

НАБЛЮДАЕМЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗА В КРИСТАЛЛАХ $Fe_xHg_{1-x}Se$

П.Н.Горлей, В.Н.Макогоненко, С.Ю.Паранчич,
Л.Д.Паранчич

С помощью измерений температурной зависимости термоэдс в классически сильном магнитном поле в монокристаллах $Fe_xHg_{1-x}Se$ обнаружена особенность в плотности состояний зоны проводимости, которая интерпретирована как узкая полоса разрешенных состояний, обусловленных наличием железа.

1. С целью детального изучения свойств узкощелевых полумономагнитных твердых растворов на основе теллурида и селенида ртути с d - или f -элементами было проведено тщательное исследование температурной зависимости термоэдс серии образцов $Fe_xHg_{1-x}Se$ в интервале температур 77 – 400 К. Измерения проводились в магнитных полях до 1,2 Т на вырезанных из слитков, полученных методом Бриджмена, неориентированных монокристаллических образцах с концентрацией электронов $n = 9,4 \cdot 10^{23} \div 5,6 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ в области составов $0,01 \leq x \leq 0,2$.

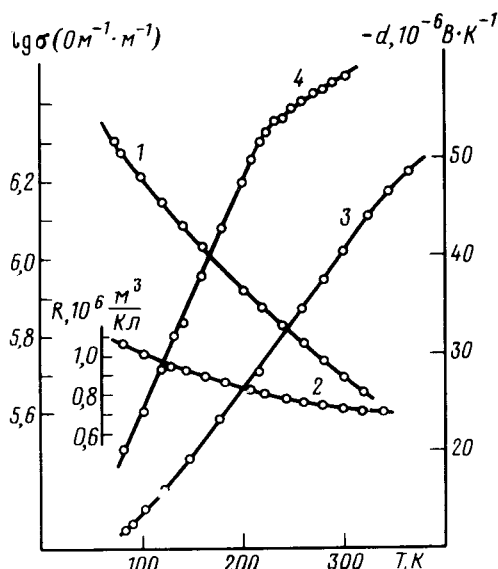


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности σ – (1), коэффициента Холла K – (2), термоэдс α_s – (3) и магнитотермоэдс α_m – (4) образцов твердых растворов $Fe_{0,01}Hg_{0,99}Se$

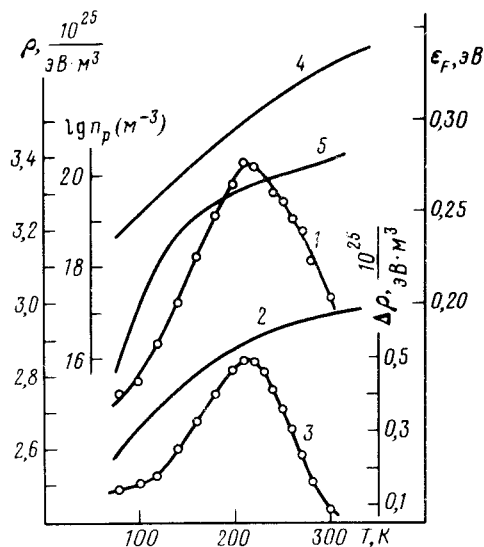


Рис. 2. Температурные зависимости плотности состояний в твердых растворах $Fe_{0,01}Hg_{0,99}Se$: $\rho_{\text{эксп}}(\epsilon_F)$ – 1; $\rho_{\text{зон}}(\epsilon_F)$ – 2; $\Delta\rho(\epsilon_F)$ – 3; а также энергии Ферми ϵ_F – 4; и концентрации носителей на резонансном уровне n_p – 5

2. Анализ результатов измерений показал, что для всех исследованных образцов в области температур 77 – 400 К на температурных зависимостях термоэдс в бесконечном (неквантуемом) магнитном поле наблюдается несвойственная чистому селениду ртути аномалия, которую можно объяснить наличием резонансного уровня в зоне разрушенных энергий зонной структуры $Fe_xHg_{1-x}Se$.

3. В качестве примера на рис. 1 представлены экспериментальные результаты температурной зависимости электропроводности σ (кривая 1) коэффициента Холла R (кривая 2), термоэдс α_0 в отсутствие магнитного поля (кривая 3) и термоэдс α_∞ в классически сильном магнитном поле (кривая 4) для образцов $\text{Fe}_{0,01}\text{Hg}_{0,99}\text{Se}$. Заметим, что значения α_∞ определялись с помощью соотношения Родо¹ с относительной погрешностью $\sim 5\%$. Видно, что зависимости $\sigma(T)$ и $R(T)$ монотонно убывают, а $\alpha_0(T)$ — возрастает с увеличением температуры, в то время как на графике $\alpha_\infty(T)$ при $T \approx 210$ К имеется излом.

4. Как известно² в случае сильно вырожденного газа носителей, что наблюдается в нашем эксперименте, величина α_∞ выражается через концентрацию электронов n , температуру T и плотность в единице объема электронных состояний на уровне Ферми $\rho(\epsilon_F)$ следующим образом:

$$\alpha_\infty = \frac{2}{3} \frac{\pi^2 k^2 T \rho(\epsilon)}{en} \quad (1)$$

Полученные из опыта данные в отношении зависимостей $\alpha_\infty(T)$ и $n(T)$ дали возможность с помощью выражения (1) определить экспериментальную зависимость плотности состояний $\rho_{\text{эксп}}(\epsilon_F)$ от температуры, которая на рис. 2 представлена кривой 1. Если предположить, что для состава $x = 0,01$ зонные параметры твердого раствора $\text{Fe}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ незначительно отличаются от таковых для чистого селенида ртути, то, используя литературные данные для HgSe ³ в приближении двухзонной модели Кейна можно рассчитать энергию Ферми (рис. 2, кривая 4) и плотность зонных электронных состояний $\rho_{\text{зон}}(\epsilon_F)$ (рис. 2, кривая 2). Разность $\Delta\rho(\epsilon_F) = \rho_{\text{эксп}}(\epsilon_F) - \rho_{\text{зон}}(\epsilon_F)$, представленную на рис. 2, кривой 3, естественно связать с плотностью состояний резонансного уровня железа в энергетической полосе зонного электрона.

5. Колоколообразный вид $\Delta\rho(\epsilon_F) = f(T)$ дает основание указанную зависимость промоделировать выражением⁴:

$$\Delta\rho(\epsilon_F) = \frac{N_p}{\pi} \frac{\Gamma}{[(\epsilon_F - E_p)^2 + \Gamma^2]} \quad (2)$$

где N_p — концентрация примесных центров на резонансном уровне, E_p и Γ — глубина залегания и полуширина самого резонансного уровня. Использование данных для $\Delta\rho(\epsilon_F)$ позволило оценить значения параметров, входящих в (2). Оказалось, что

$$E_p = (0,294 \pm 0,05) \text{ эВ}; \quad N = 3,96 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}; \quad \Gamma = (0,023 \pm 0,02) \text{ эВ}. \quad (3)$$

Полученный результат неплохо согласуется с имеющимися литературными данными для E_p ⁵ и дал возможность оценить время "жизни" электрона в состоянии с энергией E_p с помощью соотношения:

$$\tau_p \approx \hbar / \Gamma = 3 \cdot 10^{-14} \text{ с.}$$

6. Возникает естественный вопрос почему наличие резонансного уровня не отразилось на температурной зависимости электропроводности и коэффициента Холла (рис. 1). Используя (3) была рассчитана концентрация носителей на резонансном уровне по формуле:

$$n_p = \int_0^\infty \Delta\rho(\epsilon_F) f_0(\epsilon) d\epsilon, \quad (4)$$

где $f_0(\epsilon) = [1 + \exp(\frac{\epsilon - \epsilon_F + E_p}{kT})]^{-1}$ — функция Ферми–Дирака. Отсчет энергии ведется от дна зоны проводимости. Оказалось, что во всем исследованном интервале температур

величина n_p (кривая 5, рис. 2) более чем на четыре порядка меньше концентрации зонных электронов.

Значительное различие в концентрациях зонных и "резонансных" носителей, а также факт, что в нашем случае величины σ и R одного порядка, дают основание предположить о несущественности вклада резонансного рассеяния в величины σ и R для кристаллов $\text{Fe}_{0,01}\text{Hg}_{0,99}\text{Se}$. Более категоричные выводы по этому вопросу можно будет сделать лишь в результате конкретного численного расчета.

Литература

1. Rodot M. Ann. Phys., 1960, 5, 1083.
2. Цидильковский И.М. Зонная структура полупроводников. М.: Наука, 1978, с. 327.
3. Leibler K, et al. Phys. Stat. Sol. (b), 1971, 47, 405.
4. Цидильковский И.М. и др. Примесные состояния и явления переноса в бесщелевых полупроводниках. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987, с. 141.
5. Глузман Н.Г. и др. ФТП, 1986, 20, 1994.

Поступила в редакцию
16 сентября 1989 г.

Черновицкий государственный университет