

## "СМЯГЧЕНИЕ" ФОНОННОГО СПЕКТРА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ СИСТЕМЫ $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В БЕСЩЕЛЕВОЕ СОСТОЯНИЕ

*И.Н. Николаев, А.П. Шотов, А.Ф. Волков ,  
В.П. Марьин*

В области бесщелевого состояния в узкозонных полупроводниках системы  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  обнаружено уменьшение вероятности эффекта Мессбауэра на  $\sim 30\%$ . Это объясняется "смягчением" фононного спектра за счет уменьшения частот оптических ветвей и свидетельствует о сильном электрон-фононном взаимодействии.

В узкозонных полупроводниках системы  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  наблюдается бесщелевое состояние в интервале  $0,6 < x < 0,7$ ; при этом в точках  $L$  зоны Бриллюэна происходит инверсия зон [1]. В работе [2] предпола-

галось, что в этой системе осуществляется сильное электрон-фононное взаимодействие. В настоящей работе сообщаются экспериментальные результаты, свидетельствующие в пользу этого предположения.

Идея наших опытов состоит в следующем. Если справедливо упомянутое предположение, то изменение электронного спектра в области бесщелевого состояния должно повлечь за собой изменение фононного спектра. Информацию о фононном спектре можно получить, измеряя вероятность эффекта Мессбауэра.

Мы измеряли эффект Мессбауэра на ядрах  $\text{Sn}^{119}$  в поликристаллических образцах сплавов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с различным содержанием олова  $x$  при комнатной температуре. Источником  $\gamma$ -квантов служила двуокись олова активностью  $\sim 10$  мкюри. Сплавы синтезировали по методике, описанной в работе [3]. Для используемых нами "тонких" поглотителей вероятность Мессбауэра  $f^*$  вычисляли по формуле:  $f^* = AS_0/d$ , где  $A$  – нормировочная постоянная,  $S_0$  – площадь под кривой спектра,  $d$  – толщина поглотителя по олову. При уменьшении  $x$  отношение числа резонансных ( $\text{Sn}$ ) к нерезонансным ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Te}$ ) атомам уменьшается. Это может привести к постороннему эффекту – уменьшению  $S_0$  за счет нерезонансного поглощения. Проведенные нами контрольные опыты показали, что для выбранных толщин поглотителей этим эффектом можно пренебречь. Мессбауэровские спектры образцов имели форму одиночных линий. Площади  $S_0$  под кривыми спектров и изомерные сдвиги  $\epsilon$  (положения центров тяжести спектров) вычисляли с помощью ЭВМ.

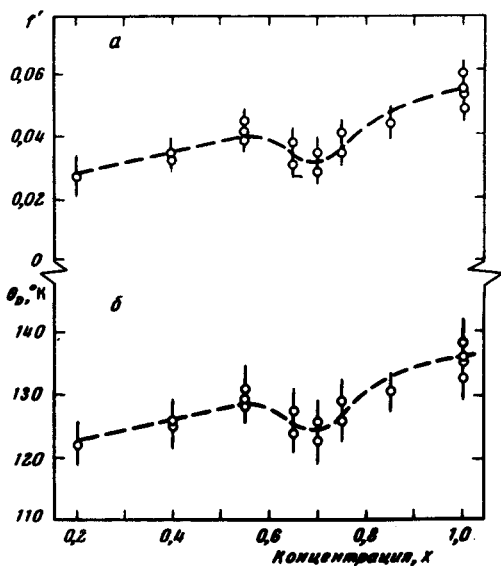


Рис. 1. *a* – Зависимость вероятности эффекта Мессбауэра на ядрах  $\text{Sn}^{119}$  от  $x$  в сплавах  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ; *б* – зависимость температур Дебая от содержания олова  $x$  для тех же сплавов. Вычисления  $\theta_D$  проведены в пределе высоких температур ( $T \gg \theta_D$ )

На рис. 1, *a* приведены вероятности  $f^*$  при различных содержаниях олова  $x$ . Разброс точек при фиксированном  $x$  показывает степень воспроизводимости результатов. Как видно из рисунка, в области  $x = 0,7$   $f^*$  уменьшается на  $\sim 30\%$ . Следует отметить, столь большие изменения  $f^*$  ( $\sim 20\%$ ) наблюдаются обычно при фазовых переходах, которые сопровождаются или скачкообразным изменением параметра кристаллической решетки или типа ее структуры. В связи с этим возникает вопрос: не является ли наблюдаемая аномалия  $f^*$  при  $x = 0,7$

следствием аналогичных причин? Согласно нашим измерениям и данным работы [4] параметры решетки сплавов, измеренные с точностью  $\sim 0,003\text{\AA}$ , уменьшаются линейно с увеличением  $x$ . В окрестности точки  $x = 0,7$  на этой зависимости мы не обнаружили никакой аномалии. Кроме того, как  $\text{PbTe}$ , так и  $\text{SnTe}$  имеют структуру типа  $\text{NaCl}$ . Следовательно, переход в бесщелевое состояние не сопровождается существенной перестройкой кристаллической решетки.

Сам факт уменьшения  $f^*$  при  $x = 0,7$  однозначно говорит о значительном ослаблении упругих констант кристаллической решетки сплава и об увеличении среднеквадратичных смещений атома олова из положений равновесия. Это означает также, что частоты колебаний атома олова уменьшаются. Поскольку атом олова может колебаться в оптических ветвях, то в качестве возможного объяснения аномалии  $f^*(x)$  можно предложить следующее: в бесщелевом состоянии частоты оптических ветвей уменьшаются, или, другими словами, происходит "смягчение" фононного спектра. Это может привести к неустойчивости кристаллической решетки по некоторым модам колебаний.

На рис. 1, б зависимость  $f^*(x)$  выражена в терминах характеристических температур Дебая  $\theta_D$ , вычисленных для случая  $T \gg \theta_D$  по формуле:  $f^* = \exp\left(-\frac{6RT}{k\theta_D^2}\right)$ , где  $R$  — энергия отдачи ядра,  $k$  — постоянная Больцмана. В рассматриваемом случае  $\theta_D$  является лишь качественной характеристикой фононного спектра, так как в элементарной ячейке сплава содержится более одного атома.

Таким образом, обнаруженная взаимосвязь изменений электронного и фононного спектров свидетельствует, по нашему мнению, о сильном электрон-фононном взаимодействии в полупроводниках системы  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ .

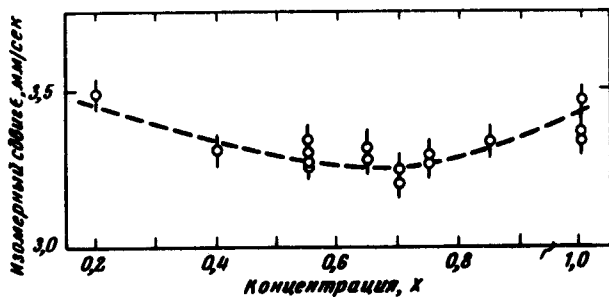


Рис. 2. Зависимость изомерных сдвигов ядер  $\text{Sn}^{119}$  в сплавах  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  от  $x$ . Источник —  $\text{Sn}^{119m} \text{O}_2$  при комнатной температуре

Из мессбауэровских спектров мы получили также информацию о состоянии  $s$ -электронов атома олова. Как известно, изменение изомерного сдвига  $\Delta\epsilon$  пропорционально изменению суммарной плотности  $s$ -электронов на ядрах. На рис. 2 приведена зависимость  $\epsilon(x)$ , из которой видно, что плотность  $s$ -электронов на ядрах  $\text{Sn}^{119}$  при  $x = 0,7$  минимальна. В работе [5] высказывалось предположение об изменении знака заряда иона олова при переходе в бесщелевое состояние. В чисто ионных соединениях олова изменению заряда иона на единицу соответствует  $\Delta\epsilon \approx 2,6 \text{ м.м/сек.}$  Хотя сплавы  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  и не являются чисто ионными,

тем не менее наши результаты противоречат этому предположению, так как глубина минимума  $\epsilon(x)$  составляет всего лишь  $\sim 0,15$  мж/сек. По-видимому,  $\epsilon(x)$  отражает зависимость концентрации  $s$ -подобных электронов в зоне проводимости сплавов от содержания олова.

Авторы выражают благодарность В.Е.Бухарину за помощь в проведении рентгеновских измерений, а также Ю.В.Копаеву и Б.А.Волкову за полезное обсуждение результатов.

Московский  
инженерно-физический институт

Поступила в редакцию  
14 декабря 1974 г.

### Литература

- [1] J.O.Dimmock, I.Melngailis, A.J.Strauss. Phys. Rev. Lett., **16**, 1193, 1966.
  - [2] Б.А.Волков, Ю.В.Копаев. ЖЭТФ, **64**, 2184, 1973.
  - [3] А.П.Шотов. И.В.Кучеренко. Ю.Н.Королев, Е.Г.Чижевский. ФТП, **6**, 1508, 1972.
  - [4] J.Dixon, R.Bis. Phys. Rev., **176**, 942, 1968.
  - [5] S.H.Wemple. Phys. Lett., **45A**, 401, 1973.
-