

ОСТАТОЧНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$ В ДАЛЕКОЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

И.Д. Воронова, Е.В. Семенова

Вплоть до длин волн ~ 350 мкм не обнаружено красной границы для явления остаточной фотопроводимости в $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te:In$. Характер температурной и временной релаксации в длинноволновой области спектра оказался таким же, как и в более коротковолновой. Предложено объяснение явления в рамках модели ян-теллеровских центров захвата электронов.

Остаточная фотопроводимость (ОФП), т.е. фотопроводимость, которая сохраняется в образце долгое время (многие часы) после выключения освещения, впервые в узкозонных полупроводниках ($E \sim 0,1$ эВ) наблюдалась в $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$, легированном индием /1/. Это явление имеет место при гелиевых температурах и исчезает при $T \geq 20$ К.

К настоящему времени явление ОФП исследовано в интервале длин волн от видимого света до $\lambda = 22$ мкм /2/. Для нахождения красной границы ОФП мы расширили этот диапазон в сторону увеличения длин волн до ~ 350 мкм. Во всем исследованном интервале была обнаружена ОФП с долговременной релаксацией.

Исследовались монокристаллические образцы $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$ с примесью индия (0,5 ат.%). Использовались источники излучения двух типов: полупроводниковые лазеры и широкополосные полупроводниковые излучатели. Измерения проводимости и питание источников излучения осуществлялись на постоянном токе. Лазеры из GaAs, InSb, PbSSe, PbSnSe, PbS и TeSe генерировали излучение соответственно при длинах волн 0,83, 5,3, 6,3, 7,8, 18,8, 19,5, 22, 36 и 46 мкм. Лазеры вместе с образцами закрывались медным экраном от теплового фонового излучения. Для получения больших длин волн с $\lambda > 40$ мкм использовались немонохроматические источники излучения из n-Ge:Sb и p-Ge:Ga /3/. Эти источники, в отличие от лазеров, помещались вне медного экрана, в котором напротив образца было сделано отверстие. В это отверстие вклеивались фильтры, через которые пропускалось излучение, начиная только с некоторой λ_f . В качестве фильтров использовались черная бумага и пластинки плавленого кварца разной толщины. Бумага не пропускала видимый свет и излучение ближней ИК области (до ~ 10 мкм). Средняя ИК область поглощалась кварцем. Граничная длина волны λ_f определялась на уровне $\leq 1\%$ пропускания по спектральной характеристике кварца. Таким образом, на образец попадало излучение в интервале $\lambda_s > \lambda > \lambda_f$, где λ_s — красная граница излучения немонохроматического источника.

Измерения температурной и временной релаксации фотопроводимости показали, что ОФП в длинноволновой части спектра имела такие же характеристики, как и в более коротковолновой области /1/. На рис. 1 показаны температурные зависимости проводимости $\sigma = 1/R$ для образцов $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te:In$ после освещения их излучением с $\lambda_f = 300$ мкм (кривая 1), $\lambda = 46$ мкм (кривая 2) и $\lambda = 0,83$ мкм (кривая 3). Освещение выключалось при 4,2 К и только после этого повышалась температура образца.

Измерения временной релаксации ОФП проводились при 4,2 К. Как и для $\lambda = 5,3$ мкм /4/, для длин волн в далекой ИК области установлено, что по истечении времени t_0 после выключения освещения проводимость спадает по логарифмическому закону

$$\sigma = \sigma_0 - a \lg(t/t_0), \quad (1)$$

где σ_0 — начальная проводимость в момент t_0 . Для выяснения смысла коэффициента a на рис. 2 приведена зависимость величины a от σ_0 для разных длин волн от 5,3 до 350 мкм. Каждой точке на этом рисунке соответствует процесс релаксации вида (1). Видно, что коэффициент a пропорционален начальной проводимости при изменении σ_0 на пять порядков величины.

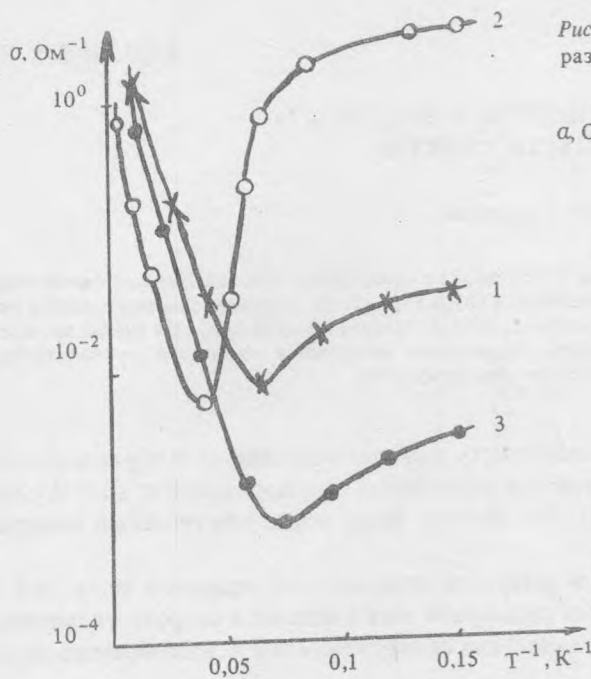


Рис. 1. Температурная зависимость ОФП при освещении излучением различных длин волн.

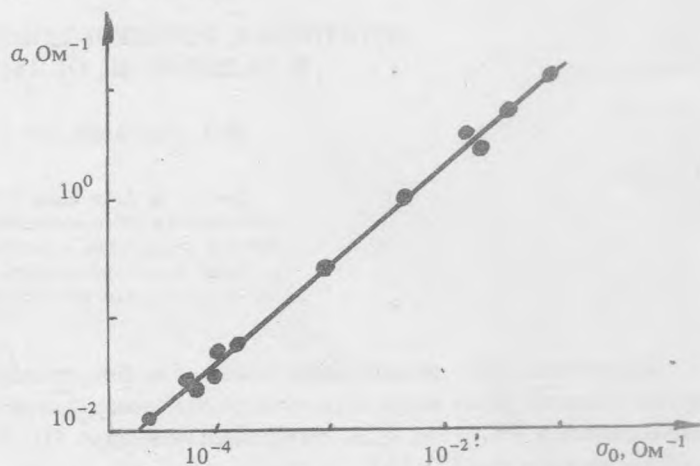


Рис. 2. Скорость логарифмической релаксации в зависимости от начальной проводимости.

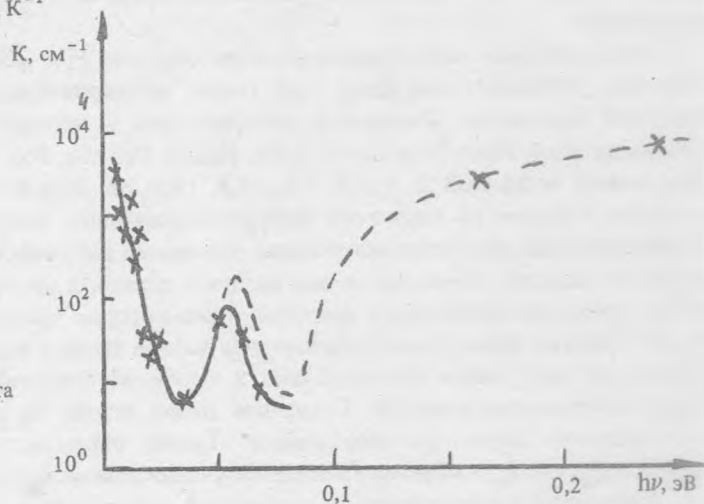


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения для ОФП.

Логарифмическая релаксация (1) ОФП была объяснена в рамках модели ян - теллеровских центров (ЯТЦ) при наличии в зоне проводимости полосы энергий, в которой находятся свободные от электронов ЯТЦ /4/. Расчеты /4/ показали, что концентрация свободных электронов уменьшается при релаксации как $kT N_{\text{eff}} \ln(t/t_0)$. Сравнение с экспериментальной зависимостью (1) показывает, что эффективная плотность состояний ЯТЦ в зоне проводимости N_{eff} , во-первых, не зависит от времени, что означает, что она постоянна в довольно широкой полосе энергий; во-вторых, она пропорциональна начальной концентрации свободных электронов.

В третьей группе экспериментов измерялась спектральная зависимость вероятности генерации долгоживущих электронов k , которую условно мы будем называть коэффициентом поглощения для ОФП. На рис. 3 показана такая зависимость, полученная нами (сплошная линия) и в работе /2/ (пунктирная линия). Коэффициент поглощения для ОФП определялся по методу, предложенному в /2/.

Из рис. 3 видно, что в области поглощения зона-зона и в области пика около 60 мэВ нами получены значения k , близкие к результатам /2/. В области около 35 мэВ ($\lambda \approx 35$ мкм) мы обнаружили минимум k . Именно эта область считалась в работе /5/ красной границей для ОФП. Согласно расчетам /6/, она нахо-

дится при энергии квантов $\epsilon \sim 20$ мэВ ($\lambda \sim 60$ мкм). Однако наши эксперименты показывают, что при продвижении в более длинноволновую область наблюдается рост коэффициента поглощения для ОФП вплоть до 350 мкм; по крайней мере, не существует красной границы для ОФП.

Прежде чем перейти к объяснению роста k при $\epsilon < 30$ мэВ, отметим, что в этой области спектра начинается полоса остаточных лучей — область сильного поглощения света на колебаниях решетки, которая характерна для всех ионных кристаллов. Именно в этой области в работе /7/ наблюдалось полное отсутствие пропускания излучения в образцах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0,22 - 0,28$). Рост коэффициента поглощения для ОФП, полученный в наших экспериментах в полосе сильного поглощения на колебаниях решетки, говорит о тесной связи этих явлений. Отсутствие красной границы для ОФП при столь малых энергиях квантов объяснить трудно. Оставаясь в рамках модели ЯТЦ, мы предположили, что связь ОФП с активным поглощением света решеткой осуществляется следующим образом. Так как собственная частота ЯТЦ находится вблизи частоты поперечного оптического фонона ω_{TO} /8/, то при поглощении света в области остаточных лучей возникают резонансные колебания примесных атомов /9/. Такие колебания могут привести к смещению ЯТЦ в "мягкой" решетке $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$ при низких температурах, возможно, близких к температуре фазового перехода смещения /10/. С другой стороны, энергия перестроенного ЯТЦ находится в зоне проводимости, и дальнейшее изменение его зарядового состояния не требует дополнительной затраты энергии. Наше предположение состоит в изменении порядка двух процессов — ионизации ЯТЦ и его перестройки в решетке /11/, которые происходят при фотоионизации ЯТЦ коротковолновым светом. Результатом в обоих случаях будет появление долгоживущего электрона в зоне проводимости.

Авторы выражают благодарность С.Н. Максимовскому, С.Д. Сиваченко и А.П. Чеботареву за предоставление источников излучения. Авторы благодарны также С.П. Гришечкиной за консультации по методу определения коэффициента поглощения для ОФП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вул Б. М. и др. Письма в ЖЭТФ, 29, 21 (1979).
2. Вул Б. М., Гришечкина С. П., Рагимова Т. Ш. ФТП, 21, № 6, 1054 (1987).
3. Астров Ю. А., Порцель Л. М. Труды VI Всесоюз. симп. "Плазма и неустойчивости в полупроводниках", Вильнюс, 1986, с. 130; Берман Л. В. и др. ФТП, 19, 369 (1985).
4. Волков Б. А., Воронова И. Д., Шотов А. П. ДАН СССР, 293, 602 (1987).
5. Елизаров А. И. и др. ФТП, 16, 856 (1982).
6. Акимов Б. А. и др. Препринт МГУ № 1, 1980.
7. Такаока С., Мурасаке К. J. Phys. Soc. Jap., 52, 25 (1983).
8. Волков Б. А., Панкратов О. А. ДАН СССР, 255, 93 (1980).
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., Наука, 1978.
10. Кавамура Н. Proc. Internat. Summer School Narrow-Gap Semicond., Nimes, 1980, p. 470.
11. Волков Б. А., Осипов В. В., Панкратов О. А. ФТП, 14, 1387 (1980).

Поступила в редакцию 10 марта 1987 г.