

## Исследование фотоэлектрических характеристик матричных фотоприемных устройств ультрафиолетового диапазона спектра

П. И. Мольков, Д. Л. Балиев

*В данной работе исследованы фотоэлектрические характеристики матричных фотоприемных устройств видимо-слепого ультрафиолетового диапазона спектра. Измерена зависимость соотношения сигнал/шум от времени накопления и напряжения смещения на фотодиодах фотоприемного устройства, измерены вольт-амперные характеристики фотодиодов. Сделан вывод о преобладании шумов БИС считывания над шумами фоточувствительных элементов. По результатам исследования выяснено, что для получения наилучшего соотношения сигнал/шум необходимо использовать максимально возможные времена накопления и напряжение смещения. Используемый метод измерения вольт-амперных характеристик после стыковки с БИС считывания позволил измерить темновые токи отдельных фотодиодов. Их характерный уровень составил  $4 \times 10^{-15}$  А.*

*Ключевые слова:* ультрафиолетовое излучение, матричное фотоприемное устройство, соотношение сигнал/шум, вольт-амперная характеристика, темновой ток.

### Введение

Использование ультрафиолетовых (УФ) матричных фотоэлектронных модулей на основе  $p-i-n$ -фотодиодов, изготовленных в структурах AlGaIn, перспективно для решения ряда важных задач военного и гражданского назначения, например, таких как пеленгация ракет для предупреждения опасности ракетного нападения, обнаружение компонентов биологического и химического оружия, обнаружение очагов радиоактивного заражения, экологический мониторинг атмосферы, контроль горения в реактивных двигателях, мониторинг возгораний и пожаров, УФ-астрономия и медицина, неразрушающий контроль деталей машин и механизмов и многое др. [1].

Ультрафиолетовое излучение – это электромагнитное излучение с длинами волн от 10 до 380 нм. Принято выделять две группы фотоприемников. Это видимо-слепые (чувствительные к излучению с длинами волн  $\lambda \leq 380$  нм) и солнечно-

слепые (чувствительные к излучению с длинами волн  $240 \leq \lambda \leq 285$  нм).

В идеале, для ближней УФ-области спектра предпочтительным является условие, когда ширина запрещенной зоны фоточувствительного полупроводникового материала составляет более 3,2–6,2 эВ, как это и наблюдается в тройных соединениях AlGaIn. Для создания эффективных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) ближней УФ-области спектра в настоящий момент наиболее перспективным направлением развития считается применение широкозонных полупроводников группы нитридов, таких как AlN и GaN [2].

Материал AlGaIn обеспечивает чувствительность УФ ФПУ в трех основных ультрафиолетовых спектральных областях. Приборы, основанные на нитридных соединениях, привлекательны благодаря высоким напряжениям пробоя и высокими скоростями носителей заряда, что способствует быстрому преобразованию оптического сигнала в электрический [3]. При этом тройные соединения AlGaIn на основе нитридов имеют малое рассогласование постоянных решеток, что делает возможным применение гетероструктур, давая тем самым широкий простор для дизайна конструкций прибора [4]. В качестве материала подложки обычно применяется сапфир, прозрачный в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Это делает возможным ввод излучения через подложку [5].

В АО «НПО «Орион» было разработано матричное фотоприемное устройство на основе гетероструктур AlGaIn/GaN формата 320×256 для

Мольков Павел Иванович<sup>1,2</sup>, инженер НТК, студент.

Балиев Дмитрий Леонидович<sup>1,2</sup>, инженер НТК, аспирант.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2017 г.

ультрафиолетового диапазона спектра с шагом 30 мкм [6]. Для считывания сигнала с матриц ФЧЭ на основе AlGaN использовалась кремниевая БИС считывания с входной ячейкой, выполненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА). Применение данного типа входной ячейки обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума  $p-i-n$ -фотодиодов из AlGaN [6].

В качестве структур фоточувствительных элементов для ФПУ на основе твердых растворов  $Al_xGa_{1-x}N$  были разработаны  $p-i-n$ -структуры [7], которые позволяют реализовывать наибольшие значения обнаружительной способности и вольтовой чувствительности.

Целью данной работы являлось комплексное исследование видимо-слепого ФПУ УФ-диапазона.

### Постановка эксперимента

Относительная спектральная характеристика видимо-слепого ФПУ приведена на рис. 1.

Рис. 1. Относительная спектральная характеристика исследуемого образца видимо-слепого диапазона спектра. По оси X – длина волны, нм. По оси Y – чувствительность S, отн. ед.

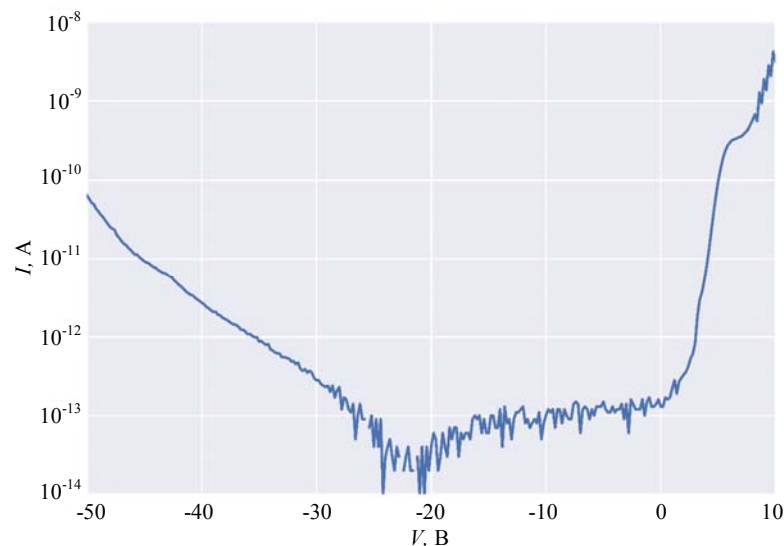
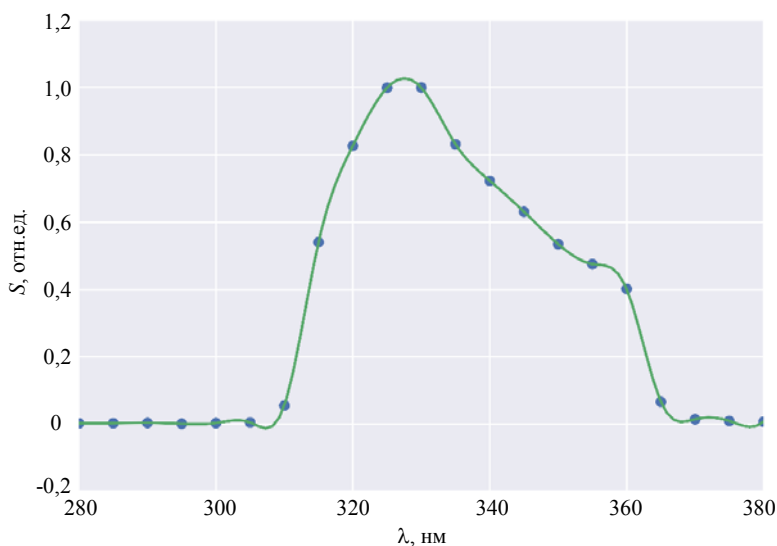


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика, измеренная на пластине материала. По оси X – напряжение смещения V, В. По оси Y – ток I, А.

В работе были исследованы зависимости отношение сигнал/шум от таких параметров, как время накопления и напряжение смещения. Важно отметить, что напряжение смещения подается через интегральную схему считывания, а не напрямую на фотодиод. В результате часть напряжения падает на транзисторах БИС. Одновременно в работе были проведены измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Исследования, ранее проводившиеся в АО «НПО «Орион» на этапе проверки вольт-амперных характеристик пластин материала, показали, что характерный уровень темнового тока структуры составляет  $10^{-13}$  А. Это отражено на графике рис. 2. Как можно видеть из этого графика, значения, меньшие  $10^{-13}$  А, имеют большой шумовой разброс, что говорит о возможном достижении предела точности измерений. Другими словами, получение реальных значений ВАХ в диапазоне от -25 В до 0 В было ограничено измерительными возможностями прибора.

Необходимо отметить, что после изготовления пластина стыкуется с кремниевой БИС считывания. Поэтому далее измеряемые ВАХ и типичные значения темнового тока могут отличаться от того, что было измерено ранее.

### Исследование зависимости соотношения сигнал/шум от времени накопления

ФПУ освещался светодиодным источником с длиной волны  $\lambda = 335$  нм. Были проведены из-

мерения среднего значения сигнала, шума и соотношения сигнал/шум в диапазоне времен накопления 1÷30 мс. Результаты представлены на рис. 3. Значения шума не зависели от времени накопления, а сигнал возрастал до полного заполнения накопительных емкостей. Таким образом, соотношение сигнал/шум возрастало с увеличением времени накопления. Это позволяет сделать вывод, что основная составляющая шума обусловлена шумами БИС считывания и от темновых токов фотодиода фактически не зависит.

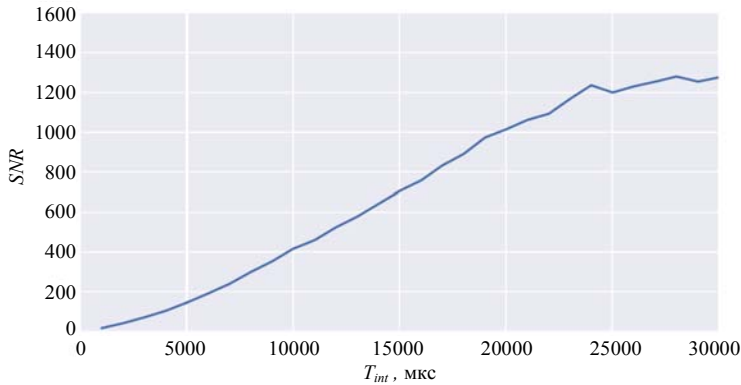


Рис. 3. Зависимость соотношения сигнал/шум от времени накопления. По оси X – время накопления  $T_{int}$ , мкс. По оси Y – соотношение сигнал/шум SNR.

### Исследование вольт-амперных характеристик

Для снятия ВАХ был использован метод аддитивного измерения тока [8]. Здесь для получения тока фотодиода необходимо измерить напряжение на накопительной емкости при двух различных временах накопления и затем вычислить ток фотодиода по формуле:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{C\Delta U}{\Delta t} \quad (1)$$

где  $I$  – полный ток фотодиода,  $\Delta t$  – разница времен накопления,  $C$  – размер накопительной емкости,  $\Delta U$  – разница выходного напряжения при разных временах накопления.

При измерении аддитивным методом при каждом напряжении смещения  $V$  измеряется

напряжение сигнала  $U$  при времени накопления  $t$ , а вблизи рабочей точки  $V_{раб}$  снимаются напряжения сигнала  $U_1$  и  $U_2$  при двух временах накопления  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 = t$ ). Далее по формуле (1) рассчитывается ток  $I_{раб}$  при напряжении смещения  $V_{раб}$ , где  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $\Delta U = U_2 - U_1$ . В конечном итоге, для каждого значения напряжения смещения  $V$  ток рассчитывается аддитивно к  $I_{раб}$ :

$$I(V) = I_{раб} + \frac{CU}{t} - \frac{CU_2}{t}$$

Результат измерения вольт-амперной характеристики одного из фотодиодов представлен на рис. 4. Характерный темновой ток составил порядка  $4 \times 10^{-15}$  А, что на два порядка меньше характерного темнового тока, измеренного на пластинах исходного материала.

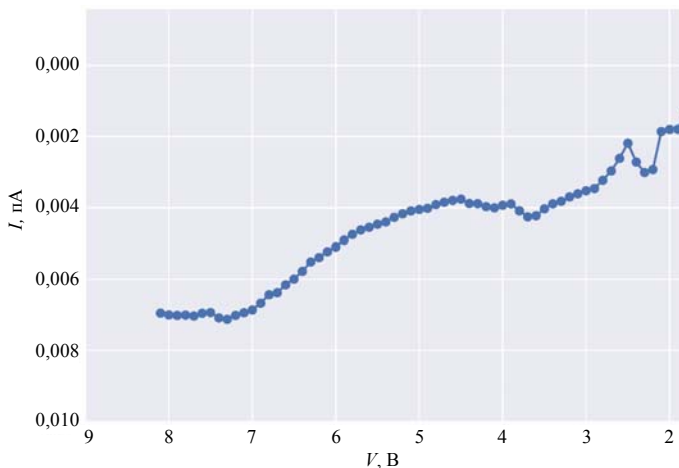


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика фотодиода, измеренная после стыковки с БИС считывания. По оси X – напряжение смещения  $V$ , В. По оси Y – ток  $I$ , нА.

### Исследование зависимости соотношения сигнал/шум от напряжения смещения

Одним из преимуществ низких темновых токов является возможность подавать на фотодиоды высокое напряжение смещения. По результатам измерений (см. рис. 5, а) зависимости среднего значения сигнала, шума и соотношения сигнал/шум от напряжения смещения в диапазоне 2,8÷8,1 В можно заключить, что среднее значения шума фотодиодов не зависело от напряжения смещения, а сигнал возрастал при увеличении напряжения смещения. Таким образом, соотношение сигнал/шум возрастало с увеличением напряжения смещения.

Границу возрастания соотношения сигнал/шум в данном исследовании установить не удалось, т. к. используемые БИС считывания не рассчитаны на подачу напряжения смещения выше 8 В. Несмотря на то, что максимальное соотношение сигнал/шум достигается при высоком напряжении смещения, необходимо учитывать увеличение количества дефектных фотодиодов, обладающих плохой вольт-амперной характеристикой, с увеличением напряжения смещения. На рис. 5, б представлена зависимость количества дефектных фотодиодов от напряжения смещения. Дефектность определялась по значению соотношения сигнал/шум по отношению к среднему значению по матрице.

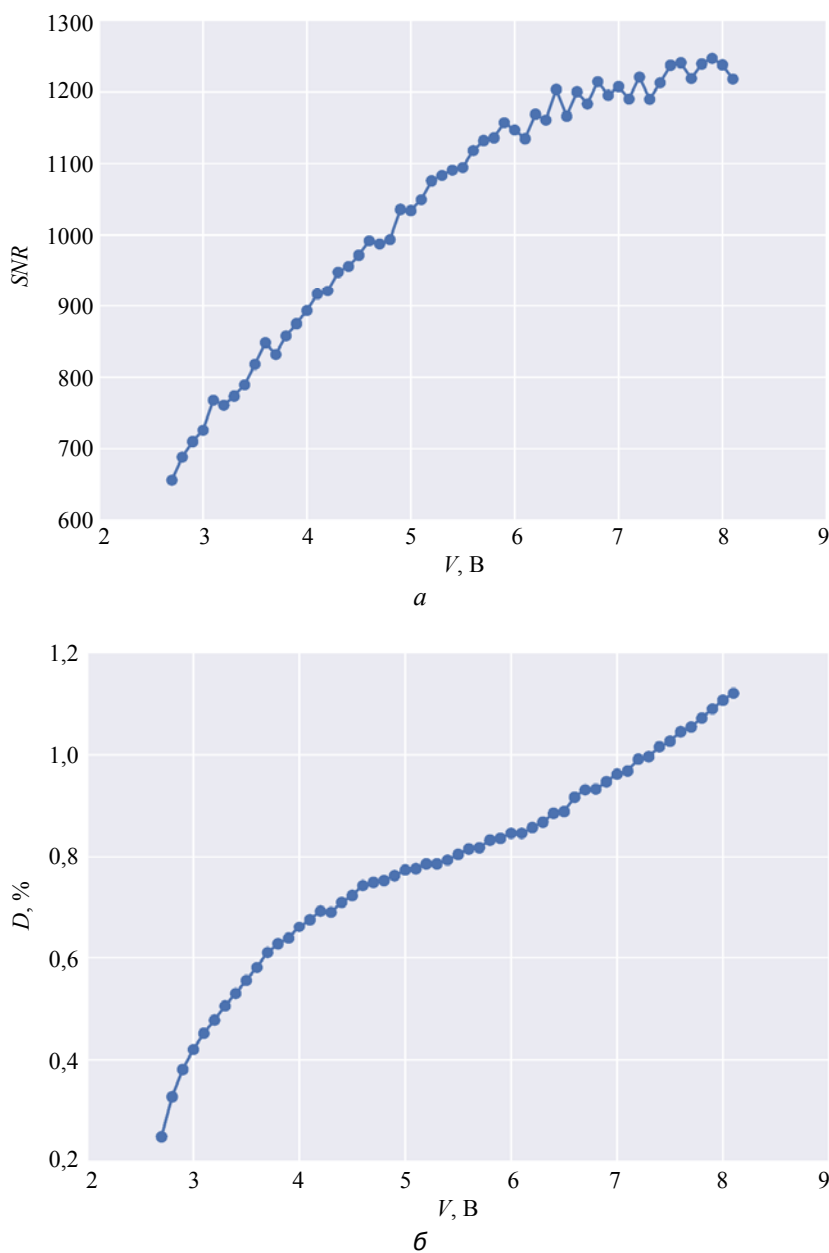


Рис. 5. Экспериментальные результаты исследования ФПУ: а – зависимость соотношения сигнал/шум от напряжения смещения V; б – зависимость относительного количества D дефектных фотодиодов от напряжения смещения V.

### Заключение

В работе проведены исследования соотношения сигнал/шум в матричном фотоприемном устройстве видимо-слепого диапазона спектра производства АО «НПО «Орион» от времени накопления и напряжения смещения. Измерения показали, что среднее значение шума фотодиодов постоянно при изменении времени накопления в пределах от 1 до 30 мс и при варьировании напряжения смещения в пределах от 2,8 до 8,1 В (без учета падения на транзисторах БИС). Сделан вывод о преобладании шума БИС считывания над шумами фоточувствительных элементов. Построенная зависимость сигнал/шум от времени накопления в диапазоне от 1 до 30 мс показала, что для достижения наибольшего соотношения сигнал/шум необходимо работать при максимально возможном времени накопления.

Из измеренной вольт-амперной характеристики можно сделать вывод, что характерный темновой ток составил  $4 \times 10^{-15}$  А. При этом измеренный темновой ток фотодиода после стыковки с БИС считывания ниже, чем ток, измеренный на пластинах исходного материала (порядка  $1 \times 10^{-13}$  А). Данное расхождение, предположительно, связано с инструментальными пределами возможностей измерения ВАХ на пластинах.

Построенные зависимости соотношений сигнал/шум и количества неработоспособных эле-

ментов от напряжения смещения фотодиодов показали, что наилучшее отношение сигнал/шум достигается при максимальном напряжении смещения, однако при этом и количество дефектных (по соотношению сигнал/шум) фотодиодов возрастает. Таким образом, напряжение смещения должно подбираться компромиссно, т. е. с учетом требований по дефектности в решаемых задачах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Сало В. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 623.
2. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Сало В. В., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
3. Cohen T., Zhu L., Liu M. et al. // IEEE APES Austin. 2005. P. 311
4. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Кравченко Н. В., Седнев М. В., Никонов А. В., Трищенко М. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 61.
5. Болтарь К. О., Таубкин И. И., Седнев М. В., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Смирнов Д. В., Мармалюк А. А., Мазалов А. В., Сабитов Д. Р., Курешов В. А., Падалица А. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 71.
6. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Седнев М. В., Кравченко Н. В., Смирнов Д. В., Иродов Н. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
7. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Седнев М. В., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 200.
8. Балиев Д. Л., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 71.

PACS: 85.60.-q

## Investigation of photoelectric characteristics in focal plane arrays designed for the ultraviolet spectral range

*P. I. Molkov<sup>1,2</sup> and D. L. Baliev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received November 28, 2017

*This paper presents the investigation results of the photoelectric characteristics in the focal plane arrays for the ‘visual-blind’ ultraviolet spectral range. The dependencies such as the signal-to-noise ratio (SNR) on the integration time, SNR on the bias voltage on photodiodes, current-voltage characteristics of the photodiodes are measured. It is possible to say that noise of the ROIC dominate over the noise of photosensitive elements. According to the investigation, it is necessary to use the maximum integration time and bias voltage in order to reach the best SNR. The method used to measure the current-voltage*

*characteristics after hybridization with ROIC has allowed us to measure the dark currents of the individual photodiodes. The typical value was  $4 \times 10^{-15}$  A.*

*Keywords:* ultraviolet radiation, focal plane arrays, signal-to-noise ratio, current-voltage characteristic, dark current.

#### REFERENCES

1. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and V. V. Salo, Usp. Prikl. Fiz. **2** (6), 623 (2014).
2. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, V. V. Salo, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 6, 54 (2013).
3. T. Cohen, L. Zhu, M. Liu, et al., IEEE APEC Austin., 311 (2005).
4. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, N. V. Kravchenko, M. V. Sednev, A. V. Nikonov, and M. A. Trishenkov, Prikl. Fiz., No. 6, 61 (2013).
5. K. O. Boltar, I. I. Taubkin, M. V. Sednev, et al., Prikl. Fiz., No. 6, 71 (2013).
6. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, et al. Usp. Prikl. Fiz. **1** (3), 344 (2013).
7. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, M. V. Sednev, and N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **1** (2), 200 (2013).
8. D. L. Baliev and K. O. Boltar, Prikl. Fiz., No. 2, 71 (2016).