

КИНЕТИКА ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (In) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ СОСТАВА

© Б.А. Акимов, Н.А. Львова, Л.И. Рябова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Получена 12 сентября 1995 г. Принята к печати 17 октября 1995 г.)

Исследована кинетика фотопроводимости монокристаллических твердых растворов со стабилизированным положением уровня Ферми $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (In) ($x \leq 0.1$) в температурном интервале $4 \div 35$ К в условиях подсветки. Обнаружено, что изменение состава твердого раствора приводит к качественному изменению кинетики фотопроводимости — к появлению с ростом x на кинетических кривых наряду с задержанной фотопроводимостью участка сравнительно быстрых релаксаций. Доля быстро релаксирующих носителей растет по мере увеличения x .

Анализ экспериментальных результатов проводится с использованием конфигурационной диаграммы, предполагающей существование наряду с основным состоянием примесного центра метастабильного. Показано, что в предположении линейного смещения энергетических уровней примеси быстрый релаксационный процесс можно наблюдать именно в тех твердых растворах, где уровень метастабильного состояния попадает в запрещенную зону.

Область существования твердых растворов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ ограничивается составами с $x < 0.25$, при этом с ростом x запрещенная зона E_g существенно увеличивается ($\partial E_g / \partial x \sim 40$ мэВ/мол % MnTe) [1,2]. Изучение характера пиннинга уровня Ферми E_f и диаграмм перестройки энергетического спектра с изменением x для твердых растворов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (In) показало, что стабилизированный уровень Ферми с ростом x смещается в запрещенную зону, переход металл-полупроводник имеет место при $x \simeq 0.05$ [3]. В образцах с $x < 0.05$ (уровень Ферми находится выше дна зоны проводимости, $\epsilon_f > E_c$) наблюдаются осцилляции Шубникова-де-Гааза с ярко выраженным спиновым расщеплением уровней Ландау [3]. В области температур $T < T_c \simeq 20$ К обнаружена задержанная фотопроводимость (ФП), причем T_c не зависит от состава твердого раствора (от x), так же как и в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (In) [4,5].

Исследование кинетики ФП именно в твердых растворах $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (In) представлялось весьма интересным по следующим соображениям. Ранее при исследовании $PbTe$ (Ga) было показано, что

важную роль в фотоэлектрических явлениях играют не только основные, но и метастабильные состояния примесных центров [6]. Причем характер кинетики ФП определяется как энергетическим положением основного и метастабильного состояний, так и процессами оптической перезарядки центров. В $Pb_{1-x}Mn_xTe(In)$ имеется реальная возможность существенно и достаточно плавно изменять конфигурацию примесных уровней и разрешенных зон посредством вариации состава. Таким образом, можно попытаться определить, как именно перестройка энергетического спектра влияет на характер кинетических процессов, а также уточнить вклад основного и метастабильного состояний в кинетику ФП.

Исследованные образцы. Методика эксперимента

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные о кинетике фотопроводимости образцов $Pb_{1-x}Mn_xTe(In)$ ($x \leq 0.1$), для которых гальваномагнитные, в частности осцилляционные эффекты, были подробно исследованы ранее в работе [3]. Таблица с характеристиками образцов приведена там же. Во всех исследованных кристаллах количество введенного индия составляло от 0.5 до 1 ат %, что достаточно для реализации пиннинга уровня Ферми. В этих условиях свойства образцов в основном определяются взаимным расположением разрешенных зон и уровня Ферми, а также характером перестройки энергетического спектра при изменении состава, т.е. x . Поскольку, как показано в [3], смещение уровня Ферми относительно краев зон проводимости (E_c) и валентной (E_v) является линейным, далее в тексте мы будем указывать лишь состав исследованных твердых растворов, т.е. x .

Исследование кинетики ФП осуществлялось в температурном интервале $4.2 \div 35$ К с использованием непрерывного и импульсного источников излучения. Измерения проводились в условиях, обеспечивающих практически полное экранирование исследуемых кристаллов от фоновой подвески [4,5].

Экспериментальные результаты

В условиях слабого возбуждения кинетика нарастания фототока I регистрировалась в режиме заданного напряжения $V = 0.1$ В. Образец освещался «белым» светом от миниатюрной лампы накаливания с максимальной мощностью $P \simeq 0.3$ мВт (к свету обращена наиболее широкая грань образца).

Для образцов твердых растворов $Pb_{1-x}Mn_xTe(In)$ с $x \leq 0.07$ включение источника приводит к росту тока I без какой-либо заметной задержки. При выключении источника ток I практически не изменяется во времени t (величина I падает не более чем на 1% в течение часа). Это явление можно считать твердотельной оптической памятью. Повторное включение света приводит к дальнейшему росту фототока. При уменьшении мощности источника скорость роста фототока снижается. При более высоком уровне возбуждения сопротивление образца становится малым, и кинетика ФП регистрируется в режиме заданного

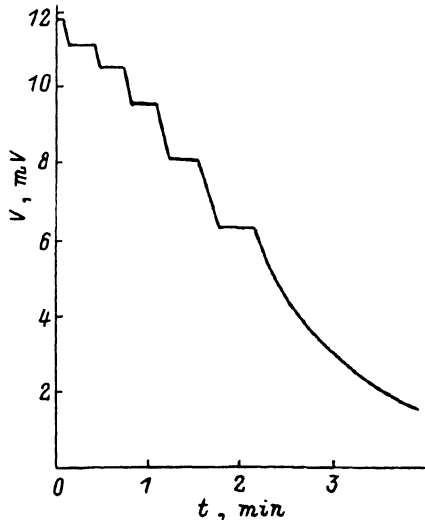


Рис. 1. Кинетика спада напряжения на образце $\text{Pb}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{Te}(\text{In})$ при прерывном освещении в режиме заданного тока $I = 30 \text{ мкА}$, $T = 4.2 \text{ К}$. Размеры образца — $3.2 \times 1.2 \times 0.7 \text{ мм}^3$.

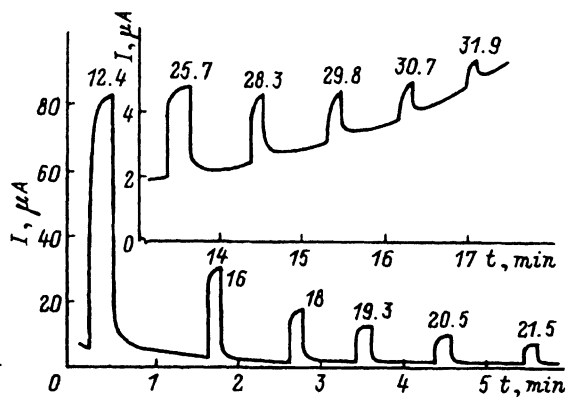


Рис. 2. Относительные изменения фотоотклика образца $\text{Pb}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{In})$ при отогреве от 4.2 К — измерения в режиме заданного напряжения $V = 0.1 \text{ В}$ в условиях прерывистой подсветки от источника мощностью $P = 1 \text{ мВт}$. Размеры образца — $3 \times 1.6 \times 0.6 \text{ мм}^3$. Указаны значения температуры T [К].

тока. При этом изменяющееся напряжение V снимается с потенциальных контактов. Пример записи изменений $V(t)$ в режиме заданного тока ($I = 30 \text{ мкА}$) для образца $\text{Pb}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{Te}(\text{In})$ показан на рис. 1. При записи кривой рис. 1 источник мощностью $P = 0.3 \text{ мВт}$ включался и выключался, что повторялось многократно. Из приведенных данных видно, что при гелиевых температурах для сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ с $x \leq 0.07$ релаксация $V(t)$ после выключения освещения в широкой области изменения проводимости практически не наблюдается.

Снятая в тех же условиях кинетика фототока для образцов с $x = 0.085$ характеризуется появлением на кривых спада участка относительно быстрого изменения сигнала. Сравнение кинетических кривых для твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ разного состава позволяет отметить, что с ростом x проявляется тенденция к уменьшению интегральных времен релаксации.

В твердом растворе $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ с $x \approx 0.1$ доля быстро релаксирующих неравновесных носителей заметно возрастает. Анализ кривой спада показывает, что релаксация $I(t)$ не является экспоненциальной, мгновенное время релаксации увеличивается с течением времени. Однако на «хвосте» релаксационной кривой спад ФП затягивается, и в образце в течение длительного времени существует некоторая остаточная проводимость.

На рис. 2 показано относительное изменение характера ФП при отогреве подсвеченного образца $\text{Pb}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{In})$ от 4.2 до 35 К . Кривые сняты в режиме заданного напряжения $V = 0.1 \text{ В}$ в условиях прерывистой подсветки от источника мощностью $P = 1 \text{ мВт}$. При $T = 4.2 \text{ К}$ темновой ток равен 0.03 мкА . Как видно из приведенных данных, при температурах $T > 12 \text{ К}$ остаточная ФП, или «хвосты» релаксаций, на-

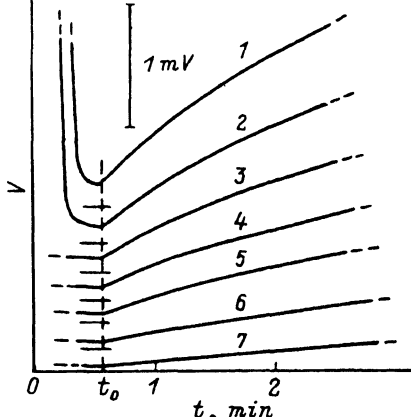


Рис. 3. Кинетика релаксаций напряжения на потенциальных контактах образца $\text{Pb}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{In})$ в режиме заданного тока $I = 0.25 \text{ мА}$ при 4.2 К . Размеры образца — $3 \times 1.6 \times 0.6 \text{ мм}^3$. Освещение выключается в момент t_0 . Мощность источника света, мВт: (1-4) — 1; 5, 6 — 9; 7 — 150. Длительность освещения, мин: 1 — 0.2, 2 — 0.3, 3 — 0.8, 4 — 2.8, 5 — 0.2, 6 — 1, 7 — 2.

чинают исчезать. При $T > 25 \text{ К}$ происходит существенный рост темнового тока, и относительная величина сигнала фототока падает.

При длительном освещении образца при гелиевой температуре характер релаксаций также изменяется. Эти изменения для образца $\text{Pb}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{In})$ отражены на рис. 3. Кривые релаксации напряжения на потенциальных контактах образца при разных условиях освещения снимались в режиме заданного тока $I = 0.25 \text{ мА}$. Для удобства представления кривые сдвинуты относительно друг друга, при этом горизонтальная линия ниже каждой кривой соответствует точке $V = 0$. Для кривых 1, 2 показан участок падения напряжения при освещении. Момент t_0 соответствует моменту выключения освещения. Наименьшее сопротивление образца при освещении составляет 0.8 Ом , в то время как темновое сопротивление $\sim 3 \text{ МОм}$. Из приведенных данных следует, что с увеличением мощности и длительности облучения характерные времена релаксации заметно увеличиваются.

Для образца $\text{Pb}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{In})$ анализировалась также кинетика ФП при импульсном облучении с использованием полупроводникового лазера с длиной волны $\sim 4.2 \text{ мкм}$. Длительность импульса облучения составляла 10 мкс , мощность $\sim 10 \text{ мкВт}$, период повторения — 1 с . Обнаружено, что релаксация импульсной ФП также не является экспоненциальной, мгновенные времена релаксаций увеличиваются с течением времени. При гелиевых температурах форма кривых спада ФП зависит от числа импульсов облучения, поскольку после каждого импульса происходит частичное «запоминание» фототока.

Обсуждение результатов

Так же как и в случае $\text{PbTe}(\text{Ga})$, для объяснения закономерностей в изменении кинетики ФП при вариации состава твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ представляется наиболее оправданным привлечь модель, предполагающую наличие метастабильного состояния примесного центра наряду с основным. Анализ ситуации существенно упрощается в связи с тем, что авторы работы [7] с помощью экспериментов по использованию туннельной спектроскопии определили параметры для модели одно- и двухэлектронных состояний примесного центра в $\text{PbTe}(\text{In})$. На рис. 4, а приведена конфигурационная диаграмма из этой

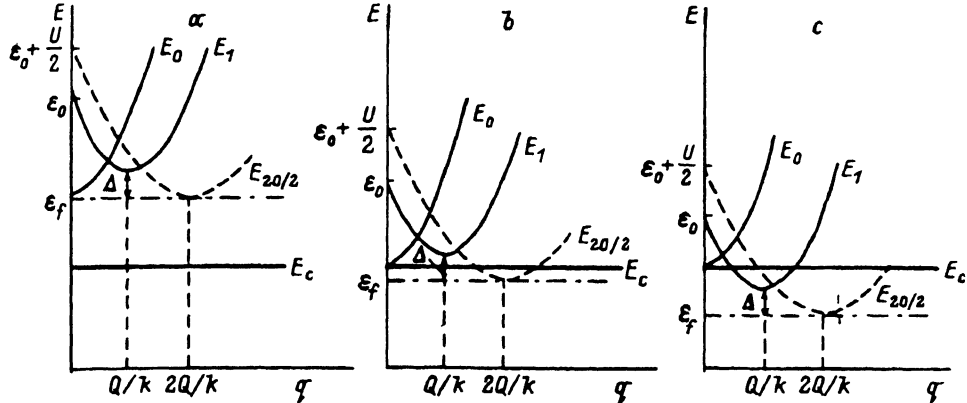


Рис. 4. Конфигурационные диаграммы в модели двухэлектронного квазилокального состояния для $\text{PbTe}(\text{In})$ из [7] (a) и $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ (b, c). Пояснения в тексте.

работы, где q — обобщенная координата, характеризующая локальную деформацию или взаимное расположение примеси и атомов основного вещества; Q и k — соответственно деформационный потенциал и жесткость решетки при локальной деформации; энергия системы «примесный центр, на котором находится один электрон, + решетка», записывается в виде

$$E_1 = (\varepsilon_0 - Qq) + kq^2/2; \quad (1)$$

энергия «двух центров, из которых на одном находится два электрона, а второй пустой, + решетки» —

$$E_{20} = 2(\varepsilon_0 - Qq) + kq^2/2 + U, \quad (2)$$

U — энергия кулоновского отталкивания двух электронов, ε_0 — энергия электрона на примесном центре в отсутствие деформации. $E_0 = \varepsilon_f + kq^2/2$ — энергия системы «электрон + центр + решетка», когда электрон остается делокализованным.

Уровень одноэлектронного квазилокального состояния с минимальной энергией находится выше уровня Ферми по энергии на $\Delta = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f)/2 - U/4$. Пользуясь численными оценками авторов [7], можно считать $\Delta \simeq 40$ мэВ. Если предположить, что введение Mn в PbTe не приводит к существенному изменению Q и q , изменение конфигурационной диаграммы при увеличении x можно качественно представить рисунками 4, b и 4, c: одноэлектронный уровень при некотором x должен попадать в запрещенную зону.

Переход одноэлектронного уровня E_1 через край зоны проводимости E_c должен сопровождаться качественным изменением кинетики ФП. Действительно, при $E_1 > E_c$ кинетику задержанной ФП обуславливает большой барьер между зонными и двухэлектронными локализованными состояниями. При $E_1 < E_c$ имеется возможность захвата части зонных электронов в метастабильное одноэлектронное состояние, отделенное гораздо меньшим барьером, что и обуславливает быстрый участок спада фототока. Лишь при высоком уровне возбуждения, когда метастабильные уровни размываются в зону, указанный канал релаксации подавляется. Кинетические характеристики для этих

составов качественного подобны полученным для PbTe (Ga), для которого метастабильное (одноэлектронное?) состояние расположено ниже дна зоны проводимости [6].

Как следует из экспериментальных данных по исследованию кинетики ФП, появление сравнительно быстрых релаксаций наряду с участком задержанной ФП наблюдается в твердых растворах с $x \geq 0.085$, что соответствует приблизительным расчетам точки пересечения $E_1 = E_c$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты N 95-02-04658-а и N 93-03-5813) и Международного научного фонда (грант МВВ 300).

Список литературы

- [1] J. Niewodniczanska-Zawadzka, A. Szczerbakow. Sol. St. Commun., **34**, 887 (1980).
- [2] J. Neuwirth, W. Jantsch, L. Palmethofer, W. Zulehner. J. Phys. C, **19**, 2475 (1986).
- [3] Б.А. Акимов, А.В. Никорич, Л.И. Рябова, Н.А. Широкова. ФТП, **23**, 1019 (1989).
- [4] Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. Письма ЖТФ, **6**, 1269 (1980).
- [5] B.A. Akimov, N.B. Brandt, S.O. Klimonskiy, L.I. Ryabova, D.R. Khokhlov. Phys. Lett. A, **88**, 483 (1982).
- [6] Б.А. Акимов, А.В. Албул, Л.И. Рябова. ФТП, **29**, 2158 (1995).
- [7] В.И. Кайданов, С.А. Рыков, М.А. Рыкова, О.В. Сюрис. ФТП, **24**, 144 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

A composition-varying photoconductivity kinetics in $Pb_{1-x}Mn_xTe(In)$ solid solutions

V.A. Akimov, N.A. L'vova, L.I. Ryabova

M.V. Lomonosov Moscow State University, 119899 Moscow, Russia