



Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на «квантовых ямах» – состояние и перспективы развития

Н. А. Кульчицкий^{1,2,3,4}, А. В. Наумов⁵, В. В. Старцев⁵
¹ Московский технологический университет (МИРЭА),
² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
³ Государственный научный центр РФ, Москва, Россия
⁴ АО «НПО «ОРИОН», Москва, Россия
⁵ АО «ОКБ «Астрон», Лыткарино, Моск. обл., Россия

Рассмотрены инфракрасные детекторы тепловизионной техники на квантовых ямах (КЯ). Устройства востребованы в системах и комплексах охранного наблюдения, персональных системах ночного видения и обеспечения безопасности. Рассмотрены охлаждаемые фотоприемные устройства (ФПУ) на КЯ для спектрального диапазона 3–5 мкм, 8–12 мкм. Представлено сравнение тепловых детекторов разного типа от разных мировых производителей. Дан экспертный прогноз изменений динамики роста рынка и его тенденции развития.

Ключевые слова: тепловизоры, квантовые ямы, фотоприемные устройства

Статья получена: 10.01.2022

Статья принята: 28.01.2022

В последние годы темпы развития тепловизионной техники новых поколений заметно ускорились. Устройства с использованием тепловизоров позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости, проводить поиск и сопровождение целей и проч. Сферами применения также являются инфракрасная астрономия,

“Quantum Wells” Cooled Infrared Photodetectors – the State and Prospects of Development

N. A. Kulchitsky^{1,2,3,4}, A. V. Naumov⁵, V. V. Startsev⁵

¹ Moscow Technological University (MIREA),

² Lomonosov Moscow State University,

³ State Scientific Center of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁴ Orion RPA JSC, Moscow, Russia

⁵ RDB Astrohn JSC, Lytkarino, Moscow region, Russia

In this paper the quantum wells infrared detectors (QWIP) of thermal imaging equipment are considered. These devices are in demand in the security surveillance systems and complexes, as well as in personal night vision and security systems. The QWs cooled photodetectors (PDs) for the spectral range 3–5 μm and 8–12 μm are of the special interest. A comparison of thermal detectors of various types from different world manufacturers is presented. An expert forecast of changes in the dynamics of market growth and its development trends is given.

Keywords: thermal imagers, quantum wells, photodetectors

Received on: 10.01.2022

Accepted on: 28.01.2022

In recent years, the pace of development of new generation thermal imaging equipment has accelerated noticeably. Devices using thermal imagers allow good performance in conditions of poor visibility, provide a search for and tracking of targets, etc. The spheres of application are also infrared astronomy, medicine, metrology, military equipment [1,2]. According to Yole Development, the market for thermal imaging cameras for IR systems (civilian and military) amounted to USD 6.2 billion in 2021, will reach USD 8.7 billion in 2026 (Fig. 1)

медицина, метрология, военная техника [1, 2]. По прогнозу фирмы Yole Development рынок тепловизионных камер для ИК-систем (гражданских и военных) составил 6,2 млрд долл. в 2021 году, в 2026 году достигнет 8,7 млрд долл. (рис. 1).

ОСНОВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Еще в конце 90-х годов прошлого века различные обзоры разработок охлаждаемых ИК-фотоприемников включали в себя упоминания довольно обширного перечня приборов на основе различных фоточувствительных материалов, таких как примесный кремний, силициды платины, халькогениды свинца-олова, узкозонные твердые растворы InAsSb, HgCdTe, фотоприемные структуры на квантовых ямах (КЯ) и др. Сегодня перечень сократился фактически до четырех основных технологий: 1) технологии твердых растворов HgCdTe; 2) технологии соединений InGaAs; 3) технологии квантоворазмерных структур на квантовых ямах – КЯ (или QWIP – quantum well infrared photodetector) и ее более поздних производных – технологии структур с квантовыми точками (СКТ или QDIP) и 4) технологии сверхрешеток 2-го рода (CP2P или T2SL) в системе InAs/GaSb [2, 3].

Доля ФПУ на КЯ в общих объемах производства сегодня достаточно мала (рис. 2) [1], но динамику развития ФПУ на основе КЯ можно оценить, как нам представляется на рис. 3.

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Твердые растворы HgCdTe (кадмий-ртуть-теллур КРТ) считаются одними из наиболее перспективных фоточувствительных материалов. Однако эти ожидания пока оправдываются лишь отчасти. Если при создании ФПУ на диапазон 3–5 мкм на основе КРТ достигнуты весьма высокие показатели, то для диапазона 8–12 мкм и более длинноволнового с приемлемыми характеристиками удается пока производить только линейные и матричные фотоприемники относительно небольшого формата. Причиной этого явились высокая неоднородность характеристик КРТ для длинноволнового диапазона по площади кристалла, а также высокая чувствительность по отношению к различным внешним воздействующим факторам (температура, радиация и др.). В результате техническая возможность использования длинноволнового КРТ для ФПУ 3-го поколения ограничена: такие фотоприемники оказываются чрезвычайно дорогими даже

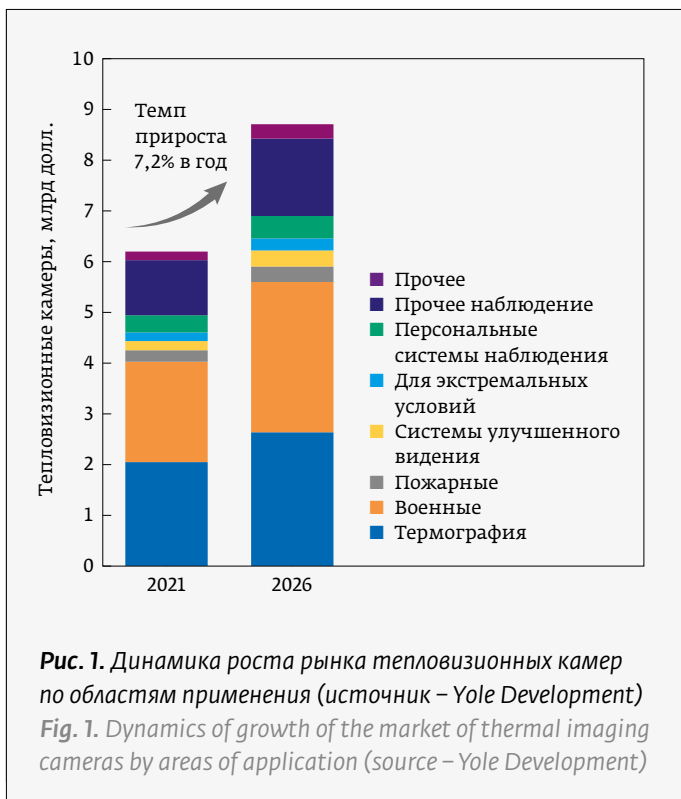


Рис. 1. Динамика роста рынка тепловизионных камер по областям применения (источник – Yole Development)

Fig. 1. Dynamics of growth of the market of thermal imaging cameras by areas of application (source – Yole Development)

BASIC SEMICONDUCTOR PHOTSENSITIVE MATERIALS AND THEIR FEATURES.

Back in the late 90s of the last century various reviews of the development of cooled IR photodetectors included references to a rather extensive list of devices based on various photosensitive materials, such as impurity silicon, platinum silicides, lead-tin chalcogenides, narrow-gap solid solutions InAsSb, HgCdTe, photodetector structures based on quantum wells (QW), etc. By the present day the list has been reduced to four main technologies which are the following: 1) technology of HgCdTe solid solutions;



Рис. 2. Доли различных материалов в продажах ИК-камер

Fig. 2. Shares of various materials in sales of IR cameras

для специальных применений. Возможность появления указанной проблемы была осознана разработчиками ИК-систем более 20 лет назад. Тогда же начались поиски альтернативных фоточувствительных материалов, позволяющих преодолеть отмеченные недостатки КРТ и максимально сохранить его достоинства. В ходе поисков были опробованы многочисленные материалы. Проведенные поиски привели к появлению нового класса фоточувствительных материалов: квантово-размерных гетероструктур или структур с квантовыми ямами – КЯ [3, 6]. Эффект размерного квантования лежит в основе работы не только ФП СКЯ, но и более сложных в конструктивном и технологическом отношении приборов на квантовых точках – QDIP – и сверхрешетках 2-го рода – T2SL.

Однако приборы двух последних типов пока находятся в стадии создания экспериментальных образцов, и технологические проблемы, стоящие сегодня на пути их совершенствования, не дают пока возможности однозначно определить их перспективы. Так, в приборах на основе QDIP, которым теоретические оценки предсказывают значительные преимущества по сравнению с QWIP по основным фотоэлектрическим характеристикам, сегодня удается реализовать главным образом лишь одно из них, заключающееся в отсутствии селективности по отношению к поляризации сигнального излучения [5,6]. Главной причиной такого положения является отсутствие технологической возможности надежно контролировать размеры и однородность распределения квантовых точек в структуре. Приборы на основе T2SL показывают хорошие результаты: они имеют большую квантовую эффективность, большее время жизни и, как следствие, большую рабочую температуру, чем QWIP, могут работать в фотовольтаическом режиме. Однако T2SL структуры, по сравнению с КРТ, имеют пока в несколько раз большую остаточную концентрацию примесей в активной области, что вызывает избыточные туннельные токи. Не решенной пока остается проблема надежной пассивации боковой поверхности мезодиодов, что

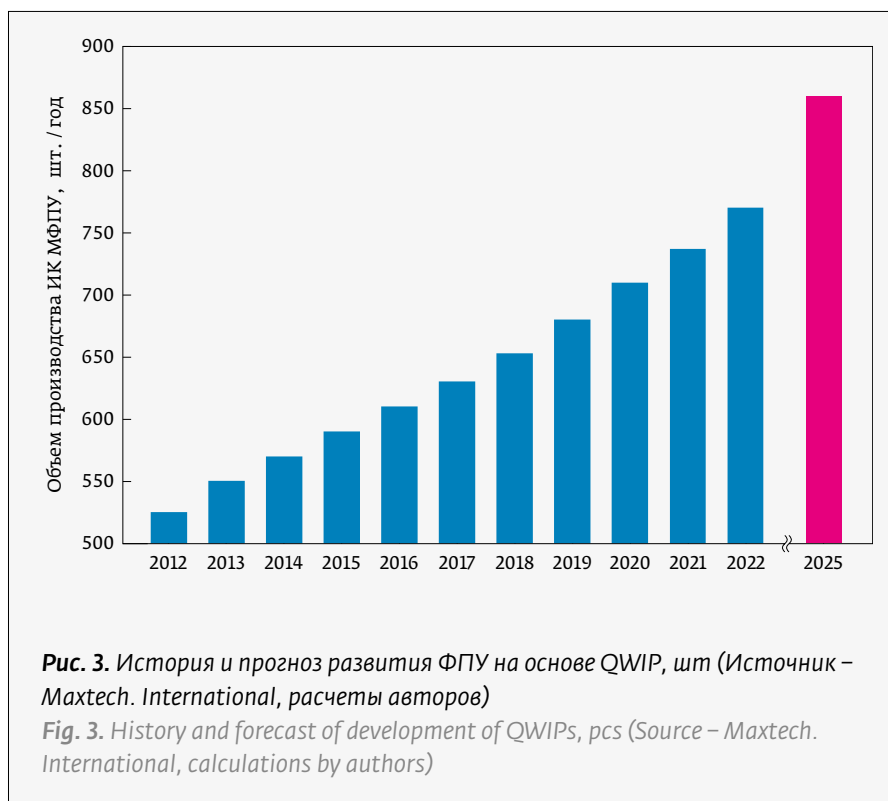


Рис. 3. История и прогноз развития ФПУ на основе QWIP, шт (Источник – Maxtech. International, расчеты авторов)

Fig. 3. History and forecast of development of QWIPs, pcs (Source – Maxtech. International, calculations by authors)

2) technologies of InGaAs compounds; 3) technologies of quantum wells quantum-dimensional structures (or QWIP – quantum well infrared photodetector) and its later derivatives, technology of quantum dot structures (QDIP) and 4) technology of type 2 superlattices (T2SL) in the InAs/GaSb system [2, 3]. The share of QWIP in the total production volumes today is quite small (Fig. 2) [1], but the dynamics of development of QWIP can be assessed, as it seems to us in Fig. 3

COMPARISON OF PROPERTIES OF VARIOUS PHOTODETECTOR MATERIALS

The solid solutions of HgCdTe (cadmium-mercury-tellurium, CMT) are known as one of the most promising photosensitive materials. However, these expectations have so far been only partly justified. While very high performance has been achieved in the creation of an PDs for the range of 3–5 μm based on CMT, for the range of 8–12 μm and longer wavelengths with acceptable characteristics, it is still possible to produce only linear and matrix photodetectors of a relatively small format. The reason for this was the high inhomogeneity of the CMT characteristics for the long-wavelength range over the crystal area, as well as the high sensitivity with respect to various external influencing factors (temperature, radiation, etc.). As a result, the technical feasibility of using long-



вызывает поверхностные утечки и, в совокупности с туннельными утечками, приводит к ухудшению пороговых характеристик ФПУ. В результате ФПУ на основе T2SL сегодня приближаются по своим характеристикам к аналогам на основе КРТ, но еще далеки до приборной реализации в промышленных масштабах [7].

В данной статье будут рассматриваться некоторые свойства и характеристики охлаждаемых тепловых детекторов на «квантовых ямах» (КЯ или QWIP-структурах), чувствительных в инфракрасном (ИК) диапазоне с длинноволновой границей от 3 до 20 мкм, а также возможные перспективы развития рынка.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ФПУ НА ОСНОВЕ КЯ

В основе работы большинства фотонных ФПУ лежит одно общее явление: носитель тока (электрон, дырка, ион), находящийся в связанном (нейтральном) состоянии и не принимающий участия в создании электрического тока, при поглощении фотона переходит в свободное состояние, т.е. может перемещаться под действием электрического поля и создавать электрический ток. Такое ФПУ можно рассматривать как среду, содержащую множество потенциальных ям, в которых имеется, по крайней мере, по одному связанному энергетическому состоянию, занятому носителями заряда. Принцип формирования фоточувствительной среды из набора квантовых ям известен довольно давно (классические квантовые ямы теоретически исследовались еще на заре появления квантовой механики) [4, 5]. Одними из первых аналогов такой среды стали ФПУ на основе примесной фотопроводимости. Однако примесные атомы в кремнии (германии, арсениде галлия и т.п.) задают строго фиксированные энергетические характеристики квантовой ямы, что ограничивает возможности подстройки материала ФПУ к требованиям той или иной задачи. Поэтому у разработчиков ФПУ всегда был интерес к материалам, в которых можно, управляя «геометрическими» параметрами ямы: толщиной, высотой барьеров – изменять энергетическое положение уровней в ней. И благодаря прецизионным методам эпитаксии – эпитаксии из металлорганической газовой фазы (МОСГЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – такие материалы появились. Наиболее успешной реализация указанной идеи оказалась в системе материалов GaAs/AlGaAs. Рис. 4 и 5 поясняют принцип работы ФПУ на КЯ. В структурном отношении структура с КЯ представляет собой многослойную эпитаксиальную структуру, в которой

wavelength CMT for 3rd generation photodetectors is limited: such photodetectors turn out to be extremely expensive even for special applications. The possibility of this problem was recognized by the developers of IR systems more than 20 years ago. At the same time, the search began for alternative photosensitive materials that would make it possible to overcome the noted shortcomings of CMT and preserve its advantages to the maximum. Numerous materials were tested during the search. The conducted searches have led to the emergence of a new class of photosensitive materials – quantum-dimensional heterostructures or structures with quantum wells, QWs [3,6]. The size quantization effect underlies the operation not only of QWIP, but also of quantum dots devices, QDIP, and type 2 superlattices, T2SL, which are more complex in terms of design and technology.

However, the devices of the last two types are still at the stage of creating experimental samples, and the technological problems that stand in the way of their improvement today do not yet make it possible to unequivocally determine their prospects. Thus, in devices based on QDIP, for which theoretical estimates predict significant advantages over QWIP according to the main photoelectric characteristics, today it is possible to realize, mainly, only one of them, which consists in the absence of selectivity with respect to the signal radiation polarization. [5,6] The main reason for this situation is the lack of technological capability to reliably control the size and uniformity of the distribution of quantum dots in the structure. Instruments based on T2SL show good results: they have a higher quantum efficiency, a longer lifetime and, as a result, a higher operating temperature than QWIP, they can operate in the photovoltaic mode. However, T2SL The structures still have several times higher residual impurity concentration in the active region compared to CMT, which causes excess tunneling currents. The problem of reliable passivation of the lateral surface of mesa diodes remains unresolved, which causes surface leakage and, in combination with tunnel leakage, leads to a deterioration in the threshold characteristics of the PDs. As a result, today the T2SL PDs, in terms of their characteristics, they are close to their CMT counterparts, but are still far from instrumental implementation on an industrial scale [7].

This article considers some properties and characteristics of quantum wells (QWs or QWIP structures) cooled thermal detectors sensitive in the infrared (IR) range with a long-wave boundary from 3 to 20 microns, as well as possible prospects for the development of the market.

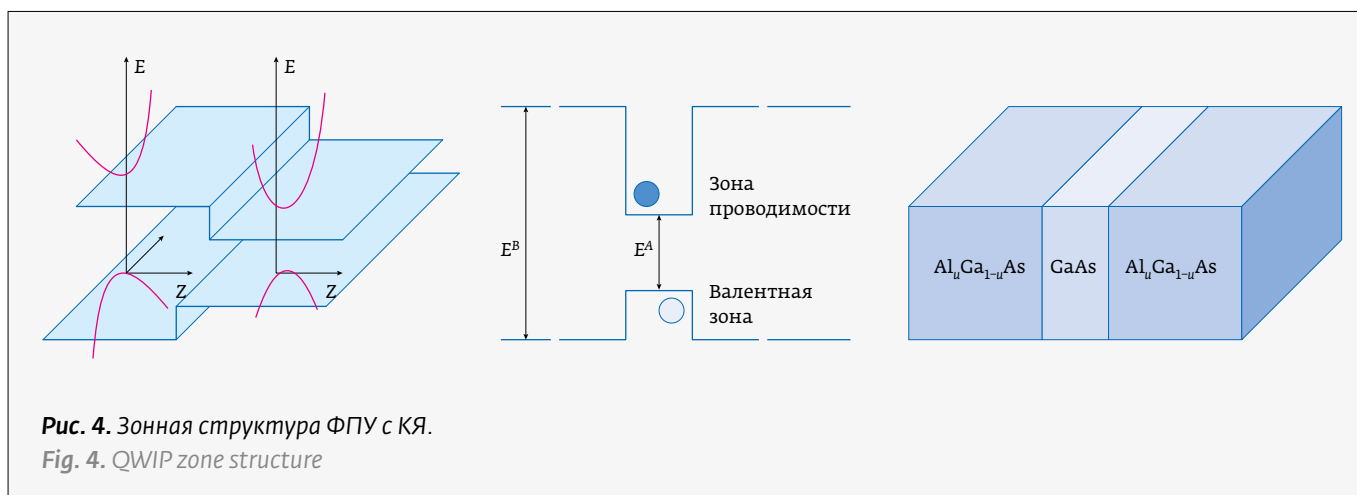


Рис. 4. Зонная структура ФПУ с КЯ.
Fig. 4. QWIP zone structure

чередуются слои GaAs – ямы и AlGaAs – барьеры (рис. 4). Указанные материалы имеют различные значения ширины запрещенной зоны. ФПУ на КЯ являются приборами на основных носителях заряда, т.е. такими, в которых носители, определяющие тип проводимости материала, определяют и его фоточувствительность. Таким образом, в электронных структурах квантовые ямы легируют донорной примесью, в дырочных структурах – акцепторной, а фоточувствительность возникает благодаря оптическому возбуждению электронов или дырок из связанного состояния в зону проводимости или валентную зону соответственно.

Типичные толщины слоев GaAs, при которых в яме располагается 1-2 уровня, имеют величину 40-50 Å. Толщины барьеров из AlGaAs – 400-500 Å. Для заполнения ям электронами (дырками) слои GaAs легируют кремнием (бериллием) до концентраций около 10^{18} см^{-3} . При достаточном охлаждении электроны в основном заполняют нижний энергетический уровень в ямах. Подвижных носителей в зоне проводимости над барьерами относительно мало, и их концентрация определяется термогенерацией. Поэтому «темновая» проводимость структуры с КЯ определяется в основном этими носителями. При облучении структуры с КЯ фотонами, энергия которых превышает энергетическое расстояние между нижним уровнем в яме

QWIP PRINCIPLE OF OPERATION

The operation of most photonic PDs is based on one common phenomenon: a current carrier (electron, hole, ion), which is in a bound (neutral) state and does not participate in the creation of an electric current, passes into a free state when a photon is absorbed, i.e., it can move under the influence of an electric field and create an electric current. Such PDs can be considered as a medium containing many potential wells, in which there is at least one bound energy state occupied by charge carriers. The principle of formation of a photosensitive medium from a set of quantum

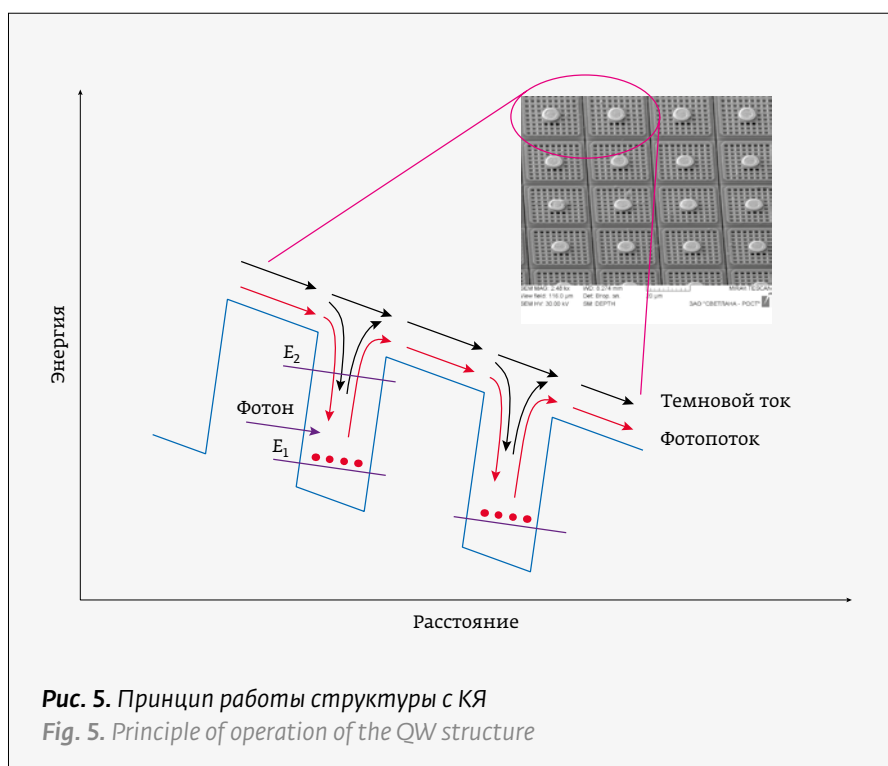


Рис. 5. Принцип работы структуры с КЯ
Fig. 5. Principle of operation of the QW structure

и верхним или верхушкой барьера, может происходить переход электрона между этими уровнями или между нижним уровнем и дном зоны проводимости барьера [5]. Далее электрон становится свободным и может двигаться под действием электрического поля, создавая, таким образом, фототок (рис. 5).

Согласно теоретическим расчетам, чувствительность ФПУ с КЯ зависит от поляризации поглощаемых фотонов, т.е. для эффективного поглощения электрический вектор поляризации фотона должен быть перпендикулярен слоям структуры с КЯ [5]. Для управления ориентацией вектора поляризации относительно слоев с КЯ на поверхности фоточувствительных элементов стали формировать устройства ввода излучения в виде дифракционных решеток (как правило, фазовых), которые позволяют обеспечить требуемое направление распространения излучения. Использование дифракционных решеток оказывается полезным для повышения квантовой эффективности ФПУ. Принцип действия дифракционной решетки показан на рис. 6.

При создании многоэлементных ФПУ возникает необходимость считывания сигналов с чувствительных элементов. Обычно в охлаждаемых многоэлементных ФПУ, включая КЯ, считывание сигналов осуществляется с помощью кремниевых микросхем, соединяемых с фотоприемной секцией (рис. 7) [6,9]. Таким образом, ФПУ включает матрицу фоточувствительных элементов, состыкованную с схемой считывания. Охлаждение обеспечивается микрокриогенной системой охлаждения (МКС), работающей по циклу Стирлинга.

ПОЯВЛЕНИЕ ФПУ НА ОСНОВЕ КЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Первые сообщения о получении изображений с помощью фотоприемников на основе структур с КЯ появились в 1991 году [5]. Группа исследователей из Bell Laboratories (США) (B. F. Levine и др.) продемонстрировала тепловое изображение, полученное с помощью линейного фотоприемника на основе КЯ (диапазон 8–12 мкм) с использованием оптико-механического сканирования. К этому времени с момента первого экспериментального наблюдения эффекта фотопроводимости в КЯ прошло всего 4 года. В 1997 году была продемонстрирована тепловизионная камера с ФПУ, в котором использовался матричный фотоприемник на основе КЯ формата 256×256 элементов [6]. К настоящему времени на основе ФПУ с КЯ уже создано немало разнообразных ИК-систем, при-

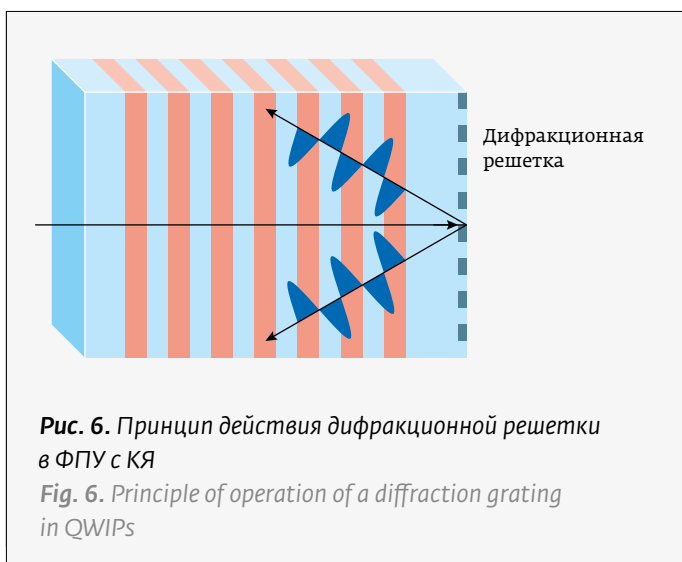


Рис. 6. Принцип действия дифракционной решетки в ФПУ с КЯ

Fig. 6. Principle of operation of a diffraction grating in QWIPs

wells has been known for a long time (classical quantum wells were theoretically studied at the dawn of quantum mechanics) [4, 5]. PDs based on impurity photoconductivity became one of the first analogues of such a medium. However, impurity atoms in silicon (germanium, gallium arsenide, etc.) set strictly fixed energy characteristics of the quantum well, which limits the possibility of adjusting the PDs material to the requirements of a particular problem. Therefore, PDs developers have always been interested in materials in which it is possible, by controlling the “geometric” parameters of the well: the thickness, the height



Рис. 7. Конструкция фотоприемного устройства с считывающей интегральной схемой

Fig. 7. Design of a photodetector with a readout integrated circuit



меняемых в Франции, Германии, США и др. [6, 7]. Сегодня уже являются обыденными сообщения о промышленно выпускаемых тепловизионных приборах с фотоприемной матрицей формата 640×480 элементов на основе КЯ на спектральные диапазоны как 3–5 мкм, так и 8–12 мкм. Имеются сообщения и о создании фотоприемных матриц формата свыше 1000×1000 элементов, многоспектральных ФПУ [8,9]. При этом наиболее убедительно преимущества структур с КЯ проявляются в спектральном диапазоне 8–12 мкм и более длинноволновом. Таким образом, сегодня технология КЯ представляет одну из основных технологий, благодаря которой происходит оснащение охлаждаемыми ФПУ ИК-систем различного назначения. При этом наибольшая востребованность ФПУ на КЯ отмечается в ИК-системах, в которых необходимы ФПУ длинноволнового диапазона большого формата, а также многоспектральные приборы [1, 6].

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ОХЛАЖДАЕМЫХ ФПУ
ДЛИННОВОЛНОВОГО СПЕКТРА**

Длинноволновые тепловизионные охлаждаемые ФПУ разрабатываются и производятся для спектра от 8 до 14 мкм на основе нескольких технологий. Охлаждаемые ФПУ длинноволнового диапазона производят на основе гетероструктур тройных соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ) и на основе гетероструктур с КЯ. Основные производители представлены в табл. 1.

Характеристики длинноволновых КРТ и КЯ различаются, и каждый имеет свои плюсы и минусы. В России на протяжении последних нескольких лет было проведено несколько НИР и ОКР по разработке и освоению ФПУ длинноволнового диапазона. Основными разработчиками являлись НПО «Орион», ОКБ «Астрон» и ИФП СО РАН. На диа-

of the barriers, to change the energy position of the levels in it. And thanks to precision methods of epitaxy – metal-organic gas phase epitaxy (MOGPE) and molecular beam epitaxy (MBE), such materials have appeared. The most successful implementation of this idea turned out to be in the system of GaAs/AlGaAs materials. Fig. 4 and 5 explain the principle of operation of the QWIP. Structurally, the QW structure is a multilayer epitaxial structure in which GaAs wells layers alternate with AlGaAs barriers (Fig. 4). These materials have different values of the band gap. QWIP are the devices based on majority charge carriers, i. e., those in which the carriers, which determine the type of conductivity of the material, also determine its photosensitivity. Thus, in electronic structures, quantum wells are doped with a donor impurity, in hole structures, with an acceptor impurity, and photosensitivity arises due to the optical excitation of electrons or holes from a bound state to the conduction band or valence band, respectively. Typical thicknesses of GaAs layers, at which 1-2 levels are located in the well, have a value of 40–50 Å. The thicknesses of AlGaAs barriers is 400–500 Å. To fill the wells with electrons (holes), GaAs layers doped with silicon (beryllium) to concentrations of about 10^{18} cm^{-3} . With sufficient cooling, the electrons mainly fill the lower energy level in the wells. There are relatively few mobile carriers in the conduction band above the barriers, and their concentration is determined by thermal generation. Therefore, mainly these carriers determine the ‘dark’ conductivity of a QW structure. When a QW structure is irradiated with photons whose energy exceeds the energy distance between the lower level in the well and the upper level or the top of the barrier, an electron transition can occur between these levels or between the lower level and the bottom of the barrier conduction band [5]. Further, the electron becomes free and

Табл. 1. Основные производители длинноволновых охлаждаемых приемников [7]

Table 1. Major manufacturers of longwave cooled receivers [7]

Марка	Mars LW	Scorpio LW	Sirius LW	Hawk LW	Harier LW	–	Астрон-640КЯ20
Фирма, страна	Lynred, Франция			Finmeccanica, Англия		AIM, Германия	Астрон/Светлана, Россия
Формат	320×256	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512
Шаг, мкм	30	15	20	16	24	20	20
Технология	HgCdTe		QWIP	HgCdTe		QWIP	QWIP
Траб, К	80	80	73	80	80	70	≤70

Таблица 2. Сравнительные характеристики длинноволновых ФПУ фирмы LYNRED и ОКБ «Астрон»

Table 2. Comparative characteristics of LYNRED and RDB Astrohn long-wave PDs

Показатель Indicator	SCORPIO LW	SIRIUS LW	Астрон-640КЯ20
Технология Technology	КРТ	QWIP	QWIP
Шаг матрицы, мкм Matrix pitch, μm	15	20	20
Диапазон длин волн (по уровню 50%), мкм Wavelength range (by 50% level), μm	7,7–9,3 мкм	8,5 \pm 0,5 мкм (8,0–9,0)	8,5 \pm 0,3 мкм (8,2–8,7)
Эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ) при $f/2$, мК Noise-equivalent temperature difference (NETD) at $f/2$, mK	22 мК (при 80 К)	31 мК (при 73 К)	25 мК (при 70 К)
Количество годных пикселей Number of valid pixels	99,0%	99,9%	99,9%
Вес, г Weight, g	550 (с МКС К508)	660 (с МКС К548)	550 (с МКС-500)

пазон спектра 8–14 мкм матричные ФПУ разрешением 640×480 пкс производятся в настоящее время в АО «ОКБ «АСТРОН» и НПО «Орион». ОКБ «Астрон» производит неохлаждаемые ФПУ на основе матриц микроболометров типа Астрон-64017 и охлаждаемые на основе гетероструктур с КЯ типа Астрон-640КЯ20 на основе промышленно производимых в АО «Светлана-Рост» (СПб) гетероструктур с КЯ. ОКБ «Астрон» производит также охлаждаемые ФПУ на основе гетероструктур с КРТ типа АСТРОН-640КРТ15А810 на основе производимых в ИФП СО РАН гетероструктур с КРТ. Производимые в НПО «Орион» ФПУ на диапазон 8–12 мкм на КРТ имеют разрешение 320×240 пкс.

Основными достоинствами охлаждаемых ФПУ является их быстродействие (до 200 кадров в секунду) и высокая чувствительность. Надо отметить, что чувствительность длинноволновых охлаждаемых ФПУ (около 35 мК) уступает коротковолновым приемникам (около 15–20 мК) примерно в 2 раза и сопоставима с чувствительностью микроболометрических матриц.

Наиболее известными приемниками в России являются французские Scorpio LW на КРТ и Sirius LW на КЯ. Сравним используемые в РФ приемники французской фирмы LYNRED на соединении КРТ типа Scorpio LW, на квантовых ямах Sirius

can move under the action of an electric field, thus creating a photocurrent (Fig. 5).

According to theoretical calculations, the sensitivity of a QWIP depends on the polarization of the absorbed photons, i.e. for efficient absorption, the electric polarization vector of a photon should be perpendicular to the layers of the structure with QWs [5]. To control the orientation of the polarization vector relative to the words with QWs, radiation input devices in the form of diffraction gratings (usually phase gratings) began to be formed on the surface of photosensitive elements, which make it possible to provide the required direction of radiation propagation. The use of diffraction gratings turns out to be useful for increasing the quantum efficiency of the PDs. The principle of operation of a diffraction grating is shown in Fig. 6

When creating multi-element PDs, it becomes necessary to read signals from sensitive elements. Typically, in cooled multi-element PDs, including QWs, signals are read using silicon microcircuits connected to the photodetector section (Fig. 7) [6,9]. Thus, the PDs includes a matrix of photosensitive elements coupled to the readout circuit. Cooling is provided by a micro-cryogenic cooling system (MCS) operating on the Stirling cycle.

THE EMERGENCE OF QWIPS AND THEIR APPLICATIONS.

The first reports on imaging with photodetectors based on QW structures appeared in 1991 [5]. A group of researchers from Bell Laboratories (USA) (B. F. Levine et al.) demonstrated a thermal image obtained with a QW-based linear photodetector (range 8–12 μm) using optical-mechanical scanning. By that time, only 4 years had passed since the first experimental observation of the photoconductivity effect in QWs. In 1997, a thermal imaging camera with a PD was demonstrated, in which a matrix photodetector based on a QW with a format of 256×256 elements was used [6]. To date, many different IR systems have already been created on the basis of QWIP, which are used in France,

LW и приемник ОКБ «Астрон» на квантовых ямах (табл. 2).

У французских приемников видна разница в количестве годных пикселей между приемниками КРТ и QWIP в пользу последних (99,9%). Это обусловлено прежде всего физикой самих гетероструктур на квантовых ямах и зрелой технологией роста. Многочисленные публикации отмечают большую стабильность и повторяемость технологических процессов создания структур на квантовых ямах. Это подтверждают и показатели отечественных ФПУ на квантовых ямах, выращенных на предприятии АО «Светлана-Рост» для приемников ОКБ «Астрон».

У приемника на КРТ немного больше область спектрального диапазона (7,7–9,3 мкм) с пиком в области 8,5 мкм и по 0,7 мкм в обе стороны. У приемников на КЯ при пике на 8,5 мкм диапазон уже – у Астрон $\pm 0,3$ мкм в обе стороны, у Sirius $\pm 0,5$ мкм в обе стороны.

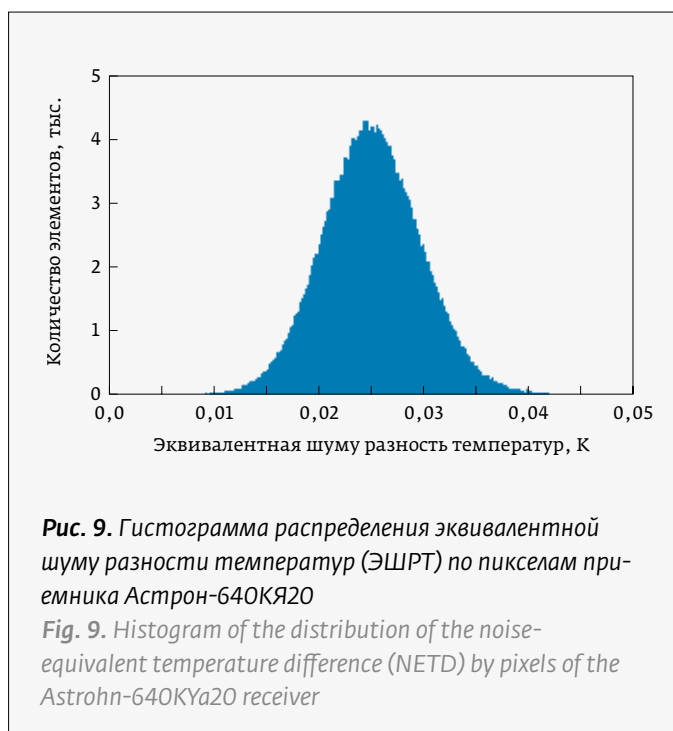
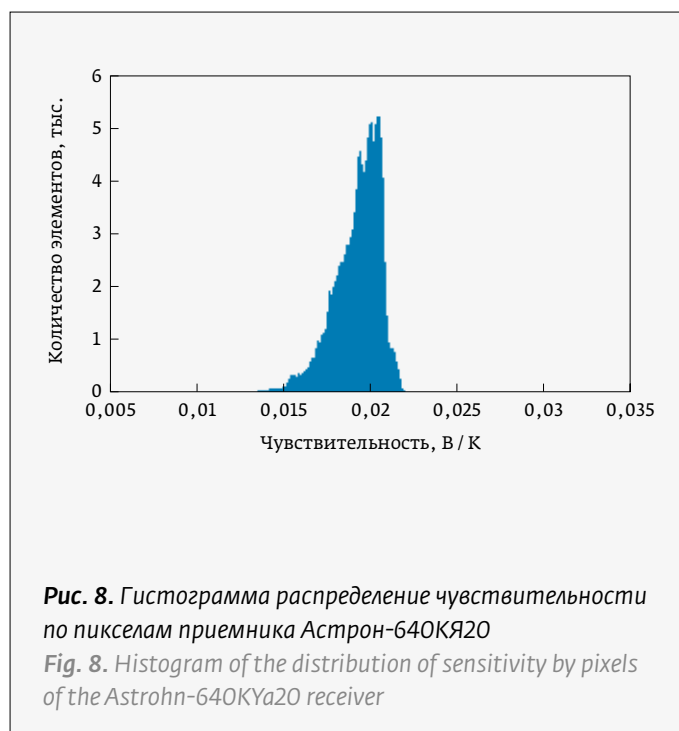
Также следует отметить большую однородность чувствительности пикселей на матрице приемника Астрон-640КЯ20, что хорошо видно на гистограмме рис. 8.

Приемники на КРТ имеют лучше показатели по чувствительности как в диапазоне 3–5 мкм, так и в 7–14 мкм. Однако уровень годных пикселей на длинноволновых матрицах КРТ имеет неприемлемый для многих задач уровень 98%. Прием-

Germany, the USA, etc. [6, 7]. Today, reports about commercially available thermal imaging devices with a photodetector matrix of 640×480 elements based on QWs for the spectral ranges of both 3–5 μm and 8–12 μm are already commonplace. There are also reports on the creation of photodetector matrices with a format of more than 1000×1000 elements, multispectral photodetectors [8,9]. In this case, the advantages of structures with QWs are most convincingly manifested in the spectral range of 8–12 μm and longer wavelengths. Thus, today the QW technology is one of the main technologies due to which IR systems are equipped with the cooled PDs for various purposes. At the same time, the greatest demand for QWIPs is observed in IR systems, which require PDs in the long-wavelength range of a large format, as well as multispectral devices [1, 6].

COMPARATIVE ANALYSIS OF COOLED PDS OF THE LONG-WAVELENGTH SPECTRUM

longwave thermal imaging cooled photodetectors are designed and manufactured for the spectrum from 8 to 14 μm based on several technologies. Cooled long-wavelength PDs are produced on the basis of heterostructures of ternary compounds of cadmium-mercury-tellurium (CMT) and on the basis of heterostructures with QWs. The main manufacturers are presented in table. one.



ники на КЯ имеют промышленную повторяемость качества, хорошую равномерность чувствительности пикселей на пластине и высокий (99,9%) уровень годных пикселей. Сравнение приемников на основе КЯ фирмы LYNRED и ОКБ «Астрон» показывает идентичность основных показателей как в размере пикселя (20 мкм), так и средней чувствительности пикселей на матрице (рис. 9).

СИТУАЦИЯ В РОССИИ

В России проблема обеспечения разработок и производства в области ИК-фотоэлектроники отечественными фоточувствительными материалами стоит достаточно остро. Разработкой фотоприемных устройств различного назначения в России занимается ряд предприятий, сосредоточенных в АО «Швабе» и АО «Росэлектроника», в Российской академии наук, а также в частных предприятиях. Основными поставщиками тепловизионных ФПУ и МФПУ 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, материологическая база предприятия ориентирована на молекулярно-лучевую эпитаксию. АО «МЗ «Сапфир» производит охлаждаемые и неохлаждаемые ФПУ на основе Si, Ge, InSb, CdHgTe. Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН развивает ФПУ на основе CdHgTe, InAs, микроболометров и квантовых ям. АО «ОКБ «Астрон» (г. Лыткарино) разрабатывает и производит тепловизионные приборы гражданского назначения на основе неохлаждаемых ФПУ собственного про-



Рис. 10. Общий вид приемника Астрон-640КЯ20

Fig. 10. General view of the Astrohn-640KYa20 receiver

The characteristics of long-wavelength CMT and QW are different while each has its pros and cons. In Russia, over the past few years, several research and development works have been carried out to develop and master the PDs of the long-wave range. The main developers were Orion RPA, RDB Astrohn and ISP SB RAS. Matrix PDs with a resolution of 640×480 px for the spectrum range of 8–14 μm are currently being produced at RDB Astrohn and Orion RPA. RDB Astrohn produces uncooled PDs based on Astrohn-64017 type microbolometer arrays and cooled PDs based on Astrohn-640KYa20 type QW heterostructures based on QW heterostructures industrially produced at

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



изводства, а также охлаждаемых ФПУ на основе КЯ совместно с «Светлана-Рост» и микроохлаждающей системы Астрон-МКС500.[9]

Таким образом, в настоящее время в России разработаны ФПУ второго поколения, а также крупноформатные и смотрящие ИК ФПУ. Достигнутые результаты близки по своим показателям мировому уровню [9, 10].

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ФПУ НА КЯ

Несмотря на впечатляющие успехи в области разработки ФПУ с КЯ, сегодня остается ряд проблем, который ограничивает круг применений данной технологии. Разработка охлаждаемого ФПУ 3-го поколения преследует цель получить в результате прибор большого формата с пороговой чувствительностью (в одном или нескольких спектральных диапазонах), близкой к предельной, при максимально возможной рабочей температуре. Именно по пороговой чувствительности и рабочей температуре ФПУ на КЯ уступают сегодня аналогам на основе КРТ. Для улучшения указанных характеристик ФПУ на КЯ необходимо проведение исследований фундаментального характера с целью уточнения физических механизмов, лежащих в основе работы ФПУ на КЯ, а также поиска конструктивных и технологических решений, учитывающих новые результаты исследований. Важнейшим фактором, определяющим пороговую чувствительность любого ФПУ, является квантовая эффективность. По данному показателю ФПУ на КЯ пока уступают узкозонным аналогам. Однако, как показано в ряде публикаций, такое отставание может быть сведено к минимуму за счет усовершенствования конструкций чувствительных элементов ФПУ [5, 6].

Рабочая температура, кроме квантовой эффективности, зависит также от времени жизни носителей в активной области и от конструкции КЯ. Как уже отмечалось, структур на КЯ по своей природе во многом аналогичны примесным фотосопротивлениям. Указанное сходство позволяет использовать для увеличения времени жизни в КЯ те же методы, что и в примесных фотосопротивлениях, в которых вероятность захвата носителя на примесный центр может быть уменьшена на несколько порядков путем преобразования этого центра из нейтрального в заряженный [5]. Аналогичный прием может быть применен и в структуре с КЯ посредством легирования не квантовой ямы, а барьера, в результате чего яма будет заряжена отрицательно, и свободные носители будут отталкиваться от нее, т.е. вероятность захвата

Svetlana-Rost JSC (St. Petersburg). RDB Astrohn also produces cooled PDs based on heterostructures with CMT of the Astrohn-640KRT15A810 type based on heterostructures with CMT produced at the ISP SB RAS. The PDs produced by Orion RPA for the range of 8–12 μm on CMT have a resolution of 320×240 px.

The main advantages of cooled PDs are their speed (up to 200 frames per second) and high sensitivity. It should be noted that the sensitivity of long-wave cooled PDs (about 35 mK) is inferior to short-wave receivers (about 15–20 mK) by about 2 times and is comparable to the sensitivity of microbolometric arrays.

The most famous receivers in Russia are CMT Scorpio LW and QW Sirius LW (France). Let us compare the receivers LYNRED (France), used in the Russian Federation, based on the Scorpio-LW type CMT connection, on Sirius LW quantum wells and RDB Astrohn quantum wells receiver, Table 2

French receivers show a difference in the number of valid pixels between CMT and QWIP receivers in favor of the latter (99.9%). This is primarily due to the physics of the quantum well heterostructures themselves and the mature growth technology. Numerous publications note the great stability and repeatability of technological processes for creating structures based on quantum wells. This is also confirmed by the indicators of domestic PDs based on quantum wells grown at the Svetlana-Rost JSC for the receivers by RDB Astrohn.

The CMT receiver has a slightly larger spectral range (7.7–9.3 μm) with a peak in the 8.5 μm region and 0.7 μm in both directions. For QW receivers with a peak of 8.5 μm , the range is narrower, for Astrohn it is ± 0.3 μm in both directions, for Sirius it is ± 0.5 μm in both directions.

Also noteworthy is the high uniformity of the pixel sensitivity on the Astrohn-640KYa20 receiver matrix, which is clearly seen in the histogram in Fig. 8

The CMT receivers have better performance in sensitivity both in the range of 3–5 microns and in the range of 7–14 microns. However, the level of usable pixels on long-wavelength CMT matrices is 98%, which is unacceptable for many tasks. The QW receivers have industrial quality repeatability, good uniformity of pixel sensitivity on the plate and a high (99.9%) level of usable pixels. Comparison of QW receivers by LYNRED and RDB Astrohn shows the identity of the main indicators both in the pixel size (20 μm) and in the average pixel sensitivity on the matrix. (Fig.9)

Таблица 3. Характеристики длинноволнового охлаждаемого приемника Астрон-640КЯ20А89

Table 3. Characteristics of the Astrohn-640KYA20A89 long-wave cooled receiver

Технология Technology	Квантовые ямы (AlGaAs/GaAs) – «Светлана»
Спектральный диапазон, мкм Spectral range, μm	8,3–8,7
Эквивалентная шуму разность температур, мК Noise-equivalent temperature difference, mK	при 70 К – 25, при 73 К – 30
Формат матрицы Matrix format	640×512
Шаг матрицы, мкм Matrix pitch, μm	20
Частота кадров, Гц Frame rate, Hz	50
Диаметр охлаждаемой диафрагмы, мм Cooled diaphragm diameter, mm	5,1
Спектральная чувствительность по уровню 0,5, мкм Spectral sensitivity at the level of 0.5, μm	min=8,3, max=8,7
Среднее значение удельной обнаружительной способности при температуре фона 300 К (D), см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹ Average value of specific detectivity at a background temperature of 300 K (D), cm Hz ^{1/2} W ⁻¹	$3-7 \times 10^{10}$
Количество битых фоточувствительных элементов не более, % The number of broken photosensitive elements, no more than, %	<0,3
Рабочая температура охлаждаемого модуля, К Working temperature of the cooled module, K	70–73
Время выхода модуля на стационарный режим, мин Time for the module to reach the stationary mode, min	при НКУ ≤5, при 55 °С ≤8
Амплитуда выходного сигнала, В Output signal amplitude, V	1,12–3,75
Напряжение питания электронной подсистемы считывания, В Supply voltage of the electronic reading subsystem, V	5,6; 2,9
Потребляемая мощность электронной подсистемы считывания, Вт Power consumption of the electronic reading subsystem, W	≤2
Напряжение питания микрокриогенной системы, В Supply voltage of the microcryogenic system, V	24
Потребляемая мощность микрокриогенной системы при НКУ, Вт Power consumption of microcryogenic system at low-voltage switchgear, W	На старте ≤20, в стационарном режиме ≤6
Рабочая температура, °С Working temperature, °C	–40 ... +60
Температура хранения, °С Storage temperature, °C	–45 ... +70
Вес, г Weight, g	550



в яму уменьшится, а время жизни возрастет. Для реализации указанного метода увеличения времени жизни необходимы как конструктивные, так и технологические усовершенствования при создании ФПУ с КЯ.

Также резкость границ барьер – яма весьма существенным образом может влиять на время жизни, темновой ток и, как следствие, на пороговую чувствительность [5, 8]. В смотрящих ФПУ особую актуальность приобрели однородность чувствительности по матрице, количество дефектных элементов.

Одним из достоинств ФПУ на КЯ является их потенциально высокая стойкость по отношению к разного рода внешним воздействующим факторам. В первую очередь, это стойкость по отношению к ионизирующим излучениям и лазерному воздействию большой энергии. Однако сообщения о проведении исследований в указанных областях в зарубежной периодике практически отсутствуют. Ввиду особой важности указанных свойств ФПУ для различных специальных применений проведение исследований стойкости ФПУ на КЯ является актуальным.

Отмеченные выше физико-технологические проблемы создания ФПУ на основе КЯ характеризуют данное направление в целом, однако они имеют особое значение для России, где сохраняется отставание отечественной прикладной науки в данной области [11].

Это требует как фундаментальных исследований в области физики низкоразмерных полупроводников и ИК-фотоники [12–14], так и разработки перспективных прикладных применений в различных областях техники [15–17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последнее десятилетие можно охарактеризовать как период стремительного развития технологий КЯ и приборов на его основе. Такие ФПУ разрабатываются практически всеми ведущими фирмами. Достигаемое при их применении повышение информативности и вероятности обнаружения и распознавания, а также компактность комплексированных оптико-электронных систем являются основными движущими силами развития этого направления. В следующем десятилетии двухспектральные ФПУ, наряду с мегапиксельными, станут основными коммерчески доступными изделиями ИК-фотоэлектроники. Для реализации двухспектральных ФПУ, чувствительных в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм, применяют технологии на основе КЯ.

SITUATION IN RUSSIA

In Russia, the problem of providing development and production in the field of IR photoelectronics with domestic photosensitive materials is quite acute. The development of photodetectors for various purposes in Russia is carried out by a number of enterprises concentrated in Shvabe JSC and Ruselectronics JSC, in the Russian Academy of Sciences, as well as private enterprises. The main suppliers of thermal imaging PDs and MPDs are Orion RPA JSC and MZ Sapfir JSC, which are part of Shvabe JSC, as well as the private enterprise RDB Astrohn JSC. Orion RPA JSC develops and manufactures cooled and uncooled photodetectors, the material science base of the enterprise is focused on molecular beam epitaxy. MZ Sapfir JSC produces cooled and uncooled PDs based on Si, Ge, InSb, CdHgTe. The Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences is developing PDs based on CdHgTe, InAs, microbolometers and quantum wells. RDB Astrohn JSC (Lytkarino) develops and manufactures civil thermal imaging devices based on uncooled PDs of its own production, as well as cooled QWIPs together with Svetlana-Rost and the Astrohn-MKS500 microrefrigeration system. [9]

Thus, at present, Russia has developed PDs of the second generation, as well as large-format and IR viewing PDs. The results achieved are close in terms of their indicators to the world level [9, 10].

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF QWIPs

Despite the impressive progress in the field of development of QWIPs, today there are a number of problems that limit the range of applications of this technology. The development of a cooled PDs of the 3rd generation aims at obtaining a large-format device with a threshold sensitivity (in one or several spectral ranges) close to the limit at the highest possible operating temperature. It is precisely in terms of threshold sensitivity and operating temperature that QWIP are inferior today to analogues based on CMT. In order to improve the indicated characteristics of QWIPs, it is necessary to carry out fundamental studies in order to clarify the physical mechanisms underlying the operation of QWIPs, as well as to search for constructive and technological solutions that take into account new research results. The most important factor determining the threshold sensitivity of any PD is the quantum efficiency. According to this indicator, QWIPs are still inferior to their narrow-gap counterparts. However, as

Нам представляется, что в России продолжится отставание от ведущих зарубежных компаний в области разработки ФПУ, и просто финансовых, пусть даже значительных вливаний в существующие организационные структуры для его преодоления недостаточно. Задача достижения паритета с мировым уровнем, а также создания научно-технического и технологического заделов для развития ФПУ может быть решена программно-целевым методом, предусматривающим проведение комплекса мероприятий технического, финансового и организационного характера в рамках механизма государственно-частного партнерства.

REFERENCES

1. **Burlakov I. D., Ponomarenko V. P.** *Sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya fotoelektroniki. Materialy XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya.* – М: NPO Orion. 2018. p.5.
Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П. *Современное состояние и тенденции развития фотоэлектроники. Материалы XXV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения.* – М: НПО Орион. 2018. с. 5.
2. **Rogalsky A.** *Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition).* – New York-CRC Press of Taylor & Francis Group. 2019. 1043 p.
3. **Sizov F., Rogalsky A.** *Opto-Electronics Review.* 2011;19(3):346.
4. **Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A.** *Tverdotel'naya fotoelektronika. Fotorezistory i fotopriemnye ustrojstva.* – М.: Fizmatkniga. 2012. 368 p.
Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. *Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства.* – М.: Физматкнига. 2012. 368 p.
5. Patent RU 2589759. Photodetector based on a structure with quantum wells / «Cyclone»: Solodkov A. A., Tarasov V. V., Kulikov V. B. Патент RU 2589759. Фотоприемник на основе структуры с квантовыми ямами / ЦНИИ «Циклон»: Солодков А. А., Тарасов В. В., Куликов В. Б.
6. **Razeghi M.** *Technology of Quantum Devices.* – New York: Springer US. 2010.
7. **Kovshov S., Nikonov A. V., Pashkeev D. A., Lopatina E. A.** *Sovremennoe sostoyanie razrabotok i issledovanij sverhreshetok II tipa*

shown in several publications, such a lag can be minimized by improving the designs of PD sensitive elements [5,6].

The operating temperature, in addition to the quantum efficiency, also depends on the carrier lifetime in the active region and on the design of the QW. As already noted, structures on QWs are similar in nature to impurity photoresistors. This similarity makes it possible to use the same methods to increase the QW lifetime as in impurity photoresistors, in which the probability of carrier capture by an impurity center can be reduced by several orders of magnitude by converting this center from neutral to charged [5]. A similar technique can also be applied in a structure with a QW by doping not a quantum well, but a barrier, as a result of which the well will be negatively charged and free carriers will be repelled from it, i. e. the probability of being trapped in the pit will decrease, and the lifetime will increase. To implement this method of increasing the lifetime, both constructive and technological improvements are required in the creation of QWIPs.

Also, the sharpness of the barrier – well boundaries can significantly affect the lifetime, the dark current, and, as a result, the threshold sensitivity [5, 8]. In viewing PDs, the homogeneity of sensitivity across the matrix and the number of defective elements have acquired particular relevance.

One of the advantages of QWIPs is their potentially high resistance to various kinds of external influencing factors. First, this is resistance to ionizing radiation and laser exposure to high energy. However, there are practically no reports



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



- dlya priborov IK-fotoelektroniki. *Uspekhi prikladnoj fiziki*. 2021;9(2): 97–111. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-97-111.
- Ковшов С., Никонов А. В., Пашкеев Д. А., Лопатина Е. А. Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотэлектроники (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2021;9(2): 97–111. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-97-111.
8. Sizov F. F. ИК-Фотэлектроника: Фотонные или тепловые детекторы? *Perspektiv. Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2015;12(1): 25–52.
 9. Kul'chickij N. A., Naumov A. V., Starcev V. V. Infrared Focal Plane Array Detectors: «Post -Pandemic» Development Trends. Part I. *Photonics Russia*. 2020;14(3):234–244. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.3.234.244. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть 1. *Фотоника*. 2020;14(3):234–244. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.3.234.244.
 10. Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Starcev V. V., Pahomov O. V. Micro-Cryogenic Stirling Cooler with a Combined Regenerator and Magnetocaloric Cooling Step. *Photonics Russia*. 2019;13(5):496–499. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.496.499. Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Пахомов О. В. Микрокриогенная система Стирлинга с комбинированным регенератором и магнитокалорической ступенью охлаждения. *Фотоника*. 2019;13(5):496–499. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.496.499.
 11. Kul'chickij N. A., Naumov A. V., Starcev V. V. Neohlazhdaemye mikrobolometry infrakrasnogo diapazona-sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018;20(10):613–624. 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.
 12. Nikolaev S. N., Bagaev V. S., Krivobok V. S., Davletov E. T., Gulyashko A. S., Kopytov G. F., Vasil'chenko A. A. Multicomponent Structure of an Electron-Hole Liquid in Shallow SiGe/Si Quantum Wells. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2018; 82:427–430. DOI:10.3103/S1062873818040135.
 13. Glazov M. M., Suris R. A. Collective states of excitons in semiconductors. *Phys. Usp*. 2020; 63: 1051–1071. DOI:10.3367/UFNe.2019.10.038663.
 14. Karimullin, K. R., Arzhanov A. I., Eremchev I. Y., Kulnitskiy B. A., Surovtsev N. V., Naumov A. V. Combined photon-echo, luminescence and Raman spectroscopies of layered ensembles of colloidal quantum dots. *Laser Phys*. 2019; 29: 124009. DOI:10.1088/1555-6611/ab4bdb.
 15. Rozhentsov A. A., Baev A. A., Gromyko D. S. Resolving and Estimating Signal Parameters in Infrared, Raman, and Terahertz Spectrometers and Other Analytical Tools. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2018; 82: 1518–1521. DOI: 10.3103/S1062873818120183.
 16. Romanovskii O. A., Sadovnikov S. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Broadband IR Lidar for Gas Analysis of the Atmosphere. *J. Appl. Spectrosc.* 2018; 85: 457–461. DOI: 10.1007/s10812-018-0672-y.
 17. Rocheva V. V., Khochenkov D. A., Generalova A. N., Nechaev A. V., Semchishen V. A., Stepanova E. V., Sokolov V. I., Khaydukov E. V., Panchenko V. Y. Upconversion nanoparticles for tumor imaging with near-infrared radiation. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2016; 80: 467–470. DOI: 10.3103/S1062873816040274.

ОБ АВТОРАХ

Кульчицкий Николай Александрович, д.т.н., 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, к.т.н., главный конструктор, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0002-2800-544

on research in these areas in foreign periodicals. In view of the particular importance of the indicated properties of the PDs for various special applications, it is important to study the resistance of the QWIPs.

The physical and technological problems of creating QWIPs, noted above, characterize this area as a whole, however, they are of particular importance for Russia, where the backlog of domestic applied science in this area remains [11].

This requires both basic researches in the field of physics of low-dimensional semiconductors and IR-photonics [12–14], and perspectives of applications in different fields [15–17].

CONCLUSION

The last decade can be characterized as a period of rapid development of QW technologies and devices based on it. Such PDs are developed by almost all leading companies. The increase in the information content and the probability of detection and recognition achieved with their use, as well as the compactness of complex optoelectronic systems, are the main driving forces for the development of this direction. In the next decade, two-spectrum PDs, along with megapixels, will become the main commercially available products in IR photoelectronics. To implement two-spectral PDs sensitive in the ranges of 3–5 and 8–12 μm , QW-based technologies are used.

It seems to us that Russia continues to lag behind the leading foreign companies in the development of PDs, and simply financial, even if significant, “injections” into existing organizational structures are not enough to overcome it. The task of achieving parity with the world level, as well as creating scientific, technical, and technological groundwork for the development of PDs, can be solved by a program-target method that provides for a set of technical, financial, and organizational measures within the framework of a public-private partnership mechanism.

ABOUT THE AUTHORS

Kulchitsky Nikolai Alexandrovich, Dr. of Sciences (Eng.), e-mail: n.kulchitsky@gmail.com, Professor, Moscow Technological University (MIREA), Chief Specialist, State Scientific Center of the Russian Federation, Orion Research and Production Association JSC, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-4664-4891

Naumov Arkady Valerievich Analyst Engineer, Astrohn Optical-Mechanical Design Bureau JSC, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia. ORCID: 0000-0001-6081-8304

Startsev Vadim Valerievich, Cand. of Sciences (Eng.), Chief Designer, Astrohn Optical -Mechanical Design Bureau, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia. ORCID: 0000-0002-2800-544



www.prombvk.ru

РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

12-14.04.2022

Специализированные выставки

- Машиностроение. Металлообработка
- Инновационный потенциал Уфы

ВДНХ **ЭКСПО** УФА




МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКИ
И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



АДМИНИСТРАЦИЯ
ГОРОДСКОГО ОКРУГА г. УФА РБ



БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

 Мероприятия проводятся с учетом всех
требований Роспотребнадзора



ОРГКОМИТЕТ:
+7 (347) 246 41 80, 246 41 77
promexpo@bvkeexpo.ru

Facebook / [prombvk](https://www.facebook.com/prombvk)
Instagram / [promexroufa](https://www.instagram.com/promexroufa)
#рпфуфа #промфорумуфа