

Особенности механизма переноса заряда в слоистых монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором и тербием

© Н.А. Абдуллаев[¶], Н.М. Абдуллаев, Х.В. Алигулиева, Т.Г. Керимова, Г.С. Мехдиев, С.А. Немов*

Институт физики им. Г.М. Абдуллаева Национальной академии наук Азербайджана, AZ-1143 Баку, Азербайджан

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 апреля 2010 г. Принята к печати 17 мая 2010 г.)

Исследованы температурные зависимости удельного сопротивления ($T = 5\text{--}300\text{ К}$) в плоскости слоев и в направлении, перпендикулярном слоям, а также эффект Холла и магнитосопротивление ($H < 80\text{ кЭ}$, $T = 0.5\text{--}4.2\text{ К}$) в монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором и тербием. Показано, что легирование Bi_2Te_3 атомами тербия оказывает акцепторное действие и приводит к увеличению концентрации дырок. Легирование атомами хлора меняет не только тип проводимости Bi_2Te_3 на n -тип, но и характер проводимости. В температурной зависимости удельного сопротивления в направлении, перпендикулярном слоям, возникает участок с активационной проводимостью, обусловленной прыжковой проводимостью по локализованным состояниям. Предложен механизм переноса заряда в монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором.

1. Введение

В последние годы интерес к исследованиям легированных полупроводниковых соединений группы $\text{A}_2\text{B}_3\text{V}_1$ существенно возрос [1–7]. Этот интерес, с одной стороны, обусловлен проверкой теоретических моделей, описывающих энергетические спектры и механизмы рассеяния носителей заряда в таких соединениях [1–3], а с другой — перспективой практического использования их в качестве одного из компонент высокоэффективных термоэлектрических преобразователей: возможностью расширения диапазона рабочих температур этих соединений [4] и повышения их термоэлектрической эффективности [5–7]. Особый интерес вызывает неизоэлектронное замещение атомами примесей в анионной и катионной подрешетках теллурида висмута в связи с обнаружением примесных уровней, стабилизации уровня Ферми, исследованиями роли резонансного рассеяния и др.

Хорошо известно [8], что нелегированные монокристаллы Bi_2Te_3 при синтезе из расплава стехиометрического состава уже изначально характеризуются наличием значительного количества собственных точечных дефектов структуры, обусловленных переходом атомов Bi в положения атомов Te и наоборот (так называемые антиструктурные дефекты), ведущих себя как акцепторы. А потому монокристаллы Bi_2Te_3 имеют всегда p -тип проводимости со значительной концентрацией дырок $p \approx 10^{18}\text{--}10^{19}\text{ см}^{-3}$. Такая большая концентрация примесей формирует в запрещенной зоне значительное количество локальных состояний, образующих широкую примесную зону, перекрывающуюся с собственной зоной чистого кристалла. Поэтому при исследованиях электропроводности монокристаллов Bi_2Te_3 наблюдается типичный „металлический“ ход температурной зависимости сопротивления: с уменьшением температуры величина удельного сопротивления падает во всем

температурном интервале, а при низких температурах выходит на плато. Такой ход температурной зависимости удельного сопротивления в нелегированных монокристаллах Bi_2Te_3 характерен как для переноса заряда в плоскости слоев ρ_{par} , так и в направлении, перпендикулярном слоям ρ_{per} . Поэтому анизотропия проводимости с изменением температуры практически не меняется и находится обычно в пределах $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 4\text{--}6$.

При легировании ситуация с анизотропией электропроводности может значительно измениться вследствие неравномерного распределения примеси по объему кристалла [6]. В слоистых кристаллах наличие слабой связи между слоями способствует неравномерному распределению примеси: значительная часть атомов примеси располагается в межслоевых промежутках. Это приводит не только к значительному изменению анизотропии электропроводности, но и может обусловить изменение механизма переноса заряда в таких соединениях.

В настоящей работе представлены результаты исследований электропроводности, эффекта Холла и магнитосопротивления в слоистых монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных тербием (0.0025 вес%) и хлором (в виде соли CdCl_2 — 0.03 вес%), в широком диапазоне температур 0.5–300 К и магнитных полей, вплоть до 8 Тл. Монокристаллы Bi_2Te_3 , легированные тербием и хлором, как и собственно монокристаллы Bi_2Te_3 , обладают ромбоэдрической структурой и относятся к кристаллам с пространственной группой D_{3d}^5 ($R\bar{3}m$) [8]. Они принадлежат большой группе соединений, кристаллизующихся в слоистую структуру, слои в которых перпендикулярны оси симметрии 3-го порядка. Этим объясняется легкость расщепления монокристаллов Bi_2Te_3 вдоль плоскостей (0001), что очень удобно при подготовке образцов для измерений.

2. Эксперимент

Монокристаллы Bi_2Te_3 выращивались методом Бриджмена и вертикальной направленной кристаллизацией

[¶] E-mail: anadir@azintex.com.

из компонент со стехиометрическим соотношением и примесями в виде особоистого редкоземельного элемента Tb и соли CdCl_2 . Зоннонаправленная кристаллизация проводилась при скорости перемещения зоны 3 см/ч. Рентгеноструктурные исследования образцов проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. О высоком качестве кристаллов косвенно свидетельствовала достаточно высокая подвижность носителей заряда в плоскости слоев при гелиевых температурах ($\mu > 1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).

Исследования проводились в интервале температур 0.5–300 К и магнитных полях вплоть до 8 Тл. Измерения проводились по селективной методике на переменном токе частотой 20.5 Гц, величина тока не превышала 1 мА. Образцы для исследований получались из монокристаллических слитков простым скалыванием вдоль поверхности, содержащей плоскость слоя. Образцы приготавливались в форме прямоугольных пластинок размерами примерно 6×8 мм, толщинами в пределах 0.2–0.8 мм. При исследованиях эффекта Холла и магнитосопротивления образец помещался в центр сверхпроводящего соленоида и ток направлялся в плоскости слоев.

Абсолютные значения удельного сопротивления в плоскости слоев (ρ_{par}) и перпендикулярно слоям (ρ_{per}) определялись усовершенствованным четырехзондовым комбинационным методом Шнабеля [9], разработанным специально для изучения анизотропии проводимости слоистых кристаллов. Четыре контакта при таких измерениях наносились попарно на противоположные стороны пластинки в прямоугольной геометрии. Характерные размеры — диаметры контактов, расстояния между контактами, толщины образцов и другие определялись с помощью оптического микроскопа.

3. Результаты исследований и их обсуждение

3.1. Электропроводность

Прежде всего отметим, что, согласно данным исследований эффекта Холла в сильных магнитных полях, концентрация дырок в нелегированных образцах Bi_2Te_3 была примерно $p \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Легирование атомами тербия оказывает акцепторное действие в Bi_2Te_3 — концентрация дырок возрастает до $p \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Легирование же атомами галогена — хлора — оказывает донорное действие: концентрация дырок в исследованных образцах уменьшалась до $p \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По видимому, легированные указанными элементами монокристаллы Bi_2Te_3 образуют твердые растворы замещения, в которых атомы хлора замещают в кристаллической решетке атомы теллура, а атомы тербия — атомы висмута. При этом, поскольку у атома хлора число электронов на внешней оболочке на единицу больше, чем у теллура, атом хлора может отдавать один электрон в зону проводимости, у атомов же тербия

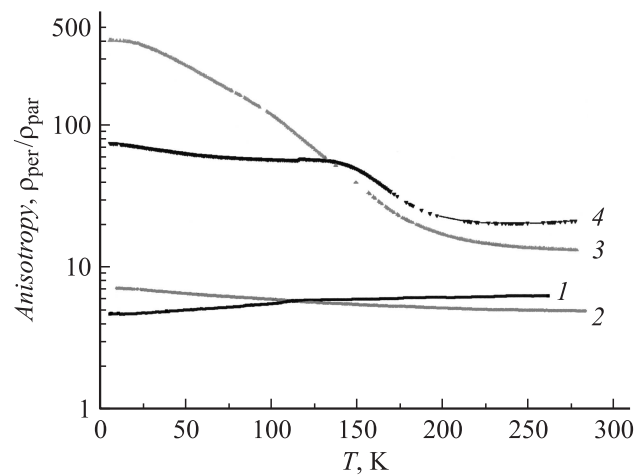


Рис. 1. Температурные зависимости анизотропии удельных сопротивлений $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}}$ в области температур $5 < T < 300$ К: 1 — нелегированный Bi_2Te_3 , 2 — Bi_2Te_3 (Tb), 3 — Bi_2Te_3 (Cl), 4 — Bi_2Te_3 (Cl, Tb).

число электронов на внешней оболочке меньше, чем у висмута, что приводит к возникновению дополнительных акцепторных уровней.

На рис. 1 приведены температурные зависимости анизотропии удельного сопротивления $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}}$ нелегированного Bi_2Te_3 (кривая 1) и легированного тербием (кривая 2), хлором (кривая 3), а также тербия с хлором (кривая 4). Из анализа данных, представленных на рис. 1, следует.

1. Легирование атомами тербия практически не меняет величину анизотропии электропроводности (кривая 2) $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 5-7$ в сравнении с нелегированным Bi_2Te_3 — $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 4-6$.

2. В легированных атомами тербия монокристаллах Bi_2Te_3 , как и в нелегированном Bi_2Te_3 , анизотропия электропроводности почти не меняется с температурой.

3. В монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных атомами хлора (кривая 3), анизотропия электропроводности при $T = 300$ К значительно больше, чем в нелегированных Bi_2Te_3 ($\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 14$), и существенно возрастает с понижением температуры (при $T = 5$ К $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 400$).

4. В монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных атомами тербия и хлора (кривая 4), анизотропия электропроводности при $T = 300$ К наибольшая ($\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 20$), в интервале температур $T = 200-150$ К анизотропия электропроводности резко возрастает, достигая значений $\rho_{\text{per}}/\rho_{\text{par}} \approx 70$, и затем слабо возрастает с понижением температуры до $T = 5$ К.

Чтобы понять столь значительную разницу в температурном поведении анизотропии удельных сопротивлений, на рис. 2 и 3 приведены температурные зависимости величин абсолютных удельных сопротивлений в характерных кристаллографических направлениях: в плоскости слоев ρ_{par} (рис. 2) и перпендикулярно слоям ρ_{per} (рис. 3) нелегированного Bi_2Te_3 (кривые 1) и легированного тербием (кривые 2), хлором (кривые 3),

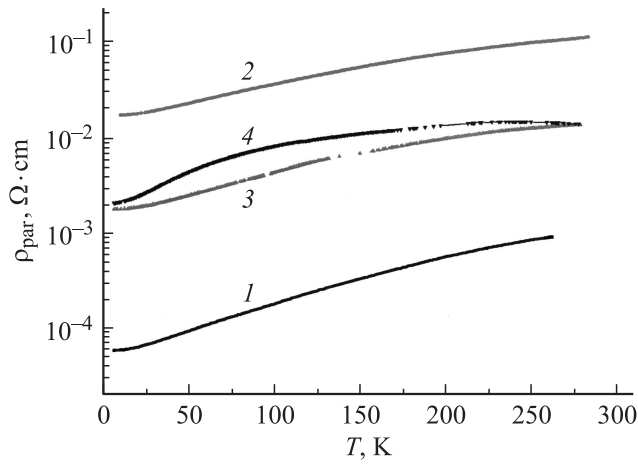


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления в плоскости слоев ρ_{par} в области температур $5 < T < 300$ К: 1 — нелегированный Bi_2Te_3 , 2 — Bi_2Te_3 (Tb), 3 — Bi_2Te_3 (Cl), 4 — Bi_2Te_3 (Cl, Tb).

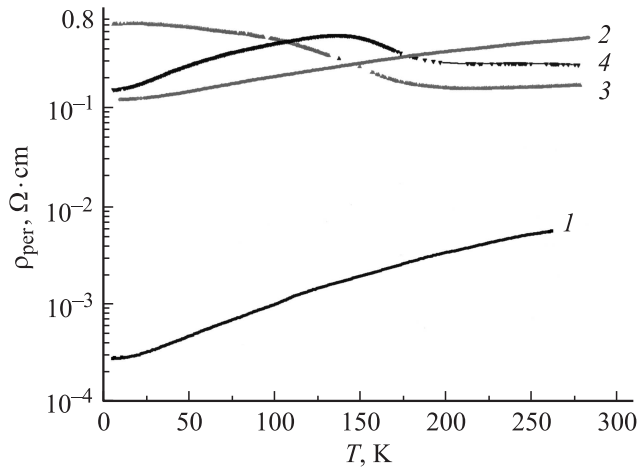


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления в направлении, перпендикулярном слоям ρ_{per} , в области температур $5 < T < 300$ К: 1 — нелегированный Bi_2Te_3 , 2 — Bi_2Te_3 (Tb), 3 — Bi_2Te_3 (Cl), 4 — Bi_2Te_3 (Cl, Tb).

а также тербием с хлором (кривые 4). Из рис. 2 видно, что „металлический“ ход температурной зависимости сопротивления в плоскости слоев $\rho_{\text{par}}(T)$ практически сохраняется для всех легированных образцов Bi_2Te_3 . Лишь возрастают величины абсолютных значений удельных сопротивлений и ослабевают их температурные зависимости, что свидетельствует о возрастании роли примесного рассеяния носителей заряда.

Иначе обстоит дело с проводимостью в направлении, перпендикулярном слоям (рис. 3). В монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором (кривые 3) и хлором с тербием (кривые 4), проводимость в направлении, перпендикулярном слоям, приобретает в определенных температурных интервалах активационный характер. В монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором (кривые 3) с понижением температуры от 300 К до 200 К, сопротив-

ление уменьшается с понижением температуры, далее в интервале температур $T = 18\text{--}200$ К, с понижением температуры наблюдается активационный участок — величина сопротивления возрастает более чем в 5 раз, и ниже 18 К вновь происходит уменьшение сопротивления с понижением температуры. В монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором с тербием (кривые 4), проводимость в направлении, перпендикулярном слоям, имеет похожий вид: с понижением температуры до 200 К сопротивление почти не меняется по величине, далее в интервале температур $T = 130\text{--}200$ К наблюдается активационный характер проводимости (сопротивление возрастает по величине в 2 раза), а ниже $T = 130$ К проводимость приобретает „металлический“ ход. Теперь становится понятной причина возрастания анизотропии проводимости с понижением температуры — для разных кристаллографических направлений наблюдаются различные механизмы переноса заряда.

Для слоистых кристаллов одновременное доминирование двух различных механизмов переноса заряда в разных кристаллографических направлениях не является удивительным. Например, в наиболее типичном слое кристалла — в полуметалле графита [10], в то время как проводимость в плоскости слоев имеет типичный „металлический“ ход, в направлении, перпендикулярном слоям, проводимость имеет активационный характер. В слоистом полупроводнике InSe [11], в то время как проводимость в плоскости слоев осуществляется путем переноса заряда по протяженным состояниям в зоне проводимости, перенос заряда перпендикулярно слоям определяется прыжками носителей заряда по локализованным состояниям в узкой полоске энергий вблизи уровня Ферми (так называемая прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка). Поэтому в этих слоистых кристаллах анизотропия проводимости также существенно растет с понижением температуры.

Таким образом, в направлении, перпендикулярном слоям, в температурном поведении проводимости наблюдается своеобразный переход металл–диэлектрик с „металлическим“ характером проводимости при низких температурах и „диэлектрическим“, или активационным, — при более высоких температурах. Переход металл–диэлектрик экспериментально наблюдается во многих материалах [12], но необычным является то, что в исследованных нами образцах переход металл–диэлектрик совершается с „металлическим“ характером проводимости при низких температурах и „диэлектрическим“, или активационным, — при более высоких температурах. В литературе [12,13] известны случаи подобного „необычного“ температурного поведения электропроводности. Поляроны малого радиуса ведут себя при низких температурах подобно свободной частице с возросшей массой, а при высоких температурах ($kT > \hbar\omega/2$, где ω — частота фонона) двигаются термически активированными прыжками [12]. Поскольку рассматриваемые нами объекты являются неполярными веществами, эту версию можно отклонить. В сильно легированных полупроводниках при проводимости по примесной зоне при низких температурах локализационные

эффекты, обусловленные электрон-электронным взаимодействием, также могут приводить к подобной температурной зависимости удельного сопротивления [13]. Однако, как видно из рис. 3, в нашем случае наблюдаемый эффект приходится на относительно высокие температуры: $T \approx 150$ К.

Чтобы объяснить одновременное существование двух механизмов переноса заряда в направлении, перпендикулярном слоям с „металлическим“ характером проводимости при низких температурах, так же, как в графите [10], можно предположить, что проводимость в легированных хлором образцах Bi_2Te_3 перпендикулярно слоям осуществляется параллельно по двум каналам — „металлическому“ σ_M и „активационному“ σ_H . В рамках этой модели предполагается, что перенос заряда происходит по конкурирующим между собой узким проводящим нитевидным путям и широким областям разупорядочения посредством стимулированных фононами прыжков носителей заряда по локализованным состояниям. В этом случае суммарная проводимость σ равна

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_H, \quad (1)$$

где „металлическая“ проводимость

$$\sigma_M = \rho_M^{-1} = (\rho_0 + AT)^{-1}. \quad (2)$$

Величины ρ_0 и A можно определить из рис. 3 экстраполяцией в более низкотемпературную область. Теперь, вычитая из результирующей σ величину σ_M , определим „активационную“ часть проводимости σ_H , а затем и $\rho_H = \sigma_H^{-1}$. Вычисленные таким образом температурные зависимости активационной части удельного сопротивления в направлении, перпендикулярном слоям, $\rho_H(T)$ представлены на рис. 4 для образцов Bi_2Te_3 , легированных хлором (рис. 4, *a*), и хлором с тербием (рис. 4, *b*). Хорошо просматривается экспоненциальное возрастание величины сопротивления с уменьшением температуры. Подгонка методом наименьших квадратов температурной зависимости удельного сопротивления $\rho_H(T)$ под зависимости вида

$$\rho_H(T) = \rho_{H0} \exp(T_0/T)^x \quad (3)$$

выявила, что наилучшее спрямление в наибольшем температурном интервале наступает при $x = 1/2$.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что проводимость в направлении, перпендикулярном слоям, в слоях Bi_2Te_3 , легированных хлором при температурах $T = 25\text{--}150$ К, а в слоях Bi_2Te_3 , легированных хлором и тербием при температурах $T = 130\text{--}200$ К, удовлетворительно описывается выражением

$$\rho_H(T) = \rho_{H0} \exp(T_0/T)^{1/2}, \quad (4)$$

справедливым при одномерной прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка [14]. В работе [15] показано, что в слоистых кристаллах, в частности

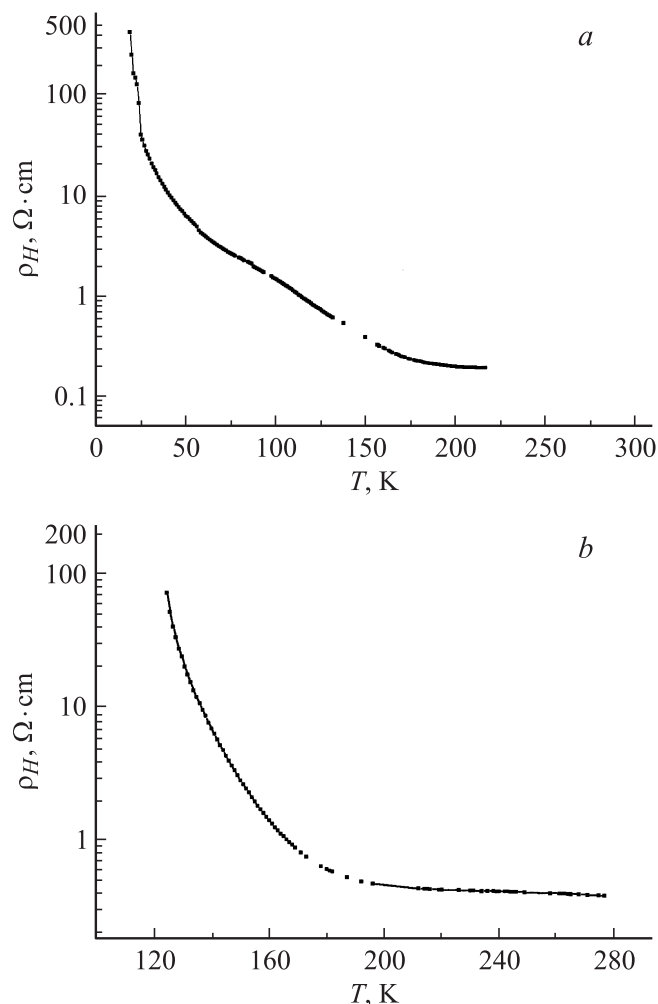


Рис. 4. Температурные зависимости активационной части удельного сопротивления в направлении, перпендикулярном слоям $\rho_H(T)$, для образцов: *a* — $\text{Bi}_2\text{Te}_3(\text{Cl})$, *b* — $\text{Bi}_2\text{Te}_3(\text{Cl, Tb})$.

в InSe , проблема разупорядочения, обусловленная наличием характерных для слоистых кристаллов плоских протяженных дефектов, дефектов стыковки слоев или другими причинами, сходна с задачей одномерно-разупорядоченных цепочек, и предложено зарядовый транспорт поперек слоев рассматривать посредством одномерной модели фононно-стимулированных прыжков. При этом предполагается, что каждый слой представляет собой плотно упакованную большую молекулу, составленную из сильно связанных атомов, а в целом слоистый кристалл возможно рассматривать как цепочку из больших слабо связанных молекул с разупорядочениями. В нашем случае разупорядочение обусловлено неоднородным легированием, при котором основная масса легирующей примеси внедряется в межслоевые промежутки. Это предположение представляется более вероятным, если учесть, что атомы хлора обладают малым атомным радиусом и могут легко внедряться в промежутки между слоями.

3.2. Магнитосопротивление

Полевая зависимость магнитосопротивления ρ_{xx} в исследованных нами образцах характерна для идеальных полупроводников [16]: в слабых магнитных полях наблюдается квадратичный рост ρ_{xx} , а при полях выше 7 Тл ρ_{xx} стремится к насыщению. В [3] в рамках общепринятой шестизонной модели зонной структуры Bi_2Te_3 Дреббла–Вольфа [17] получены формулы, описывающие зависимость поперечного удельного сопротивления ρ_{xx} от магнитного поля B . Учитывая, что магнитное поле направлено перпендикулярно слоям, т. е. вдоль оси C_3 , и при сильном вырождении газа носителей заряда согласно [3]:

$$\frac{\rho_{xx}(B)}{\rho_0} = \frac{1 + (R_0\sigma_0 B)^2 / f_{II}}{1 + (R_0\sigma_0 B)^2}. \quad (5)$$

Здесь ρ_0 и σ_0 — значения удельного сопротивления и проводимости при $B = 0$, а $R_0 = \rho_{123}$ при $B \rightarrow 0$; f_{II} — холл-фактор, обусловленный анизотропией эффективных масс и ориентацией эллипсоидов относительно кристаллографических осей. Зависимость (5) спрямляется в координатах $\frac{B^2}{(\Delta\rho/\rho_0)} - (B^2)$:

$$\frac{B^2}{(\Delta\rho/\rho_0)} = \frac{1}{(1/f_{II} - 1)(R_0\sigma_0)^2} + \frac{1}{(1/f_{III} - 1)} B^2. \quad (6)$$

На рис. 5 приведены экспериментально определенные магнитополевые зависимости поперечного сопротивления монокристаллов Bi_2Te_3 (кривая 1), Bi_2Te_3 (Tb) (кривая 2), Bi_2Te_3 (Cl) (кривая 3), Bi_2Te_3 (Cl, Tb) (кривая 4), построенные в координатах $\frac{B^2}{(\Delta\rho/\rho_0)} - (B^2)$. Из (6) по тангенсу угла наклона прямой можно определить сначала f_{II} , а затем из отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат, и холловскую подвижность $\mu_H = R_0\sigma_0$. Определенные из рис. 5 тангенсы угла

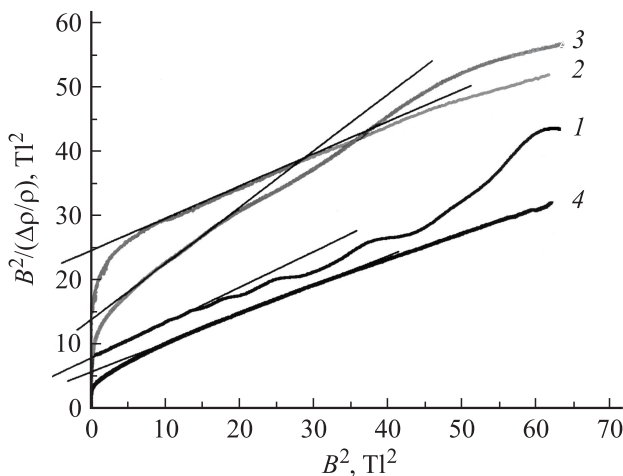


Рис. 5. Полевые ($H \approx 0-80$ кЭ) зависимости магнитосопротивления, построенные в координатах $(\frac{B^2}{\Delta\rho/\rho_0}; B^2)$, при температуре $T = 0.5$ К исследованных образцов: 1 — нелегированный Bi_2Te_3 , 2 — Bi_2Te_3 (Tb), 3 — Bi_2Te_3 (Cl), 4 — Bi_2Te_3 (Cl, Tb).

наклона прямых и отрезки, отсекаемые на оси ординат, примерно равны: Bi_2Te_3 (0.58 и 8 Тл²), Bi_2Te_3 (Tb) (0.48 и 25 Тл²), Bi_2Te_3 (Cl) (0.87 и 14 Тл²), Bi_2Te_3 (Cl, Tb) (0.45 и 6.1 Тл²). Соответственно значения холл-фактора f_{II} и холловской подвижности μ_H примерно равны: Bi_2Te_3 ($f_{II} = 0.37$ и $\mu_H \approx 2700$ см²/В·с), Bi_2Te_3 (Tb) ($f_{II} = 0.33$ и $\mu_H \approx 1340$ см²/В·с), Bi_2Te_3 (Cl) ($f_{II} = 0.47$ и $\mu_H \approx 2500$ см²/В·с), Bi_2Te_3 (Cl, Tb) ($f_{II} = 0.31$ и $\mu_H \approx 2700$ см²/В·с). Как видно из приведенных результатов, величины холл-факторов находятся в пределах 0.3–0.45, что согласуется с литературными данными [3,8]. Это свидетельствует об отсутствии заметного влияния примесей на зонные параметры дырок в Bi_2Te_3 . Высокая холловская подвижность дырок в плоскости слоев в исследованных нами соединениях ($\mu_H \geq 1000$ см²/В·с) свидетельствует, с одной стороны, о том, что рассеяние дырок на примесях не является доминирующим, а с другой — о высоком качестве исследуемых монокристаллов. Необходимо отметить, что оцененная из исследований магнитосопротивления относительно низкая величина холловской подвижности в Bi_2Te_3 (Tb) согласуется с данными исследований удельного сопротивления в плоскости слоев (кривая 2, рис. 2). Высокая подвижность носителей заряда в плоскости слоев Bi_2Te_3 (Cl) ($\mu_H \approx 2500$ см²/В·с), Bi_2Te_3 (Cl, Tb) ($\mu_H \approx 2700$ см²/В·с) также согласуется с исследованиями удельного сопротивления (рис. 2 и 3), указывая на то, что часть атомов хлора при легировании внедряется в межслоевые промежутки. Такие дефекты, практически не влияя на электропроводность в плоскости слоев, существенно затрудняют перенос заряда в направлении, перпендикулярном слоям.

4. Заключение

Таким образом, результаты проведенных нами исследований показали, что легирование монокристаллов Bi_2Te_3 атомами тербия оказывает акцепторное действие, не изменяя ни типа проводимости (p -тип), ни „металлического“ характера проводимости. При этом величины удельного сопротивления легированных образцов и в плоскости слоев, и в направлении, перпендикулярном слоям, значительно повышаются, а температурные зависимости $\rho(300\text{ К})/\rho(5\text{ К})$ ослабевают. Это свидетельствует о возрастании роли примесного рассеяния носителей заряда. Слабое изменение анизотропии электропроводности ($\rho_{\text{пер}}/\rho_{\text{пар}}$) с температурой указывает на практически схожий характер механизма переноса заряда в плоскости слоев и в направлении, перпендикулярном слоям. На значительное уменьшение подвижности дырок в плоскости слоев Bi_2Te_3 (Tb) указывают и данные исследований магнитосопротивления.

Совершенно отличная ситуация наблюдается в монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных хлором, а также хлора с тербием. Выявлено, что легирование хлором оказывает донорное действие, а также приводит к значительному повышению анизотропии проводимости, увеличивающейся с понижением температуры. Анализ экспериментальных исследований температурных зависимостей

удельных сопротивлений в плоскости слоев и в направлении, перпендикулярном слоям, показал, что в то время как в плоскости слоев перенос заряда осуществляется по примесной зоне, перенос заряда перпендикулярно слоям определяется в основном термоактивированными прыжками по локализованным состояниям. Это возможно при неоднородном легировании. По-видимому, при легировании хлором часть атомов внедряется в межслоевые промежутки вследствие наличия слабой связи, что может привести к изменению межслоевых расстояний, перестройке зонной структуры и появлению локализованных состояний.

В работе [18] показано, что изменение концентрации носителей заряда и характера проводимости с „металлического“ на активационный наблюдается в соединении $\text{In}_x\text{Bi}_{2-x}\text{Te}_3$ ($x = 0.04, 0.07$) при облучении электронами с энергией 5 МэВ. Предполагается, что в облученных образцах производится большое количество дефектов типа вакансий и межузельных атомов, которые отжигаются при высоких температурах. Необходимо отметить, что в облученных образцах активационный характер проводимости наблюдается как в процессах переноса заряда в плоскости слоев, так и в направлении, перпендикулярном слоям. Восстановление „металлической“ проводимости при последующем отжиге указывает на дефектную природу активационного характера проводимости.

Следует отметить, что неоднородное легирование может, вероятно, происходить и при легировании Bi_2Te_3 атомами других элементов. В нашей предыдущей работе [6] в монокристаллах Bi_2Te_3 , легированных дополнительно индием, наблюдалась высокая анизотропия проводимости, увеличивающаяся с понижением температуры (кривая 3, рис. 3 [6]), что не явилось предметом обсуждений. В последующей работе мы надеемся подробно исследовать влияние легирования монокристаллов Bi_2Te_3 атомами индия и олова различной концентрации на электрические свойства.

Авторы благодарят сотрудников Лаборатории электронной кинетики Института физики твердого тела РАН за предоставление возможности проведения низкотемпературных исследований, в том числе и в сильных магнитных полях.

Список литературы

- [1] М.К. Житинская, С.А. Немов, Т.Е. Свечникова, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов, В.А. Кутасов. ФТТ, **45** 1193 (2003).
- [2] П.П. Константинов, Л.В. Прокофьева, М.И. Фёдоров, Ю.И. Равич, Д.А. Пшенай-Северин, В.В. Компаниец, В.А. Чистяков. ФТП, **39**, 1059 (2005).
- [3] Р. Лайхо, С.А. Немов, А.В. Лашкул, Э. Лахдеранта, Т.Е. Свечникова, Д.С. Дворник. ФТП, **41**, 565 (2007).
- [4] В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов. ФТП, **34**, 389 (2000).
- [5] М.К. Житинская, С.А. Немов, Т.Е. Свечникова. ФТП, **41**, 1158 (2007).

- [6] Н.А. Абдуллаев, С.Ш. Кахраманов, Т.Г. Керимова, К.М. Мустафаева, С.А. Немов. ФТП, **43**, 156 (2009).
- [7] П.П. Константинов, Л.В. Прокофьева, Ю.И. Равич, М.И. Фёдоров, В.В. Компаниец. ФТП, **38**, 811 (2004).
- [8] Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов. *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3* (М., Наука, 1972).
- [9] P. Schnabel. Zeits Angew. Phys., **22**, 136 (1967).
- [10] N.A. Abdullayev, T.G. Kerimova. Phys. B: Condens. Matter, **404**, 5215 (2009).
- [11] Г.Л. Беленький, Н.А. Абдуллаев, В.Н. Зверев, В.Я. Штейншрайбер. Письма ЖЭТФ, **47**, 498 (1988).
- [12] Н.Ф. Мотт, Э.А. Девис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1974).
- [13] Y. Ootuka, A. Kawabata. Progr. Theor. Phys., **84**, 249 (1985).
- [14] V.K.S. Shante, C.M. Varma, A.N. Bloch. Phys. Rev. B, **8**, 4885 (1973).
- [15] A. Khater, M. Balkanski, C. Julien, M. Weber. Phys. Rev. B, **37**, 8278 (1988).
- [16] Б.М. Аскеров. *Кинетические эффекты в полупроводниках* (М., Наука, 1970).
- [17] J.R. Drabble, R. Wolfe. Proc. Phys. Soc., **69**, 1101 (1956).
- [18] А.Е. Карькин, В.В. Щенников, Б.Н. Гошицкий, С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов, В.А. Кульбачинский. ФТТ, **45**, 2147 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

Features of the mechanism of charge transfer in layered Bi_2Te_3 single crystals, doped by chlorine and terbium

N.A. Abdullaev, N.M. Abdullaev, H.V. Aliguliyeva, T.G. Kerimova, G.S. Mehdiyev, S.A. Nemov*

Abdullaev Institute of Physics,
National Academy of Sciences of Azerbaijan,
Az-1143 Baku, Azerbaijan

* St. Petersburg State Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Temperature dependences ($T = 5\text{--}300\text{ K}$) of resistivity in the plane of layers and in the direction perpendicular to the layers, and Hall effect and magnetoresistance as well ($H < 80\text{ kOe}$, $T = 0.5\text{--}4.2\text{ K}$) in Bi_2Te_3 single crystals doped by chlorine and terbium are investigated. It is shown that doping of Bi_2Te_3 by atoms of a terbium turns out acceptor effect and results in increase of a hole concentration. The doping by atoms of chlorine changes not only type of conductivity of Bi_2Te_3 to n -type, but also character of conductivity. In temperature dependences of resistivity in the direction perpendicular to the layers there is a range with the activation conductivity caused hopping conductivity between localized states. The mechanism of charge transfer in Bi_2Te_3 single crystals doped by chlorine is proposed.