

GRAZ 65

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЖУРНАЛ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

Том 48

Выпуск 5

(Отдельный оттиск)

МОСКВА · 1965

ОСОБЕННОСТИ БАРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ СО СПИНОВЫМ

УПОРЯДОЧЕНИЕМ

М. Р. Гражданкина

Н. П. Гражданкина

Исследовано влияние всестороннего гидростатического сжатия на электрическое сопротивление ферромагнитного соединения CrTe и антиферромагнитного соединения MnTe . Измерения проводились как выше, так и ниже температур их магнитных превращений ($\Theta_f = 65^\circ \text{C}$ и $T_N = 37^\circ \text{C}$). При переходе в парамагнитное состояние наблюдается резкое изменение барических коэффициентов электросопротивления, связанное с нарушением спинового порядка в этих веществах.

Введение

В интервале давлений примерно до $10\,000 \text{ кг/см}^2$ и комнатных температурах барический коэффициент электрического сопротивления подавляющего большинства металлов имеет отрицательный знак [1]. В связи с этим металлы, у которых электрическое сопротивление под влиянием всестороннего гидростатического сжатия уменьшается, носят название «нормальных» металлов. Теоретически этот эффект объясняется изменением сил взаимодействия между электронами и упругими колебаниями кристаллической решетки, обусловленным тем, что внешнее давление приводит к повышению характеристической температуры Дебая. Изменение характера энергетического спектра носителей тока и вида поверхности Ферми должно проявляться для этих металлов при значительно более высоких давлениях.

Металлы, имеющие положительный знак барического коэффициента электросопротивления, принято считать «аномальными». Увеличение электрического сопротивления этих металлов с давлением объясняют [2, 3] изменением их электронной энергетической структуры, обусловленное тем, что всестороннее сжатие приводит к изменению в перекрытии различных энергетических полос. Помимо Li , Ca , Sr , Ba , Bi и Sb , положительный знак барического коэффициента электросопротивления $\gamma = R^{-1} dR/dP$ имеют ферромагнитные сплавы, у которых наблюдается сильная зависимость температуры Кюри от давления: CrTe [4] и инварные сплавы $\text{Fe} - \text{Ni}$ [5]. Поэтому можно было ожидать, что аномальный знак γ в указанных сплавах обусловлен, главным образом, изменением при всестороннем сжатии магнитного состояния сплава — изменением спонтанной намагниченности и температуры Кюри. В связи с этим представляется интересным исследовать вещества с различным типом спинового упорядочения, имеющие разные знаки эффекта $d\Theta_f/dP$ (смещения температур магнитного превращения под давлением) и выявить особенности барических коэффициентов электросопротивления для этих случаев.

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния всестороннего сжатия на электрическое сопротивление ферромагнитного соединения CrTe , имеющего отрицательный знак $d\Theta_f/dP$ и антиферромагнитного соединения MnTe , у которого температура Нееля с давлением растет, т. е. dT_N/dP положительно [6]. В обоих случаях измерения проводились как выше, так и ниже температур магнитных превращений указанных соединений.

Результаты измерений и их обсуждение

Всестороннее гидростатическое сжатие образца осуществлялось в камере высокого давления; средой, передающей давление, служила 50-процентная смесь трансформаторного масла с керосином. Методика измерений электросопротивления, температуры и давления была аналогична описанной нами ранее [4].

1. Данные измерений по влиянию давления на электрическое сопротивление CrTe при разных температурах представлены на рис. 1. Из графиков

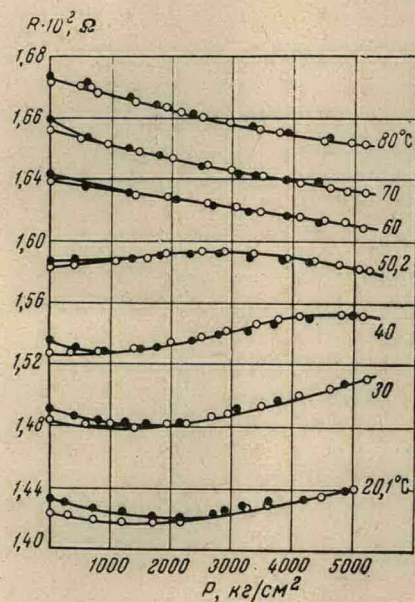


Рис. 1. Влияние давления на электросопротивление CrTe при разных температурах: \circ — при повышении давления, \bullet — при снижении давления

видно, что измерения, проведенные при повышении и при понижении давления, не дают строго одинаковых результатов. При малых давлениях наблюдается гистерезис, который приводит к необратимому повышению исходного значения сопротивления, составляющему в отдельных случаях 4—5%. В связи с этим вычисления барического коэффициента электросопротивления проводились, начиная с 1500 кг/см^2 ; расхождение прямого и обратного хода кривых $R(P)$ в области давлений $1500\text{—}5200 \text{ кг/см}^2$ было незначительным. Контрольные измерения, проведенные при повторных циклах сжатия при различных температурах, показали хорошую воспроизводимость общего характера кривых $R(P)$. Температура Кюри исследованного нами образца, определенная при атмосферном давлении по максимуму гальваномагнитного эффекта, была равна $+65^\circ \text{C}$. Из рис. 1 видно, что при температурах выше Θ_f электрическое сопротивление теллурида хрома уменьшается с ростом давления, т. е. барический коэффициент электрического сопротивления имеет «нормальный» отрицательный знак. При температурах ниже Θ_f электрическое сопротивление растет с давлением, т. е. знак γ становится положительным. Если принять, что изменение знака γ связано с разрушением спинового упорядочения в этом соединении, то нужно ожидать, что кривые $R(P)$, измеренные в соответствующих интервалах P и T , включающих температуру магнитного превращения, в области Θ_f должны иметь максимумы. Измерения, проведенные при температурах $50,2$ и 40°C хорошо подтверждают это (рис. 1). Ранее нами было показано, что температура Кюри теллурида хрома очень сильно понижается с давлением: $d\Theta_f/dP = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ град} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{см}^2$ [4]. Следовательно Θ_f , равная при атмосферном давлении 65°C , понижается при $P = 2500 \text{ кг/см}^2$ до 50°C , а при $P = 4000 \text{ кг/см}^2$ точка Кюри равна 40°C . Из кривых, приведенных на рис. 2, видно, что в указанной области давлений и температур происходит изменение знака барического коэффициента электросопротивления. Определение γ во всех случаях производилось путем графического дифференцирования кривых $R(P)/R_1$, где R_1 — электрическое сопротивление при атмосферном давлении.

Кривые температурной зависимости γ , вычисленные для давлений $2000, 3000, 4000$ и 5000 кг/см^2 , приведены на рис. 3. Из графиков видно,

что измерения, проведенные при повышении и при понижении давления, не дают строго одинаковых результатов. При малых давлениях наблюдается гистерезис, который приводит к необратимому повышению исходного значения сопротивления, составляющему в отдельных случаях 4—5%. В связи с этим вычисления барического коэффициента электросопротивления проводились, начиная с 1500 кг/см^2 ; расхождение прямого и обратного хода кривых $R(P)$ в области давлений $1500\text{—}5200 \text{ кг/см}^2$ было незначительным. Контрольные измерения, проведенные при повторных циклах сжатия при различных температурах, показали хорошую воспроизводимость общего характера кривых $R(P)$. Температура Кюри исследованного нами образца, определенная при атмосферном давлении по максимуму гальваномагнитного эффекта, была равна $+65^\circ \text{C}$. Из рис. 1 видно, что при температурах выше Θ_f электрическое сопротивление теллурида хрома уменьшается с ростом давления, т. е. барический коэффициент электрического сопротивления имеет

что в парамагнитной области, т. е. при $T > \Theta_f$ барический коэффициент электросопротивления имеет отрицательный знак, а абсолютное значение его несколько меняется с давлением и равно $(3 \div 5) \cdot 10^{-6} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Таким образом, при отсутствии спинового упорядочения знак и величина γ такие

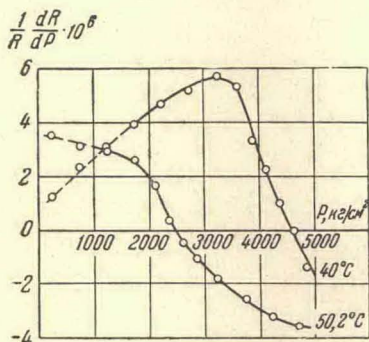


Рис. 2

Рис. 2. Изменение барического коэффициента электросопротивления SrTe в зависимости от давления при температурах 40 и 50°C

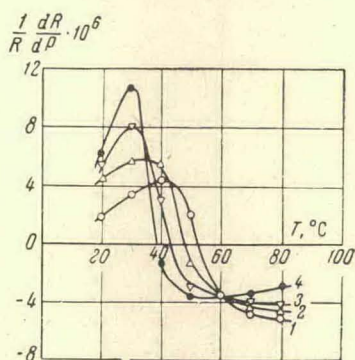


Рис. 3

Рис. 3. Температурные зависимости барического коэффициента электросопротивления SrTe: 1 — при $P = 2000 \text{ кг/см}^2$, 2 — при $P = 3000 \text{ кг/см}^2$, 3 — при $P = 4000 \text{ кг/см}^2$, 4 — при $P = 5000 \text{ кг/см}^2$

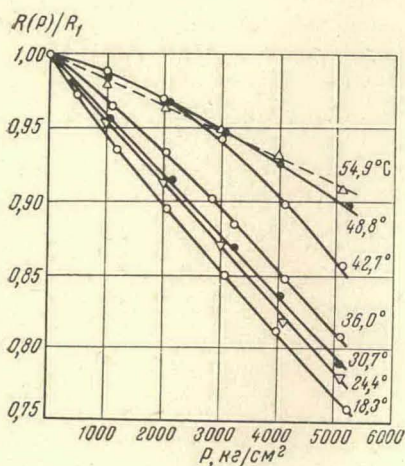


Рис. 4

Рис. 4. Влияние давления на электросопротивление MnTe при разных температурах

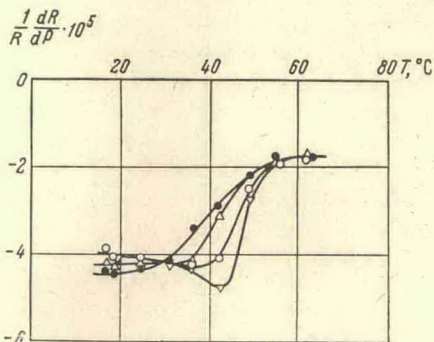


Рис. 5

Рис. 5. Температурные зависимости барического коэффициента электросопротивления MnTe: ● — при $P = 2000 \text{ кг/см}^2$, △ — при $P = 3000 \text{ кг/см}^2$, ○ — при $P = 4000 \text{ кг/см}^2$, ▽ — при $P = 5000 \text{ кг/см}^2$

же, как и у «нормальных» ферромагнитных металлов. При $T < \Theta_f$, т. е. в области существования ферромагнетизма, знак γ положительный, а абсолютная величина коэффициента γ растет при приближении температуры к Θ_f , достигает максимума, после чего начинает падать, и при $T > \Theta_f$ становится отрицательной. На графиках видно, что с ростом давления кривые $\gamma(T)$ смещаются в сторону низких температур, что связано с понижением

температуры Кюри при всестороннем сжатии образца; характер кривых $\gamma(T)$ при этом не меняется.

2. Результаты измерения антиферромагнитного соединения MnTe приведены на рис. 4, где показано изменение относительного электрического сопротивления $R(P)/R_1$, при увеличении давления. Измерения проводились в области температур $16 \div 65^\circ \text{C}$ и давлении $1 \div 5300 \text{ кг/см}^2$. Температура антиферромагнитного превращения при атмосферном давлении равна $+37^\circ \text{C}$; согласно нашим измерениям [6], T_N растет с увеличением давления, величина этого эффекта $dT_N/dP = (2,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \text{ град} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Из приведенных на рис. 4 кривых $R(P)/R_1$ видно, что всестороннее сжатие приводит к уменьшению электрического сопротивления MnTe, т. е. барический коэффициент имеет отрицательный знак как при температурах ниже T_N , так и в парамагнитной области при $T > T_N$. При температурах, далеко отстоящих от точки Нееля, имеет место линейное изменение электросопротивления с давлением. Однако в области температуры магнитного превращения характер кривых $R(P)$ заметно меняется: появляется кривизна, причем ниже T_N кривые $R(P)$ обращены выпуклостью книзу, а выше T_N — кверху. На рис. 5 показано изменение барического коэффициента электросопротивления с температурой; кривые $\gamma(T)$ рассчитывались для давлений 2000, 3000, 4000 и 5000 кг/см^2 . Из приведенных кривых видно, что с повышением температуры в области точки Нееля абсолютное значение коэффициента γ уменьшается, и с ростом давления кривые $\gamma(T)$ смещаются в сторону более высоких температур, что обусловлено, как и в предыдущем случае, влиянием давления на температуру магнитного превращения вещества.

3. Полученные нами экспериментальные данные являются иллюстрацией того, что возникновение спинового упорядочения в веществе приводит к наличию специфических особенностей барического коэффициента электрического сопротивления. Эти особенности обусловлены тем, что изменение электрического сопротивления под давлением ферро- и антиферромагнетиков определяется не только изменением электрон-фононного взаимодействия, но и изменением магнитного состояния вещества. В том случае, когда всестороннее сжатие приводит к сильному уменьшению относительной намагниченности ($d\theta_f/dP < 0$), обычный эффект — уменьшение электрического сопротивления под давлением — может быть перекрыт влиянием сильного рассеяния электронов проводимости на спиновых неоднородностях, что и приводит в конечном счете к положительному знаку барического коэффициента электросопротивления при $T < \theta_f$. Эта тенденция особенно сильно проявляется вблизи θ_f . Знаки γ в ферро- и парамагнитном состояниях образца при этом будут различны. Если же всестороннее сжатие приводит к росту намагниченности ($d\theta_f/dP > 0$), то увеличение степени магнитного порядка приведет к уменьшению электрического сопротивления и знак барического коэффициента электросопротивления будет отрицательный (для «нормальных» металлов) как выше, так и ниже θ_f . В том случае, когда внешнее давление мало изменяет магнитное состояние вещества ($d\theta_f/dP \approx 0$), возникновение спинового упорядочения не должно привести к изменению ни знака, ни величины γ . Эти закономерности в равной мере должны проявляться при наличии как ферро-, так и антиферромагнитного упорядочения спиновых магнитных моментов.

Результаты, полученные нами при исследовании антиферромагнитного соединения MnTe, хорошо подтверждают это. Положительное смещение температуры Нееля теллурида марганца с давлением ($dT_N/dP > 0$) можно рассматривать как увеличение степени антиферромагнитного упорядочения, которое должно привести к дополнительному уменьшению

электрического сопротивления MnTe при высоком давлении в области температур $T < T_N$, что в действительности и наблюдалось.

В работе Кондорского и Седова [5] были рассмотрены возможные причины, вызывающие изменение спонтанной намагниченности (σ_s) и электрического сопротивления (R) вещества при его всестороннем сжатии. При сравнении барических коэффициентов указанных характеристик таких ферромагнетиков, как Ni и Fe, с одной стороны, и инварных сплавов, обладающих «скрытым антиферромагнетизмом», с другой, авторы цитируемой работы приходят к выводу о том, что изменение спонтанной намагниченности под давлением в указанных веществах вызывается разными причинами. В ферромагнитных металлах Fe и Ni, у которых барические коэффициенты спонтанной намагниченности и электросопротивления малы и имеют одинаковые знаки, основной причиной изменения σ_s и R под давлением считается изменение величины интегралов $s-d$ -обмена. В инварных сплавах, у которых барические коэффициенты сравнительно велики и имеют разные знаки ($\gamma_\sigma < 0$, $\gamma_R > 0$), за основную причину изменения σ_s и R под давлением принимается изменение интегралов $d-d$ -обменного взаимодействия. Полученные нами экспериментальные данные позволяют высказать следующие соображения относительно разного характера влияния всестороннего сжатия на электрическое сопротивление ферромагнитных металлов Fe и Ni и инварных сплавов, исследованных в работе Кондорского и Седова [5]. Известно, что магнитное состояние Fe и Ni очень мало изменяется с давлением ($d\sigma / \sigma_0 dP \sim 10^{-7} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{см}^2$, $d\theta_f / dP \sim 10^{-4} \text{ град} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кг}$). В связи с этим можно полагать, что основной причиной изменения электрического сопротивления указанных ферромагнитных металлов под давлением является изменение электрон-фононного взаимодействия. Возникновение спинового упорядочения при $T < \theta_f$ не должно приводить к изменению ни величины, ни знака коэффициента γ . Этим и объясняется тот факт, что барический коэффициент электросопротивления Fe и Ni такой же, как у «нормальных» неферромагнитных металлов.

Основной причиной изменения электрического сопротивления инварных сплавов под давлением является сильное изменение под давлением магнитного состояния этих сплавов.

Институт физики металлов
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 декабря 1964 г.

Литература

- [1] A. W. Lawson. Progr. in Metal Physics, 6, 1, 1956.
- [2] M. H. Frank. Phys. Rev., 47, 282, 1935.
- [3] J. J. Van de Ven. Chem. Phys., 6, 367, 1938.
- [4] Н. П. Гражданкина, Л. Г. Гайдуков, К. П. Родионов. ЖЭТФ, 40, 433, 1961.
- [5] Е. И. Кондорский, В. Л. Седов. ЖЭТФ, 38, 773, 1960.
- [6] Н. П. Гражданкина. ЖЭТФ, 33, 1524, 1957.

SOME FEATURES OF THE ELECTRIC RESISTANCE PRESSURE COEFFICIENT OF SUBSTANCES WITH SPIN ORDERING

N. P. Grazhdankina

The effect of uniform hydrostatic compression on the electric resistance of the ferromagnetic compound CrTe and antiferromagnetic compound MnTe is investigated. The measurements are carried out above as well as below the magnetic transformation temperatures ($\theta_f = 65^\circ \text{C}$ and $T_N = 37^\circ \text{C}$). On transition to the paramagnetic state a sharp change of the electric resistance pressure coefficients is observed which is due to violation of spin order in these substances.