

# О КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ЭФФЕКТА МЁССБАУЭРА ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

*А.Ю.Александров, В.С.Варшанов,  
А.И.Иванов, Е.Ф.Макаров*

В настоящей работе исследовалась зависимость вероятности эффекта Мёссбауэра  $f'$  на ядрах  $\text{Te}^{125}$  в соединении  $\text{PbTe}$  от степени легирования индием и лантаном в диапазоне концентраций от нуля до 1% (по весу). В качестве источника излучения использовался  $\text{Te}^{125m}$  (энергия гамма-перехода  $35,6 \text{ кэВ}$ ) в соединении  $\text{TeO}_3$  [1]. Во всех измерениях источник находился при комнатной температуре, а поглотители при  $77^\circ \text{K}$ . В работе использовались поликристаллические образцы, синтезированные на естественном теллуре [2] с чистотой компонент:  $\text{Pb} - 99,999$ ;  $\text{Te} - 99,999$ ;  $\text{In} - 99,9995$ ;  $\text{La} - 99,93$ . Толщина образцов по  $\text{Te}$  во всех измерениях была одинаковой  $- 30 \text{ мг/см}^2$ . Эксперименты проводились на спектрометре электродинамического типа с равноускоренным движением источника излучения и сцинтилляционной системой регистрации импульсов.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Мёссбауэровские спектры всех образцов состояли из одиночной линии с одинаковым значением изомерного сдвига  $\delta$ :  $\delta = 0,12 \pm 0,04 \text{ см/сек}$ . На рис. 1 приведена зависимость  $\ln(f'/f'_0)$  от концентрации  $\text{In}$  и  $\text{La}$  ( $f'$  — вероятность эффекта Мёссбауэра для легированных образцов  $\text{PbTe}$ ,  $f'_0$  — для нелегированного образца), а на рис. 2 — зависимость экспериментальной ширины линии  $\Gamma_3$  от концентрации  $\text{In}$  и  $\text{La}$  в  $\text{PbTe}$ .

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Известно, что в кристаллах всегда существует определенное число дефектов, в том числе вакансий по Шоттки. В исследуемом нелегированном образце  $\text{PbTe}$ , как показали электрофизические измерения, превышение числа вакансий по  $\text{Pb}$  над числом вакансий по  $\text{Te}$  составляет  $1,9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что согласуется также с результатами работы [3]. На участке концентраций  $0 + C_1$  (для кривой 1, рис. 1) дефектами решетки являются вакансии по Шоттки, а заполнение их даже примесными атомами (в данном случае  $\text{In}$ ), естественно, приводит к уменьшению потенциальной энергии решетки, что обуславливает увеличение  $f'$ , так как при этом уменьшаются среднеквадратичные смещения атомов  $\text{Te}$ . В этой связи отметим, что подобный эффект должен влиять

также на величину температурного сдвига мёсбауэровской линии. Ожидаемая величина этого изменения на участке  $0 + C_1$  составляет несколько сотых долей  $мж/сек$  при изменении температуры в интервале  $20 + 80^\circ K$ . После заполнения всех вакансий (в данном случае сначала, по-видимому, вакансий по  $Pb$ , а затем по  $Te$ ) примесные атомы начина-

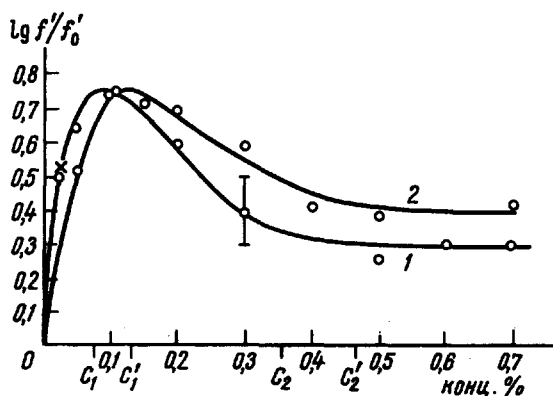


Рис.1. Зависимость вероятности эффекта Мёсбауэра от концентрации примесных атомов  $In$  и  $La$  в полупроводнике  $PbTe$ . 1 – легирование  $Zn$ , 2 – легирование  $La$

ют вытеснять атомы  $Pb$  в междоузлия, т.е. дальнейшее увеличение концентрации (интервал  $C_1 + C_2$  для кривой 1, рис. 1) приведет уже к увеличению числа дефектов типа френкелевских. Эти дефекты возмущают колебательный спектр решетки, увеличивая среднеквадратичные смещения атомов, что приводит к уменьшению величины  $f'$ . При больших концентрациях примеси ( $C > C_1$  для кривой 1, рис. 1) возможно также попадание атомов  $In$  в междоузлия и образование второй фазы, что должно приводить к появлению дислокаций, связанных с примесью, и образованию высокодисперсной фазы [4, 5]. Это обстоятельство может также приводить к уменьшению величины  $f'$  [6].

При отжиге примесь должна распределяться равномернее, и  $f'$  может вновь возрасти. Некоторым подтверждением этого может служить тот факт, что после отжига образца  $PbTe$ , легированного 0,3%  $In$  в течение 60 час при  $T = 750^\circ C$ , величина  $f'$  возросла на 20% (по сравнению с ее величиной до отжига), а для образца  $PbTe$  с концентрацией 0,05%  $In$  величина  $f'$  при аналогичном отжиге практически не изменилась.

Так как в нелегированном образце РbТе ширина линии (см.рис.2) близка к удвоенной естественной ширине ( $2\Gamma_e = 0,49 \text{ см/сек}$ ,  $\Gamma_3 = 0,52 \pm 0,05 \text{ см/сек}$ ), то можно считать, что в РbТе существует сферическая симметрия электрического поля ионов, лежащих в первой координационной сфере теллура. Введение примеси создает отличный от нуля градиент электрического поля (из-за различия валентных связей In - Te, La - Te и Pb - Te), что и приводит к уширению мёссбауэровской линии. Если считать, что после концентраций  $C > (0,3 + 0,4)\%$  вся примесь накапливается в определенных участках кристалла, то дополнительное уширение, связанное с электрическим сверхтонким взаимодействием, составляет приблизительно  $0,2 \text{ см/сек}$ .

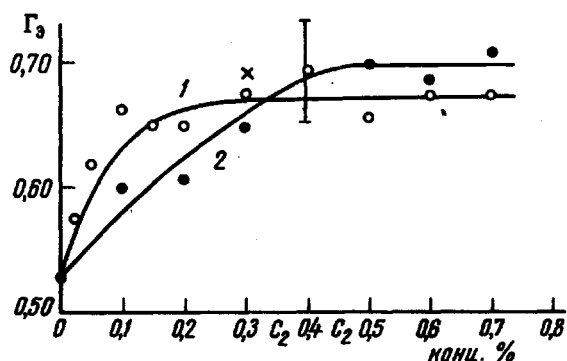


Рис.2. Изменение ширины линии  $\Gamma_3$  от концентрации примесных атомов In и La при легировании РbТе

Аналогичное качественное рассуждение можно привести и для образцов РbТе, легированных лантаном (кривая 2, рис. 1).

Используя результаты работы [7], можно показать, что для случая, когда  $TR \gg b\theta$ , величина  $f'/f_0'$  записывается в виде:

$$\frac{f'}{f_0'} = \exp \left[ - \frac{A(T/\theta)(b/\lambda)^2}{R^2} \right]$$

где  $T$  – температура кристалла,  $\theta$  – характеристическая температура, аналогичная температуре Дебая,  $b$  – характерная длина порядка размеров элементарной ячейки,  $R$  – расстояние от рассматриваемого ядра до дефекта (предполагается, что  $R \gg b$ ).

Это выражение качественно описывает наблюдаемую зависимость  $f'/f_0'$  от концентрации дефектов.

Считая, что максимум  $f'$  отвечает заполнению всех вакансий, получаем, что концентрация вакансий по свинцу в исходном РbТе составляет  $2,23 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (число вакансий по теллуру —  $2,04 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Суммарная концентрация всех вакансий отвечает приблизительно 0,1 вес.% при легировании In (кривая 1) и 0,12 вес.% при легировании La (кривая 2), что соответствует отношению их атомных весов.

Как явствует из рис. 1, вероятность эффекта Мёссбауэра в максимуме возрастает в  $e^{0,8} \approx 2,1$  раза по сравнению с нелегированным РbТе. Отсюда легко получить оценку:  $\bar{L}_0^2 \gg \bar{L}_{\text{лег}}^2 \approx 2,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^2$ , причем, для исходного РbТе среднее по образцу значение среднеквадратичного смещения атома теллура  $\bar{L}^2 \geq 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^2$ .

В заключение выражаем благодарность А.М.Афанасьеву, В.И.Гольданскому и И.М.Лифшицу за полезные дискуссии.

Институт химической физики  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
10 июля 1968 г.

#### Литература

- [1] В.А.Лебедев, Р.А.Лебедев, А.М.Бабешкин, А.Н.Несмеянов. Вестник МГУ, сер. Химия, 4, 18, 1968 .
- [2] W. Zachariasen. Z. Phys. Chem., 124, 273, 1929.
- [3] Masatomo Fujimoto, Jasuo Sato. Japanese J. of Appl. Phys., 5, 12, 1966.
- [4] E. Miller, K. Komaren, J. Kadoff. J. of Appl., Phys., 32, 11, 1961.
- [5] В.И.Фистуль. ФТТ, 6, 3738, 1964.
- [6] И.П.Суздалев, М.Я.Ген, В.И.Гольданский, Е.Ф.Макаров. ЖЭТФ, 51, 118, 1966.
- [7] В.И.Пересада. ЖЭТФ, 38, 1140, 1960.