

## ЭФФЕКТ КОНДО В ПОЛУПРОВОДНИКАХ $A^{IV}V^{VI}$ С НЕЦЕНТРАЛЬНЫМИ ИОНАМИ

А.И.Дмитриев, В.И.Лазоренко, В.И.Литвинов, Г.В.Лашкарев

Обнаружена логарифмическая температурная зависимость сопротивления  $\rho(T)$  в соединениях  $PbTe_{1-x}S_x$ , которая подавляется электрическим полем. Аномалия  $\rho(T)$  обусловлена рассеянием электронов на двухуровневых центрах – нецентральных ионах  $S^{2-}$  и чувствительна к наличию упорядочения диполей.

Сегнетоэлектрические фазовые переходы (СФП) в кристаллах с нецентральными ионами являются предметом интенсивного исследования (см. обзор <sup>1</sup>). В дополнение к известным полупроводниковым соединениям  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ , в которых нецентральный является ион  $Ge^{2+}$  <sup>1</sup>, недавно синтезировано соединение с анионным замещением  $PbTe_{1-x}S_x$ , демонстрирующее СФП, обусловленный нецентральным анионом  $S^{2-}$  <sup>3</sup>. К настоящему времени в  $PbTe_{1-x}S_x$  исследованы сопротивление  $\rho(T)$  вблизи критической температуры  $T_c$  <sup>3</sup>, шубниковские осцилляции при  $T < T_c$  <sup>4</sup>.

Имея в виду некоторую общность свойств соединений  $PbGeTe$  и  $PbTeS$ , как узкощелевых полупроводников с СФП, обусловленным нецентральными ионами, можно ожидать в новом соединении  $PbTeS$  аномалию в сопротивлении, аналогичную имеющейся в  $PbGeTe$ . Аномалия состоит в наличии минимума и логарифмического роста сопротивления при понижении температуры в гелиевой области <sup>5, 6</sup>. Она обусловлена рассеянием частиц на ионах  $Ge^{2+}$ , которые представляют собой двухуровневые центры-диполи, туннелирующие вдоль одной из осей  $\langle 111 \rangle$ .

В настоящей работе выполнены измерения  $\rho(T)$  в монокристаллах  $PbTe_{1-x}S_x$  и пленках  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ , впервые обнаружен эффект типа Кондо в соединениях  $PbTe_{1-x}S_x$ , а также исследовано влияние на него электрического поля.

Исследования проводились четырехзондовым методом на монокристаллах  $PbTe_{1-x}S_x$  ( $x = 0,05$ ,  $n = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $x = 0,08$ ,  $n = 6,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), вырезанных в виде параллелепипеда с размерами  $6 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ , и пленке  $Pb_{0,96}Ge_{0,04}Te$  с концентрацией носителей  $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , напыленной на скол  $BaF_2$ . Состав монокристаллов определялся по зависимости  $T_c(x)$  с точностью до  $10^{-3}$  <sup>3</sup>. Состав пленок был задан соотношением компонент в шихте и контролировался оптическим методом по положению края оптического поглощения. Точность определения изменений  $\rho$  относительного его значений при  $T = 4,3 \text{ К}$  составляла 1%.

Результаты измерений  $\rho(T)$  монокристаллов  $PbTe_{1-x}S_x$  приведены на рис. 1. Характерная для эффекта Кондо линейная зависимость  $\rho(\ln T)$  наблюдалась без магнитных примесей, о чем свидетельствуют положительное магнетосопротивление и отсутствие аномалий магнитной восприимчивости. В интервале температур 4,3 – 40 К коэффициент Холла не обнаруживает аномалий и практически не зависит от температуры (с точностью до 10%).

Фиксация преимущественного направления примесных диполей электрическим полем должна подавлять рассеяние частиц с изменением направления диполя, аналогично тому, как магнитное поле подавляет эффект Кондо в кристаллах с магнитными примесями. Для создания заметного электрического поля в образце с высокой диэлектрической постоянной ( $10^3 - 10^4$ ) мы пропускали электрический ток через образец, который в случае  $Pb_{0,96}Ge_{0,04}Te$  был выполнен в виде пленки и имел поэтому большее сопротивление, чем монокристалл того же состава. На рис. 2 изображены зависимости  $\rho(\ln T)$  при различных значениях плотностей тока (напряженности "гянущего" электрического поля  $E$ ). С увеличением  $E$  исчезают сначала линейный участок зависимости, а далее и минимум сопротивления вообще.

<sup>1</sup>) Первое экспериментальное доказательство нецентральности  $Ge^{2+}$  в  $PbTe$  получено недавно в работе

Неомическое поведение, обусловленное разогревом носителей, наблюдается в  $\text{PbTe}$  лишь в полях  $E \sim 10^3$  В/см. Нами измерены вольт-амперные характеристики исследованных образцов. Например, в пленках  $\text{PbGeTe}$  в полях 20 – 100 В/см, когда обсуждаемая в статье аномалия сопротивления уже подавлена, вольт-амперная характеристика имеет омический характер, что свидетельствует об отсутствии неомичности из-за разогревных эффектов в использованных слабых полях.

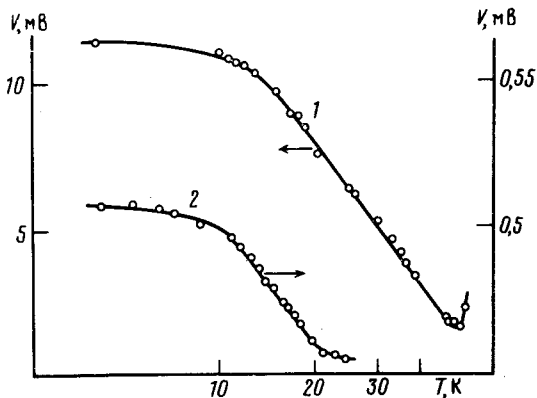


Рис. 1

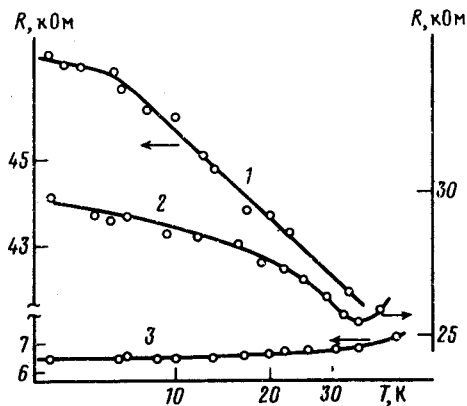


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость падения напряжения на зондовых контактах монокристаллов  $\text{PbTe}_{1-x}\text{S}_x$  от температуры; 1 –  $x = 0,05$ , 2 –  $0,08$

Рис. 2. Зависимость сопротивления зондовых контактов пленок  $\text{Pb}_{0,96}\text{Ge}_{0,04}\text{Te}$ ;  $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  от температуры при различной напряженности "тянущего" электрического поля  $E$ : 1 –  $E \approx 0,4$ ; 2 –  $0,9$ ; 3 –  $20$  В/см

Отметим, что аномалию  $\rho(T)$  мы наблюдали в ограниченном интервале составов  $x$ . Причина ограничения по  $x$  снизу тривиальна и состоит в проявлении пропорциональной  $x$  логарифмической части  $\rho(T)$ . Чтобы понять ограничение сверху, нужно учесть, что в упорядоченной фазе (именно в ней выполнены измерения  $\rho(T)$ ) имеется бесконечный кластер нецентральных ионов (сегнетоэлектрический или стекольный). С увеличением состава  $x$  уменьшается доля ионов, не принадлежащих к бесконечному кластеру. Именно эти индивидуальные центры или кластеры малых размеров являются в данном случае эффективными рассеивателями, т. к. направления их дипольных моментов не фиксированы взаимодействием с диполями, принадлежащими бесконечному кластеру.

#### Литература

1. Вугмейстер Б.Е., Глинчук М.Д. УФН, 1985, 146, 459.
2. Islam Q.T., Bunker V.A. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 2701.
3. Абдуллин Х.А., Лебедев А.И., Гаськов А.М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 229.
4. Дмитриев А.И., Лашкарев Г.В., Литвинов В.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 304.
5. Yaraneri H., Grassie A.D.C., Yusheng He, Loram J.W. J. Phys. C, 1981, 14L, 441.
6. Takano S., Kumashiro Y., Tsuji K. J. Phys. Soc., 1984, 53, 4309.

Институт проблем материаловедения  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
28 марта 1988 г.