

Особенности продольного магнитосопротивления и осцилляции Шубникова-де Гааза в полупроводниковых нитях $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$

* А. А. Николаева^а, Л. А. Конопко^а, ** Т. Е. Хубер^б,
И. А. Попов^а, Г. И. Пара^а, О. В. Ботнар^а

^аИнститут электронной инженерии и нанотехнологий им. Д. Гицу,
г. Кишинев, МД-2028, Молдова, *e-mail: A.Nikolaeva@nano.asm.md

^бУниверситет Ховарда, Департамент химии, Вашингтон, США,
**e-mail: titoehuber@gmail.com

Поступила 28.07.2020

После доработки 11.08.2020

Принята к публикации 18.08.2020

Исследовались особенности проявления свойств топологических изоляторов (ТИ) и квантовых размерных эффектов на продольном магнитосопротивлении (ПМС) ($H||I$) монокристаллических полупроводниковых нитей $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ с ориентацией $(10\bar{1}1)$ вдоль оси, полученных литьем из жидкой фазы по методу Улитовского, с диаметрами от 75 нм до 1000 нм. В области высоких температур ($T > 50$ К) квантовый размерный эффект проявляется в росте энергетической щели $\Delta E \sim d^{-1}$ полупроводниковых нитей $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ с уменьшением диаметра нитей d . При уменьшении температур ($T < 50$ К) наблюдался переход от полупроводниковой зависимости $R(T)$ к металлической с уменьшением диаметра нитей d , указывающий на наличие поверхностных состояний, присущих ТИ. В области диаметров 200–350 нм на продольном магнитосопротивлении $H||I$ в слабых магнитных полях ($H < 3$ Т) наблюдались осцилляции Шубникова де Гааза (ШдГ), из которых были рассчитаны температура Дингла, циклотронная масса, длина свободного пробега носителей и подвижность носителей заряда $\mu = 11 \times 10^3$ см²/сек. На ПМС нитей $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ при 4,2 К обнаружена особенность в виде сдвига фазы уровней Ландау ШдГ осцилляций и аномального максимума на толщинной зависимости ПМС при 4,2 К, связанные с переходом полупроводник – металл за счет существенного вклада в проводимость поверхностных состояний ТИ. В совокупности особенности на продольном магнитосопротивлении, сдвиг фазы ШдГ осцилляций, большие подвижности носителей заряда, высокая анизотропия циклотронных масс и подвижностей, возрастание проводимости с уменьшением диаметра нитей d , указывают на наличие поверхностных состояний в тонких полупроводниковых нитях $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, с энергией Ферми типа «конуса Дирака», высокочувствительных к диаметру, температуре, величине и направлению магнитного поля и приводящих к новым особенностям транспортных свойств топологических изоляторов в размерно-ограниченных структурах.

Ключевые слова: монокристаллические нанонити, топологический изолятор, квантовые осцилляции, продольное магнитосопротивление, поверхностные состояния, квантовый размерный эффект

УДК 537.9, 53.06, 53.043

DOI: 10.5281/zenodo.4305606

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полупроводниковые сплавы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ являются предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в связи с проявлением в них свойств топологических изоляторов (ТИ) [1–3], с одной стороны, а с другой стороны, с возможностью реализации в них квантового размерного эффекта, что, согласно предсказаниям теории [4–6], должно привести к возрастанию термоэлектрической эффективности и появлению новых физических свойств, не характерных ни для металлов, ни для полупроводников, способствующих развитию спинтроники, квантовых компьютеров [7–9]. Сплавы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ при концентрациях $\text{Sb}(0,08 < x < 0,2)$ являются полупроводниками с инверсионным спектром [10],

с максимальной прямой щелью $\Delta E \approx 20$ мэВ при $0,12 < x < 0,18$ [11, 12] (рис. 1).

Поверхностные состояния внутри объемной запрещенной зоны с линейным законом дисперсии впервые экспериментально наблюдались на полупроводниковых сплавах $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым расширением (ARFES) [13].

В работе [14] были обнаружены два типа осцилляций Шубникова-де Гааза (ШдГ) в угловых зависимостях поперечного магнитосопротивления массивных полупроводниковых сплавов ТИ $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$ в сильных и слабых магнитных полях с большой анизотропией циклотронных масс и подвижностей носителей заряда.

В данной работе представлены результаты исследования проявления свойств тополо-

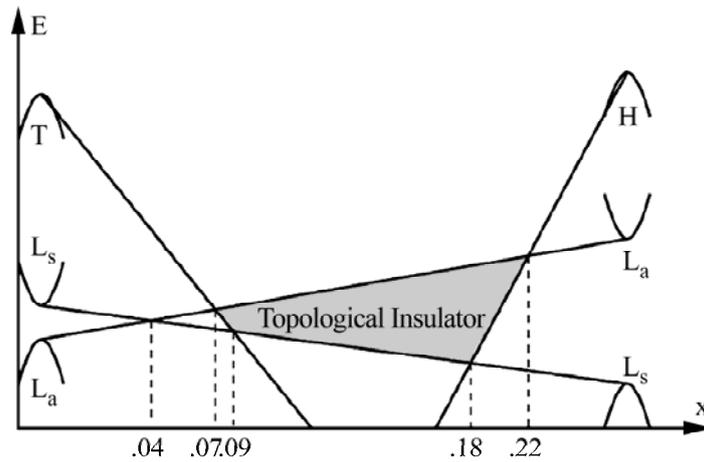


Рис. 1. Диаграмма перестройки энергетического спектра сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x < 0,2$) при изменении содержания Sb [18].

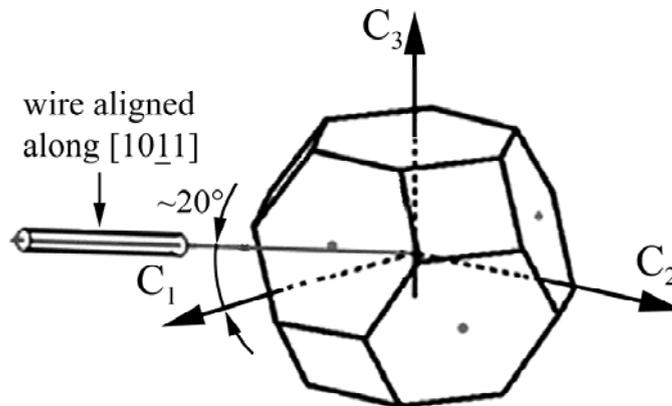


Рис. 2. Схематическое изображение зоны Бриллюэна с направлением кристаллографических осей и направлением роста исследуемых нитей $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($10\bar{1}1$), 1, 2, 3 соответствуют направлениям биссекторной, бинарной и тригональной осей.

гического изолятора и квантового размерного эффекта на изменение электронных характеристик и продольное магнитосопротивление (ПМС) монокристаллических полупроводниковых нитей сплавов $\text{Bi}_{17\text{at}\%}\text{Sb}$ различных диаметров, с одинаковой кристаллографической ориентацией относительно длины нити и магнитного поля ($H \parallel I$), что обеспечивает воспроизводимость и однозначность интерпретации экспериментальных результатов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Монокристаллические нити сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ с диаметрами 75–1000 нм в стеклянной изоляции изготавливались методом Улитовского литья из жидкой фазы в атмосфере аргона [15–17]. В качестве исходного материала использовались полупроводниковый сплав $\text{Bi}_{17\text{at}\%}\text{Sb}$ и стекло (Pigex) в качестве стеклянной оболочки. Большие скорости кристаллизации (до 10^5 К/сек) способствовали получению гомогенных монокристаллических образцов на длине до нескольких метров [17]. Использование X-Ray diffraction подтвердило монокристаллическость образцов и ориентацию $[10\bar{1}1]$ вдоль оси нити для всех исследуемых диаметров. В данной кристалло-

графической ориентации ось нити составляет угол в $19,5^\circ$ с биссекторной осью C_1 в биссекторно-тригональной плоскости (рис. 2).

При этом тригональная ось C_3 наклонена к оси нити по углом в 70° , а бинарная ось C_2 перпендикулярна к ней и оси нити (рис. 2). Аналогичная ориентация наблюдалась в монокристаллических нитях Bi и его сплавов и полуметаллических сплавах $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ [15–17].

Для измерений нити в стеклянной оболочке монтировались на подложку фольгированного гетинакса, вырезанного в виде параллелепипеда $6 \times 3 \times 2$ мм³.

В середине подложки медная фольга стравливалась на ширине $\sim 1\text{--}2$ мм. Медные полоски на подложке служили контактными площадками для нитевидного образца и токопроводящих и потенциальных проводов. Нить в стеклянной оболочке устанавливалась на подложке параллельно ее длинной грани и крепилась лаком в центре.

Измерения сопротивления и магнитосопротивления проводились двухконтактным методом, с использованием In-Ga припоя, в интервале температур 1,5–300 К и погрешностью не более 1%. Продольное магнитосопротивление ($H \parallel I$) в магнитных полях напряженностью

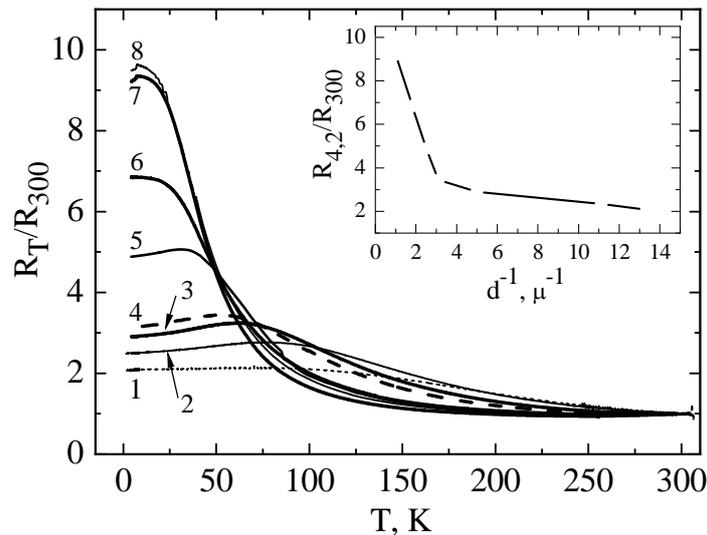


Рис. 3. Температурные зависимости относительного сопротивления $R_T/R_{300}(T)$ нитей Bi-17at%Sb различных диаметров: 1 – $d = 75$ нм; 2 – $d = 100$ нм; 3 – $d = 200$ нм; 4 – $d = 350$ нм; 5 – $d = 450$ нм; 6 – $d = 550$ нм; 7 – $d = 1000$ нм; 8 – $d = 1100$ нм. На вставке: зависимость приведенного сопротивления от обратного диаметра $R_{4,2}/R_{300}(d^{-1})$ при 4,2 К.

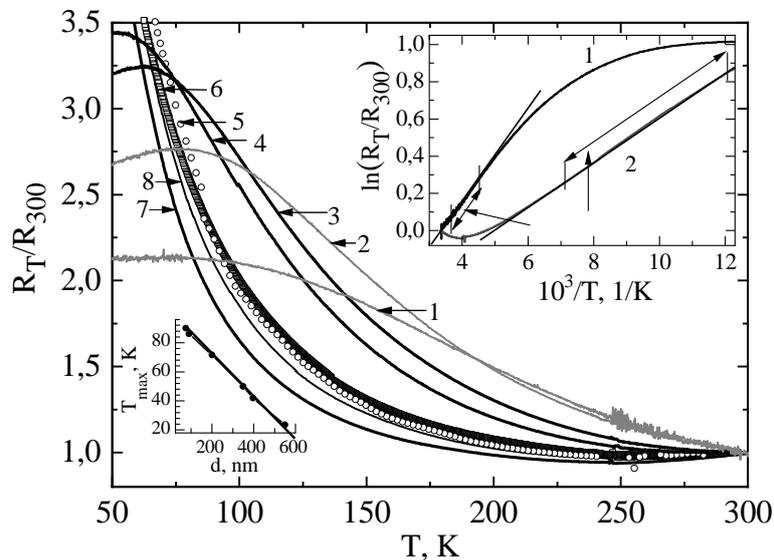


Рис. 4. Температурные зависимости относительного сопротивления $R_T/R_{300}(T)$ в области температур 50–300 К, нитей Bi-17at%Sb различных диаметров: 1 – $d = 75$ нм; 2 – $d = 100$ нм; 3 – $d = 200$ нм; 4 – $d = 350$ нм; 5 – $d = 450$ нм; 6 – $d = 550$ нм; 7 – $d = 1000$ нм; 8 – $d = 1100$ нм. На вставке сверху: зависимость $\ln(R_T/R_{300})$ от $10^3/T$: 1 – $d = 100$ нм; 2 – $d = 1000$ нм (стрелками указаны линейные участки). На вставке внизу: зависимость величины T_{\max} в области максимума на температурной зависимости $R_T/R_{300}(T)$ от диаметра нитей d .

до 14 Т проводилось в сверхпроводящем соленоиде (Institute of Low Temperatures and Structural Research, PAS, Wrocław, Poland). При изучении осцилляций Шубникова-де Гааза использовалась модуляционная техника, позволяющая измерять производную $\partial R/\partial H(H)$, регистрировать амплитуду осцилляций ШдГ с высокой точностью, с помощью Lock-in Amplifier.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИИ

Исследовались температурные зависимости удельного сопротивления полупроводниковых нитей Bi-17at%Sb различных диаметров в интервале температур 1,5–300 К.

При температуре 300 К удельное сопротивление нитей Bi-17at%Sb в интервале иссле-

дуемых диаметров (75–1100 нм) практически не зависело от диаметра нитей d и составляло $\rho \approx 120 \times 10^{-6}$ Ом·см. Температурные зависимости приведенного сопротивления $R_T/R_{300}(T)$ монокристаллических нитей Bi-17at%Sb с диаметрами от 75 до 1000 нм в интервале температур 1,5–300 К представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, на температурной зависимости имеются две области – область низких температур $\approx 1,5$ –50 К и область высоких температур ≈ 50 –300 К, в которых просматривается существенное различие в характере изменения зависимостей $R_T/R_{300}(T)$. На вставке рис. 3 показана зависимость приведенного сопротивления $R_{4,2}/R_{300}(d^{-1})$, отражающая возрастание вклада поверхностных состояний в

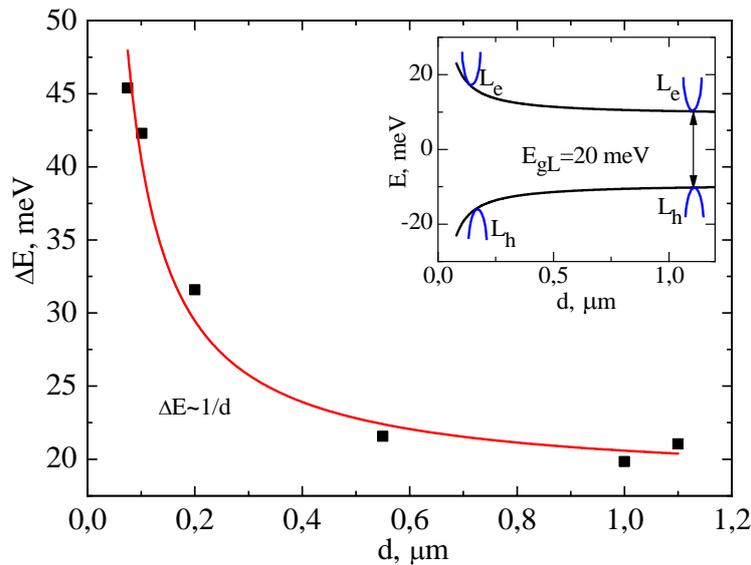


Рис. 5. Зависимость ширины запрещенной зоны ΔE от диаметра нитей d . На вставке: схематическое изображение щели в точке L при изменении диаметра нитей d за счет квантового размерного эффекта.

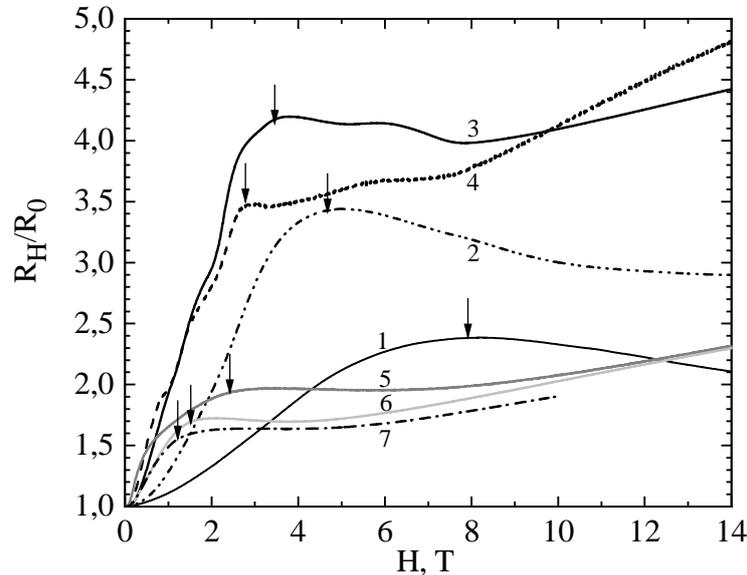


Рис. 6. Полевые зависимости приведенного продольного магнитосопротивления $R_H/R_0(H)$, $(H||I)$, $T = 4,2$ К для нитей $\text{Bi-17at}\% \text{Sb}$ различных диаметров: 1 – $d = 75$ нм; 2 – $d = 100$ нм; 3 – $d = 200$ нм; 4 – $d = 350$ нм; 5 – $d = 550$ нм; 6 – $d = 1000$ нм; 7 – $d = 1100$ нм.

проводимость при уменьшении диаметра нитей d при 4,2 К.

В области температур 300–40 К наблюдается возрастание сопротивления при уменьшении температуры с образованием максимума на $\Delta R/R(T)$ (рис. 4), линейно сдвигающегося в область более высоких температур при уменьшении диаметра нитей d (рис. 4, вставка внизу).

В области температур $T > T_{\text{макс}}$ на зависимостях $R_T/R_{300}(10^3/T)$ проявляются четкие экспоненциальные участки, подчиняющиеся зависимости $\rho_T = \rho_0 \cdot \exp(\Delta E / 2k_0T)$ (рис. 4, вставка сверху), характерные для массивных полупроводников $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, наклон которых зависит диаметром нитей d , из которых рассчитывалась энергетическая щель ΔE для нитей различных диаметров.

Величины ΔE , полученные из анализа зависимостей $\rho(1/T)$ для нитей $\text{Bi-17at}\% \text{Sb}$ различных диаметров, приведены на рис. 5.

При $d = 1100$ нм величина щели составила $\Delta E_g = 21$ мэВ, что хорошо согласуется со значениями для массивных образцов Bi-Sb аналогичного состава. Известно, что полупроводниковые сплавы $\text{Bi-17at}\% \text{Sb}$ являются прямозонными полупроводниками с минимальной щелью $\Delta E \sim 20$ мэВ в точке L зоны Бриллюэна [10–12]. При диаметре нити 75 нм энергетическая щель возросла до значения 45 мэВ (рис. 5).

Зависимость энергетической щели $\Delta E \sim d^{-1}$ (рис. 5) указывает на то, что причиной возрастания ΔE при уменьшении диаметра нитей d в этой области температур является квантовый размерный эффект (КРЭ), предсказанный в [4–6],

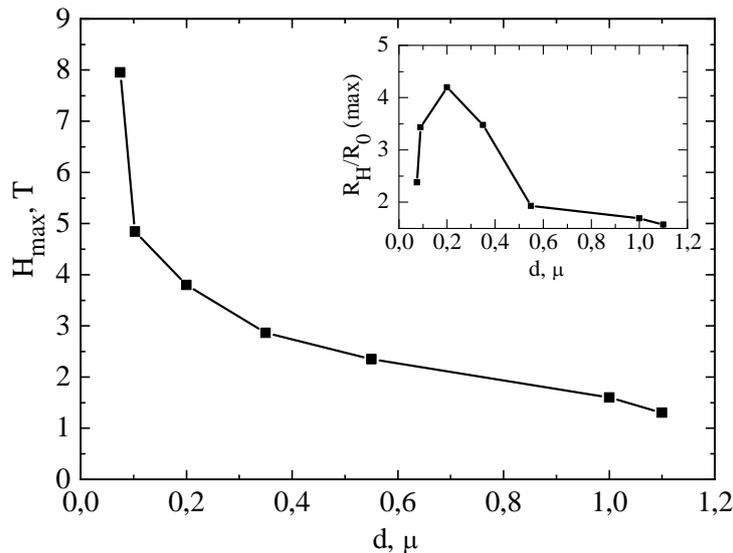


Рис. 7. Зависимость положения $H_{\max}(d)$ и величины $R_H/R_0(d)$ в точке максимума (вставка) на продольном магнитосопротивлении от диаметра нитей d для нитей Bi-17at%Sb.

наблюдаемый в нитях Bi и полуметаллических нитях $Bi_{1-x}Sb_x$ [15–17].

В области температур ($T < T_{\max}$) для нитей с $d < 350\text{--}400$ нм происходит качественное изменение температурной зависимости сопротивления $R_T/R_{300}(T)$ – переход от полупроводниковой к металлической зависимости, усиливающийся с уменьшением диаметра нитей d (рис. 3), что отражает факт включения и существенной роли поверхностных состояний с большими подвижностями, характерными для топологических изоляторов и, в частности, для полупроводниковых сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$.

На рис. 6 приведены полевые зависимости приведенного продольного магнитосопротивления ($H||I$) при 4,2 К нитей Bi-17at%Sb различных диаметров.

Изменение электрического сопротивления нитей сплавов Bi-17at%Sb в продольном магнитном поле характеризуется возрастанием в слабом магнитном поле и падением в более сильных магнитных полях.

Как и в нитях чистого Bi, положение максимума на ПМС при 4,2 К в полупроводниковых нитях Bi-17at%Sb смещается в область более сильных магнитных полей с уменьшением диаметра нитей d (рис. 6, 7) (положение максимумов на ПМС отмечено стрелками).

В нитях чистого Bi наличие максимума на зависимости продольного магнитосопротивления $R(H)$, ($H||I$), $H_{\max} \sim d^{-1}$ и следующего за этим отрицательного магнитосопротивления свидетельствует о реализации гальваномагнитного размерного эффекта (Mac-Donald-Chambers) [19]. Начальный рост сопротивления в нитях в продольном магнитном поле обусловлен тем, что искривление траектории носителей магнитным полем приводит к уменьшению подвижностей

носителей заряда из-за вклада поверхностного рассеяния. В области, когда ларморовский радиус r_L будет равен диаметру нитей d ($r = d$), роль поверхности исключается и сопротивление уменьшается при возрастании магнитного поля H . Смещение максимума на $R(H)$ в область более сильных магнитных полей при уменьшении диаметра нитей d обусловлено возрастанием величины магнитного поля для реализации условия $r_H = d$ (ларморовский радиус вписывается в сечение цилиндра), $r_H = p_F^\perp \times c / e \times H$, где p_F^\perp – составляющая фермиевского импульса.

Как было показано в работах [15, 16] и подтверждено в работе Дрессельхаус [20] для нитей чистого Bi, величина H_{\max} на ПМС рассчитана для нитей Bi $H_{\max} = \frac{p_F \times c}{e \times d}$,

где $p_F = 2,2 \times 10^{-21}$ г/см·сек – максимальный диаметр экстремального сечения поверхности Ферми в точке L для двух электронных эллипсоидов, расположенных симметрично относительно бисекторно-тригональной плоскости, содержащей ось нити ($H||I$), и совпадает со значением для массивных образцов Bi аналогичной ориентации. Наиболее строго для аномального максимума на $R(H)$ в нитях и пленках следовало применить выражение

$$H_{\max} = \frac{D_{\max} \times c}{e \sqrt{d \times l}}, \text{ где } l \text{ – длина свободного пробега}$$

носителей отражает зависимость подвижности носителей от диаметра и температуры.

Как видно из рис. 6, на ПМС нитей Bi-17at%Sb также имеется максимум, и его положение зависит от диаметра нити $H_{\max} \sim d^{-1}$ (рис. 7), как и в нитях чистого Bi. Рассчитанное значение $D_{\max} = 10,24 \times 10^{-21}$ г/см·сек почти в 5 раз больше, чем в нитях чистого Bi, что

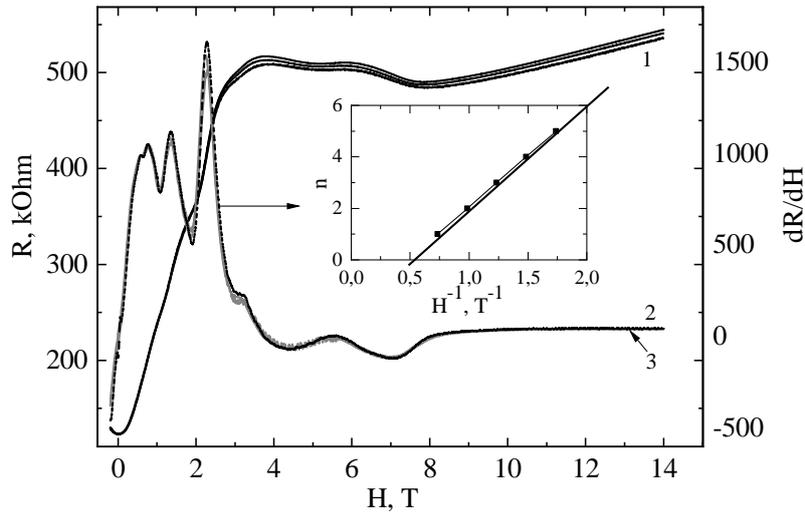


Рис. 8. Зависимость продольного магнитосопротивления $R(H)$ $H \parallel I$ (кривая 1) и производная $\partial R/\partial H(H)$ (кривые 2, 3) при температурах 3 К, 1,5 К для нити Bi-17at\%Sb с $d = 200$ нм. На вставке: зависимость квантового номера n осцилляций ШдГ от обратного поля H^{-1} , согласно экспериментальной кривой продольного магнитосопротивления $\partial R/\partial H(H^{-1})$.

объясняется большой анизотропией сечений поверхностных состояний в 2D ТИ, обнаруженных в работе [14].

Уменьшение величины $R_H/R_0(H)$ в точке максимума на ПМС $R(H)$ при 4,2 К с уменьшением диаметра нитей d в нитях чистого Bi связывалось с уменьшением концентрации L носителей из-за проявления квантового размерного эффекта [4, 5]. В исследуемых полупроводниковых нитях Bi-17at\%Sb величина R_H/R_0 возрастает с уменьшением диаметра нитей $\approx 75\text{--}300$ нм в области металлической проводимости нитей (рис. 6, 7, вставка). В области диаметров 200–350 нм образуется максимум, после чего возрастание диаметра нитей d приводит к уменьшению значения R_H/R_0 в точке максимума на $R(H)$ (рис. 7, вставка), то есть в области усиления полупроводникового хода $R(T)$. Именно в области диаметров $d \approx 350\text{--}400$ нм наблюдается переход от полупроводниковой к металлической проводимости на $R(T)$ (рис. 3), подтверждающий проявление поверхностных состояний в полупроводниковых нитях Bi-17at\%Sb и их возрастающий вклад в проводимость с уменьшением диаметра нитей d при низких температурах.

Таким образом, в области диаметров 300–1000 нм уменьшение величины максимума на ПМС с возрастанием диаметра нитей d связано с переходом в полупроводниковую область и уменьшением носителей заряда поверхностных состояний.

В области диаметров 200–300 нм на ПМС $R(H)$ при $T \leq 4,2$ К наблюдались осцилляции ШдГ с характерным ростом амплитуды при возрастании магнитного поля H и периодичностью по обратному магнитному полю H^{-1} (рис. 8).

Наиболее четко осцилляции видны на производной $\partial R/\partial H(H)$ (рис. 8, кривая 2). Осцилляции наблюдались в магнитных полях $< H_{\text{max}}$, в данном случае до 3 Т. Отметим, что осцилляции ШдГ в Bi и его полуметаллических сплавах с $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ наблюдались в магнитных полях $> H_{\text{max}}$.

Из зависимости квантового номера n осцилляций ШдГ от обратного магнитного поля H^{-1} (вставка на рис. 8) определялся период осцилляций ШдГ, который составлял $\Delta(H^{-1}) = 0,5 \text{ T}^{-1}$, частота осцилляций $f = (\Delta)^{-1}$ равнялась $1,96 \text{ T}$.

Циклотронная масса m_c определялась по относительному изменению с температурой амплитуды осцилляций, которая при $T_2 = 2T_1$ (в нашем случае 3 и 1,5 К) (рис. 8, кривые 2, 3):

$$m_c = \frac{e \times \hbar \times H}{2\pi^2 \times k \times T_1 \times c} \text{Arch} \left[\frac{A(T_1)}{A(T_2)} \right]$$

составляла $m_c = 0,0196m_0$.

Отметим, что циклотронные массы, оцененные нами из осцилляций ШдГ в перпендикулярном магнитном поле в нитях Bi-17at\%Sb [21], составляли: $m_{c_3} = 8,5196 \times 10^{-3} m_0$, $m_{c_2} = 1,5 \times 10^{-1} m_0$ при $H \parallel C_3$ и $H \parallel C_2$ ($H \perp I$) соответственно.

Сильная угловая зависимость циклотронных масс поверхностных состояний от угла ($m_c = m_c^0 / \sin \theta$), рассчитанная из осцилляций ШдГ в массивных образцах полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ в работе [14], позволяет подтвердить дираковскую природу энергетического спектра поверхностных состояний в исследуемых полупроводниковых нитях Bi-17at\%Sb .

Температура Дингла $T_D = \frac{\hbar}{\pi \times k \times \tau}$, учитывая уширение уровней Ландау из-за процессов рассеяния на примесях и дефектах, оценивалась также по соотношению амплитуд для двух последовательных значений H_n и H_{n+1} (при $T_2 = 2T_1$), при которых имеют место максимумы (или минимумы) магнитосопротивления, T_D составляла 9,6 К, что позволило оценить время релаксации $\tau = \hbar/2\pi \times k_B \times T_D = 1,25 \times 10^{-13}$ сек и фермиевскую скорость $v_F = \hbar \times k_F / m_C = 4,6 \times 10^7$ см/сек, длину свободного пробега носителей $l_s = v_F \times \tau = 58$ нм и подвижности носителей заряда $\mu = e \times l_s / \hbar \times k_F = 1,13 \times 10^4$ см²/В·сек.

Следует отметить, что зависимость квантового номера $n(H^1)$ осцилляций ШдГ имеет особенность в виде фазового сдвига, равного $0,5 T^{-1}$ (рис. 8, вставка). Известно, что фазовый сдвиг осцилляций ШдГ ассоциируется с фазой Берри, которая является интегральной характеристикой кривизны циклотронной орбиты и дисперсии электронов и присуща поверхностным состояниям топологических изоляторов с энергетическим спектром дираковского типа [1–3, 22].

Все вышеперечисленное позволяет заключить, что наблюдаемые осцилляции ШдГ в параллельном магнитном поле ($H||I$) и аномалии на ПМС связаны с особенностями энергетического спектра поверхностных состояний топологических изоляторов, вызванных возникновением спин-расщепленных топологических поверхностных состояний с дисперсией дираковского типа, то есть линейной зависимости энергии от импульса $E = \hbar \times k_F \times v_F$, где v_F – фермиевская скорость носителей.

Аномалии на продольном магнитосопротивлении и их корреляция с температурными зависимостями $R_T/R_{300}(d^{-1})$ подтверждают существование поверхностных состояний в полупроводниковых нитях $\text{Bi-17at}\% \text{Sb}$ с высокими подвижностями носителей заряда и большой анизотропией поверхности Ферми.

ВЫВОДЫ

В монокристаллических нитях ТИ $\text{Bi-17at}\% \text{Sb}$ с ориентацией $(10\bar{1}1)$ вдоль оси нити наблюдались эффекты, связанные как с проявлением КРЭ (рост энергетической щели $\Delta E \sim d^{-1}$ с уменьшением диаметра нити d), так и с проявлением поверхностных состояний – металлический ход зависимости $R(T)$ в области низких температур у нитей с $d < 500$ нм, усиливающийся с уменьшением диаметра нитей d .

Малые циклотронные массы $m_c = 0,0196 \times m_0$, большие подвижности $\mu = 1,1 \times 10^4$ см²/В·сек рассчитаны из осцилляций ШдГ, их большая анизотропия, сдвиг фазы осцилляций ШдГ, аномалии на ПМС $R(H)$ подтверждают существование поверхностных состояний в полупроводниковых нитях $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, характерных для ТИ, приводящих к новым особенностям транспортных свойств ТИ в размерно-ограниченных структурах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена благодаря финансовой поддержке Государственной программы Министерства образования, культуры и инноваций Молдовы (проект № 20.80009.5007.02) и американских фондов: NSF through STC CIQM 1231319, the Boeing Company and the Keck Foundation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liang, Fu and Kane, C.L., Topological Insulators with Inversion Symmetry, *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 76, p. 045302–1.
2. Hsieh D., Xia Y., Qian D., Wray L. et al., A tunable topological insulator in the spin helical Dirac transport regime, *Nature*, 2009, vol. 460, p. 1101.
3. Takahashi, Ryuji and Murakami, Shuichi, Thermoelectric transport in topological insulators, *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, vol. 27, no. 12, p. 124005.
4. Tang, Shuang and Dresselhaus Mildred, S., Electronic phases, band gaps, and band overlaps of bismuth antimony nanowires, *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 89, p. 045424–1.
5. Jane E., Cornett and Oded, Rabin., Thermoelectric figure of merit calculations for semiconducting nanowires, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, p. 182104–1.
6. Tang, Shuang and Dresselhaus Mildred, S., Constructing anisotropic Single-Dirac-Cones in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ thin films, *Nano Lett.*, 2012, Vol. 12, no. 4, P. 2021.
7. Moore, J.E., The birth of topological insulators, *Nature*, 2010, vol. 464, p. 194.
8. Qi, X.L., Li, R., Zang, J., Zhang, S.C., Inducing a magnetic monopole with topological surface States, *Science.*, 2009, vol. 323, p. 1184.
9. Linder, J., Tanaka, Y., Yokoyama, T., Sudbø, A., et al., Unconventional Superconductivity on a Topological Insulator, *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, no. 6, p. 67001.
10. Миронова Г.А., Судакова М.В., Пономарев Я.Г. Исследование зонной структуры полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, *ЖЭТФ.*, 1980, т. 78, № 5, с. 1830.

11. Golin, S., Band Model for Bismuth-Antimony Alloys, *Phys. Rev.*, 1968, vol. 176, p. 830.
12. Brandt, N.B., Semenov, M.V., Falkovsky, L.A., Experiment and theory on the magnetic susceptibility of Bi-Sb alloys, *J. Low Temp. Phys.*, 1977, vol. 27, p. 75.
13. Hsieh, D., Qian, D., Wray, L., Xia, Y. et al., A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase (experimental realization of a 3D Topological Insulator), *Nature*, 2008, vol. 452, p. 970.
14. Taskin, A.A. and Yoichi, Ando, Quantum oscillations in a topological insulator $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 80, p. 085303.
15. Brandt, N.B., Gitsu, D.V., Nikolaeva, A.A., Ponomarev, Ya.G., Investigation of size effects in thin cylindrical bismuth single crystals in a magnetic field, *JETP*, 1977, vol. 45, no. 6, p. 1226.
16. Nikolaeva, A., Huber, T.E., Gitsu, D. and Konopko, L., Diameter-dependent thermopower of bismuth nanowires, *Phys. Rev. B*, 2008, vol. 77, no. 3, p. 035422.
17. Nikolaeva, A.A.; Konopko, L.A.; Huber, T.E.; Bodiul, P.P.; Popov, I.A., Prospects of nanostructures $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ for thermoelectricity, *J. of Solid State Chemistry*, 2012, vol. 193, p. 71.
18. Demouge, A., Lenoir, B., Ravich Yu I., Scherrer, H., Scherrer, S., Estimation of carrier mobilities and densities in $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ alloys from galvanomagnetic coefficients, *J. Phys. Chem. Solids*, 1995, vol. 56, no. 9, p. 1155.
19. Chambers, R.G., The conductivity of thin wires in a magnetic field, *Proc. Roy. Soc.*, 1950, vol. 202, p. 378.
20. Zhibo, Zhang, Xiangzhong, Sun, Dresselhaus, M.S., Jackie, Y., Ying et al., Electronic transport properties of single-crystal bismuth nanowire arrays, *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 61, no. 7, p. 4850.
21. Konopko, L.A., Nikolaeva, A.A., Huber T.E., Ansermet J.-P., Surface States Transport in Topological Insulator $\text{Bi}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ Nanowires, *J. Low Temp. Phys.*, 2016, vol. 185, no. 5, p. 673.
22. He, Liang, Xiu, Faxian, Yu, Xinxin., Surface-dominated conduction in a 6 nm thick Bi_2Se_3 thin film, *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, no. 3, p. 1486.

Summary

The features of the manifestation of the properties of topological insulators (TIs) and quantum size effects on the longitudinal magneto-resistance (LM) ($H||I$) of Bi-17at%Sb single-crystal semiconductor wires prepared by liquid phase casting (Ulitsky method) having orientation $(10\bar{1}1)$ along the axis and diameters of 75–1000 nm have been studied. At high temperatures ($T > 50$ K), the quantum size effect was evident as an increase in the energy gap of $\Delta E \sim d^{-1}$ of Bi-17at%Sb semiconductor wires, with a decrease in wire diameter d . A decrease in temperature ($T < 50$ K) leads to a transition from the semiconductor dependence $R(T)$ to the metallic dependence, with a decrease in the wire diameter d ; the transition indicates the presence of the surface states characteristic of TIs. In a diameter range of 200–350 nm, on the LM ($H \parallel I$) in weak magnetic fields ($H < 3$ T), the Shubnikov de Haas (SdH) oscillations are observed; they are used to calculate the Dingle temperature, cyclotron masses, carrier mean free path, and charge carrier mobilities $\mu = 11 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$. On the LM of Bi-17at%Sb wires at 4.2 K, a singularity in the form phase shift of the Landau levels index on the SdH oscillations of an anomalous maximum in the thickness dependence of the LM at 4.2 K is observed; it is associated with the semiconductor-metal transition due to a significant contribution of the surface states of the TI with a decrease in the wire diameter d . Taken together, the singularities on the LM, the phase shift of the SdH oscillations, high mobility and anisotropy of charge carriers, and an increase in conductivity with a decrease in the wire diameter d indicate the presence of surface states in thin semiconductor $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ wires with a Fermi energy of the “Dirac cone” type, which are highly sensitive to the wire diameter, temperature, and the magnitude and direction of the magnetic field and lead to new features of the transport properties of TIs in low-dimensional structures.

Keywords: single-crystal nanowires, topological insulator, quantum oscillations, longitudinal magneto-resistance, surface state, quantum size effect