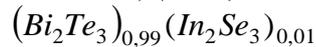


**ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ  
 $Bi_2Te_3$ , ЛЕГИРОВАННОМ МЕДЬЮ, И ТВЕРДОГО РАСТВОРА**



**Н.А.АБДУЛЛАЕВ, С.Ш.КАХРАМАНОВ, Т.Г.КЕРИМОВА,  
К.М.МУСТАФАЕВА**

*Институт физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, Баку, пр. Джавида, 33*

Исследованы эффект Холла и магнитосопротивление в монокристаллах  $Bi_2Te_3$ , легированных медью, и в твёрдом растворе  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  ( $H \sim 0 \div 80$  кЭ,  $T = 0,5 \div 4,2$  К) при различных ориентациях магнитного поля. В области сильных магнитных полей ( $H > 30$  кЭ) наблюдались осцилляции магнитосопротивления, периодичные в обратном магнитном поле, т.н. осцилляции Шубникова-де Гааза. Из периода осцилляций были оценены площади экстремального сечения Ферми поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля. Показано, что легирование медью практически не меняет форму Ферми поверхности. В твёрдом растворе  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  наблюдаются два периода осцилляций, что свидетельствует о двух экстремальных сечениях Ферми поверхности поверхностью, перпендикулярной направлению магнитного поля. Из ориентационной зависимости магнитосопротивления установлено, что наблюдаемые два периода осцилляций могут быть вкладками различных ориентаций слоёв вследствие несовершенства структуры твёрдых растворов.

**ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, соединения  $A_2^V B_3^{VI}$  и твёрдые растворы на их основе нашли широкое практическое применение в качестве высокоэффективных термоэлектрических преобразователей [1]. Современные исследования монокристаллов  $Bi_2Te_3$ , легированных различными элементами, и твёрдых растворов направлены на исследование возможности расширения диапазона рабочих температур таких материалов и повышения термоэлектрической эффективности соединений на основе  $A_2^V B_3^{VI}$  [2-6]. В настоящей работе представлены результаты исследований гальваномагнитных эффектов в слоистых монокристаллах  $Bi_2Te_3$ , легированных медью, и в твёрдом растворе  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  в сильных магнитных полях при различных ориентациях магнитного поля. Исследования ориентационной зависимости поперечного магнитосопротивления, с одной стороны, несут информацию о подвижности носителей заряда, а с другой стороны, дают представление о структуре поверхности Ферми.

Монокристаллы группы  $A_2^V B_3^{VI}$  обладают ромбоэдрической структурой и относятся к кристаллам с пространственной группой  $D_{3d}^5$  ( $R\bar{3}m$ ) [1]. Монокристаллы  $A_2^V B_3^{VI}$  принадлежат большой группе соединений, кристаллизующихся в слоистую структуру, слои в которых перпендикулярны оси симметрии третьего порядка.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Монокристаллы  $A_2^V B_3^{VI}$  выращивались методом Бриджмена и вертикальной направленной кристаллизацией из компонент со стехиометрическим соотношением. Зоннонаправленная кристаллизация проводилась при скорости перемещения зоны 3см/час. Рентгенструктурные исследования образцов проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. О высоком качестве кристаллов косвенно свидетельствовало достаточно низкое значение сопротивления образцов, обусловленное высокой подвижностью носителей заряда, и чёткая картина квантовых осцилляций большой амплитуды поперечного магнитосопротивления.

Исследования проводились в интервале температур  $0,5 \div 5K$  и магнитных полях вплоть до 8Тл. При гальваномагнитных исследованиях образец помещался в центр сверхпроводящего соленоида. Образцы для исследований получались из монокристаллических слитков простым скалыванием вдоль поверхности, содержащей плоскость слоя. Образцы приготавливались в форме прямоугольных пластин, толщинами  $0,2 \div 0,8mm$ . Измерения проводились по селективной методике на переменном токе частотой 20Гц, величина тока не превышала 1мА. Ток направлялся в плоскости слоев. Имелась возможность изменения направления магнитного поля относительно плоскости слоя (оси симметрии третьего порядка), но всегда направление магнитного поля было перпендикулярно направлению тока. В настоящей работе представлены данные о магнитосопротивлении при трёх ориентациях магнитного поля относительно плоскости слоёв: магнитное поле направлено в плоскости слоёв ( $\alpha=0^0$ ), магнитное поле направлено под углом  $45^0$  к плоскости слоёв ( $\alpha=45^0$ ) и магнитное поле перпендикулярно плоскости слоёв ( $\alpha=90^0$ ). Температуры ниже 1К получались с помощью криооткачки изотопа гелия  $He^3$ .

Как известно, соединения  $A_2^V B_3^{VI}$  при синтезе из расплава стехиометрического состава характеризуются наличием значительного количества собственных точечных дефектов структуры, обусловленных переходом атомов  $A$  в позиции  $B$  в решётке [1]. Поскольку такие антиструктурные дефекты являются акцепторами, эти соединения изначально обладают высокой концентрацией дырок  $p \sim 10^{19} cm^{-3}$ . В слоистых монокристаллах  $Bi_2Te_3$ , легированных медью, медь оказывает донорное воздействие, частично компенсируя дырки, и потому концентрация дырок по данным холловских измерений была несколько ниже ( $p \sim 5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ ). Компенсация дырок наблюдалась и в твёрдом растворе  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$ , где концентрация дырок составляла  $p \sim 7 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ .

### ТЕОРИЯ

Как известно, в сильных магнитных полях (это такие поля, при которых  $\mu B > 1$ , здесь  $\mu$  - подвижность носителей заряда,  $B$  - индукция магнитного поля) энергия носителей заряда квантуется и в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля, принимает дискретные значения (т.н. уровни Ландау). При изменении величины магнитного поля  $N$ -тый уровень Ландау перемещается относительно уровня Ферми  $\xi$  и при каждом его пересечении (соответствующим разным  $N$ ) обуславливает всплеск плотности состояний на уровне Ферми. Поскольку кинетические и некоторые другие эффекты в

вырожденных полупроводниках определяются, в основном, носителями с энергией, близкой к  $\xi$ , то это влечёт за собой осцилляции ряда величин при изменении магнитного поля  $H$ , например, электропроводности (эффект Шубникова - де Гааза). Например, из периодов  $P$  осцилляций магнитосопротивления можно оценить экстремальные площади сечения  $S_F$  поверхности Ферми плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля. Меняя направление магнитного поля, можно, таким образом, исследовать Ферми поверхность исследуемых соединений.

В общем случае для замкнутой поверхности Ферми произвольной формы период осцилляций определяется выражением [7]

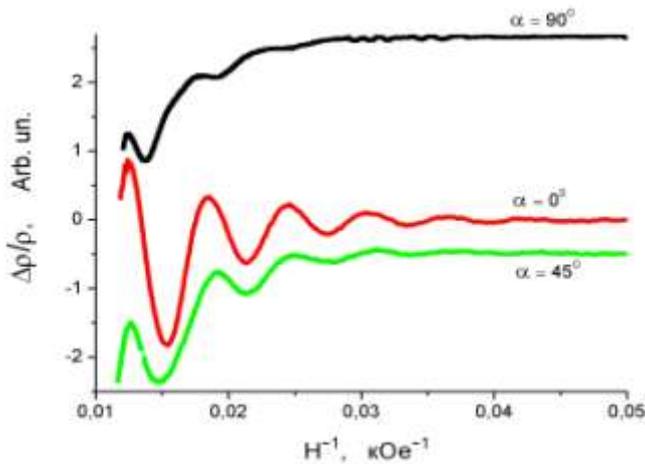
$$P\left(\frac{1}{H}\right) = \frac{2\pi e}{\hbar c S_F}, \quad (1)$$

здесь  $S_F$  - экстремальная площадь сечения поверхности Ферми  $\varepsilon(\vec{k}) = \mu_F$  плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

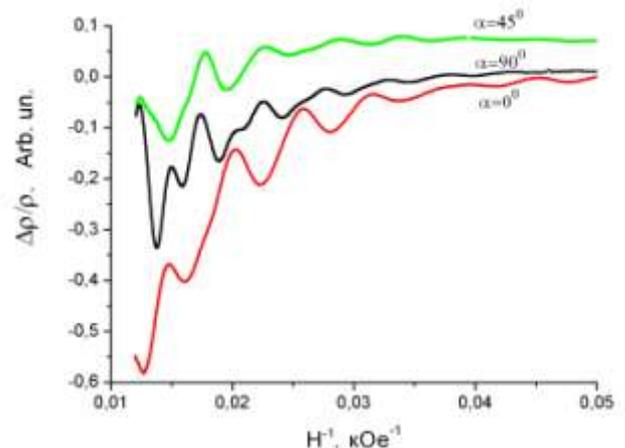
Нами было выявлено, что при низких температурах ( $T \sim 0,5K$ ) в области высоких магнитных полей ( $H > 30kЭ$ ) на магнитолевых зависимостях магнитосопротивления в монокристаллах  $Bi_2Te_3$ , легированных медью, и в твёрдом растворе  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  наблюдаются осцилляции магнитосопротивления. По специально написанным программам нами была выделена осциллирующая часть магнитосопротивления, она периодична в обратном магнитном поле.

На Рис.1 приведена выделенная часть осцилляции магнитосопротивления в монокристаллах  $Bi_2Te_3$ , легированных медью, при трёх ориентациях магнитного поля относительно плоскости скола (слоя) образца. Углы между направлением магнитного поля и плоскостью слоя составляли  $\alpha = 90^\circ, 45^\circ$  и  $0^\circ$ .



**Рис.1.**

Осциллирующая часть магнитосопротивления ( $T=0,5K$ ), построенная в обратном магнитном поле для трёх различных ориентаций магнитного поля относительно плоскости слоя в  $Bi_2Te_3$  легированном медью.



**Рис.2.**

Осциллирующая часть магнитосопротивления ( $T=0,5K$ ), построенная в обратном магнитном поле для трёх различных ориентаций магнитного поля относительно плоскости слоя в  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$ .

Как видно из Рис.1, наиболее отчётливые осцилляции поперечного магнитосопротивления наблюдались при направлении магнитного поля вдоль поверхности образца, т.е. в плоскости слоя (угол  $\theta^0$ ). Измерения показывают, что соответствующие периоды осцилляций магнитосопротивления составляют:  $T(1/H) = 5,5 * 10^{-6} \text{ Э}^{-1}$  при  $\alpha = 90^0$ ,  $T(1/H) = 6,1 * 10^{-6} \text{ Э}^{-1}$  при  $\alpha = 45^0$ ,  $T(1/H) = 6,0 * 10^{-6} \text{ Э}^{-1}$  при  $\alpha = 0^0$ . Соответственно анизотропия экстремального сечения поверхности Ферми  $S_F$ , отнесённая к экстремальному сечению  $S_t$  плоскостью, перпендикулярной оси третьего порядка в  $Bi_2Te_3$ , легированном медью, будет равна примерно (формула 1):  $S_F(\alpha = 45^0)/S_t = S_F(\alpha = 45^0)/S(\alpha = 90^0) = 0,9$  и  $S_F(\alpha = 0^0)/S_t = 0,92$ . Эти величины близки к значениям анизотропии экстремального сечения поверхности Ферми в нелегированном  $Bi_2Te_3$  [1]. Таким образом, можно заключить, что легирование медью не приводит к видимым изменениям поверхности Ферми.

На Рис.2 представлены выделенные части осцилляций магнитосопротивления в твёрдом растворе  $Bi_2Te_3-In_2Se_3$  (с содержанием 1 мол.%  $In_2Se_3$ ) при магнитном поле, направленном перпендикулярно слоям ( $\alpha = 90^0$ ), параллельно плоскости слоёв ( $\alpha = 0^0$ ) и под углом  $45^0$  к плоскости слоёв твёрдого раствора  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  при температуре  $T \sim 0,5\text{K}$ . При  $\alpha = 90^0$  хорошо заметны осцилляции двух периодов: одни осцилляции периодичны с периодом  $T(1/H) = 5 * 10^{-6} \text{ Э}^{-1}$ , а другие осцилляции - с периодом  $T(1/H) = 5,4 * 10^{-6} \text{ Э}^{-1}$ . Это свидетельствует о том, что имеются два экстремальных сечения поверхности Ферми плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля. Из Рис.2 совершенно очевидно, что эти осцилляции с двумя периодами при  $\alpha = 90^0$  являются наложением осцилляций одного периода, наблюдаемого при углах между направлением магнитного поля и плоскостью слоёв  $\alpha = 0^0$  и  $\alpha = 45^0$ . Возможно это может быть следствием реальной структуры твёрдого раствора и неправильной упаковки слоёв относительно друг друга.

Авторы благодарят коллектив Лаборатории электронной кинетики Института физики твёрдого тела РАН за предоставление возможности проведения низкотемпературных исследований.

1. Б.М.Гольцман, В.А.Кудинов, И.А.Смирнов, *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $Bi_2Te_3$* . Наука., М. (1972).
2. Г.Т.Алексеева, П.П.Константинов, В.А.Кутасов, Л.Н.Лукьянова, Ю.И.Равич, *ФТТ*, **38** (1996) 2998.
3. М.К.Житинская, С.А.Немов, Л.Д.Иванова, *ФТТ*, **44** (2002) 41.
4. В.А.Кутасов, Л.Н.Лукьянова, П.П.Константинов, *ФТП*, **34** 389 (2000).
5. Р.Лайхо, С.А.Немов, А.В.Лашкул, Э.Лахдеранта, Т.Е.Свечникова, Д.С.Дворник, *ФТП*, **41** (2007) 565.
6. Н.П.Степанов, С.А.Немов, М.К.Житинская, Т.Е.Свечникова, *ФТП*, **41** 808 (2007).
7. И.М.Лифшиц, А.М.Косевич, *ЖЭТФ*, **29** (1955) 730 .

**MISLƏ AŞQARLANMIŞ  $Bi_2Te_3$  VƏ  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  BƏRK MƏHLULUNDA  
MAQNİTMÜQAVİMƏTİN SAHƏSİN ORİYENTASIYASINDAN ASILILIĞI**

**N.A.ABDULLAYEV, S.Ş.QƏHRƏMANOV, T.H.KƏRİMOVA, K.M.MUSTAFAYEVA**

Mislə aşqarlanmış  $Bi_2Te_3$  və  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  bərk məhlulunda ( $H \sim 0 \div 80$  kE,  $T = 0.5 \div 4.2$  K) maqnit sahəsinin müxtəlif oriyentasiyalarında Hall effekti və maqnitmüqaviməti tədqiq edilmişdir. Güclü maqnit sahələrində ( $H > 30$  kE) tərs maqnit sahəsində periodik olan maqnitmüqaviməti ossilyasiyası -Şubnikov-de Haas ossilyasiyası müşahidə olunmuşdur. Ossilyasiya periodundan maqnit sahəsinə perpendikulyar istiqamətdə Fermi kəsiyinin ekstremal sahəsi təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, gümüşlə aşqarlanma praktiki olaraq, Fermi səthinin formasını dəyişmir.  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  bərk məhlulunda 2 ossilyasiya periodu müşahidə edilmişdir ki, bu da maqnit sahəsinə perpendikulyar istiqamətdə 2 ekstremal Fermi kəsiyini təsdiq edir. Maqnitmüqavimətinin maqnit sahəsinin oriyentasiyasından asılılığından müəyyən edilmişdir ki, müşahidə olunan 2 ossilyasiya periodu bərk məhlulların quruluş qeyri-mükəmməlliyi səbəbindən layların müxtəlif oriyentasiyalarına əlavə verir.

**ORIENTATIONAL DEPENDENCE OF MAGNETIC RESISTIVITY IN  $Bi_2Te_3$  DOPED BY Cu  
AND SOLUTION  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$**

**N.A.ABDULLAYEV, S.S.GAHRANANOV, T.G.KERIMOVA, K.M.MUSTAFAYEVA**

Hall effect and magnetoresistivity in  $Bi_2Te_3$  doped by Cu and  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  ( $H \sim 0 \div 80$  kE,  $T = 0.5 \div 4.2$  K) solid solution at different orientation of magnetic field have been investigated. At the high (strong) magnetic field ( $H > 30$  kE) the magnetoresistivity oscillations, periodical in reverse magnetic field, called Shubnikov-de Haas oscillation, have been observed. By the oscillation period the cross extreme section of Fermi surface by plane perpendicular to magnetic field has been evaluated. It has been shown that doping by Cu copper didn't change the form of Fermi surface. In  $(Bi_2Te_3)_{0,99}(In_2Se_3)_{0,01}$  solid solution two oscillations due to two extreme sectional areas of Fermi surface by plane perpendicular to magnetic field direction have been observed. It has been established from the orientational dependence of that the observed two oscillation periods give contribution to different layer orientation due to imperfection of solid solution structure.

Редактор: Д.Абдинов