

ИНВЕРСИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ХОЛЛА И ТЕРМОЭДС ПОД ДАВЛЕНИЕМ В УЗКОЩЕЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ СВИНЕЦ – ОЛОВО – СЕЛЕН

*Ицкевич Е.С.¹⁾, Каширская Л.М.¹⁾, Кучеренко И.В.,
Панкратов О.А., Свистов А.Е., Шотов А.П.*

В системе твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ проведены исследования зависимостей коэффициента Холла (R_H), проводимости σ , эффекта Шубникова – де Гааза и термоэдс α при $T = 4,2$ К до 30 кбар. Обнаружена смена знака R_H и α при $P \geq 18$ кбар. Делается вывод о существовании резонансной зоны с проводимостью дырочного типа и о сильном влиянии флуктуации дна зоны на подвижность электронов в этих полупроводниках.

¹⁾ Институт физики высоких давлений АН СССР.

Специфика узкощелевых полупроводников A^4B^6 состоит в том, что энергетические уровни собственных дефектов и примесей могут попадать в спектр разрешенных состояний. Некоторые из них располагаются вблизи экстремумов зон, оказывая заметное влияние на процессы переноса носителей заряда.

В данной работе в системе нелегированных твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ обнаружена зона резонансных состояний с проводимостью дырочного типа, налагающаяся на континуум зоны проводимости и расположенная вблизи ее дна. Кроме того, обнаружено резкое падение подвижности зонных электронов при уменьшении энергии Ферми ϵ_F ; (в пределах зоны проводимости), обусловленное флуктуациями дна зоны. Наличие двух этих явлений приводит к резкому уменьшению термоэдс α и коэффициента Холла R_H при уменьшении ϵ_F и в некоторых образцах к смене их знака.

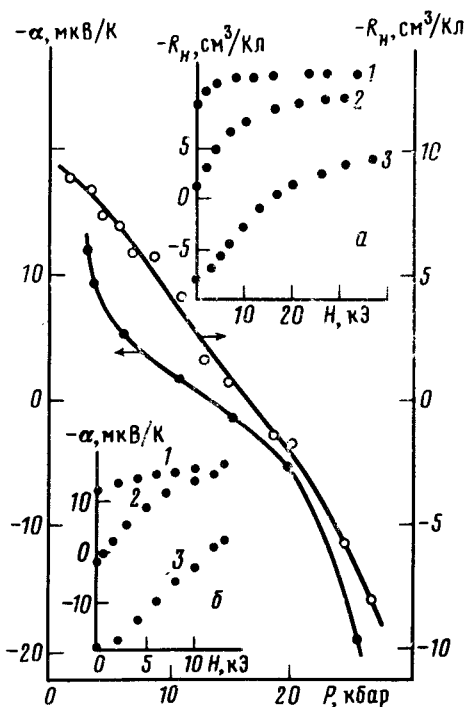


Рис. 1. Зависимости R_H ($H = 600 \text{ Э}$) и α от гидростатического давления при $T = 4,2 \text{ K}$ в образце $Pb_{0,85}Sn_{0,15}Se$. Вставки а, б. Зависимости R_H и α от H при 1 - $P = 0$, 2 - $P = 15$ кбар, 3 - $P = 27$ кбар

Рис. 2. Зависимости длины свободного пробега l от энергии Ферми ϵ_F при $T = 4,2 \text{ K}$ для образцов 1 - $x = 0,06$; 2 - $x = 0,15$; 3 - $x = 0,20$; 4 - $x = 0,31$

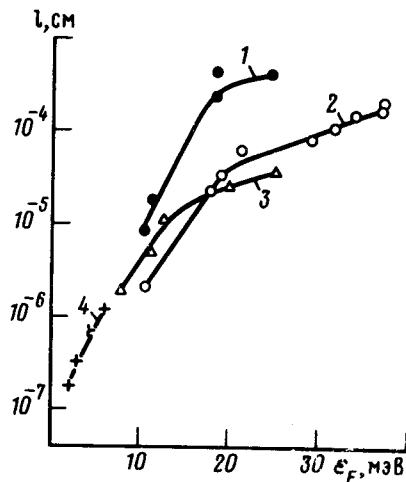


Рис. 2

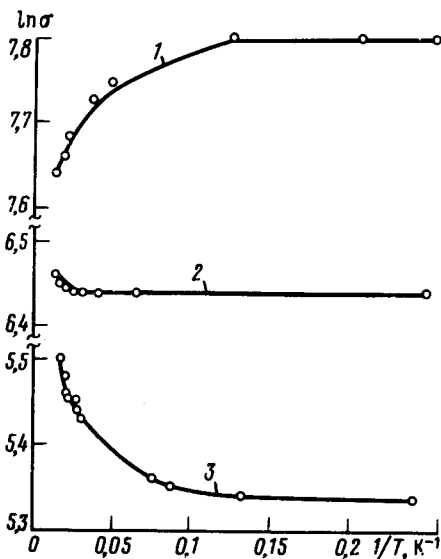


Рис. 3

Рис. 3. Температурные зависимости σ в образце $Pb_{0,67}Sn_{0,33}Se$ при 1 - $P = 0$, 2 - $P = 5$ кбар, 3 - $P = 12,5$ кбар

Традиционные исследования примесной зоны в Ge , Si , $GaAs$ основывались на изменении степени компенсации образца, что давало возможность сканировать ϵ_F по этой зоне. Мы использовали другой метод. Известно, что в узкозонных полупроводниках A^4B^6 под воздействием гидростатического давления ширина запрещенной зоны ϵ_g способна изменяться на вели-

чину сравнимую с \mathcal{E}_g . При этом значительно изменяется плотность состояний в основной зоне и, следовательно, \mathcal{E}_F . Ранее нами было показано, что в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ имеется зона резонансных состояний, расположенная вблизи дна зоны проводимости ^{1, 2}. Поэтому для исследования ее вклада в явление переноса необходимо было выбрать такие условия эксперимента, которые позволили бы плавно приближать \mathcal{E}_F ко дну зоны. Эти условия были реализованы в кристаллах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ с инверсным расположением зон ($x \geq 0,15$), поскольку в них с ростом давления увеличивается \mathcal{E}_g , что приводит к увеличению плотности состояний и уменьшению \mathcal{E}_F . В диапазоне давлений 0 – 30 кбар \mathcal{E}_F изменялась от 37 до 2 мэВ.

Исследовались монокристаллы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ с $x = 0,06 - 0,33$ и концентрацией электронов $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при температуре жидкого гелия. Изучались зависимости коэффициента Холла R_H , проводимости σ и термоэдс α от всестороннего сжатия в диапазоне 0 – 30 кбар, а также эффект Шубникова – де Гааза.

Результаты этих исследований проиллюстрированы на примере образца, содержащего 15 ат.% олова, с концентрацией электронов $n = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью при атмосферном давлении $\mu = 3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что при давлениях $P \geq 18$ кбар в слабом магнитном поле ($\mathcal{H} \leq 1$ кЭ) происходит инверсия знака R_H и α . Наблюдается также сильная зависимость R_H и α от напряженности магнитного поля, и в полях $\mathcal{H} > 10$ кЭ электронный знак R_H и α восстанавливается (рис. 1). Такое поведение R_H и α имеет место, когда в проводимости участвуют два типа носителей с разными знаками зарядов. Однако, в этих полупроводниках полуметаллическая ситуация не реализуется, так как исследование эффекта Шубникова – де Гааза свидетельствует о том, что экстремумы валентной зоны и зоны проводимости расположены в \mathcal{L} -точке k -пространства. Полученные результаты могут быть объяснены вкладом резонансной зоны в явление переноса. Расчет на ЭВМ зависимостей $R_H(H, P)$, $\sigma(P)$, $\alpha_0(P)$ в двухзонной модели дает возможность определить парциальные вклады носителей основной и резонансной зоны. Оказывается, что подвижность зонных электронов уменьшается почти в 100 раз при увеличении P до 30 кбар. В результате вклад резонансной зоны становится доминирующим. На рис. 2 приведена зависимость длины свободного пробега электронов от энергии Ферми для образцов с разным содержанием олова. Длина свободного пробега вычислялась по формуле $l = v_F \tau = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{l^2} \frac{\sigma}{n^{2/3}}$. Концентрация электронов n определялась из эффекта Шубникова – де Гааза.

Все кривые имеют излом при $\mathcal{E}_F \approx 14 - 16$ мэВ. Первоначальное, относительно слабое падение l хорошо объясняется сплавным рассеянием, обусловленным разупорядочением атомов твердого раствора.

В борновском приближении l при этом механизме рассеяния определяется соотношением:

$$l = \frac{\hbar p_F}{2\pi x(1-x)\Delta^2 \rho(\mathcal{E}_F) a^3 m^*} \quad (1)$$

где p_F – фермиевский импульс, а $\Delta - 1$ эВ – разность энергий p -оболочек Pb и Sn ³, a – постоянная решетки.

Эта формула правильно описывает зависимость l от состава (x) и \mathcal{E}_F в интервале энергий 35 – 16 мэВ. При $\mathcal{E}_F < 14 - 16$ мэВ происходит резкое уменьшение l , причем при $\mathcal{E}_F \rightarrow 0$ $l \sim a$.

Наиболее вероятной причиной этой тенденции к локализации является, на наш взгляд, локальное перераспределение электронной плотности валентных электронов, обусловленное замещением Pb на Sn. Как показывают предварительные расчеты, вблизи атома Sn образуется избыточный отрицательный заряд $\approx 0,2e$ (на периферии, естественно, возникает также же положительный заряд). Оценка соответствующего флуктуационного потенциала (с учетом пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости) дает величину ≈ 10 мэВ. Тенденция к локализации подтверждается температурными зависимостями $\sigma(T)$ (рис. 3).

Как видно из рисунка, при $P = 0$ проводимость уменьшается с ростом T в результате рассеяния на фонах. При $P > 10$ кбар, что соответствует $\mathcal{E}_F \leq 5$ мэВ, зависимости $\sigma(T)$ имеют противоположный характер. Возрастание σ с температурой указывает на резкое увеличение τ с энергией. При увеличении температуры возрастает энергия электронов вблизи \mathcal{E}_F , что приводит к удалению их от уровня протекания. Отсутствие типичной для прыжковой проводимости активационной зависимости σ от T в низкотемпературной области свидетельствует о том, что \mathcal{E}_F лежит выше порога подвижности.

Таким образом, показано существование флуктуации энергии дна зоны проводимости и наличие в ней резонансной зоны с проводимостью дырочного типа. Положительный знак R_H в резонансной зоне, возможно, обусловлен тем, что порождающее ее состояние отщепилось от валентных зон⁴. Оценки подвижности носителей в примесной зоне по двухзонной модели дают величину $\sim 10^4$ см²/В·с при 7 К. Однако, эта величина может быть сильно завышена, так как при расчете не учитывалось влияние магнитного поля на R_H и μ в примесной зоне. Из двухзонной модели следует также, что термоэдс в примесной зоне велика и составляет ~ 100 мкВ/К. Знак термоэдс в примесной зоне зависит от степени ее заполнения. В кристалле с $x = 0,15$ $\alpha > 0$, что свидетельствует о том, что примесная зона заполнена более, чем наполовину.

Литература

1. Кучеренко И.В., Шотов А.П., Свистов А.Е. Труды 4-ой Международной конференции по физике узкозонных полупроводников, г. Линц, Австрия, 1981 г.
2. Кучеренко И.В., Панкратов О.А., Свистов А.Е., Чижевский Е.Г., Шотов А.П. ФТП, 1984, 18, 1583.
3. Волков Б.А., Панкратов О.А., Сазонов А. ЖЭТФ, 1983, 85, 1395.
4. Emin D. Phil. Mag.; 1977, 35, № 5, 1189.