

УДК 539.261.1

Николаева А.А.^{1,2}, Конопко Л.А.^{1,2}, Хубер Т.Е.³,
Кобылянская А.К.¹, Пара Г.И.¹

¹ Институт электронной инженерии и нанотехнологий им. Д. Гицу, АНМ
ул. Академическая, 3/3, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова

² Международная лаборатория сильных магнитных полей
и низких температур, ул. Гаявицкая 95, Вроцлав, 53-421, Польша

³ Химический факультет, университет Говарда,
500, DC 20059, Вашингтон, США

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ ЛИФШИЦА, ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФОРМАЦИЕЙ РАСТЯЖЕНИЯ НА ТЕРМОЭДС И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОЛОК ВИСМУТА

В работе представлены результаты исследования влияния упругой деформации растяжения на термоЭДС и сопротивление монокристаллических проволок Bi в интервале температур 4.2 – 300 К. Монокристаллические проволоки Bi различного диаметра (70 и 320 нм) в стеклянной оболочке получались литьем из жидкой фазы методом Улитовского и согласно данным исследования рентгеновской дифракции имели одну и ту же ориентацию (1011) вдоль оси проволоки. Методом изучения осцилляций Шубникова де Гааза в проволоках чистого висмута и, легированного оловом, убедительно доказано, что точка смены знака термоЭДС на деформационных зависимостях термоЭДС $\alpha(\xi)$, совпадающая с положением максимума на деформационной кривой сопротивления $R(\xi)$ связана с электронным топологическим переходом, индуцированным упругой деформацией, при котором T-дырки в точке T-зоны Бриллюэна исчезают. Обсуждается вопрос повышения термоэлектрической эффективности проволок Bi при деформации в области высоких температур.

Ключевые слова: термоэлектричество, проволоки висмута, упругая деформация, осцилляции Шубникова де Гааза, квантовый размерный эффект, топологические переходы.

This paper reports on the effect of elastic deformation on the resistance and thermopower of bismuth nanowires at 4.2 – 300 K. Single-crystal Bi wires in a glass envelope of different diameters (70 and 320 nm) were prepared by high-frequency liquid phase casting. According to X-Ray diffraction, it has been established that all wires have the same orientation (1011) along the wire axis. Methods of investigation of Shubnikov de Haas oscillations in the pure and Sn-doped Bi wires have conclusively proven that the point of the thermopower sign inversion deformation dependence $\alpha(\xi)$, which coincides with the position of the maximum resistance in $R(\xi)$, is associated with an electronic topological transition induced by the elastic deformation in which the T holes in the Brillouin zone disappear. The effect of the enhancement the thermoelectric figure of merit of Bi wires under deformation at high temperature has been discussed.

Key words: thermoelectricity, bismuth wires, elastic deformation, Shubnikov de Haas, quantum size effect, topological transitions.

Введение

Высокий интерес к термоэлектричеству, обусловлен развитием новых концепций, теорий и нанотехнологий, открывающих новые пути повышения термоэлектрической эффективности как в наноструктурах, так и в нанотекстурированных материалах [1-4]. Термоэлектрическая эффективность определяется выражением: $Z = \alpha^2 \sigma / \chi$, где α – термоЭДС, σ – удельная проводимость, $\chi = \chi_e + \chi_p$, χ_p – теплопроводность решетки, χ_e – электронная теплопроводность.

Особый интерес привлекают квантовые нанопроволоки занимают нанопроволоки на базе висмута и его сплавов [1-3, 5], квантовые и классические размерные эффекты, наблюдающиеся в которых, открывают перспективы управления электронным и фононным транспортом посредством структурой инженерии. В работах [1-3] было показано возрастание термоэлектрической эффективности в размерноограниченных структурах и, в частности, в квантовых проволоках Bi . Возрастание Z может происходить за счёт квантового размерного эффекта, приводящего к переходу полуметалл-полупроводник при одновременном увеличении плотности состояний вблизи уровня Ферми, что в свою очередь приводит к существенному увеличению термоЭДС, в результате чего фактор мощности ($\alpha^2 \sigma$) возрастает по сравнению с массивными образцами. С другой стороны, рассеяние носителей и фононов на поверхности приведет к уменьшению теплопроводности, что также увеличивает Z . При этом необходимо, чтобы реализация механизма рассеяния фононов (ухудшающая эффективность) не препятствовала эффективному транспорту носителей заряда [6].

Известно, что малый диаметр нанопроволок приводит к эффективному рассеянию фононов поверхностью и гигантскому уменьшению теплопроводности [7, 8].

Экспериментальное исследование теплопроводности в нанопроволоках висмута было проведено в нескольких работах [5, 9, 10] с различной структурой и изготовленных различными способами. Как в монокристаллических, так и в поликристаллических нанопроволоках наблюдалось значительное подавление теплопроводности с уменьшением диаметра d . Кроме того, в монокристаллических проволоках Bi наблюдалась значительная анизотропия теплопроводности [10], превышающая значение в массивных образцах Bi . В работе [5] было показано, что в монокристаллических нанопроволоках Bi , выращенных в направлении [110] (т. е. перпендикулярно тригональной оси) теплопроводность в 4 раза меньше, чем в проволоках с направлением роста (102) и с уменьшением диаметра значительно уменьшается, что указывает на присутствие сильного рассеяния горячих носителей на поверхности.

Поиск материалов с высокой электропроводностью является задачей оптимизации и повышения термоэлектрической эффективности. Сложный подбор свойств может осуществляться на базе понимания взаимосвязи структуры и свойств полуметаллов и полупроводников различного свойства, с опорой на теоретические концепции физики конденсированного состояния.

Одним из возможных методов управления термоэлектрическими параметрами является упругое деформирование, при которой происходит существенное изменение топологии поверхности Ферми в Bi и его сплавах [11, 12, 13].

В работе [13] было показано, что упругая деформация в монокристаллических нанопроволоках Bi в стеклянной оболочке может достигать 2 – 3% относительного удлинения, что приводит к существенному изменению топологии поверхности Ферми (ПФ).

В данной работе представлены результаты исследования изменения проводимости и

термоЭДС при упругой деформации монокристаллических проволок Bi в стеклянной оболочке различных диаметров в интервале температур 4.2 – 300 К. Изменение топологии поверхности Ферми контролировалось с помощью регистрации осцилляций Шубникова де Гааза в нанопроволоках чистого и легированного оловом висмута.

Образцы и методика эксперимента

Нанопроволоки чистого висмута и висмута, легированного оловом, в стеклянной оболочке, получались литьем из жидкой фазы по методу Улитовского-Тейлора [13-16] и представляли собой монокристалл строго цилиндрической формы с диаметрами от 75 нм до нескольких мкм с ориентацией (1011) – вдоль оси проволоки (рис. 1).

Тестовые исследования с использованием рентгенограмм вращения субмикронных проволок Bi показали, что полученные нанопроволоки были монокристаллическими, как правило, одной и той же ориентации: ось проволоки совпадает с ΓL – направлением в приведенной зоне Бриллюэна, которое расположено в биссекторно-тригональной плоскости и составляет с биссекторной осью угол 19.5° (рис. 1).

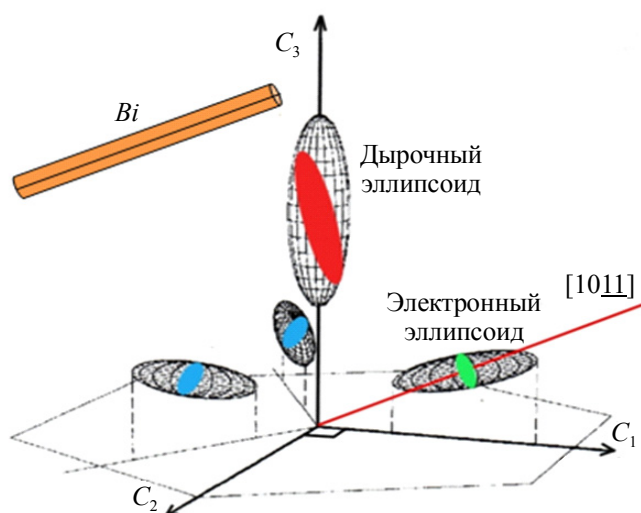


Рис. 1. Ориентация (1011) поверхности Ферми висмута относительно оси нанопроволоки.

При этом тригональная ось C_3 наклонена к оси нанопроволоки под углом в 70° , а одна из осей второго порядка C_2 перпендикулярна к ней.

Ориентация кристаллографических осей в проволоках Bi и его сплавах и совершенство структуры, подтверждались также исследованиями угловых диаграмм вращения поперечного магнитосопротивления, а также с помощью исследования осцилляций Шубникова де Гааза (ШдГ) [13-16].

Для исследований деформационных кривых сопротивления, и осцилляций ШдГ был сконструирован специальный держатель (рис. 2), позволяющий проводить исследования в интервале температур 4.2 – 300 К как по точкам, так и в автоматическом режиме при упругих растяжениях проволоки до 2 – 3% относительного удлинения в магнитных полях до 14 Тл [17].

При исследовании проволок под действием упругого растяжения проволока укреплялась на кольцо из бериллиевой бронзы диаметром ≈ 5 мм (рис. 2, а). Две контактные площадки из фольгированного медью стеклотекстолита размерами $2 \text{ мм} \times 1 \text{ мм} \times 0.5 \text{ мм}$, укрепленные на кольце на расстоянии 2 – 3 мм друг от друга, служили контактными площадками, на которых

крепился образец (1) и нагреватель (2) для создания градиента температуры при измерении термоЭДС. Градиент температуры поддерживался миниатюрной печкой и измерялся дифференциальной термопарой *Cu-Fe* (3). Все данные: сигнал с образца, температура, градиент температуры и расчетное значение термоЭДС выводились на компьютер и наблюдались в процессе измерений на мониторе. Вся конструкция – кольцо из бериллиевой бронзы с образцом помещалась в держатель (рис. 2, б).

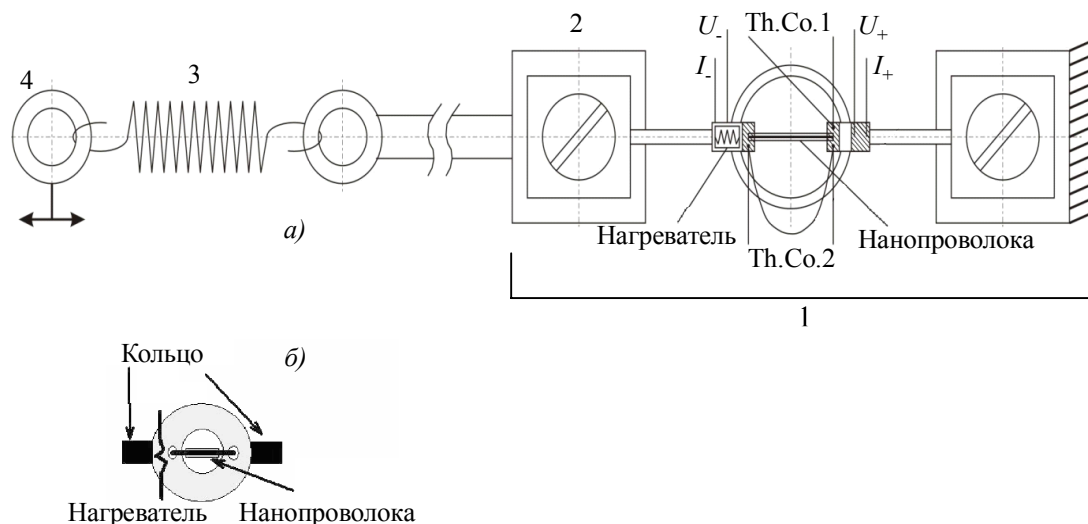


Рис. 2. а) – схема крепления образца на кольце из бериллиевой бронзы при измерениях кинетических свойств проволоки в условиях упругого растяжения.
 б) схема держателя для образца, позволяющий проводить исследования при упругом растяжении, в интервале температур 2 – 300 К. (1 – конструкция кольца из бериллиевой бронзы, ThCo 2 – дифференциальная термопара *CuFe*, 2 – шток, регулирующий напряжение от пружины к обойме, 3 – пружина, 4 – винт).

Один конец кольца (1) неподвижно закреплялся, а второй (2) соединялся с растягивающей подвижной частью. Перемещение винта (4) при его вращении передается свободному концу пружины, соединенной с бериллиевым кольцом, что приводит к изменению величины силового воздействия на кольцо из термически обработанной бериллиевой бронзы и, соответственно, к изменению величины деформации этого кольца, а также к изменению удлинения отрезка микропровода *Bi*, приклеенного к противоположным точкам бериллиевого кольца. Ось винта с помощью зубчатой передачи соединена с двигателем постоянного тока, а также соединена с многооборотным потенциометром. По изменению сопротивления потенциометра можно определить угол поворота винта и, соответственно, определить изменение удлинения образца. Такая схема позволила автоматизировать проведение эксперимента. В этом случае при включении двигателя программа выдает команду цифровым мультиметрам на измерение сопротивления потенциометра и на измерение сопротивления или термоЭДС образца, выводит на монитор кривую $R(\xi)$ или $\alpha(\xi)$ и записывает измеренные данные в файл.

Предварительно проводилась градуировка растягивающегося кольца от прилагаемого усилия под микроскопом при $T = 300$ К. Приведенная конструкция позволяла плавно растягивать образец до 2-3% относительного удлинения $\xi = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%$, где l_0 – длина образца до растяжения. Точность измерения растягивающего усилия, составляла ~2 %.

Особое внимание уделялось соблюдению условия упругого растяжения. С этой целью проводились многочисленные циклы растяжения, и оценивалась воспроизводимость результатов. Температурные зависимости сопротивления и термоЭДС как в отсутствие растяжения, так и при упругом растяжении проводились в автоматическом режиме на компьютеризованной установке в интервале температур 77 – 300 К в лаборатории физики и электроники полуметаллов ИЭИПТ АНМ, а в области 4.2 – 300 К в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (Вроцлав, Польша) в магнитных полях до 14 Тл.

Результаты и обсуждение

Проведены комплексные измерения температурных зависимостей сопротивления $R(T)$, термоЭДС $\alpha(T)$, а также деформационные зависимости сопротивления $R(\xi)$ и $\alpha(\xi)$ проволок Bi различных диаметров, в интервале температур 4.2 – 300 К.

Для однозначной интерпретации и регистрации изменения сечения поверхности Ферми от T дырок при упругой деформации использовались нанопроволоки, легированные акцепторной примесью Sn , в которых уровень Ферми смещается по шкале энергий вниз и концентрация T -дырок значительно возрастает. Это позволяло исследовать осцилляции ШдГ при упругой деформации на зависимостях $R(H)$, а не на производных $\partial R/\partial H(H)$, что значительно упрощало эксперимент.

Известно, что осцилляции ШдГ от T -дырок в продольной конфигурации $H \parallel I$ проволоках чистого Bi (при $\xi = 0$) видны только в сильных магнитных полях, на производных $\partial R/\partial H(P)$ как правило на проволоках, у которых продольное магнитосопротивление не насыщается в сильном магнитном поле, а начинает возрастать [18] при $H > 8 T$.

Отметим, что как было обнаружено ранее на проволоках с $d < 75$ нм наблюдался переход полуметалл-полупроводник, обусловленный квантовым размерным эффектом, который проявлялся в «полупроводниковом» характере зависимости $R(T)$, и сменой знака термоЭДС на $\alpha(T)$ [13-15, 19].

На рисунке представлены деформационные зависимости сопротивления R в зависимости от растяжения проволок Bi различных диаметров d при 4.2 К. Упругость процесса деформации (растяжения) подтверждались воспроизводимостью результатов при многочисленных циклах упругого растяжения. Для проволок Bi с $d \geq 90$ нм характерной особенностью является то, что в области низких температур (4.2 К) на деформационной кривой $R(\xi)$ имеется минимум при $\xi = 0.8 - 1.2\%$ в области электронного топологического перехода $3e^L + 1h^T \rightarrow 2e^L + 1h^T$, затем сопротивления резко возрастает в 2 – 4 раза и в области максимальных растяжений образуется аномальный максимум, после которого следовала область пластичности. Такая немонотонная зависимость сопротивления от растягивающего усилия характерна для всех проволок с $d > 90$ нм.

При диаметрах нанопроволоки менее 80 нм вид деформационных кривых при 4.2 К изменяется: максимум на $R(\xi)$ уменьшается и при диаметрах проволоки 60 – 45 нм деформационная кривая $R(\xi)$ имеет убывающий характер (рис. 3, кривая 1). Сопротивление $R(\xi)$ уменьшается на 20 – 30%. Такой вид деформационной кривой сопротивления $R(\xi)$ характерен для проволок висмута легированных Te (рис. 3, кривая 2), когда дырки в точке T не актуальны и проводимость определяется только L -электронами. Таким образом, этот факт является косвенным доказательством перехода полуметалл – полупроводник в проволоках Bi с $d < 80$ нм за счет квантового размерного эффекта.

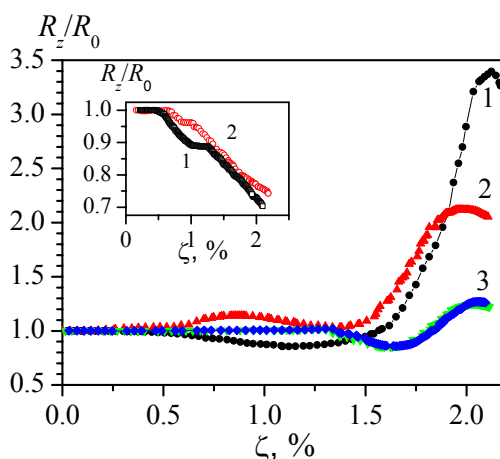


Рис. 3. Деформационные кривые $R(\xi)$ проволок Bi различных диаметров при $T = 4.2$ К. 1. $d = 300$ нм, 2. $d = 110$ нм, 3. $d = 80$ нм. На вставке: деформационные зависимости сопротивления $R(\xi)$ проволоки Bi (1), $T = 4.2$ К, $d = 50$ нм и (2) $Bi - 0.025$ ат% Te , $d = 200$ нм. Шкала для кривой 2 увеличена в 2 раза.

На рис. 4, 5 представлена трансформация деформационных кривых сопротивления $R(\xi)$ и термоЭДС $\alpha(\xi)$ проволок Bi с $d = 320$ нм, при возрастании температуры от 4.2 К до 300 К. Наблюдается постепенный переход от немонотонной зависимости $R(\xi)$ при 4.2 К к линейной зависимости (с двумя наклонами) уменьшения сопротивления с деформацией растяжения при температурах 250 – 300 К (рис. 4, кривая 9).

Чем меньше диаметр проволок d , тем при более высокой температуре происходит переход от немонотонной зависимости $R(\xi)$ к линейному уменьшению сопротивления с повышением температуры. Величина максимума сопротивления $R(\xi)$ и ход деформационной зависимости $R(\xi)$ существенным образом зависят от температуры T (рис. 4).

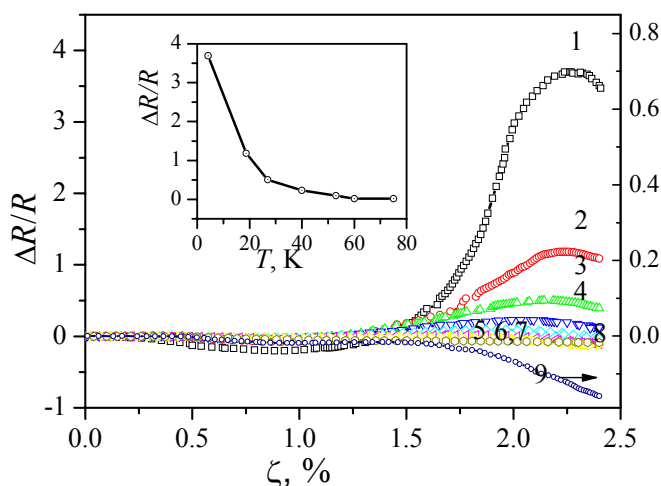


Рис. 4 Деформационные зависимости относительного сопротивления $\Delta R/R(\xi)$ проволоки Bi с $d = 320$ нм:
 1 – $T = 4.2$ К, 2 – $T = 18.7$ К, 3 – $T = 27$ К, 4 – $T = 40$ К,
 5 – $T = 53$ К, 6 – $T = 60$ К, 7 – $T = 75$ К, 8 – $T = 187$ К, 9 – $T = 203$ К.
 На вставке: зависимость величины максимума сопротивления $(\Delta R/R)_{\max}$ на деформационных зависимостях сопротивления от температуры T .

При повышении температуры величина максимума на деформационной кривой сопротивления существенно уменьшалась (рис. 4). Вставка на рис. 4 показывает экспоненциальный рост величины максимума с уменьшением температуры, что указывает на уменьшение концентрации носителей заряда.

На рис. 5 представлены деформационные зависимости термоЭДС проволоки Bi с $d = 320$ нм при различных температурах. Установлено, что с повышением температуры, смена знака термоЭДС смещается в область более слабых упругих деформаций (вставка на рис. 5).

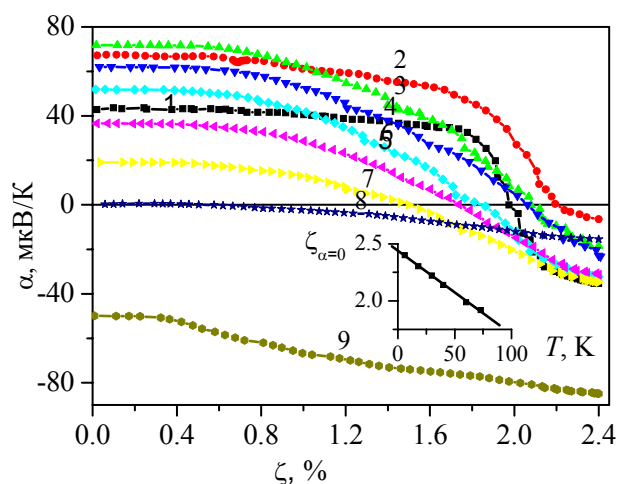


Рис. 5 Деформационные зависимости термоЭДС $\alpha(\xi)$ при различных температурах проволоки Bi с $d = 320$ нм: 1 – $T = 4.2$ К, 2 – $T = 18.7$ К, 3 – $T = 27$ К, 4 – $T = 40$ К, 5 – $T = 53$ К, 6 – $T = 60$ К, 7 – $T = 75$ К, 8 – $T = 187$ К, 9 – $T = 203$ К. На вставке: зависимость величины упругой деформации ξ , при которой термоЭДС изменяет знак при растяжении от температуры T .

Зависимость температуры смены знака термоЭДС с (+) на (-) на деформационных кривых термоЭДС $\alpha(\xi)$ носит почти линейный характер (вставка на рис. 5). Различные температурные зависимости аномалий сопротивления и термоЭДС служат доказательством того, что изменения сопротивления обусловлены иным механизмом, чем в случае термоЭДС, но оба факта указывают на уменьшение концентрации T -дырок при деформации растяжения проволок Bi с ориентацией (1011) вдоль оси.

На рис. 6, 7 представлены деформационные зависимости сопротивления и термоЭДС нанопроволок Bi с $d = 320$ нм и с $d = 75$ нм при различных температурах.

Как было показано в [12, 20], анизотропная деформация кристаллической решетки проволок Bi приводит к сильному неэквивалентному изменению объема отдельных частей поверхности Ферми, не вызывая при этом существенного изменения анизотропии и углов наклона у возрастающих электронных эллипсоидов.

Уменьшение сопротивления на $R(\xi)$ при деформации в области растяжений 0 – 1% и образование минимума при $\xi = 0.8 - 1.1\%$ объясняется с точки зрения электронного топологического перехода, при котором носители из электронного эллипсоида L_1 вытянутого вдоль оси проволоки с менее подвижными носителями перетекают в $L_{2,3}$ электронных эллипсоида с более подвижными носителями заряда вплоть до электронного топологического перехода $3L_e^L + 1L_h^T \rightarrow 2L_e^L + 1L_h^T$. Именно при этих значениях ξ на деформационной кривой сопротивления $R(\xi)$ при 4.2 К образуется минимум (рис. 6 а, б, в, г, д, е, рис. 7).

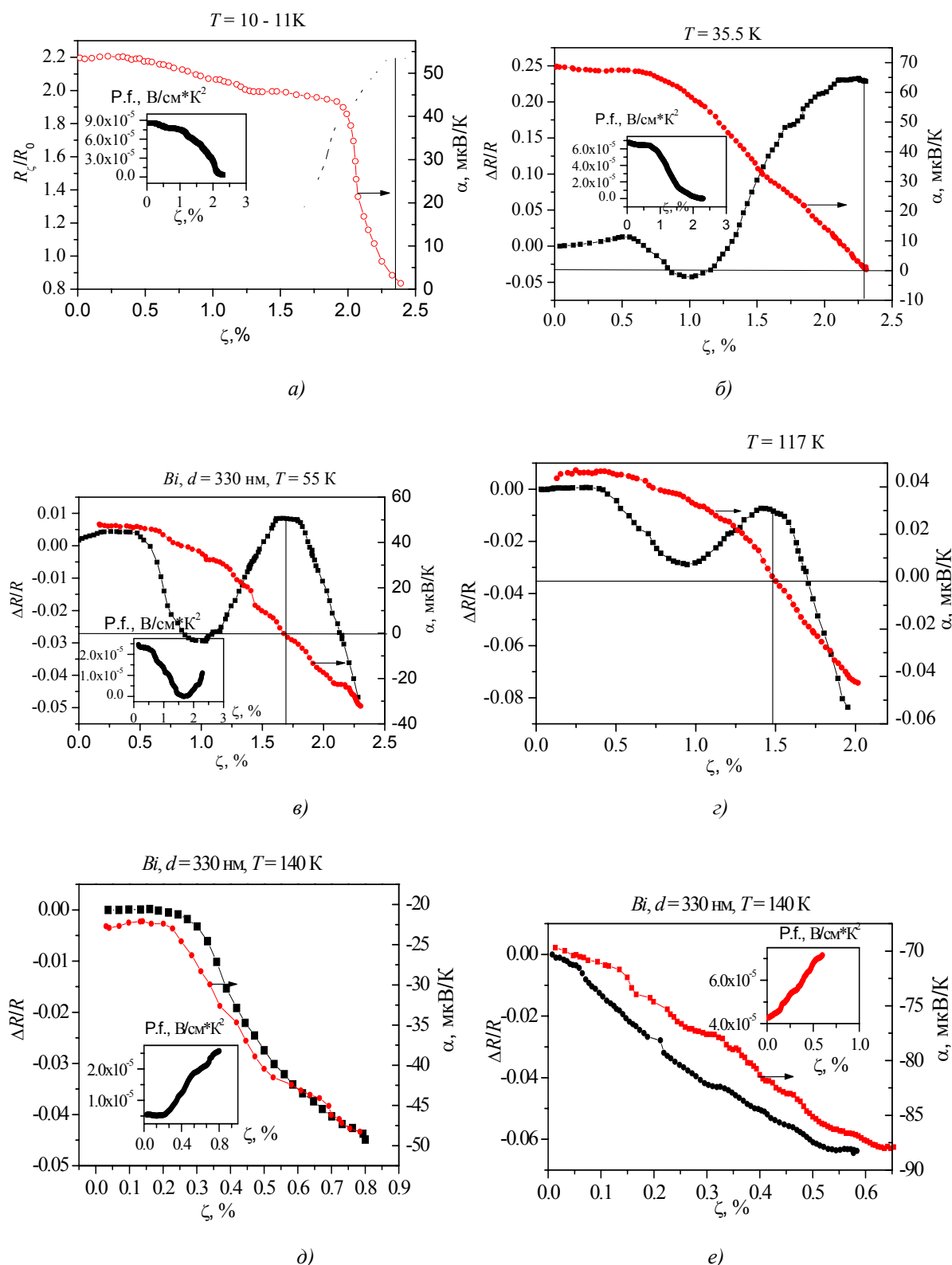


Рис. 6. Деформационные зависимости относительного сопротивления $\Delta R/R(\xi)$ и термоЭДС $\alpha(\xi)$ проволоки Bi, $d = 330$ нм при различных температурах:

а) $T = 11$ K, б) $T = 35.5$ K, в) $T = 55$ K,

г) $T = 117$ K, д) $T = 140$ K, е) $T = 300$ K.

На вставках – деформационные зависимости эффективности $\alpha^2\sigma$.

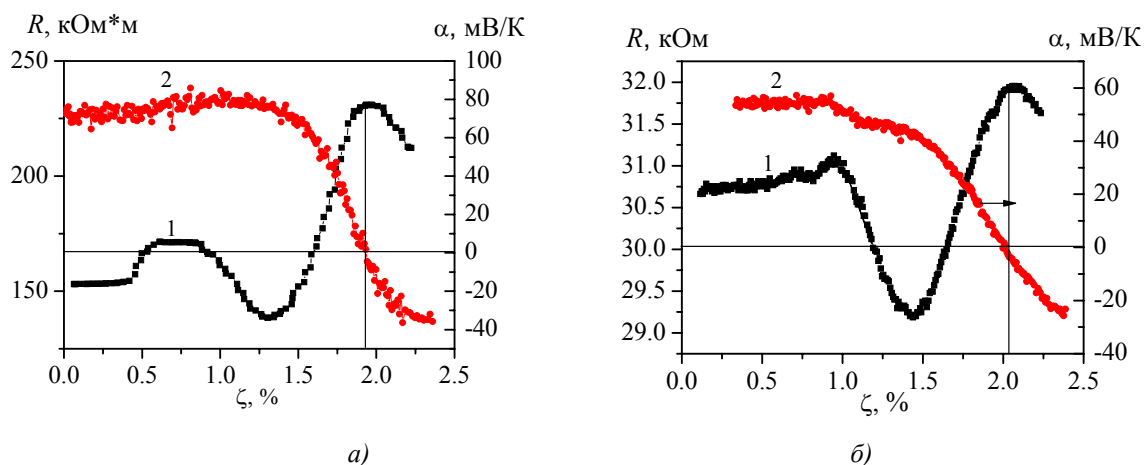


Рис. 7. Деформационные зависимости сопротивления $R(\xi)$ (1) и термоЭДС $\alpha(\xi)$ (2) в нанопроволоках Bi , $d = 7 \text{ нм}$, при различных температурах:
 а) $T = 4.2 \text{ K}$ (кривая 2 $T = 6.6 \text{ K}$); б) $T = 55 \text{ K}$.

Впервые на наличие перехода $3_{ee} + 1_h \rightarrow 2_{ee} + 1_h$ при анизотропной деформации массивных кристаллах Bi указано в работе [12, 20], а при растяжении вискеров в [21]. В области деформаций, предшествующих обращению S^e в нуль, концентрацию носителей L , в экстремуме столь мала, что вклад в электропроводность уже не наблюдается. В массивных образцах критическая деформация $\varepsilon_k \approx 0.5\%$, что хорошо согласуется с 0.4 у вискеров Bi [21]. Согласно оценкам, проведенным в [20] такой ЭТП должен происходить при $\xi = 0.4\%$.

При 200 K сопротивление уменьшается во всей области упругих растяжений, абсолютная величина $\Delta R/R$ в этой области температур $250 - 300 \text{ K}$ не более $10 - 15\%$. Температура, при которой происходит качественное изменение зависимости $R(\xi)$, зависит от диаметра проволок d . Немонотонная зависимость $R(\xi)$ наблюдается практически у нанопроволок всех исследуемых диаметров ($d > 80 \text{ нм}$) и сохраняется до температур $100 - 200 \text{ K}$, смещаясь с уменьшением диаметра в область более высоких температур.

Обращает на себя внимание тот факт, что максимум на деформационных кривых сопротивления при различных температурах совпадает с точкой смены знака термоЭДС с (+) на (-) на деформационных кривых термоЭДС (рис. 6 а – з, рис. 7).

Наиболее точная информация об изменении ПФ и ее изменении с деформацией решетки была получена из эффекта ШдГ.

Как уже упоминалось, осцилляции ШдГ от T -дырок (от сечения дырок, близкого к максимальному) обычно плохо видны на проволоках при $H \parallel I$ на $R(H)$, т.е. на продольном магнитосопротивлении, особенно если эллипсоид уменьшается при деформации, происходит быстрое падение амплитуды осцилляций. Однако, эксперименты на массивных образцах Bi при записи производных $\partial R/\partial H(H)$ как в перпендикулярных, так и параллельных магнитных полях показали, что при деформации растяжения вдоль биссекторной оси происходит уменьшение объема дырочного эллипсоида в точке T [12, 20]. Эксперименты на проволоках легированных акцепторной примесью Sn , когда уровень Ферми определяется по шкале энергий вниз, и концентрация T -дырок возрастает при легировании, приводит к проявлению ШдГ осцилляций от T -дырок на продольном магнитосопротивлении даже на $R(H)$ (рис. 8) и поэтому легко проследить за изменением периода осцилляций ШдГ от T -дырок (рис. 8) при деформации в проволоках с ориентацией (1011).

Для наглядности на рис. 8 приведены ШдГ осцилляции, на продольном магнитосопротивлении $R(H)$ проволоки $Bi - 0.07 \text{ ат\% } Sb$ при деформации растяжения. Вставка на рис. 8 показывает на уменьшение частоты ШдГ осцилляций от T -дырок $f = [\Delta(1/H)]^{-1} = \frac{S_{ex}c}{eh}$, где S_{ex} – экстремальное сечение ПФ перпендикулярно направлению магнитного поля (заштрихованная область сечения дырочного эллипсоида на рис. 1), что указывает на уменьшение объема поверхности Ферми T -дырок с растяжением вдоль направления (1011).

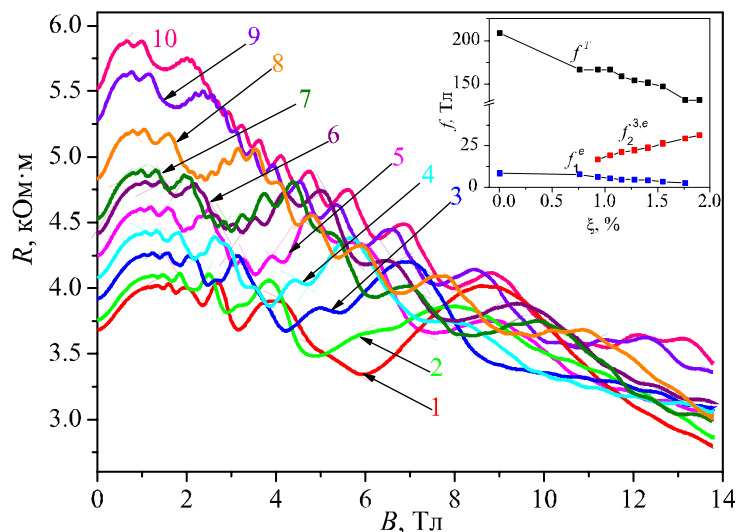


Рис. 8. Деформационные зависимости частот осцилляций ШдГ экстремальных сечений поверхности Ферми f_T -дырки в T , $f_h^{L2,3}$ и L_h^1 -дырочные эллипсоиды в точке L .

Оценка значения упругой деформации при которой произойдет исчезновение T -эллипсоида проводилась с учетом данных ШдГ осцилляций на массивных образцах Bi (метод экстраполяции до 2% относительного удлинения) дает значение $\xi = 1.2\%$, когда растягивающее усилие направлено вдоль оси C_1 . Учитывая, что ось проволок Bi отклонена на 20% от биссекторной оси C_1 и то, что топологический переход $3_3 + 1^h \rightarrow 2_{3,3} + 1^h$, происходит в проволоках Bi при значениях $\xi = 0.8 - 1\%$, т.е. в 2 раза больше, чем в массивных образцах Bi ($\xi_k = 0.4\%$), ориентированных вдоль C_1 , значение $\xi = 2.2\%$ относительного удлинения является реальным, указывающем на исчезновение T -эллипсоида в проволоках Bi в точке максимума на зависимости $R(\xi)$. Именно в этой точке и происходит смена знака термоЭДС с (+) на (-).

С точки зрения практических применений в термоэлектрическом аспекте интересно было проследить, в комплексе, изменение сопротивления $R(\xi)$, термоЭДС $\alpha(\xi)$ и $\alpha^2\sigma$ от упругой деформации растяжения в области температур 200 – 300 К. На рис. 6 а – е (вставки) приведены рассчитанные значения $\alpha^2\sigma$ в зависимости от растяжения проволоки Bi с $d = 320 \text{ нм}$ при различных температурах. Установлено, что рост P.f. происходит только в области температур, где сопротивление уменьшается, т.е. в области высоких температур. В области низких температур, где $R(\xi)$ носит немонотонный характер и эффективность $\alpha^2\sigma$ уменьшается. Одновременное уменьшение сопротивления и возрастание абсолютного значения термоЭДС при деформации растяжения в проволоках Bi в области высоких температур $T > 250 \text{ К}$ приводит к росту $\alpha^2\sigma$ в два раза (рис. 6, а), который достигает значения $7.2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см} \cdot \text{К}^2$ при

температурах 250 – 300 К, при $\zeta = 0.6\%$ для проволоки с $d = 330$ нм. Ограничение возрастания эффективности связано с ограничением области упругого растяжения проволок Bi до 1.5% в области температур $T > 250$ К.

Учитывая тот факт, что теплопроводность в нанопроволоках Bi с $d = 200$ нм при 300 К по крайней мере более, чем в 3 раза меньше [5, 10], чем в массивных образцах, следует ожидать значения ZT больше единицы при 300 К.

Выводы

Проведены комплексные исследования деформационных зависимостей сопротивления и термоЭДС монокристаллических проволок Bi , различных диаметров в стеклянной оболочке в интервале температур 4.2 – 300 К. Показано, что аномалии на деформационных зависимостях сопротивления $R(\xi)$ и термоЭДС $\alpha(\xi)$ соответствуют электронным топологическим переходам индуцированных деформацией.

Методом изучения осцилляций Шубникова де Гааза в проволоках как чистого, так и легированного акцепторной примесью висмута убедительно доказано, что точка смены знака термоЭДС на $\alpha(\xi)$, совпадающая с положением максимума на $R(\xi)$ в области низких связана с электронным топологическим переходом, индуцированным сильной до (6 ГПа) упругой деформацией, при которой дырки в точке T -зоны Бриллюэна становятся неактуальными. Наблюдается повышение термоэлектрической эффективности до $Z > 1$ в области 300 К при упругой деформации растяжения монокристаллических проволок Bi с ориентацией (1011) вдоль оси.

Работа выполнена при поддержке Институционального проекта 15.817.02.09А.

Литература

1. Hicks L. D., Dresselhaus M.S. Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor, Phys. Rev. B. 1993, v. 47, p. 16631-16634.
2. Lin Y.-M., Sun X., Dresselhaus M. S. Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires. Phys. Rev. B. 2000-I, v. 62, p. 4610-4623.
3. Heremans J. and Thrush C. M. Thermoelectric power of bismuth nanowires. Phys. Rev. B. 1999, v. 59, p. 12579-12583.
4. Saleh R, Thomas P, Zvyagin I.P. Internal currents in multi-layer structures. Superlattices Microstruct., 1991, v. 10(1), p. 59-62.
5. Heremans J. P. Low-Dimensional Thermoelectricity, Acta Physica Polonica. 2005, 108, p. 609-634.
6. Noals G.S., Poon J., Kanatzidis M.G. Recent developments in bulk thermoelectric materials. Mater. Res. Soc. Bull. 2006, v. 31, p. 199-205.
7. Ivanov Y.V. Ballistic thermoelectric transport in a lattinger liquid. J. Phys. Cond. Matter. 2010, v. 22, N24, p. 245602.
8. Weathers A., Shi L. Thermal Transport Measurement Techniques for Nanowires and Nanotubes. arXiv:1504.05128 [cond-mat.mes-hall], 20 Apr 2015.
9. Moore Arden L, Pettes Michael T., Zhou Feng, and Shi Li. Thermal conductivity suppression in bismuth nanowires. J. Appl. Phys. 2009, v. 106, p. 034310.
10. Jong Wook Roh, Kedar Hippalgaonkar, Jin Hee Ham, Renkun Chen, Ming Zhi Li, Peter Ercius,

- Arun Majumdar, Woochul Kim, and Wooyoung Lee. Observation of anisotropy in thermal conductivity of individual single-crystalline bismuth nanowires. *ACS Nano*, 2011, v. 5, nr. 5, p. 3954-3960.
11. Брандт Н.Б., Мюллер Р., Пономарев Я.Г. Исследование закона дисперсии носителей в висмуте, легированном примесями акцепторного типа. *ЖЭТФ* 1976, т. 71, № 6(12), с. 2268-2277.
 12. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Минина Н.Я., Широких В.Д. Изменение зонной структуры у Bi и $Bi_{1-x}Sb_x$ при деформациях типа одноосного растяжения. *ЖЭТФ*, 1980, т. 78, № 3, с. 1114-1131.
 13. Gitsu D., Konopko L., Nikolaeva A., Huber T. Pressure-dependent thermopower of individual Bi nanowires. *Appl. Phys. Lett.* 2005, v. 86, p. 10210.
 14. Brandt N.B., Gitsu D.V., Nikolaeva A.A. and Ponomarev Ya.G. Investigation of size effects in thin cylindrical bismuth single crystals in a magnetic field. *Zh. Exp. Teor. Fiz.*, 1977, v. 72, p.2332 [(Sov. Phys. JETP, 45 (6), 1977)].
 15. Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Tsurkan A.K., Huber T.E. Thermoelectric properties of single-crystal $Bi-Sn$ wires with different crystallographic orientation at elastic strains. *J. of Thermoelectricity* 2009, №3, p. 41-59.
 16. Nikolaeva A., Konopko L., Huber T., Para Gh., and Tsurkan A.. Effect of Weak and High Magnetic Fields in Longitudinal and Transverse Configurations on Magneto-Thermoelectric Properties Quantum Bi -wires. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014, v. 50, N1, p. 57-62.
 17. Бодюл П.П., Гарабаджиу В.Ф., Кондря Е.П., Николаева А.А. Способ создания упругого анизотропного деформирования монокристаллов в условиях их одноосного растяжения. Авт. Свид. № 48100511/9 от 30.01.91.
 18. Пара Г.И. Термомагнитные и термоэлектрические свойства нано и микронитей на основе полуметалла Bi . Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Кишинев, 2012 г., 197 с.
 19. Gitsu D. V., Huber T. E., Konopko L. A., and Nikolaeva A. A. Size Effects in Quantum Single Crystal Bismuth Wires in Glass Cover. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 2009, v. 4, Nr.1, p. 40-51.
 20. Брандт П. Б., Кульбачинский В. А., Минина Н.Я. Электронный фазовый переход 2,5 рода у Bi при: растяжении. *Физ. низких температур*, 1978, т.4, № 4, с. 527-530.
 21. Гайдуков Ю.П., Данилова Н.П., Щербина-Самойлова М.Б. Прочность и электрические свойства нитевидных кристаллов висмута.- *Физ. низких температур*, 1978, т. 4, № 2, с. 250-255.
 22. Редько Н.А. Теплопроводность сплавов на основе висмута в условиях комбинированного фонон-примесного рассеяния фононов. *Письма в ЖТФ*. 1990. – Т. 16. – № 22. – С. 52-56.

Поступила в редакцию 10.09.2015.