



Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития

Часть 1

В. Н. А. Кульчицкий^{1,2}, А. В. Наумов³, В. В. Старцев³

¹ Московский технологический университет (МИРЭА),
Москва, Россия

² ГНЦ РФ АО «НПО «ОРИОН», Москва, Россия

³ АО «ОКБ «Астрон», Лыткарино, Моск. обл., Россия

В обзоре рассмотрены инфракрасные детекторы тепловизионной техники. Устройства востребованы в системах и комплексах гражданской и медицинской термографии, охранного и пожарного наблюдения, персональных системах ночного видения и обеспечения безопасности. Представлено сравнение фотонных и тепловых детекторов разного типа от разных мировых производителей. Дан экспертный прогноз изменений динамики роста рынка и тенденций его постпандемического развития.

Ключевые слова: тепловизоры, болометры, фотонные детекторы

Статья получена: 08.04.2020

Принята к публикации: 20.04.2020

ВЕДЕНИЕ

С момента своего возникновения рынок инфракрасной (ИК) тепловизионной техники рос прежде всего из-за своих военных приложений. Сегодня военный сектор по-прежнему обеспечивает рынку некоторый рост, но парадигма его развития изменилась. Теперь основной рост рынку обеспечивают сектора гражданской и медицинской термографии, охранного и пожарного наблюдения, персональные системы ночного видения и локальные

Infrared Focal Plane Array Detectors: “Post Pandemic” Development Trends

Part 1

N. A. Kulchitsky^{1,2}, A. V. Naumov³, V. V. Startsev³

¹ Moscow Technological University (Moscow Institute of Radio,
Electronics and Automatics, MIREA), Moscow, Russia

² State Scientific Center of the Russian Federation, NPO
ORION JSC, Moscow, Russia

³ Astron Design Bureau JSC, Lytkarino, Moscow Region, Russia

The review deals with infrared detectors of thermal imaging technology. The devices are in demand in systems and complexes of civil and medical thermography, security and fire surveillance, personal night vision and security systems. A comparison of photonic and thermal detectors of various types by different world manufacturers is presented. An expert forecast of changes in market growth dynamics and trends of its post pandemic development is given.

Keywords: thermal imagers, bolometers, photon detectors

Received on: 08.04.2020

Accepted on: 20.04.2020

INTRODUCTION

Since its inception, the market for infrared (IR) thermal imaging equipment has grown, primarily, due to its military applications. Today, the military sector still provides some growth for the market, but its development paradigm has changed. Now the main growth in the market is provided by the sectors of civil and medical thermography, security and fire surveillance, personal night vision systems and local security niches (municipal, private, etc.). The devices using thermal imagers make it possible to detect in conditions of poor visibility, to detect people with high temperature in the crowd (Fig. 1) [1, 2].

ниши безопасности (муниципальные, частные и пр.). Устройства с использованием тепловизоров позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости, обнаруживать людей с повышенной температурой в толпе (рис. 1) [1, 2].

По «допандемическому» прогнозу фирмы Maxtech International (США) и сегодняшним оценкам авторов, рынок ИК-систем (гражданских и военных), составив 10,5 млрд долларов в 2017 году, в 2025 году может достигнуть 20 млрд долларов. Из-за пандемии прогнозы Maxtech International были пересчитаны нами в сторону увеличения для среднесрочной перспективы. Как нам представляется, спад в данном секторе, если и произойдет, будет краткосрочным (рис. 2).

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Тепловизионные приборы можно разделить на две части: более и менее чувствительные. В более чувствительных приборах используют фотонные детекторы (охлаждаемые и неохлаждаемые), в менее чувствительных – тепловые (неохлаждаемые) детекторы (микроболометры). В данной статье будут рассмотрены только некоторые свойства и характеристики широко применяемых в настоящее время детекторов, а также возможные перспективы развития рынка их использования в связи с постпандемической ситуацией.

Инфракрасные камеры воссоздают образ теплового объекта по сигналам от первичных детекторов теплового излучения. Инфракрасная энергия от объектов сцены фокусируется оптической системой на ИК-детектор. Информация от него передается на электронную систему обработки изображения, которое затем транслируется на стандартный видеозэкран. В любом детекторе поглощенное электромагнитное излучение приводит к возникновению или изменению электрического сигнала [1, 2]. Это поглощенное излучение возбуждает или нагревает электронную или решеточную подсистемы детекторов, что приводит к изменениям их физических свойств или изменениям в распределении электронов по энергиям. Как результат изменяется движение заряженных носителей. Такие изменения влекут за собой изменение физических параметров приемников, что фиксирует детектор.

В фотонных детекторах (а это в основном полупроводниковые детекторы) излучение поглощается непосредственно чувствительным к данной длине волны излучения материалом. Механизм взаимодействия излучения с электро-

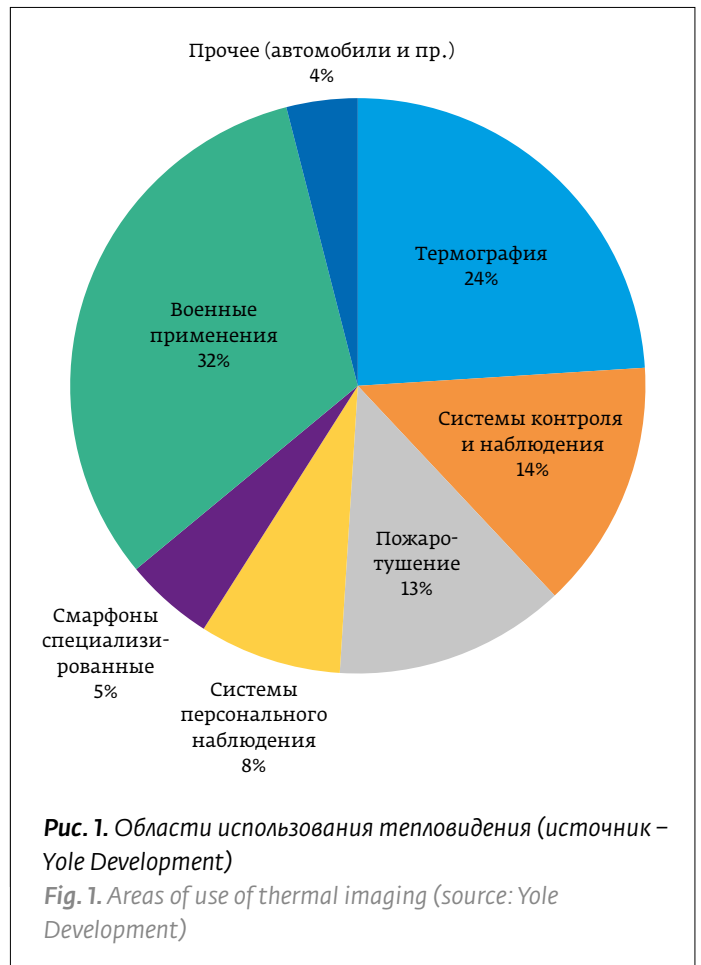


Рис. 1. Области использования тепловидения (источник – Yole Development)

Fig. 1. Areas of use of thermal imaging (source: Yole Development)

According to the “pre-pandemic” forecast of Maxtech International (USA) and today’s estimates of the authors, the market for infrared systems (civil and military) amounted to 10.5 billion dollars in 2017, and could reach 20 billion dollars by 2025. Due to the pandemic, we have restated the Maxtech International’s

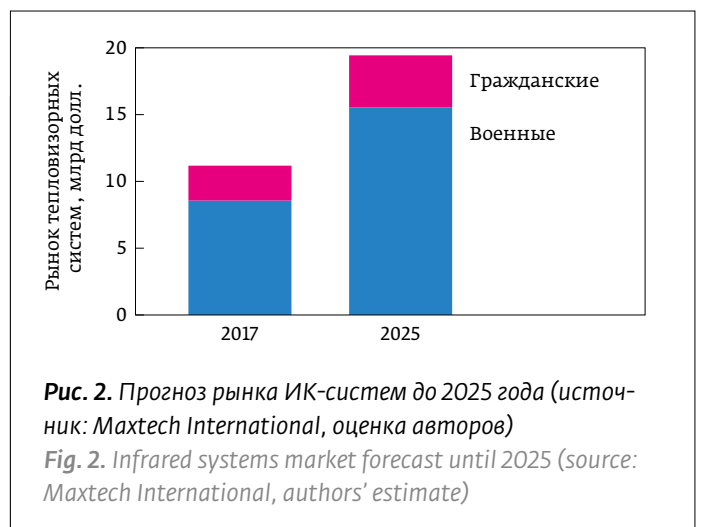


Рис. 2. Прогноз рынка ИК-систем до 2025 года (источник: Maxtech International, оценка авторов)

Fig. 2. Infrared systems market forecast until 2025 (source: Maxtech International, authors' estimate)

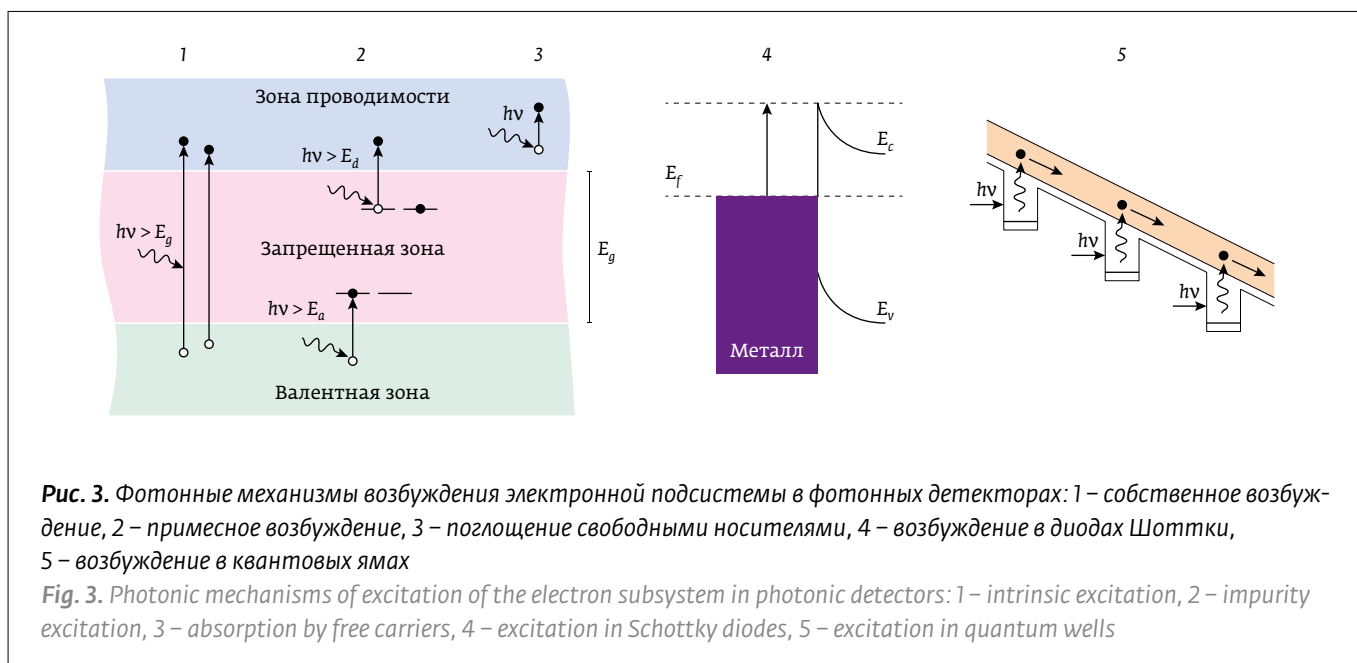


Рис. 3. Фотонные механизмы возбуждения электронной подсистемы в фотонных детекторах: 1 – собственное возбуждение, 2 – примесное возбуждение, 3 – поглощение свободными носителями, 4 – возбуждение в диодах Шоттки, 5 – возбуждение в квантовых ямах

Fig. 3. Photonic mechanisms of excitation of the electron subsystem in photonic detectors: 1 – intrinsic excitation, 2 – impurity excitation, 3 – absorption by free carriers, 4 – excitation in Schottky diodes, 5 – excitation in quantum wells

нами материалов детектора схематично изображен на рис. 3. Условно разделим электроны на те, которые связаны с атомами кристаллической решетки (находящиеся в валентной зоне – это «собственные» детекторы), на связанные с атомами примесей (это «несобственные» или примесные детекторы) и свободные носители (детекторы на свободных носителях), находящиеся внутри валентной зоны или зоны проводимости, и также те, которые в металле находятся вблизи границы металл-полупроводник. На изменении подвижности последних базируется принцип работы фотоэмиссионных Шоттки-детекторов (SBD – Schottky Barrier Diode детекторы). То есть фотонные детекторы реагируют только на фотоны, энергия которых превышает некоторые пороговые значения, например ширину запрещенной зоны полупроводника («собственные» детекторы), энергию переходов в квантовых ямах (КЯ), квантовых точках (КТ) и сверхрешетках (СР), высоту барьера $q\varphi_b$ в детекторах на основе диодов Шоттки. Количество носителей заряда, генерируемых в фотонном детекторе за счет поглощения падающего излучения, может измеряться непосредственно в виде сигнала напряжения или тока. Отклик квадратичных фотонных детекторов пропорционален числу поглощенных фотонов (поглощенная интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля).

Принцип работы тепловых детекторов основан на изменении электрических характеристик

forecasts upwardly for the medium term. It seems to us that the recession in this sector will be short-term, even if it happens. (Fig. 2).

CLASSIFICATION OF INFRARED DETECTORS

Thermal imaging devices can be classified into two groups: more and less sensitive. Photonic detectors (cooled and uncooled) are used in the devices that are more sensitive; thermal (uncooled) detectors (microbolometers) are used in the devices that are less sensitive. In this article, we consider only some properties and characteristics of the currently widely used detectors, as well as possible prospects for the development of the market for their use in connection with the post-pandemic situation.

The infrared cameras recreate the image of a warm object using signals from primary thermal radiation detectors. Infrared energy from scene objects is focused by the optical system onto an IR detector. It transmits information to an electronic image processing system, which then transmits it to a standard video screen. In any detector, the absorbed electromagnetic radiation leads to the appearance or change of an electrical signal [1, 2]. This absorbed radiation excites or heats the electronic or lattice subsystems of the detectors, which leads to changes in their physical properties or changes in the electron energy distribution. As a result, the movement of charged carriers changes. Such changes entail a change in the physical parameters of the detectors, which fixes the detector.

приемника за счет энергии поглощенного теплового излучения. Падающее излучение нагревает материал, что приводит к изменению электронной подвижности и соответственно к изменению сопротивления. Прямого взаимодействия фотонов с электронами материала в данном случае нет [1, 2].

Почти до конца 20-го века развитие ИК-технологий определялось доминирующим вкладом фотонных детекторов. Существенным недостатком ИК-фотонных детекторов является необходимость криогенного охлаждения. Это вызвано требованием предотвратить тепловую генерацию носителей заряда. Она является источником шумов, ограничивающих параметры приемников излучения. Вторая революция в ИК-видении началась в последние десятилетия 20-го века. На протяжении периода с конца 1970-х – начала 1990-х годов несколько компаний приступили к выпуску неохлаждаемых тепловых детекторов, работающих на различных принципах обнаружения тепловых потоков (ИК-излучения). Такой технологической прорыв позволил создавать крупноформатные массивы (матрицы) приемников ИК-излучения.

По сравнению с фотонными детекторами тепловые детекторы во второй половине XX века применялись в меньшей степени. Причина заключалась в том, что они работали относительно медленно (время ответа $\tau > 5 \cdot 10^{-2}$ с), и их чувствительность была ниже. Но переход к выпуску чувствительных пикселей меньших размеров позволил значительно сократить время отклика. На сегодня тепловая константа времени τ может составлять около ~20 мс и менее. Начиная с конца 1970-х на рынке отмечается значительный сдвиг, связанный с прогрессом в увеличении количества элементов в линейных и матричных детекторах. Это делало их выпуск гораздо более экономически эффективным в первую очередь благодаря применению кремниевых интегральных схем считывания и обработки информации (Read out Integrated Circuits – ROICs). Интеграция таких схем с разными типами детекторов позволила создавать матричные фотоприемные устройства (МФПУ). В ИК-матрицах ФПУ насчитывается до 10^8 ИК-детекторов, что соответствует числу чувствительных рецепторов в человеческом глазу ($\sim 2 \cdot 10^8$).

Начиная с 2000-х годов микроболлометры уже преобладали на рынке детекторов для неохлаждаемых и относительно недорогих МФПУ. К сегодняшнему дню число изготавливаемых матриц

In photon detectors (which are mainly semiconductor detectors), the radiation is absorbed directly by the material sensitive to a given radiation wavelength. The mechanism of the interaction of radiation with the electrons of the detector materials is schematically shown in Fig. 3. Conventionally, we divide electrons into those associated with the atoms of the crystal lattice (located in the valence band, the “intrinsic” detectors), those associated with impurity atoms (the “extrinsic” or impurity detectors) and free carriers (free-carriers detectors) located inside the valence or conduction bands, and also those in the metal located near the metal-semiconductor interface. The principle of operation of photoemissive Schottky detectors (SBD – Schottky Barrier Diode detectors) is based on a change in the mobility of the latter. That is, photon detectors react only to photons whose energy exceeds certain threshold values, e.g., the semiconductor band gap (“intrinsic” detectors), the transition energy in quantum wells (QWs), quantum dots (QDs), and superlattices (SL), barrier height $q\varphi_b$ in detectors based on Schottky diodes. The number of charge carriers generated in a photon detector due to the absorption of incident radiation can be measured directly in the form of a voltage or current signal. The response of quadratic photon detectors is proportional to the number of absorbed photons (absorbed intensity is

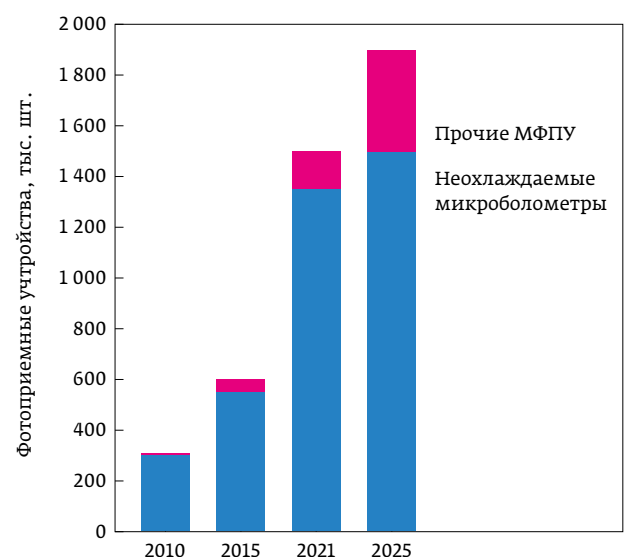


Рис. 4. Динамика и прогноз развития фотоприемных устройств (источник – Yole DevelopmentI, оценка авторов)

Fig. 4. Dynamics and forecast of the development of photo-receiving devices (source: Yole DevelopmentI, authors' estimate)



Таблица 1. Сравнение существующих детекторов для длинноволнового ИК излучения

	Степень готовности (0–10)	Военные системы	Примеры применения	Ограничения	Преимущества
Болометры	9	Предпочтительны для применений, требующих средних или невысоких параметров	Оружейные прицелы, очки ночного видения, самонаводящиеся ракеты, датчики небольших беспилотных летательных аппаратов, автономные сенсоры наземного базирования	Низкая чувствительность и ограничения по скорости реагирования	Низкая стоимость и не требуется активное охлаждение. Используется стандартное технологическое оборудование для производства Si чипов
InSb	9	Предпочтительны для применений, требующих высоких параметров	Самонаводящиеся ракеты, захват целей, платформы космического базирования для зондирования земной поверхности	Возможность применения только в спектральной области 3–5 мкм	Близкие к теоретическим характеристики. Останется основным материалом в ближайшие 10–15 лет
HgCdTe	9	Предпочтительны для применений, требующих высоких параметров	Ракетный перехват, наземное и воздушное видение, регистрирующий спектрометр, гиперспектральность, самонаводящиеся ракеты, захват целей, платформы космического базирования для зондирования земной поверхности	Чувствительность эффективности к вариациям производства. Сложности с применением в спектральной области >14 мкм	Близкие к теоретическим характеристики. Останется основным материалом в ближайшие 10–15 лет
II тип CP*	2–3	Исследования и разработки	В настоящее время разрабатываются в университетах и тестируются в промышленных исследовательских центрах	Требуются значительные инвестиции >100 млн долларов и фундаментальные исследования новых материалов	Теоретически лучше, чем КРТ при $\lambda > 14$ мкм. Возможность использования коммерческих III–V технологий изготовления
QWIP**	8	Коммерческое	Используются в некоторых военных и гражданских приложениях	Узкая спектральная область и низкая чувствительность	Низкая стоимость. Возможность использования коммерческих производственных процессов. Однородный материал
QDIP/ QDWIP***	1–2	Исследования и разработки	Ранние этапы разработок в университетах	Узкая спектральная область и низкая чувствительность	Недостаточно данных для характеристики и преимуществ материала

* CP – сверхрешетка.

** QWIP – ИК-фотоприемник с квантовыми ямами (QWIP – quantum well IR photodetector),

*** QDIP – ИК-фотоприемник с квантовыми точками (QDIP – quantum dot IR photodetector).

тепловых детекторов в несколько раз больше, чем ИК-матриц всех остальных типов, вместе взятых. Эта ситуация сохранится и в дальнейшем (рис. 4). Стоимость МФПУ на основе неохлаждаемых болометров при промышленном производстве на два порядка ниже, чем стоимость фотонных матриц [3, 4]. Можно сравнить степень технологической готовности ФПУ для внедрения в промышленность по условной шкале фотоприемников различного типа, используя табл. 1 [4].

proportional to the square of the amplitude of the electric field).

The principle of operation of thermal detectors is based on a change in the electrical characteristics of the detector due to the energy of absorbed thermal radiation. The incident radiation heats the material, which leads to electronic mobility and, accordingly, to a change in resistance. In this case, there is no direct interaction of photons with the electrons of the material [1, 2].

Table 1. Comparison of existing detectors for long-wave infrared radiation

	Readiness level (0 to 10)	Military systems	Application examples	Limitations	Advantages
Bolometers	9	Preferred for applications requiring medium or low parameters	Gun sights, night vision goggles, homing missiles, sensors of small unmanned aerial vehicles, autonomous ground-based sensors	Low sensitivity and speed limits	Low cost and no active cooling required. Uses standard processing equipment for the production of Si chips
InSb	9	Preferred for applications requiring high parameters	Self-guided missiles, target acquisition, space-based platforms for sensing the earth's surface	Ability to use only in the spectral region of 3–5 microns	The characteristics are close to theoretical. Will remain the main material in the next 10-15 years
HgCdTe	9	Preferred for applications requiring high parameters	Missile interception, ground and aerial vision, recording spectrometer, hyperspectrality, homing missiles, target acquisition, space-based platforms for sensing the earth's surface	Sensitivity of efficiency to variations in production. Spectral difficulties >14 microns	The characteristics are close to theoretical. Will remain the main material in the next 10-15 years
SL type II*	2–3	Research and development	Currently being developed at universities and tested in industrial research centers	Significant investment required >100 million USD and fundamental research of new materials	Theoretically better than MCT at $\lambda > 14$ microns. Possibility of using commercial III-V manufacturing technologies
QWIP**	8	Commercial	Used in some military and civilian applications.	Narrow spectral region and low sensitivity	Low cost. Possibility of using commercial production processes. Homogeneous material
QDIP/QDWIP***	1–2	Research and development	Early university developments	Narrow spectral range and low sensitivity	Insufficient data to characterize material benefits

* SL – superlattice.

** QWIP – quantum well IR photodetector.

*** QDIP – quantum dot IR photodetector.

ФОТОННЫЕ ОХЛАЖДАЕМЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Типичная конструкция фотонного охлаждаемого детектора представлена на рис. 5. Гибридный фотоприемный узел, включающий матрицу фоточувствительных элементов, состыкованную с кремниевой интегральной схемой считывания, смонтирован в вакуумный корпус. Охлаждение МФПУ обеспечивается микрокриогенной системой охлаждения (МКС), интегрированной с корпусом МФПУ и работающей по циклу Стирлинга.

Основу МФПУ составляют полупроводниковые фоточувствительные материалы. Их состав различается в зависимости от требуемого диапазона спектральной чувствительности. Тройное

Almost until the end of the 20th century, the development of IR technologies was determined by the dominant contribution of photon detectors. A significant disadvantage of IR photon detectors is the need for cryogenic cooling. This is due to the requirement to prevent thermal generation of charge carriers. It is a source of noise that limits the parameters of radiation detectors. The second revolution in infrared vision began in the last decades of the 20th century. Over the period from the late 1970s – early 1990s, several companies began to produce uncooled heat detectors operating on various principles of detecting heat fluxes (IR radiation). Such a technological breakthrough made it possible to create large-format arrays of infrared radiation detectors.

полупроводниковое соединение кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) применяется для спектральных диапазонов 1-2,5 мкм; 3-5 мкм; 8-14 мкм. Двойное полупроводниковое соединение антимонид индия (InSb) – для спектрального диапазона 3-5 мкм. Тройное полупроводниковое соединение индий-галлий-арсенид (InGaAs) – для спектрального диапазона 0,4-2,3 мкм, структуры с квантовыми ямами (QWIP) – для спектральных диапазонов 3-5 мкм; 8-14 мкм.

Compared with photon detectors, thermal detectors in the second half of the twentieth century were used to a lesser extent. The reason was that they worked relatively slowly (response time $\tau > 5 \cdot 10^{-2}$ s), and their sensitivity was lower. However, the transition to the release of sensitive pixels of smaller sizes has significantly reduced response time. Today, the thermal time constant τ can be about ~20 ms or less. Since the late 1970s, a significant shift has been noted in the market due to progress in increasing

the number of elements in linear and array detectors. This made their release much more cost-effective, primarily due to the use of silicon read-out integrated circuits (ROICs). Integration of such circuits with different types of detectors allowed creating array photodetectors (APDs). There are up to 10^8 IR detectors in the APD IR-arrays, which corresponds to the number of sensitive receptors in the human eye ($\sim 2 \cdot 10^8$).

Since the 2000s, microbolometers have already dominated the market for detectors for uncooled and relatively inexpensive APDs. To date, the number of produced arrays of thermal detectors is several times larger than the IR-arrays of all other types taken together. This situation will continue in the future (Fig. 4). The cost of multifunctional devices based on uncooled bolometers in industrial production is two orders of magnitude lower than the cost of photon arrays [3, 4]. You can compare the degree of technological readiness of APDs for implementation in industry on a conventional scale of various types of photodetectors using table 1 [4].

PHOTON COOLED DETECTORS

A typical design of a cooled photon detector is shown in Fig. 5. A hybrid photodetector assembly including an array of photosensitive elements coupled to a silicon integrated read-out circuit is

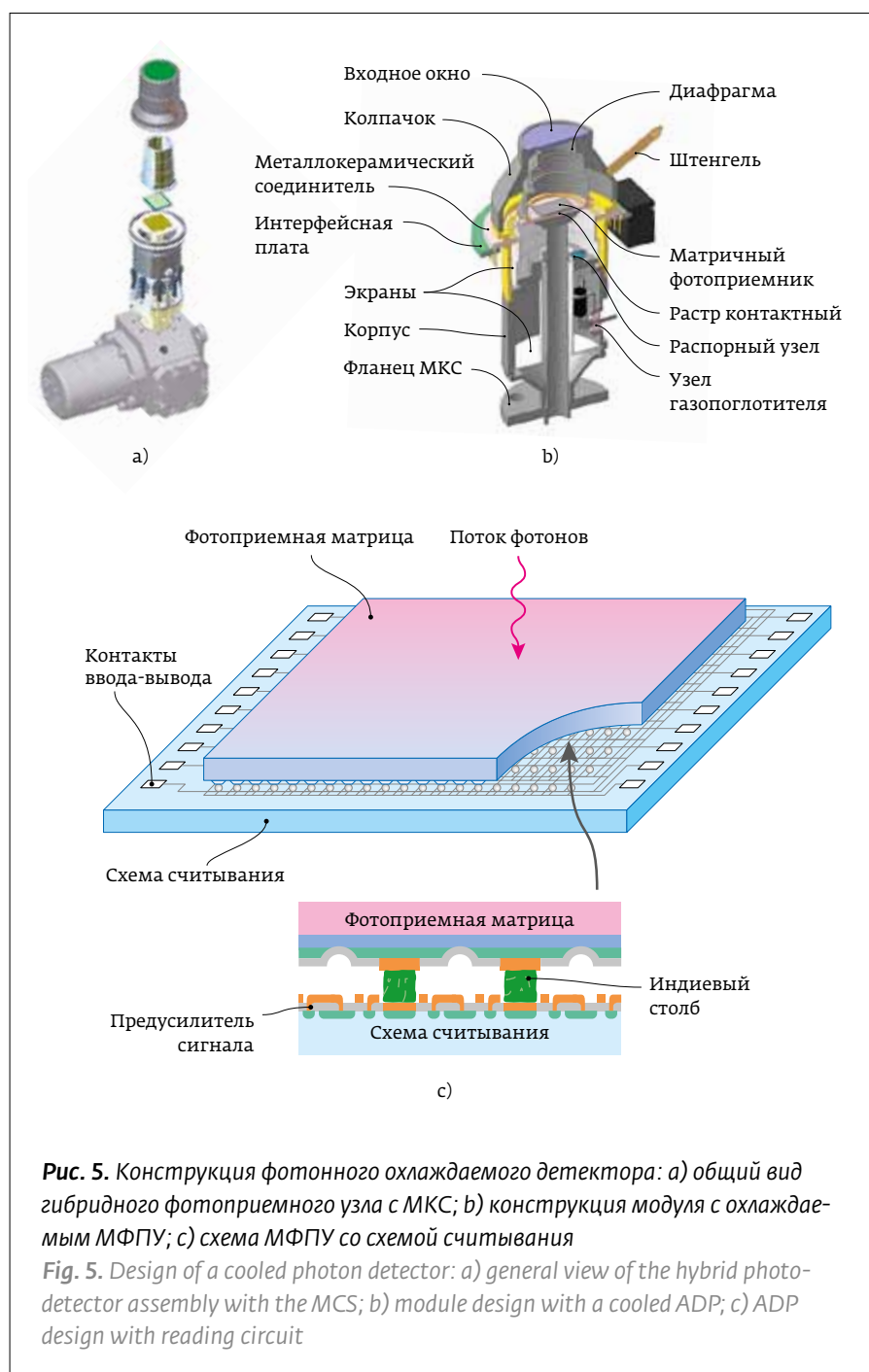


Рис. 5. Конструкция фотонного охлаждаемого детектора: а) общий вид гибридного фотоприемного узла с МКС; б) конструкция модуля с охлаждаемым МФПУ; в) схема МФПУ со схемой считывания
Fig. 5. Design of a cooled photon detector: а) general view of the hybrid photodetector assembly with the MCS; б) module design with a cooled ADP; в) ADP design with reading circuit

Для высокочувствительных и дальнедействующих тепловизионных приборов применяются МФПУ, изготовленные из полупроводниковых соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ) и антимонида индия (InSb). В настоящее время производится примерно равное количество как на основе КРТ, так и на основе InSb (рис. 7). Мы ожидаем, что это соотношение сохранится в среднесрочной перспективе.

Основным материалом МФПУ длинноволнового спектрального диапазона остается КРТ. КРТ доминирует для военных применений, где требуется высокая чувствительность и быстродействие. Сегодня достигнуты высокие результаты по получению качественных эпитаксиальных КРТ-структур на различных полупроводниковых подложках. Наиболее качественные струк-

mounted in a vacuum housing. APD cooling is provided by a microcryogenic cooling system (MCS) integrated with the APD housing and operating according to the Stirling cycle.

The basis of APD are the semiconductor photosensitive materials. Their composition varies depending on the required range of spectral sensitivity. The cadmium-mercury-tellurium triple semiconductor compound (CdHgTe) is used for the spectral ranges of 1–2.5 microns; 3–5 microns; 8–14 microns. The double semiconductor compound indium antimonide (InSb) is for the spectral range of 3–5 microns. Indium gallium arsenide ternary semiconductor compound (InGaAs) is used for the spectral range of 0.4–2.3 microns, the structures with quantum wells (QWIP) are used for the spectral ranges of 3–5 microns; 8–14 microns.

For highly sensitive and long-range thermal imaging devices, the APDs made of cadmium-mercury-tellurium (CdHgTe) and indium antimonide (InSb) semiconductor compounds are used. Currently, approximately equal amounts of both CdHgTe-based and InSb-based are produced (Fig. 7). We expect this ratio to continue in the medium term.

The CdHgTe remains the main material of the APDs of the long-wavelength spectral range. CdHgTe dominates for military applications where high sensitivity and speed are required. Today, high results have been achieved in obtaining high-quality epitaxial CdHgTe structures on various semiconductor substrates. The highest-quality structures are grown on CdZnTe substrates matched with the CdHgTe by the lattice constant. Sophisticated and multi-stage technology for CdHgTe producing involves deep purification of the

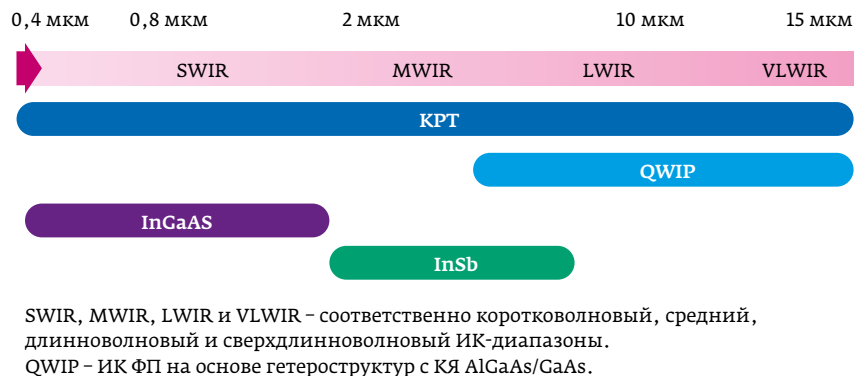


Рис. 6. Основные полупроводниковые материалы для охлаждаемых тепловизионных матриц и рабочие диапазоны

Fig. 6. Basic semiconductor materials for cooled thermal imaging arrays and operating ranges

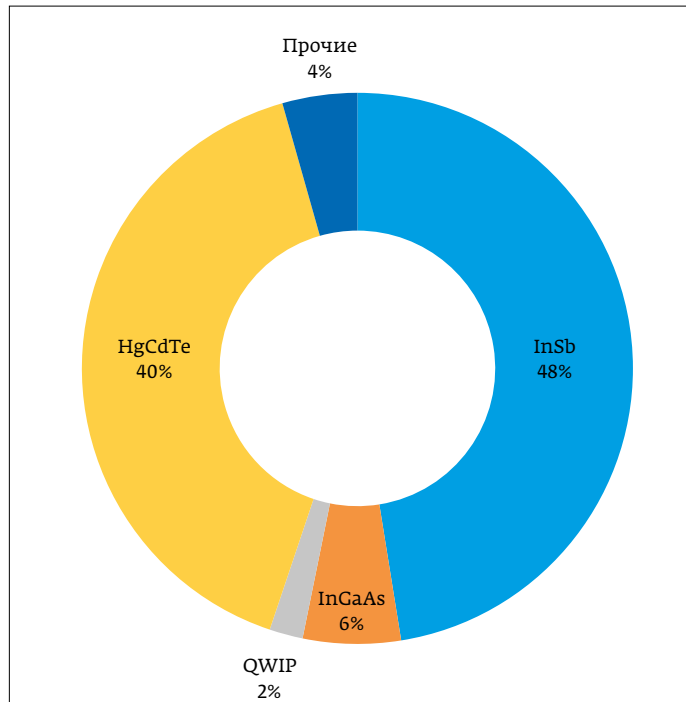


Рис. 7. Относительные доли продаж фотонных МФПУ на разных материалах, % (источник: Maxtech International)

Fig. 7. Relative shares of sales of photonic APDs on different materials, % (source: Maxtech International)



Таблица 2. Матричные ФПУ различных мировых производителей

Table 2. Array photodetectors offered by some major manufactures

Марка Brand	Фирма Company	Страна Country	Формат Format	Шаг, мкм Step, μm	Технология Technology	$T_{\text{раб.}}$, К $T_{\text{операт.}}$, К
Scorpio MW	Lynred	Франция France	640×512	15	HgCdTe	80
Jupiter MW			1280×024	15	HgCdTe	80
Pelican MW	SCD	Израиль Israel	640×512	15	InSb	80
Blackbird			1920×1536	10	InSb	80
Hawk MW	Finmeccanica	Англия England	640×512	16	HgCdTe	80
Hawk HD			1280×1024	8	HgCdTe	80
HiPIR 1280M	AIM	Германия Germany	1280×1024	15	HgCdTe	80
Neutrino	FLIR	США USA	640×512	15	InSb	80
CD640-12-M	DRS	США USA	640×480	12	HgCdTe	80
640-15K-B	i3System	Южная Корея South Korea	640×512	15	InSb	80
C615M	GST	Китай China	640×512	15	HgCdTe	80
–	НПО «Орион»	Россия Russia	640×512	15	InSb	80
–	МЗ «Сапфир»	Россия Russia	320×256	30	InSb	80

туры выращиваются на подложках CdZnTe (КЦТ), согласованных с КРТ по постоянной кристаллической решетки. Сложная и многоступенчатая технология получения КРТ включает глубокую очистку исходных Cd, Hg и Te, синтез соединений HgTe и CdTe, получение CdHgTe. В настоящее время основным промышленным методом изготовления эпитаксиальных слоев в ведущих мировых фирмах, производящих многоэлементные и матричные фотодиоды является метод жидкофазной эпитаксии на подложке из соединения кадмий-цинк-теллур (КЦТ). Преимущества этого метода: относительно низкая стоимость и высокая производительность оборудования, автоматическая доочистка поверхности на начальном этапе роста, дополнительная очистка от примесей в процессе роста и однородность состава по площади. Однако, подложки большой площади из CdZnTe остаются дорогими изделиями с плохо воспроизводимыми характеристиками.

Высокая стоимость КЦТ заставляет развивать эпитаксию на альтернативных подложках – из

initial Cd, Hg and Te, the synthesis of HgTe and CdTe compounds, and the obtaining of CdHgTe. Currently, the main industrial method for the manufacture of epitaxial layers in leading world companies producing multi-element and array photodiodes is the method of liquid-phase epitaxy on a cadmium-zinc-tellurium (CdZnTe) substrate. The advantages of this method are the relatively low cost and high productivity of the equipment, automatic surface cleaning at the initial stage of growth, additional purification from impurities during growth, and uniform composition over the area. However, large-area substrates made of CdZnTe remain expensive products with poorly reproducible characteristics.

The high cost of CdZnTe makes it possible to develop epitaxy on alternative substrates, from gallium arsenide, silicon, germanium, gallium antimonide, and some others. In this regard, such technologies are being developed everywhere. The large difference in the parameters of the crystal lattices, the chemical and structural inconsistencies of the CdHgTe on Si, GaAs, and Ge make the task of producing APDs based

арсенида галлия, кремния, германия, антимонида галлия и некоторых других. В связи с этим повсеместно разрабатываются такие технологии. Большое различие параметров кристаллических решеток, химическая и структурная несогласованность КРТ на Si, GaAs, Ge превращает задачу изготовления МФПУ на основе структур КРТ/Si, (GaAs, Ge) с подходящими параметрами в чрезвычайно сложную [3].

Основной тенденцией в настоящее время является снижение массогабаритных показателей и потребляемой мощности фотоэлектронных модулей. Формат МФПУ 640×512 элементов при шаге 15 мкм является в настоящее время основным форматом и, по-видимому, по соотношению «цена-качество» на ближайшие 5-10 лет он таковым и останется. Ведущими фирмами-разработчиками МФПУ в качестве коммерчески доступного достигнут мегапиксельный формат 1280×1024 элементов. В настоящее время цены на такие матрицы достаточно высоки, что не позволяет разработчикам аппаратуры осуществить массовый переход на него. Однако уже к 2025 году такой переход произойдет. За рубежом в направлении разработки и производства изделий фотоэлектроники работает большое число компаний. Среди них: AIM Infrared Modules

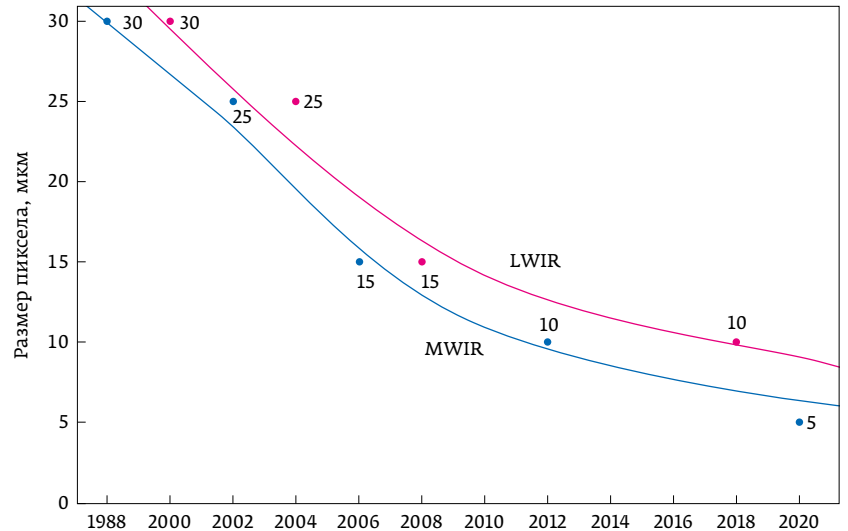


Рис. 8. Динамика снижения размера пиксела для МФПУ на КРТ

Fig. 8. Dynamics of pixel size reduction for CdHgTe-based APDs

on the CdHgTe/Si, GaAs, Ge structures with suitable parameters extremely difficult [3].

Currently, the main trend is the decrease in overall dimensions and power consumption of photoelectronic modules. The APD format of 640×512 elements with a pitch of 15 microns is currently the main format and, apparently, in terms of price-quality ratio for the next 5-10 years, it will remain so. The leading developers of APDs as a commercially available megapixel format reached 1280×1024 elements. Currently, the prices for such arrays are quite high, which does not allow hardware developers to make a massive transition to it. However, by 2025, such a transition



АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д.1; тел: +7 (495) 215-13-82; info@astrohn.ru, www.astrohn.ru



(Германия), BAE Systems (США), Brandywine photonics LLC (США), CalSensors Inc. (США), EGIDE USA (США), China Germanium Co.Ltd. (Китай), FLIR Systems (США), SCD (Израиль), Raytheon Vision Systems (США), RICOR (Израиль), Selex ES (Великобритания), Thales Cryogenics (Франция), Lynred (Франция), Spectrolab Inc. (США) и др.

Уменьшение шага и повышение формата является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей ИК МФПУ. Фирма Leonardo (Великобритания) уже достигла шага 8 мкм для матриц мегапиксельного формата средневолнового ИК-диапазона. А фирма Lynred (Франция) в текущем году достигнет шага 5–7 мкм для таких матриц (рис. 8). Снижение шага и повышение формата приводит к значительному росту дальности распознавания объектов [5–8].

Во второй части обзора будут рассмотрены охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 3–5 мкм, 8–12 мкм, неохлаждаемые МФПУ и развитие их рынка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пономаренко В. П., Филачев А. М.** Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений. – М.: Физматкнига. 2016. 417 с.
2. **Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А.** Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. – М.: Физматкнига. 2012, 368 с.
3. **Пономаренко В. П.** Теллурид кадмия – ртуть и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники. УФН. 2003; 173(6): 649–665.
4. **Сизов Ф. Ф.** ИК-ФОТОЭЛЕКТРОНИКА: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы. *Sensor Electronics and Microelectronics Technologies*. 2015;12(1): 26–53.
5. **Rogalski A.** Next decade in infrared detectors. Proc. SPIE10433. *ElectroOptical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV* (9–10 October2017). 2017;10433:104330L1–104330L25. DOI: 10.1117 / 12.2300779.
6. **Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В.** Неохлаждаемые микроболлометры инфракрасного диапазона-современное состояние и тенденции развития. *Нано- и микросистемная техника*. 2018; 20(10): 613–624.
7. **Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Пахомов О. В.** Интегральные микрокриогенные систем Стирлинга в составе криостатируемых фотоприемных модулей на основе матриц длинноволновой ИК-области. *Фотоника*. 2019; 13(1): 58–64. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.1.58.64.
8. **Иванов С. Д., Косцов Э. Г.** Приемники теплового излучения неохлаждаемых мегапиксельных тепловизионных матриц (обзор). *Успехи Прикладной физики*. 2017; 5(2): 136–154.

ОБ АВТОРАХ

Кульчицкий Николай Александрович, докт. техн. наук, e-mail: n.kulchitsky@gmail.com, профессор, Московский технологический университет (МИРЭА), главный специалист, ГНЦ РФ, АО «Научно-производственное объединение «Орион», Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-4664-4891

Наумов Аркадий Валерьевич инженер-аналитик, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0001-6081-8304

Старцев Вадим Валерьевич, канд. техн. наук, главный конструктор, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0002-2800-544X

will occur. A large number of companies work abroad in the direction of the development and production of photoelectronics products. Among them AIM Infrared Modules (Germany), BAE Systems (USA), Brandywine photonics LLC (USA), CalSensors Inc. (USA), EGIDE USA (USA), China Germanium Co. Ltd. (China), FLIR Systems (USA), SCD (Israel), Raytheon Vision Systems (USA), RICOR (Israel), Selex ES (United Kingdom), Thales Cryogenics (France), Lynred (France), Spectrolab Inc. (USA) and others.

Reducing the pitch and increasing the format is a universal trend for practically all the milestones of the global developers and manufacturers of infrared multifunction devices. Leonardo (Great Britain) has already reached a pitch of 8 microns for a megapixel array of the medium-wave infrared range. Moreover, Lynred (France) this year will reach a pitch of 5–7 microns for such arrays (Fig. 8). Reducing the pitch and increasing the format leads to a significant increase in the range of recognition of objects [5–7].

The second part of the review will deal with cooled APDs for the spectral range of 3–5 microns, 8–12 microns, uncooled APDs and the development of their market.

REFERENCES

1. **Ponomarenko V. P., Filachev A. M.** *Infrakrasnaya tekhnika i elektronnyaya optika. Stanovlenie nauchnykh napravleniya*. – M.: Fizmatkniga. 2016. 417.
2. **Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A.** *Tverdotel'naya fotoelektronika. Fotorezistory i fotopriemnye ustrojstva*. – M.: Fizmatkniga. 2012, 368.
3. **Ponomarenko V. P.** Tellurid kadmiya – rtuti i novoe pokolenie priborov infrakrasnoj fotoelektroniki. *UFN*. 2003; 173(6): 649–665.
4. **Sizov F. F.** ИК-ФОТОЭЛЕКТРОНИКА: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы. *Sensor Electronics and Microelectronics Technologies*. 2015;12(1): 26–53.
5. **Rogalski A.** Next decade in infrared detectors. Proc. SPIE10433. *ElectroOptical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV* (9–10 October2017). 2017;10433:104330L1–104330L25. DOI: 10.1117 / 12.2300779.
6. **Kul'chickij N. A., Naumov A. V., Starcev V. V.** Neohlazhdaemye mikrobolometry infrakrasnogo diapazona-sovremennoe sostoyaniye i tendencii razvitiya. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018; 20(10): 613–624.
7. **Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Starcev V. V., Pahomov O. V.** Integral Microcryogenic Stirling Systems As A Part Of Cryostatting Photoreceiving Modules Based On Long IR Region Matrix. *Photonics Russia*. 2019; 13(1): 58–64. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.1.58.64.
8. **Ivanov S. D., Koscov E. G.** Priemniki teplovogo izlucheniya neohlazhdaemyh megapiksel'nyh teplovizionnyh matric (obzor). *Uspekhi Prikladnoj fiziki*. 2017; 5(2): 136–154.

ABOUT AUTHORS

Kulchitsky Nikolai Alexandrovich, Doctor of Technical Sci., e-mail: n.kulchitsky@gmail.com, Professor, Moscow Technological University (MIREA), Chief Specialist, SSC RF, JSC Orion Scientific-Production Association, Moscow, Russia. ORCID ID: 0000-0003-4664-4891

Naumov Arkady Valerievich, engineer-analyst, ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia. ORCID: 0000-0001-6081-8304

Startsev Vadim Valerievich, Cand. of Technical Sciences, ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia. ORCID ID: 0000-0002-2800-544X

20–22 октября 2020

Москва, КВЦ «Сокольники»



Единственная
в России выставка
вакуумной техники
и криогенного
оборудования



Вакуумное
оборудование

Криогенное
оборудование

Оборудование
для нанесения
функциональных
покрытий

ПОДРОБНЕЕ О ВЫСТАВКЕ
vacuumtechexpo.com

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+ 7 (495) 252 11 07
vacuumtechexpo@mvk.ru

При поддержке

