

УДК 681.2:621.383

## Автоматизированная установка для исследования относительной спектральной характеристики матричного фотоприемного устройства ультрафиолетового диапазона спектра

А. Д. Деомидов, М. Е. Кононов, А. В. Полесский, Н. А. Семенченко, К. А. Хамидуллин,  
С. В. Добрунов

*Приведены результаты разработки установки исследования спектральной характеристики ультрафиолетового матричного фотоприемного устройства в диапазоне спектра 190—540 нм. Описан основной функционал установки и рассмотрен вопрос методики измерения.*

PACS: 06.90.+v

**Ключевые слова:** относительная спектральная характеристика, ультрафиолетовый диапазон спектра, матричное фотоприемное устройство, измерение спектральной характеристики.

### Введение

Спектральная характеристика чувствительности фотоприемного устройства (ФПУ) является одной из самых важных его характеристик, определяющей возможность работы всей оптико-электронной системы (ОЭС). Информация о спектральной характеристике чувствительности является ключевой при расчете отношения сигнал/шум, вероятности обнаружения и других параметров ОЭС.

Известно, что спектральная характеристика фоточувствительного материала зависит от температуры, давления, состояния электрического и магнитного полей [1], а также от величины и знака приложенного напряжения [2].

В ОАО «НПО «Орион» была поставлена задача создания специального оборудования для контроля относительной спектральной характеристики впервые разработанного в России матричного ФПУ на основе гетероструктур AlGaIn/GaN для ультрафиолетового диапазона спектра с размером фоточувствительного элемента 20 мкм, шагом 30 мкм, формата 320×256 [3].

Деомидов Александр Дмитриевич, инженер<sup>1</sup>, студент<sup>2</sup>.

Кононов Михаил Евгеньевич, инженер<sup>1</sup>, студент<sup>2</sup>.

Полесский Алексей Викторович, главный метролог<sup>1</sup>.

Семенченко Наталья Александровна, техник<sup>1</sup>, студентка<sup>3</sup>.

Хамидуллин Камиль Алиевич, начальник отдела<sup>1</sup>.

Добрунов Сергей Владимирович, главный специалист<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14.

<sup>3</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана.

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

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2014 г.

© Деомидов А. Д., Кононов М. Е., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Хамидуллин К. А., Добрунов С. В., 2014

Преимуществом ФПУ на основе гетероструктур AlGaIn/GaN перед ФПУ на основе кремния является возможность получить ОЭС нечувствительную в видимом и инфракрасном диапазоне, либо даже к излучению Солнца, причем без использования фильтров. Данное применение требует обязательного контроля спектральной характеристики ФПУ [4].

Стоит отметить, что спектральная характеристика фоточувствительных элементов на основе тройного соединения AlGaIn/GaN зависит от состава материала. Состав материала на пластине, на которой происходит травление матрицы фоточувствительных элементов, может быть неоднородным по поверхности [5]. В связи с этим разрабатываемая установка должна была давать возможность проводить измерения любого фоточувствительного элемента ФПУ.

Целью данной статьи является описание результатов разработки автоматизированной установки исследования спектральной характеристики ультрафиолетового матричного фотоприемного устройства в диапазоне спектра 190—540 нм [6], а также всестороннего исследования влияния различных факторов на процесс измерения относительной спектральной характеристики ФПУ.

### Методика измерения

Методы измерения относительной спектральной характеристики чувствительности, согласно отечественным [7] и зарубежным стандартам [8], по идеологической составляющей чрезвычайно близки и реализуют относительную методику измерения.

Согласно отечественной нормативной документации, в схему измерения должны входить следующие элементы: источник излучения, моду-

лятор, монохроматор, контрольное ФПУ, усиленные устройства контрольного и измеряемого ФПУ и регистрирующие приборы.

Конструкция измерительной установки должна исключать влияние рассеянного излучения и посторонних источников излучения на результаты измерений. Влияние оптических элементов (зеркала, линзы, объективы) не должно учитываться, если они изменяют коэффициент использования излучения за счет изменения его спектрального состава не более чем на 2 %.

При проведении измерений относительной спектральной характеристики необходимо поочередно регистрировать сигналы с контрольного и испытуемого ФПУ во всем спектральном диапазоне с количеством шагов не менее 20, а в области максимума спектральной чувствительности — не менее 5.

Основной задачей установки является измерение относительной спектральной характеристики матричного ФПУ УФ диапазона, совмещенного с интегральной схемой считывания и предварительной обработки сигнала [9]. Специфика работы матричного ФПУ с интегральной схемой считывания заключается в том, что на выход подается поток информации с большого количества фоточувствительных элементов, в то время как величина пятна облучения на выходе монохроматора занимает только небольшую область матрицы фоточувствительных элементов, вследствие чего, полезный сигнал облученных элементов вносит лишь небольшую добавку в общий сигнал, передаваемый по выходным каналам.

В связи с наличием интегральной схемы считывания к исследуемому типу матричного ФПУ схема, приведенная в нормативной документации, напрямую не применима. Поэтому в схему измерения был внесен ряд корректировок, не затрагивающих ее метрологических особенностей и характеристик.

Во-первых, вместо усилительного устройства использовался специализированный блок электронной обработки, задачей которого являлось выделение полезного сигнала с облученных элементов матричного ФПУ и сохранение его величины в течение времени кадра, т. е. имитации работы матричного ФПУ в качестве одноэлементного.

Во-вторых, из схемы измерения был исключен модулятор, поскольку контрольное и измеряемые ФПУ уже имеют внутреннюю модуляцию. Вопрос устранения паразитной фоновой засветки решался путем вычитания уровня темнового сигнала, измеренного при закрытой внутренней заслонке монохроматора.

В схеме установки был использован монохроматор, имеющий возможность быстрого переключения между двумя каналами при помощи поворотного зеркала. Для предотвращения систематической погрешности ввиду достаточно высокой селективности отражения материалов зеркал в УФ диапазоне [10] в алгоритм расчета была внесена поправка, учитывающая спектральный коэффициент отражения зеркала.

На основании вышеизложенного была разработана структурная схема (рис. 1), которая легла в основу установки измерения спектральной чувствительности.



Рис. 1. Структурная схема установки измерения спектральной характеристики: КИ — контрольный источник; ИИ — источник излучения; ПК — персональный компьютер; ПО — программное обеспечение; ОП — опорный приемник; L-Card — плата ввода; БП — блок питания; МФПУ — измеряемый приемник; БЭО — блок электронной обработки

Вычисление относительной спектральной характеристики матричного ФПУ при проведении измерений осуществляется по формулам (1) и (2):

$$S_{\text{измер}}(\lambda) = \frac{S_{\text{отн\_опорн}}(\lambda)}{\rho(\lambda)} \cdot \frac{N_{\text{измер}}}{N_{\text{опорн}}} \quad (1)$$

$$S_{\text{отн\_измер}}(\lambda) = \frac{S_{\text{измер}}(\lambda)}{S_{\text{измер\_max}}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{измер}}$  — сигнал с измеряемого ФПУ;

$N_{\text{опорн}}$  — сигнал с контрольного ФПУ;

$\rho(\lambda)$  — спектральный коэффициент отражения зеркала;

$S_{\text{отн\_опорн}}(\lambda)$  — спектральная характеристика опорного ФПУ;

$S_{\text{измер}}(\lambda)$  — спектральная характеристика измеряемого ФПУ до приведения;

$S_{отн\_измер}(\lambda)$  — относительная спектральная характеристика измеряемого ФПУ;

$S_{измер\_max}$  — максимальное значение спектральной характеристики измеряемого ФПУ.

### Описание стенда

Внешний вид установки приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид установки измерения спектральной характеристики

В качестве источника излучения в разработанном стенде используется дейтериевая лампа Stellar-SL3 с излучением в диапазоне спектра 180—600 нм, мощностью 30 Вт, с оптоволоконным выходом. Использование оптоволоконного выхода обусловлено необходимостью защиты оператора от воздействия излучения.

Основным узлом стенда является двухканальный монохроматор/спектрограф SolarLS M266, обеспечивающий разделение светового потока в диапазоне спектра 190—540 нм с помощью дифракционной решетки.

В состав монохроматора входит опорный приемник излучения фирмы Hamamatsu, представляющий собой линейное ФПУ формата 1×1024 элементов на основе кремния. Диапазон регистрации опорного фотоприемника 190—1100 нм. Его спектральная характеристика откалибрована в ФБУ «Ростест».

Блок электронной обработки содержит программируемую логическую интегральную схему и отвечает за формирование тактовой диаграммы, подачу напряжения смещения на ФПУ и съем сигнала с единичного фоточувствительного элемента.

Сигнал с блока электронной обработки поступает на плату сбора данных L-Card L-783, работающую в составе персонального компьютера.

Процесс измерения спектральной характеристики чувствительности является довольно тру-

доемким, поэтому необходима высокая степень автоматизации установки, которая позволит сократить трудозатраты, уменьшить требования к квалификации персонала, а также увеличить точность измерений за счет исключения ошибки оператора.

Автоматизация была достигнута за счет управления почти всеми процедурами во время измерения персональным компьютером с помощью специализированной программы. Программным способом осуществляется:

- управление поворотом решеток;
- управление заслонкой;
- смена фильтров разделения порядка дифракции;
- изменение размера входных и выходных щелей;
- изменение параметров контрольного ФПУ;
- изменение параметров измеряемого ФПУ;
- переключение потока излучения между каналами;
- съем сигнала с контрольного и измеряемого ФПУ.

Программное обеспечение также осуществляет обработку данных, формирование протокола измерений и его сохранение в различных форматах. Данные сохраняются не только в виде графика и набора параметров (максимум спектральной чувствительности, границы спектральной чувствительности), но в виде массива чисел, что позволяет использовать данные для расчета различных параметров в других программах. Также в отчете присутствуют исходные данные с контрольного и измеряемого ФПУ.

Внешний вид программного обеспечения приведен на рис. 3.

Установка также позволяет проводить серии измерений. Оператор может задавать количество измерений и их параметры. Дальнейшая работа установки, которая при большом количестве измерений может продолжаться несколько часов, не требует участия оператора.

По окончании серии измерений программа может выдавать не только результаты единичных измерений, но и общий отчет, с расчетом средних значений.

Возможно проведение измерений спектральной характеристики ФПУ при различных уровнях облученности, времени накопления, температуры, и т. д., для любого фоточувствительного элемента.

Установка позволяет проводить как грубые измерения с большим шагом по длине волны, так и точные, с шагом 1 нм, для более точного иссле-

дования вида спектральной характеристики чувствительности, поиска выбросов и впадин на графике спектральной характеристики.

Как видно, ФПУ имеет спектральный диапазон чувствительности 300—370 нм, что позволяет отнести его к «видимо-слепым» УФ ФПУ.

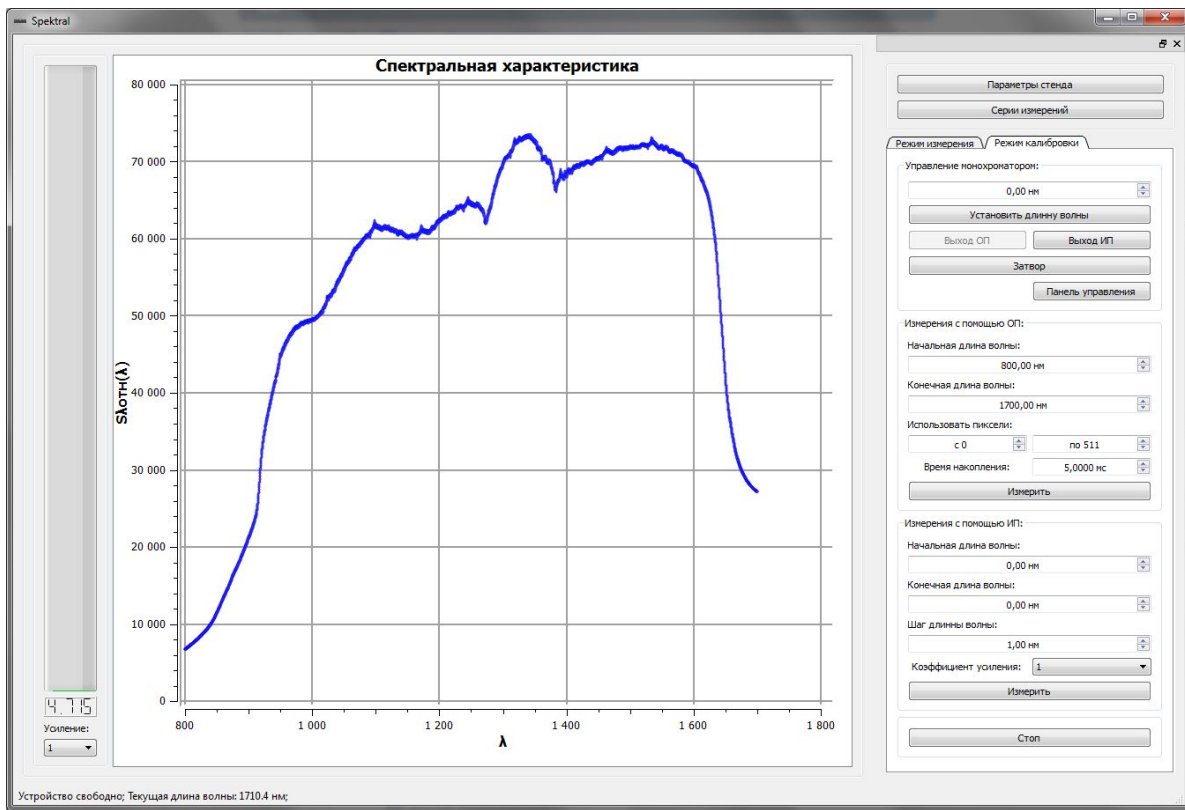


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения

### Результаты измерений

На установке был проведен ряд измерений матричного ФПУ на основе гетероструктур AlGaIn/GaN. Типовые результаты измерения приведены на рис. 4.

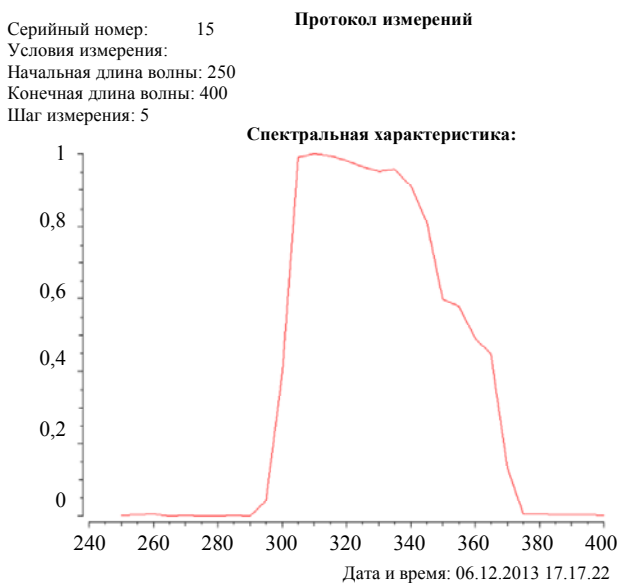


Рис. 4. Относительная спектральная характеристика матричного ФПУ на основе гетероструктур AlGaIn/GaN

### Исследование метрологических характеристик стенда

Исследование достоверности измерений, проводимых с помощью стенда, проводилось по двум основным критериям: верификация и повторяемость.

Верификация была подтверждена путем сравнения результатов параллельных измерений одного и того же матричного ФПУ. В результате относительная спектральная характеристика, измеренная на установке, с высокой степенью соответствия сертификату калибровки, выданному в ФБУ «Ростест-Москва».

Повторяемость результатов проверялась путем многократного измерения матричного ФПУ. В результате исследования было установлено, что повторяемость составляет порядка 2 % в случае, если измерение проводится спустя полчаса после включения дейтериевой лампы.

### Выводы

Разработаны методика и оборудование, проведены исследования относительной спектральной характеристики современных матричных ФПУ.

Установка позволяет проводить измерения относительной спектральной характеристики различных ФПУ в спектральном диапазоне 190—540 нм. Установка является автоматизированной, управляется программным обеспечением с персонального компьютера и имеет расширенный функционал, что дает возможность сократить трудозатраты, уменьшить требования к квалификации персонала, а также увеличить точность измерений за счет исключения ошибки оператора. Устройство позволяет проводить измерение любого фоточувствительного элемента.

Специализированное программное обеспечение управляет монохроматором, контрольным и измеряемым ФПУ, осуществляет обработку информации и формирование отчета, позволяет задавать необходимую точность измерений, а также проводить серии замеров с требуемыми параметрами.

В работе используется методика измерений, соответствующая нормативной документации, однако, в схему измерения был внесен ряд корректировок, обусловленных наличием в ФПУ интегральной схемы считывания. Внесенные поправки не затрагивают метрологических особенностей и характеристик схемы измерения.

Совместно с ФБУ «Ростест-Москва» было проведено исследование метрологических харак-

теристик стенда, которое показало высокую достоверность измерений, проводимых на нем.

#### Литература

1. Дмитриев Е. // Фотоника. 2007. № 2. С. 24.
2. Суляков Ю. В., Кормильцев И. В. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 95.
3. Болтарь К. О., Бураков И. Д., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
4. *Hadis Morkoc*. Handbook of Nitride Semiconductor and Devices Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
5. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физмат-книга, 2011.
6. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Кравченко Н. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 61.
7. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
8. Photovoltaic devices — Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998).
9. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 12.
10. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. — Л.: Химия, 1984.

## Test equipment for spectral response measurement of ultraviolet focal plane arrays

*A. D. Deomidov, M. E. Kononov, A. V. Polesskiy, N. A. Semchenko, K. A. Khamidullin, and S. V. Dobrunov*

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Received September 29, 2014*

*The results of development of the test equipment for spectral response measurement of ultraviolet focal plane arrays (UV FPA) are present. The test bench allows automatically measurements in spectral range of 190—540 nm. Measurements of spectral response of UV FPA based on AlGaIn material are realized according to GOST 17772-88 and IEC 60904-8.*

PACS: 06.90.+v

*Keywords:* spectral response, UV, FPA, test bench.

**References**

1. E. Dmitriev, *Fotonika*, No. 2, 24 (2007).
2. Yu. V. Suslyakov and I. V. Kormil'tsev, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 95 (2011).
3. K. O. Boktar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikl. Fiz.*, No.6, 54 (2013).
4. Morkoc.Hadis, *Handbook of Nitride Semiconductor and Devices Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth*, (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008).
5. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
6. K. O. Boktar, N. I. Iakovleva, N. V. Kravchenko, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 61 (2013).
7. GOST 17772-88. [in Russian].
8. *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device*. IEC 60904-8 (MEK 60904-8:1998).
9. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 12 (2013).
10. V. M. Zolotarev, V. N. Morozov, and E. V. Smirnova, *Optical Constants of Media*. Handbook (Khimiya, Leningrad, 1984) [in Russian].