

# ПОЗИЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 4-х КОНТАКТНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ n-CdSe/слюда

© Э.А. Сенокосов, В.И. Чукита, Р.А. Хамидуллин, В.Н. Чебан

*Приднестровский государственный университет имени Т.Г.Шевченко  
г. Тирасполь, Приднестровская Молдавская Республика.*

*e-mail:chykita@mail.ru*

Показана возможность создания 4-х контактных позиционно - чувствительных фотоприемников из эпитаксиальных слоев n-CdSe, выращенных в квазизамкнутом объеме на кристаллах слюды. Проведен анализ их позиционной чувствительности на основе элементарной теории токопротекания, развитой на базе решения уравнения Лапласа, и модели электрического диполя. Установлено, что теоретические характеристики координатной чувствительности таких ПЧФ коррелируют с их экспериментальными зависимостями как по форме, так и положению своих максимумов.

## Введение

Полупроводниковые позиционно – чувствительные фотоприемники (ПЧФ) обладают возможностью не только обнаруживать излучение, но и определять с высокой точностью местоположение (координаты) облученной области в режиме реального времени. В частности, они находят применение в системах, контролирующих уровень жидкости, в дальномерах фотоаппаратов и видеокамер [1] и других электронных устройствах. К настоящему времени разработаны и используются ПЧФ на основе фоторезистивных слоев [2], *p-n*-переходов [3, 4], МОП – транзисторов [5]. Однако функциональные фоторезисторы [2] имеют сравнительно низкую разрешающую способность, а технология производства *p-n*-переходов и МОП – транзисторов, используемых для ПЧФ, достаточно сложна. Кроме того, такие ПЧФ обладают чувствительностью к свету лишь в области собственного поглощения светоприемного элемента.

В работах [6, 7] впервые предложена конструкция ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоев с нетрадиционной схемой расположения и коммутации электрических контактов. В зависимости от конструкции они позволяют фиксировать местоположение излучающего объекта по одной и двум координатам. Их спектральная область чувствительности может быть расширена за счет примесного поглощения [6].

## 1. Образцы и методика эксперимента

В данной работе исследовались характеристики 4-х контактных ПЧФ, изготовленных на основе однородных эпитаксиальных слоев n-CdSe. Такие слои толщиной  $d = 15 \div 50$  мкм выращивались методом горячей стенки в квазизамкнутом объеме на кристаллических подложках слюды (мусковит) [8] в форме диска радиусом  $R = 8$  мм. Удельное темновое сопротивление слоев и кратность их фотоответа при комнатной температуре и освещенности 300 лк имели значения  $\sim 10^9$  Ом-см и  $\sim 10^3$  соответственно.

На боковые поверхности эпитаксиальных слоев n-CdSe наносились линейные индиевые контакты, располагаемые в вершинах квадрата (ABCD) (рис.1). К одной паре контактов (A и C), размещенных на концах его диагонали, подключался источник входного напряжения, и через светоприемный элемент пропускался ток  $I_{вх}$ . К двум другим контактам (B и D), расположенным на эквипотенциальной линии тока, подключался резистор нагрузки, с которого снималось “поперечное” выходное напряжение  $U_{вд}$ , возникающее при локальной засветке поверхности приемного элемента ПЧФ. Его появление можно рассматривать как следствие разбаланса цепи интегрального электрического моста, в четырех плечах которого до освещения находятся одинаковые пространственно распределенные сопротивления полупроводникового слоя.

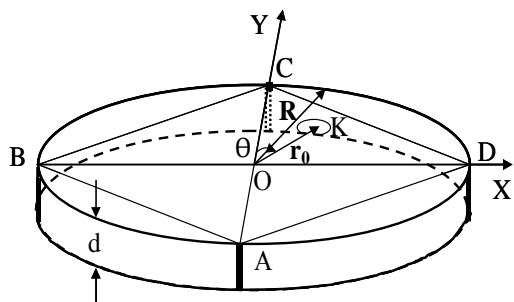


Рис. 1. Схема квадратного расположения контактов приемного элемента 4-х контактного ПЧФ, изготовленного на основе слоя n-CdSe, с «привязкой» координат его точек и пятна засветки.

Оптическое зондирование поверхности приемного элемента ПЧФ осуществлялось по кругу с использованием твердотельного лазера с длиной волны  $\lambda = 532 \text{ nm}$  и средней мощностью  $P = 50 \text{ mW}$ . Луч лазера направлялся под углом  $90^\circ$  к поверхности фотоприемного элемента и фокусировался в пятно диаметром  $0.5 \text{ mm}$ . В общем случае выходное напряжение 4-х контактных ПЧФ n-CdSe зависело от местоположения, радиуса и интенсивности светового пятна, а также от величины тока  $I_{\text{вх}}$ .

## 2. Экспериментальные результаты их обсуждение

Полярные диаграммы чувствительности, представленные на рис. 2 для 4-х контактных ПЧФ, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев n-CdSe, исследовались при  $300 \text{ K}$  и постоянной освещенности  $L$  в области оптического зонда. Они изучались при фиксированном значении входного тока ( $I_{\text{in}} = 10^{-5} \text{ A}$ ) и трех значениях безразмерного радиуса оптического зондирования  $r_{00} = \frac{r_0}{R}$ , где  $r_0$  – модуль радиус-вектора пятна засветки,  $R$  – радиус полупроводникового диска. Видно, что для каждого радиуса зондирования диаграммы выходного напряжения ПЧФ имеют 4-х “лепестковую” форму с симметрией, близкой к квадратной. В каждом квадранте напряжение  $U_{\text{ВД}}$  возрастало по абсолютному значению с ростом величины радиуса зондирования, за исключением засветки точек, расположенных на осях X и Y. Знак напряжения  $U_{\text{ВД}}$  менялся при переходе от одного квадранта светоприемного элемента к соседнему. Его величина достигала максимального значения при локальной засветке точек, расположенных вблизи биссектрис углов между осями X и Y, т.е. в точках, характеризуемых радиус-векторами  $\underline{r}_0 = (r_0; \Theta = (2n+1)\frac{\pi}{4}, n = 0, 1, 2, 3)$ . Такая зависимость наблюдается для  $r_{00} < 0.7$ . При оптическом зондировании радиусом  $r_{00} \geq 0.7$  на полярных диаграммах чувствительности в каждом квадранте

приемного элемента, как и в слоях n-CdTe:In [9], появляется по два идентичных максимума (рис. 2, кривая 3), которые с ростом  $r_0$  смещаются к осям, соединяющим противоположные контакты. Напряжение  $U_{\text{ВД}}$  принимает значения, равные нулю, при засветке точек приемного элемента ПЧФ, характеризуемых радиус-векторами  $\underline{r}_0 = (r_0; \Theta = n\frac{\pi}{2}, n = 0, 1, 2, 3)$ .

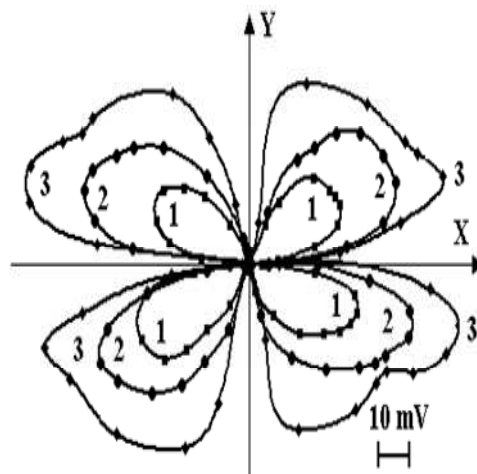


Рис.2. Полярные диаграммы экспериментальной зависимости выходного напряжения  $U_{\text{ВД}}$  4-х контактного пленочного ПЧФ n-CdSe от координат пятна его круговой засветки для радиусов  $r_{00} = \frac{r_0}{R} = 0.3$  (кривые 1);  $0.5$  (кривые 2);  $0.7$  (кривые 3).

Позиционная чувствительность 4-х контактных ПЧФ, изготовленных на основе слоев n-CdSe, анализировалась на основе двух теорий: элементарной теории токопротекания [9], развитой на основе уравнения Лапласа, и модели электрического диполя [10]. В соответствии с теорией [9] выходной сигнал напряжения  $U_{\text{ВД}}$  таких ПЧФ должен зависеть от местоположения, радиуса и интенсивности  $L$  светового пятна ( $\delta\sigma \sim L$ ), а также от величины входного тока  $I_{\text{in}}$ . Согласно [9], выходное напряжение ПЧФ должно определяться следующим выражением:

$$U_{\text{ВД}} = \frac{d\psi}{y} \cdot \frac{a^2}{R^2} \cdot \frac{I_{\text{in}}}{d\pi y} \cdot \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta}{(1-r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta} \quad (1)$$

где  $a$  – радиус пятна засветки,  $\Theta$  – угол между вектором  $\underline{r}_0$  и положительным направлением оси Y,  $d$  – толщина полупроводникового диска,  $\sigma$  – его удельная электропроводность и  $\delta\sigma$  – изменение  $\sigma$  при локальной оптической засветке диска в точке  $K(\underline{r}_0)$ . При выводе соотношения (1) считалось, что относительная величина фототока в области

засветки приёмного элемента характеризуется неравенством  $\frac{\delta\sigma}{\sigma} \ll 1$ .

На рис. 3. представлены теоретически рассчитанные согласно (1) зависимости безразмерной разности потенциалов  $V_{BD} = \frac{U_{BD}}{N}$  от координат пятна засветки для различных значений безразмерного радиуса зондирования  $r_{00}$ , здесь  $N = \frac{\delta\sigma \cdot a^2 \cdot I_{in}}{R^2 \cdot \pi \cdot \epsilon^2 \cdot d}$ .

При построении диаграмм на радиус-векторах, проведенных из начала декартовых координат, соответствующего центру О фронтальной поверхности диска, под углом  $\Theta$  откладывались в выбранном масштабе абсолютные значения потенциала  $V_{BD}$ .

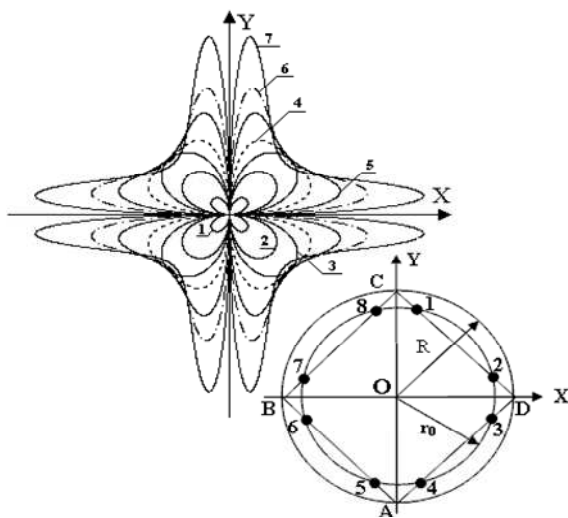


Рис.3. Полярные диаграммы теоретической зависимости [9] выходного сигнала 4-х контактного ПЧФ n-CdSe для различных безразмерных радиусов его оптического зондирования  $r_{00}$ : 1 – 0.3; 2 – 0.5; 3 – 0.6; 4 – 0.7; 5 – 0.8; 6 – 0.85; 7 – 0.9. На вставке отмечены точки (1 – 8), соответствующие максимальной чувствительности ПЧФ при  $r_{00} \geq 0.7$ .

Видно, что диаграммы имеют квадратную симметрию, являющуюся следствием квадратной симметрии приемного элемента. При переходе от одного квадранта к соседнему выходной сигнал меняет знак. Диаграммы чувствительности при  $r_{00} \leq 0.7$  (рис.3; кривые 1 – 3) представляют собой систему однолепестковых фигур, для которых большим значениям  $r_{00}$  отвечают большие величины  $V_{BD}$ . Для них абсолютные максимумы функции  $V_{BD}(\Theta)$  лежат на биссектрисах прямых углов между диагоналями квадрата ABCD.

Полярные диаграммы чувствительности ПЧФ при  $r_{00} \geq 0.7$  представляют собой систему симметричных двухлепестковых фигур (кривые 4 – 7). В этом случае абсолютные максимумы функции  $V_{BD}(\Theta)$  лежат в точках пересечения окружности

зондирования со сторонами квадрата ABCD (см. вставку на рис. 3.). С увеличением  $r_{00}$  максимумы этой функции смещаются к ближайшим осям X и Y. При засветке точек приемного элемента, находящихся на осях X и Y, выходной сигнал равен нулю. Для значений угла  $\Theta = (2n + 1) \frac{\pi}{4}$ , где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ , с ростом  $r_{00}$  от 0 до 0.7 выходной сигнал увеличивается, а затем с дальнейшим ростом  $r_{00}$  уменьшается.

Сопоставление экспериментальных полярных диаграмм чувствительности ПЧФ, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев n-CdSe, с теоретически рассчитанными в соответствии с формулой (1) приводит к следующему общему выводу. Экспериментальные (рис.2) и теоретические (рис.3) диаграммы чувствительности ПЧФ в основном коррелируют между собой как по форме, так и положению своих максимумов. Установлено, что величина выходного сигнала 4-х контактных ПЧФ на основе n-CdSe обратно пропорциональна толщине слоя приемного элемента и линейно возрастает с величиной входного тока и интенсивностью локальной засветки. Их удельная интегральная чувствительность составляет величину  $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ V}/\mu\text{A}\cdot\text{mW}$ . Она при прочих равных условиях возбуждения в 5 раз превышает чувствительность 4-х контактных ПЧФ на основе слоев n-CdTe:In [2].

В соответствии с теоретической моделью электрического диполя [4], разность потенциалов между электрическими контактами В и D светоприёмного элемента ПЧФ равна:

$$U_{BD} = \frac{P_0 \cdot I_{in}}{\pi \epsilon y_0 d} \left[ \frac{2Rr_0 \sin \theta}{(R^2 + r_0^2)^2 - 4R^2 r_0^2 \sin^2 \theta} \right] \times \left[ \frac{r_0^2 - R^2 + 2Rr_0 \cos \theta}{[R^2 + r_0^2 + 2Rr_0 \cos \theta]^{3/2}} - \frac{r_0^2 - R^2 - 2Rr_0 \cos \theta}{[R^2 + r_0^2 - 2Rr_0 \cos \theta]^{3/2}} \right] \quad (2)$$

здесь  $\sigma_0$  – удельная темновая электропроводность,  $P_0 = \frac{\pi \epsilon \Delta n a^2}{4} \cdot (\mu_e \tau_e + \mu_h \tau_h)$  – дипольный момент в области локального оптического возбуждения (ОЛОВ),  $\Delta n$  – концентрация фотоносителей заряда,  $\mu_e$  и  $\mu_h$ ,  $\tau_e$  и  $\tau_h$  – подвижности и времена жизни фотоэлектронов и фотодырок соответственно,  $\alpha$  и  $\epsilon$  – коэффициент поглощения и относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Теоретические расчеты координатной чувствительности 4-х контактных ПЧФ, проведенные в рамках дипольного представления [10], коррелируют с выше приведенными экспериментальными данными. Это, в частности, следует из рис. 4, на котором представлены теоретическая диаграмма чувствительности (кривая 1), построенная в соответствии с формулой (2) для  $r_{00} = 0.7$ , и экспериментальная (кривая 2), снятая для пленочного фотоприемника n-CdSe при таком же значении  $r_{00}$ . (Кривые 1 и 2 накладывались друг на друга с применением таких масштабных

коэффициентов, которые обеспечивали их лучшее совпадение). Учитывалось, что дипольный момент, образующийся в ОЛОВ вследствие полевого смещения носителей заряда, вносит основной вклад в выходной сигнал ПЧФ [9]. Поэтому формулу (2) можно применять, когда выполняется условие  $V_{eh} \cdot \tau_{eh} \sim a$ , а формулу (1) если  $V_{eh} \cdot \tau_{eh} \ll a$ . (Здесь  $V_{eh} = V_e$  или  $V_h$ ,  $\tau_{eh} = \tau_e$  или  $\tau_h$  соответственно).

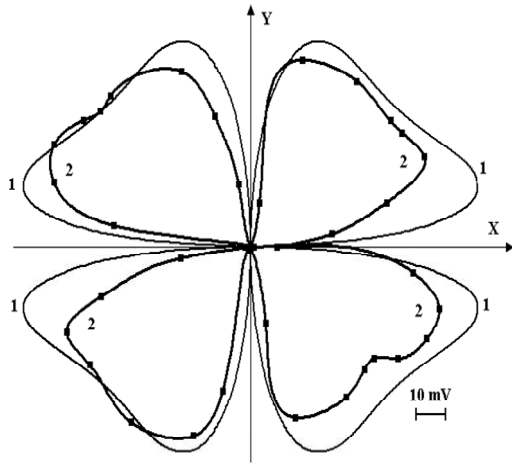


Рис.4. Полярные диаграммы чувствительности (300 К) пленочного 4-х контактного ПЧФ n-CdSe для  $I_{in} = 10^{-5}$  А и  $r_{00} = 0.7$ : 1 – теоретические кривые, 2 – экспериментальные кривые.

Согласно (2) рост выходного напряжения  $U_{BD}$  при перемещении пятна засветки от центра фотоприемного элемента n-CdSe к его периферии вдоль диагонали каждого квадранта для  $r_{00} < 0.7$  (рис.2, кривые 1 и 2) связан, как и для ПЧФ n-CdTe:In, с увеличением модуля вектора  $\Gamma_{KB}$  и уменьшением модуля вектора  $\Gamma_{KD}$ , а также ориентацией диполя вдоль поля [10]. Уменьшение темпа роста  $U_{BD}$  с увеличением  $r_{00}$  в области значений координат  $r_{00} \approx 0.7$  связано с увеличением модуля вектора  $\Gamma_{KD}$  и переориентацией диполя в области оптического возбуждения фотоприемника n-CdSe. В этом случае диполь ориентируется не по прямой CD. Кроме того при смещении пятна засветки к боковой границе фотоприемного элемента снижается напряженность внешнего электрического поля в диполе, что уменьшает его “плечо”. Эти факты в конечном итоге приводят к спаду зависимости  $U_{BD} = f(r_{00})$  в области больших значений  $r_{00}$  на линии засветки диагоналей

квадрантов светоприемных элементов n-CdSe. Это вызывает появление на диаграммах их чувствительности “двулепестковых” фигур (рис. 2, кривая 3).

### Заключение

Таким образом, можно считать, что дипольное представление в ОЛОВ [10] и электронная теория [9], развитая на основе решения уравнения Лапласа, являются двумя предельными случаями одного и того же неравновесного процесса в полупроводниковых фотоэлементах. Поэтому на величину теоретически рассчитанного выходного сигнала 4-х контактного ПЧФ могут влиять оба механизма. Этим может быть обусловлено некоторое расхождение теоретических характеристик позиционной чувствительности ПЧФ на основе эпитаксиальных слоев n-CdSe с их экспериментальными зависимостями.

### Список литературы

- [1] Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера, 2005. 588 с.
- [2] Марченко А.Н., Свечников С.В., Смовж А.К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы. М.: Радио и связь, 1988. 192 с.
- [3] Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974. 351 с.
- [4] Полупроводниковые фотоприемники преобразователи излучения / Под ред. А.И. Фримера и И.И. Таубкина. М.: Мир, 1965. 215 с.
- [5] Niu H., Aoki C., Matsuda T. // Jap. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. №1. P. L35-L37.
- [6] Сенокосов Э.А., Клюканов А.А., Усатый А.Н., Сергеев С.А., Федоров В.М. //А.С. СССР №1436796, приоритет от 12.08.86., опубл.8.07.88.
- [7] Клюканов А.А., Сенокосов Э.А., Усатый А.Н., Федоров В.М. //А.С. СССР №1499119, приоритет от 7.01.87., опубл.7.08.89.
- [8] Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Один И.Н., Чукичев М.В., Абрамова Е.С. // Неорганические материалы. 2012. Т.48. №12. С. 1299-1302.
- [9] Клюканов А.А., Сенокосов Э.А., Богинский Д.Е., Сорочан В.В., Фещенко Л.В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. №1. С. 49-51.
- [10] Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Хамидуллин Р.А. Брусенская Е.И. // Вестник Приднестровского университета. 2009. №3 (35). С. 7-12.
- [11] Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.