

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, к. т. н. В. В. РЮХТИН,  
И. И. ФЕДИНЧУК, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор», ЦКБ «Ритм»  
E-mail: td\_tenzor@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
29.02 2008 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. А. БОРЩАК  
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

## СИММЕТРИЧНЫЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ФОТОДИОД

*Разработан и исследован двухкоординатный фотодиод на продольном фотоэффекте, имеющий симметричные по крутизне и продольному сопротивлению координатные характеристики.*

Одной из актуальных задач современной оптоэлектронной техники является создание устройств для определения координат различных объектов. В качестве датчиков в таких устройствах используются координатные фотодиоды (ФД) разных конструкций. Принцип действия одного из координатных ФД базируется на продольном фотоэффекте. Этот эффект (наличие координатной чувствительности при локальной засветке  $p-n$ -перехода), основанный на растекании носителей фототока от места генерации, был открыт В. Шоттки в 1930 году и использован в патентах Д. Панкова и Дж. Волмарка в 50-х годах прошлого века [1]. Важнейшим условием применения таких фотодиодов является симметричность крутизны координатных характеристик как по оси  $X$ , так и по оси  $Y$ .

Актуальной задачей микрофотоэлектроники является создание конструкций фотодиодов, обеспечивающих выполнение этого условия.

В литературе описаны фотодиоды на продольном фотоэффекте [2, 3]. В конструкции таких ФД взаимоположенные контакты для снятия координатных характеристик формируются на тонком легированном слое (ось  $X$ ) и на исходной кремниевой подложке (ось  $Y$ ). Очевидно, что у них крутизна координатных характеристик, которая определяется продольным сопротивлением  $R_{pp}$ , по осям  $X$  и  $Y$  существенно различается. Для оси  $X$  это продольное сопротивление определяется режимами технологического процесса диффузии примеси, а для оси  $Y$  — толщиной и сопротивлением исходной полупроводниковой пластины.

Целью работы являлось создание и исследование двухкоординатного фотодиода на продольном фотоэффекте, который отличался бы идентичностью координатных характеристик по осям  $X$  и  $Y$ .

### Результаты исследований

Разработанный двухкоординатный ФД базируется на подложке из кремния марки КЭФ с удельным сопротивлением 100 Ом·см толщиной 300 мкм. Поверхностное сопротивление  $\rho_s$  области, легированной бо-

ром (фоточувствительная площадка  $p^+$ -типа проводимости), составляет около 500 Ом/□ при размерах 5×5 мм. На рис. 1 показано схематическое изображение кристалла ФД с контактными площадками, выполненными из алюминия.

Кристалл изготовлен методом стандартной планарной технологии. Основной проблемой технологического процесса получения слоя  $p^+$ -типа проводимости (использован метод диффузии из твердых источников) являлось получение максимальной величины поверхностного сопротивления  $\rho_s$  при обеспечении небольшого разброса его значений по поверхности кристалла фотодиода, т. е. существенное изменение  $\rho_s$  по поверхности фоточувствительного элемента приводит к нелинейности координатной характеристики.

В предложенной конструкции ФД контакты для снятия координатной характеристики выполнены на  $p^+$ -слое, что позволяет получить максимальную фоточувствительность. Исследования координатных характеристик проводились в различных режимах работы для определения наиболее эффективного режима.

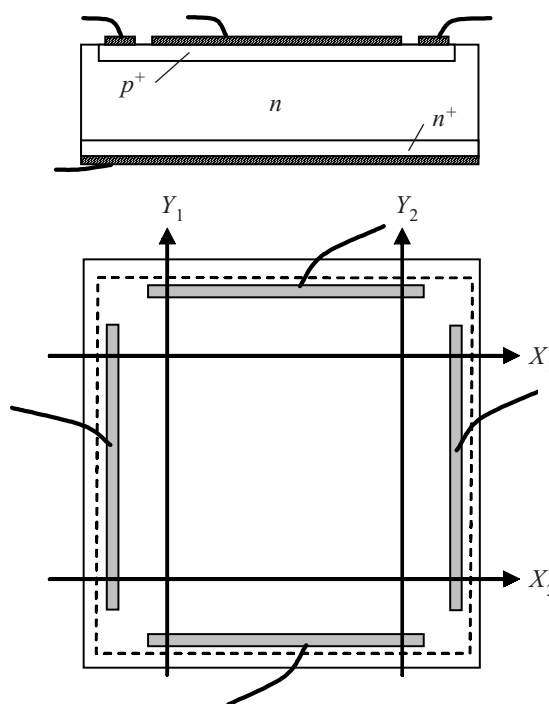


Рис. 1. Схематическое изображение кристалла фотодиода

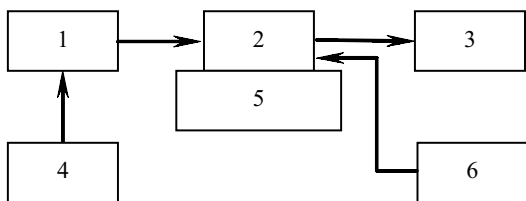


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения координатной характеристики ФД:  
1 — осветитель; 2 — исследуемый ФД; 3 — преобразователь ток—напряжение ППТН-2; 4 — блок питания лампы Б5-21 (АДБ109.00); 5 — координатный столик с ценой деления 0,01 мм; 6 — блок питания ФД (Б5-44)

Измерения в постоянном световом потоке проводились на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2. Осветитель 1 состоял из источника излучения типа А (лампы накаливания с цветовой температурой  $T_{цв} = 2856$  К), диафрагмы и объектива «Юпитер-3».

С учетом соотношений геометрической оптики [4, с. 288—290], при помощи оптической системы в плоскости фоточувствительной площадки фотодиода формировался световой зонд диаметром 100 мкм (при диаметре диафрагмы 1 мм). При измерении координатной характеристики чувствительности ФД при немодулированном потоке оптическая схема осветителя защищалась от фоновых засветок светонепроницаемым экраном.

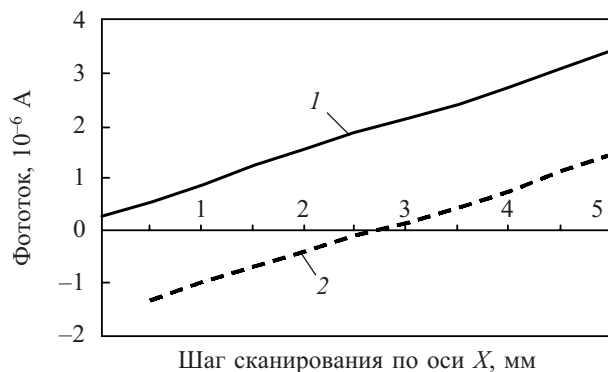


Рис. 3. Координатные характеристики ФД при рабочем напряжении 5 В (1) и 0 В (2), снятые в средней части фоточувствительного элемента

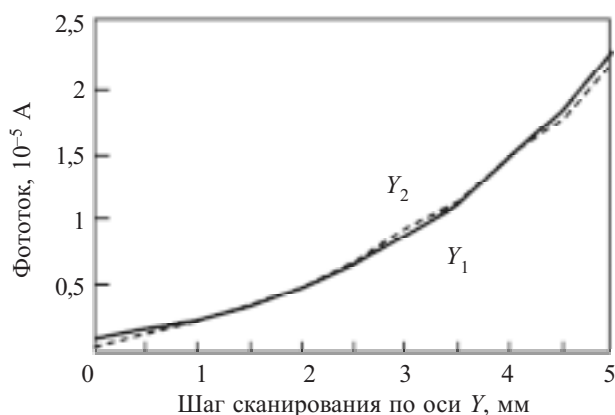


Рис. 4. Координатные характеристики ФД при двух значениях X. Рабочее напряжение на ФД не подавалось

Фоточувствительную поверхность фотодиода сканировали световым зондом вдоль осей  $X_1, X_2$  (рис. 1) при неизменной координате  $Y$  и вдоль осей  $Y_1, Y_2$  при неизменной координате  $X$ .

Результаты измерений координатной чувствительности ФД представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3 показаны координатные характеристики, снятые в средней части фоточувствительного элемента вдоль оси  $X$  при двух значениях рабочего напряжения. Здесь видно, что обе характеристики достаточно линейны.

На рис. 4 представлены координатные характеристики фотосигнала, измеренные вдоль оси  $Y$  при двух значениях  $X$  в отсутствие рабочего напряжения (характеристики, полученные при сканировании вдоль оси  $X$  — аналогичны). Различие координатных характеристик  $Y_1$  и  $Y_2$  лежит в пределах точности измерений и не превышает 10%.

Как видно из рис. 3 и 4, линейность характеристик ФД ухудшается при удалении от центральной зоны фоточувствительного элемента и приближении к продольным контактам. Это объясняется шунтированием поверхностного сопротивления  $p^+$ -слоя металлическим контактом.

Также были проведены измерения координатных характеристик фотодиодов, работающих в режиме холостого хода. Полученные результаты идентичны приведенным на рис. 3 и 4.

С помощью установки, структурная схема которой приведена на рис. 5, исследовались условия работы фотодиода под действием импульсного излучения длительностью до 5 мкс.

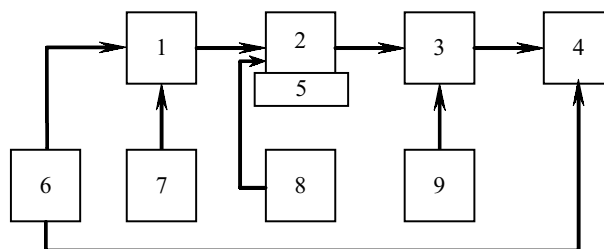


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения импульсной монохроматической чувствительности ФД: 1 — источник импульсного излучения; 2 — исследуемый ФД; 3 — широкополосный усилитель; 4 — осциллограф; 5 — координатный столик; 6 — генератор импульсов; 7 — блок питания источника излучения; 8 — блок питания ФД; 9 — блок питания усилителя

Координатная характеристика фотодиода при засветке фоточувствительной площадки импульсным излучением с длиной волны 0,9 мкм, длительностью импульса 5 мкс и при диаметре светового зонда 400 мкм для различных величин рабочего напряжения  $U_p$  приведена на рис. 6.

Как видно, наиболее близки к линейным координатные характеристики на рис. 3. В случае, представленном на рис. 6, сравнительно линейные зоны наблюдаются в области, удаленной от контактов ФД на 1—2 мм. При приближении светового зонда к то-

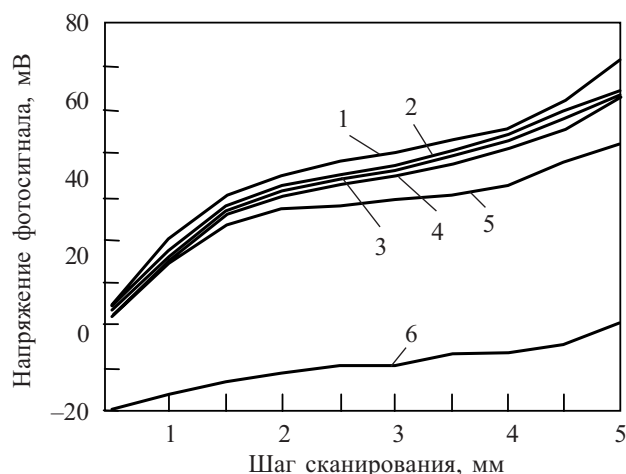


Рис. 6. Координатная характеристика ФД при засветке импульсным оптическим излучением, снятые в средней части фоточувствительного элемента, для различных  $U_p$  (в В): 1 — 5; 2 — 2,5; 3 — 1,5; 4 — 1; 5 — 0; 6 —  $U_p$  отсоединено

косъемным контактам координатная характеристика отклоняется от линейности. Это происходит из-за того, что слой контактной металлизации шунтирует продольное сопротивление тем больше, чем ближе световой зонд к контакту.

Таким образом, разработанная конструкция ФД может обеспечивать линейность координатной характеристики, в лучшем случае, на некотором удалении от периферии фоточувствительного элемента.

Крутизна координатной характеристики при фиксированном уровне засветки возрастает с ростом поверхностного сопротивления  $\rho_s$  и с уменьшением ширины области пространственного заряда. В фотодиоде, работающем на продольном фотоэффекте, продольное сопротивление  $R_{пр}$  всегда меньше обратного сопротивления  $p-n$ -перехода и вычисляется по формуле

$$R_{пр} = 1/\lambda^{i_{т}}, \quad (1)$$

где  $i_{т}$  — темновое сопротивление насыщения  $p-n$ -перехода;  
 $\lambda = q/(kT)$ ;  
 $q$  — заряд электрона;  
 $k$  — постоянная Больцмана;  
 $T$  — температура.

Для таких приборов при слабом световом сигнале ( $Li_{ф}\rho_s \ll 1$ ) координатная характеристика (зависимость выходного сигнала от координаты светового пятна) линейна и для  $R_{пр} \ll R_{пп}$  и  $Li_{ф}\rho_s \ll 1$  определяется формулой [3]

$$U_x = \frac{i_{ф}R_{пп}x}{2L}, \quad (2)$$

где  $i_{ф}$  — фототок;  
 $2L$  — длина ФД;  
 $R_{пп}$  — поперечное сопротивление;  
 $x$  — координата светового пятна.

Полученные результаты показывают, что практически невозможно получить оптимальное значение продольного сопротивления, которое является определяющим фактором линейности и идентичности координатных характеристик по осям  $X$  и  $Y$ . Это связано с тем, что сопротивление  $p^+$ -слоя определяется режимами технологического процесса диффузии бора (фосфора), которые, в свою очередь, должны отвечать технологическим режимам, необходимым при создании фотодиодов. И если для однокоординатного фотодиода продольное сопротивление можно увеличить за счет конструкции, выполнив  $p^+$ -слой в виде меандра или узкого прямоугольника, то для симметричного двухкоординатного фотодиода это невозможно. Авторы допускают, что этих недостатков можно избежать, изменив конструкцию фотоприемника так, чтобы контакты для снятия координатной зависимости были выполнены на подложке, в данном случае,  $n$ -типа, а общий контакт находился на  $p^+$ -слое.

Действительно, простой расчет показывает, что используя кремний с удельным сопротивлением 600 Ом·см и толщиной подложки 0,03 см можно получить значение продольного сопротивления по обеим координатам 20 кОм. Крутизна координатной характеристики такого фотодиода должна возрасти по сравнению с рассмотренным фотодиодом.

\*\*\*

Таким образом, разработан двухкоординатный фотодиод, принцип действия которого базируется на продольном фотоэффекте. Исследование его фотоэлектрических параметров показало, что наилучший вид (с точки зрения крутизны и линейности) координатная характеристика имеет в центральной части фоточувствительного элемента.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wellmark J. T. A new semiconductor photocell using lateral photoeffect // Proc.IRE.— 1957.— Vol. 45.— P. 474—484.
2. Рюхтин В. В., Годованюк В. М. Кремнієвий фотодіод на поздовжньому фотоэффекті // Науковий вісник Чернівецького національного ун-ту.— 1998.— № 29.— С. 193—200.
3. Таубкин И. И., Фример А. И., Лисейкин В. П. и др. Продольный фотоэффект в  $p$ - и  $n$ -областях кремниевых фотодиодов // ОМП.— 1983.— № 5.— С. 16.
4. Ландсберг Г. С. Оптика.— М.: Наука, 1976.