

УДК 621.383

## Исследование коэффициента фотоэлектрической связи ультрафиолетового матричного фотоприемного устройства

А. В. Лобачев, Н. А. Соломонова, В. К. Тресак, А. И. Шкетов, Ю. А. Фирсенкова

*Приведены результаты измерений величины фотоэлектрической связи от положения рабочей точки УФ матричного фотоприемного устройства (МФПУ). Для измерения величины фотоэлектрической связи ультрафиолетового МФПУ был использован «классический» метод. В результате проведенных исследований были получены зависимости коэффициента фотоэлектрической связи от величины управляющих напряжений.*

PACS: 42.79.Pw

*Ключевые слова:* ультрафиолетовое матричное фотоприемное устройство, рабочая точка, коэффициент фотоэлектрической связи.

### Введение

Современные инфракрасные и ультрафиолетовые матричные фотоприемные устройства (МФПУ) являются сложными техническими системами, включающими в себя матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ), выполненную на основе сложных полупроводниковых структур из материалов InSb, HgCdTe, InGaAs, AlGaN и др., большую интегральную схему (БИС) считывания, включающую в себя массив ячеек считывания и усиления, а также электронику мультиплексирования сигнала. При этом каждое фотоприемное устройство индивидуально настраивается путем регулировки ряда управляющих напряжений, совокупность которых называется «рабочей точкой». Выбор рабочей точки является результатом компромисса, поскольку увеличение или уменьшение управляющего напряжения неоднозначно влияет на параметры МФПУ. Например, при увеличении напряжения смещения на МФЧЭ возрастает чувствительность МФПУ, но вместе с тем увеличивается число дефектных элементов.

Помимо основных фотоэлектрических параметров (удельная обнаружительная способность,

вольтовая чувствительность, пороговый поток, число дефектных элементов) для МФПУ чрезвычайно важной является величина коэффициента фотоэлектрической связи, наличие которой приводит к падению модуляционной передаточной функции (МПФ) МФПУ и, как следствие, к падению качества оптико-электронной системы в целом. Наличие фотоэлектрической связи с коэффициентом, равным 7 %, приводит к падению модуляционной передаточной функции МФПУ на средних частотах примерно в 1,5 раза.

При установке рабочей точки в первую очередь решается задача получения максимальной удельной обнаружительной способности, минимального порогового потока и числа дефектных элементов, при этом коэффициент фотоэлектрической связи не рассматривается.

Целью данного исследования является определение соответствия оптимальных рабочих точек для основных фотоэлектрических параметров и для коэффициента фотоэлектрической связи ультрафиолетового матричного фотоприемного устройства на основе AlGaN формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, разработанного и изготовленного АО «НПО «Орион».

Лобачев Антон Васильевич, студент<sup>1</sup>.

Соломонова Наталья Алексеевна, студент<sup>1</sup>.

Тресак Виктория Константиновна, студент<sup>1</sup>.

Шкетов Алексей Иванович, главный специалист<sup>2</sup>.

Фирсенкова Юлия Андреевна, студент<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

<sup>2</sup>АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.

© Лобачев А. В., Соломонова Н. А., Тресак В. К., Шкетов А. И., Фирсенкова Ю. А., 2015

### Описание объекта исследования

Основными конструктивными элементами ультрафиолетового МФПУ являются МФЧЭ, БИС считывания, корпус и термоэлектрический охладитель (ТЭО).

Матричный фотоприемник (МФП) состоит из двух пластин: МФЧЭ и БИС считывания (рис. 1), состыкованных по технологии «flip-chip» при помощи индиевых (In) столбиков. МФП смонтирован на теплопоглощающей поверхности двухкаскадного ТЭО, который своей тепловыделяющей

поверхностью припаян к цоколю со стеклометаллическими гермовыводами.

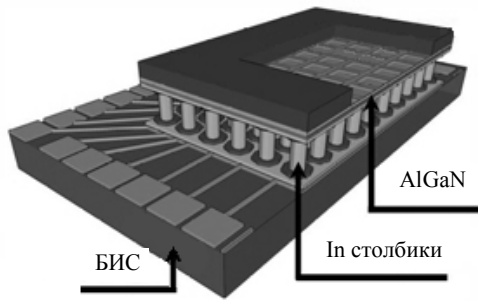


Рис. 1. Конструкция МФП

МФЧЭ выполнена на основе элементов из твердого раствора AlGaN. Такие растворы в зависимости от состава могут иметь ширину запрещенной зоны от 3,4 эВ (чистый GaN) до 6 эВ (чистый AlN). Соответственно, край поглощения и граница чувствительности с ростом содержания Al может изменяться от 207 нм до 363,5 нм. Таким образом, путем изменения в материале содержания Al и Ga можно получить фотоприемники на основе AlGaN как для «солнечно-слепого» (240—285 нм), так и для «видимо-слепого» (300—380 нм) УФ-диапазонов (см. рис. 2).



Рис. 2. Схематичное изображение структур, используемых для «видимо-слепых» (а) и «солнечно-слепых» (б) УФ-светодиодов

Исследуемое МФПУ, выполненное на основе AlGaN формата 320×256 элементов, является «видимо-слепым».

Структурная схема аналогового канала БИС представлена на рис. 3. С помощью напряжения VDET происходит выбор рабочей точки фотодиода. Входной каскад ячейки считывания состоит из каскадного усилителя, рабочую точку которого определяет напряжение VCAS, с накопительной емкостью в цепи обратной связи. После окончания фазы накопления происходит дальнейшая комму-

тация и усиление фотосигналов. Стоковый усилитель на основе p-канального МОП-транзистора обеспечивает передачу сигналов с выхода ячеек на емкости хранения столбцовых шин. Дальнейшее усиление производится с помощью столбцового трансимпедансного усилителя, смещение которого управляется напряжением VOS, а также двух последовательных буферов на основе дифференциальных усилителей с глубокой отрицательной обратной связью.

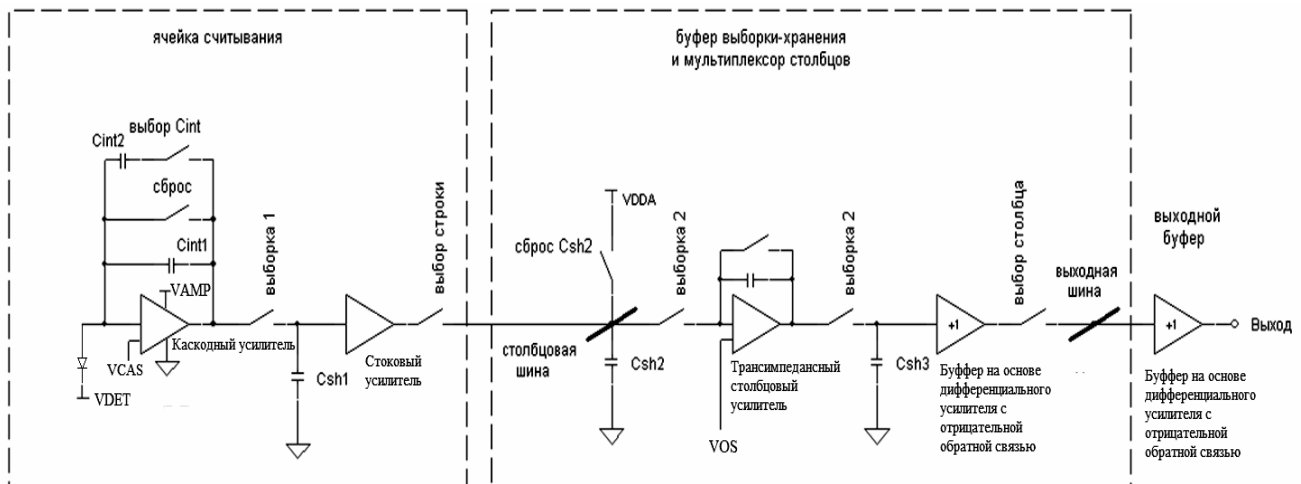


Рис. 3. Структурная схема аналогового канала БИС

Совокупность напряжений VDET, VCAS, VOS и образует рабочую точку ультрафиолетового МФПУ.

### Измерение величины коэффициента фотоэлектрической связи

Измерения фотоэлектрической связи можно проводить различными методами. Наиболее простой и распространенный «классический» метод измерения фотоэлектрической связи [1], применяемый в России и за рубежом, требует наличия оптического зонда со специальной проекционной оптической системой, способной обеспечить засветку единичного фоточувствительного элемента. Применение данного метода показало его эффективность в ближнем ИК-, видимом и УФ-диапазоне. Причем его эффективность в УФ-диапазоне наиболее высока, поскольку с уменьшением длины волны линейно уменьшается величина дифракционного пятна рассеяния.

Среди других методов стоит отметить метод экранирования соседних фоточувствительных площадок путем нанесения непрозрачной маски и метод сканирования многоэлементных фотоприемных устройств световым пятном размером, превышающим размер пикселя. Каждый из перечисленных методов имеет свои недостатки.

Основным недостатком метода экранирования является нанесение непрозрачной металлической маски на поверхность фоточувствительных элементов. Из-за того что маска наносится химическим способом, её удаление с поверхности практически неосуществимо, поэтому дальнейшее использование данного фотоприемного устройства невозможно, а полученные в результате исследований результаты позволяют оценить лишь уровень коэффициента фотоэлектрической связи, обеспечиваемый методом производства. Также при использовании данного метода наблюдается довольно сильная дифракция на отверстиях, которая приводит к засветке соседних элементов и, как следствие, к ошибкам измерений.

Основным недостатком метода сканирования многоэлементных фотоприемных устройств световым пятном размером, превышающим размер пикселя, является сложность его реализации, вызванная необходимостью применения прецизионных аттестованных оптико-механических компонентов и сложной математической обработкой первичных результатов измерений.

Для измерения величины фотоэлектрической связи ультрафиолетового МФПУ был, как уже сказано, использован «классический» метод [1]. Наиболее сложно обеспечиваемым метрологическим требованием при измерении фотоэлектрической связи является требование на величину зондирующего пятна в плоскости ФЧЭ, которое не

должно превышать шага ФЧЭ по уровню 90 % мощности падающего излучения [2]. Это требование связано с тем, что засветка большим пятном приведет к облучению не только нужного элемента ФЧЭ, но и соседних, т. е. к ошибке измерения. По этой причине чрезвычайно важной частью измерения является определение величины пятна оптического зонда. В качестве оптического зонда для измерения фотоэлектрической связи был использован объектив, описанный в [3].

### Определение размера пятна рассеяния оптического зонда

Схема установки, на которой проводились измерения, является классической для решения задач измерения пятна рассеяния [4, 5]. При регистрации использовалась USB-камера с 8-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Поскольку данной глубины оцифровки недостаточно для измерения пятна рассеяния [6], то была использована оригинальная методика обработки результатов измерения, позволяющая проводить оцифровку с большой разрядностью при использовании в качестве приемника изображения видеокамеры с 8-битным АЦП. Получение большой глубины оцифровки достигалось путем съемки серии кадров, со временем экспозиции кратным двум, и их последующей обработке по методике, близкой к методике, описанной в [7, 8]. Подобная обработка позволяет за счет съемки каждого последующего кадра увеличивать разрядность оцифровки на единицу.

Формула, по которой производится сложение сигналов в различных кадрах, приведена ниже:

$$sum_{i,j} = 2 \cdot sum_{i,j} + \begin{cases} \text{если } (50 < el_{i,j} < 250), \\ \text{то } \frac{(sum_{i,j} + el_{i,j})}{2}, \\ \text{иначе } 0. \end{cases}$$

где  $sum_{i,j}$  — элемент (пиксель  $i, j$ ) итогового кадра на момент обработки;  $el_{i,j}$  — элемент (пиксель  $i, j$ ) текущего обрабатываемого кадра.

Как видно из формулы, сложение производится только в диапазоне от 50 до 250 отсчетов АЦП, так как было экспериментально установлено, что в этом диапазоне у используемой камеры наблюдается хорошая линейность зависимости величины сигнала от падающего потока. Сложение проводилось по 7 кадрам, т. е. суммарный динамический диапазон измерений составил около 84 дБ. При таком динамическом диапазоне ошибка измерения концентрации энергии по заданному уровню не должна превышать 3 % [6].

Измерение пятна рассеяния проводилось для разного размера апертурной диафрагмы (13, 21 и 30 мм), результаты измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений пятна рассеяния

Диаметр диафрагмы, мм	Размер пятна, пикс.	Размер пятна, мкм
13 мм	10	24
21 мм	11	26,4
30 мм	23	55,2

Из полученных результатов видно, что для проведения измерений фотоэлектрической связи ультрафиолетового МФПУ с шагом 30 мкм необходимо уменьшение апертурной диафрагмы до 21 мм.

Схема установки для измерения фотоэлектрической связи приведена на рис. 4.

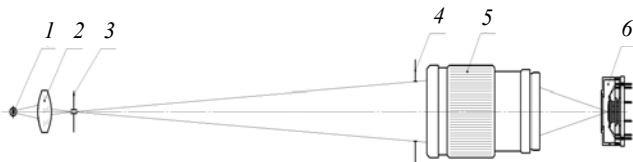


Рис. 4. Схема измерения фотоэлектрической связи УФ МФПУ: 1 — светодиод; 2 — конденсор; 3 — точечная диафрагма; 4 — апертурная диафрагма; 5 — оптический зонд; 6 — исследуемое МФПУ.

В качестве источника излучения использовался светодиод UVTOP355BL фирмы SETI, имеющий спектральный диапазон излучения 355—365 нм.

Светодиод освещал точечную диафрагму (3) диаметром 20 мкм.

Оптический зонд формировал в плоскости фоточувствительных элементов изображение точечной диафрагмы. Оптический зонд, используемый в установке, имеет следующие характеристики: фокусное расстояние  $f' = 70$  мм; относительное отверстие  $D/f' = 1:2.5$ ; спектральный диапазон  $\Delta\lambda = 270—400$  нм.

Используемое матричное фотоприемное устройство являлось «видимо-слепым» и имело спектральный диапазон работы  $\Delta\lambda = 295—370$  нм.

Для перемещения изображения диафрагмы с одного фоточувствительного элемента на другой производились малые перемещения источника излучения относительно объектива.

Считывание сигнала с матричного фотоприемного устройства осуществлялось с помощью специального блока электронной обработки производства ФГУП ОКТБ «Омега» и персонального компьютера.

Для определения уровня шумов, вызванных нестабильностью характеристик, было произведено пробное измерение без засветки. Программа вычитала один усредненный по 1000 измерений кадр без засветки из другого. Из результатов измерений стало ясно, что измерение сигнала в диапазоне  $\pm 10$  отсчетов АЦП является погрешностью измерений, вызванной нестабильностью параметров матрицы.

Результаты измерений величины фотоэлектрической связи от положения рабочей точки УФ МФПУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений величины фотоэлектрической связи

Напряжения, определявшие рабочую точку	Обозначение напряжения	Положение рабочей точки			
		По критерию максимальной удельной обнаружительной способности, при минимуме дефектных элементов		По критерию минимального коэффициента ФЭС	
		Значение напряжения, В	Суммарный коэффициент ФЭС по 4 площадкам, %	Значение напряжения, В	Суммарный коэффициент ФЭС по 4 площадкам, %
Напряжение смещения ФЧЭ	VDET	2,74	1	2,9	0,4
Напряжение смещения каскодного усилителя	VCAS	1,57	2,3	0,5	1,7
Напряжение смещения столбцового трансимпедансного усилителя	VOS	2,04	1,8	2	1,8
Суммарный коэффициент ФЭС по всем напряжениям, %		5,1		3,9	

## Заклучение

В результате проведенных исследований были получены зависимости коэффициента фотоэлектрической связи от величины управляющих напряжений. Исследования показали, что для УФ МФПУ оптимальные рабочие точки по критерию максимальной удельной обнаружительной способности, при минимуме дефектных элементов, и по критерию минимальной фотоэлектрической связи незначительно отличаются, причем суммарный коэффициент фотоэлектрической связи по первому критерию составляет 5,1 %, а по второму 3,9 %.

Однако ввиду малого отличия величин коэффициентов ФЭС в обоих случаях, а также принимаемая во внимание, что суммарная ошибка измерения составляет 0,6 %, можно считать, что для УФ МФПУ рабочие точки по обоим критериям совпадают с высокой точностью.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
- Демидов В. И., Залетаев Н. Б., Полесский А. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 11.
- Колесова А. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 63.
- Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987.
- Афанасьев В. А. Оптические измерения. — М.: Недра, 1968.
- Демидов В. И., Колесова А. А., Кононов М. Е. и др. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 66.
- Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. — СПб ГУ ИТМО. 2008.
- Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан // Научно-технический вестник. СПб ГУ ИТМО. 2009. № 2(60). С. 24.

## The dependence of the coefficient of pixel crosstalk for a ultraviolet FPA on the operating point

A. V. Lobachyov<sup>1</sup>, N. A. Solomonova<sup>1</sup>, V. C. Tresak<sup>1</sup>, A. I. Shketov<sup>2</sup>, and Yu. A. Firsenkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University  
5 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion0ir.ru

Received December 7, 2015

*The results of measurements of pixel crosstalk from the operating point of the UV FPA are presented. To measure the pixel crosstalk of the FPA, the "classic" method was used. The dependence of the pixel crosstalk on the value of the control voltages was obtained.*

PACS: 42.79.Pw

*Keywords:* ultraviolet photodetector, operating point, coefficient, pixel crosstalk.

## REFERENCES

- USSR GOST 17772-88 (1988).
- V. I. Demidov, N. B. Zaletaev, A. V. Polesskii, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 11 (2013).
- A. A. Kolesova, A. V. Polesskii, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 63 (2013).
- G. B. Kreopalova, N. L. Lazareva, and D. T. Puryaev, *Optical Measurements* (Mashinostroenie, Moscow, 1987) [in Russian].
- V. A. Afanas'ev, *Optical Measurements* (Nedra, Moscow, 1968) [in Russian].
- V. I. Demidov, A. A. Kolesova, M. E. Kononov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 66 (2015).
- V. K. Kirillovskii and Le Zui Tuan, *Optical Measurements. Part 6* (ITMO, SPb, 2008) [in Russian].
- V. K. Kirillovskii and Le Zui Tuan, *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik SPb GU ITMO*, No. 2(60), 24 (2009).

\* \* \*