



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

Часть II

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 первой части обзора (см. *Фотоника. 2020; 14(3): 234–244*) были 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. Во второй части обзора рассмотрены охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 3–5 мкм, 8–12 мкм, неохлаждаемые МФПУ. Представлено сравнение тепловых детекторов разного типа от разных мировых производителей. Дан экспертный прогноз изменений динамики роста рынка и его пост-пандемические тенденции развития.

Ключевые слова: тепловизоры, болометры

Статья получена: 08.04.2020

Принята к публикации: 20.04.2020

ОХЛАЖДАЕМЫЕ МФПУ ДЛЯ ИК-ДИАПАЗОНА

Снижение шага расположения пикселей и повышение формата матрицы приводит к значительному росту дальности распознавания объектов опико-электронными системами [5–7].

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

Part II

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 first part of the review (see *Photonics Russia. 2020; 14(3): 234–244*) 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. The second part of the review deals with cooled APDs for the spectral range of 3–5 microns, 8–12 microns, uncooled APDs. A comparison of 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

Received on: 08.04.2020

Accepted on: 20.04.2020

COOLED APDS FOR IR RANGE

A decrease in the pixel pitch and an increase in the array format leads to a significant increase in the range of recognition of objects by optoelectronic systems [5–7].

Cooled APDs for the spectral range of 3–5 μm

Array photodetectors (APDs) considered in the first part of the review (see *Photonics Russia. 2020; 14(3): 234–244*) are mass-produced widely presented on the world market. The main format is 640 × 512 pixels, the transition to 1280 × 1024 pixels. Advances in technology of IR sensors allowed increasing the size of the



Охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 3–5 мкм

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ), рассмотренные в первой части обзора (см. Фотоника. 2020; 14(3): 234–244), выпускаются серийно и широко представлены на мировом рынке. Основной формат – 640×512 пикселей, осуществляется переход на 1280×1024 пикселей. Достижения в технологиях ИК-датчиков позволили увеличить размеры матриц и уменьшить размеры пикселей для получения мегапиксельных матриц. Материалы для их создания – InSb, KPT, InAsSb.

Охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 8–12 мкм

МФПУ, представленные в табл. 3, также выпускаются серийно ведущими производителями и широко представлены на мировом рынке. Основные форматы – 320×256, 384×288 и 640×512, разработаны образцы мегапиксельных МФПУ. Материалы для их создания – KPT, QWIP.

Двух- и многоспектральные МФПУ

Двух- и многоспектральные МФПУ активно разрабатываются практически всеми ведущими фирмами. Их применение в оптико-электронных системах повышает вероятность обнаружения и распознавания цели. Высокая информативность и достигаемая при этом компактность приборов – движущие силы развития этого направления. В следующем десятилетии двухспектральные МФПУ станут коммерчески доступными изделиями ИК-фотоэлектроники. Для реализации двухспектральных МФПУ, чувствительных в диа-

arrays and reducing the size of pixels to obtain megapixel arrays. Materials for their creation are InSb, KPT, InAsSb.

Cooled APDs for the spectral range of 8–12 μm

APDs presented in table 3, are also mass-produced by leading manufacturers and are widely represented in the world market. The main formats are 320 × 256, 384 × 288, and 640 × 512; samples of megapixel APDs are developed. Materials for their creation are KPT, QWIP.

Dual-spectrum and multispectral APDs

Almost all leading companies actively develop dual-spectrum and multi-spectral APDs. Their use in optoelectronic systems increases the probability of target detection and recognition. High information content and achieved at the same time compact devices are the driving forces for the development of this direction. In the next decade, dual-spectrum APDs will become commercially available infrared photoelectronics products. For the implementation of dual-spectrum APDs sensitive in the ranges 3–5 and 8–12 μm, SRT-based technologies are mainly used. An example of images in two ranges (Fig. 9), obtained using a dual-spectrum APDs, gives an idea of the degree of detailed study of the scene.

UNCOOLED APDs

Compared to photon, thermal detectors in the second half of the twentieth century were used less frequently. The reason lies in the fact that they worked relatively slowly (response time $\tau > 5 \cdot 10^{-2}$ s) and their sensitivity was lower. However, over the past two

Таблица 3. Матричные ФПУ различных мировых производителей

Table 3. Matrix APDs of various world manufacturers

Марка Brand	Mars L	Scorpio LW	Sirius LW	Hawk LW	Harier LW	–	C615S	АСТРОН-640KPT15A810
Фирма Firm	Lynred		Finmeccanica		AIM	GST	ОКБ Астрон ИФП СО РАН	
Страна Country	France		England		Germany	China	Russia	
Формат Format	320×256	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512	
Размер шага, мкм Pixel size, μm	30	15	20	16	24	15	15	
Технология Technology	HgCdTe/CdZnTe		QWIP	HgCdTe/CdZnTe		QWIP	T2SL	HgCdTe/Si
T _{раб.} , К	80	80	73	80	80	70	≤80	70



Рис. 9. Изображения, полученные в средне- и длинноволновом диапазоне с помощью МФПУ формата 1280 × 720 с шагом 12 мкм фирмы HRL (США)
Fig. 9. Medium and long wavelength images using an APD of 1280 × 720 format with a pitch of 12 μm by HRL (USA)

пазонах 3–5 и 8–12 мкм, применяют в основном технологии на основе КРТ. Пример изображений в двух диапазонах (рис. 9), полученных с помощью двухдиапазонного МФПУ, дает представление о степени детальной проработки сцены.

НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ МФПУ

По сравнению с фотонными, тепловые детекторы во второй половине XX века применялись реже. Причина кроется в том, что они работали относительно медленно (время ответа $t > 5 \cdot 10^{-2}$ с) и их чувствительностью была ниже. Однако за последние два десятка лет мы наблюдаем значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов ИК-диапазона. Их пороговые характеристики приблизились к характеристикам фотонных детекторов, и заметьте – при значительно меньшей стоимости. Стоимость МФПУ на основе болометров при промышленном производстве на два порядка меньше, чем стоимость матриц на основе HgCdTe, InSb [2–4].

Излучение регистрируется при накоплении в объеме приёмника тепла от воздействия энергии излучения за время кадра. Для этого в конструкции чувствительный элемент максимально теплоизолирован от

To this end, the sensitive element is maximally insulated from the substrate in the design. Thermal insu-

decades we have seen significant progress in creating uncooled infrared thermal detectors. Their threshold characteristics are close to the characteristics of photon detectors, and note – at a much lower cost. The cost of APDs based on bolometers in industrial production is two orders of magnitude lower than the cost of arrays based on HgCdTe, InSb [2–4].

Radiation is recorded when heat is accumulated in the volume of the receiver from the action of radiation energy during the frame.

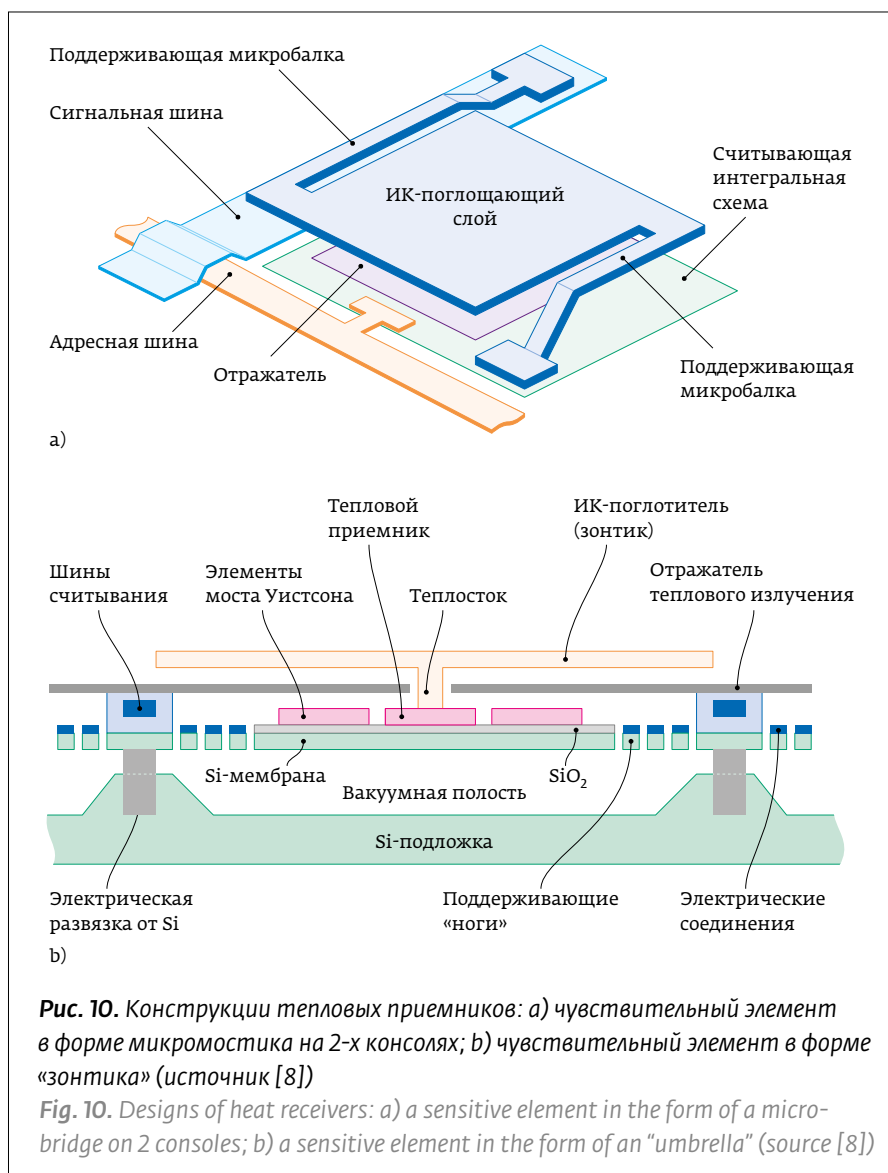


Рис. 10. Конструкции тепловых приемников: а) чувствительный элемент в форме микробалки на 2-х консолях; б) чувствительный элемент в форме «зонтика» (источник [8])
Fig. 10. Designs of heat receivers: a) a sensitive element in the form of a microbridge on 2 consoles; b) a sensitive element in the form of an "umbrella" (source [8])

подложки. Теплоизоляция реализована за счёт использования технологии MEMS. В ее основе лежит глубокое сухое травление кремния с применением «жертвенных» слоев (до трех). На поверхности таким путём создают мембранные конструкции толщиной менее 1 мкм. Пара микробалок (поддерживающих консолей) удерживает их над подложкой на расстоянии ~2 мкм, на них размещен фоточувствительный элемент – тонкоплёночная структура (рис. 10).

На рис. 11 приведена дорожная карта развития неохлаждаемых матриц тепловых ИК-детекторов [4]. Видно, что при улучшении характеристик и увеличении плотности пикселей (уменьшении их размера) можно значительно расширить число их применений. Тепловые матрицы уже стали широко использоваться в повседневных устройствах ночного вождения. Для таких целей применяют матрицы с числом пикселей в матрице $2 \cdot 10^5$ и значениями NETD=100 мК (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference – температурная чувствительность, равная минимальной разности температур, эквивалентной шуму). В наשלмных устройствах, стрелковых прицелах, датчиках наземных охранных устройств широко применяют матрицы, у которых шаг пикселей уменьшен до 10–17 мкм при количестве пикселей $>10^6$. Если цели такой программы будут достигнуты (NETD<10 мК), то области применения таких тепловых неохлаждаемых матриц могут быть расширены еще больше. Пока на пути реализации встают технические трудности.

В настоящее время наиболее широко используются для создания тепловых формирователей изображения оксид ванадия и легированный

lution is realized through the use of MEMS technology. It is based on deep dry etching of silicon using “sacrificial” layers (up to three). On the surface in this way create membrane structures with a thickness of less than 1 micron. A pair of microbeams (supporting consoles) holds them above the substrate at a distance of ~ 2 μm , a photosensitive element is placed on them – a thin-film structure (Fig. 10).

Figure 11 shows a roadmap for the development of uncooled arrays of thermal IR detectors [4]. It can be seen that with an improvement in the characteristics and an increase in the density of pixels (a decrease in their size), it can significantly expand the number of their applications. Thermal arrays have already become widely used in everyday night driving devices. For such purposes, we use arrays with the number of pixels in the array $2 \cdot 10^5$ and the value NETD=100 мК (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference). In helmet-mounted devices, rifle scopes, sensors of ground-based security devices, arrays are widely used, in which the pixel pitch is reduced to 10–17 μm with the number of pixels $>10^6$. If the goals of such a program are achieved (NETD <10 мК), then the areas of application of such thermal uncooled arrays can be expanded even more. So far, technical difficulties are getting in the way of implementation.

Currently, vanadium oxide and doped $\alpha\text{-Si:H}$ are most widely used to create thermal imaging devices. Vanadium oxide VO_x has high values of the temperature coefficient of resistance (TCR=2–3%). Based on this material, arrays of 2048×1536 format with a pixel size of 17 μm were created [4–6]. However, vanadium oxide is a non-standard material for CMOS technology. The manufacture of vanadium oxide in the form of thin films is difficult to control the process. The reason

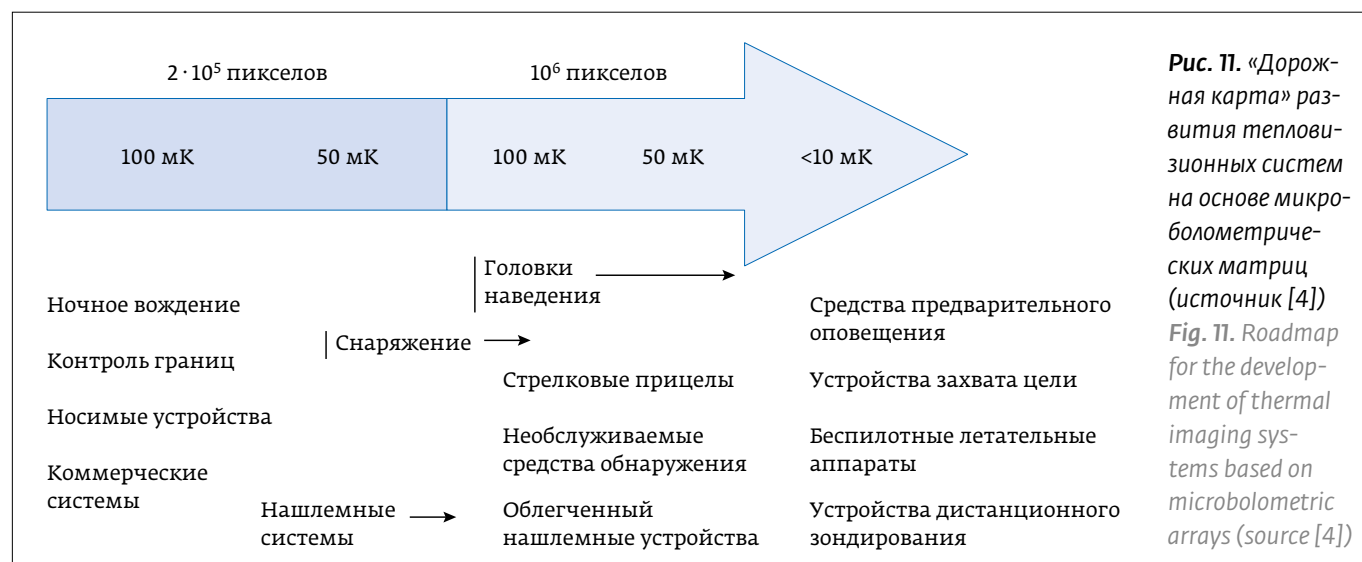


Рис. 11. «Дорожная карта» развития тепловизионных систем на основе микроболومترных матриц (источник [4])
Fig. 11. Roadmap for the development of thermal imaging systems based on microbolometric arrays (source [4])

α -Si:H. Оксид ванадия VO_x обладает высокими значениями температурного коэффициента сопротивления (ТКС=2-3%). На основе этого материала созданы матрицы форматом 2048×1536 с размером пикселя 17 мкм [4-6]. Однако оксид ванадия – нестандартный материал для КМОП-технологии. Изготовление оксида ванадия в виде тонких пленок является сложным в управлении процессом. Причина кроется в слишком узком диапазоне технологических параметров, в рамках которых можно обеспечить стабильность и оптимальность характеристик оксида. Кроме того, наличие гистерезиса приводит к проблемам при построении тепловых изображений горячих объектов. Теплопроводность таких пленок на порядок выше, чем значения этого параметра для полупроводников (обычно 0,05 Вт/смК). Болометры на основе α -Si:H обладают высоким сопротивлением, но этот материал нестабилен при тепловых обработках и при действии ультрафиолетового облучения. Этот материал имеет две фазы: стабильную и метастабильную, которые разделены потенциальными барьерами, что препятствует формированию равновесного состояния.

В настоящее время внимание разработчиков сконцентрировано в области технологических проблем совместимости процесса изготовления болометрических матриц с КМОП-технологией, а также в области оптимизации сопротивления материала, ТКС, тепловой проводимости и других характеристик прибора. Болометры на основе карбида кремния SiC обладают высокими значениями ТКС (4-6%). Но для стабилизации свойств материала требуется проводить отжиг при температурах около 1000 °C, что несовместимо с КМОП-технологией [6, 7].

Другим направлением развития стало создание матричных массивов фоточувствительных элементов с уменьшенным вплоть до 5 мкм шагом элементов (рис. 12).

Однако мы видим новый интерес к технологии создания микроболометров. Он связан с их применением в камерах высокоскоростной съемки. При формировании изображений от детектора требуется быстрый отклик. В этом случае лимитирующим фактором является величина тепловой постоянной времени отклика τ_{th} . Сегодня для типовых болометров с шагом 17 мкм достигнута величина $\tau_{th}=12$ мс. Путем оптимизации конструкции болометра τ_{th} может быть уменьшена до величин менее 3 мс. Уменьшение тепловой постоянной времени может обеспечить улучшение качества изображения (рис. 13).

lies in the too narrow range of technological parameters within which it is possible to ensure the stability and optimality of the characteristics of the oxide. In addition, the presence of hysteresis leads to problems in constructing thermal images of hot objects. The thermal conductivity of such films is an order of magnitude higher than the values of this parameter for semiconductors (usually 0.05 W/cmK). α -Si: H-based bolometers have high resistance, but this material is unstable during heat treatments and under the influence of ultraviolet radiation. This material has two phases: stable and metastable, which are separated by potential barriers, which prevents the formation of an equilibrium state.

Currently, the attention of the developers is focused in the field of technological problems of compatibility of the manufacturing process of bolometric arrays with CMOS technology, as well as in the field of optimization of material resistance, TCR, thermal conductivity and other characteristics of the device. Silicon carbide SiC bolometers have high TCR values (4-6%). However, to stabilize the material properties, annealing is required at temperatures of about 1000 °C, which is incompatible with CMOS technology [6, 7].

Another development direction was the creation of array arrays of photosensitive elements with a step of elements reduced up to 5 μm (Fig. 12).

However, we see a new interest in the technology of creating microbolometers. It is associated with their use in high-speed cameras. When imaging, a fast response is required from the detector. In this

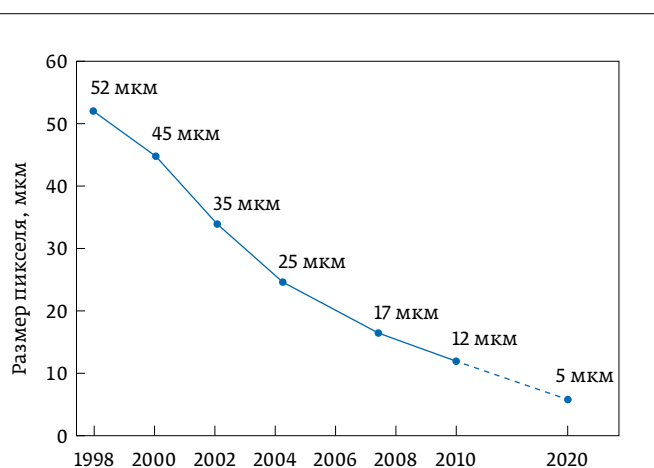


Рис. 12. Динамика снижения размера пикселя для неохлаждаемых МБ

Fig. 12. Pixel size dynamics for uncooled microbolometric arrays

Рынок микроболометров

По данным аналитического агентства Yole Development, основное производство микроболометров сегодня сосредоточено в США, Франции. Также производители имеются в Израиле, Китае, Японии, др. странах Юго-Восточной Азии (рис. 14). Эти изделия выпускаются серийно мировыми производителями и широко представлены на мировом рынке [6, 8]. В табл. 4 представлены характеристики неохлаждаемых ФПУ различных производителей.

СИТУАЦИЯ В ССРС И РОССИИ

Разработкой фотоприемных устройств различного назначения в России занимается ряд предприятий АО «Швабе» и АО «Росэлектроника», Российской академии наук, частные предприятия. Основными поставщиками являются АО «НПО «Орион» и АО «МЗ Сапфир», входящие в АО «Швабе», а также частное предприятие АО «ОКБ «Астрон». АО «НПО «Орион» разрабатывает и ведет производство охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников. АО «МЗ «Сапфир» производит охлаждаемые и неохлаждаемые МФПУ на основе Si, Ge, InSb, CdHgTe. АО «НИИ «Полюс» развивает неохлаждаемые МФПУ на основе InGaAs и производство фоточувствительных полупроводниковых структур. Предприятия АО «Росэлектроника» специализируются на разработке и производстве матриц видимого диапазона на основе кремния, охлаждаемых МФПУ на основе квантовых ям, барьера Шотки из силицида платины, и охлаждаемых ФПУ на основе примесного кремния (АО «НПП «Пульсар», АО «ЦНИИ «Электрон», АО «ЦНИИ «Циклон» АО «НПП «Восток»). Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН развивает полупроводниковое материаловедение и МФПУ на основе CdHgTe, InAs, микроболометров и квантовых ям. АО «ОКБ «Астрон» (г. Лыткарино, Моск. обл.) разрабатывает и производит тепловизионные приборы гражданского назначения на основе неохлаждаемых МФПУ собственного производства, а также охлаждаемых МФПУ на основе CdHgTe совместно с ИФП СО РАН.

АО «НПО «Орион» приступило к серийному выпуску МФПУ средневолнового диапазона.



Рис. 13. Скриншот снимка велосипедов, сделанный с помощью камеры, оснащенной стандартным микроболометром QVGA ULIS с шагом пикселей 17 мкм (слева) и высокоскоростным микроболометром (справа)

Fig. 13. Screenshot of a bicycle picture taken with a camera equipped with a standard QVGA ULIS microbolometer with a pixel pitch of 17 μm (left) and a high-speed microbolometer (right)

case, the limiting factor is the value of the thermal response time constant τ_{th} . Today, for typical bolometers with a step of 17 μm, the value $\tau_{th}=12$ ms is reached. By optimizing the design of the bolometer, τ_{th} can be reduced to values less than 3 ms. Reducing the thermal time constant can provide improved image quality (Fig. 13).

MICROBOLOMETER MARKET

According to the analytical agency Yole Development, the main production of microbolometers today is

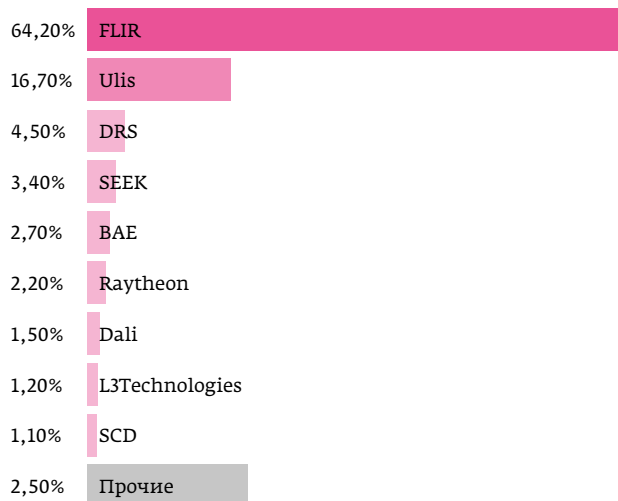


Рис. 14. Производители неохлаждаемых микроболометров (источник – Yole Development)

Fig. 14. Manufacturers of Uncooled Microbolometers (source – Yole Development)



АО «ОКБ «Астрон» приступило к серийному выпуску матричного фотоприемного модуля в длинноволновом диапазоне на основе охлаждаемой матрицы KPT/Si (производства ИФП СО РАН) и собственной микрохолодильной системы Астрон-МКС500. Астрон-МКС500 работает по замкнутому обратному термогазодинамическому регенеративному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла, в качестве рабочего тела используется сверхчистый газообразный гелий. Достигнутые результаты близки по своим показателям мировому уровню.

Первые попытки создания микроболометрических матриц были начаты в 1994–1995 годов в НПО «Орион» (Москва) [1, 3]. В начале 2000-х годов предприятие приступило к разработкам приборов формата 320×240 на оксиде ванадия на подложке из нитрида кремния. Однако развивающийся рынок гражданских и охранных применений требовал крупносерийного выпуска микроболометров. До недавних пор отечественную технику обеспечивали тепловизионными системами в рамках закупки либо совместного производства с иностранными соисполнителями. Необходимость разработки и серийного производства отечественных неохлаждаемых МФПУ стала особенно актуальной после запрета их поставок из-за рубежа.

С 2016 года на предприятии АО «ОКБ Астрон» освоено производство МФПУ с чувствительностью до 40 мК «Астрон-38425-1» и «Астрон-64025-1» с размером чувствительных элементов матрицы 25 мкм и 17 мкм. МФПУ изготовлено на основе матрицы микроболометров с электронной подсистемой считывания, и упакованной в керамический корпус. МФПУ имеет массив микроболометров в виде двумерной матрицы элементарных детекторов, расположенный в фокальной плоскости, состоящей из 384×288 элементов (ФПУ АСТРОН-38417-1), и 640×480 (ФПУ АСТРОН-64017-1). Микроболометры выполнены из оксида ванадия по мостиковой схеме. МФПУ выдает необработанное изображение в аналоговом формате со скоростью до 60 кадров в секунду. Управление электронной подсистемы производится по последовательной шине данных. Размер пиксела составляет 17×17 мкм. МФПУ выполнено в корпусе LCC (Leadless chip Carrier) из вакуумплотной керамики (рис. 15). Топология микроболометрических детекторов разных производителей приведена на рис. 16 [6]. Работы по созданию микроболометрических матриц на основе оксидов ванадия ведутся также в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) [4, 6, 7].

concentrated in the USA and France. Also, manufacturers are available in Israel, China, Japan, and other countries of Southeast Asia (Fig. 14). These products are mass-produced by world manufacturers and are widely represented on the world market [6, 8]. In the table. 4 shows the characteristics of uncooled PDs of various manufacturers.

SITUATION IN THE USSR AND RUSSIA

A number of enterprises of Shvabe JSC and Roselectronika JSC, the Russian Academy of Sciences, and private enterprises are developing photodetectors for various purposes in Russia. The main suppliers are NPO Orion JSC and MZ Sappfir JSC, members of Shvabe JSC, as well as a private enterprise Astrohn DB JSC. NPO Orion JSC develops and produces refrigerated and uncooled photodetectors. MZ Sapphire JSC produces cooled and uncooled APDs based on Si, Ge, InSb, CdHgTe. NII Polyus JSC is developing uncooled InGaAs-based APDs and the production of photosensitive semiconductor structures. The enterprises of Roselectronika JSC specialize in the development and production of visible-range arrays based on silicon, cooled by APDs based on quantum wells, the Schottky barrier from platinum silicide, and cooled PDs based on impurity silicon (NPP Pulsar JSC, CRI Electron JSC, CRI Cyclone JSC, NPP Vostok JSC). The Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences is developing semiconductor materials science and multifunctional devices based on CdHgTe, InAs, microbolometers and quantum wells. Astrohn DB JSC (Lytkarino, Moscow Region) designs and manufactures civil thermal imaging devices based on uncooled APDs of its own production, as well as cooled APDs based on CdHgTe in conjunction with IFP SB RAS.

NPO Orion JSC started mass production of the medium-wave range APDs. Astrohn DB JSC has begun serial production of a array photodetector module in the long wavelength range based on a cooled KRT/Si array (manufactured by the Institute of Physics and Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) and Astrohn-MKS500 own microcooling system. Astrohn-MKS500 operates on a closed reverse thermogasdynamic Stirling regenerative cycle with internal heat recovery; ultrapure helium gas is used as a working fluid. The results achieved are close in their indicators to the world level.

The first attempts to create microbolometric arrays were started in 1994–1995 at the NPO Orion (Moscow) [1, 3]. In the early 2000s, the company began developing devices of the 320×240 format on vanadium oxide on a silicon nitride substrate. However, the emerging market for civilian and security appli-

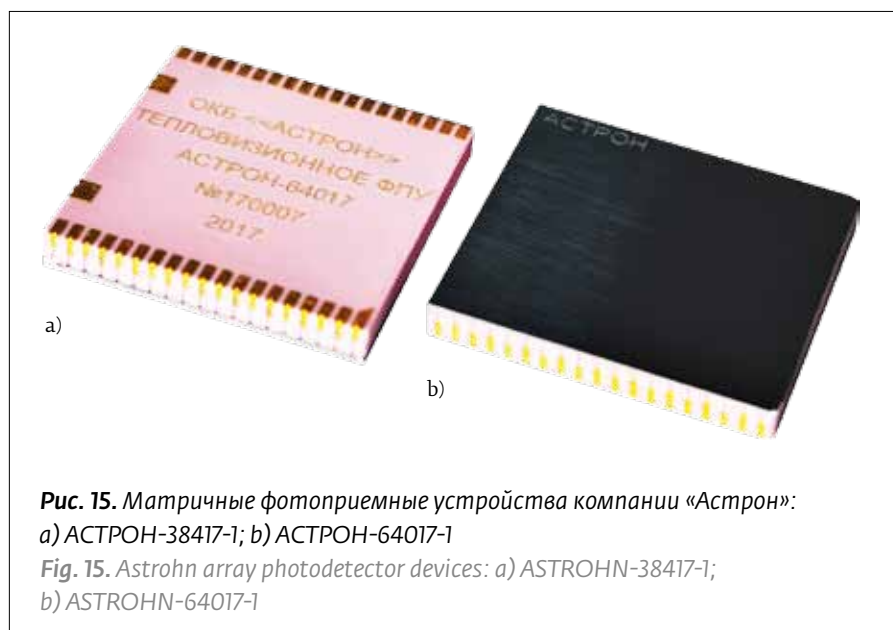


Рис. 15. Матричные фотоприемные устройства компании «Астрон»:

a) АСТРОН-38417-1; b) АСТРОН-64017-1

Fig. 15. Astrohn array photodetector devices: a) ASTROHN-38417-1;

b) ASTROHN-64017-1

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

В последнее десятилетие в фотоэлектронике ИК-диапазона наметился ряд новых направлений и тенденций. Они связаны с повышением разрешающей способности систем, усовершенствованием методов регистрации сверхслабых оптических сигналов, созданием быстродействующих и многоспектральных систем, формированием инфракрасных 3D-изображений и др.:

- переход на полный мегапиксельный формат 1024×1280 элементов с одновременным уменьшением шага элементов, создание сверхкрупноформатных матриц;
- повышение функциональных возможностей МФПУ (3D, лавинное усиление и т. д.);

cations required large-scale production of microbolometers. Until recently, domestic equipment was provided with thermal imaging systems as part of a purchase or joint production with foreign co-contractors. The need for the development and serial production of domestic uncooled APDs became especially urgent after the ban on their supplies from abroad.

Since 2016, Astrohn DB JSC has mastered the production of multi-function devices with a sensitivity of up to 40 mK Astrohn-38425-1 and Astrohn-64025-1 with the size of sensitive elements of the array 25 μm and 17 μm . APD is made on the basis of a array of microbolometers with an electronic reading subsystem, and packed in a ceramic case. The APD has an array of microbolometers in the form of a two-dimensional array of elementary detectors located in the focal plane, consisting of 384×288 elements (PD ASTROHN-38417-1), and 640×480 (PD ASTROHN-64017-1). Microbolometers are made of vanadium oxide according to the bridge circuit. The APD delivers a raw image in analog format at speeds up to 60 frames per second. The electronic subsystem is controlled via a serial data bus. The pixel size is 17×17 μm . The APD is made in the LCC (Leadless chip Carrier) case made of vacuum-tight ceramic (Fig. 15). The topology of microbolometric detectors of different manufacturers is shown in Fig. 16 [6]. Work on the creation of microbolometric arrays based on vanadium



Теплотелевизионный регистратор температуры тела

АСТРОН-ТТ2019

Предназначен для автоматизированного бесконтактного определения людей с повышенной температурой тела на пунктах пропуска и досмотра

АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1;
тел.: +7 (495) 215-13-82;
v@astrohn.ru, www.astrohn.ru



- создание двух- и многоспектральных МФПУ;
- расширение применений МФПУ коротковолнового ИК-диапазона;
- введение цифровой предобработки в БИС считывания;
- создание сверхдлинноволновых МФПУ с граничной длиной волны более 14 мкм;
- поиск новых принципов детектирования ИК-излучения и новых фоточувствительных материалов (графен, другие 2D структуры и т. п.).

oxides is also underway at the Institute of Physics and Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) [4, 6, 7].

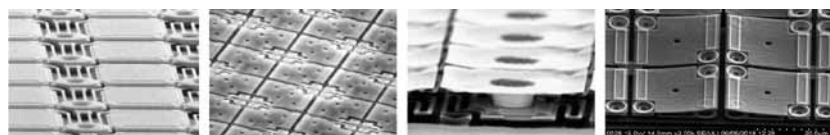
MAIN DEVELOPMENT TRENDS

In the last decade, a number of new directions and trends have been outlined in infrared photoelectronics. They are associated with increasing the resolution of systems, improving methods for recording ultra-weak optical signals, creating high-speed and multispectral systems, forming infrared 3D images, etc.:

Таблица 4. Неохлаждаемые ФПУ различных мировых производителей

Table 4. Uncooled APDs from various world manufacturers

Компания Company	Материал болометра Bolometer material	Формат матрицы Matrix format	Размер пиксела, мкм Pixel size, μm	NEDT (мК)
L-3 (USA)	a-Si	160×120, 640×480	30	50
	a-Si/a-SiGe	320×240, 1024×768	17	30–50
BAE (USA)	VOx	640×480	12	<50
	VOx	1024×768	17	<50
DRS (USA)	VOx	320×240	25, 17	<40
	VOx	640×480, 1024×768	17	<40
Raytheon (USA)	VOx	320×240, 640×480	25	30–40
	VOx	320×240, 640×480	17	50
	VOx	1024×480, 2048×1536	17	50
Lynred (France)	a-Si	80×80	34	<100
	a-Si	160×120	25	<60
	a-Si	320×240	12	<60
	a-Si	384×240	17	<55
	a-Si	640×480, 1024×768	17	<50
SCD (Israel)	VOx	384×288	25	<20
	VOx	384×288	25	<35
	VOx	640×480	17	<35
	VOx	1024×768	17	<35
FLIR Systems (USA)	VOx	640×512	17	<60
	VOx	336×256	17	<50
ASTROHN Design Bureau JSC (Russia)	VOx	320×240	17	<50
	VOx	384×288	17	<50
NEC (Japan)	VOx	320×240	23,5	<75
	VOx	640×480	23,5	<75
	VOx	640×480	12	60
	VOx	320×240	23,5	60



а) б) в) г)

Рис. 16. Топология микроболметрических детекторов разных производителей: а) BAE на VO_x ; б) Lynred на $a-Si$; в) DRS на VO_x ; г) ОКБ Астрон на VO_x

Fig. 16. Topology of microbolometric detectors from different manufacturers: а) BAE on VO_x ; б) Lynred on $a-Si$; в) DRS on VO_x ; г) Astrohn Design Bureau on VO_x

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последствия пандемии и ограничений ведут к появлению краткосрочных и долгосрочных факторов влияния на рынок ИК МФПУ. К краткосрочным можно отнести все, что напрямую связано с медицинской термографией. В первую очередь это относится к неохлаждаемым тепловым детекторам. Низкое время отклика в случае недорогих «смотрящих» тепловизионных систем практически несущественно, особенно для медицинских применений при измерении тепловых полей неподвижных объектов или объектов, перемещающихся с малыми угловыми скоростями. В целом вся индустрия будет испытывать подъем (особенно заметный на фоне возможного замедления мировой экономики в целом). И этот тренд может перейти из краткосрочной фазы в долгосрочную.

Что касается долгосрочных тенденций, то весьма вероятно, что эпидемиологическая угроза займет в общественном сознании такое же место, какое после терактов в Нью-Йорке 2001 года заняла террористическая угроза. Нельзя исклю-

- transition to a full megapixel format of 1024×1280 elements with a simultaneous decrease in the step of elements, the creation of super-large format arrays;
- increase the functionality of APDs (3D, avalanche amplification, etc.);
- creation of dual-spectrum and multispectral APDs;
- expansion of applications of the short-wave infrared APDs;
- introduction of digital preprocessing in LSI read-out;
- creation of ultra-long-wavelength APDs with a boundary wavelength of more than 14 microns;
- search for new principles for detecting infrared radiation and new photosensitive materials (graphene, other 2D structures, etc.).

CONCLUSION

The consequences of the pandemic and restrictions lead to the emergence of short-term and long-term factors influencing the market of IR APDs. Short-term can be attributed to everything that is directly related to medical thermography. This primarily relates to uncooled thermal detectors. The low response time in the case of inexpensive “looking” thermal imaging systems is practically insignificant, especially for medical applications when measuring the thermal fields of stationary objects or objects moving with small angular velocities. In general, the entire industry will experience a recovery (especially noticeable against the background of a possible slowdown in the



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Програмное обеспечение и автоматизация



Изготовление технологических устройств



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий



Разработка технологий формирования тонких пленок



Оптические элементы



Напылительный сервис



Сложные и уникальные покрытия

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com



чать появления в аэропортах биометрического контроля в дополнение к существующим протоколам авиационной безопасности, новых протоколов прохождения пунктов перехода границы и пр. Все это потребует резкого увеличения объемов производства и снижения себестоимости изготовления. Будут востребованы технологии еще более крупносерийного формирования в едином техпроцессе многопиксельных матриц с низкой дефектностью, а также их гибридизацию со считывающими схемами. Из достаточно экзотического и дорогого прибора тепловизор в среднесрочной перспективе превратится в почти бытовой прибор.

Идеи использования в фотоэлектронике метаматериалов, графена и других 2D-структур начинают реализовываться на практике. Вместе с «традиционным» тепловидением они необычайно широко раздвигают границы и технические возможности. Мы ожидаем значительного расширения перспектив совершенствования и создания новых инфракрасных оптико-электронных систем.

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 October 2017).* 2017; 10433:104330L1–104330L25. DOI: 10.1117 / 12.2300779.
6. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Неохлаждаемые микроболометры 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

global economy as a whole). Moreover, this trend can move from short-term to long-term phase.

With regard to long-term trends, it is highly likely that the epidemiological threat will occupy in the public mind the same place as the terrorist threat after the terrorist attacks in New York in 2001. It is impossible to exclude the appearance of biometric control at airports in addition to the existing aviation security protocols, new protocols for passing border crossing points, etc. All this will require a sharp increase in production volumes and lower manufacturing costs. Technologies of even larger series production in a single technical process of multi-pixel arrays with low defectiveness, as well as their hybridization with readout circuits will be in demand. In the medium term, a thermal imager will turn from a rather exotic and expensive device into an almost household device.

The ideas of using metamaterials, graphene, and other 2D structures in photoelectronics are being put into practice. Together with the “traditional” thermal imaging, they unusually widely push the boundaries and technical capabilities. We expect a significant expansion of the prospects for improvement and the creation of new infrared optoelectronic systems.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Filachev A. M. *Infrakrasnaya tekhnika i elektronnaya 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 October 2017).* 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. *Nanoi 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 neohlazhdaemykh megapiksel'nykh teplovizionnykh 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
- Starcev Vadim Valerievich, Cand. of Technical Sciences, ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia. ORCID ID: 0000-0002-2800-544X



Expo
Coating
MOSCOW

ExpoCoating Moscow

18-я Международная выставка
материалов и оборудования
для обработки поверхности,
нанесения покрытий
и гальванических производств

27-29
октября
2020

Москва,
Крокус Экспо



Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

MVK Международная
Выставочная
Компания

+7 (812) 380 6000
expocoating@mvk.ru

Запросите
условия участия:

expocoating-moscow.ru

12+