

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ФОТОПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФОТОКАТОДОМ GAN/GAALN НА САПФИРЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Л. М. Баясный<sup>1</sup>, Ю.Н. Гордиенко<sup>1</sup>, Ю. К. Грузевич<sup>1,2</sup>,  
П.С. Альков<sup>1,2</sup>, О.В. Чистов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО Геофизика-НВ», 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

baliaska@mail.ru

Рассмотрен фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя третьего поколения с фотокатодом на основе нитрида галлия с эффективным отрицательным электронным средством и состыкованной с ним через волоконную оптику цифровой камерой с матрицей приборов с зарядовой связью. Показано соответствие этого фотокатода самым строгим требованиям современной науки и техники. Проведено его сравнение с традиционными щелочными фотокатодами, по результатам которого установлено наличие у фотокатода высокого квантового выхода в солнечно-слепой и видимо-слепой областях спектра ультрафиолетового излучения, низкого темнового тока, однородной чувствительности в широком спектральном диапазоне, резкого спада чувствительности у красной границы и высокой стабильности. Выявлена возможность изменения красной границы чувствительности электронно-оптического преобразователя в широких пределах за счет модификации состава активного слоя фотокатода с помощью добавки алюминия в активный слой Ga $\times$ Al $1-x$ N. Даны рекомендации по использованию фотоприемного модуля в составе приборов наблюдения и мониторинга космического базирования в целях раннего обнаружения очагов пожаров — лесных и на нефтегазовых месторождениях и терминалах для обнаружения и картографирования зон радиоактивного заражения местности, краткосрочного предупреждения землетрясений и извержений вулканов, спектроскопии явлений взаимодействия космических аппаратов с атмосферой и многих других областях хозяйственной деятельности.

**Ключевые слова:** электронно-оптический преобразователь, ОЭС-фотокатод, фотоприемный модуль, оптико-электронные системы

**Ссылка для цитирования:** Баясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Грузевич Ю.К., Альков П.С., Чистов О.В. Ультрафиолетовый фотоприемный модуль на основе электронно-оптического преобразователя с фотокатодом GaN/GaAlN на сапфире для применения в оптико-электронных комплексах космического базирования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 59–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-59-65

Ультрафиолетовые (УФ) фотоприемники широко используются в астрономических наблюдениях, спектральных системах наблюдения за состоянием озонового слоя, обнаружения высоковольтных электрических разрядов и пламени различного происхождения, а также в различных областях медицины и биологии. Такие приборы необходимы для применения в военной технике: в мультиспектральных системах обнаружения и наведения ракет, в средствах обеспечения скрытой помехозащищенной УФ-оптической связи, приборах радиационной, химической и биологической разведки [1–4].

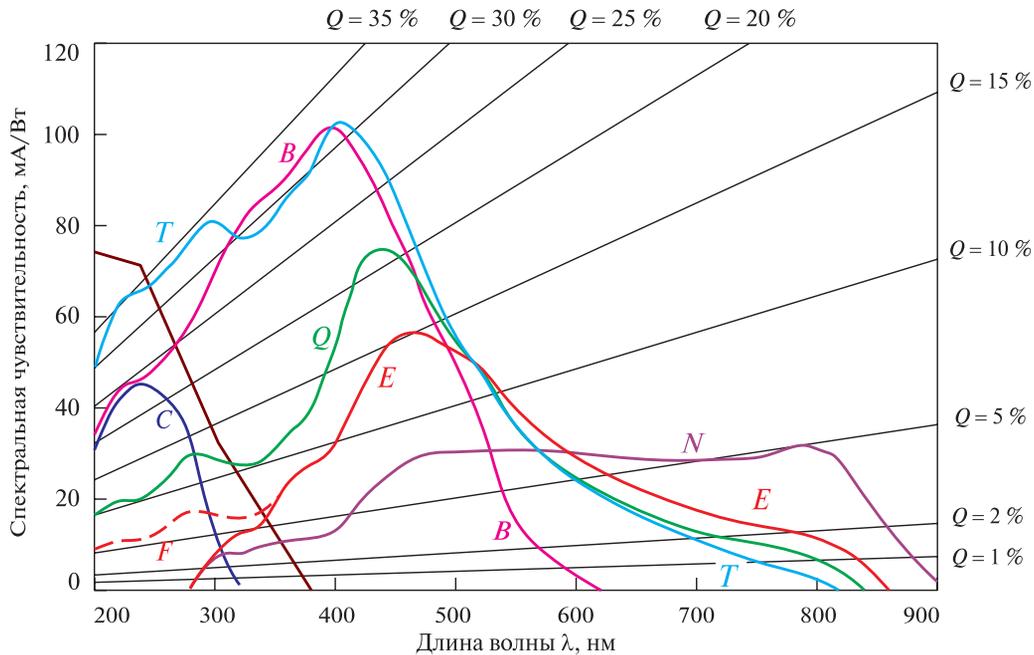
Для увеличения чувствительности и помехоустойчивости этих систем активно разрабатываются УФ-фотоприемники различного типа, работающие в так называемых солнечно-слепых т. е. таких, в которых отсутствует солнечное излучение, ( $200 \leq \lambda < 290$  нм) и видимо-слепых ( $200 \leq \lambda < 390$  нм) диапазонах длин волн, т. е. на уровне моря на Земле и в ближнем космосе соответственно.

Наиболее чувствительными приборами, работающим в указанных областях УФ-спектра

являются электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и фотоприемные модули (ФПМ), созданные на их основе.

Чувствительные в УФ-области спектра ЭОП, были разработаны и выпускаются отечественными и зарубежными производителями уже более 30 лет. Фотокатоды этих ЭОП изготавливают на основе таких соединений, как Cs<sub>2</sub>Te и Rb<sub>2</sub>Te, а также традиционных соединений — K<sub>2</sub>CsSb, Na<sub>2</sub>KCsSb, Ag-O-Cs и ОЭС-фотокатода на основе GaAs (рис. 1).

Анализ спектральных характеристик показывает, что, хотя фотокатоды, изготовленные на основе традиционных соединений — K<sub>2</sub>CsSb, Na<sub>2</sub>KCsSb, Ag-O-Cs, обладают высоким квантовым выходом в УФ-области спектра (до 30 %), их использование в приборах затруднено вследствие высокой чувствительности в видимой области, а фотокатоды, изготовленные на основе Cs<sub>2</sub>Te и Rb<sub>2</sub>Te, имеют неоднородную чувствительность в УФ-диапазоне. Кроме того, эмпирический способ изготовления этих фотокатодов и их поликристаллическая структура позволяют повысить достигнутый уровень чувствительности (24 % на 240 нм).



**Рис. 1.** Спектральные характеристики фотокатодов, работающих в УФ-диапазоне спектра: *G* — фотокатод GaN на лейкосапфире; *C* — фотокатод CsTe на кварцевом стекле; *B* — бищелочной фотокатод  $K_2SbCs$  на кварцевом стекле; *T* — фотокатод UV Wide-Band ( $Na_2KSb$ )Cs на кварцевом стекле; *Q* — фотокатод S20 ( $Na_2KSb$ )Cs на кварцевом стекле; *F* — фотокатод S25 ( $Na_2KSb$ )Cs на кварцевом стекле; *E* — фотокатод S25 ( $Na_2KSb$ )Cs на боросиликатном стекле; *N* — фотокатод S25RE ( $Na_2KSb$ )Cs на боросиликатном стекле

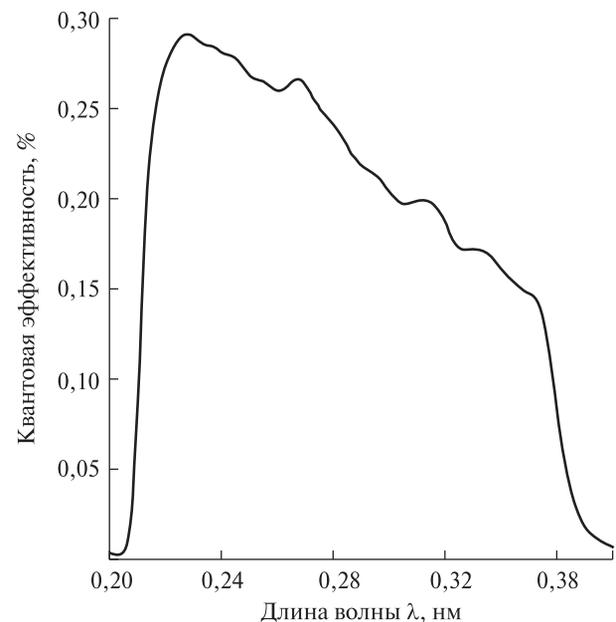
**Fig. 1.** Spectral characteristics of photocathodes operating in the UV spectral range: *G* — GaN leucosapphire photocathode; *C* — the CsTe quartz glass photocathode; *B* —  $K_2SbCs$  silica glass alkaline photocathode; *T* — UV Wide-Band ( $Na_2KSb$ )Cs photocathode on quartz glass; *Q* — the photocathode S20 ( $Na_2KSb$ )Cs on quartz glass; *F* — photocathode S25 ( $Na_2KSb$ )Cs on quartz glass; *E* — the photocathode S25 ( $Na_2KSb$ )Cs on borosilicate glass; *N* — Photocathode S25RE ( $Na_2KSb$ )Cs on borosilicate glass

Исторически первый фотокатод с отрицательным сродством к электрону (ОЭС-фотокатод) на основе монокристаллического GaAs имеет типичную для таких фотокатодов П-образную спектральную характеристику с резким спадом чувствительности у красной границы.

Для УФ-области спектра наиболее перспективным материалом является система тройных соединений  $Ga_xAl_{1-x}N$ , в связи с тем, что они являются монокристаллическими прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ, что соответствует спектральному диапазону с красной границей от 200 нм (AlN) до 365 нм (GaN). Меняя состав слоя можно получить предсказуемую форму спектральной характеристики и красную границу фотокатода в зависимости от решаемой задачи.

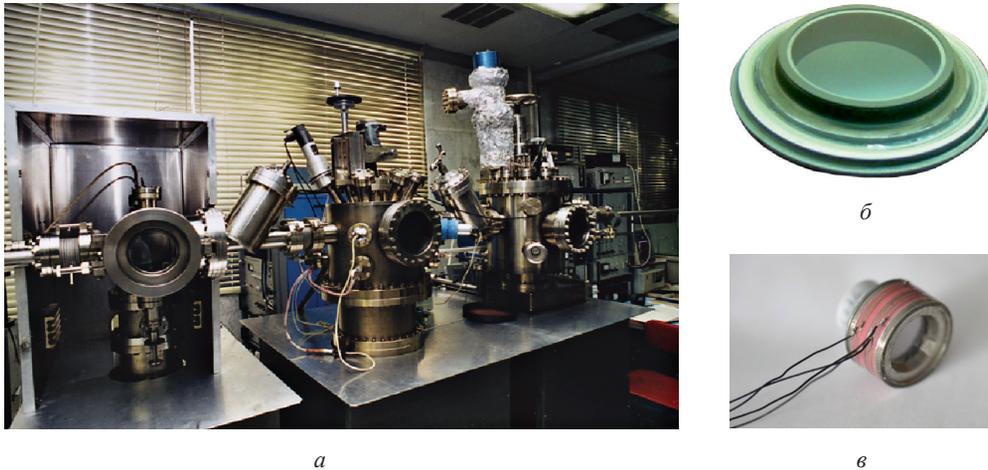
Возможность получения ОЭС-фотокатода на основе нитридов была продемонстрирована еще в середине 1970-х гг., однако активные работы по созданию таких фотокатодов начались только в конце 1990-х гг. после получения однородных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) нитрида галлия с высокими электрофизическими параметрами на подложках из сапфира, прозрачного в требуемом спектральном диапазоне, и согласованного с нитридами по коэффициенту термического

расширения (КТР) и постоянной кристаллической решетки, в противном случае высокие параметры слоев нитрида галлия не могут быть получены.



**Рис. 2.** Спектральная характеристика ОЭС-фотокатода GaN/GaAlN на лейкосапфире на пропускание

**Fig. 2.** Spectral characteristic of a GaN/GaAlN OES photocathode on a leucosapphire for transmission



**Рис. 3.** Сборочная сверхвысоковакуумная установка: *a* — фотокатодный узел GaN/GaAlN; *б* — на сапфире; *в* — вакуумный блок ультрафиолетового электронно-оптического преобразователя  
**Fig. 3.** Assembly ultra-high vacuum installation: *a* — photocathode node GaN/GaAlN; *б* — on sapphire; *в* — the vacuum unit of the ultraviolet electron-optical converter

В настоящее время на фотокатодах GaN был получен квантовый выход до 60 % на отражение и 30 % на 250 нм, 40 % на 240 нм — на пропускание, причем независимо от способа роста эпитаксиальной структуры  $c\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/p\text{-GaIn}$  (рост в газовой фазе из металлоорганических соединений или в сверхвысоком вакууме методом молекулярно-лучевой эпитаксии). Спектральная характеристика чувствительности такого фотокатода представлена на рис. 2.

Отечественные производители гетероэпитаксиальных структур в настоящее время достигли высоких электрофизических параметров (значительный уровень и ширина спектральной характеристики фотолюминесценции, совершенство кристаллической решетки активного слоя, высокие значения спектральной зависимости тока в электролит и подвижности неосновных носителей и др.). Первые же опыты по активировке этих структур в сверхвысоковакуумной камере дали квантовый выход 11 % на отражение на длине волны 275 нм [5].

В последние годы активные исследования ОЭС-фотокатодов на основе нитридных ГЭС, изготовленных методом МЛЭ или эпитаксии из МОС в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ведутся в ИФП СО РАН лабораторией под руководством А.С. Терехова [5, 6].

### Цель работы

На основе ГЭС оптимизированной конструкции были разработаны и изготовлены фотокатодные узлы  $c\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/p\text{-GaIn}$ , сочлененные с титановой оправой с помощью диффузионной сварки, в отличие от фотокатодного узла, изготовленного фирмой Hamamatsu, в котором ГЭС сочленяли сплавлением с профильным сапфировым диском [7].



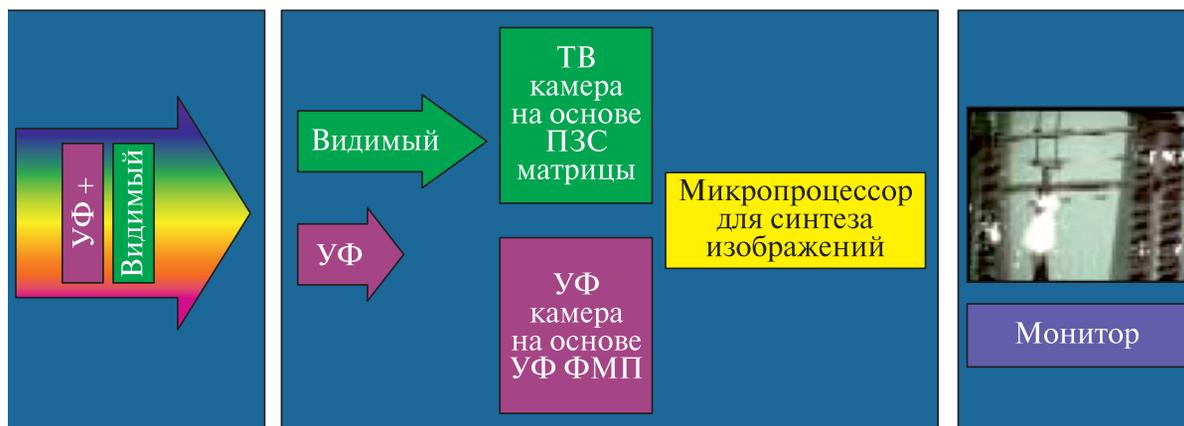
**Рис. 4.** Фотоприемный модуль на основе фотокатода GaAlN  
**Fig. 4.** Photodetector module based on the GaAlN photocathode

### Результаты и обсуждение

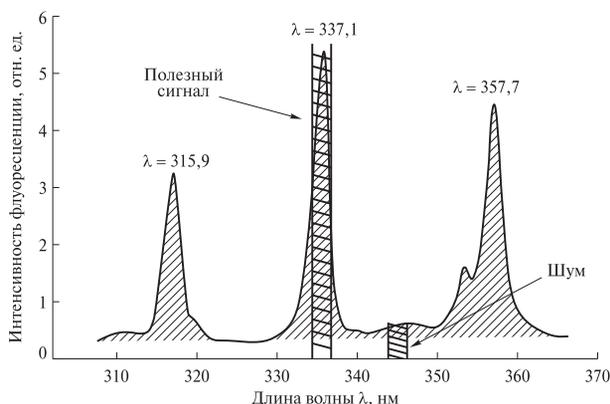
Оптимизированный фотокатодный узел (рис. 3) встроили в стандартную конструкцию ЭОП третьего поколения. Узел, содержал микроканальную пластину и катодолюминесцентный экран, нанесенный на волоконно-оптический элемент, который предназначался для стыковки с прибором с зарядовой связью (ПЗС) или камерой комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП) в целях дальнейшего изготовления фотоприемного модуля.

В результате проведенных исследований изготовленного ЭОП установлена высокая квантовая эффективность в УФ-спектральном диапазоне, превышающая результаты, достигнутые на традиционных материалах, а также стабильность фотокатода в составе ЭОП при отсутствии ионно-барьерной пленки на микроканальной пластине (МКП), что обеспечивало высокое значение отношения сигнал/шум для основного применения.

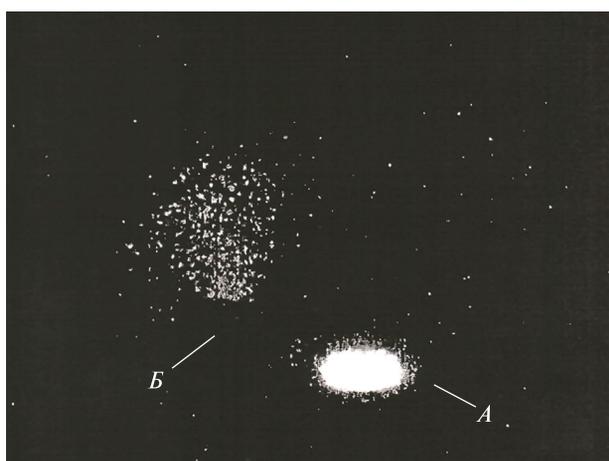
Нами изготовлены ФПМ с аналоговым и цифровым выходом на базе ПЗС-матриц как отечественно, так и зарубежного производства [8–10] (рис. 4).



**Рис. 5.** Комплексование изображений видимого и УФ-диапазона спектров и отображение его на мониторе  
**Fig. 5.** Integration of images of the visible and UV spectral range and its display on the monitor



**Рис. 6.** Спектр свечения атмосферного азота под действием различных источников радиации  
**Fig. 6.** The emission spectrum of atmospheric nitrogen under the influence of various radiation sources



**Рис. 7.** Изображение источников радиации на экране монитора: А — от источника α-излучения <sup>238</sup>Pu с активностью 100 мКи; В — от источника <sup>90</sup>Sr γ-излучения с активностью 1,35 мКи  
**Fig. 7.** Image of radiation sources on the monitor screen: А — from a <sup>238</sup>Pu α-radiation source with an activity of 100 mCi; В — from a source of <sup>90</sup>Sr γ-radiation with an activity of 1,35 mCi

На основе таких ФПМ, работающих в видимом и УФ-диапазоне спектра можно собрать комплексованный двухспектральный прибор для выделения УФ-кластеров в изображении (рис. 5). Это обеспечивает привязку УФ-изображения дефекта в высоковольтном изоляторе (тлеющего разряда) на фоне изображения участка линии электропередачи.

Для мониторинга радиационных загрязнений местности можно использовать эффект свечения атмосферного азота, вызванное его ионизацией радионуклидами (рис. 6, 7).

### Выводы

Мониторинг радиационных загрязнений из космоса можно проводить методом, который представлен в работе [10], путем регистрации УФ-излучения флуоресценции атмосферного азота, вызванной радиационным возбуждением от радионуклидов. Принцип мониторинга заключается в сравнении контрастов изображений загрязненных и незагрязненных участков местности при их наблюдении с помощью комплексованной камеры, состоящей из УФ и видимого ПЗС-приемников изображения. Такой же принцип положен в основу мониторинга кратчайших предвестников землетрясений [11].

Свечение ионизированного атмосферного азота в данном случае связано с выделением радиоактивного радона из разломов в земной коре перед началом землетрясений или извержений вулканов [12, 13]. Поскольку из разломов одновременно с радоном выделяется водород, система определяет избыточную концентрацию водорода и изменение концентрации радона двумя разными каналами.

Все методы определения концентрации веществ из космоса позволяют осуществлять координатную привязку к местности известными методами [14].

## Список литературы

- [1] Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Власов В.И., Горшков А.Б., Залогин Г.Н. Измерение и анализ интенсивности УФ излучения атмосферного образования при спуске СА корабля «Союз-ТМА» по наблюдениям с борта МКС // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2006. Т. 4. С. 270–288.
- [2] Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Родионов А.В., Сженев Е.Ю., Сипачев Г.Ф., Хмелинин Б.А. Спектрально-зонные исследования сверхслабых эмиссий естественного и техногенного происхождения в верхних слоях атмосферы и ионосферы Земли // Космонавтика и ракетостроение, 2007. Вып. 4 (49). С. 26–32.
- [3] Карабаджак Г.Ф., Комраков Г.П., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Ружин Ю.Я., Фролов В.Л., Хмелинин Б.А. Исследование глобальных пространственно-временных характеристик свечения верхней атмосферы и ионосферы Земли при воздействии на них радиоизлучения при наблюдении с борта МКС // Космонавтика и ракетостроение, 2009. Вып. 4 (57). С. 88–94.
- [4] Бакин В.В., Пахневич А.А., Косолюбов С.Н., Шайблер Г.Э., Ярошевич А.С., Терехов А.С. Преломление термализованных электронов, баллистически эмитированных в вакуум из  $p^+$ -GaAs-(Cs,O) // Письма в ЖЭТФ, 2003. Т. 77. № 4. С. 197–201.
- [5] Айнбунд М.Р., Алексеев А.Н., Алымов О.В., Жмерик В.Н., Лапушкина Л.В., Иванов С.В., Пашук А.В., Петров С.И. Солнечно-слепые УФ-фотокагоды на основе гетероструктур AlGaIn с границей спектральной чувствительности 300–330 нм // Письма в ЖТФ, 2012. № 38 (9). С. 88–95.
- [6] Mizuno I., Nihashi a T., Nagai a T., Niigaki b M., Shimizu a Y., Shimano a K., Kato h a K., Ihara a T., Okano K., Matsumoto a M., Tachino a M. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode // Proc. of SPIE, v. 6945, p. 694.
- [7] Мазалов А.В., Сабитов Д.Р., Курешов В.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Балясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Ильевский Д.В., Чистов О.В., Широков А.А. Гетероструктуры GaN/AlN для фотоэммитеров с отрицательным электронным средством // Успехи прикладной физики, 2013. Т. 1. № 5. С. 617–620.
- [8] Балясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Чистов О.В., Широков Д.А., Варфоломеев А.Ю., Сысоев П.А. Фотоприемный модуль на основе ЭОП с УФ ОЭС фотокаодом // Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011», Новосибирск, ИФП СО РАН, 22–26 августа 2011. С. 129. Новосибирск: ИФП СО РАН, 158 с.
- [9] Васильев А.В., Мозжилкин А.В., Садовников Р.Н. Способ обнаружения опасного радиоактивного загрязнения местности. Патент № 2549610. Дата регистрации: 2015.03.31. Номер заявки: 2013154386. Дата подачи заявки: 20131206.
- [10] Бондур В.Г., Давыдов В.Ф., Сорокин И.В., Давыдова С.В., Цидилина М.Н. Устройство регистрации предвестников землетрясений. Патент РФ № 2446418. Патентообладатель ГУ «Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга» — ЦПАМ «АЭРОКОСМОС» (RU), ГОУ ВПО МГУЛ. Дата подачи заявки: 14.07.2010 г. Публикация патента: 27.03.2012.
- [11] Кудринская Т.В. Экспериментальные исследования процессов ионизации в атмосферном приземном слое: Автореф. дисс. ... канд. ф.-м. наук, Нальчик, 2003 г.
- [12] Кузнецов В.В. Физика землетрясения и сопутствующих ему явлений в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере, Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 2010. 24 с.
- [13] Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Кочкарев Д.А., Куликов Д.С. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования, 2013. № 2. С. 197–202.

## Сведения об авторах

**Балясный Лев Михайлович** — гл. конструктор ЭОП и ФПМ ОАО «НПО Геофизика-НВ», baliaska@mail.ru

**Гордиенко Юрий Николаевич** — канд. техн. наук, заместитель техн. директора ОАО «НПО Геофизика-НВ», zam\_techdir@geo-nv.com

**Грузевич Юрий Кириллович** — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке ОАО «НПО Геофизика-НВ», yukg@mail.ru

**Альков Павел Сергеевич** — научный сотрудник ОАО «НПО Геофизика-НВ», pavel\_alkov@mail.ru

**Чистов Олег Валерьевич** — начальник сектора ОАО «НПО Геофизика-НВ», arkhont@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

# ULTRA-VIOLET PHOTO-RECEIVE MODULE BASED ON IMAGE INTENSIFIER TUBE WITH GAN/GAALN PHOTOCATHODE ON SAPPHIRE FOR USE IN SPACE-BASED OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

L.M. Baliasny<sup>1</sup>, Yu.N. Gordienko<sup>1</sup>, Yu.K. Gruzevich<sup>1,2</sup>, P.S. Alkov<sup>1,2</sup>, O.V. Chistov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Scientific Production Unity «Geophizika-NV», St. Company, bld. 2, 23, Matrosskaya Tishina st., 107076, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

baliaska@mail.ru

We have developed and manufactured a photo-receive module (FM) based on a 3rd generation image intensifier tube (IIT) with a photocathode based on gallium nitride with an effective negative electron affinity (NEA) and a digital camera with a matrix of charge-coupled devices (CCD) coupled with it through fiber optics. GaN NEA photocathode meets the most stringent requirements of modern science and technology. Compared with traditional alkaline photocathodes, it has a high quantum efficiency in the UV-solar-blind and visible-blind regions of the spectrum, low dark current, uniform sensitivity in a wide spectral range, a sharp drop in sensitivity at the red border and high stability. In addition, by modifying the composition of the active layer of the photocathode with additives of aluminum in the active layer is  $Ga_xAl_{1-x}N$ , it is possible to change the red border of IIT sensitivity within wide limits. FM as a part of space-based observation and monitoring devices can be used for: early detection of forest fires and fires in oil and gas fields and terminals; detection and mapping areas of radioactive contaminations; short-temporary prevention of earthquakes and volcanic eruptions; spectroscopy of the phenomena of interaction spacecraft with the atmosphere and many other areas

**Keywords:** image intensifier tube, NEA photocathode, photodetector module, optical-electronic systems

**Suggested citation:** Baliasny L.M., Gordienko Yu.N., Gruzevich Yu.K., Alkov P.S., Chistov O.V. *Ul'trafiioletovyy fotopriemnyy modul' na osnove elektronno-opticheskogo preobrazovatelya s fotokatodom GaN/GaAlN na sapfire dlya primeneniya v optiko-elektronnykh kompleksakh kosmicheskogo bazirovaniya* [Ultra-violet photo-receive module based on image intensifier tube with GaN/GaAlN photocathode on sapphire for use in space-based optical-electronic systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 59–65.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-59-65

## Reference

- [1] Plastinin Yu.A., Karabadzhak G.F., Vlasov V.I., Gorshkov A.B., Zalogin G.N. *Izmerenie i analiz intensivnosti UF izlucheniya atmosfernogo obrazovaniya pri spuske SA korablya «Soyuz-TMA» po nablyudeniya s borta MKS* [Measurement and analysis of the intensity of UV radiation from atmospheric formation during the descent of the Soyuz-TMA spacecraft using observations from the ISS] *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2006, v. 4, pp. 270–288.
- [2] Karabadzhak G.F., Plastinin Yu.A., Rodionov A.V., Szhenov E.Yu., Sipachev G.F., Khmelinin B.A. *Spektrozonal'nye issledovaniya sverkhslabykh emissiy estestvennogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya v verkhnikh sloyakh atmosfery i ionosfery Zemli* [Spectrozonol studies of super-weak emissions of natural and man-made origin in the upper atmosphere and the ionosphere of the Earth] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2007, iss. 4 (49), pp. 26–32.
- [3] Karabadzhak G.F., Komrakov G.P., Kuznetsov V.D., Plastinin Yu.A., Ruzhin Yu.Ya., Frolov V.L., Khmelinin B.A. *Issledovanie global'nykh prostranstvenno-vremennykh kharakteristik svecheniya verkhney atmosfery i ionosfery Zemli pri vozdeystvii na nikh radioizlucheniya pri nablyudenii s borta MKS* [Investigation of the global space-time characteristics of the upper atmosphere and the Earth's ionosphere when exposed to radio emission when observed from the ISS] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2009, iss. 4 (57), pp. 88–94.
- [4] Bakin V.V., Pakhnevich A.A., Kosolobov S.N., Scheibler G.E., Yaroshevich A.S., Terekhov A.S. *Prelomlenie termalizovannykh elektronov, ballisticheski emitirovannykh v vakuum iz  $p + -GaAs-(Cs, O)$*  [Refraction of thermalized electrons ballistically emitted into vacuum from  $p + -GaAs-(Cs, O)$ ]. *Letters to the JETP*, 2003, v. 77, no. 4, pp. 197–201.
- [5] Aynbund M.R., Alekseev A.N., Alymov O.V., Zhmerik V.N., Lapushkina L.V., Ivanov S.V., Pashuk A.V., Petrov S.I. *Solnechno-slepye UF-fotokatody na osnove geterostruktur AlGaIn s granitsey spektral'noy chuvstvitel'nosti 300–330 nm* [Sun-blind UV photocathodes based on AlGaIn heterostructures with a spectral sensitivity limit of 300–330 nm] *Pis'ma v ZhTF* [Letters in ZhTF], 2012, no. 38 (9), pp. 88–95.
- [6] Mizuno I., Nishashi A. T., Nagai A. T., Niigaki b M., Shimizu a Y., Shimano a K., Katoh a K., Ihara a T., Okano K., Matsumoto a M., Tachino a M. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode. *Proc. of SPIE*, v. 6945, p. 694.
- [7] Mazalov A.V., Sabitov D.R., Kureshov V.A., Padalitsa A.A., Marmalyuk A.A., Balyasny L.M., Gordienko Yu.N., Il'evskiy D.V., Chistov O.V., Shirokov A.A. *Geterostrukturny GaN/AlN dlya fotoemitterov s otritsatel'nykh elektronnykh srodstvom* [GaN / AlN heterostructures for photo emitters with negative electron affinity] *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in applied physics], 2013, v. 1, no. 5, pp. 617–620.
- [8] Balyasny L.M., Gordienko Yu.N., Chistov O.V., Shirokov D.A., Varfolomeev A.Yu., Sysoev P.A. *Fotopriemnyy modul' na osnove EOP s UF OES fotokatodom* [Photo-receiving module based on image intensifier with UV ECO photocathode] *Tezisy dokladov konferentsii «Fotonika–2011»* [Abstracts of the conference «Photonics–2011»], Novosibirsk, Institute of Applied Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, August 22–26, 2011]. Novosibirsk: Institute of Physics Siberian Branch RAS, pp. 129, 158 p.

- [9] Vasil'ev A.V., Mozzhilkin A.V., Sadovnikov R.N. *Sposob obnaruzheniya opasnogo radioaktivnogo zagryazneniya mestnosti. Patent № 2549610* [The method of detection of dangerous radioactive contamination of the area. Patent number 2549610]. Registration date: 2015.03.31. Application number: 2013154386. Application date: 20131206.
- [10] Bondur V.G., Davydov V.Fedorovich., Sorokin I.V., Davydova S.V., Tsidilina M.N. *Ustroystvo registratsii predvestnikov zemletryasenyi. Patent RF № 2446418*. [Device for recording earthquake precursors. Patent of the Russian Federation No. 2446418]. Patentee GU «Scientific Center for Problems of Aerospace Monitoring» – TsPAM «AEROKOSMOS» (RU), GOU VPO MGUL. Filing date of the application: 07/14/2010. Publication of the patent: 03/27/2012.
- [11] Kudrinskaya T.V., *Eksperimental'nye issledovaniya protsessov ionizatsii v atmosfernom prizemnom sloe: Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Experimental studies of ionization processes in the atmospheric surface layer: Author's abstract. Diss. ... Cand. Physical and Mathematical Sciences], Nalchik, 2003.
- [12] Kuznetsov V.V. *Fizika zemletryaseniya i soputstvuyushchikh emu yavleniy v litosfere, atmosfere, ionosfere i magnitosfere* [Physics of the earthquake and related phenomena in the lithosphere, atmosphere, ionosphere and magnetosphere]. Novosibirsk: Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010, 24 p.
- [13] Gryaznov N.A., Pantaleev S.M., Ivanov A.E., Kochkarev D.A., Kulikov D.S. *Vysokoproizvoditel'nyy metod izmereniy koordinat ob'ektov v usloviyakh kosmicheskogo prostranstva* [High-performance method for measuring the coordinates of objects in space conditions] *Matematicheskie metody. Modelirovanie. Eksperimental'nye issledovaniya* [Mathematical methods. Modeling. Experimental studies], 2013, no. 2, pp. 197–202.

## Authors' information

**Baliasnyy Lev Michailovich** — Chief Constructor IIT of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, baliaska@mail.ru

**Gordienko Yuriy Nikolaevich** — Cand. Sci. (Tech.), Technical Director of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, zam\_techdir@mail.ru

**Gruzevich Yuriy Kirillovich** — Cand. Sci. (Tech.), Deputy General Director for science of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, yukg@mail.ru

**Al'kov Pavel Sergeevich** — Researcher of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, pavel\_alkov@mail.ru

**Chistov Oleg Valer'evich** — Chef of department of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, arkhont@mail.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.