

©1994 г.

## ЭФФЕКТ ВЫТЯГИВАНИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ $Cd_xHg_{1-x}Te$ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ ПРОВОДИМОСТИ

*А.И.Власенко, А.В.Любченко*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,  
252650, Киев, Украина  
(Получена 27 декабря 1993 г. Принята к печати 7 февраля 1994 г.)

Исследован эффект вытягивания неосновных носителей заряда в кристаллах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с  $x \approx 0.21 \div 0.22$   $n$ -,  $p$ - и смешанного типа проводимости. Получено простое соотношение, позволяющее проанализировать этот эффект. По экспериментальным значениям времени жизни и электрического поля, при котором наступает вытягивание, рассчитана амбиполярная подвижность, характеризующая в кристаллах  $n$ - и  $p$ -типа проводимости подвижность неосновных носителей заряда.

В фоточувствительных полупроводниках пропорциональность фототока  $I_{ph}$  приложенному электрическому напряжению (закон Ома) выполняется до определенных значений напряженностей электрического поля  $E = E^*$ , выше которых наступает его насыщение, связанное с вытягиванием (экстракцией) неосновных неравновесных носителей заряда (ННЗ) из объема кристалла. Этот эффект в твердых растворах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  состава, соответствующего  $x = 0.2$ , теоретически и экспериментально изучался в работах [1,2]. В области насыщения  $I_{ph}$  время жизни ННЗ уменьшается с ростом  $E$  [2]. Оба эффекта могут быть использованы для определения параметров неосновных ННЗ. Экспериментальные результаты различных авторов по экстракции в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  были получены и проанализированы лишь на кристаллах  $n$ -типа проводимости.

Представляет интерес сопоставление результатов эксперимента в кристаллах различных типов проводимости, полученных по единой технологии — с близкой концентрацией фоновых примесей и протяженных дефектов решетке.

Были изучены монокристаллические образцы  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с  $x = 0.21 \div 0.22$   $n$ -,  $p$ - и смешанного типа проводимости. Электрофизические параметры кристаллов при 77 К приведены в таблице. Для кристаллов 5, 6 (со смешанной проводимостью при условии  $p_0 > n_0$ ) характерно, что знак коэффициента Холла  $R_H$  соответствует электрон-

### Характеристики образцов

№ образца	Тип проводимости	$n_0, p_0,$ $10^{14} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{n,p},$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\tau_0,$ $10^{-6} \text{ с}$	$E^*,$ $\text{В}/\text{см}$	$\tau_{p,n},$ $10^{-6} \text{ с}$	$\mu_a,$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1	<i>n</i>	1.1	$1.5 \cdot 10^5$	2.8	65	2.5	$0.9 \cdot 10^3$
2	<i>n</i>	6.7	$1 \cdot 10^5$	1.2	50	1.6	$1.5 \cdot 10^3$
3	<i>n</i>	0.8	$6 \cdot 10^4$	1.5	60	1.8	$1.3 \cdot 10^3$
4	<i>p</i>	21	$3 \cdot 10^2$	1.2	0.8	2.5	$1.2 \cdot 10^5$
5	<i>p</i> *	3	$9 \cdot 10^4$	0.5	1.6	0.6	$2 \cdot 10^5$
6	<i>p</i> *	5	$1 \cdot 10^5$	0.6	1.0	0.8	$2.5 \cdot 10^5$

Примечание. *p*\* относится к кристаллам *p*-типа проводимости ( $p_0 > n_i$ ) с существенной электронной компонентой — так называемый смешанный тип проводимости.

ной проводимости и зависит от поля. В силу этого концентрация и подвижность, формально определенные по стандартным выражениям из гальваномагнитных измерений, имеют смысл эффективных ( $n^*, \mu_n^*$ ).

Полевые зависимости сигнала фотоответа  $U_c$  и времени релаксации  $\tau$ , определенного по спаду  $U_c(t)$  при возбуждении  $\text{CO}_2$ -лазером для образцов 1 и 4 (соответственно *n*- и *p*-типа проводимости), приведены на рис. 1.

Как и следовало ожидать, в *p*-образцах (неосновные ННЗ — электроны) насыщение и область полевой зависимости  $\tau$  наступают при значительно более низких полях ( $E^* \approx 0.08 \text{ В}/\text{см}$ ), чем в *n*-образцах ( $E^* \approx 60 \div 70 \text{ В}/\text{см}$ ). Величины времени релаксации  $\tau_0$  в области низких напряжений,  $E < E^*$ , приведены в таблице.

Из теоретического анализа эффекта экстракции носителей, проведенного для случая биполярной фотопроводимости ( $\tau_n = \tau_p$ ), имеем величину  $E^*$  и полевую зависимость эффективного времени жизни  $\tau_{\text{eff}}$

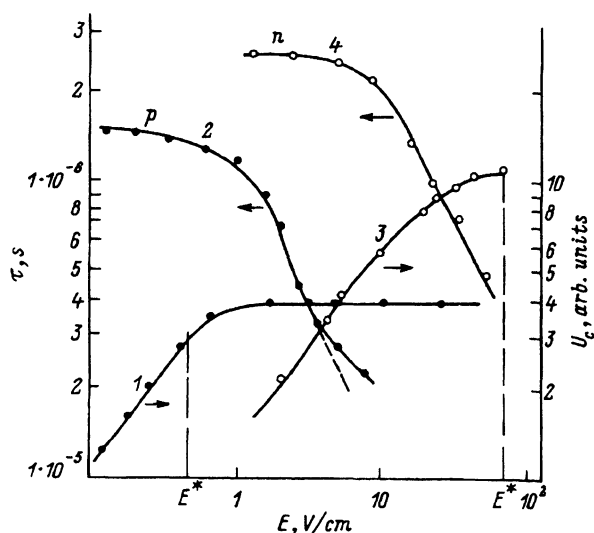


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала  $U_c$  (1, 3) и времени релаксации  $\tau$  (2, 4) фотопроводимости для кристалла  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ : образец 4 *p*-типа проводимости (1, 2) и образец 1 *n*-типа проводимости (3, 4).  $T = 77 \text{ К}$ .

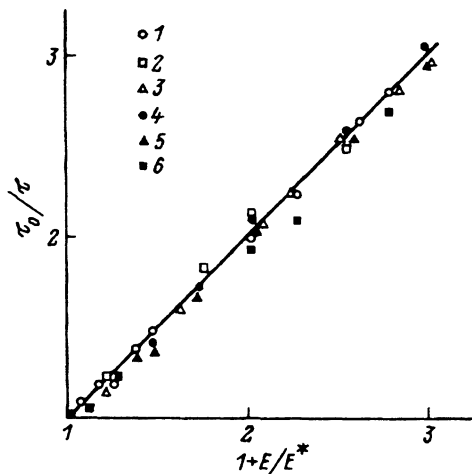


Рис. 2. Зависимости обратного времени релаксации  $\tau_0/\tau$  от напряженности электрического поля  $E$  в относительных координатах.  $T = 77$  К. Указаны номера образцов в соответствии с таблицей.

в кристаллах  $n$ -типа проводимости в следующем виде [1]:

$$E^* = \frac{l}{\mu_a \tau_p}, \quad (1a)$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{\mu_a E}{l}, \quad (16)$$

где  $\mu_a$  — амбиполярная подвижность,  $\tau_p$  — время жизни ННЗ,  $l$  — расстояние между токовыми контактами. Аналогичное выражение может быть записано для кристаллов  $p$ -типа проводимости. Различие заключается лишь в том, что в примесном полупроводнике ( $n_0, p_0 \gg n_i$ ) величина  $\mu_a$  совпадает с подвижностью неосновных ННЗ:  $\mu_a \cong \mu_p$  ( $n$ -тип) и  $\mu_a \cong \mu_n$  ( $p$ -тип).

Из (16) следует экспериментально подтвержденный факт [1-3] — смещение зависимости  $\tau(E)$  в область более высоких напряженностей электрического поля с уменьшением времени жизни ННЗ.

Комбинацией выражений (1a, 16) для кристаллов  $n$ - и  $p$ -типа может быть получено универсальное простое соотношение

$$\tau_0/\tau_{\text{eff}} = 1 + E/E^*, \quad (2)$$

которое позволяет проверить выполнимость эффекта вытягивания, определить величину  $\tau_0$  и ее соответствие времени жизни ННЗ. Для исследованных образцов она приведена на рис. 2. Величины  $E^*$  взяты из зависимостей  $U_c(E)$  (рис. 1).

Этот эффект будет иметь место лишь в том случае, когда величина  $\tau$  совпадает с временем жизни ННЗ. Детальный анализ этого вопроса для кристаллов  $\text{CdHgTe}$  проведен в [4]. Предполагается, что  $\tau = \tau_{\text{eff}}$ . Это предположение доказывается реализацией линейной зависимости  $1/\tau$  от  $E$ . Совпадение экспериментальных данных с (2) вполне удовлетворительное, заметное расхождение наблюдается лишь для образцов со смешанной проводимостью (образцы 5, 6).

Времена жизни неосновных ННЗ ( $\tau_p, \tau_n$ ), определенные по линейной зависимости  $\tau_0/\tau(E) = \tau_{p,n}/\tau_{\text{eff}}$ , приведены в таблице. Они близки к

экспериментальным значениям времени релаксации  $U_c(t)$  при  $E < E^*$ , которое с учетом большой величины отношения  $b = \mu_n/\mu_p \cong 10^2$  в составах с  $x \cong 0.2$  связано с релаксацией электронной компоненты фотопроводимости.

При известных (экспериментально определенных) величинах  $\tau_p$  и  $E^*$  по (1а) рассчитывается амбиполярная подвижность  $\mu_a$  ННЗ (см. таблицу). В  $p$ -образцах 4–6 ее величина, как и следовало ожидать, совпадает с электронной подвижностью, в  $n$ -образцах (образцы 1–3)  $\mu_a > \mu_p$ . В CdHgTe, по данным [5],  $\mu_p \lesssim 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при 77 К. Из сравнения величин  $\mu_n^*$  и  $\mu_a$  для образцов 5 и 6 видно, что экспериментально определенная по холловским измерениям электронная подвижность в кристаллах со смешанной проводимостью имеет смысл эффективно-го параметра [6]. В таких кристаллах тип проводимости однозначно определяется по напряженности электрического поля  $E^*$  (1а), что не требует изучения полевых зависимостей эффекта Холла.

Особенности полевой зависимости времени жизни ННЗ для кристаллов со смешанной проводимостью, а также завышенные значения подвижности дырок (см. таблицу) требуют дальнейшего анализа.

#### Список литературы

- [1] M.R. Johnos. J. Appl. Phys., **43**, 3090 (1972).
- [2] В.И. Иванов-Омский, В.К. Огородников, Т.Ц. Тотиева. ФТП, **14**, 699 (1980).
- [3] Л.Н. Курбатов, А.В. Межеричкий, И.М. Овчинников, Н.В. Сороко-Новицкий, Е.С. Банин, Т.Ф. Терехович. ФТП, **14**, 799 (1980).
- [4] А.И. Власенко, Ю.Н. Гаврилюк, А.В. Любченко, Е.А. Сальков. ФТП, **13**, 2180 (1979).
- [5] А.И. Елизаров, Л.П. Зверев, В.В. Кружаев, Г.М. Миньков, О.Э. Рут. ФТП, **17**, 459 (1983).
- [6] Л.А. Карачевцева, А.В. Любченко. ФТП, **26**, 1342 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

### Effect of Extraction of Minority Carriers in Photoresistor $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ Crystals with Different Conductivity Type

*A.I. Vlasenko and A.V. Lubchenko*

Institute of Semiconductors, Academy of Sciences of the Ukraine, 252650, Kiev, Ukraine