

# Фотоприемник с управляемой напряжением спектральной характеристикой фоточувствительности на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© Н.Д. Исмаилов<sup>†</sup>

Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,  
AZ-1143 Баку, Азербайджан

(Получена 24 декабря 2007 г. Принята к печати 15 мая 2008 г.)

На основе структуры  $\text{Al-n-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с тонким диэлектрическим зазором реализован фотоприемник с управляемой напряжением смещения спектральной характеристикой фототока. Особенности спектральной характеристики фототока объясняются изменением соотношения между поверхностным и объемным компонентами фототока при изменении напряжения смещения. Показана возможность одновременной регистрации и управления спектральной характеристикой фоточувствительности на краю фундаментального поглощения и в коротковолновой области спектра.

PACS: 73.50.Pz, 73.50.Gr, 73.61.Ga, 73.40.Gv

## 1. Введение

Важной характеристикой фотоприемников является спектральная характеристика их фоточувствительности. Известно, что спектральная характеристика фоточувствительности фоторезисторов толщиной порядка диффузионной длины неосновных носителей заряда зависит как от объемных параметров полупроводника, так и от состояния поверхности. Для твердых растворов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , являющихся базовым материалом для изготовления детекторов ИК-излучения, состояние поверхности существенно влияет на его фотоэлектрические свойства. Осаждением тонких слоев различных металлов на поверхность  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  можно управлять спектральной характеристикой фоточувствительности в области фундаментального поглощения [1,2]. Однако этот метод носит необратимый характер, так как после осаждения металла спектральная характеристика остается неизменной. В некоторых применениях оптоэлектроники для спектрального анализа принимаемого излучения возникает необходимость в фотоприемниках, в которых спектральную характеристику фоточувствительности можно менять путем приложения изменяемого внешнего напряжения [3]. К таким типам фотоприемников относятся МДП-фоторезисторы, в которых используется увеличение проводимости приповерхностных слоев полупроводника при соответствующем потенциале на затворе [4]. При этом достигается подъем спектральной характеристики фоточувствительности в коротковолновой области спектра, без изменения длинноволновой границы фоточувствительности, определяемой краем фундаментального поглощения. А в структурах с барьером Шоттки с внутриэмиссионным механизмом работы изменением внешнего напряжения смещения можно сдвигать только длинноволновую границу спектра его фоточувствительности [5]. В данной работе описывается экспериментально изготовленный фотоприемник на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0.28$ ) с нанесенным на поверхности полупрозрачным слоем алюминия, спектральная харак-

теристика фоточувствительности которого может управляться приложенным напряжением как в коротковолновой области, так и в области длинноволновой границы.

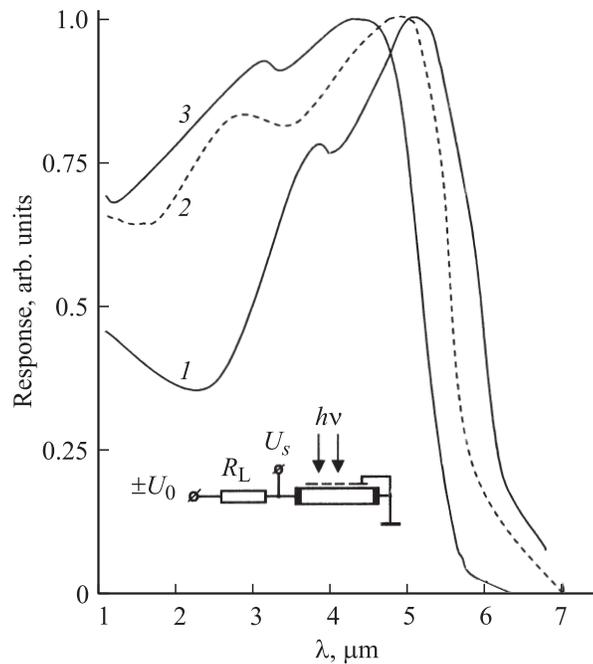
## 2. Методика эксперимента и образцы

Для изготовления экспериментальных образцов использовались монокристаллы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x \leq 0.3$ ), компенсированные  $n$ -типа проводимости, с  $N_D - N_A = (1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu_n = (6-8) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 77 К. Пластинам придавалась прямоугольная форма с размерами  $2 \times 5 \times 0.07 \text{ мм}$ . Омические контакты формировались электрохимическим осаждением индия. Полевой полупрозрачный электрод изготавливался вакуумно-термическим испарением алюминия через маску для обеспечения между ним и омическими контактами промежуточного зазора 0.1 мм. Диэлектрический зазор между Al и узкозонным  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  был туннельно-непрозрачным для носителей заряда и был подобен МДП-структуре с сверхтонким (5–6 нм) слоем диэлектрика. Об особенностях фотопроводимости узкозонного  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с алюминиевым покрытием мы сообщали в [6], где также изложена методика проведения измерений. Для регистрации сигнала использовался усилитель с фазовым детектором. В данной структуре, хотя все приложенное к затвору постоянное напряжение смещения  $U_0$  падало на диэлектрическом зазоре, на частоте модуляции излучения  $f \approx 1 \text{ кГц}$ , из-за большой емкости диэлектрика  $C_d$ , падение напряжения на нем сигнала поверхностно-барьерной структуры было значительно меньше, чем на нагрузочном резисторе  $R_L$  ( $1/\omega \cdot C_d < R_L$ ).

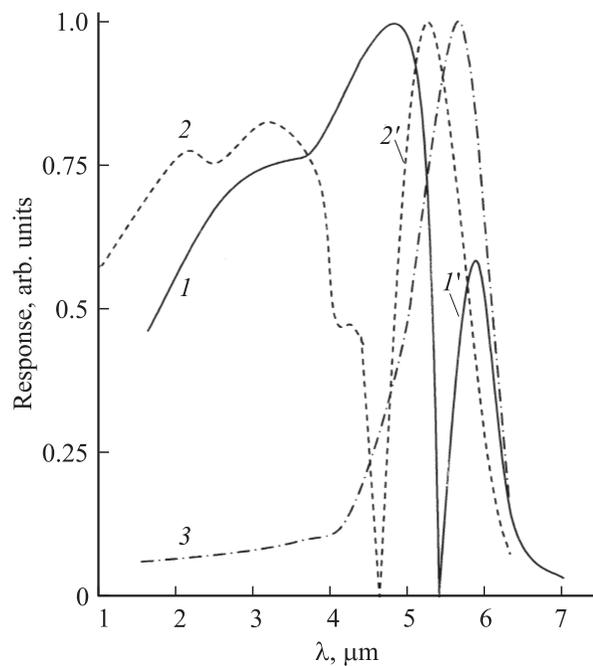
## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены спектральные характеристики фототока рассматриваемого фотоприемника при различных напряжениях смещения и  $T = 80 \text{ К}$ . Как

<sup>†</sup> E-mail: ismailov namik@yahoo.com



**Рис. 1.** Спектральное распределение фотопроводимости  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  до (1) и после (2) покрытия полупрозрачным слоем алюминия и распределение фототока поверхностно-барьерной структуры  $\text{Al}-n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (3) при приложенном напряжении +1.5 В. На вставке — схема соединений электродов структуры.



**Рис. 2.** Спектральное распределение фототока фотопроводимости  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , покрытой полупрозрачным слоем алюминия при отрицательных напряжениях: 1, 1' — 0.05; 2, 2' — 0.1; 3, 3' — 1.5 В. Кривые 1, 2, 3 и 1', 2' соответствуют фототокам, находящимся в противофазе.

видно из рис. 1, при положительной полярности приложенного напряжения для указанной схемы подключения электродов наблюдается существенное увеличение фоточувствительности в коротковолновой (КВ) области спектра по сравнению с фоторезистором без покрытия. Для сравнения на рис. 1 приведена спектральная характеристика фототока при нулевом смещении, которая совпадает с характеристикой поверхностно-барьерного фототока структуры  $\text{Al}-n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . При отрицательных напряжениях смещения  $|U_0| \geq 0.5$  В, наоборот, в КВ-области наблюдается спад фоточувствительности, а максимум его приходится на край фундаментального поглощения. При малых отрицательных напряжениях  $|U_0| \leq 0.5$  В спектральная характеристика состоит из двух участков с разными знаками величины фотосигнала: длинноволнового участка с максимумом чувствительности на краю фундаментального поглощения  $\lambda_1$  и коротковолнового участка с максимумом на некоторой  $\lambda_2 < \lambda_1$ . Значение длины волны  $\lambda_3$ , на которой происходит смена знака фотосигнала, изменяется при изменении напряжения смещения.

В рассматриваемой структуре формирующийся при освещении фототок состоит из объемной компоненты, возникающей в квазинейтральной области полупроводника, и из поверхностной компоненты фототока, возникающей в приповерхностной области пространственного заряда. При нулевом напряжении смещения сигнал на последовательно соединенном нагрузочном резисторе  $R_L$  возникает за счет поверхностно-барьерного фототока (рис. 1). При подаче напряжения смещения возникает также объемный фототок за счет фотопроводимости, который в зависимости от полярности приложенного напряжения складывается или вычитывается с поверхностным фототоком. Поскольку спектральная характеристика каждой компоненты фототока изменяется по-разному в зависимости от длины волны излучения, то, меняя их соотношение путем изменения приложенного напряжения смещения, можно управлять спектральной характеристикой чувствительности фотоприемника.

Для количественного описания наблюдаемых особенностей фототока можно воспользоваться выражениями для спектральной зависимости биполярной фотопроводимости, учитывающей проводимость квазинейтрального объема и поверхностной области пространственного заряда [7]. Для фотосигнала при положительном смещении можно упрощенно записать:

$$U_s(\lambda) = eP_\lambda R_L \frac{\eta\lambda}{hc} \left\{ \frac{U_0}{I^2} (\mu_n + \mu_p)(1 - e^{-kd}) \right. \\ \left. \times \left[ \tau_{ef} \left( 1 - \frac{e^{-kw}}{1+kL} \right) + \tau_v \frac{e^{-kw}}{1+kL} \right] + I_s(U_0) \left( 1 - \frac{e^{-kw}}{1+kL} \right) \right\},$$

где  $P_\lambda$ ,  $\lambda$ ,  $k$  — падающая мощность, длина волны и коэффициент поглощения излучения;  $\eta$  — квантовая эффективность;  $h$  — постоянная Планка;  $e$  — заряд электрона;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  — подвижность электронов и дырок;

$l, d$  — длина и толщина образца;  $w$  — ширина ОПЗ;  $L$  — длина диффузии неосновных носителей заряда;  $\tau_{ef}, \tau_v$  — эффективное и объемное время жизни неравновесных носителей заряда;  $I_s(U_0)$  — зависимость поверхностно-барьерного фототока от приложенного напряжения в относительных величинах.

Как видно из выражения, спектральная зависимость имеет подъем в КВ-области спектра как за счет вклада фотопроводимости приповерхностной ОПЗ при  $\tau_{ef} > \tau_v > l^2/U_0(\mu_n + \mu_p)$ , так и за счет вклада поверхностно-барьерного фототока при  $\tau_{ef}, \tau_v < l^2/U_0(\mu_n + \mu_p)$ .

Для отрицательного смещения поверхностный фототок направлен встречно объемному фототоку, и упрощенно для фотосигнала можно записать

$$U_S(\lambda) = eP_\lambda R_L \frac{\eta\lambda}{hc} \left\{ \frac{U_0}{l^2} (\mu_n + \mu_p) (1 - e^{-kd}) \times \left( \tau_v \frac{e^{-kw}}{1 + kL} \right) - I_s(U_0) \left( 1 - \frac{e^{-kw}}{1 + kL} \right) \right\}.$$

При малых отрицательных значениях приложенного напряжения, когда эти компоненты соизмеримы и направлены встречно, в области края поглощения доминирует объемная компонента, а в КВ-области, в противофазе, — поверхностная. По мере увеличения напряжения смещения поверхностный изгиб зон уменьшается, увеличивается эффективная скорость поверхностной рекомбинации, что приводит к уменьшению поверхностно-барьерного фототока, в то время как объемная компонента фототока увеличивается пропорционально приложенному напряжению. В результате длина волны  $\lambda_3$ , на которой наблюдается смена знака сигнала, и длинноволновые границы поверхностной и объемной компонент фототока смещаются в КВ-область. При приложенных напряжениях смещения  $|U_0| > 0.5$  В, когда поверхностные зоны почти плоские и поверхностным фототоком можно пренебречь, преобладает чисто объемная компонента фототока, что и наблюдается экспериментально.

Расчетные значения спектральных зависимостей по этим выражениям хорошо согласуются с полученными экспериментально при использовании реальных коэффициентов поглощения, которые для компенсированных образцов сильно отличаются от теоретических на краю фундаментального поглощения. Это объясняется наличием в компенсированном образце различного рода микронеоднородностей и существованием вакансионной зоны [8]. Использованная в формуле зависимость  $I_s(U_0)$  также была получена из измерений и была аналогична приведенной в [6], которая из-за влияния поверхностных состояний имеет более пологий вид, чем идеальная расчетная кривая.

Если для регистрации излучения используется усилитель с фазовым детектором, то можно одновременно использовать оба участка спектральной характеристики, изменяя их путем изменения знака и величины приложенного напряжения смещения. Эта особенность делает этот фотоприемник привлекательным для применения,

например в анализаторах спектра принимаемого излучения или в качестве двухполосного фотоприемника для актуальных диапазонов инфракрасной области спектра, соответствующих окнам прозрачности атмосферы.

Таким образом, на примере структуры  $Al-n-Cd_xHg_{1-x}Te$  показано, что на основе однородного полупроводника с постоянной шириной запрещенной зоны возможно реализовать фотоприемник, спектральной характеристикой которого можно управлять приложенным напряжением смещения как на краю, так и в области фундаментального поглощения.

## Список литературы

- [1] Е.П. Мацасс, А.И. Власенко, Е.А. Сальков, О.В. Снитко, А.В. Любченко. УФЖ, **26**, 670 (1981).
- [2] N.J. Ismailov, E.K. Guseinov. Tr. J. Phys., **18** (4), 669 (1994).
- [3] В.Л. Бакуменко, А.Н. Свиридов. Прикл. физика, вып. 2, 34 (1999).
- [4] В.А. Зуев, В.Г. Попов. *Фотоэлектрические МДП-приборы* (М., Радио и связь, 1983).
- [5] L. Pahun, Y. Campidelli, F. Arnaud d'Advitava, P.A. Bodoz. Appl. Phys. Lett., **10** (60), 1166 (1992).
- [6] Э.Ю. Салаев, Э.К. Гусейнов, А. Тезер, Н.Д. Исмаилов. ФТП, **31**, 740 (1997).
- [7] В.А. Зуев, В.Г. Литовченко, В.Г. Попов, Г.А. Сукач. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, вып. 12, 32 (1973).
- [8] Л.А. Бовина, В.И. Стафеев. В кн.: *Физика соединений  $A^{II}B^{VI}$* , под ред. А.Н. Георгобиани, М.К. Шейнкмана (М., Наука, 1986) гл. 8, С. 276.

Редактор Л.В. Беляков

## Photodetector with voltage controlled spectral dependency of response based on $Hg_{1-x}Cd_xTe$

N.J. Ismailov

Institute of Physics,  
Azerbaijan National Academy of Sciences,  
Az-1143 Baku, Azerbaijan

**Abstract** On the  $Al-n-Cd_xHg_{1-x}Te$  based structure with thin dielectric gap a detector with spectral response controlled by bias voltage have been realized. The peculiarity of spectral dependence of photocurrent is explained by correlation between surface and bulk photocurrent components under different bias voltage. It was shown the possibility of simultaneous registration and control of spectral dependence of response as on the fundamental absorption edge as on the short wavelength area of spectrum.