

УДК 537.527

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОДИОДЫ ДЛЯ ПРИЕМА ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА 0,6—1,1 мкм

Ю. М. Деготь, О. Н. Забенькин, Т. М. Мельникова,  
А. В. Кулыманов, Н. В. Кравченко, О. В. Огнева

Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

*Рассмотрены особенности пригодной к серийному выпуску технологии изготовления и основные фотоэлектрические характеристики одноэлементных и многоэлементных ррп-фотодиодов для работы в области спектра 0,8—0,9 мкм и для приема импульсного лазерного излучения 1,06 мкм. Диаметр фоточувствительных площадок лежит в пределах 0,2—16 мм. Обсуждены перспективы изготовления одноэлементных лавинных фотодиодов и линеек с количеством элементов 8—10 для работы в широком спектральном диапазоне 0,6—1,1 мкм с коэффициентом умножения 10—100.*

Кремниевые фотодиоды (ФД) являются основными детекторами для приема излучения в диапазоне спектра 0,6—1,1 мкм вследствие развитой планарной технологии на кремнии, а также высокой обнаружительной способности в данном спектральном диапазоне.

По своему назначению кремниевые ФД можно разделить на две группы:

ФД для приема лазерного импульсного излучения с длиной волны 1,06 мкм, предназначенные для дальнометрии, наведения, обнаружения и т. д.;

ФД для приема излучения с длиной волны 0,8—0,9 мкм в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСПИ), вычислительной технике, диагностической медицинской аппаратуре и других областях народного хозяйства.

ФД первого типа работают на краю спектрального поглощения и, следовательно, область собирания носителей должна быть относительно толстой — 0,5—0,7 мм, при этом с учетом обратного отражения сигнала от тыльной стороны кристалла достигается квантовый выход 0,2—0,6. Высокие же требования по быстродействию обуславливают полное истощение этой области, что при ограниченном рабочем напряжении до 250 В требует использования высокоомного кремния с сопротивлением более 10 кОм.

За последние пять лет проведен цикл разработок по созданию как одноэлементных, так и квадрантных и многоэлементных *pin*-фотодиодов с диаметром площадки 0,5—16 мм. Для снижения темновых токов в этом классе приборов используются охранные изолированные кольца.

На рис. 1 приведена схема включения ФД с диаметром площадки 14 мм. При рабочем напряжении 75 В ФД имеет чувствительность не менее 0,2 А/Вт к излучению с  $\lambda = 1,06$  мкм, к импульсу длительностью 50 нс в диапазоне температур минус 60—85 °С, имеет технические условия БУТИ. 432231.009 ТУ, выпускается серийно.

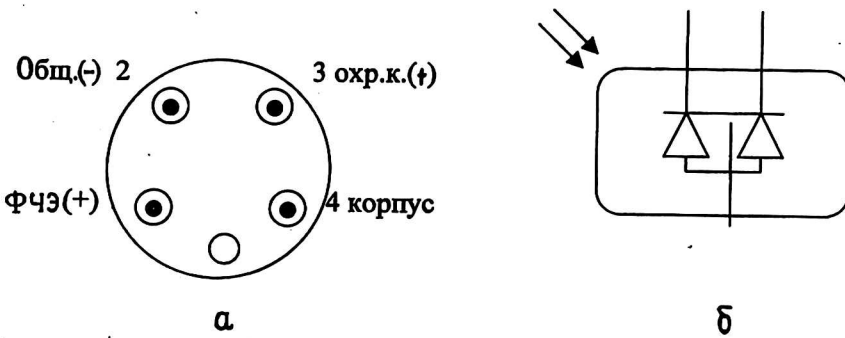


Рис. 1. Схема включения *pin*-фотодиода:  
 а — вид со стороны выводов; б — условное графическое обозначение

**Техническая характеристика (при  $t = 20$  °С)**

Рабочее напряжение, В .....	75
Темновой ток, мкА, менее:	
фоточувствительного элемента .....	7
охранного кольца .....	250
Токовая монохроматическая чувствительность, А/Вт, более .....	0,2
Емкость, пФ, менее .....	70
Граничная частота, мГц, более .....	5

На рис. 2 приведена схема включения квадрантного ФД с диаметром площадки 16 мм. При рабочем напряжении 135 В чувствительность к импульсу 20 нс составляет величину не менее 0,25 А/Вт. Опытные образцы ФД могут поставляться малыми сериями.

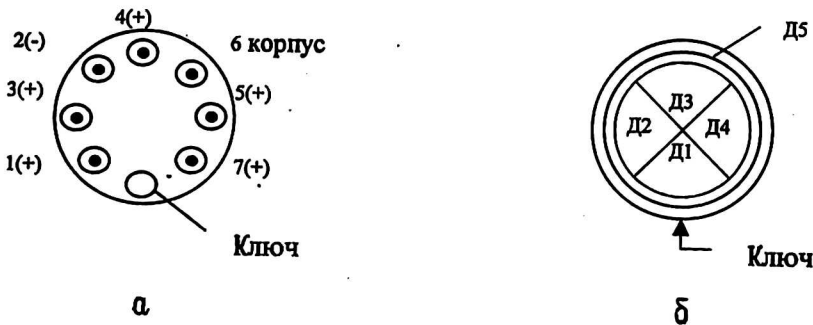


Рис. 2. Схема включения квадрантного ФД:  
 а — вид со стороны выводов; б — вид со стороны входного окна

В таблице приведены основные параметры ФД. Параметры измерены при 20 °С; рабочее напряжение  $(135 \pm 5)$  В; размер  $S = 5,4 - 0,1$  мм между базовой поверхностью и плоскостью ФЧЭ.

Номер элемента	Темновой ток $I_t$ , мкА	Импульсная чувствительность при $\lambda = 1,06$ , $\tau = 20$ нс, А/Вт	Емкость, пФ	Коэффициент взаимосвязи, %
1-й элемент	0,16	0,28	15,1	< 10
2-й элемент	0,16	0,28	15,0	< 10
3-й элемент	0,60	0,28	15,5	< 10
4-й элемент	0,16	0,28	15,5	< 10
Охранное кольцо, мкА	120,0			

На рис. 3. показан внешний вид и приведены основные фотоэлектрические параметры 8-элементного *pin*-фотодиода с общим диаметром площадки 10 мм. Чувствительность 0,3—0,35 А/Вт к излучению с  $\lambda = 1,06$  мкм, импульсу длительностью 20 нс достигается при рабочем напряжении 210 В. ФД изготавливается в бескорпусном исполнении.

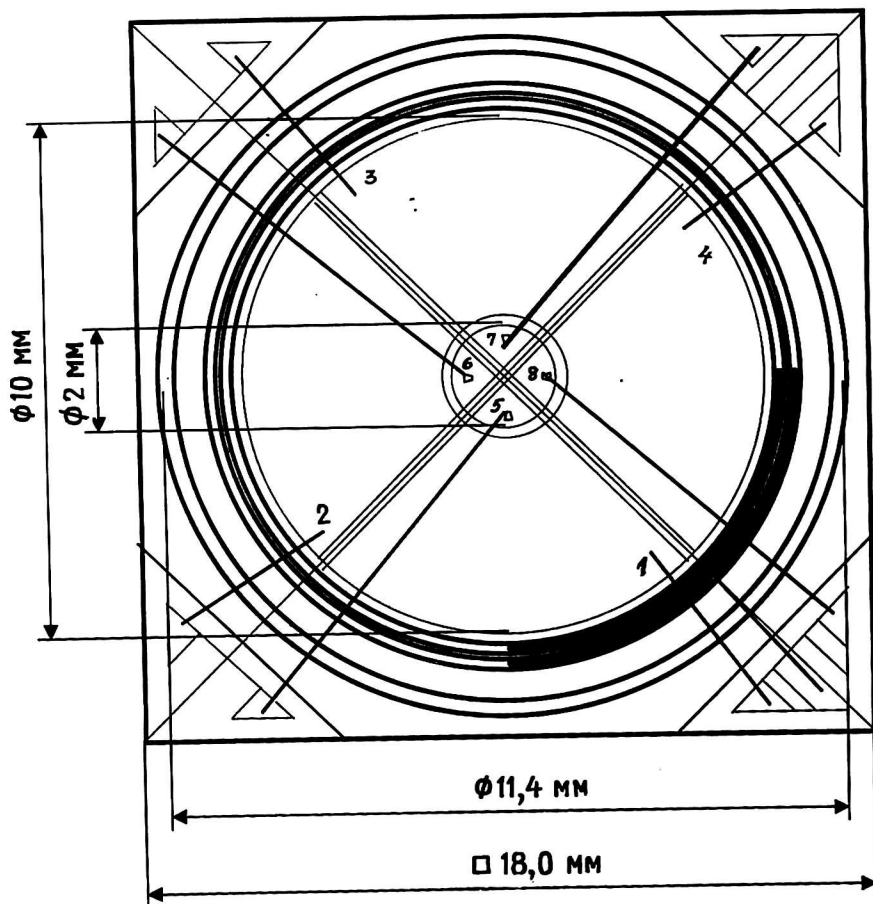


Рис. 3. Внешний вид 8-элементного *pin*-фотодиода

#### Основная характеристика ФД

Рабочее напряжение, В	..... 210
Чувствительность, А/Вт	..... 0,3—0,35
Темновой ток, нА:	
$I_6$ .....	100—200

$I_m$ .....	5—10
Емкость, пФ, $I_6/I_m$ .....	5/1,5
Коэффициент взаимосвязи, %, менее .....	10

Применение указанных ФД в спектральном диапазоне 0,8—0,9 мкм приводит к повышению чувствительности до 0,5 А/Вт без изменения других параметров.

Создание *pin*-фотодиодов большой площади потребовало решения ряда научно-технических задач:

получение высокочистого кремния с сопротивлением более 10 кОм·см диаметром 60 мм методом нейтронной трансмутации и исследование однородности распределения сопротивления по торцу и образующей монокристалла;

выяснение влияния высокотемпературных обработок на параметры изготовленных ФД;

проведение физической оптимизации *pin*-структуры в целях обеспечения необходимой чувствительности и инерционности с учетом зависимости подвижности от электрического поля.

Высокочастотные ФД для приема излучения 0,8—0,9 мкм изготавливаются на основе эпитаксиальных подложек *np(+)*-типа либо на монокристаллическом кремнии с сопротивлением не ниже 400 Ом·см. Диаметры чувствительных площадок лежат в пределах 0,1—14 мм. ФД могут выпускаться в бескорпусном исполнении, в металлостеклянной конструкции с плоским стеклом, в корпусе с отрезком волокна. При рабочем напряжении 5—25 В ФД имеют чувствительность не менее 0,45 А/Вт, выходную емкость 10 пФ/мм<sup>2</sup>, уровень темнового тока 6—10 нА/мм<sup>2</sup>.

**Фотоэлектрическая характеристика трех модификаций ФД для ВОСПИ (при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )**

Диаметр фоточувствительной площадки, мм ..	0,8	0,5	0,2
Рабочее напряжение, В .....	24	24	24
Темновой ток, нА .....	5—10	5—10	2—5
Токовая чувствительность к длине волны			
0,87 мкм, А/Вт .....		0,45—0,5	
Быстродействие, нс, менее .....	5	3	1
Емкость, пФ .....	3—4	2—3	< 1
Рабочий температурный диапазон, $^\circ\text{C}$ .....		минус 60÷85	

ФД имеют технические условия ОС 3.368.070 ТУ и могут поставляться мелкими сериями.

Чувствительность *pin*-фотодиодов во всем спектральном диапазоне ограничена квантовым выходом, и дальнейшее ее увеличение может быть достигнуто за счет лавинного умножения, при этом сохранить малую величину инерционности и емкости при не слишком высоких рабочих напряжениях позволяет только четырехслойная  $n^+p_i p^+$ -структура, в которой генерация носителей происходит в относительно широкой области, а лавинное размножение — в узкой области вблизи *p-n*-перехода.

**Техническая характеристика лавинных ФД  
(корпусное исполнение аналогично *pin*-фотодиодам)**

Диаметр фоточувствительной площадки, мм .....	0,08	0,2	0,5	2,0
Рабочее напряжение, В .....	70—350	70—350	150—400	280—450
Темновой ток, нА .....	< 1	1—2	5—20	40—50
Коэффициент умножения .....	150—200	100—120	80—120	40—50
Токовая монохроматическая чувствительность, А/Вт:				
на длине волны 0,9 .....	> 100	50—100	40—60	20—25
на длине волны 1,06 .....	—	—	16—20	8—10
Емкость, пФ .....	0,5	1—2	2—3	6—7
Время нарастания (спада) по уровню 0,1—0,9, нс ..	0,5	1—2	2—4	4—5
Температурный коэффициент напряжения, В/°С ...	0,5—1	0,5—1	2,3—2,4	2,3—2,4

При изготовлении лавинных ФД используется прецизионное ионное легирование бором и фосфором, создается протяженная лавинная область длительной разгонкой примеси, а также применяется двухслойное маскирующее покрытие для защиты от неконтролируемой примеси. На основе данной технологии изготовлены макетные образцы 8-элементной и 25-элементной линеек лавинных ФД. В 8-элементной линейке размер элемента  $64 \times 64 \text{ мкм}^2$ , зазор 14 мкм. При рабочем напряжении 150—300 В чувствительность к излучению 0,9 мкм достигает величины 40—60 А/Вт. 25-элементная линейка состоит из элементов  $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ , разделенных 20-мкм зазорами. При рабочем напряжении 250—400 В коэффициент умножения 30—50, чувствительность к 1,06-мкм излучению 6—10 А/Вт.

В заключение можно сказать, что разработанные базовые технологии изготовления *pin*- и лавинных ФД позволяют разрабатывать фотоприемники разных размеров и конфигураций, в том числе линейки и матрицы.

**HIGH-FREQUENCY SI-PHOTODIODES FOR INFRARED DETECTION  
IN 0,6—1,1  $\mu\text{m}$  SPECTRAL BAND**

*Yu. M. Djogot, O. N. Zabenkin, T. M. Melnikova, A. V. Kulymanov,  
N. V. Kravchenko, O. V. Ogneva*

State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

*The specialties and basic photoelectric characteristics are considered of the pin-photodiodes technology intended for quantitative production. The single- and multi-element devices are designed for 0,8—0,9  $\mu\text{m}$ -band detection and for 1,06  $\mu\text{m}$ -laser's pulse detection, as while. The diameter of the devices sensitive area is restricted to 0,2—16 mm range. The perspectives are discussed of producing both single-element and 8—9-elements linear array detectors for use in wide spectral band of 0,6—1,1  $\mu\text{m}$  with avalanche factors of 10—100.*