

$$L_s^2 = \frac{\pi}{12N} s(s+1)(4s+5),$$

где N — концентрация электронов в пленке.

На рисунке показаны результаты численного решения уравнения (4) для параметров: $N=10^{27} \text{ м}^{-3}$, $U=16 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $\Gamma=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $\epsilon_a=0.8 \times 10^{-19} \text{ (а)}$ и $0.64 \cdot 10^{-19} \text{ Дж (б)}$. Как видно, зависимость $\langle n \rangle$ от толщины пленки L носит осцилляционный характер. Изменение энергии адатома при заполнении очередного уровня порядка $\Delta \epsilon_a \sim 10^{-20} \text{ Дж}$. Эта особенность хемосорбции на размерно-квантованной пленке может быть обнаружена в экспериментах по измерению энергии хемосорбции. Точность измерения современных экспериментов порядка $\sim 10^{-22} \text{ Дж}$ [4].

Автор признателен Ю. М. Гальперину за полезное обсуждение и интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Anderson P. V. // Phys. Rev. 1961. V. 124. N 1. P. 41—53.
 [2] Newns D. M. // Phys. Rev. 1969. V. 175. N 3. P. 1125—1135.
 [3] Кондратьев А. С., Кучма А. Е. Электронная ферми-жидкость нормальных металлов. ЛГУ, 1980. 200 с.
 [4] Электронная и ионная спектроскопия твердых тел / Под ред. Фирманса Л. М.: Мир, 1981. 468 с.

Институт проблем геотермии
 Дагестанский филиал АН СССР
 Махачкала

Поступило в Редакцию
 14 февраля 1989 г.

УДК 537.311

Физика твердого тела, том 31, в. 7, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 7, 1989

ЭФФЕКТ КОНДО И СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В $A^{IV}B^{VI}$, СОДЕРЖАЩИХ НЕЦЕНТРАЛЬНЫЕ ИОНЫ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

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

Эффект Кондо, возникающий при рассеянии носителей тока (НТ) на локализованных магнитных моментах, являлся прерогативой магнитных явлений. Тем удивительнее наблюдение эффекта этого типа в твердых телах, не содержащих локализованных магнитных моментов. Причиной тому — рассеяние НТ на диполях нецентральных ионов, являющихся электрическими аналогами локализованных магнитных моментов. Возникновение диполей может быть обусловлено легированием, а также различного рода неоднородностями. Роль последних наименее изучена.

Стимулирование структурного фазового перехода (СФП) превращениями в системе диполей типа порядок—беспорядок не является редкостью и наблюдалось в КОН и КОД [1], а также в других многокомпонентных соединениях [2]. В [3] показано, что эффективность дипольного механизма СФП в полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ полностью обусловлена свойствами электронной подсистемы (большой диэлектрической проницаемостью ϵ).

Целью настоящей работы является изучение влияния нецентральных ионов различного происхождения (геометрический фактор, одноосная деформация) в полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ на СФП и проявление эффекта типа Кондо в области температур ниже T_c (аномалии типа Кондо при $T > T_c$ исследованы в [4]).

СФП в полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ являются предметом детального изучения [5, 6]. Изовалентное легирование германием, приводящее к образованию нецентральных ионов Ge^{2+} , позволило обнаружить в $Pb_{1-x}Ge_xTe$ наряду с СФП при T_c эффект типа Кондо при $T < T_c$ [7]. Недавно исследованы свойства твердого раствора с изовалентным анионным замещением $PbTe_{1-x}S_x$, демонстрирующего СФП [8-10]. Подробные исследования в области $T < T_c$ позволили обнаружить второй СФП по температурной зависимости $\rho(T)$ и появление дополнительной частоты квантовых осцилляций магнитосопротивления [9].

Предполагая общность свойств соединений $Pb_{1-x}Ge_xTe$ и $PbTe_{1-x}S_x$ как узкощелевых полупроводников с СФП, обусловленными нецентральными ионами, можно объяснить низкотемпературные аномалии в сопротивлении $PbTe_{1-x}S_x$, исследованные нами подробно. Аномалия состоит в наличии минимума и логарифмического роста сопротивления при понижении температуры в гелиевой области (существенно ниже T_c). Она, по-видимому, обусловлена рассеянием НТ на нецентральных ионах Ge^{2+}

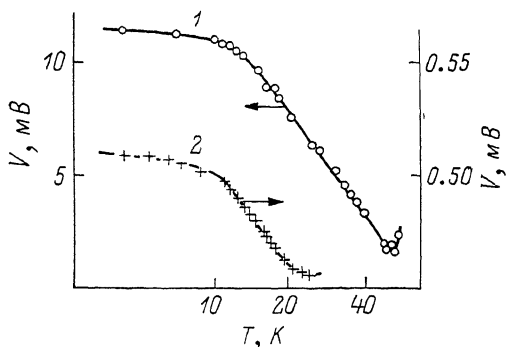


Рис. 1. Зависимость падения напряжения на зондовых контактах монокристаллов $PbTe_{1-x}S_x$ от температуры. $x=0.05$ (1), 0.08 (2).

или S^{2-} , которые при $T < T_c$ представляют собой двухуровневые центры — диполи, туннелирующие вдоль одной из осей $\langle 111 \rangle$. Результаты измерения $\rho(T)$ 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 свидетельствует отсутствие ориентационного парамагнетизма [10]. Наблюдаемый эффект не может быть следствием вымораживания мелких примесных центров, так как коэффициент Холла для всех обсуждаемых образцов и материалов с точностью до ошибки эксперимента оставался независимым от температуры и электрического поля до $T \leq 40$ К. Концентрация носителей тока составляла $5 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Эффект типа Кондо наблюдался в ограниченном интервале составов x , так как при увеличении x уменьшается концентрация эффективно рассеивающих центров. Это понятно, если учесть, что в сегнетоэлектрической фазе имеется основной, пронизывающий весь кристалл, сегнетоэлектрический кластер нецентральных ионов. С увеличением x уменьшается доля ионов, не принадлежащих кластеру. Именно эти центры и кластеры малых размеров являются эффективными рассеивателями, т. е. их дипольные моменты не коррелируют с дипольными моментами основного кластера.

Аналогия взаимодействия магнитных моментов с магнитным полем и диполей с электрическим полем E должна проявляться в снижении рассеяния НТ, связанного с упорядочением ориентации диполей, по мере возрастания E . Это должно приводить к уменьшению сопротивления образца, исчезновению эффекта типа Кондо, а также подавлению аномального возрастания $\rho(T)$ в районе СФП. В случае больших значений диэлектрической проницаемости исследуемых образцов ($\epsilon=10^3-10^4$) создаются определенные трудности при достижении значительных величин E ме-

тодом конденсатора. Поэтому нами использовалось «тянущее» электрическое поле, создаваемое приложенной к образцу разностью потенциалов. Для увеличения электрического поля образец выполнен в виде пленки, напыленной взрывным методом на подложку BaF_2 . В качестве исследуемого материала был использован твердый раствор $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$, поскольку именно на нем экспериментально доказана нецентральность ионов Ge [11]. Состав пленок был задан соотношением компонентов в распыленном материале и контролировался оптическими методами по краю собственного поглощения. Результаты измерений $\rho(T)$ при различных значениях E приведены на рис. 2. Видно, что увеличение E вызывает уменьшение удельного сопротивления в интервале температур 4.3—40 К, а также исчезновение линейного участка зависимости, а далее и минимума сопротивления вообще. Отметим, что преимущественная ориентация диполей электрическим полем подавляет второй СФП при $T < T_c$ в $\text{PbTe}_{1-x}\text{S}_x$, что наблюдалось в наших экспериментах.

Таким образом, изовалентное замещение свинца и теллура в PbTe нецентральными ионами Ge^{2+} и S^{2-} приводит к образованию диполей.

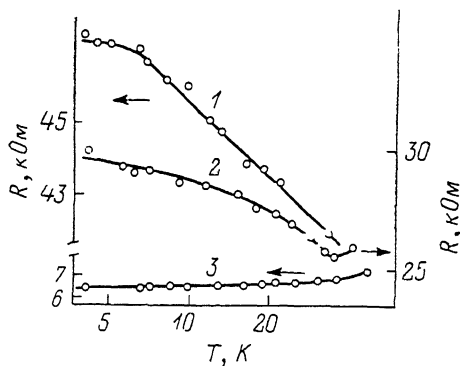


Рис. 2. Зависимость сопротивления между зондовыми контактами пленок $\text{Pb}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}\text{Te}$ ($n=8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) от температуры.

1 — $E=0.4$, 2 — 0.9 , 3 — 20 В см.

Превращения в системе диполей обуславливает возникновение второго СФП при $T < T_c$. Рассеяние носителей тока на диполях аналогично рассеянию на локализованных магнитных моментах.

Известно, что выделение одной из осей $\langle 111 \rangle$ является следствием ромбического искажения кубической решетки. Последнее возможно при одноосной деформации. В этом случае центральные в обычных условиях ионы способны занимать одно из двух энергетически эквивалентных положений вдоль оси, т. е. представляют собой двухуровневые центры — диполи. Стимулирование СФП и эффекта Кундо давлением наблюдалось на $\text{Pb}_{0.985}\text{Ge}_{0.015}\text{Te}$ [12].

При охлаждении пленок типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ (нанесенных на подложку BaF_2) за счет разности их коэффициентов термического расширения возникает квазиодноосная деформация, влекущая ромбическое искажение вдоль оси $\langle 111 \rangle$, нормальной к подложке. Эти искажения экспериментально подтверждаются появлением дополнительной частоты квантовых осцилляций магнитосопротивления, обнаруженной в [13] и наблюдавшейся нами на пленках PbTe , легированных Bi . В качестве объекта исследований нами был выбран твердый раствор $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$, нанесенный в виде пленки на скол BaF_2 . При замещении иона Te^{2-} ($r=2.11 \text{ \AA}$) ионом Se^{2-} ($r=1.91 \text{ \AA}$) последний, по-видимому, не может выступать в качестве нецентрального в PbTe вследствие малого различия ионных радиусов. Отметим, что размеры иона Se^{2+} — 1.17 \AA , а Pb^{2+} — 1.20 \AA [14]. Следовательно, даже в исключительных случаях ион Se будет центральным, что и определило его выбор в качестве объекта исследований. Однако эффект типа Кундо

нами наблюдался (рис. 3): хотя характерных для СФП аномалий $\rho(T)$ в $\text{PbTe}_{0.92}\text{Se}_{0.08}$ не обнаружено, так как при увеличении температуры деформация пленки становится незначительной и диполи исчезают. Таким образом, рассеяние на диполях деформационного происхождения может вызывать эффект типа Кондо.

Локальные деформации возникают при охлаждении до гелиевых температур на границах раздела различного рода неоднородностей в монокристаллах (малоугловые границы, области различного типа проводимости, разных концентраций НТ, различного состава, выделений второй фазы и пр.). По-видимому, такие деформации также могут генерировать диполи, рассеяние на которых приводит к эффектам типа Кондо. Неоднородностью образцов и связанным с этим возникновением деформационных диполей можно, вероятно, объяснить наблюдение лишь на отдельных

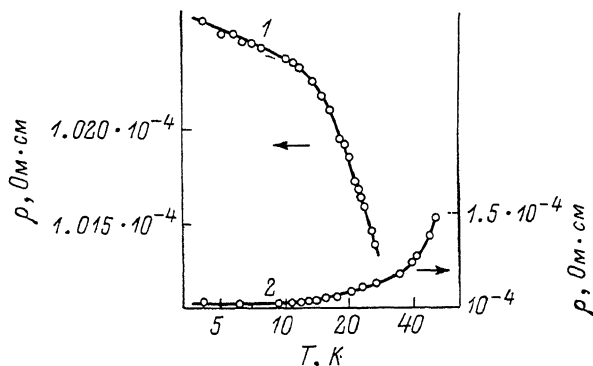


Рис. 3. Зависимости удельного сопротивления пленки $\text{PbTe}_{0.92}\text{Se}_{0.08}$ ($p=10^{20}$ см $^{-3}$) от температуры.

1 — $E \approx 1.2$, 2 — 19 мВ/см. При 4.3 К $\rho = 1.25 \cdot 10^{-4}$ (1) и $1.02 \cdot 10^{-4}$ Ом·см (2).

образцах эффекта типа Кондо в монокристаллах $\text{Pb}_{0.82}\text{Sn}_{0.18}\text{Te}$ [15]; значительный разброс значений T_c для $\text{Pb}_{1-x}\text{Se}_x\text{Te}$ [5]; проявление особенностей магнитной восприимчивости, характерных для СФП, лишь на избранных кристаллах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с $x < 0.2$ [16]; обнаружение нескольких СФП при исследовании монокристаллов $p\text{-Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ методом рентгеновской дифрактометрии [17]; подавление электрическим полем второго СФП при $T < T_c$ в монокристаллах $\text{PbTe}_{1-x}\text{S}_x$.

СФП в полупроводниках типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ происходит вследствие превращений типа порядок—беспорядок в системе диполей нецентральных ионов. Последние могут возникать при изовалентном легировании ионами меньшего радиуса, а также генерироваться локальными неоднородностями различного типа. При этом могут возникать несколько фазовых переходов, а также значительный разброс экспериментальных значений T_c . Рассеяние НТ на диполях, связанных с нецентральными ионами различного происхождения, вызывает эффект типа Кондо, а электрическое поле выполняет роль, аналогичную магнитному полю при рассеянии электронов на локализованных магнитных моментах. Ориентация диполей электрическим полем может подавлять эффект Кондо и СФП при $T < T_c$.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. П. Бахтинову, В. П. Водопьянову за предоставление качественных пленок, В. И. Литвинову за консультации и полезные замечания при обсуждении.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Bastow T., Elcombe M. M., Howard C. J. // Sol. St. Comm. 1986. V. 59. N 5. P. 257—259.
- [2] Hitmi N., Lalabanne C., Young R. A. // J. Phys. Chem. Sol. 1986. V. 47. N 6. P. 533—546.
- [3] Квятковский О. Е. // ФТП. 1986. Т. 28. № 4. С. 983—990.
- [4] Абдуллин Х. А., Демин В. Н., Лебедев А. И. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 4. С. 1020—1025.

- [5] Nimitz G., Schlicht B. Narrow-gap semiconductors. Narrow-gap lead salts. Berlin, 1983. 117 p.
- [6] Вугмейстер Б. Е., Глинчук М. Д. // УФН. 1985. Т. 146. № 3. С. 459—491.
- [7] Yaganery H., Grassie A., Yusheng H., Loram J. M. // J. Phys. C. Sol. St. Phys. 1981. V. 14. N 15. P. L441—L444.
- [8] Абдуллин Х. А., Лебедев А. И., Гаськов А. М., Демин В. Н., Зломанов В. П. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. № 6. С. 229—233.
- [9] Дмитриев А. И., Лашкарев Г. В., Литвинов В. И., Гаськов А. М., Демин В. Н. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. № 6. С. 304—306.
- [10] Лашкарев Г. В., Бродовой А. В., Радченко М. В., Демин В. Н., Гаськов А. М. // ФТП. 1988. Т. 22. № 4. С. 766—768.
- [11] Islan Q. T., Bunker V. A. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 23. P. 2701—2704.
- [12] Suski T., Takaoka S., Murase K. // Sol. St. Comm. 1983. V. 45. N 4. P. 259—263.
- [13] Гейман К. И., Драбкин И. А., Метвеенко А. В., Можавев Е. А., Парфеньев Р. В. // ФТП. 1977. Т. 11. № 3. С. 846—854.
- [14] Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства / Под ред. Самсонова Г. В. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
- [15] Багинский В. М., Дмитриев А. И., Лашкарев Г. В., Орлецкий В. Б., Радченко М. В. // Тез. докл. IV Всес. симпозиума. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы. Львов, 1975. Ч. II. С. 12—13.
- [16] Багинский В. М., Кикодзе Р. О., Лашкарев Г. В. // Препринт ИФ АН УССР. № 18. Киев, 1978. 28 с.
- [17] Александров О. В., Кисилев К. В. // Кр. сообщ. по физике. 1984. № 4. С. 18—21.

Институт проблем
материаловедения АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
20 октября 1988 г.
В окончательной редакции
16 февраля 1989 г.

УДК 539.32 : 669.85

Физика твердого тела, том 31, в. 7, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 7, 1989

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ СОИЗМЕРИМОСТИ НА МАГНИТНУЮ ФАЗОВУЮ ДИАГРАММУ МОНОКРИСТАЛЛА ТЕРБИЯ

Г. И. Катаев, М. Р. Самтаров, А. М. Тишин

Наблюдаемое в тяжелых редкоземельных металлах (РЗМ) спиральное магнитное упорядочение, несоизмеримое по отношению к периоду кристаллической структуры, характеризуется тем, что магнитные моменты ионов, принадлежащие одной базисной плоскости, коллинеарны, а при переходе к другой плоскости их ориентация меняется на постоянный угол α . При изменении температуры величина α не остается постоянной и при определенных значениях температуры периоды магнитной и кристаллической структур становятся кратными друг другу. Исследование влияния такой соизмеримости на поведение ряда физических величин представляет большой интерес. В настоящей работе приводятся результаты исследования магнитной фазовой диаграммы монокристалла тербия.

В тербии точка фазового перехода парамагнетизм (ПМ)—геликоидальный антиферромагнетизм (АФМ) Θ_2 , по литературным данным [1], лежит в диапазоне 223.3—230 К, а температура перехода АФМ—ферромагнетизм (ФМ) Θ_1 210—222 К. Сведения о величине критического поля разрушения АФМ упорядочения H_{cr} также заметно расходятся [1]. Не совпадают данные о характере этих магнитных переходов [1, 2]. В [1] высказано предположение, что указанные различия можно объяснить чистотой и степенью совершенства структуры исследованных образцов. Отметим, что проявление эффектов соизмеримости, очевидно, возможно только в весьма совершенных кристаллах.

В работе использовался монокристалл тербия высокой степени чистоты (99.99 вес.%) и отношением электросопротивлений при 4.2 и 300 К,