

# Изменение поверхности Ферми при упругой деформации нитей $\text{Bi-0,07at\%Sn}$

Николаева А.А.<sup>1,2</sup>, Конопко Л.А.<sup>1,2</sup>, Цуркан А.К.<sup>1</sup>, Бурджуа Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Инженерии и Нанотехнологий им. Д.Гицу  
г. Кишинев, Молдова

<sup>2</sup>Международная Лаборатория Сильных Магнитных Полей и Низких Температур  
г. Вроцлав, Польша  
A.Nikolaeva@nano.asm.md

**Abstract** — Исследовано влияние одноосной упругой деформации на сечение поверхности Ферми (ПФ) L- и T-дыроч в нитях  $\text{Bi-0,07at\%Sn}$ , методом изучения осцилляций Шубникова де Гааза (ШДГ). Монокристаллические нити  $\text{Bi-0,07at\%Sn}$  в стеклянной оболочке с ориентацией 1011 вдоль оси нити, получались литьем из жидкой фазы по методу Улитовского-Тейлора. Показано, что при упругой деформации осуществляется электронный топологический переход, при котором два эквивалентно расположенных по отношению к оси нити дырочных «эллипсоидов»  $L_{2,3}$  исчезают, и проводимость осуществляется дырками из  $L_1$  и T- «эллипсоидов», расположенных в точках L и T зоны Бриллюэна.

**Ключевые слова** — монокристаллические нанонити, упругая деформация, топологический переход, ШДГ осцилляции.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Комбинированное воздействие на энергетический спектр легирования и деформации позволяют изменять энергетический спектр носителей заряда в широких пределах. При этом каждый из способов может изменять энергетический спектр в определенных пределах. При легировании возможное изменение спектра ограничивается сильным уменьшением времени релаксации носителей заряда, а в деформационных исследованиях имеется ограничение на предел упругого деформирования кристалла.

Роль деформационных эффектов в изучении энергетического спектра металлов и сплавов является определяющим, что связано с тем, что в отличие от метода легирования, деформация осуществляется на одном и том же образце, при многократных циклах упругой деформации, в то время как, при легировании и работе с образцами различного состава всегда имеется элемент неопределенности, связанный с сменой объекта исследования. Действие деформации на энергетический спектр более определенный. Наиболее эффективным для наблюдений качественной перестройки энергетического спектра являются сильные анизотропные упругие деформации [1, 2]. Определенную роль играют вопросы непрерывного изменения параметра воздействия на монокристалл, полной обратимости и воспроизводимости результатов. Существенно также, чтобы метод позволял

одновременно следить за изменением топологии поверхности Ферми.

Известно, что деформация висмута вдоль различных кристаллографических направлений приводит к изменениям поверхности Ферми (ПФ) разных знаков [3, 4]. Любая деформация за исключением вдоль тригональной оси (111) приводит к понижению симметрии решетки Bi и различному изменению трех эквивалентных «эллипсоидов» ПФ, по-разному расположенных относительно оси приложения нагрузки, т.е. для каждого направления существует, по крайней мере, две группы различно изменяющихся с деформацией ПФ [5].

Наиболее перспективным объектом для изучения изменения ПФ при одноосных деформациях являются монокристаллические нити на базе полуметаллов в стеклянной оболочке, т.к. область их упругой деформации составляет  $\approx 2\div 2,5$  относительного удлинения [6, 7], что превышает значения в массивных образцах на порядок.

Наибольшей информативностью для исследования энергетического спектра носителей заряда и зонной структуры в полуметаллах обладают квантовые осцилляционные эффекты типа ШДГ осцилляций.

В данной работе исследовались ШДГ осцилляции при упругой деформации растяжения до 2% нитей  $\text{Bi-0,07at\%Sb}$ , у которых уровень Ферми расположен в зоне легких L дыроч и тяжелых T дыроч зоны Бриллюэна (Рис. 1).

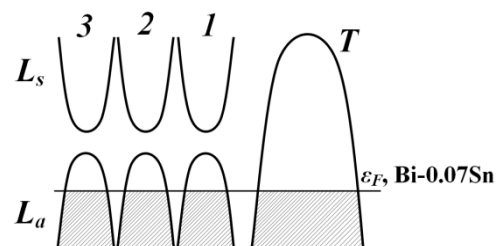


Рис. 1. Зонная структура и расположение уровня Ферми в нитях  $\text{Bi-0,07at.\%Sn}$ .

## II. ОБРАЗЦЫ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Монокристаллические нити в стеклянной оболочке получались литьем из жидкой фазы по методу Улитовского [7, 8]. В качестве исходного материала служил монокристаллический слиток синтезированного

сплава Bi-0,07at%Sn, полученного методом зонной перекристаллизации. Тонкие нити Bi-0,07at%Sn, в стеклянной оболочке, с диаметрами от 200 нм до 1 мкм, полученные литьем из жидкой фазы, обычно имеют одну и ту же кристаллографическую ориентацию (1011) вдоль оси нити.

Определение ориентации образцов производилась с помощью угловых диаграмм вращения поперечного магнетосопротивления (УДВПМ) ( $B \perp I$ ) в магнитных полях 0–14 Т при температурах 300–4,2 К и осцилляций Шубникова де Газа. Контрольные измерения на отдельных образцах были проведены рентгено-дифрактометрическим методом (X-ray diffraction method).

При исследовании нитей под действием упругого растяжения нить укреплялась на кольцо из бериллиевой бронзы диаметром  $\approx 5$  мм (Вставка в центре на Рис.2).

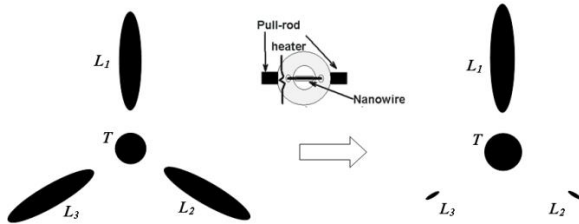


Рис. 2. Изменение формы поверхности Ферми у нити Bi-0,05at%Sn с стандартной ориентацией (1011) при растяжении вдоль оси нити.

Две контактные площадки из фольгированного медью стеклотекстолита размерами 2 мм x 1 x 0,5 мм укрепленные на кольца на расстоянии 2-3 мм друг от друга служили контактными площадками на которые крепилась нить. Все данные: сигнал с образца, температура, магнитное поля выводились на компьютер и наблюдались в процессе измерений на мониторе. Вся конструкция – кольцо из бериллиевой бронзы с образцом помещалась в держатель, который погружался в дьюар с He.

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

Особое внимание уделялось соблюдению условия упругого растяжения. С этой целью проводились многочисленные циклы растяжения, и оценивалась воспроизводимость результатов. Температурные зависимости сопротивления, магнетосопротивления, ШдГ осцилляции в отсутствие растяжения, так и при упругом растяжении проводились в автоматическом режиме на компьютеризованной установке в интервале температур 4,2 – 300 К в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (Вроцлав, Польша).

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Проводились две серии измерений. В первой из них снимались температурные зависимости сопротивления

$R(T)$  нитей Bi-0,07at%Sn различных диаметров, в интервале температур 4,2-300 К (Рис. 3), а также полевые зависимости продольного ( $H \parallel I$ ) и поперечного ( $H \perp I$ ,  $H \parallel C_2$ ,  $H \perp I$ ,  $H \parallel C_3$ ) магнетосопротивления, в отсутствие растяжения. (Рис. 4) Температурные зависимости сопротивления  $R(T)$  различных диаметров носят «металлический» характер, проявляя «размерную» зависимость в смещении максимума на  $R(T)$  в область высоких температур и с уменьшением отношения  $R_T/R_{300}$  при 4,2 К с уменьшением диаметра нитей  $d$  (Рис. 3).

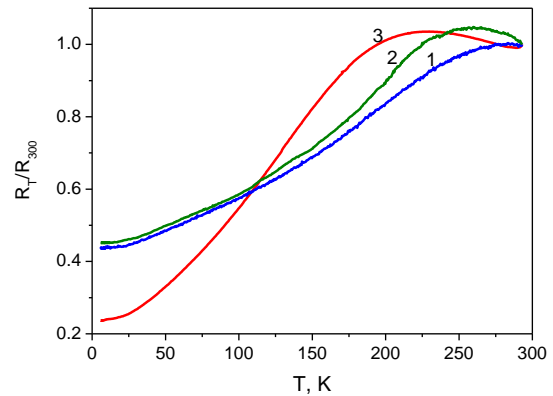


Рис. 3. Температурные зависимости относительного сопротивления  $R_T/R_{300}(T)$  нитей Bi-0,07at%Sn различных диаметров: 1.  $d = 0.2$  мкм, 2.  $d = 0.3$  мкм, 3.  $d = 1.5$  мкм.

Как видно из Рис. 4, полевые зависимости  $R(H)$  носят ярко выраженный осциллирующий характер во всех главных кристаллографических направлениях.

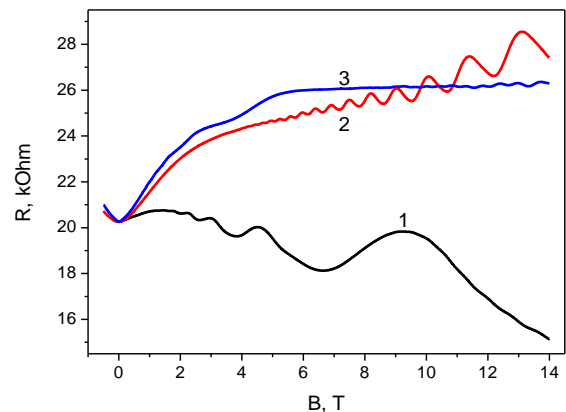


Рис. 4. Полевые зависимости продольного ( $B \parallel I$ ) (1), поперечного ( $B \perp I$ ,  $B \parallel C_3$ ) (2) и ( $B \perp I$ ,  $B \parallel C_2$ ) (3) магнетосопротивления нити Bi-0,07at%Sn с ориентацией (1011) вдоль оси нити  $d = 600$  нм при  $T = 2.1$  К.

Периоды наблюдаемых осцилляций ШдГ и циклотронные массы, рассчитанные из зависимостей амплитуды осцилляций от температуры позволили определить положение уровня Ферми дырок в  $T$ , согласно известным соотношениям [9].

Было установлено, что уровень Ферми  $T$  дырок  $\varepsilon_F^T$  составлял 104 мэВ отсчитанный от потолка валентной

зоны в Т, т.е. расположен в области легких L- дырок (Рис. 1).

Во второй серии измерений снимались деформационные зависимости сопротивления R(ξ) при 4,2 К (вставка на Рис. 5) Затем при фиксированных значениях Δ/l снимались полевые зависимости продольного магнетосопротивления. Последовательное увеличение Δ/l, позволяло следить за изменением периодов квантовых осцилляций от экстремальных сечений L- и Т- дырочных поверхностей Ферми при деформации.

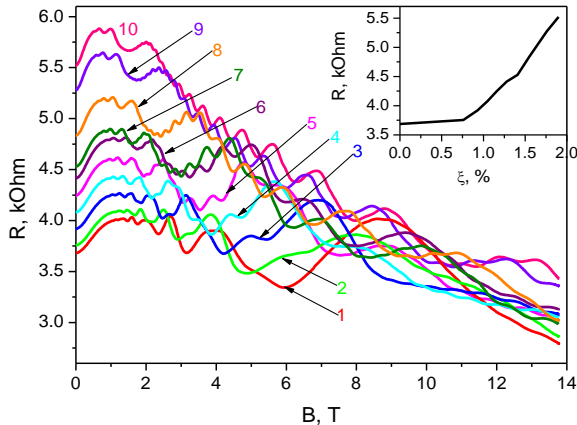


Рис. 5. Осцилляции ШдГ на продольном магнетосопротивлении R(B) (B || l) нити Bi- 0.07at%Sn с ориентацией (1011) вдоль оси нити d = 600 нм при фиксированных значениях упругого растяжения от ξ = 0 до ξ = 1.9 %, T = 4.2 К. На вставке: деформационная зависимость сопротивления R(ξ) при 4,2 К.

Рисунок 5 иллюстрирует полевые зависимости продольного магнетосопротивления R(B) нити Bi- 0,05at%Sn с d= 550 нм с ориентацией (1011) при различных значениях относительного удлинения ξ при температуре 4.2 К.

Как видно из рисунка 4 на продольном магнетосопротивлении R(B) в отсутствии деформации (ξ = 0) при 4.2 К в начальной области магнитных полей и до 9 Т четко наблюдаются осцилляции от сечений ПФ двух дырочных «эллипсоидов» L<sub>2,3</sub> симметрично расположенных относительно оси нити с периодом Δ(B<sup>-1</sup>) = 1.2\*10<sup>-5</sup>Oe<sup>-1</sup>. В области сильных магнитных полей видны осцилляции от Т дырок с периодом Δ(B<sup>-1</sup>) = 0.048\*10<sup>-5</sup>Oe<sup>-1</sup>. Граница существования осцилляций от L и Т дырок при ξ = 0 четко разграничена магнитным полем в 11 Т (Рис. 4).

С возрастанием нагрузки на полевых зависимостях R(B) появляется ярко выраженный эффект отрицательного магнетосопротивления, величина которого возрастает, а область существования расширяется и сдвигается в область более слабых магнитных полей (Рис. 5).

На магнетополевых зависимостях продольного магнетосопротивления хорошо видны осцилляции ШдГ на фоне монотонного хода R(B) при всех значениях упругих деформаций.

На рисунке 6 приведены зависимости квантового номера n ШдГ осцилляций при различных значениях упругой деформации растяжения.

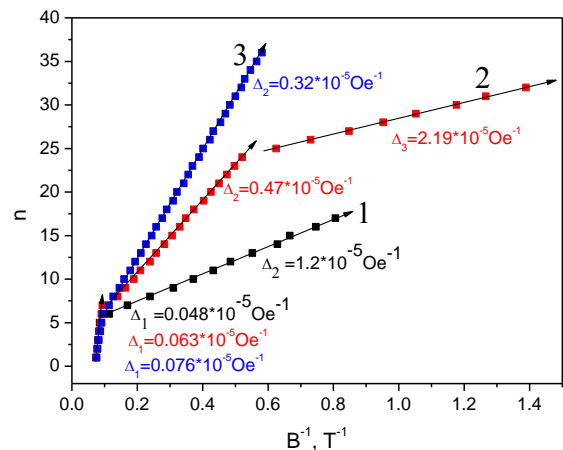


Рис. 6. Зависимости условного квантового номера n осцилляций ШдГ от обратного поля B<sup>-1</sup> нити Bi-0.07at%Sn с ориентацией (1011) вдоль оси нити d = 600 нм при фиксированных значениях упругого растяжения: 1. ξ = 0, 2. ξ = 1.16%, 3. ξ = 1.9%, T = 4.2 К.

Рассчитанные из линейных зависимостей n(B<sup>-1</sup>) соответствующие периоды ШдГ осцилляций для различных (L и Т) сечений поверхности Ферми на рисунке 7 демонстрирует зависимости частот ШдГ осцилляций от экстремальных сечений ПФ при 4,2 К.

$$f = \left[ \Delta \left( \frac{1}{H} \right) \right]^{-1} = \frac{S_{ex} * c}{eh} \quad (1)$$

Отчетливо видно, как при растяжении ξ = 1 % в промежуточной области магнитных полей появляется новая частота f = 19,2; T, (Δ(B<sup>-1</sup>) = 0,52\*10<sup>-5</sup>Oe<sup>-1</sup>) ШдГ осцилляций (Рис. 6) на зависимостях R(B) в области 0,2 – 5 Т, которая с увеличением нагрузки (растяжения) возрастает и становится доминирующей – область ее существования расширяется и сдвигается в область сильных магнитных полей отражая факт роста минимального экстремального сечения поверхности Ферми L<sub>1</sub> дырок. При этом период осцилляций ШдГ от двух дырочных L<sub>2,3</sub> «эллипсоидов» резко возрастает до значения 4.4\*10<sup>-5</sup>Oe<sup>-1</sup> при ξ = 1,8% и область существования ШдГ осцилляций от квази-«эллипсоидов» L<sub>2,3</sub> смещается в слабые магнитные поля, что указывает на резкое уменьшение их объема.

Т.о. в отличие от аналогичных зависимостей в нитях чистого Bi при упругом растяжении нитей Bi-0,05at%Sn той же ориентации происходит перетекание носителей их двух дырочных квази-эллипсоидов L<sub>2,3</sub> с более подвижными носителями в квази-эллипсоид L<sub>1</sub> вытянутый вдоль оси нити, с менее подвижными носителями в направлении оси нити. Одновременно период осцилляций от Т – дырок в области деформаций до 1% меняется слабо и при возрастании нагрузки до 2% относительного удлинения возрастает в 1,4 раза, что свидетельствует об уменьшении объема дырочного «эллипсоида» в точке Т зоны Бриллюэна при упругой деформации растяжения вдоль оси (1011) (Рис. 7). Такие изменения топологии поверхности Ферми сопровождаются ростом сопротивления нити при T= 4,2 К в 1,4 раза.

Деформационная зависимость сопротивления  $R(\xi)$  при 4,2 К приведена на вставке Рис. 5.

Для наглядности на Рис. 6 приведены зависимости периодов ШдГ осцилляций при  $\xi = 0$ ,  $\xi = 1,1\%$  и  $\xi = 1,9\%$ , а так же на Рис. 7 приведены зависимости частот ШдГ осцилляций  $f = 1/\Delta(B^{-1})$ , для различных сечений поверхности Ферми (L и T дырок). Схематическое изменение соответствующих экстремумов ПФ при деформации растяжения нити Bi-0,07at%Sn с стандартной ориентацией вдоль оси деформации, показано на Рис. 2.

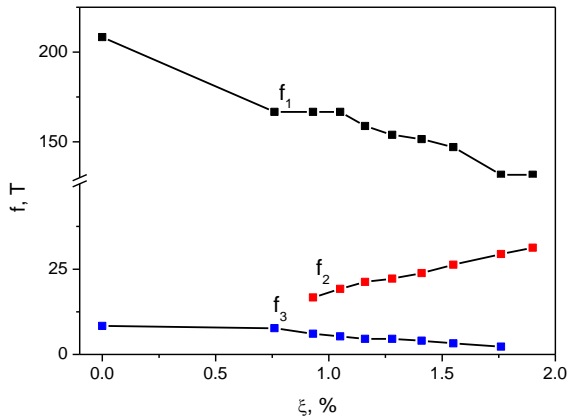


Рис. 7 Деформационные зависимости частот осцилляций ШдГ от сечений ПФ: T- дырок ( $f_1$ ), L- дырочного ( $f_2$ ) и L- дырочных «эллипсоидов»  $L_{2,3}$  ( $f_3$ ) при  $T = 4,2$  К.

Растяжение нитей Bi-0,07at%Sn вдоль оси (1011) изменяет симметрию решетки и нарушает эквивалентность L – «эллипсоидов». (Рис. 2) Т.о. при упругой деформации растяжения нитей Bi-0,07at%Sn осуществляется электронный топологический переход, при котором поверхность Ферми, состоящая из трех дырочных L-«эллипсоидов» и одного дырочного T-«эллипсоида» видоизменяется и при максимальных деформациях растяжения состоит из одного L дырочного «эллипсоида»,

вытянутого вдоль оси (1011) и дырочного T-«эллипсоида»:  $3_h^L + 1_h^T \rightarrow 1_h^L + 1_h^T$ .

#### ACKNOWLEDGMENT

Работа выполнена при поддержке Институционального проекта “Функциональные нано и микро- структуры на базе неорганических и органических полупроводников для микроэлектроники. Преобразователи энергии”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Е.В. Зароченцев, С.М. Орел, С.В. Теплов. Изменение топологии поверхности Ферми простых металлов при одноосных напряжениях. ФТТ. том. 22, 1, с. 24-30, 1930.
- [2] Н.В. Брандт, Ю.П. Гайдуков, Е.С. Ицкевич, Н.Д. Минина. Влияние давления на осцилляционные эффекты у висмута. ЖЭТФ, том. 47(8), с. 455-463, 1964.
- [3] Н.В. Брандт, В.А. Кульбачинский, Я. Минина. Влияние растяжения на поверхность Ферми у висмута. Письма в ЖЭТФ. том. 26(3), с. 173-176, 1977.
- [4] Ю.П. Гайдуков, Н.П. Данилова, М.Б. Щербина-Самойлова. Электронный переход  $2\frac{1}{2}$  рода в висмуте при простом растяжении. ЖЭТФ. том.77, 5, с. 2125-2141, 1979.
- [5] Н.В. Брандт, Я.Г. Пономарёв. Электронные переходы в сплавах висмут-олово, висмут-свинец, висмут-сурьма и висмут-сурьма-свинец под действием давления. ЖЭТФ. том. 55(10), с. 1215-1237, 1968.
- [6] D. Gitsu, L. Konopko and A. Nikolaeva. Pressure-dependent thermopower of individual Bi nanowires. Appl. Phys. Lett. vol. 86, pp.10210, 2005.
- [7] A. Nikolaeva, T. Huber, L. Konopko, A. Tsurkan. Features of Lifshits electron topological transitions induced by anisotropic deformation in thin wires of doped bismuth. In: J. Low. Temp. Phys. vol. 159, pp. 258–261, 2010.
- [8] N.V. Brandt, D.V. Gitsu, A.A. Nikolaeva and Ya.G. Ponomarev. Investigation of size effects in thin cylindrical bismuth single crystals in a magnetic field. Zh. Exp. Teor. Fiz. vol. 72, pp. 2332, 1977 [(Sov. Phys. JETP, 45 (6), 1977)].
- [9] Н.В. Брандт, С.М. Чудинов. «Электронная структура металлов». М.: 1973, 331с.