

©1995 г.

О ВЛИЯНИИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА НА ФОТОПРОВОДИМОСТЬ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.3$)

Э.К.Гусейнов, Н.Д.Исмаилов

Научно-исследовательский институт фотоэлектроники
Академии наук Азербайджана,
370141, Баку, Азербайджан
(Получена 7 февраля 1994 г. Принята к печати 16 января 1995 г.)

Приводятся результаты исследований кинетики релаксации и спектров фотопроедводимости p - и n - $Cd_xHg_{1-x}Te$ с учетом влияния на фотопроедводимостъ приповерхностной области пространственного заряда. Показано, что изменение фотопроедводимости в коротковолновом диапазоне спектра обусловлено вкладом области пространственного заряда в фотопроедводимостъ $Cd_xHg_{1-x}Te$ и меньшими значениями поверхностной подвижности носителей заряда по сравнению с объемными.

Полупроводниковые твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ широко применяются для создания фотоприемников инфракрасного (ИК) диапазона. Одинаково важную роль в процессе фотопроедводимости играют как поверхностный, так и объемный канал рекомбинации неравновесных носителей заряда. В работах [1,2] по исследованию объемных механизмов рекомбинации в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0.2 < x < 0.3$) в температурном интервале 4.2–300 К влияние состояния поверхности на фотопроедводимостъ ограничивалось учетом рекомбинации через поверхностные состояния. При этом величина эффективной скорости поверхностной рекомбинации S_{ef} , оцененная из спектров фотопроедводимости, не превышала 10^3 см/с, и ее влиянием на оценку объемного времени жизни τ_v пренебрегалось. Иной результат получен в работе [3], где исследовано влияние обработки поверхности на спектральное распределение фоточувствительности образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ n - и p -типа проводимости. Для химически травленной поверхности приводятся значения $S_{ef} = 10^4 - 10^6$ см/с. В то же время в работе [4] для интерпретации особенностей фотопроедводимости в этих кристаллах предполагается либо наличие приповерхностного истощенного слоя, либо обогащенного слоя [5]. Указанные различия в оценке S_{ef} , на наш взгляд, связаны с тем обстоятельством, что при этом необходимо учитывать реальный изгиб поверхностных зон, неравновесную проедводимостъ приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) и рекомбинацию носителей в слое пространственного заряда.

В данной работе приводится анализ экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии истошающих изгибов зон на поверхности монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ и необходимости учета влияния неравновесной проводимости приповерхностной ОПЗ и рекомбинации носителей в ОПЗ при расчетах фотопроводимости.

Эксперименты выполнялись на пластинах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.27 - 0.3$) n -типа проводимости с $N_D = (1 - 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_n = (3 - 6) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и p -типа проводимости с $N_A = (3 - 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_p \sim 450 - 550 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Пластинам придавалась прямоугольная форма размером $(8 \times 1 \times 0.2) \text{ мм}^2$. Поверхность пластин обрабатывалась химико-механической полировкой с последующим травлением в 4%-м бромсодержащем травителе. Необходимые для анализа фотоэффектов значения концентрации и подвижности основных носителей заряда определялась на основе измерений эффекта Холла и проводимости. Концентрация неосновных равновесных носителей заряда вычислялась с использованием закона действующих масс; подвижность неосновных носителей заряда принималась равной подвижности основных носителей для полупроводника с противоположным типом проводимости того же состава. Объемное время жизни неосновных носителей заряда τ_v определялось по методу компенсации фотомагнитного эффекта фотопроводимостью [6]. Измерения спектров фотоэффектов проводились по стандартной методике при частоте модуляции 1.2 кГц и при низком уровне фотовозбуждения от излучения глобара. Поверхностное время жизни τ_s определялось по кинетике фотопроводимости при импульсном освещении от GaAs-светодиода при низком уровне возбуждения. Величина поверхностного изгиба зон оценивалась из измерений конденсаторной фотоэдс при частоте 8 кГц и высоком уровне возбуждения. При этом в качестве обкладки служил слой прозрачного In_2O_3 , нанесенного на слюдяную пластину. Поверх In_2O_3 был нанесен слой диэлектрика Al_2O_3 толщиной 0.3 мкм. Этой стороной пластина прикладывалась к поверхности исходной полупроводниковой пластины. Однородность по составу $Cd_xHg_{1-x}Te$ определялась по измерениям спектров пропускания ИК излучения на специализированном спектрометре «Нефть», разработки ИФЭ АН Азербайджана, позволяющем производить отбор пластин по составу с точностью до $5 \cdot 10^{-4}$.

Анализ полученных результатов проведем на примере n - $Cd_xHg_{1-x}Te$ с измененными параметрами при $T = 80 \text{ К}$: $N_D = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\tau_v = 4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $E_g = 0.207 \text{ эВ}$, длина диффузии дырок $L_p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, толщина образца $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, безразмерная величина поверхностного изгиба зон $Y_s = 7$.

На рис. 1 представлена спектральная зависимость фотоответа для этого образца при 80 К с остаточным нарушенным слоем (кривая 1) и с химически травленной поверхностью (кривые 2, 3). При построении кривых учитывалась спектральная зависимость квантового выхода внутреннего фотоэффекта η [7]. В частности, в области $h\nu > E_g$, $\eta = 1.5 - 2$, что обусловлено межзонной ударной ионизацией.

При остаточном нарушенном слое наблюдается сильный спад фотопроводимости в коротковолновой области спектра, а значение коротковолнового края поглощения согласуется с данными, полученными из измерений коэффициента пропускания, измеренное значение

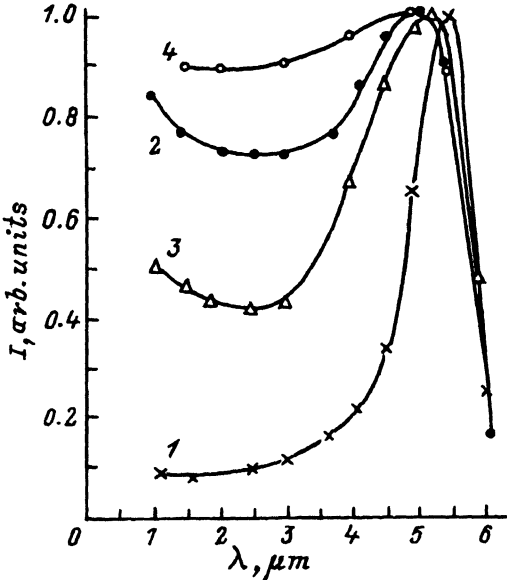


Рис. 1. Спектральная зависимость фотопроводимости (1-3) и фотомагнитного эффекта (4) для $n\text{-Cd}_{0.28}\text{Hg}_{0.72}\text{Te}$ при 77 К: 1 — для химико-механически обработанной поверхности, $\tau_s = 3$ мкс; 2 — для химически травленной поверхности, $\tau_s = 5$ мкс; 3 — для повторно травленной поверхности, $\tau_s = 4$ мкс.

$\tau_s = 3 \cdot 10^{-6}$ с. Однако величина эффективной скорости поверхностной рекомбинации $S_{\text{ef}} = 3 \cdot 10^3$ см/с, найденная из спектров фотопроводимости, более чем на порядок превышает значение S_{ef} , найденное по формуле Шокли

$$\tau_s^{-1} = \tau_v^{-1} + S_{\text{ef}}/L_d \quad (1)$$

при $d > 4L_d$, где d — толщина образца, L_d — длина диффузии неосновных носителей заряда.

После химического травления слоя толщиной 5 мкм наблюдается увеличение фоточувствительности в коротковолновой области спектра и сдвиг максимума чувствительности в сторону коротких длин волн, а $\tau_s = 5 \cdot 10^{-6}$ с, что больше τ_v (рис. 1, кривая 2). При повторном травлении наблюдается некоторый спад чувствительности в коротковолновой части спектра (рис. 1, кривая 3) по сравнению с предыдущим травлением; при этом значение τ_s совпадает с τ_v . Подобные особенности фотопроводимости наблюдаются и на $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Перечисленные особенности фотопроводимости могут быть объяснены с учетом фотопроводимости области пространственного заряда. Прежде всего отметим следующее. Как показывают результаты исследования конденсаторной фотоэдс на n - и p -типах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, а также данные исследований контакта металл- $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [8], величина поверхностного изгиба зон соответствует истощению приповерхностного слоя основными носителями заряда, а уровень Ферми на поверхности фиксируется в области середины запрещенной зоны, что также согласуется с [4]. Как было показано в работе [9], при поверхностном истощении формула Шокли применима при условиях

$$2L_dL_- \ll d, \quad 2L_dL_-^* \ll d, \quad (2)$$

где

$$L_- = \frac{1}{L_d} \int_0^l e^{-Y(x)} dx,$$

$$L_- = \frac{L_e}{L_d} \frac{e^{-Y_s}}{\sqrt{-Y_s - 1}},$$

$$L_-^\tau = \frac{1}{L_d} \int_0^l e^{-Y(x)} \frac{\tau_v}{\tau(x)} dx,$$

$$L_e = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s k_0 T}{2q^2 N_D}}.$$

Здесь L_e — длина экранирования, l — ширина области пространственного заряда (ОПЗ), $Y(x)$ — безразмерный изгиб зон в ОПЗ, Y_s — поверхностный изгиб зон, ε_s — относительная диэлектрическая постоянная полупроводника, ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, k_0 — постоянная Больцмана.

Как показывает расчет, для пластин $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0.2 < x < 0.3$) p - и n -типа проводимости толщиной $d < 2L_d$ при $T = 77$ К условия (2) не соблюдаются. Это указывает на необходимость учета фотопроводимости ОПЗ. При этом измеряемое на опыте поверхностное время жизни при поверхностном поглощении ($\alpha L_d \gg 1$, α — коэффициент поглощения) и эффективная скорость поверхностной рекомбинации для диффузионно толстого образца ($d > L_d$) непосредственно выражаются формулами [9]

$$\tau_s = \frac{L_d(1 + L_-)}{L_d(1 + L_-^\tau)(\tau_v)^{-1} + S}, \quad (3)$$

$$S_{\text{ef}} = S(1 + L_-)^{-1}, \quad (4)$$

где $S = \bar{S}e^{-Y_s}$, \bar{S} — истинная скорость поверхностной рекомбинации. При этом спектральную зависимость фотопроводимости можно аппроксимировать выражением

$$\sigma = eJ(1 + b) \left[\tau_s \mu_{sp} \left(1 - \frac{e^{-\alpha l}}{1 + \alpha L_d} \right) + \mu_{pv} \tau_v \frac{e^{\alpha l}}{1 + \alpha L_d} \right], \quad (5)$$

где J — интенсивность генерации электронно-дырочных пар, μ_s и μ_v — поверхностная и объемная подвижности носителей заряда, $b = \mu_{nv}/\mu_{pv} \simeq \mu_{ns}/\mu_{ps}$.

В случае остаточного нарушенного слоя существенна рекомбинация как в ОПЗ, так и на поверхности, поэтому при $S > L_d L_- / \tau_v$ выполняется неравенство $\tau_s < \tau_v$. Величина S , рассчитанная по формуле (3), оказалась порядка 125 см/с, что сильно отличается от значений S , полученных из спектров фотопроводимости. Объяснить это можно тем, что спад fotocувствительности в коротковолновой области может также быть обусловлен меньшими значениями μ_s по сравнению с μ_v . Тогда первое слагаемое в (5) в области сильного поглощения ($\alpha L_d > 1$) будет в μ_v/μ_s раз меньше, чем для случая с $\mu_s = \mu_v$. Это же имеет место и в случае повторного химического травления образца

(рис. 1, кривая 3), когда нарушенный слой удален, а $\tau_s = \tau_v$. Отметим, что в работе [10], где исследованы МДП транзисторы на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, получено значение $\mu_{ns} = 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что, по-видимому, меньше объемной μ_{nv} . Как было показано в [9], при истощающих изгибах зон величина $\tau(x)$ либо постоянна, либо увеличивается в направлении к поверхности. При $\tau(x) = \tau_v$, как следует из формулы (3), $\tau_s = \tau_v$, а при $\tau(x) > \tau_v$, $L_-^r < L_-$ и $\tau_s > \tau_v$, в результате чего заметный вклад в фотопроводимость вносит первое слагаемое формулы (5). Соответственно, фоточувствительность в коротковолновой области увеличивается, а максимум спектральной зависимости сдвигается в коротковолновую область, как это имеет место после первого химического травления образца (рис. 1, кривая 2). В этом случае спектр фотопроводимости близок к спектру фотомагнитного эффекта (рис. 1, кривая 4), в выражения для которого входит объемная подвижность носителей заряда, а скорость поверхностной рекомбинации и изгиб поверхностных зон влияют незначительно [11].

Формула Шокли становится приемлемой для определения S_{ef} для области температур, когда условия (2) выполняются. В частности при температуре наступления собственной проводимости поверхностные зоны можно считать плоскими и величина $S_{ef} = \bar{S}$. На рис. 2 приведены спектры фотопроводимости при 200 и 300 К для образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с параметрами при 77 К: $N_D = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $L_p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, $d = 40 \text{ мкм}$, $\tau_s = 10^{-5} \text{ с}$. В области 180–200 К измеренное значение $\tau_s = \tau_v = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Так как $L_d \simeq \sqrt{\tau_v T}$, для этой области температур образец можно считать диффузионно тонким ($d < L_d$) и расчет по формуле Шокли для тонких образцов дает $S_{ef} < 100 \text{ см}^2/\text{с}$. Как видно из рисунка, в спектрах практически отсутствует спад фоточувствительности в коротковолновой области спектра, что указывает на действительно малое значение S_{ef} и отсутствие локализации фотопроводимости в ОПЗ ($L_- < 1$).

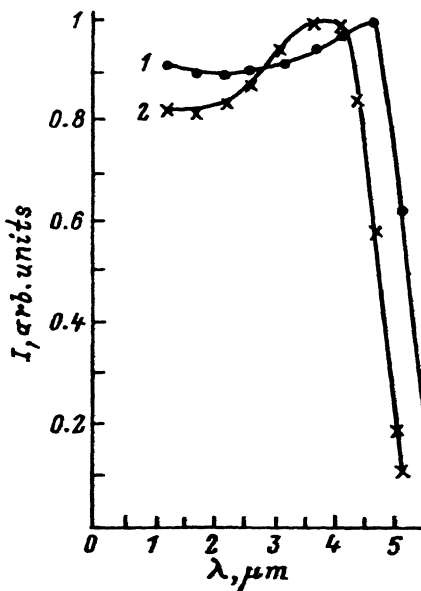


Рис. 2. Спектральная зависимость фотопроводимости $n\text{-Cd}_{0.28}\text{Hg}_{0.72}\text{Te}$ с химически травленной поверхностью: 1 — при 200 К, 2 — при 300 К.

Известно, что свидетельством влияния ОПЗ на фотопроводимость является ее уменьшение при слабой подсветке из области поверхностного поглощения. В нашем случае также наблюдается уменьшение фотопроводимости в коротковолновой области при увеличении уровня подсветки. В общем случае необходимо также учитывать влияние на фотопроводимость прилипания неравновесных носителей заряда на поверхностных ловушках. Однако уменьшение τ_s при подсветке не наблюдается, что позволяет пренебречь этим фактором.

Таким образом, экспериментальное исследование фотопроводимости $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \simeq 0.28-0.3$) показывает, что наличие на поверхности истощенного приповерхностного слоя может приводить к локализации фотопроводимости в ОПЗ. Учет неравновесной проводимости приповерхностной области и рекомбинации носителей в ОПЗ позволяет удовлетворительно объяснить полученные результаты.

Список литературы

- [1] R.A. Kinch, M.I. Brau, A. Simmons. *J. Appl. Phys.*, **44**, 1649 (1973).
- [2] Н.А. Важенков, Б.Л. Гельмонт, В.И. Иванов-Омский, А.А. Малькова, В.К. Огородников, Т.И. Топиева. *ФТП*, **16**, 109 (1982).
- [3] В.М. Петров, В.В. Белов, Л.М. Шаляпина, Е.Н. Фигуровский. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **10**, 418 (1974).
- [4] С.Г. Гасан-Заде, В.В. Богобожий, И.П. Жадько, Э.Л. Зинченко, Г.Л. Шепельский. *ФТП*, **27**, 1508 (1993).
- [5] А.И. Власенко, К.Р. Курбанов, А.В. Любченко, Е.А. Сальков. *УФЖ*, **27**, 1392 (1982).
- [6] Ю.И. Равич. *Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение* (М., Сов. радио, 1967).
- [7] М.Л. Шетинин, Н.С. Барышев, И.С. Аверьянов, Ф.П. Волкова, А.П. Черкасов. *ФТП*, **5**, 2350 (1971).
- [8] Э.И. Курбанова, Э.К. Гусейнов, Н.Д. Исмаилов, Х.Д. Джалилова. *ФТП*, **20**, 2150 (1986).
- [9] А.В. Саченко. *УФЖ*, **13**, 450 (1968).
- [10] В.П. Пономаренко, И.В. Шиманский, В.И. Стафеев. *ФТП*, **22**, 62 (1988).
- [11] В.А. Зуев, А.В. Саченко, К.В. Толпыго. *Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах* (М., Радио и связь, 1977).

Редактор Т.А. Полянская

The influence of surface range of a space charge on the photoconductivity of $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \simeq 0.3$)

E.K. Gusseinov, N.D. Ismailov

Institute of Photoelectronics, Azerbaijan Academy of Sciences, 370141, Baku, Azerbaijan

A thorough investigation of spectra and relaxation kinetics of the photoconductivity of $p, n-Cd_xHg_{1-x}Te$ at 77 K is presented, the influence of surface range of a space charge on the photoconductivity beigh taken into account. The photoconductivity variation in the short-wave region of the spectrum occurs due to the photoconductivity of surface range of a space charge and smaller values of the surface mobility of charge carriers as compared to the volume ones.