

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-122-130

УДК 621.383

# Исследования уровня внутреннего фона инфракрасного излучения на фотоприёмнике в криостате

ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ АЛДОХИН<sup>1</sup>✉, АНДРЕЙ РУДОЛЬФОВИЧ НОВОСЕЛОВ<sup>2</sup>,  
СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ХРЯЩЁВ<sup>3</sup>, ПЁТР ПОРФИРЬЕВИЧ ДОБРОВОЛЬСКИЙ<sup>4</sup>,  
КОНСТАНТИН ПАВЛОВИЧ ШАТУНОВ<sup>5</sup>

Филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения  
Российской академии наук, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники,  
Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>aldosha-pavel79@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2236-0459>

<sup>2</sup>novoselov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6822-3559>

<sup>3</sup>xzabc@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9884-9746>

<sup>4</sup>porfir@ngs.ru

<https://orcid.org/0009-0000-3705-4561>

<sup>5</sup>sconst@ngs.ru

<https://orcid.org/0009-0000-8586-8818>

## Аннотация

**Предмет исследования.** Два метода измерения уровня внутреннего фона инфракрасного излучения (8–12 мкм) на охлаждённом (до 77 К) фотоприёмнике с охлаждаемой до той же температуры цилиндрической диафрагмой в вакуумном криостате. Исследованы ограничения и возможности каждого метода. **Цель работы.** Эффективный метод измерения уровня внутренней фоновой облучённости фотоприёмника в охлаждённом вакуумном криостате. **Методология.** Первый метод — прямым измерением уровня внутреннего фона тепловизионной камерой, направленной на поверхность фотоприёмника, и второй — численным моделированием уровня внутреннего фона. **Основные результаты.** Прямое измерение уровня внутреннего фона тепловизионной камерой, направленной на поверхность фотоприёмника, сделано впервые. Измерения проведены двумя тепловизионными камерами: неохлаждаемой и охлаждаемой до той же температуры, что и фотоприёмник в вакуумном криостате с цилиндрической холодной диафрагмой (77 К). Выяснено, что на уровень внутреннего фона значительно влияет ИК излучение самой тепловизионной камеры, увеличивая его. Также стандартный объектив не отсекал проникновение внешнего ИК излучения в исследуемый криостат, где оно отражалось от края диафрагмы на фотоприёмник тепловизионной камеры. Таким образом, для измерения внутреннего фона необходимо применять охлаждаемую тепловизионную камеру и специальный объектив, исключающий попадание стороннего ИК излучения в криостат. Численное моделирование уровня внутреннего фона является эффективным, чувствительным к задаваемым параметрам методом: уменьшение коэффициента отражения внутренней поверхности цилиндрической диафрагмы в 3 раза (с 18,5 до 6%) или введение одной внутренней дополнительной диафрагмы (бленды) в неё снижает уровень внутреннего фона не менее, чем в 4 раза. Метод позволяет вычислять пространственное распределение уровня внутреннего фона для разных конструкций и форм холодной диафрагмы. **Практическая значимость.** Выяснение уровня внутреннего фона в криостате необходимо для оптимизации формы и конструкции диафрагмы, обеспечивающей минимальный уровень темнового тока и шума фотоприёмников, и, следовательно, повышения чувствительности тепловизора.

**Ключевые слова:** инфракрасное излучение, внутреннее фоновое излучение, охлаждаемый криостат, холодная диафрагма

**Ссылка для цитирования:** Алдохин П.А., Новоселов А.Р., Хрящёв С.В., Добровольский П.П., Шатунов К.П. Исследования разными методами уровня внутреннего фона инфракрасного излучения на фотоприёмнике в криостате // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 122–130. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-122-130>

**Коды OCIS:** 040.1240, 040.1490, 100.0100, 250.0040.

## Studies of the level of the internal background of infrared radiation on a photodetector in a cryostat

PAVEL A. ALDOKHIN<sup>1</sup>✉, ANDREW R. NOVOSELOV<sup>2</sup>, SERGEY V. KHRYASHCHEV<sup>3</sup>,  
PETER P. DOBROVOLSKY<sup>4</sup>, KONSTANTIN P. SHATUNOV<sup>5</sup>

*Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Technology and Design Institute of Applied Microelectronics, Novosibirsk, Russia*

<sup>1</sup>*aldosha-pavel79@yandex.ru*

*<https://orcid.org/0000-0002-2236-0459>*

<sup>2</sup>*novoselov@isp.nsc.ru*

*<https://orcid.org/0000-0001-6822-3559>*

<sup>3</sup>*xzabc@ya.ru*

*<https://orcid.org/0009-0004-9884-9746>*

<sup>4</sup>*porfir@ngs.ru*

*<https://orcid.org/0009-0000-3705-4561>*

<sup>5</sup>*sconst@ngs.ru*

*<https://orcid.org/0009-0000-8586-8818>*

### Abstract

**Subject of study.** Two methods for measuring the level of the internal background of infrared radiation (8–12 microns) on a cooled (up to 77K) photodetector with a cooled cylindrical diaphragm in a vacuum cryostat are presented. **Aim of study.** An effective method for measuring the level of internal background radiance on the photodetector in a cooled vacuum cryostat has been determined. **Methodology.** The first method is a direct measurement of the internal background radiance by a thermal imaging camera oriented to the surface of the photodetector, and the second method consists in a numerical simulation of the internal background radiance level. **Main results.** The direct measurement of the level of the photodetector internal background radiation by the thermal imaging camera oriented to the surface of the photodetector has been carried out for the first time. The measurements were carried out by two thermal imaging cameras: uncooled and cooled to the same temperature as the photodetector in the vacuum cryostat with the cylindrical cold diaphragm (77 K). It was found out that the level of the internal background radiation is significantly affected by IR radiation of the thermal imaging camera itself, increasing it. Also, the standard thermal imaging camera lens did not cut off the penetration of external IR radiation into the cryostat under study, where it was reflected from the edge of the diaphragm onto the thermal imaging camera photodetector. Thus, to measure the internal background radiation, it is necessary to use the cooled thermal imaging camera and a special lens that excludes the ingress of the outside IR radiation into the cryostat. Numerical modeling of the internal background radiation is an effective, sensitive to the specified parameters method: reducing the reflection coefficient of the inner surface of the cylindrical diaphragm by 3 times or introducing one internal additional diaphragm (lens hood) into it reduces the internal background radiation by at least 4 times. The method allows us to calculate the spatial distribution of the internal background radiation for different designs and forms of the cold diaphragm. **Practical significance.** Finding out the level of internal background radiation in the cryostat is necessary to optimize the shape and design of the diaphragm, which provides a minimum level of dark current and noise of photodetectors, and, consequently, the increase of the thermal imager sensitivity.

**Keywords:** infrared radiation, internal background radiation, cooled cryostat, cold diaphragm

**For citation:** Aldochin P.A., Novoselov A.R., Khryashchev S.V., Dobrovolsky P.P., Shatunov K.P. Studies of the level of the internal background of infrared radiation on a photodetector in a cryostat [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 122–130. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-122-130>

**OCIS codes:** 040.1240, 040.1490, 100.0100, 250.0040.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тепловизионные камеры для спектрального диапазона 8–12 мкм преимущественно изготавливают на основе гибридной сборки (ГС), состоящей из фотоприёмника и кремниевого мультиплексора [1, 2]. Фотоприёмник (ФП) в диапазоне 8–10 мкм на основе твёрдого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) необходимо охлаждать до 77–100 К, следовательно, гибридную сборку охлаждают до этих температур в вакуумном криостате [3].

Все элементы конструкции криостата и входного объектива, имеющие температуру выше температуры ФП, являются источником внутреннего инфракрасного (ИК) излучения [4, 5]. Это излучение создаёт внутреннюю фоновую облучённость на фотоприёмнике (ВФО), что увеличивает уровень темнового тока и шума фотоприёмника, и, следовательно, снижается чувствительность тепловизора [6].

Для минимизации внутренней фоновой облучённости ФП закрывается защитным экраном, закреплённым также как и гибридная сборка на охлаждаемом до рабочей температуры пьедестале вакуумного криостата. Информационная составляющая излучения без потерь проходит через диафрагму в защитном экране, обеспечивая входную апертуру элементов ФП. В область диафрагмы защитного экрана может быть установлен светофильтр. В литературе защитный охлаждаемый экран называют холодной диафрагмой (ХД).

Цель работы — эффективный метод измерения уровня внутренней фоновой облучённости фотоприёмника в охлаждённом вакуумном криостате. Рассмотрен вариант простой цилиндрической холодной диафрагмы. Спектральный диапазон исследования 8–12 мкм. Измерение ВФО необходимо для оптимизации формы и конструкции холодной диафрагмы, обеспечивающей минимальный уровень темнового тока и шума фотоприёмника, и, следовательно, повышения чувствительности гибридной сборки.

Первый метод — прямое измерение внутренней фоновой облучённости тепловизионной камерой (ТПК), направленной на поверхность фотоприёмника, и второй — использование численного моделирования. Численным методом выяснены влияние дополнительных внутренних диафрагм (бленд в ХД) и измене-

ние коэффициента отражения его внутренней поверхности на уровень внутренней фоновой облучённости.

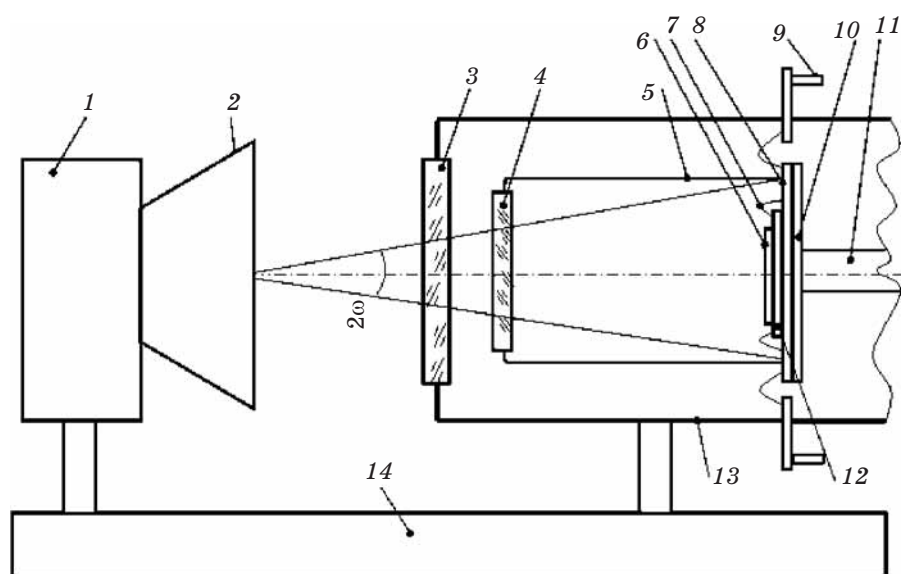
## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Первый метод

Был изготовлен исследовательский стенд, структурная схема которого показана на рис. 1, где 1 — регистрирующие ТПК на основе неохлаждаемой болометрической камеры (ТПК1) и охлаждаемого до температуры 77 К матричного фотоприёмника (ТПК2), 2 — входные ИК объективы ТПК1 и ТПК2 (для каждого ТПК свой) и 13 — исследуемый криостат. Фокусные расстояния ИК объективов ТПК определяли расстояние до фотоприёмника 6. Охлаждение 4, 5, 6, 8 и 12 осуществлялось отводом тепла через пьедестал 10, установленном на «холодном пальце» 11 в вакуумном криостате (НПО «Сапфир», Москва), конструкция которого аналогична описанной в [7]. Для охлаждения использована микрокриогенная система охлаждения (МСМГ-1,5А-0,4/80, Омск), работающая по циклу Стирлинга [8]. Исследования ВФО проводилось при температуре фотоприёмника, равной 77 К. Холодная диафрагма имела внутренний диаметр 20 мм и входное отверстие 10 мм. Внешняя поверхность ХД зеркальная — это необходимо для уменьшения поглощения излучения от холодильной машины и внешнего корпуса криостата, имеющего повышенную температуру. Внутреннее покрытие ХД — чёрный хром, 2008 г. [9, 10].

Регистрирующие ТПК1 — ИК камера фирмы «Indigo» (США) на основе болометрической матрицы и ТПК2 — камера, изготовленная в КТИПМ (Новосибирск) на основе твёрдого раствора КРТ матрицы ИФП СО РАН. Основные технические характеристики представлены в таблице. Объектом исследования было изменение теплового поля на и вокруг ФП при постепенном охлаждении пьедестала криостата до рабочей температуры. ТПК осуществляли постоянную запись теплового поля в криостате по мере охлаждения. Потом отдельные кадры были оцифрованы.

Частично материал был опубликован в трудах научных конференций (Новосибирск «ГЕО — СИБИРЬ — 2012 и 2014»).



**Рис. 1.** Структурная схема исследовательского стенда. 1 — болометрический или охлаждаемый ТПК; 2 — ИК объектив ТПК; 3 — защитное окно криостата; 4 — ИК фильтр во входном отверстии ХД; 5 — холодная диафрагма; 6 — ФП; 7 — проволочные контакты от кремниевого мультиплексора (поз. 12) к сапфировой (или поликоровой) переходной плате с токопроводящими шинами; 8 — плата разводки управляющих импульсов и постоянных напряжений для ГС; 9 — разъём для подключения криостата к электронным блокам работы ГС; 10 — пьедестал; 11 — «холодный палец»; 12 — кремниевый мультиплексор; 13 — корпус криостата; 14 — основание стенда

**Fig. 1.** Block diagram of the research stand. 1 — bolometric or cooled thermal image camera (TIC), 2 — IR lens of TIC; 3 — cryostat protective glass; 4 — IR filter at the cold diaphragm inlet; 5 — cold diaphragm; 6 — photodetector; 7 — wire contacts from a silicon multiplexer (position 12) to a sapphire (or polycore) adapter board with conductive busbars; 8 — control pulse and constant voltage wiring board for hybrid assembly; 9 — connector for connecting the cryostat to the electronic components of the hybrid assembly; 10 — pedestal; 11 — «cold finger»; 12 — silicon multiplexer; 13 — cryostat housing; 14 — stand base

Основные параметры ТПК1 и ТПК2  
The main parameters of thermal imaging cameras

Основные параметры	ТПК1	ТПК2
Рабочий спектральный диапазон, мкм	7,5–13,5	7,7–10,3
Размерность матрицы, элементов	164×128	320×256
Частота кадровой развёртки, Гц	30	50
Шаг матрицы, мкм	51	30
Температурное разрешение, NEDT, °K	Не более 0,085	0,05
Фокусное расстояние входного объектива, мм	16	30
Относительное отверстие входного объектива	1:1,6	1:2

## Второй метод

Использована программа моделирования оптических систем «ZEMAX» [11]. В работе [12] представлены результаты моделирования ВФО оптической системы тепловизора в данной программе. Авторы выяснили, что относитель-

ная систематическая ошибка при моделировании оптических систем не превышает 1,14% в сравнении с расчётами по аналитическим формулам. К сожалению, не было учтено влияние излучения криостата и холодной диафрагмы на ВФО. Мы исследовали это влияние.



При численном моделировании источник ИК излучения был расположен в области диафрагмы ХД и совпадал с её размерами. Источник имел изотропное (равномерное) пространственное распределение. В расчётах учитывались только те лучи, которые хотя бы один раз были рассеяны от внутренних стенок ХД с учётом коэффициента отражения выбранного поглощающего покрытия. В исследованиях первым методом использована ХД производства «Сапфир». В соответствии с [13] покрытия чёрным хромом не является оптимальным из-за явно выраженной зеркальной составляющей (интегральный коэффициент отражения около 18,5% в спектральном диапазоне 8–12 мкм). Поэтому одновременно с данным покрытием исследовано ВФО для поглощающего покрытия из взвеси частиц углерода (размером от 5 до 40 мкм) в лаке. Данное покрытие практически не обладает зеркальным отражением от поверхности (интегральный коэффициент отражения в диапазоне 8–12 мкм не более 6%).

Известно, что применение дополнительных диафрагм (бленд) в ХД не препятствуют прохождению информационной части излучения к фотоприёмнику, но позволяет уменьшить внутреннюю фоновую облучённость [14]. Поэтому дополнительно проведено моделирование уровня ВФО при разном количестве бленд. Для моделирования распределения и расчёта ВФО приняты следующие основные параметры:

- спектральный диапазон  $\lambda = 8\text{--}12$  мкм;
- интегральный коэффициент отражения ИК излучения от тыльной стороны ФП (GaAs) не более 30%;
- количество трассируемых лучей  $N = 25000000$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Первый метод

На рис. 2 представлены кадры с ТПК изменения теплового поля в криостате в процессе охлаждения и при температуре 77 К и распределения уровней сигнала в строках, выделенных линиями на фотографиях. На рис. 2а, 2в тепловое поле регистрировалось ТПК1 и на рис. 2б и 2г — ТПК2. На фотографиях 2а и 2б видны контуры ФП, кремниевого мультиплексора и поликоровой платы с контактами. На рис. 2в и 2г — ФП, кремниевый мультиплексор и

поликоровая плата с контактами охлаждены до 77 К, их контуры видно не столь чётко. Цифрами обозначены три характерных области. Центральные области (поз. 1) в зависимости от ТПК — светлое пятно (рис. 2в) или тёмное, поз. 3 — светлые области и поз. 2 — промежуточные круговые области. Линии на изображении показывают строку, которая была оцифрована, и результат представлен на рис. 2г и 2д соответственно.

### Второй метод

На рис. 3 показаны уровни ВФО в плоскости фотоприёмника при коэффициентах отражения внутренней поверхности цилиндрической холодной диафрагмы, равных 6 и 18,5%. Центр координат совпадает с центром ХД.

На рис. 4 представлено изменение уровней ПФО при разном количестве бленд в цилиндрической холодной диафрагме. Центр координат совпадает с центром ФП. Цифры на графиках указывают на количество бленд.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА

### Первый метод

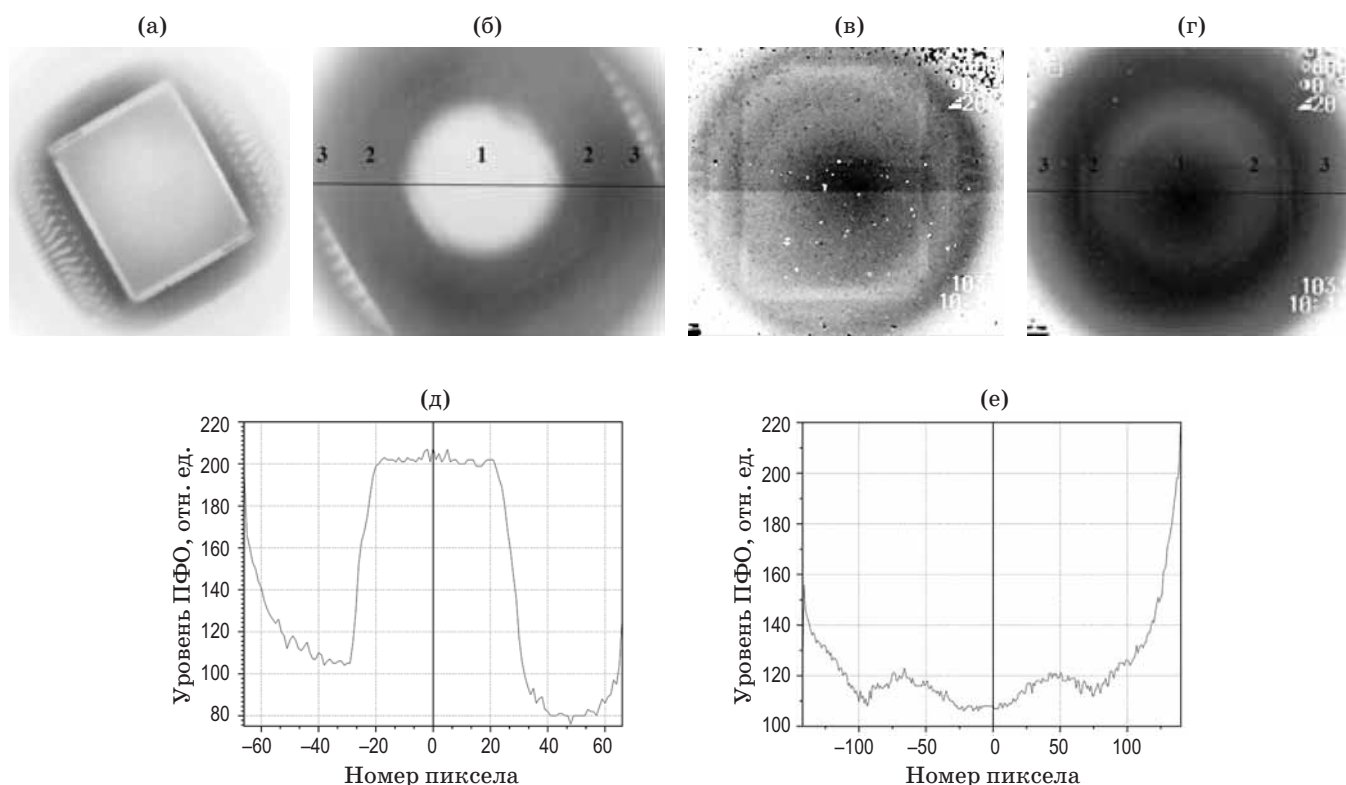
Измеряемый уровень ВФО в проводимом исследовании является суммой сигналов:

- собственного излучения от конструктивных элементов и ХД в исследуемом криостате;
- излучения входных объективов ТПК;
- излучения фотоприёмников ТПК.

Кроме этого объективы ТПК1 и ТПК2 не позволили отсечь край корпуса вакуумного криостата (рис. 1, поз. 13) вокруг защитного окна (рис. 1, поз. 3), имеющего комнатную температуру, что видно на фотографиях рис. 2.

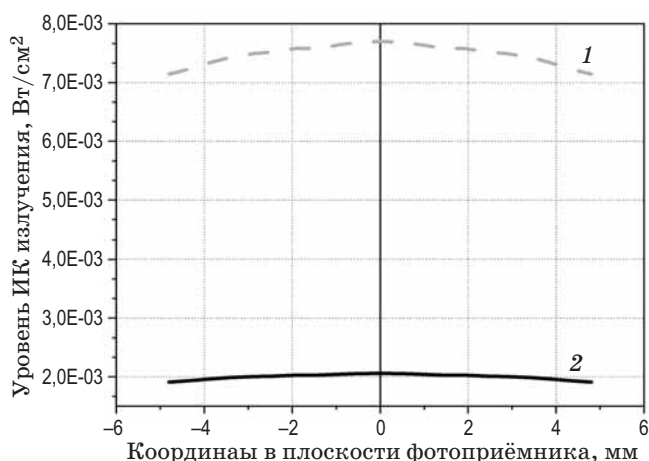
Поэтому на изображении уровня ВФО в исследуемом криостате выделяются три характерные области:

Первая область (поз. 1) — пятно от сфокусированного изображения фотоприёмной матрицы ТПК и, предположительно, окружающей её области, которые отражаются от поверхности исследуемого ФП. Таким образом, фоточувствительные матрицы ТПК являются источниками ИК излучения, которое отражается от поверхности исследуемого фотоприёмника обратно. В первом случае температура болометрической фотоприёмной матрицы ТПК1 выше температуры исследуемой



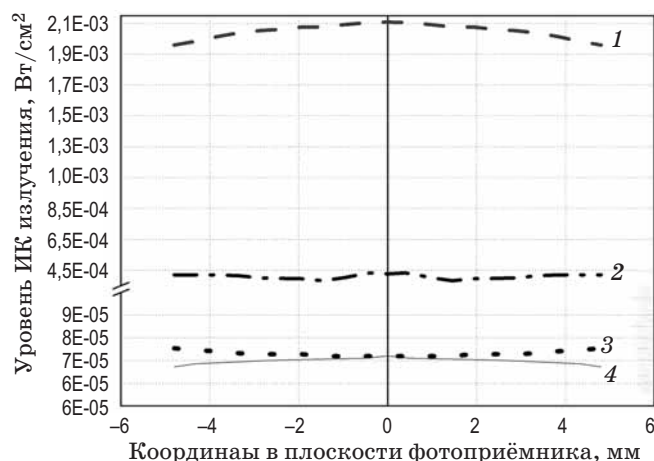
**Рис. 2.** Тепловизионные изображения ФП, кремниевый мультиплексор и поликорвая переходная плата с токопроводящими шинами в процессе охлаждения столика криостата (а, б); при температуре столика 77 К (в, г); уровни ВФО в выделенной строке (д, е)

**Fig. 2.** Thermal imaging images of a photodetector, a silicon multiplexer and a polycore adapter board with conductive buses. (а, б) In the process of cooling the cryostat table; (в, г) the temperature of the table is 77 К; (д, е) the levels of internal background irradiance in the highlighted line



**Рис. 3.** Распределения уровня ВФО в плоскости ФП с коэффициентами отражения внутренней поверхности цилиндрической холодной диафрагмы, равных 6% (кривая 1) и 18,5% (кривая 2)

**Fig. 3.** Level of IBR distributions in the AF plane with reflection coefficients of the inner surface of the cylindrical cold diaphragm equal to 6% (curve 1) and 18.5% (curve 2)



**Рис. 4.** Изменения уровня ВФО в плоскости ФП для разного количества бленд. Кривая 1 — без бленд, кривая 2 — 1 бленда, кривая 3 — 2 бленды и кривая 4 — 3 бленды

**Fig. 4.** Changes in the level of IBR in the AF plane for a different number of blends. Curve 1 — without blends, curve 2 — 1 blend, curve 3 — 2 blends and curve 4 — 3 blends

гибридной сборки (яркое пятно в центре, см. рис. 2д). Во втором случае фотоприёмная матрица ТПК2 охлаждена до той же температуры, какую имеет исследуемая гибридная сборка. Уровень излучения составил для болометрического ТПК1 190 отн. ед. и около 10 отн. ед. для ТПК2. Таким образом, собственное излучение ТПК1 не позволяет измерить ВФО. Уровень собственного излучения ТПК2, возможно, не препятствует измерению ВФО.

Вторая область (поз. 2) — вероятно, вызвано отражением ИК излучения внутренней поверхности корпуса исследуемого криостата от внешнего торца ХД в ТПК. Изображение является расфокусированным, что видно по характерному распределению отражённого сигнала (светлое пятно в виде «размытого» кольца, см. рис. 2е).

Мы провели моделирование хода оптических лучей в системе ТПК — криостат, которое подтверждает данное предположение.

Третья область (края, поз. 3) — измеренный уровень излучения от расфокусированного изображения внешней поверхности криостата.

Различия в тепловизионных изображениях при выходе на рабочий режим и при рабочем режиме работы ФП объясняется постепенным охлаждением ФП и уменьшением уровня собственной внутренней фоновой облучённости, возникающей внутри исследуемого криостата. Анализ уровней сигналов — на рис. 2д и 2е.

## Второй метод

Результатом применения покрытия из частиц углерода в лаке является значительное снижение уровня ВФО после многократных отражений излучения от поверхности холодной диафрагмы до 4-х раз по сравнению с покрытием «чёрный хром».

Введение бленд в ХД заметно снижает уровень внутреннего облучения фотоприёмника (не менее чем в 20 раз). Наиболее оптимальным количеством бленд можно считать 2 или 3, различие уровней ПФО между ними составляет не более  $10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Исследованы уровни внутреннего фона инфракрасного излучения на фотоприёмнике

в охлажденном вакуумном криостате с цилиндрической холодной диафрагмой в спектральном диапазоне 8–12 мкм двумя методами. Выяснены ограничения и возможности каждого метода, а именно:

1. Прямое измерение ВФО тепловизионной камерой, направленной на поверхность фотоприёмника. Измерения ВФО было проведено двумя тепловизионными камерами: неохлаждаемой и охлаждаемой до той же температуры, что и фотоприёмник в охлажденном вакуумном криостате с цилиндрической холодной диафрагмой. Данный метод не эффективен из-за влияния на уровень ВФО излучения измерительной тепловизионной камеры.

Также было выяснено, что применяемые объективы не полностью отсекали проникновение в оптический тракт внешнего ИК излучения, которое отражалось от ХД внутри исследуемого криостата на фотоприёмник ТПК (зона 2 на рис. 2).

Применение охлаждаемой тепловизионной камеры и объектива, ограничивающего проникновение внешнего ИК излучения, вероятно, позволит измерить уровень и распределение ВФО, но это требует дополнительных исследований. Однако в процессе исследования ВФО тепловизионными камерами были выявлены технологические несовершенства конструкций исследуемых криостатов [15].

2. Численное моделирование ВФО. Выяснено, что на уровень ВФО влияет коэффициент отражения внутреннего покрытия холодных диафрагм. Для ТПК2 (НПО «Сапфир», Россия) интегральный коэффициент отражения покрытия «чёрный хром» образца 2008 г. составлял 18,5%. При замене его на покрытие из частиц углерода в лаке (КТИПМ, Россия), имеющий интегральный коэффициент отражения около 6%, ВФО уменьшится в четыре раза. Дополнительное введение одной внутренней диафрагмы (бленды) в холодную диафрагму снижает уровень ВФО на фотоприёмнике также в 4 раза.

Наибольшее снижение ВФО в исследуемом криостате было при замене внутреннего покрытия ХД «чёрный хром» на частицы углерода в лаке и введении дополнительных 3-х бленд. ВФО уменьшается с  $7,7 \times 10^{-3}$  до  $0,7 \times 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Данный математический метод является эффективным для исследования ВФО. Он будет

использован в исследовании ВФО при разных формах и конструкциях охлаждаемых диафрагм для повышения чувствительности тепловизора. Для верификации данного ме-

тода изготавливается лабораторный стенд, позволяющий выяснить уровень ВФО разных форм и конструкций ХД самим фотоприёмником.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зверев А.В., Сусляков А.О., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В., Кузьмин В.Д., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Макаров Ю.С., Предеин А.В., Горшков Д.В., Дворецкий С.А., Васильев В.В., Сидоров Ю.Г., Латышев А.В., Кремис И.И. Матричные фотоприемные устройства формата 384×288 элементов для ИК диапазона 8–10 мкм // *Успехи прикладной физики*. 2018. Т. 6. № 3. С. 224–230. <https://doi.org/10.1134/S1064226919090171>
2. Предеин А.В., Сидоров Ю.Г., Сабина И.В., Васильев В.В., Сидоров Г.Ю., Марчишин И.В. Высококачественные длинноволновые инфракрасные матричные ФПУ формата 320×256 элементов на основе слоев CdHgTe, выращенных методом МЛЭ // *Автометрия*. 2013. Т. 49. № 5. С. 78–85.
3. Васильев В.В., Овсюк В.Н., Шашкин В.В., Асеев А.Л. Инфракрасные фотоприемные модули на варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72. № 6. С. 63–69.
4. Патрашин А.И. Теоретическое исследование фоновых облученностей ИК МФЧЭ с холодными диафрагмами заданных типов // *Прикладная физика*. 2011. № 3. С. 98–106.
5. Патрашин А.И. Инфракрасное фотоприемное устройство с оптимальной диафрагмой // *Прикладная физика*. 2011. № 4. С. 65–70.
6. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // *Progress in Quantum Electronics*. 2012. V. 36. P. 342–473.
7. Кузнецов Н.С. Проектирование и технология изготовления ВВК и стыковки с ГКМ. Курс лекций. М: Исследовательский технологический университет «МИС и С», 2021. 46 с.
8. Bo Yi Song, Kai Luo, Hui Tao Yang, Kan Qin, Wang Li. Thermodynamic performance analysis of stirling engine with a nodal analysis method // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 712–715. P. 1625–1629. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.712-715.1625>
9. Хитрова Л.М., Лопухин А.А., Савостин А.В., Марусова И.Н., Касаткин И.Л. Охлаждаемый матричный фотоприемник ИК излучения с диафрагмой и способ изготовления диафрагмы // *Патент РФ RU 2 377 694 C1*. 2009.
10. Ефимова З.Н., Ефимов И.В., Мансветов Н.Г., Власов П.В., Лопухин А.А., Киселева Л.В., Савостин А.В. ИК матричный фотоприёмник с охлаждаемой диафрагмой и способ изготовления диафрагмы // *Патент РФ RU 2 571 171 C1*. 2015.
11. ZEMAX 13. Optical design program. User's manual. 2015. June 24. 805 p.
12. Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Юдин А.Н. Метод оценивания внутреннего излучения оптических трактов инфракрасных систем // *Радиотехника. Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. № 12. С. 28–37.
13. Новоселов А.Р., Алдохин П.А., Добровольский П.П., Гусаченко А.В., Новгородов Б.Н., Шатунов К.П.,

## REFERENCES

1. Zverev A.V., Suslyakov A.O., Sabina I.V., Sidorov G.Y., Yakushev M.V., Kuzmin V.D., Varavin V.S., Craftsman V.G., Makarov Yu.S., Pride in A.V., Gorshkov D.V., Dvoretzky S.A., Vasiliev V.V., Sidorov Yu.G., Latshev A.V., Kremis I.I. LWIR 384×288 FPA for the infrared range of 8–10 μm // *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*. 2018. V. 6. № 3. P. 224–230. <https://doi.org/10.1134/S1064226919090171>
2. Predein A.V., Sidorov Yu.G., Sabinina I.V., Vasiliev V.V., Sidorov G.Yu., Marchishin I.V. High-performance 320×256 long-wavelength infrared photodetector arrays based on CdHgTe layers grown by molecular beam epitaxy // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2013. V. 49. № 5. P. 78–85.
3. Vasiliev V.V., Ovsiuk V.N., Shashkin V.V., Aseev A.L. Infrared photodetector modules based on variband layers of HgCdTe and on structures with GaAs/AlGaAs quantum wells // *Journal of Optical Technology*. 2005. V. 72. № 6. P. 63–69. <https://doi.org/10.1364/JOT.72.000474>
4. Patrashin A.I. The theoretical research of the background irradiation of an IR array with the specific cold shields // *Applied Physics*. 2011. № 3. P. 98–106.
5. Patrashin A.I. IR array photodetector with the cold stop // *Applied Physics*. 2011. № 4. P. 65–70.
6. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // *Progress in Quantum Electronics*. 2012. V. 36. P. 342–473.
7. Kuznetsov N.S. Design and manufacturing technology of vacuum cryostats and docking with a gas cryogenic machine. Course of lectures. M: National University of Science and Technology "MISIS", 2021. 46 p.
8. Bo Yi Song, Kai Luo, Hui Tao Yang, Kan Qin, Wang Li. Thermodynamic performance analysis of stirling engine with a nodal analysis method // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 712–715. P. 1625–1629.
9. Khitrova L.M., Lopukhin A.A., Savostin A.V., Marusova I.N., Kasatkin I.L. Cooled matrix infrared photodetector with diaphragm and diaphragm manufacturing method // *Patent of the Russian Federation RU 2377694C1*. 2009.
10. Efimova Z.N., Efimov I.V., Mansvetov N.G., Vlasov P.V., Lopukhin A.A., Kiseleva L.V., Savostin A.V. Infrared matrix photodetector with a cooled diaphragm and the method of manufacturing the diaphragm // *Patent of the Russian Federation RU 2 571 171 C1*. 2015.
11. ZEMAX 13. Optical design program. User's Manual. 2015. June 24. 805 p.
12. Makarenko A.V., Pravdivtsev A.V., Yudin A.N. A method for estimating the internal parasitic radiation of optical paths of infrared systems. M: «Radio Engineering». *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2009. № 12. P. 28–37.
13. Novoselov A.R., Aldokhin P.A., Dobrovolsky P.P., Gusachenko A.V., Novgorodov B.N., Shatunov K.P., Churilov S.M. Investigation of infrared radiation reflection by diaphragms in thermal imaging devices //



- Чурилов С.М. Исследование отражения диафрагмами ИК излучения в тепловизионных приборах // Автометрия. 2021. Т. 57. № 3. С. 117–125. <https://doi.org/10.15372/AUT20210313>
14. Колосов М.П. Борьба с боковыми помехами в оптико-электронных приборах // Сборник статей под ред. В.В. Тарасова и Ю.Г. Якушенкова / М: «Алтей и К», 2001. Вып. 1. С. 161.
15. Novoselov A.R., Dobrovolsky P.P., Khryashchev S.V., Shatunov K.P., Aldokhin P. A. Investigation of parasitic background IR radiation levels on a photodetector surface in a vacuum cryostat // Proceeding IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Science (SIBIRCON). 2022. P. 1470–1473. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016953>
- Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2021. V. 57. № 3. P. 117–125. <https://doi.org/10.15372/AUT20210313>
14. Kolosov M.P. Combating side interference in optoelectronic devices // Collection of articles edited by V.V. Tarasov and Yu.G. Yakushenkov. Number 1. M: «Alтей and K», 2001. P. 161.
15. Novoselov A.R., Dobrovolsky P.P., Khryashchev S.V., Shatunov K.P., Aldokhin P. A. Investigation of parasitic background IR radiation levels on a photodetector surface in a vacuum cryostat // Proceeding IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Science (SIBIRCON). 2022. P. 1470–1473. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016953>

## АВТОРЫ

**Павел Алексеевич Алдохин** — младший научный сотрудник, Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 57209322015, <https://orcid.org/0000-0002-2236-0459>, [aldosha-pavel79@yandex.ru](mailto:aldosha-pavel79@yandex.ru)

**Андрей Рудольфович Новоселов** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 7004454457, <https://orcid.org/0000-0001-6822-3559>, [novoselov@oesd.ru](mailto:novoselov@oesd.ru)

**Сергей Валерьевич Хрящёв** — ведущий инженер, Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 57208176263, <https://orcid.org/0009-0004-9884-9746>, [xzabc@ya.ru](mailto:xzabc@ya.ru)

**Петр Порфирьевич Добровольский** — канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер, Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 57222759747, <https://orcid.org/0009-0000-3705-4561>, [porfir@ngs.ru](mailto:porfir@ngs.ru)

**Константин Павлович Шатунов** — заведующий отделом тепловидения и телевидения, Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6505962026, <https://orcid.org/0009-0000-8586-8818>, [sconst@ngs.ru](mailto:sconst@ngs.ru)

## AUTHORS

**Pavel A. Aldokhin** — Junior Researcher, Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics”, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 57209322015, <https://orcid.org/0000-0002-2236-0459>, [aldosha-pavel79@yandex.ru](mailto:aldosha-pavel79@yandex.ru)

**Andrew R. Novoselov** — PhD, Senior Researcher, Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics”, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7004454457, <https://orcid.org/0000-0001-6822-3559>, [novoselov@oesd.ru](mailto:novoselov@oesd.ru)

**Sergey V. Khryashchev** — Lead Engineer, Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics”, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 57208176263, <https://orcid.org/0009-0004-9884-9746>, [xzabc@ya.ru](mailto:xzabc@ya.ru)

**Peter P. Dobrovolsky** — Phd in Physics and Mathematics, Lead Engineer, Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics”, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 57222759747, <https://orcid.org/0009-0000-3705-4561>, [porfir@ngs.ru](mailto:porfir@ngs.ru)

**Konstantin P. Shatunov** — Managing Department of Thermal Imaging and Television, Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics”, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6505962026, <https://orcid.org/0009-0000-8586-8818>, [sconst@ngs.ru](mailto:sconst@ngs.ru)

Статья поступила в редакцию 27.09.2023  
Одобрена после рецензирования 12.12.2023  
Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 27.09.2023  
Approved after review 12.12.2023  
Accepted for publication 29.12.2023