

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.383.4

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).639-646

ГРНТИ 47.29.31

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

ФОТОПРИЁМНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ GaSb/InGaAsSb

Гаврушко В. В.¹, Григорьев А. Н.², Сапожников А. А.¹, Карачинов В. А.¹,
Быстров Н. Е.¹, Петров В. М.¹

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)

² ООО «Промышленные дроссели» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье приведены сведения о структуре неохлаждаемого фотоприёмного устройства на основе соединения InGaAsSb, для спектрального диапазона 1,7...2,3 мкм. Приведены данные об интегральной чувствительности, спектральных, шумовых и пороговых характеристиках ФПУ в диапазоне температур (223-323 К). Обнаружительная способность при комнатной температуре достигала значений $D^*(\lambda_{\max}, 1000.1) = 9.4 \cdot 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$. Динамический диапазон составил 64 дБ.

Ключевые слова: фотоприёмник, усилитель, спектральные характеристики, чувствительность, обнаружительная способность, динамический диапазон

Для цитирования: Гаврушко В. В., Григорьев А. Н., Сапожников А. А., Карачинов В. А., Быстров Н. Е., Петров В. М. Фотоприёмное устройство на основе гетероэпитаксиальной структуры GaSb/InGaAsSb // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 639-646. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).639-646

Research Article

PHOTODECEPTIVE DEVICE BASED ON HETEROEPITAXIAL STRUCTURE GaSb/InGaAsSb

Gavrushko V. V.¹, Grigor'ev A. N.², Sapozhnikov A. A.¹, Karachinov V. A.¹,
Bystrov N. E.¹, Petrov V. M.¹

¹ Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

² Industrial Throttles LLC (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article provides information on the structure of an uncooled photodetector based on an InGaAsSb compound for the spectral range of 1.7...2.3 microns. The data on the integral sensitivity and also the spectral, noise, and threshold characteristics of the photodetector in the temperature range of 223-323 K are presented. The detectivity at room temperature reached the values $D^*(\lambda_{\max}, 1000.1) = 9.4 \cdot 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$. The dynamic range was 64 dB.

Keywords: photodetector, amplifier, spectral characteristics, sensitivity, detectivity, dynamic range

For citation: Gavrushko V. V., Grigor'ev A. N., Sapozhnikov A. A., Karachinov V. A., Bystrov N. E., Petrov V. M. Photodeceptive device based on heteroepitaxial structure GaSb/InGaAsSb // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 639-646. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).639-646

Введение

Во многих случаях свойства фотоприёмников определяются технологическими возможностями их реализации. В данной работе представлены характеристики

фотоприёмного устройства, разработанного на основе гетероэпитаксиальной структуры GaSb/InGaAsSb [1-4]. Узкозонный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ состава $x=0,18$ $y=0,17$ толщиной 2,5 ... 3,5 мкм выращивался методом жидкостной эпитаксии на подложке p-GaSb. Сверху на него, также методом жидкостной эпитаксии, осаждался слой n-GaSb. Использование сочетания широкозонного окна и узкозонного фоточувствительного слоя позволило сформировать П-образную спектральную характеристику. Ширина запрещенной зоны узкозонного слоя имела значение около 0,54 эВ. Если принять критерий Мооса [5] для предельной рабочей температуры полупроводникового фотоприемника:

$$T = 0,05(\Delta E_g / kT),$$

то допустимая расчетная температура составит 314 К. В связи с этим возникает особый интерес к таким фотоприёмникам, поскольку они могут быть эффективными без дополнительных устройств охлаждения. Во многих случаях сигнал, получаемый от фотоприемника, невелик и требует предварительного усиления. Кроме того, блок предварительного усиления позволяет согласовать фотоприемник с электронным трактом и реализовать пороговые и частотные свойства фотоприемников [6]. Как правило, предварительный усилитель располагают в непосредственной близости от приемника, что снижает воздействие на фотосигнал случайных наводок. Фотоприёмник и блок предварительного усиления, объединённые в единый корпус, образуют фотоприёмное устройство (ФПУ). Дополнительным преимуществом ФПУ является защита фотодиода от воздействия статического электричества. Наличие даже небольших статических зарядов, появление которых возможно при монтаже изделий, оказывалось губительным из-за небольших пробивных напряжений для фотодиодов на основе узкозонного полупроводникового материала.

Структура ФПУ

Фотоприёмник имел размер чувствительной площадки $2,2 \cdot 10^{-4}$ см². Для снижения воздействия оптических бликов использовано входное германиевое окно с интерференционными просветляющими покрытиями. Предварительный усилитель был выполнен по схеме трансимпедансного усилителя ток-напряжение, на основе низкошумящего ОУ типа 140УД17А. Усилитель обеспечивал работу фотодиода в режиме короткого замыкания при напряжении смещения не более 0,2 мВ и был оптимальным образом согласован по шумам с фотодиодом, имеющим невысокое дифференциальное сопротивление. Применение в обратной связи резистора сопротивлением 3 МОм позволило обеспечить высокую вольттовую чувствительность. Конструктивно предусилитель был выполнен по тонкоплёночной технологии. Напряжение питания ФПУ ± 10 В, масса около 2 г. Принципиальная схема предусилителя приведена на рисунке 1.

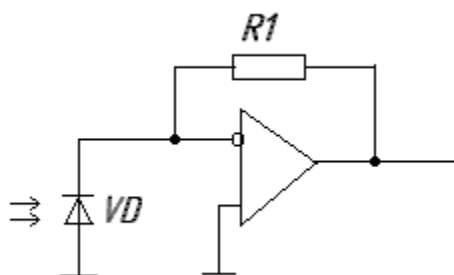


Рисунок 1. Принципиальная электрическая схема ФПУ

Характеристики ФПУ

Распределение спектральной чувствительности относят к одной из важнейших характеристик ФПУ (рисунок 2). Диапазон квантовой спектральной чувствительности на уровне 0,1 от максимального составил 1,66 ... 2,31 мкм при температуре 300 К. При изменении температуры наблюдался некоторый сдвиг спектральной характеристики, как это показано на рисунке. Изменение длинноволновой границы можно связать с температурной зависимостью ширины запрещённой зоны эпитаксиального слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, а коротковолновой – контактного слоя GaSb.

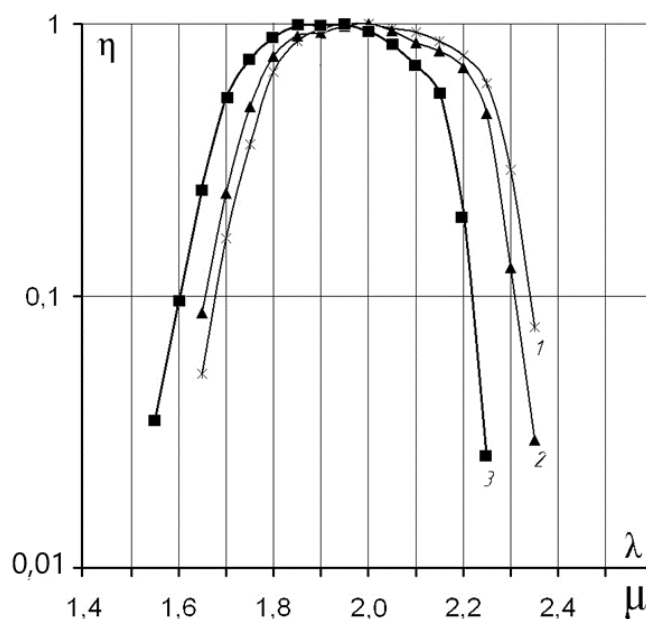


Рисунок 2. Спектральные характеристики ФПУ для равного потока падающих квантов.
1 – 323 К; 2 – 300 К; 3 – 221 К;

Одним из основных параметров, характеризующих работу ФПУ, является вольтовая чувствительность. Были выполнены измерения интегральной чувствительности ФПУ к излучению АЧТ 800 К на частоте модуляции 800 Гц. Типичная зависимость интегральной чувствительности ФПУ в обычно используемом диапазоне температур от минус 60 до плюс 40°C приведена на рисунке 3. Как видно,

в исследованном температурном диапазоне происходило изменение чувствительности более чем в 1,5 раза.

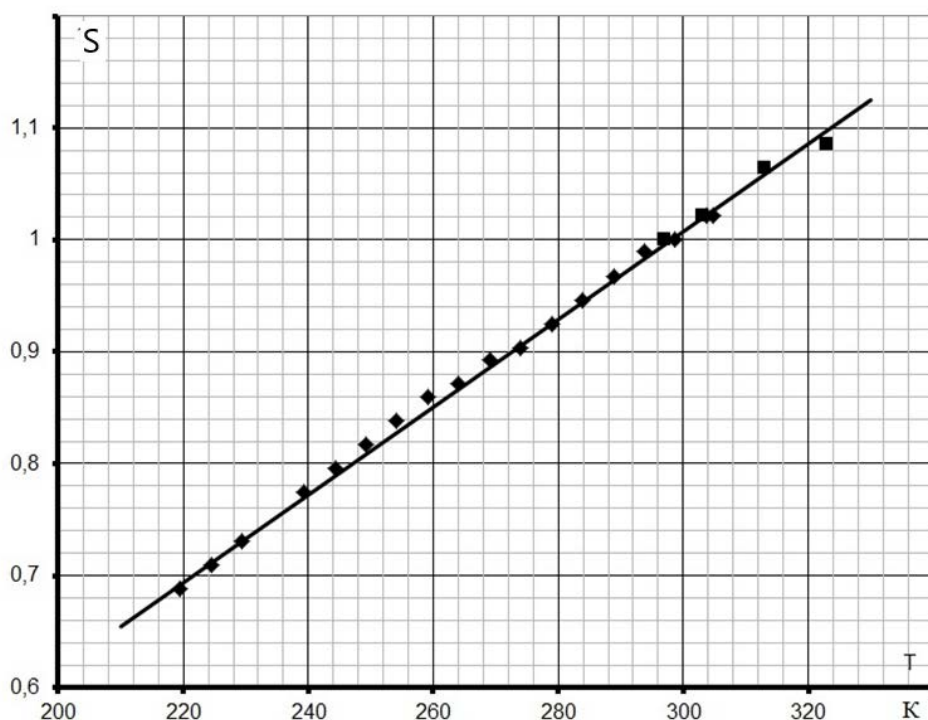


Рисунок 3. Зависимость чувствительности ФПУ от температуры в относительных единицах (АЧТ 800 К)

Значение абсолютной чувствительности для лучших образцов достигало $40 \cdot 10^3$ В/Вт при комнатной температуре (297 К). Снижение чувствительности ФПУ с уменьшением температуры может быть объяснено изменением коэффициента использования излучения в связи с температурным сдвигом красной границы спектральной характеристики в коротковолновую область.

Для определения порога чувствительности и обнаружительной способности ФПУ были измерены шумовые характеристики. Исследования шумов проводились способом прямого измерения. На рисунке 4 приведены типичные зависимости спектральной плотности напряжения шума ФПУ в области положительных температур на частоте 800 Гц. Видно, что наблюдалась существенная зависимость спектральной плотности напряжения шума от температуры. Увеличение шумового сигнала ФПУ можно связать со снижением дифференциального сопротивления ФД при увеличении температуры.

Исследование шумовых свойств и чувствительности ФПУ позволяет определить его пороговые характеристики. Наиболее распространенной характеристикой является обнаружительная способность (D^*), которая определяется, как [7]:

$$D^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{\sqrt{U_{ш}^2}} S_u,$$

где: S_u – вольтовая чувствительность, A – площадь фотоприемника, Δf – полоса пропускания, U_w – спектральная плотность напряжения шума.

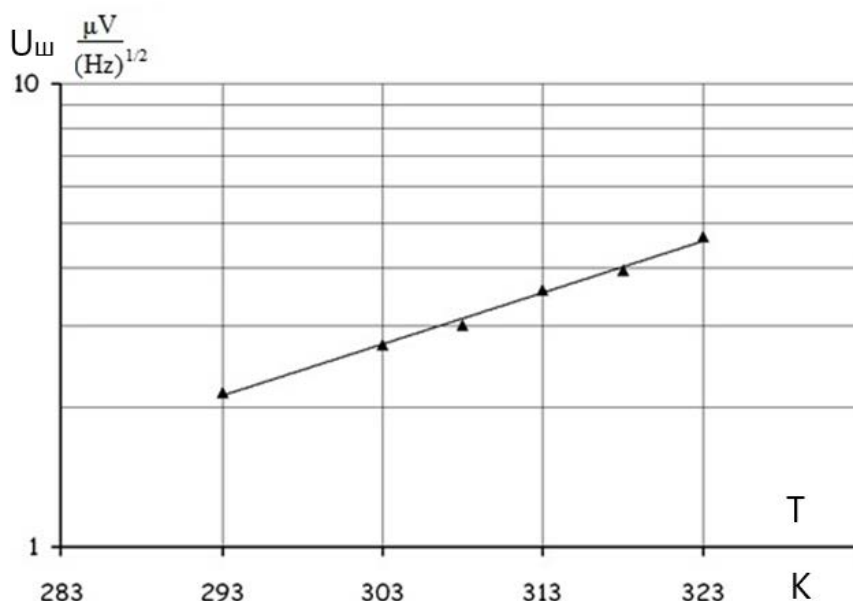


Рисунок 4. Температурная зависимость спектральной плотности шума ФПУ на частоте 800 Гц

При снижении температуры наблюдалось, с одной стороны, уменьшение коэффициента использования излучения АЧТ и снижение токовой чувствительности, а с другой – снижение уровня шумового тока. Вторая причина оказалась доминирующей, что привело в итоге к росту обнаружительной способности с охлаждением ФПУ. На рисунке 5 представлена температурная зависимость D^* . Как видно, наблюдалось 24 кратное изменение обнаружительной способности в исследованном диапазоне температур (от 220 до 330 К).

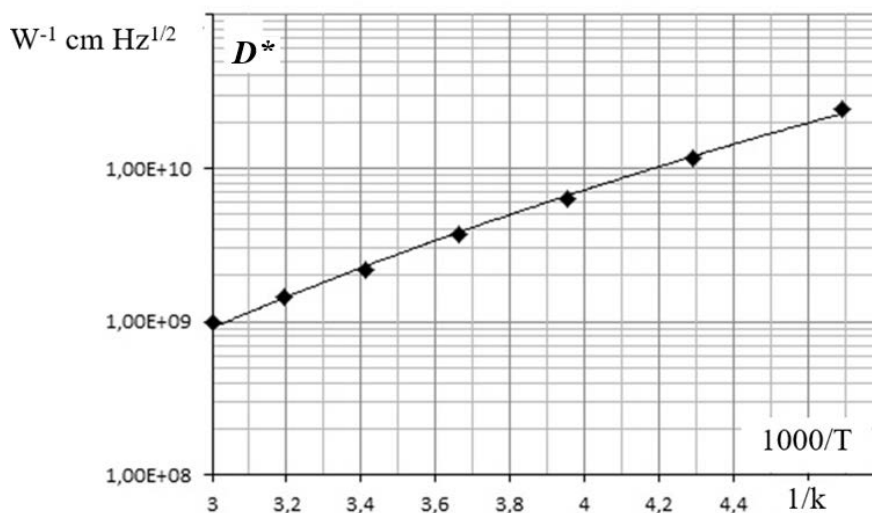


Рисунок 5. Температурная зависимость интегральной обнаружительной способности к АЧТ 800 К

Представляется интересным оценить обнаружительную способность ФПУ к монохроматическому излучению. При коэффициенте использования излучения для

комнатной температуры 2,4%. оценка дает значение $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = 9,4 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Это согласуется с данными [8], где для аналогичных фотодиодов приводятся близкие значения обнаружительной способности: $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = (8 - 10) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

На рисунке 6 приведены результаты измерения предела линейности световой характеристики. Для измерения предельного потока был использован принцип суперпозиции двух потоков излучения: слабого, модулированного потока от эталонного излучателя, амплитуда которого оставалась постоянной в процессе измерений, и мощного немодулированного потока фонового излучателя, величина которого могла регулироваться в широком интервале значений [9]. Величина фонового потока приведена в пересчете на монохроматическое излучение, в районе максимума спектральной чувствительности фотоприемника $\lambda = 2,1 \text{ мкм}$. Как видно, уменьшение дифференциальной токовой чувствительности на 10% происходило при высоких интенсивностях освещенности $R_0 = 0,02 \text{ Вт/см}^2$.

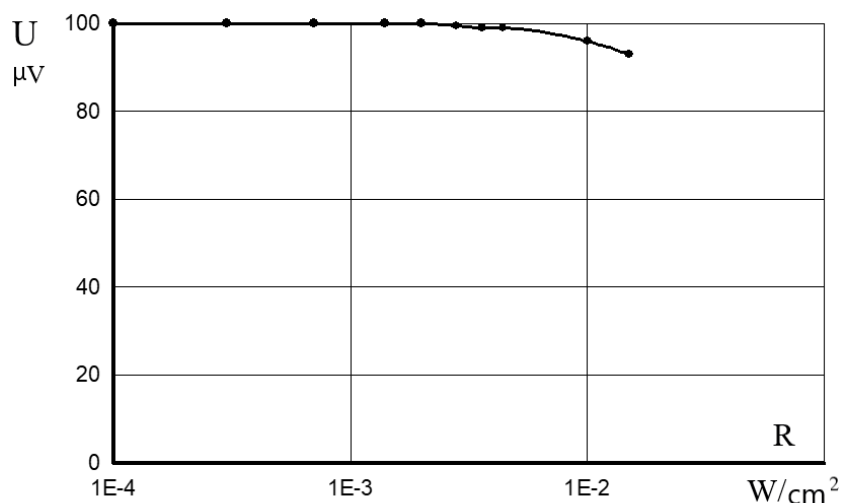


Рисунок 6. Зависимость выходного сигнала ФПУ от фоновой освещенности

Интересно оценить динамический диапазон фотоприемника по входному сигналу. Пороговый поток связан с обнаружительной способностью:

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{A \Delta f}}{D_\lambda^*}.$$

Если использовать найденное значение обнаружительной способности фотоприемника $9,4 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ и задаться полосой пропускания $\Delta f = 100 \text{ Гц}$, тогда для порогового потока получим:

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 100}}{9,4 \cdot 10^{10}} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Динамический диапазон ФПУ при размере чувствительной площадки $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ составит от $1,6 \cdot 10^{-12}$ до $4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$, или около 64 дБ.

Заключение

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высоких тактико-технических свойствах ФПУ на основе гетероэпитаксиальной структуры GaSb/InGaAsSb. Полученные зависимости важнейших характеристик могут быть полезны для практического применения изделия и для формирования технических требований при проектировании оптоэлектронных средств на основе таких ФПУ.

Список литературы

1. Tournie E., Pitard E., Joullie A., Fourcade R. High temperature liquid phase epitaxy of (100) oriented GaInAsSb near the miscibility gap boundary // Journal Crystal Growth. 1990. 104(3). 683-694. DOI: 10.1016/0022-0248(90)90012-A
2. Стоянов Н. Д., Михайлова М. П., Андрейчук О. В., Моисеев К. Д., Андреев И. А., Афраилов М. А., Яковлев Ю. П. Фотодиоды на основе гетеропереходов II типа в системе GaSb/InGaAsSb для спектрального диапазона 1.5-4.8 мкм // Физика и техника полупроводников. 2001. 35(4). 467-473.
3. Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Шленский А. А., Лунин Л. С., Ратушный В. И., Корюк А. В., Тараканова Н. Г. Свойства «иммерсионных» фотодиодов на основе GaInAsSb/GaSb ($\lambda=1.8-2.3$ мкм) в интервале температур 20-140°C // Физика и техника полупроводников. 2007. 41(11). 1389-1394.
4. Астахова А. П., Журтанов Б. Е., Именков А. Н., Михайлова М. П., Сиповская М. А., Стоянов Н. Д., Яковлев Ю. П. Длинноволновые фотодиоды на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb // Письма в журнал технической физики. 2007. 33(1). 23-29.
5. Амброзьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов / перевод с польского Н. И. Тюшкевича; под редакцией Б. Т. Коломийца. Москва: Советское Радио, 1970. 392 с.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная электроника: учебное пособие. Москва: Физматкнига, 2012. 363 с.
7. Хадсон Р. Инфракрасные системы / перевод с английского языка Б. Герчикова, Ю. Е. Голубчина, С. Г. Кинс; под редакцией Н. Н. Васильченко. Москва: Мир, 1972. 534 с.
8. Андреев И. А., Ильинская Н. Д., Куницына Е. В., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. Высокоэффективные фотодиоды на основе GaInAsSb / GaAlAsSb для спектрального диапазона 0.9-2.55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки // Физика и техника полупроводников. 2003. 37(8). 974 -979.
9. Гаврушко В. В., Сапожников А. А., Бондаренко Е. А., Раскин А. А. Авторское свидетельство № 1441894 СССР, МПК4F 01 К 25/10. Устройство для измерения предела линейности энергетической характеристики фотоприемника: опубл. 01.08.1988.

References

1. Tournie E., Pitard E., Joullie A., Fourcade R. High temperature liquid phase epitaxy of (100) oriented GaInAsSb near the miscibility gap boundary // Journal Crystal Growth. 1990. 104(3). 683-694. DOI: 10.1016/0022-0248(90)90012-A
2. Stoyanov N. D., Mikhaïlova M. P., Andreïchuk O. V., Moiseev K. D., Andreev I. A., Afrailov M. A., Yakovlev Yu. P. Photodiodes for a 1.5-4.8 μm spectral range based on type-II GaSb/InGaAsSb heterostructures // Semiconductors. 2001. 35(4). 453-458.

3. Karandashev S. A., Matveev B. A., Remennyi M. A., Shlenskii A. A., Lunin L. S., Ratushnyi V. I., Koryuk A. V., Tarakanova N. G. Properties of GaInAsSb/GaSb ($\lambda = 1.8\text{-}2.3\ \mu\text{M}$) immersion lens photodiodes at 20-140°C // Semiconductors. 2007. 41(11). 1369-1374.

4. Astakhova A. P., Zhurtanov B. E., Imenkov A. N., Mikhailova M. P., Sipovskaya M. A., Stoyanov N. D., Yakovlev Yu. P. Long-wavelength photodiodes based on n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb heterostructures // Technical Physics Letters. 2007. 33(1). 11-13.

5. Ambroziak A. Konstrukcja i Technologia Przyrzadzow Fotoelektrycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1967. (Russ. ed.: Amboziak A. Konstruktsiia i tekhnologiia poluprovodnikovyykh fotoelektricheskikh priborov [Design and technology for constructing photoelectric semiconductor devices]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1970. 392 p.)

6. Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Tverdotel'naia elektronika [Solid state electronics]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2012. 363 p.

7. Hudson R. Infrared System Engineering. Wiley (Interscience), New York, 1969. 642 p. (Russ. ed.: Khadson R. Infrakrasnye sistemy. Moscow. Mir Publ., 1972. 534 p.)

8. Andreev I. A., Il'inskaya N. D., Kunitsyna E. V., Mikhaïlova M. P., Yakovlev Yu. P. High-efficiency GaInAsSb / GaAlAsSb photodiodes for 0.9- to 2.55- μM spectral range with a large-diameter active area // Semiconductors. 2003. 37(8). 949-954.

9. Gavrushko V. V., Sapozhnikov A. A., Bondarenko E. A., Raskin A. A. Ustroistvo dlia izmereniia predela lineinosti energeticheskoi kharakteristiki fotopriemnika [Device for measuring the linear range of the radiant-power characteristic of a photodetector]. Authorship certificate USSR, no. 1441894, 1988.

Информация об авторах

Гаврушко Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru

Григорьев Александр Николаевич – заместитель генерального директора, ООО «Промышленные дроссели» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-7073-8762, Andrey.Sochilin@novsu.ru

Сапожников Александр Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0008-0911-6583, aleksandr.sapozhnikov@novsu.ru

Карачинов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru

Быстров Николай Егорович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-1998-8868, Nikolay.Bystrov@novsu.ru

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru