

## МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

 $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$ 

Крылов К. Р., Пономарев А. И., Цидильковский И. М.,  
Гавалешко Н. П., Хомяк В. В.

На образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  ( $0 < x < 0.07$ ) и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$  ( $0 < x < 0.01$ ) в интервале  $T=1.7\div 300$  К измерены магнитная восприимчивость ( $\chi$ ), сопротивление и эффект Холла. При  $T > 80$  для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  и  $T > 10$  К для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$   $\chi(T)$  описывается законом Кюри—Вейсса, что позволило определить концентрацию ионов европия и знак обменного взаимодействия между ними.

В интервале  $200\div 300$  К в образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  достигается область собственной проводимости. Определены эффективные массы электронов  $m_e$  и величина щели  $\epsilon_g = \epsilon_{\Gamma_6} - \epsilon_{\Gamma_8}$ .

Для образцов  $\text{HgEuSe}$  определены концентрации электронов и их эффективные массы. Уменьшение холловской подвижности (в 3—5 раз) по сравнению с  $\text{HgSe}$  обусловлено, по-видимому, дополнительным рассеянием на атомах Eu.

К числу наиболее изученных полумагнитных полупроводников (ПМП) относятся соединения типа  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  с растворенной в них примесью Mn. Значительно меньше изучены ПМП с другими примесями  $d$ -элементов, и нам вовсе не известны работы, в которых изучались бы физические свойства соединений  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  с растворенными в них  $f$ -элементами. В работах [1, 2] сообщалось о синтезировании твердых растворов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$ , и мы уже докладывали о результатах исследований некоторых свойств этих соединений [1-4].

Здесь мы приведем результаты исследования магнитной восприимчивости, сопротивления и эффекта Холла на 10 образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  с  $0 \leq x \leq 0.07$  и на 5 образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$  с  $0 \leq x \leq 0.01$  в интервале температур  $1.6\div 300$  К. Измерения магнитной восприимчивости проводились индукционным методом и методом Фарадея в магнитных полях до 12 кЭ, сопротивление и эффект Холла измерялись в постоянных полях до 60 кЭ и в импульсных магнитных полях до 300 кЭ.

1.  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ . На рис. 1 приведены температурные зависимости обратной восприимчивости ионов европия.

Из рис. 1 видно, что в области температур  $T > 80$  К для всех образцов магнитная восприимчивость описывается законом Кюри—Вейсса.

С помощью найденных из эксперимента значений постоянных Кюри мы определили концентрацию магнитных ионов европия  $x$ , полагая диамагнитную

Экспериментальные параметры образцов ПМП

ПМП	$T$ , К	$\chi_{\text{Eu}}$ , %	$n \cdot 10^{-16}$ , $\text{см}^{-3}$	$R_H \cdot 10^{-3}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\theta$ , К	$\frac{m_e}{m_0}$	$E_g$ , эВ	
HgTe	77	—	5.7	69	—	0.030	300	
$\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$	77	{	3.7	5.6	17	-29	0.026	260
			4.5	6.2	50	-4	0.028	280
HgSe	4.2	—	0.74	60	—	0.040	—	
$\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$	4.2	{	0.046	110	28	4.5	0.051	—
			0.053	70	11	5.0	0.039	—

восприимчивость матрицы  $\chi_0 = -0.345 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$  [5] и пренебрегая парамагнитной восприимчивостью свободных электронов. Для всех исследованных образцов  $\theta < 0$ , что свидетельствует об антиферромагнитном (АФ) обменном взаимодействии между ионами европия. Нам не удалось выявить зависимость  $\Theta(x)$ , хотя для разных образцов значения  $\Theta$  лежат в интервале  $-(4 \div 30) \text{ К}$  (см. таблицу).

При низких температурах ( $T < 70 \div 80 \text{ К}$ ) у зависимостей  $\chi_{\text{Eu}}^{-1}(T)$  увеличивается наклон (рис. 1), но значения характеристической температуры  $\Theta$  остаются отрицательными и равными  $-(5 \div 6) \text{ К}$ , т. е. практически совпадают

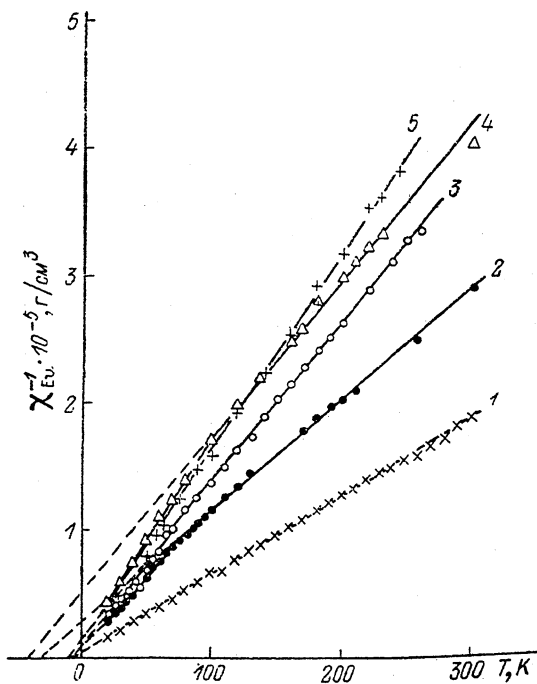


Рис. 1. Температурная зависимость  $\chi_{\text{Eu}}$  образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  с различным содержанием Eu: 1 — 0.072; 2 — 0.046; 3 — 0.032; 4 — 0.037; 5 — 0.027.

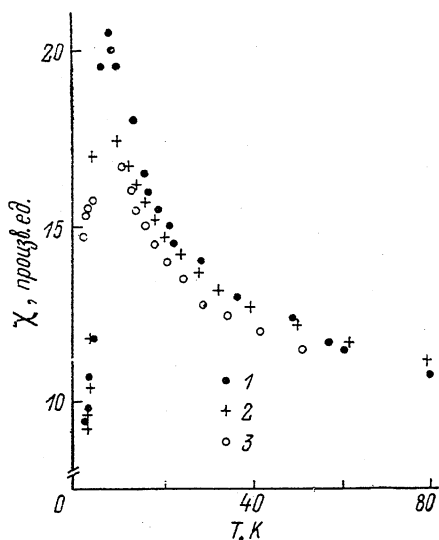


Рис. 2. Динамическая восприимчивость образца 2 в постоянном внешнем магнитном поле.

H, Э: 1 — 0, 2 — 300, 3 — 500.

со значением  $\Theta$  для  $\text{EuTe}$  [6]. Это наводит на мысль, что образцы являются двухфазными: одна фаза — твердый раствор  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ , другая —  $\text{EuTe}$ . Микрорентгеновский анализ, проведенный на установке «Самебах», подтвердил это предположение: в образцах были обнаружены микровключения фазы  $\text{EuTe}$ , хотя обычные лауэграммы не выявили двухфазности.

Установить соотношение между концентрациями европия, входящего в каждую из этих фаз, нам не удалось.

На образцах с наибольшей концентрацией Eu были выполнены измерения динамической магнитной восприимчивости в зависимости от температуры. Амплитуда переменного магнитного поля составляла  $\sim 10 \text{ Э}$ , а частота  $\sim 100 \text{ Гц}$ . Для выявления влияния магнитного поля на магнитную восприимчивость мы прикладывали дополнительно стационарное магнитное поле до  $1 \text{ кЭ}$ . На рис. 2 приведена зависимость  $\chi(T)$  для одного из исследованных образцов. Видно, что при  $T \approx 10 \text{ К}$  имеется острый пик, который уменьшается и размывается с ростом магнитного поля, что характерно для спиновых стекол [7].

Из измерений эффекта Холла в импульсном магнитном поле мы установили, что все исследованные образцы  $p$ -типа, хотя в слабых полях основными носителями являются электроны. Разность концентраций акцепторов и доноров  $N_A - N_D$  определить не удалось, так как при  $77 \text{ К}$  в магнитном поле до  $300 \text{ кЭ}$  коэффициент Холла  $R > 0$  и не достигает насыщения.

В интервале  $200 \div 300$  К для некоторых образцов зависимость концентрации электронов от температуры  $n(T)$  подчиняется закону  $n \sim T^{3/2}$ . По формуле, справедливой для бесщелевых полупроводников,  $n = 2 m_c m_v^{1/2} (2 k_B T / 2 \pi \hbar^2)^{3/2}$  [8], мы определили для этих образцов эффективные массы электронов  $m_c$ , полагая массу дырок  $m_v = 0.4 m_0$ , где  $m_0$  — масса свободного электрона. Используя выражение

$$\frac{m_0}{m_c} = \frac{2}{3} \frac{\epsilon_p}{\epsilon_g} - (\delta\gamma_1 - \delta\gamma_2)$$

и полагая  $\delta\gamma_1 = 5.2$ ,  $\delta\gamma_2 = 1.4$  [9], а  $\epsilon_p = 18.2$  эВ [10], мы определили величину щели  $\epsilon_g = \epsilon_{g_+} - \epsilon_{g_-}$  для образцов, в которых достигается область собственной

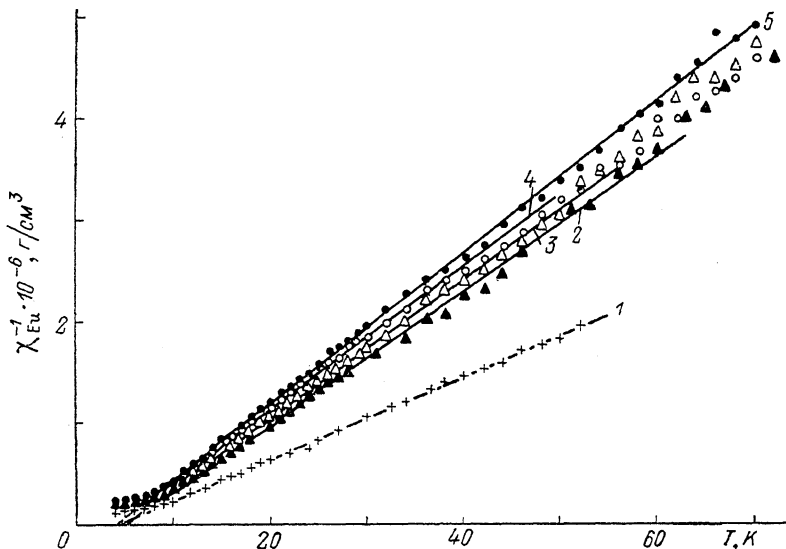


Рис. 3. Температурная зависимость  $\chi_{Eu}$  образцов  $Hg_{1-x}Eu_xSe$ .

$x \cdot 10^4$ : 1 — 8.6, 2 — 5.3, 3 — 5.1, 4 — 4.8, 5 — 4.6.

проводимости (см. таблицу). Полученные значения  $\epsilon_g$  оказались меньше, чем в  $HgTe$ , что указывает на существование фазы твердого раствора  $Hg_{1-x}Eu_xTe$  в исследованных образцах.

2.  $Hg_{1-x}Eu_xSe$ . На рис. 3 приведены температурные зависимости обратной восприимчивости ионов  $Eu^{2+}$  для 5 образцов  $Hg_{1-x}Eu_xSe$ , полученные в магнитном поле  $H = 12$  кЭ. Видно, что в области температур выше 10 К магнитная восприимчивость описывается законом Кюри—Вейсса. Используя эти данные, мы определили содержание ионов  $Eu^{2+}$  в исследованных образцах, которое отличается от вносимого в расплав на 1—2 порядка.

Для всех исследованных образцов парамагнитная температура  $\Theta > 0$ , что свидетельствует о преобладании положительного обменного взаимодействия между ионами  $Eu^{2+}$ .

При  $T < 10$  К зависимость  $\chi_{Eu}^{-1}(T)$  отклоняется от линейной и стремится к насыщению при низких температурах. Значения величин  $\Theta$ , определенные для образцов с разными  $x$ , мало отличаются друг от друга. Возможной причиной отсутствия зависимости  $\Theta(x)$  может быть выпадение фазы  $EuSe$  при выращивании твердого раствора  $Hg_{1-x}Eu_xSe$ . Температура Кюри  $\Theta_{EuSe} = 6$  К [6], и хотя рентгеновский анализ указывает на монокристалличность образцов, нельзя исключить возможность существования фазы  $EuSe$ , которая, очевидно, не проявляется из-за малой концентрации европия в образцах.

В бесщелевых полупроводниках, где вырождение зон обусловлено симметрией, обменное взаимодействие между магнитными ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки, должно быть отрицательным [11]. Мы считаем,

что положительный знак  $\Theta$  в исследованных нами образцах обусловлен наличием в них фазы  $\text{EuSe}$ .

На зависимости сопротивления одного из образцов от температуры ( $H=0$ ) при 4.5 К обнаружен резкий скачок сопротивления (рис. 4). В магнитном поле ступенька уменьшается и исчезает при  $H_c \approx 10$  кЭ. Коэффициент Холла в этом интервале температур не изменяется, поэтому скачок сопротивления, возможно, связан с резким изменением рассеяния при 4.5 К. Можно предположить, что при низких температурах благодаря обменному взаимодействию между ионами  $\text{Eu}^{2+}$  (через электроны проводимости или анионы  $\text{Se}$ ) происходит упорядочение их магнитных моментов, которое разрушается при  $T \approx 4.5$  К. Это, в свою очередь, приводит к резкому включению дополнительного механизма рассеяния электронов на магнитных моментах  $\text{Eu}^{2+}$ . В магнитном поле  $H < H_c$  антиферромагнитное упорядочение частично разрушается и ступенька сопротивления на зависимости  $\rho(T)$ , обусловленная изменением рассеяния, уменьшается.

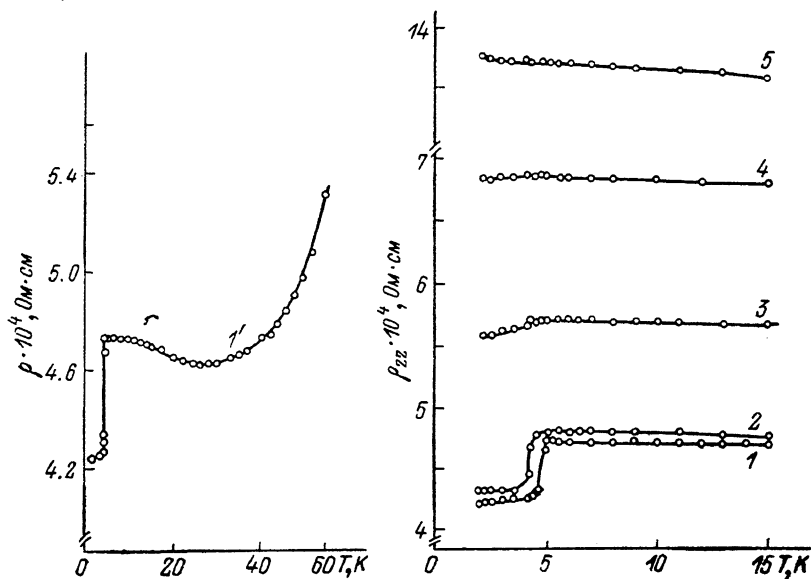


Рис. 4. Температурная зависимость сопротивления образца 1  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$  в фиксированных магнитных полях.

$H$ , кЭ: 1, 1' — 0, 2 — 1, 3 — 5, 4 — 10, 5 — 50.

Мы измерили также продольное и поперечное сопротивления в постоянных магнитных полях до 60 кЭ в интервале 1.7–20 К. На зависимостях сопротивления от магнитного поля проявляется более 20 пиков осцилляций Шубникова-де-Гааза. По осцилляционной зависимости сопротивления от магнитного поля и температуры определены концентрация электронов и их эффективная масса (см. таблицу).

Холловская подвижность для исследованных образцов оказалась в 3–5 раз меньше, чем подвижность электронов в  $\text{HgSe}$  с такой же концентрацией примесей. Это различие, по-видимому, обусловлено тем, что атомы  $\text{Eu}$  служат дополнительными центрами рассеяния электронов. Вместе с тем совпадение эффективных масс электронов в образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$  и  $\text{HgSe}$  с почти одинаковой концентрацией носителей указывает на то, что атомы  $\text{Eu}$  в исследованных образцах практически не вносят искажений в энергетический спектр.

Авторы выражают благодарность Л. Н. Ромашову за предоставление установки для измерения динамической магнитной восприимчивости, М. И. Ауслендеру и Н. Г. Шелушиной за полезные обсуждения.

#### Л и т е р а т у р а

[1] Гавалешко Н. П., Кавьюк П. В., Лотоцкий В. Б., Солончук Л. С., Хомяк В. В. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1985. Т. 21. В. 11. С. 1965–1966.

- [2] Гавалешко Н. П., Хомяк В. В., Солончук Л. С., Криган В. А. // Тез. докл. IV Всес. конф. по физике и химии редкоземельных полупроводников. Новосибирск, 1987. С. 97.
- [3] Крылов К. Р., Пономарев А. И., Цицильковский И. М., Хомяк В. В. // Тез. докл. II Всес. конф. «Материаловедение халькогенидов и кислородсодержащих полупроводников». Черновцы, 1986. Т. 2. С. 57.
- [4] Krylov K. R., Ponomarev A. I., Tsidilkovski I. M., Gavaleshko N. P., Homiak V. V. // Int. Meeting on Phys. of Semimagn. Semiconductors. Jablonna, Poland, 1987. P. 47—48.
- [5] Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т., Мельников В. М., Огородников В. К. // ФТТ. 1969. Т. 11. В. 2. С. 2563—2567.
- [6] Van Honten S. // Phys. Lett. 1962. V. 2. N 5. P. 215—216.
- [7] Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М., 1983. 304 с.
- [8] Tsidilkovski I. M., Harus G. I., Shelushinina N. G. // Adv. Phys. 1985. V. 34. N 1. P. 43—174.
- [9] Kim R. S., Narita S. // Phys. St. Sol. (b). 1976. V. 73. N 2. P. 741—752.
- [10] Dobrowolska M., Myscielski A., Dobrowolski W. // Sol. St. Commun. 1978. V. 27. P. 1333—1335.
- [11] Bastard G., Lewiner C. // Phys. Rev. B. 1979. V. 20. N 10. P. 4256—4267.

Институт физики металлов  
УНЦ АН СССР  
Свердловск

Получена 3.05.1988  
Принята к печати 9.09.1988