несколько большее удельное сопротивление во всем температурном интервале по сравнению с пленкой на NaCl , что обусловлено меньшим размером кристаллитов в этой пленке, но характер температурной зависимости аналогичен зависимости для пленки на NaCl .

Относительное магнетосопротивление в области слабого магнитного поля пропорционально квадрату подвижности свободных носителей заряда. Подвижность носителей заряда в пленках в значительной степени зависит от размеров блоков, из которых состоит пленка, поэтому при анализе влияния деформации на магнетосопротивление сравнивались пленки, имеющие примерно одинаковый размер кристаллитов. Этому условию соответствуют пленки на аморфных подложках.

На рис. 2 приведены температурные зависимости относительного магнетосопротивления пленок висмута только на аморфных подложках. Как показали исследования с использованием АСМ, размеры кристаллитов в этих пленках примерно равны. Как видно из рис. 2, наблюдается соответствие величины относительного магнетосопротивления пленки и ТКР материала подложки. При 77 K наибольшее магнетосопротивление имеет пленка на окисленном кремнии ($\alpha = 1.12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$), а наименьшее — на полиимиде ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Аналогичная закономерность наблюдается и при сравнении

пленок висмута на монокристаллических подложках, однако большое различие в размерах кристаллитов в пленках делает эту зависимость менее очевидной.

Таким образом, при 77 K пленкам висмута на кремнии соответствует наибольшее удельное сопротивление и наибольшее магнетосопротивление, а пленкам на полиимиде — наименьшее, для аморфных подложек, удельное сопротивление и магнетосопротивление. Такое соответствие наблюдается при сравнении пленок висмута любой одинаковой толщины в пределах исследуемого диапазона толщин.

Учитывая то, что магнетосопротивление пропорционально квадрату подвижности носителей заряда, можно утверждать, что такое сочетание свойств пленок висмута возможно, если концентрация носителей заряда в пленке на подложке с малым ТКР (на кремнии) значительно меньше, чем в пленках на подложке с большим ТКР (на полиимиде).

Результаты, полученные при исследовании пленок висмут–сурьма, представлены на примере пленок $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$. На рис. 3 и 4 приведены температурные зависимости удельного сопротивления и относительного магнетосопротивления блочных и монокристаллических пленок $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$ на подложках из слюды и полиимида. Как и для пленок висмута, наблюдается соответствие между ТКР подложки и характером температурной зависимости удельного сопротивления и магнетосопротивления пленок сплава $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$. При одинаковом совершенстве структуры пленок (блочные или монокристаллические) удельное сопротивление и относительное магнетосопротивление пленок сплава $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ на слюде ($\alpha = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) больше, чем на полиимиде ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Различие между свойствами пленок

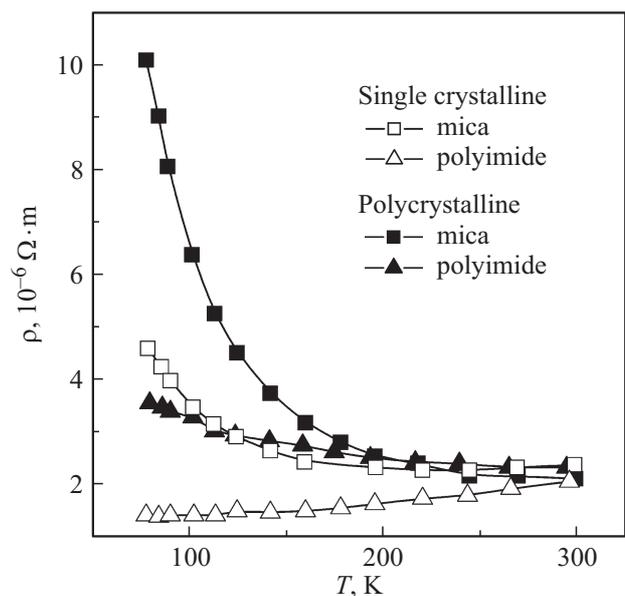


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления блочных и монокристаллических пленок состава $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$.

на слюде и полиимиде возрастает при понижении температуры. Такое соответствие было получено для пленок сплавов висмут–сурьма всех исследованных составов. Это подтверждает вывод, сделанный для пленок висмута, что концентрация носителей заряда в пленках сплавов висмут–сурьма на слюде меньше, чем в пленках того же состава на полиимиде.

Температурные зависимости коэффициента Холла в пленках висмута и $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Коэффициент Холла, измеряемый на

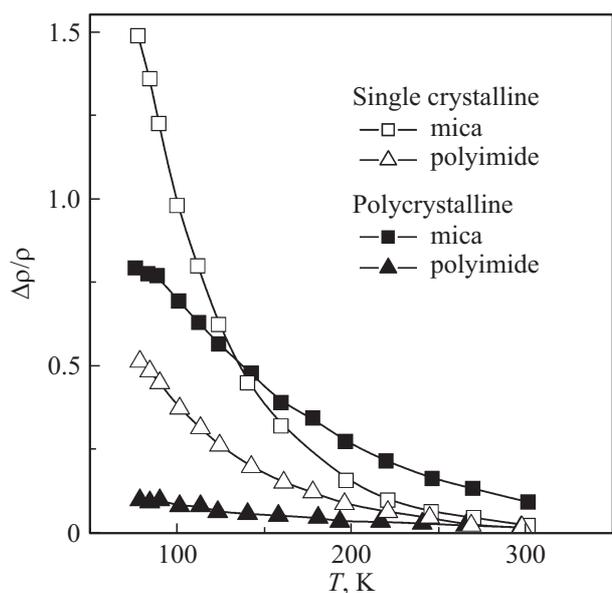


Рис. 4. Температурная зависимость магнетосопротивления блочных и монокристаллических пленок состава $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$ при $B = 0.46 \text{ T}$, $B \parallel n$.

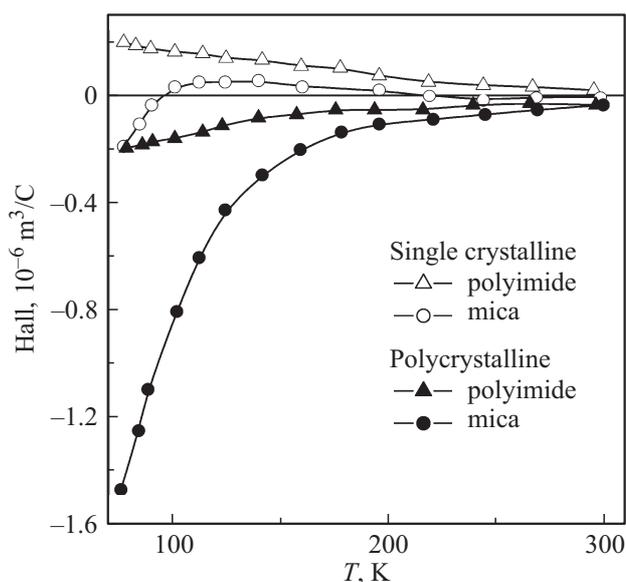


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента Холла в блочных пленках Bi толщиной $0.8 \mu\text{m}$ на различных подложках.

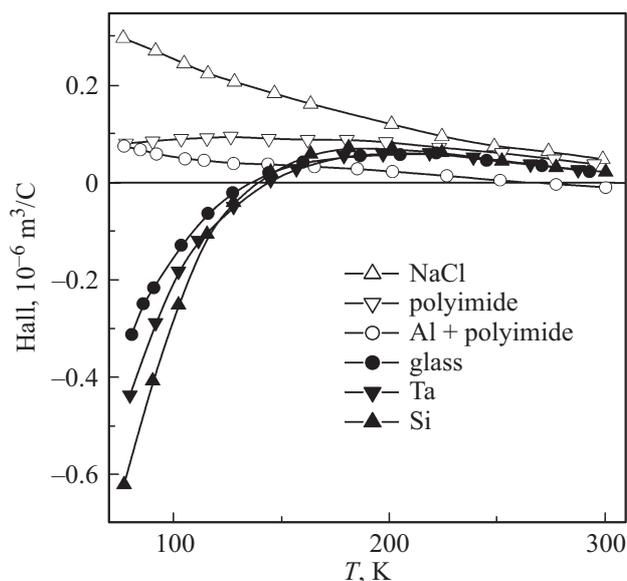


Рис. 6. Температурная зависимость коэффициента Холла в блочных и монокристаллических пленках $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$ на слюде и полиимиде.

пленках, соответствует компоненте R_{123} кристалла, которая мала вследствие почти равного вклада электронов и дырок в эффект Холла. Небольшое изменение соотношения вкладов электронов и дырок приводит к значительному изменению коэффициента Холла пленок и даже изменяет его знак. Однако некоторые закономерности влияния деформации можно отметить. В пленках висмута, имеющих примерно равные размеры кристаллитов (на аморфных подложках), при $T = 77 \text{ K}$ при уменьшении ТКР подложки коэффициент Холла возрастает по абсолютной величине, что согласуется с выводом об уменьшении концентрации носителей заряда. Аналогичная тенденция наблюдается и в пленках сплавов висмут–сурьма, в частности $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$.

Существуют другие механизмы изменения коэффициента Холла в пленках. Например, наличие межблочных границ в блочных пленках, по сравнению с монокристаллическими, изменяет соотношение вкладов электронов и дырок в эффект Холла так, что вклад электронов становится преобладающим (рис. 6). Это затрудняет использование данных по эффекту Холла для количественного анализа изменений в пленке, обусловленных деформациями в системе пленка–подложка.

3. Обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что только заменой материала подложки можно изменить удельное сопротивление и магнетосопротивление пленки в несколько раз. Такое значительное изменение свойств пленки может произойти только при изменении концентрации и подвижности свободных носителей заряда.

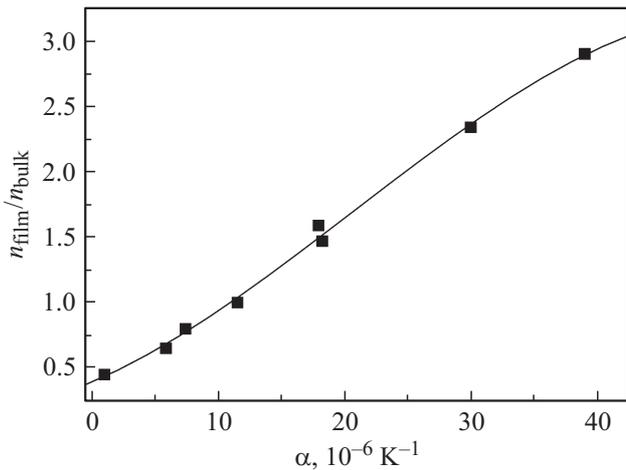


Рис. 7. Зависимость относительной концентрации свободных носителей заряда в пленках висмута $n_{\text{film}}/n_{\text{bulk}}$ при 77 К от ТКР подложки α .

Пленка на подложке при температуре, отличной от температуры ее формирования, испытывает плоскостное растяжение или сжатие. Если температура меньше температуры формирования пленки, то она испытывает плоскостное растяжение, если ТКР подложки меньше ТКР материала пленки. При той же температуре пленка испытывает плоскостное сжатие, если ТКР подложки больше ТКР материала пленки. Такая плоскостная деформация эквивалентна одноосной деформации в перпендикулярном направлении. Для пленок висмута и сплавов висмут–сурьма — это одноосная деформация вдоль оси C_3 . Как следует из результатов исследования влияния одноосной деформации на свойства монокристаллов висмута и сплавов висмут–сурьма, одноосная деформация вдоль тригональной оси приводит к изменению энергетических зазоров и перекрытий вблизи уровня Ферми без искажения общей их симметрии [5]. Результатом этого является изменение концентрации свободных носителей заряда при сохранении равенства концентраций электронов и дырок. Принимая во внимание отмеченные выше трудности использования данных по коэффициенту Холла для анализа влияния деформации, была произведена оценка изменения концентрации свободных носителей заряда в пленках висмута n_{film} на различных подложках по сравнению со значением концентрации в монокристалле n_{bulk} . Для оценки использовались экспериментальные значения удельного сопротивления ($\rho_{\text{film}}, \rho_{\text{bulk}}$) и относительного магнетосопротивления ($(\Delta\rho/\rho B^2)_{\text{film}}, (\Delta\rho/\rho B^2)_{\text{bulk}}$), которое в области слабого поля пропорционально квадрату подвижности носителей заряда, пленок и монокристалла висмута. Расчет произведен согласно выражению

$$\frac{n_{\text{film}}}{n_{\text{bulk}}} = \left(\rho_{\text{bulk}} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho B^2} \right)_{\text{bulk}} \right)^{1/2} / \left(\rho_{\text{film}} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho B^2} \right)_{\text{film}} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Результаты расчета изменения концентрации свободных носителей заряда в пленках висмута при 77 К на подложках с различным ТКР приведены в табл. 1 и на рис. 7. Все экспериментальные точки, включая точку для массивного монокристалла висмута, хорошо ложатся на плавную кривую, близкую к линейной зависимости вблизи точки, соответствующей монокристаллу висмута. Полученные значения относительной концентрации носителей заряда находятся в интервале от 0.45 для пленок висмута на кремнии до 2.9 для пленок висмута на NaCl.

По полученным данным о величине плоскостной деформации и изменению концентрации носителей заряда в рамках двухзонной модели определено изменение перекрытия L - и T -зон на единицу эквивалентной нагрузки вдоль тригональной оси $\Delta E/\sigma$. Расчет был произведен только для подложек, для которых были найдены достоверные сведения по ТКР во всем температурном интервале 77–300 К. Результаты приведены в табл. 1. Они хорошо согласуются с данными для монокристалла висмута при одноосной деформации вдоль оси C_3 ($4.46 \cdot 10^{-2} \text{ meV/MPa}$) [5].

Для блочных и монокристаллических пленок сплавов висмут–сурьма по экспериментальным результатам для удельного сопротивления, магнетосопротивления и коэффициента Холла [12] в рамках двухзонного приближения и равенства концентраций электронов и дырок решением системы уравнений (2)

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} = e \left(n \frac{1}{2} (U_1^- + U_2^-) + p U_1^+ \right), \\ \frac{R}{\rho^2} = e (p (U_1^+)^2 - n U_1^- U_2^-), \\ \frac{\Delta\rho}{\rho B^2} = \rho e \left(p (U_1^+)^3 + n U_1^- U_2^- \frac{1}{2} (U_1^- + U_2^-) \right) - \frac{R^2}{\rho^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где n, p — концентрации электронов и дырок, U_1^-, U_2^-, U_1^+ — компоненты подвижности электронов и дырок, при дополнительном условии $U_2^-/U_1^- = 0.01$, были получены значения концентрации и подвижности носителей заряда при $T = 77 \text{ К}$. Результаты расчетов для монокристаллических пленок висмут–сурьма приведены в табл. 2. В монокристаллических пленках всех исследованных составов на слюде концентрация свободных носителей заряда значительно меньше, а подвижность больше, чем в пленках того же состава на полиимиде.

Важной особенностью приведенных результатов является то, что производилось сравнение свойств пленок, имеющих монокристаллическую структуру, но полученных на различных подложках. Это позволило исключить возможное влияние различия структуры пленок на различных подложках на результат анализа свойств.

Значения концентрации носителей заряда в блочных пленках совпадают со значениями концентрации в монокристаллических пленках того же состава при исполь-

Таблица 2. Концентрации и подвижности носителей заряда в монокристаллических пленках $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$ на слюде и полиимиде при 77 К

Состав	$\text{Bi}_{97}\text{Sb}_3$	$\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$	$\text{Bi}_{92}\text{Sb}_8$	$\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$
Подложка	Слюда мусковит ($\alpha = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$)			
$n, 10^{23} \text{ m}^{-3}$	0.52 ± 0.01	1.14 ± 0.02	0.86 ± 0.09	0.44 ± 0.02
$U^+, \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	6.1 ± 0.1	4.7 ± 0.1	4.4 ± 0.3	11.1 ± 0.6
$U^-, \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	44.0 ± 0.9	31.7 ± 0.6	24.0 ± 0.7	69 ± 1
Подложка	Полиимид ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$)			
$n, 10^{23} \text{ m}^{-3}$	5.7 ± 0.2	7.1 ± 0.2	3.1 ± 0.06	1.01 ± 0.02
$U^+, \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	0.71 ± 0.02	1.00 ± 0.02	2.43 ± 0.05	2.15 ± 0.04
$U^-, \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	5.26 ± 0.2	6.7 ± 0.3	14.4 ± 0.3	11.7 ± 0.2

зовании подложек из одинакового материала. Наблюдается качественное согласие влияния ТКР подложки на подвижность носителей заряда с результатами для монокристаллических пленок: при одинаковых размерах кристаллитов подвижность носителей заряда, как электронов, так и дырок, в пленках на слюде значительно больше, чем в пленках на полиимиде.

Использование метода расчета, примененного для пленок висмута, при обработке результатов по пленкам сплава висмут–сурьма дал близкие значения концентрации носителей заряда.

Изменение концентрации и подвижности носителей заряда, вызванное деформацией в системе пленка–подложка, сопровождается изменением длины свободного пробега. Изменение длины свободного пробега носителей заряда вносит дополнительные изменения в свойства тонкой пленки вследствие изменения степени проявления классического размерного эффекта, связанного как с толщиной пленки, так и с размерами кристаллитов в блочных пленках. Вследствие большой анизотропии подвижности, а значит, и длины свободного пробега, электронов и дырок в исследованном материале с учетом того, что подвижность дырок минимальна вдоль C_3 , а электронов — в направлении, перпендикулярном C_3 , изменение степени проявления размерного эффекта может приводить к изменению соотношения вкладов электронов и дырок в гальваномагнитные явления. Размерный эффект, связанный с толщиной пленки, уменьшает относительный вклад электронов, а связанный с размерами кристаллитов — вклад дырок в гальваномагнитные явления. В рамках этой модели хорошо интерпретируются результаты измерения коэффициента Холла, приведенные на рис. 5 и 6. В пленках висмута (рис. 5) на подложках с температурным расширением большим, чем у висмута, увеличение концентрации носителей заряда сопровождается уменьшением их длины свободного пробега, обусловленной рассеянием носителей заряда на фононах. Это приводит к умень-

шению проявления классического размерного эффекта. Размеры кристаллитов в пленках висмута и сплавов висмут–сурьма в несколько раз больше толщины пленки, поэтому при уменьшении длины свободного пробега носителей заряда в первую очередь ослабляется проявление размерного эффекта, связанного с размерами кристаллитов. Это приводит к преобладанию дырочного вклада по сравнению с электронным вкладом в эффект Холла. На подложках с температурным расширением меньшим, чем у висмута, происходит уменьшение концентрации и увеличение длины свободного пробега носителей заряда, обусловленной рассеянием носителей заряда на фононах, и, как следствие, увеличение влияния размерного эффекта, что, в случае блочных пленок, приводит к преобладанию электронного вклада в эффект Холла.

Аналогичная ситуация и в пленках сплавов висмут–сурьма (рис. 6), где в монокристаллических пленках при отсутствии межблочных границ наблюдается увеличение относительного вклада дырок и переход коэффициента Холла в область положительных значений.

4. Заключение

В работе приведены результаты исследования удельного сопротивления, магнетосопротивления и коэффициента Холла в пленках висмута и сплавов $\text{Bi}_{100-x}\text{Sb}_x$ с концентрацией до 12 at.% Sb на подложках из материалов с различным температурным коэффициентом расширения. Установлено, что вид температурной зависимости исследованных электрических параметров тонкопленочных образцов в значительной степени определяется различием температурного расширения материала пленки и подложки. Деформация в системе пленка–подложка, возникающая вследствие различия ТКР пленки и подложки, приводит к изменению параметров зонной структуры вблизи уровня Ферми материала пленки, что вызывает изменение концентрации носителей заряда относительно объемного кристалла. Это изменение увеличивается с увеличением разности температуры пленки и температуры ее формирования. В пленках висмута и сплавов висмут–сурьма на подложках с ТКР меньшим, чем у висмута, концентрация носителей заряда меньше, чем в монокристалле, а на подложках с ТКР большим, чем у висмута, — больше, чем в монокристалле при той же температуре, которая ниже температуры формирования пленки.

Изменение концентрации носителей заряда сопровождается изменением их подвижности и длины свободного пробега, обусловленной рассеянием на фононах. Это вносит дополнительные изменения в свойства тонкой пленки вследствие изменения степени проявления классического размерного эффекта, связанного как с толщиной пленки, так и с размерами кристаллитов в блочных пленках.

Список литературы

- [1] D.L. Parrtin, J. Heremans, D.T. Morelli, C.M. Thrush, C.H. Olk, T.A. Perry. *Phys. Rev. B* **38**, 6, 3818 (1988).
- [2] Ramesh Chandra Mallik, V. Damodara Dasa. *J. Appl. Phys.* **98**, 023 710 (2005).
- [3] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi. *Phys. Rev. Lett.* **106**, 166 401 (2011).
- [4] Н.Б. Брандт, Е.С. Ицкевич, Н.Я. Минина. *УФН* **104**, 3, 459 (1971).
- [5] Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, Н.Я. Минина. *Письма ЖЭТФ* **26**, 3, 162 (1977).
- [6] Mei Lu, R.J. Zieve, A. van Hulst, H.M. Jaeger, T.F. Rosenbaum, S. Radelaar. *Phys. Rev.* **53**, 1609 (1996).
- [7] В.М. Грабов, В.А. Комаров, Н.С. Каблукова, Е.В. Демидов, А.Н. Крушельницкий. *Письма в ЖТФ* **41**, 1, 20 (2015).
- [8] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров. *ФТТ* **50**, 7, 1312 (2008).
- [9] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров, М.М. Климантов. *ФТТ* **51**, 4, 800 (2009).
- [10] В.А. Комаров, Е.В. Демидов, Е.Е. Христич, А.Н. Чичев. В сб.: *Термоэлектрики и их применения. Докл. XII Межгос. семинара. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб* (2010). С. 356–361.
- [11] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров. *ФТТ* **52**, 6, 1219 (2010).
- [12] Н.С. Каблукова, В.А. Комаров, Е.В. Демидов, Е.Е. Христич. *Изв. РГПУ им. А.И. Герцена*, **153**, 2, 13 (2012).