

## ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

## OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

---

---

УДК 537.312.5:621.383.52

### ТРЕХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК

*И. М. Раренко, Ю. Г. Добровольский<sup>1</sup>, М. П. Биксей*

Черновицкий национальный университет им. Ю.Федьковича  
58012, Черновцы, ул. Коцюбинского, 12, т. (0372) 584893

<sup>1</sup>Научно производственная фирма “Тензор”  
58013, г. Черновцы, ул. Красноармейская, 226, т/ф (0372) 575052  
e-mail: tenzor@chv.ukrpack.net

#### Аннотация

#### ТРЕХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК

*И. М. Раренко, Ю. Г. Добровольский, М. П. Биксей*

Предложена конструкция трехспектрального фотоприемника, состоящего из фотодиодов на основе фосфида галлия, кремния и германия, расположенных в столбик. Показано, что в максимуме спектральной характеристики, в составе фотоприемника, фотодиоды могут иметь чувствительность не менее 0,2 А/Вт, 0,33 А/Вт и 0,35 А/Вт соответственно.

**Ключевые слова.** Фотодиод, кремний, германий, фосфид галлия, оптическое излучение, конструкция, р-п переход, чувствительность.

#### Анотація

#### ТРЬОХСПЕКТРАЛЬНИЙ ФОТОПРИЙМАЧ

*І. М. Раренко, Ю. Г. Добровольський, М. П. Біксей*

Запропонована конструкція трьохспектрального фотоприймача, що складається з фотодіодів на основі фосфіду галію, кремнію і германію, розташованого в стовпчик. Показано, що в максимумі спектральної характеристики, у складі фотоприймача, фотодіоди можуть мати чутливість не менше 0,2 А/Вт, 0,33 А/Вт і 0,35 А/Вт відповідно.

**Ключові слова.** Фотодіод, кремній, германий, фосфід галію, оптичне випромінювання, конструкція, р-п перехід, чутливість.

## Abstract

## THREE-SPECTRAL PHOTO-RESAVED

I. M. Rarenko, Yu. G. Dobrovolskiy, M. P. Biksey

Construction of three-spectral photo-receiver, consisting of photodiode on the basis of phosphate of gallium, silicon and germanium, located in a column, is offered. It is shown that in the maximum of spectral characteristic in composition of photo-receiver, these photodiodes can have a sensitiveness no less than 0,2 A/W, 0,33 A/W and 0,35 A/W accordingly.

**Keywords.** Photodiode, silicon, germanium, phosphate of gallium, optical radiation, construction, p-n transition, sensitiveness.

## Введение

Одним из направлений развития оптоэлектронных систем является создание надежных устройств для оптической локации, дальнометрии и других задач, связанных с приемом и передачей оптического излучения. Для их разработки используются различные фотоприемники, в частности фоторезисторы, фотодиоды, фотоприемные устройства на их основе [1].

Целью предлагаемой работы является решение одной из актуальных задач оптоэлектроники — повышение помехоустойчивости и надежности работы оптоэлектронной аппаратуры в условиях затрудненности прохождения оптического сигнала путем оптимизации конструкции фотоприемника, входящего в состав такой аппаратуры.

Для решения этой задачи все более широкое применение находят фотоприемные устройства разбивающие сигнал по нескольким спектральным диапазонам. Такой подход предполагает наличие не менее двух фотоприемников на разные спектральные диапазоны, системы светоделительных зеркал, фильтров для коррекции чувствительности некоторых фотоприемников, “захватывающих чужой диапазон” [2-6].

Среди известных конструкций наиболее предпочтительной, на наш взгляд, является конструкция так называемой “сэндвич”-структуры, в которой датчики, чувствительные в различных спектральный диапазонах, расположены в столбик, один над другим, как это предложено например в [7]. При этом фотоприемник значительно упрощается, в связи с тем, что фоточувствительные датчики, расположенные сверху, могут выполнять функции фильтров по отношению к датчикам, расположенным ниже.

## Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим случай, когда необходимо получить фотоотклики в трех спектральных диапазонах. Получая подтверждение о локации объекта в трех спектральных диапазонах можно минимизировать ложные срабатывания при оптической локации объекта, повысить устойчивость прибора в целом к воздействию фоновой освещенности и, таким образом, повысить надежность всего оптоэлектронного прибора в целом. Для примера рассмотрим требования к конструкции фотоприемника, чувствительного в трех спектральных диапазонах с максимумами спектральной характеристики на длинах волн 400, 900, 1500 нм.

Как видно на рисунке 1, судя по кривым показателей поглощения [8-11], для этих целей подходят широко распространенные фотодиоды на основе фосфида галлия, кремния и германия. Типовые чувствительности таких фотодиодов серийного производства приведены на рисунке 2 [12].

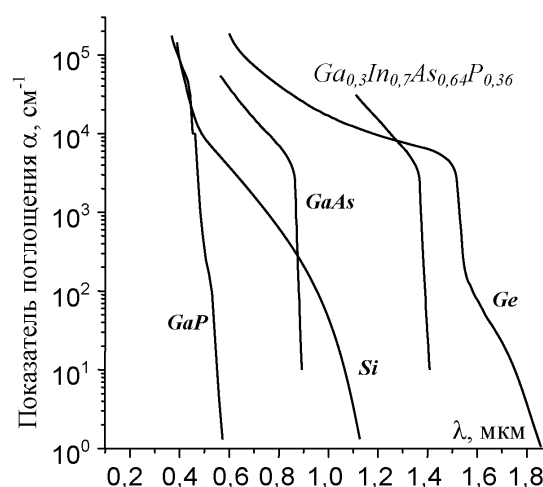


Рис. 1 Спектральные кривые показателей поглощения полупроводниковых материалов

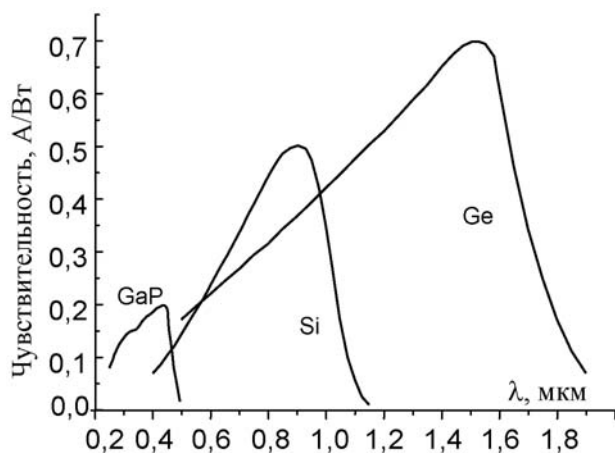


Рис. 2 Типовая спектральная чувствительность фоточувствительных элементов на основе GaP, Si, Ge

Рассмотрим, каким может быть спектральный фотоотклик фотоприемника, имеющего “сэндвич”-структуру, состоящую из трех фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе фосфида галлия (GaP), кремния (Si) и германия (Ge), схематическое изображение которого приведено на рисунке 3.

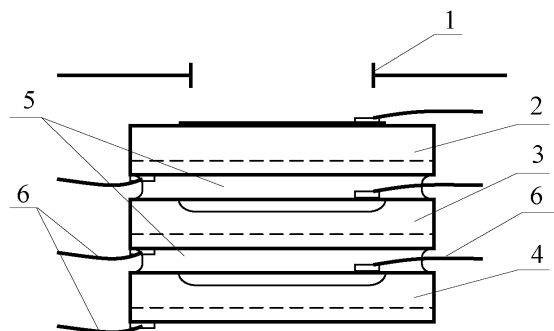


Рис. 3 Конструкция трехспектрального фотоприемника. 1 — диафрагма; 2 — ФЧЭ на основе GaP; 3 — ФЧЭ на основе Si; 4 — ФЧЭ на основе Ge; 5 — клей оптический; 6 — вывода ФЧЭ.

Поглощение оптического излучения в рабочем диапазоне фоточувствительным элементом на основе *GaP* осуществляется на глубине нескольких микрометров от фоточувствительной поверхности. Поэтому толщину пластины выбираем исходя из соображений механической прочности (типичная толщина пластин *GaP* промышленного изготовления около 0,3 мм).

Рассчитаем пропускание системы воздух (показатель поглощения  $n=1$ ) — плоскопараллельная пластина *GaP* (толщина 0,3 мм) — оптический клей (показатель поглощения  $n=1,5$ )  $T_{GaP}(\lambda)$ . Также рассчитаем отражение системы оптический клей ( $n=1,5$ ) — плоскопараллель-

ная пластина *GaP* (толщина 0,3 мм) — воздух  $R_{GaP}(\lambda)$ .

В фоточувствительном элементе на основе *Si* будем учитывать, что кривая поглощения излучения в рабочем диапазоне достаточно пологая (см. рис. 1), поэтому толщину пластины будем выбирать исходя из необходимости получения достаточной чувствительности на длине волны 0,8 мкм (возьмем 0,3 мм). Рассчитаем пропускание  $T_{Si}(\lambda)$  и отражение  $R_{Si}(\lambda)$  системы оптический клей ( $n=1,5$ ) — плоскопараллельная пластина *Si* (толщина 0,3 мм) — оптический клей ( $n=1,5$ ).

В фоточувствительном элементе на основе *Ge* рассчитаем пропускание  $T_{Ge}(\lambda)$  и отражение  $R_{Ge}(\lambda)$  системы оптический клей ( $n=1,5$ ) — плоскопараллельная пластина *Ge* (толщина 0,3 мм) — оптический клей ( $n=1,5$ ). Для расчета энергетического коэффициента отражения  $R$  границы раздела непоглощающая среда 1 — поглощающая среда 2 воспользуемся соотношениями [8]:

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_1)^2 + k_2^2}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  и  $k_2$  — соответственно показатели преломления и поглощения сред 1 и 2;

$$\alpha = \frac{4\pi k_2}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — соответственно длина волны проходящего излучения.

Пропускание плоскопараллельной пластины (система непоглощающая среда 1 — полупроводниковая пластина — непоглощающая среда 2) рассчитаем, воспользовавшись схемой, приведенной на рисунке 4:

$$T = (1 - R_{01})(1 - R_{02})e^{-\alpha d} + (1 - R_{01})(1 - R_{02})R_{01}R_{02}e^{-3\alpha d} + \dots = (1 - R_{01})(1 - R_{02}) \sum_{n=0}^{\infty} R_{01}^n R_{02}^n e^{-(2n+1)\alpha d}, \quad (3)$$

или, если параметры сред 1 и 2 одинаковы ( $R_{01} = R_{02}$ ) [12]

$$T = \frac{(1 - R_{01})^2 e^{-\alpha d}}{1 - R_{01}^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (4)$$

где  $d$  — толщина пластины,  $R_{01}, R_{02}$  — коэффициенты отражения только от измеряемых границ раздела (без учета задней стенки, рассчитываются по 1) соответственно среда 1 — пластина и пластина — среда 2;

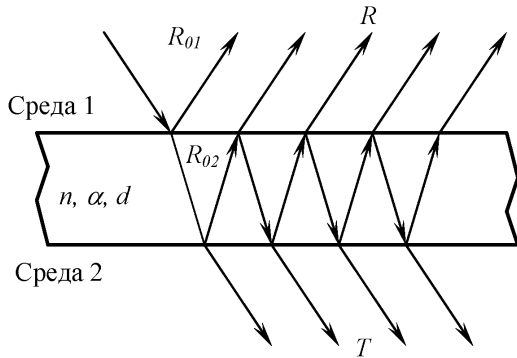


Рис. 4. Схема для расчета пропускания плоскопараллельной пластины.

Отражение плоскопараллельной пластины (система непоглощающая среда 1 — полупроводниковая пластина — непоглощающая среда 2) рассчитаем, воспользовавшись схемой, приведенной выше:

$$R = R_{01} + (1 - R_{01})^2 R_{02} e^{-2\alpha d} + (1 - R_{01})^2 R_{01} R_{02}^2 e^{-4\alpha d} + \dots = R_{01} + (1 - R_{01})^2 \sum_{n=1}^{\infty} R_{01}^{n-1} R_{02}^n e^{-2n\alpha d}, \quad (5)$$

или, если параметры сред 1 и 2 одинаковы ( $R_{01} = R_{02}$ ) [12]

$$R = \frac{R_{01} [1 - e^{-2\alpha d} (2R_{01} - 1)]}{1 - R_{01}^2 e^{-2\alpha d}}. \quad (6)$$

На рисунке 5 приведены спектральные характеристики пропускания  $T$  и отражения  $R$  для плоскопараллельных пластин фосфида галлия (толщина 0,3 мм), кремния (толщина 0,3 мм), германия (толщина 0,3 мм), рассчитанные в соответствии с приведенными выше условиями.

При расчете спектральной характеристики трехспектрального фотоприемника исходили из того, что спектральная характеристика ФЧЭ на основе  $GaP$  остается без изменения, спектральная характеристика ФЧЭ на основе  $Si$  получаем методом графического перемножения  $S_{Si}(\lambda) \cdot T_{GaP}(\lambda)$  — кривых спектральной чувствительности кремневого фотодиода (рис. 2) и спектральной характеристики пропускания пластины фосфида галлия (рис. 5). Спектральная характеристика ФЧЭ на основе  $Ge$  получаем методом графического перемножения  $S_{Ge}(\lambda) \cdot T_{GaP}(\lambda) \cdot T_{Si}(\lambda)$  — кривых спектральной чувствительности германиевого фотодиода (рис. 2) и спектральных характеристик пропускания пластин фосфида галлия и кремния (рис. 5).

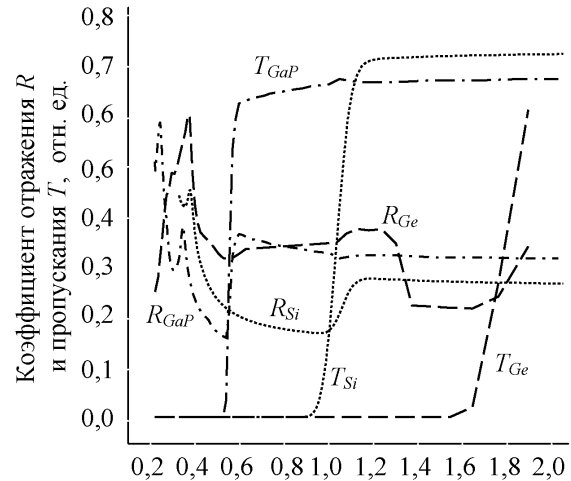


Рис. 5. Спектральные характеристики пропускания  $T$  и отражения  $R$  плоскопараллельных пластин  $GaP$ ,  $Si$ ,  $Ge$ .

Результат расчета приведен на рисунке 6.

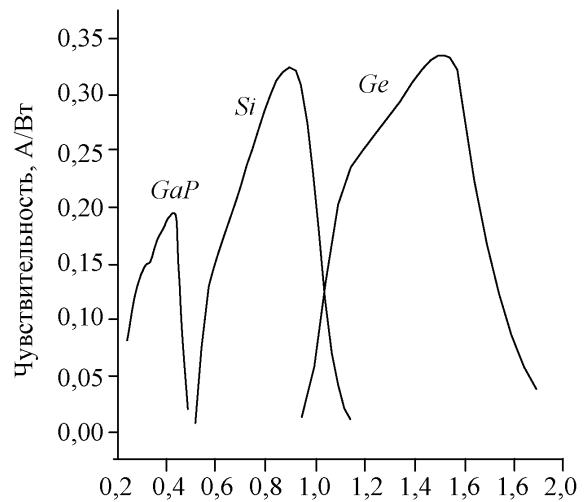


Рис. 6. Спектральная характеристика чувствительности трехспектрального фотоприемника на основе  $GaP$ ,  $Si$ ,  $Ge$

Как видно на рисунке 6 величина чувствительности фотодиодов (в максимуме спектральной характеристики), входящих в состав предлагаемого фотоприемника, должна быть не менее 0,2 А/Вт для фотодиода на основе фосфида галлия, не менее 0,33 А/Вт для фотодиода на основе кремния и 0,35 А/Вт для фотодиода на основе германия.

Необходимо отметить, что при расчетах не учитывалось отражение излучения внутри структуры трехспектрального фотоприемника от слоев полупроводниковых материалов (в рабочих спектральных диапазонах у системы фосфида галлия — коэффициент отраже-

ния достигает 30 %, у системы кремний — клей 17-27 %, у системы германий — клей 22-37 %). В первом приближении необходимо было бы брать:

$S_{Si}(\lambda) \cdot T_{GaP}(\lambda) \cdot (1 + R_{Si}(\lambda) \cdot R_{GaP}(\lambda))$  — для кремниевого элемента;

$S_{Ge}(\lambda) \cdot T_{GaP}(\lambda) \cdot (1 + R_{Si}(\lambda) \cdot R_{GaP}(\lambda)) \cdot T_{Si}(\lambda) \cdot (1 + R_{Ge}(\lambda) \cdot R_{Si}(\lambda))$  — для германиевого элемента.

Учет коэффициентов отражения мог бы дать прибавку до 10-15 % по чувствительности для кремниевого и германиевого элементов. Однако учитывая, что спектральные характеристики (рис. 1) были получены на элементах, имеющих просветление, а в случае склейки кристаллов эффект просветления пропадает, прибавка компенсируется уменьшением чувствительности исходных кристаллов вследствие пропадающего просветления кристаллов. Кроме того, необходимо отметить, что оптические параметры полупроводниковых материалов в разных литературных источниках отличаются приблизительно на такую же величину.

### Выводы

1. Проанализирована базовая конструкция фотоприемника для трехспектрального фотоприемного устройства на основе “сендвич”-структуры, состоящей из фотодиодов на основе фосфида галлия, кремния и германия.

2. Рассчитаны спектральные характеристики чувствительности каждого фотодиода в составе трехспектрального фотоприемника. Показано, что в максимуме спектральной характеристики фотодиоды на основе фосфида галлия, кремния и германия могут иметь чувствительность не менее 0,2 А/Вт, 0,33 А/Вт и 0,35 А/Вт соответственно.

3. Предложенная конструкция фотоприемника позволяет с помощью выбора соответствующих материалов получать фотоприемники с необходимым спектральным распределением каналов.

### Литература

1. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А., Курмашев Ш.Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
2. Агишев Р.Р. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. — М.: Машиностроение, 1994. — 128 с.
3. Nikolaos J. Florous, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Three-color photonic crystal demultiplexer based on ultralow-refractive-index metamaterial technology // Optics Letters — published by OSA. — 2005. — Issue 20. — pp. 2685-2810.
4. Л. К. Дийков, Ф. К. Медведев, Ю. Л. Шелехин, С. П. Варфоломеев, Н. П. Анисимова, В. Б. Кулагов. Электронно-оптические извещатели пламени. ИК приемники нового поколения // Электроника НТБ. — №6. — 2000. — с.26.
5. Гаврушко В.В., Раскин А.А., Лебедев А.С., Бондаренко Е.А., Сапожников А.А. Двухспектральный полупроводниковый фотоприемник ИК излучения — в диапазонах 3 — 5 и 8 — 14 мкм // Электронная техника. — Сер. 10. Микроэлектронные устройства. — вып. 3, 4 (93, 94). — 1992. — с.62.
6. Nikolaos J. Florous, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Three-color photonic crystal demultiplexer based on ultralow-refractive-index metamaterial technology // Optics Letters — published by OSA. — 2005. — Issue 20. — pp. 2685-2810.
7. Ю.Г. Добровольский, Е.В. Комаров, М.П. Биксей. Двухспектральный фотоприемник // ТКЭА. — 2005. — № 3. — с.18-22.
8. Оптические свойства полупроводников. Справочник. — К.: Наукова думка, 1987. — 608 с.
9. www.ioffe.ru.
10. www.vriginiasemi.com.
11. Melchior H. Demodulation and Photodetection Techniques, in Arecchi F. T., Schultz-Dubois E. O., Eds., Laser Handbook, Vol. 1, North-Holland, Amsterdam, 1972, pp. 725-835.
12. Лисица М. П. Спектрофотометрический метод исследования дисперсии и поглощения твердых веществ // ЖТФ. — 1954. — 24, №10. — С.1837-1850.