

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $GeNi_3Te_5$

Ф.Н.АБДУЛЛАЕВ, Г.Г.ГУСЕЙНОВ, Р.Д.КУРБАНОВА, Н.А.АБДУЛЛАЕВ

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

Получены монокристаллы $GeNi_3Te_5$. Методом рентгеноструктурного анализа установлена их структура. Четырёхзондовым комбинационным методом исследована электропроводность образцов в широкой области температур 5÷300К. Установлен “металлический” характер температурной зависимости проводимости монокристаллов $GeNi_3Te_5$ в плоскости слоёв и в направлении перпендикулярном слоям. Существующая анизотропия проводимости объясняется с учётом реальной структуры монокристаллов.

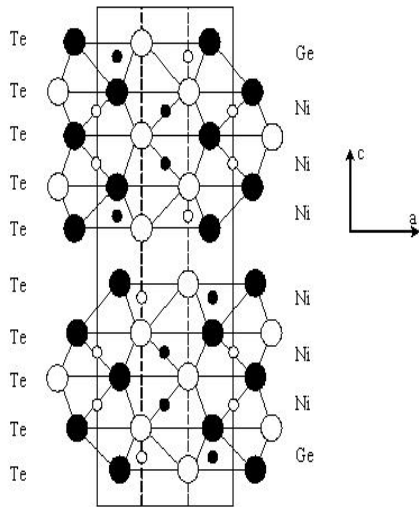
При изучении характера химического взаимодействия квазибинарного сечения $GeTe-Ni_3Te_4$ было обнаружено образование слоистого монокристаллического состава $GeNi_3Te_5$. Учитывая перспективность практического применения в электронной технике материалов со слоисто-цепочечной структурой с присутствием 3d-металлов, было целесообразным выращивание монокристаллов вышеуказанного состава, изучение их физических свойств в связи с особенностями их кристаллического строения. Монокристаллы $GeNi_3Te_5$ являются структурными аналогами известных соединений $Fe_2Ga_2S_5$ и $Zn_2In_2S_5$. В отличие от бинарных соединений в тройных соединениях ввиду наличия атомов двух сортов (вследствие проявления различной валентности) в катионной подрешётке помимо катионных и анионных вакансий возможны образования антиструктурных дефектов, обусловленных взаимозамещением катионов. Это приводит к возникновению спектра локальных состояний и, в частности, особенностям переноса заряда. Целью настоящих исследований являлось изучение процессов переноса заряда в монокристаллах $GeNi_3Te_5$ в разных кристаллографических направлениях и их взаимосвязь с особенностями строения кристаллической решётки.

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ И ИХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Монокристаллы $GeNi_3Te_5$ получены из предварительно синтезированного образца в эвакуированной до остаточного давления 10^3 Па кварцевой ампуле методом длительного отжига в течение 3 суток. Количество вещества составляло около 3г, температура отжига 700К. По завершении процесса отжига было обнаружено, что вся масса вещества была кристаллизована в виде слоистых монокристаллов тёмного цвета с характерным металлическим блеском, легко раскалывающихся на тоненькие пластинки.

Рентгенографический анализ структуры полученных монокристаллов проводился на основе изучения порошкограмм (ДРОН-3), Лауэ и рентгенограмм качаний вокруг двух направлений (001) и (100) и рентгенограмм отражения от поверхности кристалла. Из перечисленных исследований было установлено, что полученные монокристаллы обладают гексагональной симметрией с периодами кристаллической решётки: $a=4,02\text{Å}$, $c=32,44\text{Å}$, пространственной группой симметрии $R\bar{6}_3/mmc$, $Z=2$, $V=454,3\text{Å}^3$, $V_{Te}=45,43\text{Å}^3$, плотностью $\rho=3,25\text{г/см}^3$, температурой плавления $T_{пл}\sim 910\text{К}$. Сопоставительный анализ структурных расчётов выявил, что аналогичными структурными параметрами и характеристиками обладают слоистые кристаллы состава $Fe_2Ga_2S_5$ [1], которые, как отмечено выше, являются структурными аналогами полученных нами

монокристаллов $GeNi_3Te_5$. Для указанной группы кристаллов характерна слоистая двухпакетная структура. Кристаллическая решётка содержит десять атомных слоёв Te . Каждый пакет состоит из двойных октаэдрических слоёв $NiTe_6$ (Рис.1), которые замыкаются снизу одинарным тетраэдрическим слоем $GeTe_4$ и сверху аналогичным тетраэдрическим слоем $NiTe_4$. В октаэдрах атомы никеля в направлении (100) соединены посредством рёбер по зигзагообразной конфигурации, а между собой сами октаэдры соединены посредством граней, в результате чего структура сжимается, и расстояния $Ni-Ni$ в октаэдрах, укорачиваясь, составляют $\sim 2,9\text{Å}$, в результате чего создаётся металлическая связь.



Последовательность расположения атомов в пакетах следующая:



Рис.1.

Кристаллическая структура монокристаллов $GeNi_3Te_5$.

ЧЕТЫРЁХЗОНДОВАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

При исследованиях электрических свойств образцов монокристаллов решающее значение имеет способ нанесения контактов, при этом определённые требования предъявляются как к направлению силовых линий напряжённости электрического поля в образце, так и к самим контактам.

В 1967г. P.Schnabel [2] предложил усовершенствованный комбинированный четырёхзондовый метод для изучения анизотропии электропроводности образцов, приготовленных в виде тонких пластинок. Такие пластинки легко получить из слоистых материалов путём их естественного скола в плоскости параллельной слоям. Для зондовых методов силовые линии напряжённости электрического поля непараллельны и распределены неоднородно по сечению образца, в связи с чем сначала необходимо теоретически рассчитывать распределение электрического потенциала в образце, а затем находить взаимосвязь между удельным сопротивлением и экспериментально измеряемыми величинами: током и напряжением.

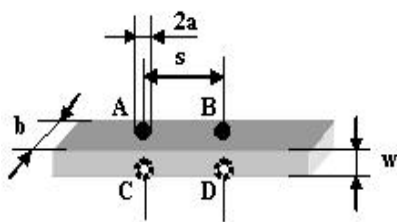


Рис.2.

Схема нанесения контактов на исследуемый образец.

Сущность данного метода заключается в том, что контакты А,В,С,Д попарно наносятся на противоположные поверхности изучаемого образца в прямоугольной геометрии (Рис.2). Сначала от внешнего источника питания ток I_{AC} направляется через контакты А и С, а напряжение U_{BD} снимается с контактов В и D (I^{ay} геометрия Шнабеля). Затем ток I_{AB} направляется через контакты А и В, а напряжение U_{CD} снимается с контактов С и D (II^{ay} геометрия Шнабеля). Таким образом определяются сопротивления $R_1 = \frac{U_{BD}}{I_{AC}}$ и $R_2 = \frac{U_{CD}}{I_{AB}}$, являющиеся параметрами

исходной задачи. Для определения удельного сопротивления данного образца, как указано было выше, необходимо теоретически рассчитать распределение электрического потенциала в образце.

Решение уравнения Лапласа позволяет получить следующие выражения для вычисления удельного сопротивления образцов слоистых материалов [3]. Из соотношения

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{G(\alpha^*, \beta)}{H(\alpha^*, \beta)}, \quad (1)$$

где

$$G(\alpha^*, \beta) = \frac{\alpha^*}{\beta} \left[\arcsin \beta + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \arcsin \left(\frac{2\beta}{\sqrt{n^2 \alpha^{*2} + (1+\beta)^2} + \sqrt{n^2 \alpha^{*2} + (1-\beta)^2}} \right) \right], \quad (2)$$

$$H(\alpha^*, \beta) = \frac{2\alpha^*}{\beta} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\operatorname{arctg} \frac{\beta}{(2n+1)\alpha^*} - \arcsin \left(\frac{2\beta}{\sqrt{(2n+1)^2 \alpha^{*2} + (1+\beta)^2} + \sqrt{(2n+1)^2 \alpha^{*2} + (1-\beta)^2}} \right) \right],$$

а значения $\alpha = \frac{w}{s}$, $\beta = \frac{a}{s}$, a - радиус контакта, s - расстояние между контактами, лежащими на одной грани пластинки, w - толщина образца (Рис.2), определяется параметр α^* . Затем из $\alpha^* = \alpha \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}}$ вычисляется анизотропия удельного сопротивле-

ния $\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}$ (ρ_{\parallel} - удельное сопротивление образца в плоскости слоя, а ρ_{\perp} - в направлении перпендикулярном слоям). Наконец, из соотношений

$$\rho_{\parallel} = \frac{R_1 \pi w}{G(\alpha^*, \beta)} \quad \rho_{\perp} = \rho_{\parallel} \left(\frac{\alpha^*}{\alpha} \right)^2 \quad (3)$$

определяются сами величины ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения удельных сопротивлений проводились по вышеописанной методике на переменном токе частотой 20,5Гц в температурном интервале 5÷300К. Образцы для измерений готовились скалыванием вдоль плоскости слоя в форме прямоугольных пластин толщинами 0,15÷0,5мм и размерами в плоскости слоя ~5×7мм². Индиевые контакты наносились на свежесколотые поверхности образца, их размеры и расположение удовлетворяли всем необходимым требованиям. Напряжённость приложенного электрического поля ($E=10 - 10^2$ В/см) соответствовала омической области вольтамперной характеристики.

На Рис.3 представлена температурная зависимость анизотропии удельного сопротивления слоистых монокристаллов $GaNi_3Te_5$. Как видно из рисунка, анизотропия проводимости значительна и слабо падает с температурой (от 29 при 275К до 26,4 при 5К). Такая анизотропия проводимости, несоответствующая анизотропии эффективных масс носителей заряда, характерна практически для всех слоистых кристаллов, например для InSe [4] и типичного слоистого кристалла графита [5]. Дело в том, что для слоистых кристаллов вследствие слабости межслоевых сил характерно наличие большого количества межслоевых дефектов, дефектов стыковки слоёв и др. Эти дефекты, практически не влияя на движение носителей заряда в плоскости слоёв, оказывают значительное влияние на движение носителей заряда в направлении перпендикулярном слоям. На Рис.4 приведены

температурные зависимости удельных сопротивлений $GeNi_3Te_5$, вычисленные по соотношениям (1÷3). Хорошо заметна типичная для металлической проводимости температурная зависимость удельного сопротивления. Как в плоскости слоёв (ρ_{par}), так и перпендикулярно слоям (ρ_{per}) величина удельного сопротивления с уменьшением температуры линейно уменьшается. Температурные коэффициенты удельного сопротивления в плоскости слоёв и перпендикулярно им равны соответственно $\alpha_{par} = 8,2 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см} / \text{К}$ и $\alpha_{per} = 2,5 \times 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см} / \text{К}$.

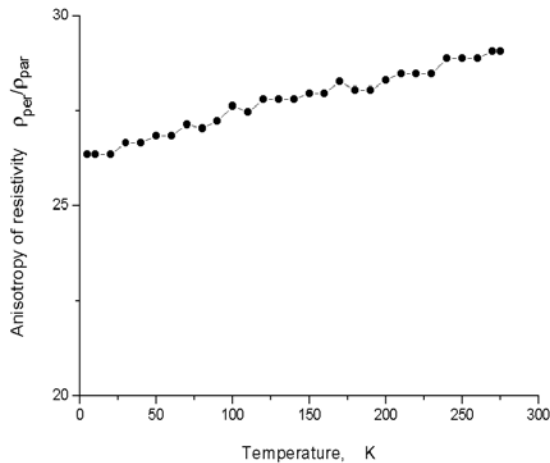


Рис.3.

Анизотропия удельного сопротивления в монокристаллах $GeNi_3Te_5$.

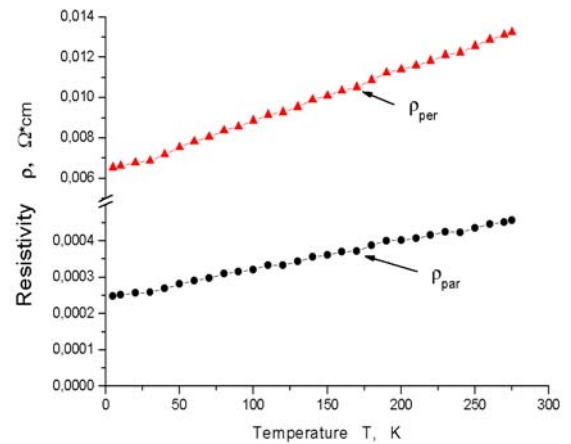


Рис.4.

Температурные зависимости удельного сопротивления в слоистом $GeNi_3Te_5$.

Если бы электрическое сопротивление определялось только рассеянием носителей заряда на фонах, то при очень низких температурах ($T \rightarrow 0\text{K}$) сопротивление практически обращалась бы в нуль. В реальности имеются различные нарушения периодичности решётки (дислокации, вакансии, примеси инородных атомов и т.п.) и потому кроме рассеяния на фонах носители претерпевают другие виды рассеяния. Это приводит к тому, что при низких температурах, при которых фоновым механизмом рассеяния можно пренебречь, кристаллы обладают сопротивлением, называемым ещё остаточным сопротивлением. Таким образом, величина остаточного сопротивления в металлах характеризует степень чистоты и совершенства кристаллической структуры исследуемого образца. Неудивительно, что величина остаточного сопротивления в направлении перпендикулярном слоям ($\rho_{per}(T = 4,2\text{K}) = 6,4 \times 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) значительно превышает величину остаточного сопротивления в плоскости слоёв

$$(\rho_{par}(T = 4,2\text{K}) = 2,5 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}).$$

Авторы благодарны коллективу лаборатории электронной кинетики Института физики твёрдого тела Российской АН за предоставление возможности проведения низкотемпературных исследований.

1. P.G.Cascarano, L.Dogguy-Smiri, Nguen-Huy Dung, *Acta Cryst.*, **C43** (1987) 2050.
2. P.Schnabel, *Zeits. Angew. Phys.*, **22** (1967) 136.

3. Ф.Н.Абдуллаев, Т.Г.Керимова, Н.А.Абдуллаев, *Материалы 1-ой Международной научной конференции "Обратные задачи теоретической и математической физики"*, (2003) 97.
4. Г.Л.Беленький, Н.А.Абдуллаев, В.Н.Зверев, В.Я.Штейншрайбер, *Письма в ЖЭТФ*, **47** (1988) 498.
5. C.Uher and L.M.Sander, *Phys.Rev.*, **B27** (1983) 1326.

***GeNi₃Te₅* MONOKRİSTALLARINDA ELEKTRİK KEÇİRİCİLİYİN MEXANİZMİ**

F.N.ABDULLAYEV, G.H.HUSEYNOV, R.D.KURBANOVA, N.A.ABDULLAYEV

GeNi₃Te₅ monokristalları alınmışdır və rentqenoqrafik analiz metodu ilə onların strukturu müəyyən olunmuşdur. Nümunələrin elektrikkeçiriciliyi dördzondlu, kombinasiya metodu ilə 5÷300K geniş temperatur intervalında tədqiq edilmişdir. *GeNi₃Te₅* monokristallarının keçiriciliyinin layların müstəvisində və laylara perpendikulyar istiqamətdə temperatur asılığının "metallik xarakteri" müəyyən edilmişdir.

MECHANISM OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN *GeNi₃Te₅* MONOCRYSTALS

F.N.ABDULLAYEV, G.H.HUSEYNOV, R.D.KURBANOVA, N.A.ABDULLAYEV

GeNi₃Te₅ monocrystals were obtained and by X-ray diffraction analysis method their structure were established. By the four probes combination method the electrical conductivity of samples in wide temperature interval 5÷300K was investigated. It was established the "metallic" character of temperature dependence of conductivity of *GeNi₃Te₅* monocrystals in layer of planes and in normal direction of planes. The existing anisotropy of conductivity was explained by taking into account the real structure of monocrystals.

Редактор: М.Алиев