

## 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.

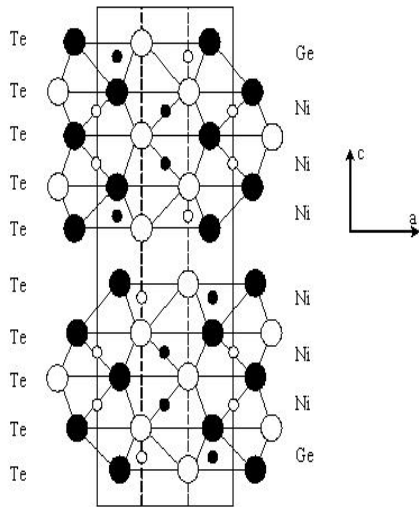
При изучении характера химического взаимодействия квазибинарного сечения  $GeTe-Ni_3Te_4$  было обнаружено образование слоистого монокристаллического состава  $GeNi_3Te_5$ . Учитывая перспективность практического применения в электронной технике материалов со слоисто-цепочечной структурой с присутствием 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 взаимозаменением 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:



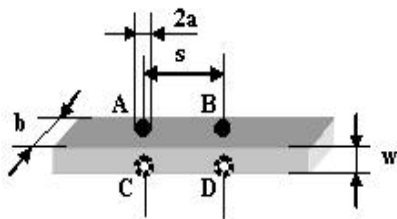
**Рис.1.**

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  $\alpha^*$ . Затем из  $\alpha^* = \alpha \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}}$  вычисляется анизотропия удельного сопротивле-

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

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

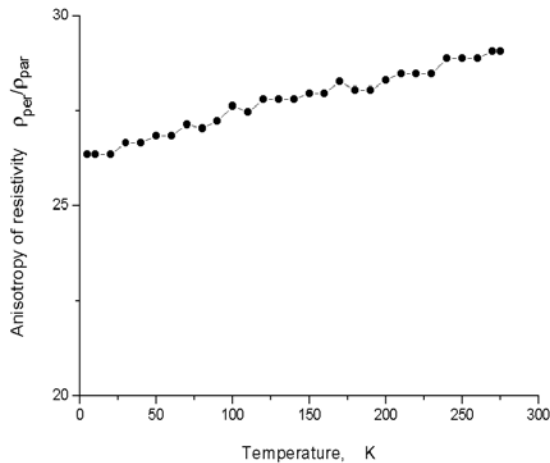
определяются сами величины  $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$ .

### 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 ~5×7мм<sup>2</sup>. 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.

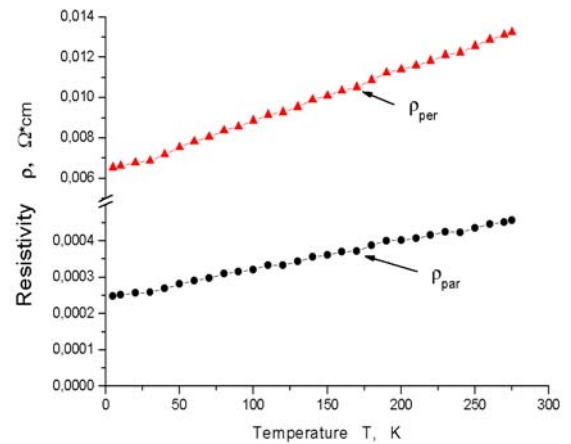
На Рис.3 представлена температурная зависимость анизотропии удельного сопротивления слоистых монокристаллов  $GaNi_3Te_5$ . Как видно из рисунка, анизотропия проводимости значительна и слабо падает с температурой (от 29 при 275К до 26,4 при 5К). Такая анизотропия проводимости, несоответствующая анизотропии 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 ( $\rho_{par}$ ), так и перпендикулярно слоям ( $\rho_{per}$ ) 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 обращалось 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.

***GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* MONOKRİSTALLARINDA ELEKTRİK KEÇİRİCİLİYİN MEXANİZMİ**

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

*GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* monokristalları alınmışdır və rentqenoqrafik analiz metodu ilə onların strukturu müəyyən olunmuşdur. Nümunələrin elektrikkeçiriciliyi dördzondlu, kombinasiya metodu ilə 5÷300K geniş temperatur intervalında tədqiq edilmişdir. *GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* monokristallarının keçiriciliyinin layların müstəvisində və laylara perpendikulyar istiqamətdə temperatur asılığının "metallik xarakteri" müəyyən edilmişdir.

**MECHANISM OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN *GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* MONOCRYSTALS**

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

*GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* 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 *GeNi<sub>3</sub>Te<sub>5</sub>* 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