

Влияние упругой деформации на термоэдс и сопротивления нитей Bi с тригональной ориентацией

А. НИКОЛАЕВА^{1,2*}, Л. КОНОПКО^{1,2}, А. ЦУРКАН¹, Е. МОЛОШНИК¹

¹ Институт Электронной Инженерии и Нанотехнологий им. Д.Гицу, АНМ

² Международная Лаборатория Сильных Магнитных Полей и Низких Температур, Вроцлав, Польша
*a.nikolaeva@nano.asm.md

Абстракт - Исследовалось влияние упругой деформации растяжения на изменение сечений поверхности Ферми методом измерения ШдГ осцилляций, а так же на сопротивление и термоэдс в интервале температур 4.2 – 300 К в нитях чистого Bi в стеклянной оболочке с тригональной ориентацией вдоль оси.

Нити Bi с тригональной ориентацией вдоль оси нити получались методом перекристаллизации с затравкой нитей Bi в стеклянной оболочке, изготовленных методом литья из жидкой фазы, с диаметрами от 0.5 до 50 мкм. Монокристалличность и ориентация нитей надежно установлено с помощью рентгено-дифрактометрическим метода, угловых диаграмм вращения поперечного магнитосопротивления и Шубников де Гааз осцилляций. Методом изучения ШдГ осцилляций установлено, что при упругой деформации типа одноосного растяжения нитей Bi с тригональной ориентацией сечение поверхности Ферми Т-дырок возрастает в 2.5 раза, проявляя линейную зависимость от деформации растяжения до 1.8%.

Показано, что сопротивление нитей уменьшается при деформации растяжения, во всей области температур, отражая факт роста перекрытия L и T зон, а термоэдс имеет температурную границу начиная с которой деформационная кривая термоэдс меняется качественно, что связано с проявлением эффекта фононного увлечения в области низких температур.

Ключевые слова – нити Bi , топологические переходы, деформация, термоэдс

I. ВВЕДЕНИЕ

Гидростатическое и анизотропное деформирование массивных монокристаллических образцов интенсивно применялось для изучения различных видов электронных топологических переходов Лифшица [1].

При гидростатическом сжатии Bi симметрия кристаллической решетки не изменяется и все 3 электронных "эллипсоида" уменьшаются одинаковым образом [2, 3]. Известно, что сжатие Bi вдоль тригональной оси качественно аналогично изменению поверхности Ферми при всестороннем сжатии и вытекает из соображения симметрии. В обоих случаях наблюдается эквивалентное уменьшение всех трех L электронных эллипсоидов и соответствующее уменьшение дырочного T – эллипсоида вследствие уменьшения перекрытия L и T – термов. [2, 4] В предельном случае должен произойти переход полуметалл-полупроводник, сопровождающийся стягиванием в точку электронных эллипсоидов и дырочной поверхности Ферми.

В работе [5] методом измерения ШдГ осцилляций при сжатии Bi вдоль оси C_3 было показано, что все электронные сечения уменьшаются в одинаковом процентном отношении, а скорость $\frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \sigma}$ изменения

сечения $\frac{\Delta S}{S_0}$ почти в 3 раза выше, чем при

всестороннем сжатии. Максимальная величина наблюдаемого изменения $\frac{\Delta S}{S_0} \approx -22\%$ при нагрузке ~

1000 кг/см², что превосходит величину достигнутого в эффекте всестороннего сжатия наблюдаемого в [6] в 4 раза, т.е. одноосное воздействие на энергетический спектр более значительно. В случае линейной зависимости энергии перекрытия от деформации $\varepsilon_o(\sigma)$ снятие перекрытия энергетических зон и переход в полупроводниковое состояние у Bi должен произойти при нагрузках $\sigma \sim 9 \cdot 10^3$ кг/см².

Известно, что нити Bi в стеклянной оболочке с стандартной ориентацией (10 $\bar{1}$ 1) вдоль оси при 4.2 К выдерживают упругие деформации до 2% относительного удлинения, что соответствует нагрузке ~ 6500 кг/см² [7, 8], что почти на порядок больше чем в экспериментах проведенных на массивных образцах висмута [2-4]. Это позволило надеяться, что нити Bi с тригональной ориентацией можно будет упруго деформировать также до 1.5-2% относительного удлинения.

II. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ. ОБРАЗЦЫ.

Тонкие монокристаллические нити Bi в стеклянной оболочке с стандартной ориентацией (10 $\bar{1}$ 1) вдоль оси

нити получались литьем из жидкой фазы по методу Улитовского. Для получения нитей с тригональной ориентацией использовался метод горизонтальной зонной перекристаллизации с затравкой. Затравка представляет собой монокристалл, вырезанный из слитка с соответствующей кристаллографической ориентацией. После чего в откаченной и отпаянной на одном конце ампуле стыковались нити в стеклянной оболочке с блоками с тригональной осью C_3 направленной вдоль блока. Ампула вставлялась в автоматизированную микропроцессорную установку для перекристаллизации нитей в стеклянной изоляции, и подключался необходимый режим. С помощью этого метода были получены нити с $d = 0.5 \div 50$ мкм. Определение ориентации образцов производилась с помощью угловых диаграмм вращения поперечного магнитосопротивления ($B \perp I$) в магнитных полях 0 – 14 Т при температурах 300 – 4.2 К, осцилляций Шубникова де Газа и рентгено-дифрактометрическим методом (X-ray diffraction method). Диаграммы вращения поперечного магнитосопротивления нитей Vi с ориентацией C_3 вдоль оси приведены на рис. 1.

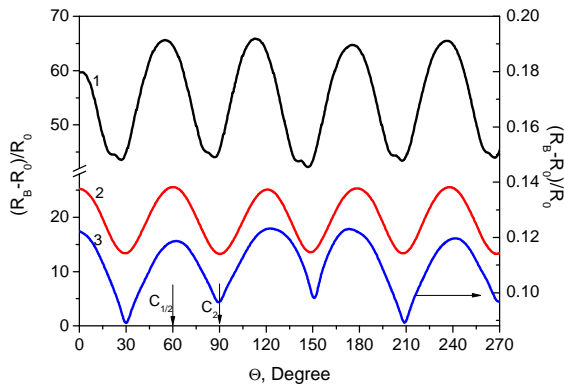


Рис. 1 Диаграммы вращения поперечного магнитосопротивления $(R_B - R_0)/R_0(\theta)$ нитей Vi с тригональной ориентацией различных диаметров: 1. $d = 54$ мкм, $B = 0.5$ Т, $T = 4.2$ К; 2. $d = 5.3$ мкм, $B = 0.5$ Т, $T = 101.5$ К; 3. $d = 0.55$ мкм, $B = 0.2$ Т, $T = 2.1$ К.

В эксперименте с растяжением геометрия эксперимента следующая: ток $I \parallel C_3$, магнитное поле $B \parallel I$, растягивающее усилие также направленно вдоль оси нити, т.е. вдоль оси C_3 . Т.о. приложенная нагрузка вдоль оси C_3 в данном случае противоположена сжатию вдоль C_3 , проведенному в работах [2-4].

Проводилось две серии измерений. В первой серии измерений при фиксированных значениях упругой деформации $\Delta l/l$ снимались магнитополевые зависимости сопротивления $R(B)$ содержащие осцилляции ШдГ при 4.2 К. Последовательное увеличение $\Delta l/l$ позволяло следить за изменением периода квантовых осцилляций ШдГ, т.е. за изменением сечения поверхности Ферми.

Во второй серии измерений исследовались деформационные зависимости сопротивления $R(\xi)$ и термоэдс $\alpha(\xi)$ ($\xi = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l}$, l_0 – длина нити до деформации) при определенных значениях температуры в отсутствии магнитного поля. Запись

зависимостей $R(\xi)$ и $\alpha(\xi)$ проводились в автоматическом режиме. При этом особое внимание уделялось воспроизводимости наблюдаемых явлений для исключения процессов перехода в пластическую область деформаций.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУСИЯ

Для оценки изменения сечения поверхности Ферми при упругом растяжении нитей с тригональной ориентации измерялось продольное магнитосопротивление $B \parallel I \parallel C_3$ при 4.2 К в магнитных полях до 14 Т.

Характерные осцилляционные зависимости $R(B)$ при температуре 4.2 К и различных значениях относительного удлинения $\xi = \frac{\Delta l}{l}$ выраженного в % приведены на рис. 2.

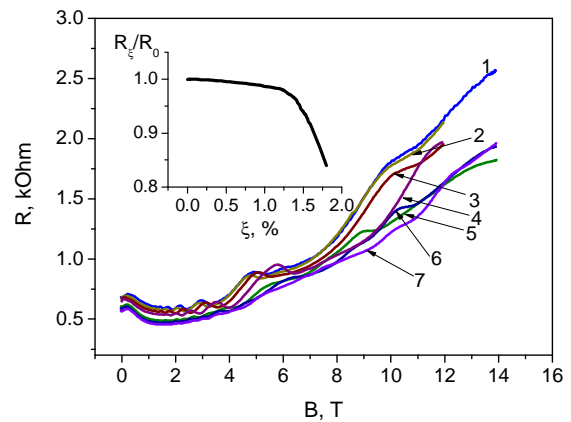


Рис. 2 Полевые зависимости продольного магнитосопротивления $R(B)$ нити Vi с тригональной ориентацией с $d = 0,55$ мкм при разных значениях упругой деформации: 1. $\xi = 0$, 2. $\xi = 0,8\%$, 3. $\xi = 1\%$, 4. $\xi = 1,2\%$, 5. $\xi = 1,4\%$, 6. $\xi = 1,6\%$, 7. $\xi = 1,8\%$ относительного удлинения. На вставке деформационная зависимость сопротивления $R(\xi)$ при $T = 4.2$ К.

Зависимости $R(B)$ носят ярко выраженный осцилляционный характер при всех значениях упругой деформации. Монотонная составляющая сигнала $R(B)$ и амплитуда осцилляций ШдГ слабо меняются при деформации. Во всей области магнитных полей наблюдался только один период ШдГ осцилляций как при $\xi = 0$, так и при $\xi = 1.6\%$ от Т – дырок. При расчете периода и частоты ($f = 1/\Delta(B^{-1})$) ШдГ осцилляций учитывались осцилляции вдали от поля квантового предела.

На рис. 3 приведены зависимости квантового номера n осцилляций ШдГ от обратного поля B^{-1} .

Изменение частоты осцилляций $f(\xi)$ от растяжения приведены на вставке рис. 3. С увеличением деформации четко прослеживается уменьшение периода ШдГ осцилляций и уменьшение сопротивления в сильном магнитном поле.

Период осцилляций $\Delta(B^{-1}) = \frac{2\pi e \hbar}{c S_{extr}}$. Зная период ШдГ осцилляций, определялось соответствующее ему

экстремальное сечение поверхности Ферми:

$$S_{extr} = \frac{2\pi e\hbar}{c \cdot \Delta(B^{-1})}$$

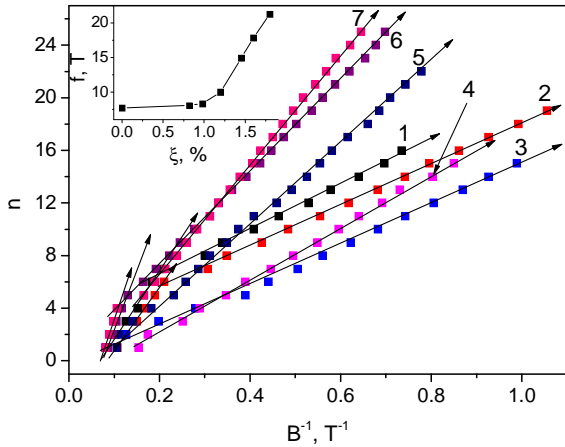


Рис. 3 Зависимости квантового номера n осцилляций ШдГ от обратного магнитного поля B^{-1} нити Вi с тригональной ориентацией, $d = 0.55$ мкм при разных значениях упругой деформации: 1. $\xi = 0$, 2. $\xi = 0,8\%$, 3. $\xi = 1\%$, 4. $\xi = 1,2\%$, 5. $\xi = 1,4\%$, 6. $\xi = 1,6\%$, 7. $\xi = 1,8\%$ относительного удлинения. На вставке деформационная зависимость частоты $f(\xi)$ осцилляций ШдГ.

Возрастание частоты осцилляций ШдГ отражает факт роста сечения поверхности Ферми T – дырок при упругой деформации растяжения ≈ 2.5 раза и т.о. подтверждает факт увеличения перекрытия L и T зон при растяжении нитей Вi вдоль оси третьего порядка C_3 .

На рис. 4 и 5 приведены деформационные зависимости относительного сопротивления $R_{\xi}/R_0(\xi)$ и термоэдс $\Delta\alpha(\xi)$ при различных температурах.

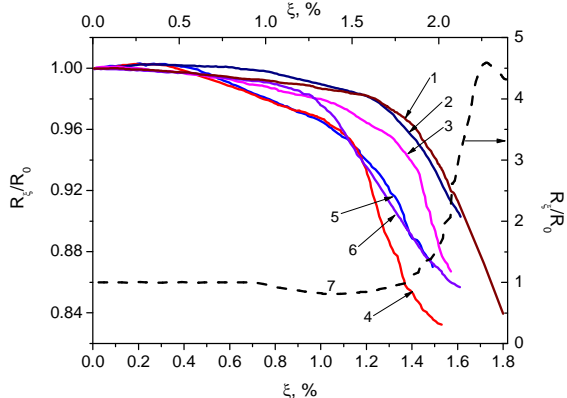


Рис. 4 Деформационные зависимости приведенного сопротивления $R_{\xi}/R_0(\xi)$ нити Вi с тригональной ориентацией, $d = 0.55$ мкм при разных значениях температуры: 1. $T = 4.2$ К, 2. $T = 13$ К, 3. $T = 56$ К, 4. $T = 86$ К, 5. $T = 93$ К, 6. $T = 170$ К. Кривая 7 (шкала справа) $R_{\xi}/R_0(\xi)$ нити Вi с стандартной (1011) ориентацией $d = 0.32$ мкм при $T = 4.2$ К.

Сопротивление $R(\xi)$ уменьшается с деформацией растяжения во всей области исследуемых температур (4.2 – 300 К). На деформационных зависимостях $R(\xi)$ наблюдаются 2 участка – слабого (до 1% относительного удлинения) и сильного изменения $R(\xi)$ при $\xi > 1\%$. Отметим, что аналогичные деформационные зависимости $R(\xi)$ наблюдались и в нитях Вi с стандартной (1011) ориентацией только в области высоких температур [8, 9].

При 4.2 К характер деформационной зависимости $R(\xi)$ нитей Вi с стандартной ориентацией, существенно отличается и носит немонотонный характер (кривая 7, пунктирная кривая на рис. 4), отражая факт неэквивалентного смещения электронных эллипсоидов в точке L зоны Бриллюэна при одноосной упругой деформации.

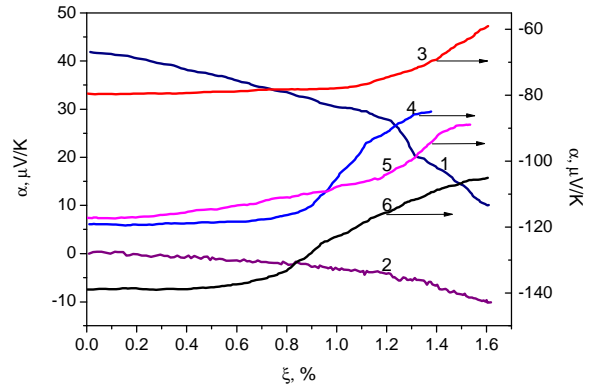


Рис. 5 Деформационные зависимости термоэдс $\alpha(\xi)$ нити Вi с тригональной ориентацией, $d = 0.55$ мкм при разных значениях температуры: 1. $T = 13$ К, 2. $T = 20$ К, 3. $T = 55$ К, 4. $T = 86$ К, 5. $T = 93$ К, 6. $T = 170$ К.

На деформационных зависимостях $\alpha(\xi)$ происходит качественное изменение термоэдс от деформации в области температур < 15 К, где термоэдс меняет знак с отрицательного на положительный. В области температур 4.2 – 15 К, где α имеет положительное значение, термоэдс уменьшается с увеличением упругой деформации (кривые 1, 2 рис. 5), как и в нитях Вi с стандартной ориентацией, отражая факт усилия электронного вклада в термоэдс.

В области высоких температур ($T > 15$ К), где α отрицательно, с растяжением возрастает положительный вклад в термоэдс (α уменьшается по абсолютному значению) (кривые 3, 4, 5 рис. 5).

Было обнаружено, что скорость возрастания сечения поверхности Ферми $\frac{\Delta S}{S \cdot \Delta \xi} \sim \frac{\Delta f}{f \cdot \Delta \xi}$, немонотонно

зависит от деформации (вставка на рис. 3). В случае линейности $f(\xi)$ (в области до 1% растяжения) данные довольно хорошо согласуются с данными работы [2] по одноосному сжатию Вi в тригональном направлении с учетом того, что воздействие сжатия на поверхность Ферми противоположено растяжению и что предел упругого сжатия в массивных образцах висмута не превышал 0.3%.

Приведенные в работах [10, 11] расчеты, показывают, что сечения поверхности Ферми должны меняться линейно с нагрузкой. Линейные уменьшения

сечения поверхности Ферми с нагрузкой наблюдались и в Bi и в InSb, HgSe [10, 11]. Однако пределы упругих деформаций не превосходили 0.1 – 0.3% относительного удлинения.

Наблюдаемые нелинейности в изменении сечений поверхности Ферми при упругих деформациях обычно связывались либо с топологическими переходами Лифшица, либо полиморфическим превращением [6], либо с неточностью эксперимента, особенно при слабых ($\xi < 0.1\%$) деформациях. Возможно, что такая нелинейность может быть связана с сильной непараболичностью спектра в точке L зоны Бриллюэна.

В данном случае упругая деформация растяжения нитей Bi вдоль оси C_3 приводит только к усилению перекрытия L и T зон. Отсутствие особенностей на термоэдс $\alpha(\xi)$ исключает топологическую особенность из-за типа появления Σ – зоны.

Качественные различия в деформационных зависимостях термоэдс $\alpha(\xi)$ в области низких ($T < 10$ K) и высоких температур связано с эффектом фононного увлечения [12]. Известно, что эффект фононного увлечения в Bi начинает проявляться при $T < 10$ K (смена знака) и уменьшается при возрастании концентрации носителей заряда, а т.к. при деформации растяжения концентрация возрастает, то такое поведение $\alpha(\xi)$ при $T < 10$ K является очевидным.

Для однозначной интерпретации нелинейной зависимости частоты ШдГ осцилляций $f(\xi)$ необходимо провести дополнительные исследования ШдГ осцилляций и изменения их в различных кристаллографических направлениях при деформации растяжения вдоль оси C_3 .

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данная работа была выполнена при поддержке билатерального проекта Молдова-Беларусь 13.820.05.12/BF.

REFERENCES

[1] Лифшиц И.М. Об аномалиях электронных характеристик металлов в области больших давлений. ЖЭТФ, т. 38(5), с. 1569-1576, 1960.

- [2] Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Минина Н.Я. Изменение энергетического спектра Bi при сильном одноосном сжатии. ФТТ, т. 18, № 7, стр. 1829-1823, 1976.
- [3] Bate R.T., Einspruch N.G. Evidence for band deformation in uniaxially stressed bismuth. Phys. Lett. v. 16(1), pp. 11, 1965.
- [4] Брандт Н.Б., Рябенко Г.А. Исследование влияния одноосного сжатия на квантовые осцилляции магнитной восприимчивости висмута. ЖЭТФ, т. 37, № 2, стр. 389-391, 1959.
- [5] Минина Н.Я. Перестройка энергетического спектра и электронные топологические переходы при сильных анизотропных деформациях у полуметаллов V группы и их сплавов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 1989.
- [6] Ицкевич Е.С., Фишер Л.М. Эффект Шубникова-де Гааза в висмуте под давлением 15 кбар. ЖЭТФ, т. 53, вып. 1(7), с. 98-104, 1967.
- [7] Способ упругого анизотропного деформирования монокристаллов. Авторское свидетельство №1749759. 22.03.1992. Бодол П.П., Николаева А.А. и др.
- [8] Gitsu D., Konopko L., Nikolaeva A. and Huber T. Pressure dependent thermopower of individual Bi nanowires. Appl. Phys. Lett., vol. 86, pp. 10210, 2005.
- [9] Пара Г. Термомагнитные и термоэлектрические свойства нано и микронитей на основе полуметалла Bi. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Кишинев, 2012. 197 стр.
- [10] Seiler D.G., Hathcox K.L. Phys. Rev., vol. 139(2), p. 648, 1974.
- [11] Seiler D.G., Hathcox K.L. Phys. Rev. Lett., vol. 29(10), p. 647, 1972.
- [12] Gitsu D.V., Huber T.E., Konopko L.A., Nikolaeva A.A., Bondarchuk N.F. Thermoelectric properties of Bi and Sb microwires at helium temperatures. J. of Thermoelectricity, № 2, p.54-60, 2007.