

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В $Pb_{1-x}Sn_xTe: In$

И.И.Засавицкий, А.В.Матвеевко, Б.Н.Мацонашвили, В.Т.Трофимов

Обнаружена отрицательная фотопроводимость (ОФП) в эпитаксиальных слоях $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x \approx 0,22$), легированных In ($5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19}$ атомов в $см^{-3}$). ОФП наблюдается при низких ($\lesssim 30$ К) температурах в условиях фоновой подсветки. Обсуждается кинетика ОФП в рамках модели ян-теллеровского центра.

Высокая фоточувствительность была обнаружена в кристаллах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x \approx 0,2$) с большим содержанием In . В данной работе сообщается о наблюдении как положительной фотопроводимости (ПФП), так и ОФП в эпитаксиальных слоях $Pb_{1-x}Sn_xTe$, легированных In до концентраций $N \sim 5 \cdot 10^{18} см^{-3}$. Как раз при таком уровне легирования в этом материале наблюдалось резкое уменьшение интенсивности фотolumинесценции².

Высококачественные эпитаксиальные слои $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ ($x = 0,22 - 0,23$) толщиной $d = 0,5 - 4$ мкм выращивались методом горячей стенки и методом мгновенного испарения в вакууме на подложках (111) BaF_2 . В первом методе легирование проводилось путем диффузии, во втором – в процессе роста. Концентрация атомов In варьировалась от $5 \cdot 10^{17}$ до $3 \cdot 10^{19} см^{-3}$. Концентрация и подвижность носителей тока при 77К составляли соответственно $\sim 10^{18} см^{-3}$ и $10^4 см^2/В \cdot с$ для слоев p -типа и $(6 - 8) \cdot 10^{16} см^{-3}$ и $3 \cdot 10^4 см^2/В \cdot с$ для слоев n -типа, легированных In . Возбуждение фотопроводимости (ФП) осуществлялось импульсным лазером на $GaAs$ ($\lambda \approx 0,9$ мкм, $\tau_{имп} = 0,1$ мкс). Образцы помещались на хладапроводе криостата с регулируемой температурой (T). Напряженность электрического поля в образце составляла около 0,1 В/см.

В нелегированных и легированных до уровня $N \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ образцах наблюдалась слабая ПФП, и время ее релаксации составляло $\leq 0,2$ мкс. При увеличении N до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ сигнал ФП возрастал более чем на два порядка, и в условиях подсветки фоном ($T \approx 300 \text{ К}$) знак сигнала ФП зависел от T . В интервале температур $7 - 27 \text{ К}$ была обнаружена ОФП – увеличение сопротивления при фотовозбуждении. На рис. 1 приведены формы сигнала фототовета для образца с $N \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при различных T . При повышении T видна смена знака сигнала ФП с отрицательного (рис. 1,а) на положительный (рис. 1,в). При этом время релаксации ОФП несколько уменьшается, а ее амплитуда сначала увеличивается, а затем резко уменьшается до нуля. При $T \approx 25 \text{ К}$ на фронте ОФП появляется положительный выброс, который при дальнейшем повышении T поглощает отрицательную часть сигнала. При $T \gg \geq 27 \text{ К}$ наблюдается только ПФП. Сигнал ПФП имеет два явно выраженных времени релаксации; короткое $\tau \leq 0,2$ мкс и длинное $\tau \leq 1$ мс.

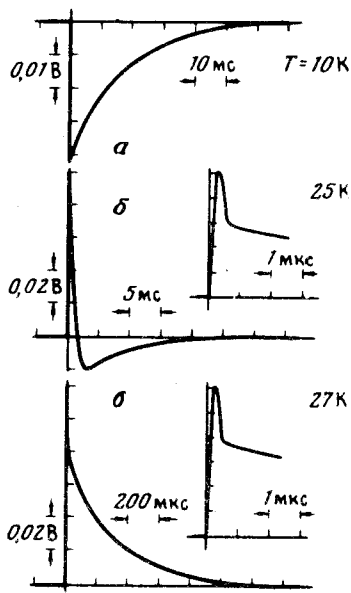


Рис. 1. Форма сигнала фототовета для образца с $N \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $d = 2,5 \text{ мкм}$

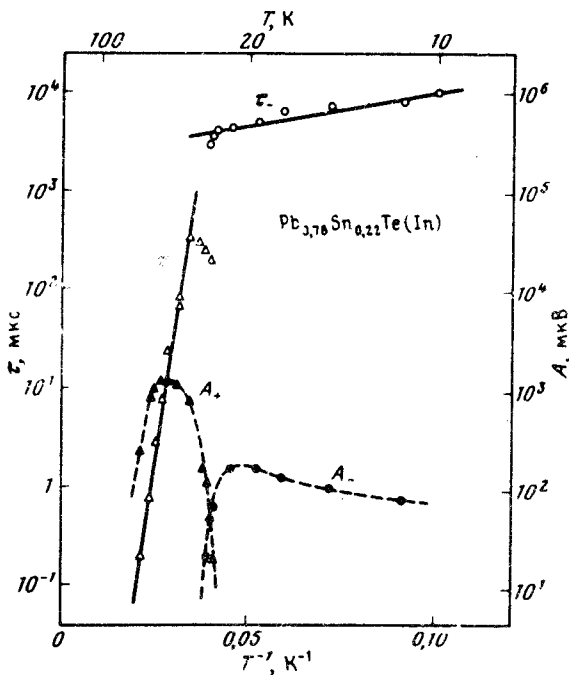


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость времени релаксации и амплитуд фототовета от температуры для ПФП (τ_+ , A_+) и ОФП (τ_- , A_-). $N = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $d = 2,0 \text{ мкм}$

На рис. 2 приведена зависимость времен релаксации ОФП (τ_-) и ПФП (τ_+) и амплитуд фототовета (A_- и A_+) для образца с $N \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в условиях фоновой подсветки. Видно, что время релаксации ПФП имеет термоактивационный характер. Энергия активации уменьшается от 51 мэВ для образцов с $N \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до 35 мэВ для образцов с $N \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 3 приведена зависимость температуры перехода (T_p) от ОФП к ПФП для образцов с различным уровнем легирования. T_p уменьшается от 27 К при $N \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до 17 К при $N \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Для выяснения влияния фона изучалась кинетика ФП в условиях полного экранирования фона. В этом случае при изменении T от 8 до 200 К наблюдалась только ПФП; при этом время релаксации убывает от 10 мс до 0,2 мкс. При одновременном облучении образца излучением GaAs-лазера и глобара ($\lambda = 3,7 - 5,5 \text{ мкм}$) в случае ОФП наблюдалось уменьшение времени релаксации от 10 до 0,5 мс и небольшое увеличение амплитуды, а в случае ПФП

— резкое уменьшение амплитуды и слабое уменьшение времени релаксации. При $T > 50$ К подсветка глобаром слабо влияет на сигнал фотоответа. Измерялась также ФП при возбуждении лазером на СО ($\lambda \approx 5,3$ мкм, $\tau_{\text{имп}} \approx 1$ мкс). В интервале температур 2 — 77 К наблюдается только ПФП. При $T > 27$ К зависимость времени релаксации от T совпадает с зависимостью, полученной при возбуждении GaAs-лазером. При $T < T_{\text{п}}$ отношение сопротивлений образца без фона и с фоном возрастало с увеличением N и составляло два порядка при $N \approx 10^{19}$ см $^{-3}$.

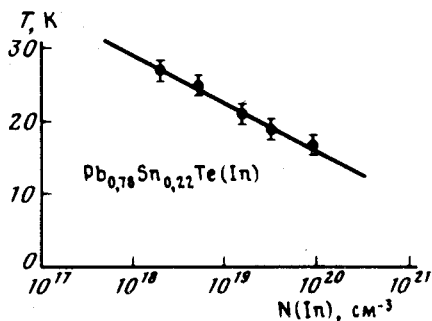


Рис. 3. Зависимость температуры перехода от ОФП к ПФП от уровня легирования In

Полученные результаты в отличие от работы ³ можно качественно объяснить с помощью модели яна-теллеровского центра (ЯТЦ) ⁴. Таким центром может быть вакансия Te или комплекс атом In — вакансия Te. Введенный In замещает вакансии металла, являющиеся основным типом точечных дефектов в $\text{Pb}_{0,78}\text{Sn}_{0,22}\text{Te}$, и по мере увеличения уровня легирования происходит понижение концентрации дырок, а затем — инверсия типа проводимости при $N \approx 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Такой материал обладает максимальным квантовым выходом излучения по сравнению с нелегированным или сильно легированным материалом ². ЯТЦ образует локальный уровень, находящийся выше дна зоны проводимости. При захвате электрона на этот уровень происходит ян-теллеровская перестройка кристаллического окружения центра, в результате уровень с захваченным электроном опускается ниже дна зоны проводимости. Вывести электрон из этого состояния можно с помощью термической активации или фотовозбуждением. Поскольку оптические переходы происходят при неизменной конфигурации ЯТЦ, то энергия термической активации меньше, чем энергия оптического перехода.

При $T < T_{\text{п}}$ электроны, заброшенные в зону проводимости фоновым излучением с ЯТЦ, не могут вернуться обратно из-за наличия потенциального барьера ΔE . При этом сопротивление образца мало. При поглощении кванта излучения с энергией большей, чем расстояние от вершины валентной зоны до уровня ЯТЦ ($\lambda < 5,3$ мкм), происходит захват электрона на уровень с последующей быстрой перестройкой ЯТЦ. Образовавшиеся дырки рекомбинируют с электронами зоны проводимости за время $< 10^{-7}$ с, при этом сопротивление образца увеличивается, наблюдается ОФП. Релаксация ОФП происходит за счет фонового излучения. Действительно, увеличение интенсивности фона подсветкой глобаром ускоряет процесс релаксации ОФП.

Полное экранирование фона приводит к ликвидации механизма релаксации ОФП. В результате каждый импульс лазерного излучения будет переводить электроны на ЯТЦ, пока прямые и обратные переходы под действием излучения не уравниваются друг друга. Это приведет лишь к изменению установившегося значения сопротивления. В промежутке между импульсами часть электронов релаксирует через барьер ΔE . При этом наблюдается ПФП с временем релаксации ~ 10 мс при $T = 4,2$ К. Этот процесс соответствует начальному участку релаксации долговременной ФП. Минимальное время релаксации, приведенное в ⁵ и объяснявшееся захватом на поверхностные центры, составляло $\sim 10^2$ с. Согласно модели ЯТЦ время релаксации сильно зависит от положения уровня Ферми относительно потенциального барьера и возрастает по мере релаксации электронов из зоны проводимости на ЯТЦ.

При $T > T_{\text{п}}$ электроны переходят на уровень ЯТЦ через потенциальный барьер ΔE в результате термической активации. Под действием лазерного излучения электроны возвращаются в зону проводимости с последующей релаксацией через потенциальный барьер ΔE , что приводит к ПФП, при этом время релаксации носит термоактивационный характер с энергией активации $\approx 35 - 51$ мэВ.

Таким образом, наблюдавшиеся ОФП и ПФП в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$: In объясняются в рамках модели ⁴. ОФП с этой точки зрения является тушением ФП, возбужденной фоновым излучением. Для указанной модели оценена величина потенциального барьера $\Delta E \approx 35-50$ мэВ и определен нижний порог расположения уровня ЯТЦ: $\sim 0,2$ эВ выше дна зоны проводимости.

Авторы благодарны Б.А.Волкову за обсуждение результатов.

Литература

1. Вул Б.М., Воронова И.Д., Калужная Г.А., Мамедов Т.С., Рагимова Т.Ш. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 21.
2. Zsavitvsky I.I., Matsonashvili B.N., Flusov G. V. Lecture Notes in Physics, 1982, 152, 449.
3. Petchina S.M., Klein A., Weiser K. J. Phys. Soc. Japan (Suppl. A), 1980, 49, 783.
4. Волков Б.А., Панкратов О.А. ДАН СССР, 1980, 255, 93.
5. Вул Б.М., Гришечкина С.П., Рагимова Т.Ш. ФТП, 1982, 16, 1452.