

УДК 621.383.52

## Многоэлементный германиевый фотодиод с кодом Грея

Ю. М. Деготь, О. Н. Забенькин, Н. Н. Кичина, Н. В. Кравченко, А. В. Кулыманов,  
Ю. В. Лобиков, О. В. Огнева, М. А. Тришенков, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева  
ФГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

О. Н. Смоленский-Суворов

Красногорский завод им. С. А. Зверева, г. Красногорск, Россия

*Разработаны технология и конструкция многоэлементного германиевого фотоприемника. Топология фоточувствительных площадок представляет собой маску кода Грея, так что при облучении полоской на выходе прибора с соответствующей внешней электроникой выдается двоичный четырехразрядный кодовый сигнал. Особенности прибора являются большая площадь фоточувствительной области ~ 60 мм<sup>2</sup>, расширенная область (по сравнению с существующими кремниевыми системами) спектральной чувствительности — вплоть до 0,8—1,55 мкм.*

В лазерных системах продолжает активно осваиваться спектральный диапазон 1,3—1,55 мкм. В волоконно-оптических системах это обусловлено минимумом потерь в волокне в этом диапазоне длин волн, а в воздушных беспроводных системах — безопасностью длинноволнового излучения 1,54 мкм для глаз (тогда как излучение первых поколений излучателей на 0,8—1,06 мкм является опасным). Системы обнаружения лазерных импульсов не являются исключением. В 80—90-х гг. в первых таких системах применялись лазеры с длиной волны 1,06 мкм. Для этих систем был разработан кремниевый многоэлементный фотодиод с кодом Грея, который позволял не только обнаружить лазерное излучение, но и определить координаты его источника [1].

В связи с освоением диапазона длин волн 1,3—1,55 мкм возникла необходимость "очувствления" кодового фотоприемника к этому диапазону. В настоящей статье приведена информация о разработке многоэлементного фотоприемника с кодом Грея, решающей сформулированные задачи.

### Фоточувствительный элемент

#### Выбор материала

Для фотодиода (ФД) на спектральный диапазон 1,3—1,55 мкм применяются в основном два материала — гетероструктура системы InGaAs и Ge. Гетерофотодиоды на основе соединений InGaAs имеют важные преимущества — их темновой ток существенно (примерно на один-два порядка) ниже темнового тока германиевых фотодиодов, а длинноволновая граница чувствительности правее (типичные значения для типовых составов InGaAs ФД ~1,6—1,8 мкм, а у Ge

ФД ~1,55—1,6 мкм). Благодаря этому типичные значения чувствительности  $S_{\lambda}$  гетерофотодиодов на  $\lambda = 1,55$  мкм близки к  $S_{1,55} \approx 1$  А/Вт, в то время как у Ge ФД они обычно на 10—20 % ниже. Меньше сказывается и температурная зависимость  $S_{1,55}$ .

Однако для рассматриваемого класса систем указанные преимущества не оказываются принципиальными, и применение находят Ge ФД в основном благодаря своей более низкой стоимости. Анализ каталогов показывает, что выпуск Ge ФД составляет заметную долю в общем выпуске фотоприемников этого диапазона, прежде всего таких известных фирм как Judson, Hamamatsu [2, 3]. В рассматриваемых системах ФД обнаруживает прямое мощное излучение лазеров, так что преимущество в 10—20 % по  $S_{1,55}$  не является определяющим. Внешняя фоновая засветка и широкая полоса (обусловленная малой длительностью лазерных импульсов 10—50 нс) приводят к тому, что собственные шумы ФД даже при его темновом токе 10—20 мкА не являются лимитирующими. Поэтому целесообразно выбрать Ge уже исходя из его более низкой стоимости. Но, кроме стоимости, для решаемой задачи выбор Ge обусловлен еще тремя его преимуществами:

- возможностью получить большую фоточувствительную площадку (как это требуется для кодового приемника — см. ниже);
- более широкой спектральной характеристикой. ФД должен регистрировать излучение из диапазона не только 1,3—1,55 мкм, но и 0,8—1,06 мкм. А в коротковолновой области 0,8—0,9 мкм InGaAs ФД имеет весьма резкий спад и уступает по чувствительности Ge ФД (рис. 1). Попытка поднять чувствительность гетеропереходов в этой области за счет состава приведет к завалу чувствительности в длинноволновой области;

• большим динамическим диапазоном. Исследования амперваттной характеристики (зависимости фототока от оптической мощности) показывают, что завал этой характеристики у типовых InGaAs ФД (одноэлементных) начинается раньше, чем у Ge ФД.

**Удельное сопротивление материала**

Нами был выбран Ge электронного типа проводимости марок ГЭС 0,35—0,5. Сопротивление 0,35—0,5 Ом·см представляется оптимальным для решаемой задачи: его повышение приведет к росту темнового тока насыщения и ухудшению температурной устойчивости прибора, а снижение — к росту электрической емкости перехода.

**Фоточувствительная площадка. Топология**

Большая фоточувствительная область 12×4,8 мм<sup>2</sup> и многоэлементность, позволяющая реализовать кодовую маску, являются основными особенностями настоящей разработки. Фоточувствительная площадка Ge ФД обычно не превышает 1—10 мм<sup>2</sup>. Заданное в настоящей разработке значение ~60 мм<sup>2</sup> типично для смотрящих матриц, а не для фотодиодов.

Топология ФД, реализующая код Грея, представлена на рис. 2.

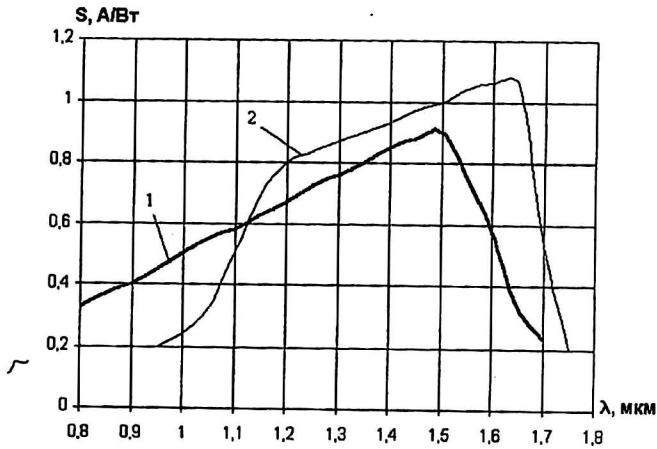


Рис. 1. Типовые спектральные характеристики чувствительности фотодиодов: 1 — Ge; 2 — InGaAsP

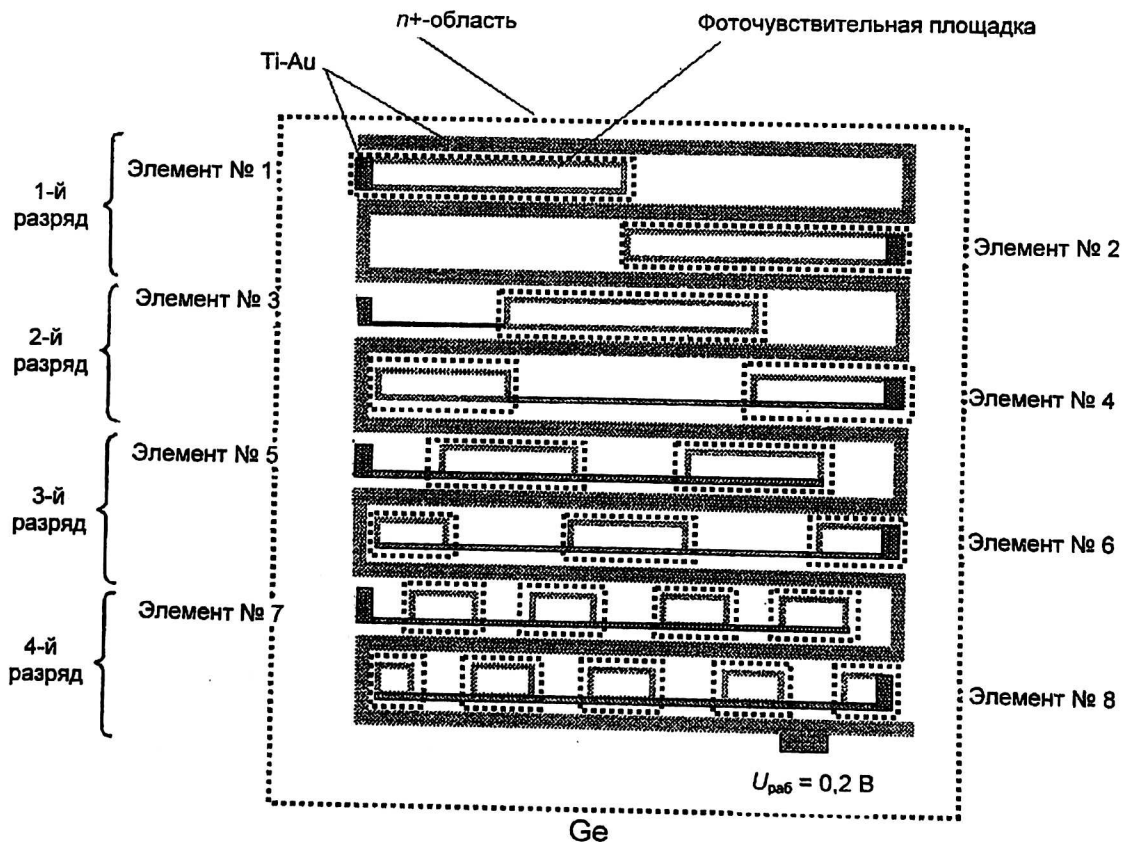


Рис. 2. Расположение фоточувствительных площадок

Прибор содержит 19 фоточувствительных площадок (на данном рисунке — горизонтальные полоски). Они объединены в восемь элементов, так что электрически один элемент — это один фотодиод. Прибор однокоординатный и засвечивается узкой полоской (для данного рисунка эта полоска должна быть вертикальной). Пара соседних элементов (например, 1 и 2) располагается так, чтобы при движении световой полоски вдоль оси  $X$  в каждом ее положении освещался лишь один элемент. При этом два соседних элемента геометрически дополняют друг друга в горизонтальном направлении. Эти дополняющие элементы включаются на вход дифференциального усилителя (нечетные — к инвертирующему входу, а четные — к неинвертирующему), позволяя осуществить режим вычитания выходных токов элементов. Два таких элемента образуют разряд — всего прибор содержит четыре разряда. На выходе дифференциального усилителя каждого разряда стоит пороговое устройство, на выходе разрядов — генерируется логическая единица (когда световая полоска попадает на фоточувствительные площадки четных элементов) либо логический ноль (когда световая полоска попадает на нечетные элементы).

Для устранения взаимосвязи между элементами формируется стоп-канал ( $n^+$ -область). Она фактически заполняет всю переднюю фокальную поверхность кристалла, отступая от  $p$ -областей лишь на 50 мкм (во избежание непосредственного контакта  $n^+$ - и  $p$ -областей и, как следствие, пробоя между ними). Металлические контакты к  $p$ -областям полностью ее "окольцовывают" по периметру. Это позволяет с фотолитографической точностью ( $\sim 1-3$  мкм) выдержать геометрические размеры маски кода Грея, а также снизить последовательное сопротивление растекания в  $p$ -области. С той же целью (снизить сопротивление растекания в подложке) формируется и контакт к  $n^+$ -области. Он также имеет змеевидную форму. Симметричность топологии элементов относительно продольной оси  $x$  обеспечивает однородность фотоотклика. Введение стоп-областей препятствует диффузии инжектированных носителей по  $n$ -подложке и, следовательно, возникновению ложных сигналов в неосвещенных элементах. Описанные выше решения особенно важны для обеспечения таких специфических требований кодового прибора, как работа при мощных ( $\sim 60-600$  Вт) и коротких лазерных импульсах. Отметим, что при освещении мощным импульсом освещаемый эле-

мент смещается в прямом направлении, инжектируя дырки в подложку. Они диффундируют, и при отсутствии стоп-канала достигают неосвещенного элемента, разделяются и создают фотоЭДС, сопоставимую по величине с фотоЭДС освещенного элемента. При различии в темновых токах элементов фотоЭДС неосвещенного элемента может даже превышать фотоЭДС освещенного, что и приведет к ложным показаниям. Сказанное наблюдалось экспериментально: в отсутствие стоп-канала могли возникать ложные сигналы; введение стоп-канала устраняло их.

Если не выполнить описанную выше топологию контактов — сделать их только по краям элемента, а не по всему периметру, то будет наблюдаться "провал" чувствительности при освещении в центре площадки коротким импульсом из-за эффектов продольного растекания. Это также наблюдалось экспериментально.

### Структура

На рис. 3 схематически представлено сечение кристалла — двух соседних элементов (например, № 2 и 3).

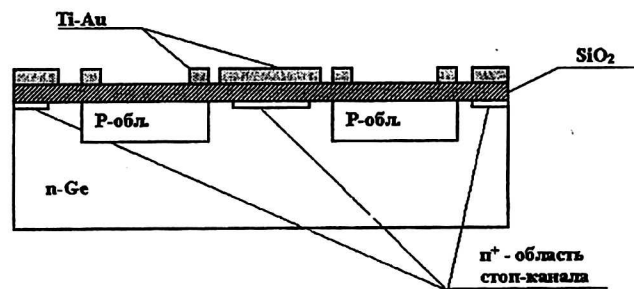


Рис. 3. Сечение кристалла двух соседних элементов

На подложке толщиной 0,3 мм формируются фоточувствительные площадки ( $p$ -область) ионной загонкой бора с последующей разгонкой при 615 °С. Поверхностное сопротивление  $p$ -области  $\rho_{\Sigma} \sim 1$  кОм. При этом продольное сопротивление растекания с учетом топологии контактов составляет  $R \sim 30$  Ом, а  $RC$ -постоянная  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$  с сопоставима с длительностью импульса 10—50 нс. Важно, что при выбранной форме контактов по всей фоточувствительной площадке параметры  $R$ ,  $RC$  практически не зависят от координаты пятна, и поэтому фотоотклик тоже не зависит от координаты пятна.

Стоп-канал формируется аналогичной технологией: ионная загонка (для стоп-канала — это мышьяк) с последующей разгонкой.

Важной операцией является формирование окисной пленки. Был отработан двухстадийный процесс низкотемпературного пиролиза осаждения пленки SiO<sub>2</sub>: на первой стадии осаждается пленка 800 Å, а на второй стадии — 1200 Å. Удалось получить обедняющий поверхностный потенциал не более 1 В, плотность поверхностных состояний ~10<sup>-11</sup> см<sup>-2</sup>·эВ<sup>-1</sup> и практически устранить наблюдающийся в таких структурах гистерезис поверхностных CV-характеристик [4]. Пленка с данными параметрами позволяет получить на лучших образцах токи, ограниченные генерацией в объеме, устранить поверхностные каналы.

### Фотоэлектрические параметры и характеристики

Спектральная характеристика прибора приведена на рис. 1. Чувствительность в максимуме ( $\lambda = 1,5$  мкм) достигала значений 0,9 А/Вт, что соответствует квантовому выходу ~70 %. Типовые значения чувствительности на длине волны 1,06 мкм составили 0,5 А/Вт, а на 1,55 мкм — 0,5—0,7 А/Вт. Для данного прибора задано достаточно низкое рабочее напряжение 0,2 В, поэтому пробивное напряжение превосходило его на полтора-два порядка и достигало значений 20 В. Типовые значения темнового тока насыщения при указанном рабочем напряжении равнялись 5—10 мкА. Низкое рабочее напряжение обуславливало относительно высокое значение емкости ~1000 пФ, которая, однако, не сказывалась на работе системы при выбранной схемотехнике.

Технические требования имеют запас по отношению к достигнутым значениям параметров и приведены ниже:

|   |         |
|---|---------|
| число:  |         |
| разрядов.....                                 | 4       |
| элементов.....                                | 8       |
| площадок.....                                 | 19      |
| общая площадь элемента, мм <sup>2</sup> ..... | 6x0,3   |
| активная область, мм <sup>2</sup> .....       | 12x4,8  |
| рабочее напряжение, В.....                    | 0,5     |
| спектральный диапазон, мкм.....               | 0,8—1,6 |
| чувствительность на                           |         |
| $\lambda = 1,54$ мкм, А/Вт.....               | 0,2     |
| темновой ток элемента, мкА.....               | 15      |
| коэффициент взаимосвязи соседних              |         |
| разрядов, %, менее.....                       | 5       |

### Конструкция.

#### Эксплуатационные характеристики

Сложной задачей являлась разработка оптической прецизионной конструкции корпуса, который фактически является составной частью оптико-механической системы. Он имеет плоско-параллельное входное окно высокой степени чистоты (не ниже V класса, ГОСТ 11141). Корпус имеет установочные отверстия и базовую посадочную цилиндрическую поверхность для монтажа в аппаратуре. Конструкция его и технология сборки обеспечивают высокую точность центровки фоточувствительного кристалла относительно указанных посадочных элементов: разворот осей не более 30 мин, смещение центра — не более 400 мкм.

Разработанная технология фоточувствительного элемента и конструкции корпуса обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики. Основные из них приведены ниже:

|  |                         |
|--|-------------------------|
| климатические факторы:                   |                         |
| диапазон рабочих температур, °С.....     | -50÷50                  |
| влажность при T = 35 °С, %.....          | 98                      |
| механические факторы:                    |                         |
| удар одиночного действия, г.....         | 3000                    |
| многократный удар.....                   | 10 000 ударов,<br>150 г |
| вибрация, г.....                         | 10                      |
| надежность:                              |                         |
| минимальная наработка                    |                         |
| при U <sub>раб</sub> , T = 50 °С, ч..... | 2500                    |
| сохраняемость, год.....                  | 15                      |

*Авторы выражают благодарность за помощь в разработке прибора В. С. Варгановой, М. А. Вороновой, М. А. Захаровой, С. Ю. Максимова, Т. Н. Мищенковой, В. М. Патрину, А. Г. Титову, А. Е. Трошковой, В. И. Фамицкому, З. В. Чижовой*

### Литература

1. Никонов Б. С., Ревкина Э. И., Таубкин И. И., Фролов Н. В. // ОМП. 1983. № 2. С. 45—47.
2. Hamamatsu. Opto-semiconductors CONDENSED CATALOG. June. 2002. P. 15—16.
3. Judson. Infrared Detector Products. 1998. P. 2.
4. Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник / Под. ред. А. В. Ржанова. — М.: Наука, 1976. — 279 с.

## Germanium Gray-coded multielement photodiode

Yu. M. Degot', O. N. Zaben'kin, N. N. Kitchina, N. V. Kravchenko, A. V. Kulymanov,  
Yu. V. Lobikov, O. V. Ogneva, M. A. Trishenkov, P. E. Khakyashev, I. V. Tchinareva  
ORION Federal Research-and-Production Association, Moscow, Russia

O. N. Smolensky-Suvorov  
Krasnogorsky plant, Krasnogorsk, Moscow region, Russia

*Multielement germanium photodetector's technology and design are worked out. The elements topology is a Gray-code mask, which leads to the appearance of binary four-digit code signal at the output of the device provided with correspondent outer electronics when input optical signal has a form of a strip. The device's features are: large photosensitive area of about 60 mm<sup>2</sup>, extended spectral response interval (comparing with existing silicon Gray-code photodiodes) up to 0,8—1,55 μm.*