

УДК 621.383.8

DOI: 10.36845/2073-8250-2019-255-4-10-15

ГИБРИДНЫЙ ФОТОПРИЁМНЫЙ МОДУЛЬ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА С ФОТОКАТОДОМ ИЗ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

**Ю.В. Брашеван¹, Ю.И. Завадский¹, П.Б. Константинов¹,
А.С. Скрылёв¹, В.В. Чернокожин¹, П.С. Альков², Л.М. Баясный²,
Ю.Н. Гордиенко², Ю.К. Грузевич², О.В. Чистов²**

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., д. 27;

²ОАО «НПО Геофизика-НВ», 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

Представлены результаты исследования разработанного гибридного фотоприёмного модуля ультрафиолетового (УФ) диапазона. Модуль состоит из сенсора изображения на основе ПЗС матрицы и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 3-го поколения с фотокатодом на основе нитрида галлия. Приведены основные фотоэлектрические характеристики изделия и методики их измерения.

Ключевые слова: УФ диапазон, фотоприёмный модуль, ЭОП, фотокатод, нитрид галлия

Сведения об авторах: Баясный Лев Михайлович, baliaska@mail.ru; Брашеван Юрий Васильевич, brashevan_uv@pulsarnpp.ru; Гордиенко Юрий Николаевич, к.ф.-м.н., yuriy194421@mail.ru; Грузевич Юрий Кириллович, yukg@mail.ru, к.т.н., профессор; Альков Павел Сергеевич, pavel_alkov@mail.ru; Чистов Олег Валерьевич, arkhont@mail.ru; Завадский Юрий Иванович, к.ф.-м.н., yuizavad@pulsarnpp.ru; Константинов Пётр Борисович, д.т.н., профессор, administrator@pulsarnpp.ru; Скрылёв Александр Сергеевич, к.т.н., лауреат Госпремии, askrylev@pulsarnpp.ru; Чернокожин Владимир Викторович, к.т.н., vch@pulsarnpp.ru

ULTRAVIOLET HYBRID PHOTOACTIVE MODULE WITH GAN PHOTOCATHODE

**Yu.V. Brashevan¹, Yu.I. Zavadskiy¹, P.B. Konstantinov¹, A.S. Skrylev¹, V.V. Chernokozhin¹,
P.S. Alkov², L.M., Balyasniy², Yu.N. Gordienko², Yu.K. Gruzevich², O.V. Chistov²**

¹S&PE PULSAR JSC, 105187, Moscow, Okružhnoy pr., 27

²«NPO Geofizika-NV» JSC, 107076, Moscow, Matrosskaya Tishina str., 23-2

This paper presents the results of the performance investigation of the ultraviolet (UV) hybrid photoactive module designed by the authors. Module contains an image sensor based on CCD-matrix and an image intensifier tube of the 3rd generation with GaN photocathode. Photovoltaic performance of the device is given along with methods of its measurement.

Keywords: UV range, photoactive module, image intensifier tube, photocathode, gallium nitride

Authors: Balyasniy Lev Mikhaylovich, baliaska@mail.ru; Brashevan Yury Vasilyevich, brashevan_uv@pulsarnpp.ru; Gordienko Yury Nikolaevich, Ph.D., yuriy194421@mail.ru; Gruzevich Yury Kirillovich, Ph.D, Professor, yukg@mail.ru; Alkov Pavel Sergeevich, pavel_alkov@mail.ru; Chistov Oleg Valeryevich, arkhont@mail.ru; Zavadskiy Yury Ivanovich, Ph.D., yuizavad@pulsarnpp.ru; Konstantinov Petr Borisovich, Sc.D., Professor, administrator@pulsarnpp.ru; Skrylev Aleksander Sergeevich, Ph.D., laureate of Russian Federation State prize, askrylev@pulsarnpp.ru; Chernokozhin Vladimir Viktorovich, Ph.D., vch@pulsarnpp.ru.

Введение

В работе [1] представлены результаты разработки конструкции и основные фотоэлектрические характеристики гибридного фотоприёмного модуля (ФПМ) видимого и ультрафиолетового диапазонов для телевизионной камеры наблюдения и контроля коронного разряда высоковольтной линии электропередачи. Фотоприёмный модуль состоит из ЭОП, комплексированного с полноформатной матрицей оптического формата 1 дюйм с помощью волоконно-оптического элемента с масштабированием изображения (фокон). В качестве входного каскада был использован ЭОП фирмы PHOTONIS типа XX1450AAT с мультищелочным фотокатодом.

Следует отметить, что использование разработанного модуля в УФ диапазоне затруднено из-за высокой чувствительности мультищелочного фотокатода к видимой и ближней ИК области спектра. Спектральная характеристика фотокатода XX1450AAT представлена на рис. 1.

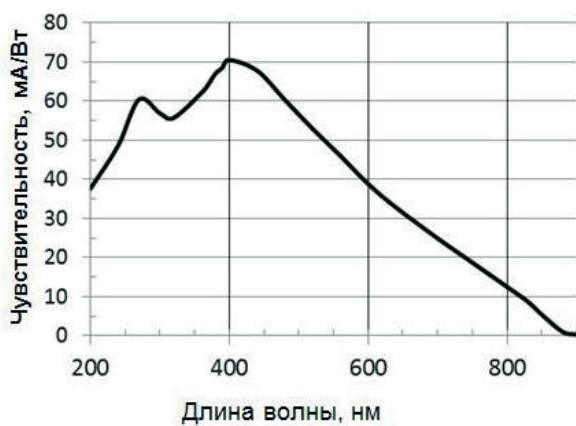


Рис. 1

Спектральная характеристика фотокатода ЭОП фирмы PHOTONIS

В работе [2] рассмотрены различные материалы для УФ фотокатодов и отмечено, что наиболее перспективным материалом для фотокатода в этом случае является система тройных соединений $Ga_xAl_{1-x}N$. У этих прямозонных полупроводников ширина запрещённой зоны изменяется от 3,4 до 6,2 эВ, что соответствует изменению правой границы чувствительности от 365 нм (GaN) до 200 нм (AlN). Работы по созданию таких фотокатодов активно начались в конце 90-х годов на гетероэпитаксиальных структурах нитрида галлия на подложках согласованного с нитридами по кристаллической решётке сапфира [3, 4]. В ОАО «НПО Геофизика-НВ» разработан и изготовлен ЭОП 3-го поколения с фотокатодом на основе нитрида галлия с эффективным отрицательным электронным средством [2]. Типичная спектральная характеристика этого фотокатода представлена на рис. 2. Максимальная квантовая эффективность на длине волны 230 нм составляет $\sim 0,29$. Отношение квантовых эффективностей на длинах волн 240 и 550 нм (середина видимого диапазона) составляет 10^4 , а для 240 и 400 нм эта величина равна $5 \cdot 10^2$. Фотокатод обладает низким темновым током, однородной чувствительностью в широком спектральном диапазоне, резким спадом чувствительности у красной границы и высокой стабильностью.

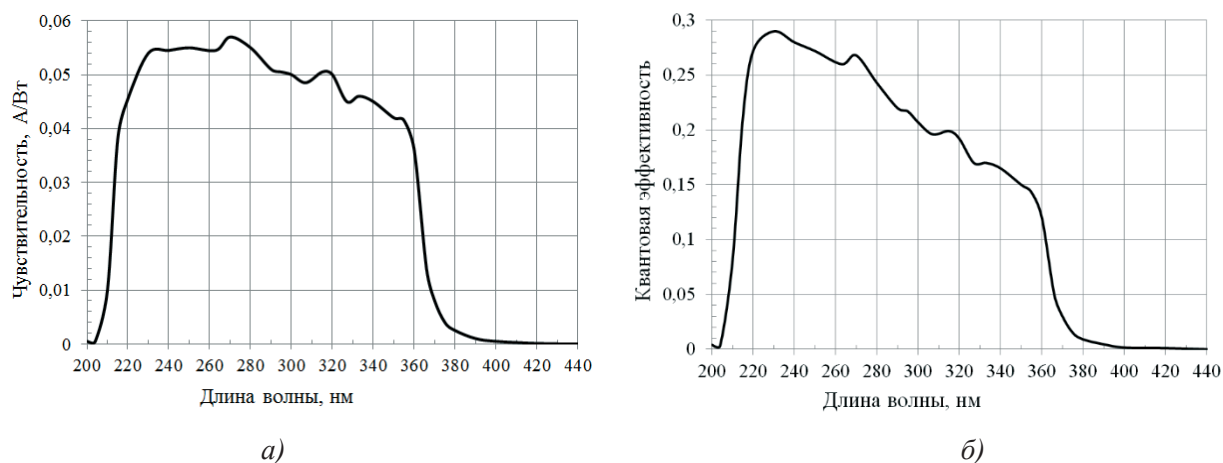


Рис. 2

Спектральные характеристики GaN фотокатода ЭОП:

а) – ампер-ваттная чувствительность; б) – квантовая эффективность

Фотокатодный узел был встроен в стандартную конструкцию ЭОП 3-го поколения (рис. 3), содержащую микроканальную пластину и катодолюминесцентный экран, нанесённый на волоконно-оптический элемент, предназначенный для стыковки с ПЗС или КМОП камерой при изготовлении фотоприёмного модуля.

В работе [2] сообщается об изготовлении ФПМ как с аналоговым, так и с цифровым выходом на базе ПЗС матриц отечественного и зарубежного производства. Достигнутая величина пороговой облучённости для аналоговой ПЗС камеры в диапазоне 200-350 нм – $5 \cdot 10^{-7}$ Вт/м².

Результаты и методики исследования пороговых характеристик модуля

В данной работе представлены результаты исследования фотоприёмного модуля, описанного в работе [1], в котором ЭОП фирмы PHOTONIS с мультищелочным фотокатодом заменён на ЭОП с GaN фотокатодом разработки ОАО «НПО Геофизика-НВ» [2]. Его следующая характерная особенность – вдвоенная микроканальная пластина. ЭОП претерпел соответствующие конструктивные изменения, позволившие вписать его в разработанную конструкцию ФПМ.



Рис. 3

Вакуумный блок ЭОП 3-го поколения с GaN фотокатодом

С целью определения пороговой облучённости данного ФПМ УФ были проведены измерения на изготовленных образцах ФПМ по двум различным методикам определения пороговой облучённости.

Методика 1. Эта методика основана на принципах, изложенных в [5].

На измерительной скамье располагается измеряемый ФПМ УФ. На расстоянии L от плоскости фотокатода ФПМ располагается точечный источник излучения (светодиод с фиксированной длиной волны излучения в диапазоне 200-350 нм). При расстоянии $L = L_{ат}$ облучённость $W_{ат}$, создаваемая источником, аттестована. Входное окно ФПМ закрывается непрозрачной крышкой с отверстием в центре диаметром ~ 150 мкм. На экране видеоконтрольного устройства наблюдается светлое пятно от изображения точечного источника излучения. Фиксирование отклика на экране ВКУ осуществляется экспертным путём. Одновременно сигнал U_c измеряется на экране осциллографа в выделенной строке, в которой сигнал максимален. Расстояние L между изделием и источником излучения увеличивается до момента, когда отклик на экране ВКУ начинает «мерцать», т.е. исчезать на одну или несколько секунд. В этой ситуации «мерцающий» сигнал $U_c = 30-70$ мВ на экране осциллографа измеряется в моменты его появления. Одновременно на экране осциллографа фиксируется значение квазипикового напряжения шума $U_{кп} = 20$ мВ. После этого перемещение прекращается и измеряется расстояние $L_{пор}$ от источника излучения до ФПМ. Пороговая облучённость рассчитывается по формуле

$$W_{пор} = W_{ат} \cdot (L_{ат}/L_{пор})^2.$$

Вычисленная таким образом пороговая облучённость в плоскости фотокатода была не больше $5 \cdot 10^{-8}$ Вт/м².

Пороговая мощность ФПМ определяется по формуле

$$P_{пор} = W_{пор} \cdot S_{эл},$$

где $S_{эл} = 0,94 \cdot 10^{-9}$ м² – площадь фоточувствительного элемента, приведённая к входному окну изделия. Соответственно $P_{пор} \leq 5 \cdot 10^{-17}$ Вт.

Методика 2. Эта методика основана на принципах, изложенных в [6].

Определение пороговой мощности ФПМ основано на измерении выходного сигнала ФПМ от точечного источника излучения (светодиода), аттестованного по энергетике на фиксированной длине волны в диапазоне 200-350 нм (близкой к длине волны источника в методике 1), и сравнении его с напряжением среднеквадратичного шума на выходе ФПМ. Сигнал снимается с крупной детали изображения, создаваемой установленной на входном окне ФПМ диафрагмой, диаметр которой не менее 1/20, но не более 1/4 минимального поперечника экрана ВКУ. На экране осциллографа фиксируются величина выходного сигнала U_c от излучения и значение квазипикового напряжения шума $U_{кп}$.

Облучённость в плоскости фотокатода от источника, находящегося на расстоянии L , рассчитывается по формуле

$$W = W_{ат} \cdot (L_{ат}/L)^2,$$

где $W_{ат}$ – облучённость ФПМ на фиксированной длине волны в диапазоне 200-350 нм при расстоянии $L_{ат}$ до изделия.

В нашем случае при облучённости в плоскости фотокатода $W = 2,6 \cdot 10^{-7}$ Вт/м² значение выходного сигнала было $U_c = 280$ мВ при квазипиковом напряжении шума $U_{кп} = 20$ мВ. Среднеквадратичная величина шума вычислялась по формуле

$$U_{ш.ск} = U_{кп} / K,$$

где пикфактор K принят равным 6. Пороговая облучённость в плоскости фотокатода, определяемая как облучённость, при которой сигнал равен среднеквадратичному шуму, вычислялась по формуле

$$W_{пор} = W / (U_c / U_{ш.ск})$$

и оказалась не более $3,1 \cdot 10^{-9}$ Вт/м². Соответственно $P_{пор} \leq 2,9 \cdot 10^{-18}$ Вт.

Обсуждение результатов исследования

Измерение пороговых характеристик ФПМ проводилось по двум различным методикам, поскольку ФПМ является комплексным прибором, включающим как ЭОП, так и ПЗС матрицу. Соответственно были применены две методики – одна из них (методика 1) основана на принципах, применяемых для оценки параметров ЭОП, другая (методика 2) – для оценки характеристик ПЗС матриц. Как в ЭОП, так и в матричных приборах под пороговой облучённостью понимается примерно одно и то же – такая облучённость прибора, при которой сигнал либо в точности равен шуму (матричные приёмники), либо соизмерим с ним (ЭОП).

Различие в цифрах пороговой облучённости (мощности), экспериментально полученных по разным методикам, не должно смущать. Такое различие отчасти

объяснимо разницей в деталях методик. Так в методике 1 в расчёт принимается квазипиковая величина шума и сигнал снимается с «малой» детали изображения, а в методике 2 учитывается среднеквадратичный шум в $K = 6$ раз меньший квазипикового, а сигнал снимается с «крупной» детали изображения.

Однако наиболее принципиальное обстоятельство заключается в том, что обе методики не предназначены для случая, имеющего место в рассматриваемом приборе. Дело в том, что прибор настолько чувствителен к излучению, что сигнал, создаваемый даже одним или несколькими поглощёнными фотонами, превышает уровень шума. Это следует и из расчёта числа поглощаемых в одной ячейке ПЗС за время кадра t_k фотонов, и из наблюдаемого в эксперименте «мерцания» сигнала при уменьшении облучённости фотокатода, а также из наблюдаемого на экране осциллографа шума сигнала на крупной детали изображения, в десятки раз превышающего шум на неосвещённых участках прибора. И следовательно, определение пороговой мощности как мощности, при которой сигнал равен шуму, теряет смысл. Практически за неимением других критериев этой величины, вычисленной либо по методике 1, либо по методике 2, можно пользоваться, но следует понимать, что это условная величина, не имеющая того же физического смысла, что обычно вкладывается в понятие пороговой мощности. Вопрос о предпочтительности одной из двух методик не имеет большого смысла – это вопрос предпочтений экспериментатора. Только сравнивать между собой разные приборы, разумеется, следует, пользуясь одной и той же методикой.

Выводы

Разработан и изготовлен гибридный фотоприёмный модуль с фотокатодом из нитрида галлия. Исследование характеристик модуля показывает, что по основному параметру – пороговой мощности – он демонстрирует весьма высокий уровень: при измерении по методике 1 $P_{\text{пор}} \leq 5 \cdot 10^{-17}$ Вт и при измерении по методике 2 $P_{\text{пор}} \leq 2,9 \cdot 10^{-18}$ Вт, что обеспечивается применением в конструкции ЭОП двух микроканальных пластин, умножающих поток электронов с фотокатода. Столь высокая

чувствительность разработанного модуля сочетается с другой его важной характеристикой: благодаря использованию фотокатода из нитрида галлия он является видимо слепым. Ясно, что использование таких модулей открывает широкие возможности создания систем обнаружения слабых УФ излучений в различных областях техники, например, для определения утечек в высоковольтных линиях электропередачи и трансформаторах, в системах контроля радиационного загрязнения окружающей среды, спектроскопии и многих других областях.

Литература

1. Брашеван, Ю.В. Гибридный фотоприёмный модуль видимого и ультрафиолетового диапазона для наблюдения и контроля коронного разряда ЛЭП / Ю.В. Брашеван [и др.] // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – Вып. 3 (254). – С. 12-18.
2. Балясный, Л.М., Гордиенко Ю.Н., Чистов О.В. и др. // Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011». – Новосибирск, 22-26 августа 2011. – С. 129.
3. Мазалов, А.В. Гетероструктуры GaN/AlN для фотоэммиттеров с отрицательным электронным средством / А.В. Мазалов [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 5. – С. 617-620.
4. Грузевич, Ю.К. Разработка фотокатодов солнечно-слепого диапазона на основе ГЭС нитрида галлия алюминия, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии / Ю.К. Грузевич, Ю.Н. Гордиенко, Л.М. Балясный, О.В. Чистов, П.С. Альков, Д.А. Широков, В.Н. Жмерик, Д.В. Нечаев, С.В. Иванов // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 82-87.
5. ГОСТ 21815.11-86. Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения пороговой освещённости. – М., 1988.
6. ГОСТ 28953-91. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров. – М., 1992.
- [Hybrid photoactive module of visible and ultraviolet range for surveillance and monitoring of the power line coronal discharge]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, Moscow, 2019, iss.3 (254), pp. 12-18.
2. Balyasny L.M., Gordienko Yu.N., Chistov O.V. et al. *Tezisy докладov konferentsii «Fotonika-2011»*, Novosibirsk, 2011, p. 129.
3. Mazalov A.V. et al. Geterostruktury GaN/AlN dlya fotoemitterov s otritsatel'nym elektronnyim sredstvom [GaN/AlN heterostructures for negative electron affinity photoemitters]. *Uspekhi Prikladnoy Fiziki*, 2013, vol. 1, no. 5, pp. 617-620.
4. Gruzevich Yu.K., Gordiyenko Yu.N., Balyasny L.M., Chistov O.V., Alkov P.S., Shirokov D.A., Zhmerik V.N., Nechayev D.V., Ivanov S.V. Razrabotka fotokatodov solnechno-slepogo diapazona na osnove GES nitrida galliya alyuminiya, izgotovlennykh metodom molekulyarno puchkovoy epitaksii [Designing solar-blind photocathodes based on AlGaIn HIC, produced by molecular beam epitaxy]. *Prikladnaya Fizika*, 2015, no. 4, pp. 82-87.
5. GOST 21815.11-86. Preobrazovateli elektronno-opticheskiye. Metod izmereniya porogovoyosveshchonnosti [Image intensifier tube. Threshold illumination measurement method], Moscow, 1988.
6. GOST 28953-91. Pribory fotochuvstvitel'nyye s perenosom zaryada. Metody izmereniya parametrov [Photosensitive charge-transfer devices. Performance measurement methods], Moscow, 1992.

References

1. Brashevan Yu.V. et al. Gibridnyy fotopriyomnyy modul' vidimogo i ul'trafioletovogo diapazona dlya nablyudeniya i kontrolya koronnogo razryada LEP