

# Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383

## Исследование фотодиодов с *p-n*-переходом на основе GaP при температурах до +500 °С

В. С. Рудневский, В. И. Стафеев

ФГУП «НПО «Орион» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Исследованы фотодиоды с *p-n*-переходом на основе GaP. Приведены температурные зависимости токовой чувствительности в диапазоне от –183 до +500 °С. При изменении температуры в указанном диапазоне максимум спектральной чувствительности смещается от 430 до 510 нм, а токовая чувствительность возрастает от 0,044 до 0,13 А/Вт. Изменение чувствительности связано с температурной зависимостью коэффициента поглощения GaP. До температуры +200 °С в фотодиодах преобладает генерационно-рекомбинационный ток, а свыше +220 °С — диффузионный ток.*

PACS: 85.60.Dw

### Введение

Исследование космического пространства и планет, наблюдение за атомными реакторами, контроль за факелом реактивного двигателя, контроль термических процессов и т. п. требуют от фотодиодов высокой стойкости к повышенным температурам, поэтому исследование фотодиодов при высоких температурах представляет научный и практический интерес.

### Подготовка образцов

Фотодиоды изготавливались на эпитаксиальных слоях  $nn^+$ -GaP с концентрацией носителей в *n*-области  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Эпитаксиальные слои толщиной ~10 мкм выращивали методом жидкофазной эпитаксии на подложке GaP толщиной ~300 мкм с концентрацией носителей в  $n^+$ -области  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

*P-n*-переходы создавались диффузией Zn. Глубина залегания составляла 0,8—1,0 мкм. Контакты к *p*-области формировались напылением в вакууме слоя золота толщиной 0,1 мкм с последующим отжигом при температуре 470 °С в течение 20 мин. Методами фотолитографии выделялись фоточувствительные площадки диаметром 1 мм.

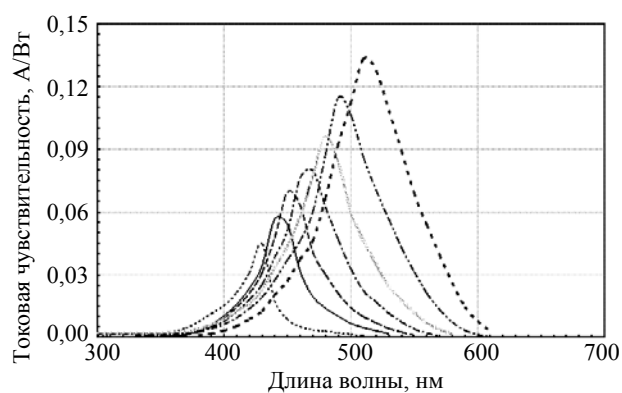
Сформированные на пластине мезаструктуры с фоточувствительными элементами «выкалывались» в виде блоков размером 2,2×2,2 мм, которые монтировались на коваровый цоколь корпуса. Распаку выводов от контактных площадок осуществляли золотой проволокой диаметром 30 мкм.

Фоточувствительные элементы размещали в герметизированном корпусе с окном из кварца. Свет попадал на фотодиод со стороны тонкой *p*-области *p-n*-перехода.

### Экспериментальные результаты

Характеристики фотодиодов исследовались в области температур от –183 до +500 °С. Перед измерением образцы выдерживали при каждой температуре не менее 2 ч.

Спектральное распределение токовой чувствительности (ТЧ) в фотовольтаическом режиме при разных температурах показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Спектральные характеристики токовой чувствительности фотодиода *p-n-GaP* при разных температурах: — · · · —  $T = 183 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — — — —  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — — — —  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — · — · —  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — — — —  $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — · — — —  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; — · — · —  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

С ростом температуры токовая чувствительность возрастает от 0,044 до 0,13 А/Вт. Соответственно, максимум токовой чувствительности сдвигается в длинноволновую область от 0,43 до 0,51 мкм (рис. 2).

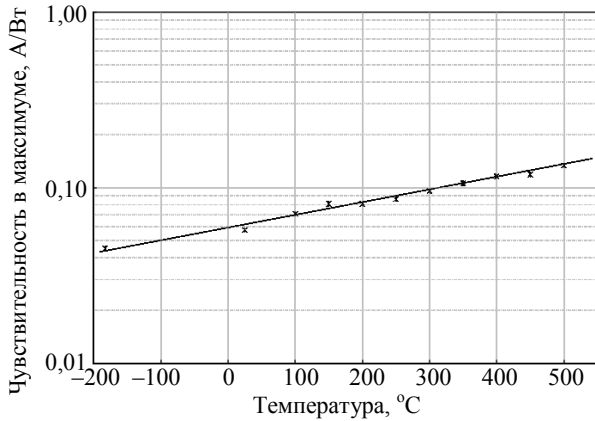


Рис. 2. Изменение максимума спектральной характеристики от температуры

Зависимость максимума чувствительности для исследуемого фотодиода от температуры описывается следующим законом:

$$S \approx 0,037 \cdot \exp(0,00165T),$$

где  $T$  — температура, К;  $S$ , А/Вт.

Изменение токовой чувствительности с ростом температуры связано с изменением коэффициента поглощения и длины диффузии. Последняя определяет сбор образованных светом носителей. Она пропорциональна квадратному корню из произведения подвижности на время жизни неравновесных носителей. Подвижность в GaP с ростом температуры в три—пять раз убывает, а время жизни примерно во столько же раз возрастает. В итоге длина диффузии практически не изменяется, поэтому основной причиной изменения чувствительности с температурой является рост коэффициента поглощения.

На рис. 3, а, б представлено пространственное распределение фоточувствительности двух фотодиодов по площадке. Такое распределение было получено на сканирующей установке, работающей по принципу телевизионного раstra с бегущим оптическим лучом размером  $\sim 15$  мкм. В центре видны контактная площадка и электрический вывод от нее. Неоднородность чувствительности по площадке фотодиода не превышает 10—20 %.

Прямой ток фотодиода описывается стандартной зависимостью

$$I_{ap} \sim \exp(qV/nkT),$$

где  $q$  — заряд электрона;

$V$  — приложенное внешнее электрическое смещение;

$k$  — постоянная Больцмана;  
 $n$  — коэффициент неидеальности.

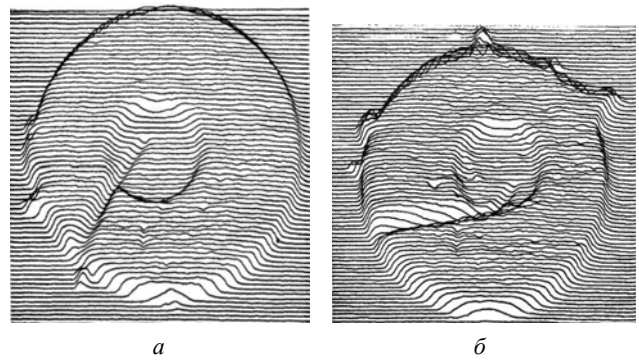


Рис. 3. Пространственное распределение фоточувствительности двух фотодиодов (диаметры: чувствительного элемента 1 мм; омического контакта — 0,3 мм; токоподводящей проволоки — 0,03 мм): а — образец 1; б — образец 2

Обратный ток линейно зависит от напряжения и имеет два участка с разным наклоном: ток слабее зависит от напряжения 0—1 В, чем при его значении свыше 1 В.

Дифференциальное сопротивление фотодиода при нулевом смещении  $R_0$  описывается зависимостью

$$R_0 \approx R \cdot \exp(-0,0304T).$$

При температуре до +100 °C сопротивление  $R \approx 8 \cdot 10^{13}$ , а выше +200 °C —  $\approx 2,4 \cdot 10^{14}$ .

Температурная зависимость коэффициента неидеальности представлена на рис. 4.

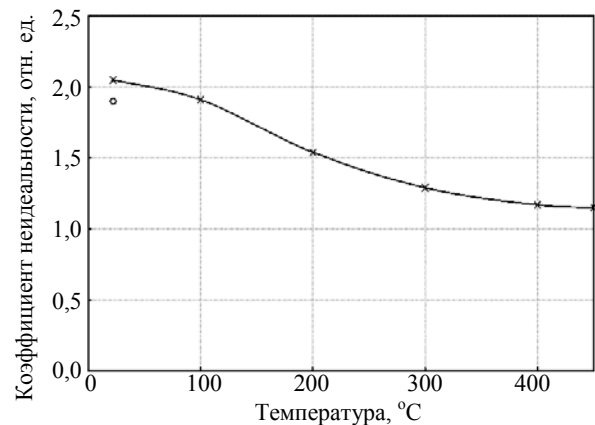


Рис. 4. Коэффициент неидеальности фотодиода p-n-GaP в зависимости от температуры.

Круглый маркер (о) соответствует повторному измерению после цикла измерений при повышенной температуре

При низких температурах коэффициент неидеальности  $n \sim 2$ , что характерно для диодов с генерацией-рекомбинацией носителей в области объемного заряда. При повышении температуры коэффициент неидеальности убывает в связи с возрастанием диффузионной компоненты тока.

**Заключение**

Выдержка при высоких температурах приводит к частичному отжигу дефектов и, соответственно, к улучшению параметров фотодиодов *p-n*-GaP: увеличению дифференциального сопротивления

диода при нулевом смещении и уменьшению коэффициента неидеальности.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2008 г.

## GaP *p-n*-junction investigation at temperatures up to plus 500 °C

V. S. Rudnevsky, V. I. Stafeev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Photodiodes based on gallium phosphide with p-n-junction have been investigated. Photosensitivity characteristics within temperature range from minus 183 up to plus 500 °C are represented. The sensitivity peak shifts from 430 to 510 nm with temperature change from minus 183 up to plus 500 °C. From 0.044 up to 0.13 A/W current sensitivity increase is explained by absorption in gallium phosphide at heightened temperatures. The recombination via impurity levels predominates in GaP photodiodes at temperature below 200 °C. The diffusion current appears at temperature more than 200 °C.*

PACS: 85.60.Dw

УДК 621.383

## Определение дефектных элементов матричных тепловизионных фотоприемников в процедуре двухточечной коррекции

К. О. Болтарь, Р. В. Грачев, В. В. Полунеев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Рассмотрен метод обнаружения дефектных элементов матричных фотоприемных устройств (МФПУ) в процессе калибровок. Обнаружение дефектных элементов осуществляется по порогам показателя дрейфа, оценок временного шума и постоянной составляющей. После горячей калибровки определяют коэффициенты чувствительности, по которым также происходит обнаружение дефектов. Приведены распределения по элементам МФПУ и гистограммы значений дрейфа и частотных зависимостей шума, измеренные с помощью формирователя тепловизионного изображения на основе МФПУ формата 256×256, спектрального диапазона 8—12 мкм на фотодиодах из полупроводникового соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ).*

PACS: 85.60.Bt

**Введение**

Первичная обработка тепловизионных изображений связана с неоднородностью характеристик ИК-детекторов МФПУ, порождающей геометрический шум в изображении. Для исправления неоднородности чувствительности и постоянной составляющей фотоотклика, как правило, используется известная формула двухточечной коррекции

$$P_{ij} = \frac{S_{ij} - b_{ij}}{k_{ij}}, \quad (1)$$

где  $S_{ij}$  — исходный сигнал, считанный с детектора;  
 $b_{ij}$  — постоянная составляющая детектора;  
 $k_{ij}$  — коэффициент чувствительности детектора;  
 $P_{ij}$  — выровненный отклик.

Метод двухточечной коррекции (1) требует выполнения двух контрольных измерений (калибро-