

# OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

---

## ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

---

---

PACS07.57.Kp,85.60.Gz

### **ИК-ФОТОЭЛЕКТРОНИКА: ФОТОННЫЕ ИЛИ ТЕПЛОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ? ПЕРСПЕКТИВЫ**

*Ф. Ф. Сизов*

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины  
проспект Науки 41, 03680 Киев, Украина; e-mail: sizov@isp.kiev.ua

### **ИК-ФОТОЭЛЕКТРОНИКА: ФОТОННЫЕ ИЛИ ТЕПЛОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ? ПЕРСПЕКТИВЫ**

*Ф. Ф. Сизов*

**Аннотация.** Инфракрасные (ИК) детекторы приобретают все большую роль в различных областях деятельности человека (мониторинга окружающей среды, пожарной безопасности, связи, космического мониторинга поверхности Земли, медицинской диагностики, безопасности и военных применений, отслеживания и захвата целей, и т.п.). В статье обсуждаются вопросы, связанные с разработкой и эксплуатацией современных детекторов и крупноформатных (матричных) фотоприемных устройств (ФПУ) ИК-излучения. Прогресс в исследованиях и разработках ИК ФПУ оказали существенное влияние на развитие ИК технологий. Приведено сравнение характеристик ФПУ с учетом эксплуатационных условий и предельных параметров их функционирования.

**Ключевые слова:** ИК-детекторы, ФПУ, кадмий-ртуть-теллур, неохлаждаемые детекторы

### **IR-PHOTOELECTRONICS: PHOTON OR THERMAL DETECTORS? OUTLOOKS**

*F. Sizov*

**Abstract.** Infrared (IR) detectors play now an increasing role in different areas of human activity (e.g., in environmental surveillance, fire safety control, communications, space surveillance of the Earth, medical diagnostics, security and military applications, tracking and targeting, etc.). Discussed

in the paper are issues associated with the development and exploitation of up to date basic IR radiation detectors and large-size (matrix) focal plane arrays (FPAs). Progress in research and development for applications IR FPAs has rendered significant influence on infrared technologies. Comparison of FPA detector performance characteristics is given with account of operational conditions and performance limits.

**Keywords:** IR detectors, FPA, cadmium-mercury-telluride, uncooled detectors

## ІЧ-ФОТОЕЛЕКТРОНІКА: ФОТОННІ ЧИ ТЕПЛОВІ ДЕТЕКТОРИ? ПЕРСПЕКТИВИ

*Ф. Ф. Сизов*

**Анотація.** Інфрачервоні (ІЧ) детектори набувають все більшу роль у різних областях діяльності людини (моніторинг оточуючого середовища, пожежної безпеки, зв'язку, космічного моніторингу поверхні Землі, медичної діагностики, безпеки та військових застосувань, відстеження та захоплення цілей, та ін.). У статті обговорюються питання, які пов'язані з розробкою та експлуатацією фотоприймальних пристроїв (ФПП) ІЧ-випромінювання. Прогрес у дослідженнях та розробках ІЧ ФПП справили суттєвий вплив на розвиток ІЧ технологій. Наведено порівняння характеристик ФПП з урахуванням експлуатаційних умов та граничних параметрів їх функціонування.

**Ключові слова:** ІЧ-детектори, кадмій-ртуть-телур, неохолоджувані детектори

### 1. Предисловие

Приемники ИК излучения применяются для обнаружения излучения в «невидимых» для глаза человека участках спектра и получения изображений от объектов, находящихся при температуре  $T > 0$  К. Обнаженное тело человека ( $T \sim 310$  К) излучает во всем спектре электромагнитного излучения от  $\lambda = 0$  мкм до  $\lambda = \infty$ . При этом излучаемая мощность, согласно закону Стефана-Больцмана,  $W(T) = \sigma_B \cdot T^4 \approx 1$  кВт. Здесь  $\sigma_B = 5.6686 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана и предполагается, что площадь поверхности человеческого тела  $S \approx 2$  м<sup>2</sup>. При той же температуре окружающей среды человеческое тело находится в равновесии с ней и поэтому не теряет энергию. Но, например, при температуре окружающей среды ниже на  $\Delta T \approx 20$  К тело человека теряет около 250 Вт и не одетый человек быстро замерзнет. В соответствии с законом Вина максимальная длина волны  $\lambda_{\max}$  интенсивности испускаемого излучения зависит от температуры:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0.2898 \text{ см} \cdot \text{град.}$$

Интуитивно люди всегда были убеждены, что получение изображений в ИК-диапазоне спектра ( $\lambda > 0.75$  мкм) является важной технологией получения дополнительной информации от невидимых для человеческого глаза (который чувствителен в спектральном диапазоне примерно от 0,4 до 0,75 мкм) объектов (например, в ночное время).

История ИК детекторов началась с экспериментов Вильяма Гершеля (William Hershel) с термометром в 1800 году. Их дальнейшее развитие в 19-м и начале 20 века было связано, в основном, с тепловыми детекторами – термометрами и болометрами. Второй тип детекторов, фотонные (квантовые) детекторы, был разработан, в основном, в 20 веке. Фотонный эффект, связанный с явлением фотопроводимости, был обнаружен В. Смитом (W. Smith) в 1873 году, когда он проводил эксперименты с селеном в качестве изолятора. Но первый ИК фотопроводящий детектор был разработан Т.В. Кейсом (T.W. Case) в 1917 году на основе  $Tl_2S$ . В 1904 году Дж. Бозе (J. Bose) впервые был запатентован твердотельный диодный де-

тектор для обнаружения электромагнитных (ЭМ) волн (“Детектор для регистрации электрических возмущений” – “Detector for electrical disturbances”).

Период между Первой и Второй мировыми войнами м.б. охарактеризован как период развития фотонных детекторов и преобразователей изображений. Это были преобразователи изображения (image tubes) (современное название – усилители яркости с фотокатодами, микроканальными пластинками и люминесцентными экранами в качестве основных элементов), с чувствительностью в ближнем ИК-диапазоне спектра ( $\lambda \sim 0.8 - 1.2$  мкм). Идея преобразователя изображения была впервые предложена Г. Холстом (G. Holst) и Г. де Буrom (H. DeVoer) в 1928 году. В 1934 году Холст создал первый успешный электронно-оптический преобразователь (“стакан Холста”). Преобразователь состоит из фотокатода, расположенного в непосредственной близости от флуоресцентного экрана. Электроны, выбитые из фотокатода ИК фотонами, попадали на флуоресцентный экран и, таким образом, преобразовывали ИК изображение в изображение в видимой области спектра.

В 1933 году Е.В. Кутцшер (E.W. Kutzscher, Германия) обнаружил, что сульфид свинца (PbS) является фотопроводящим материалом при регистрации излучения длиной волны около 3 мкм. Этот детектор был первым действующим ИК детектором, нашедшим разнообразные применения во время Второй мировой войны. После Второй мировой войны, Р.Дж. Кэшман (R.J. Cashman) в США обнаружил, что соли свинца (PbSe и PbTe) могут быть использованы в качестве инфракрасных детекторов. После Второй мировой войны развитие технологий ИК-детекторов происходило, в основном, за счет военных разработок. В 1959 году В.Д. Лоусон (W.D. Lawson) с коллегами показал, что изменения в ширине запрещенной зоны кадмий-ртуть-телура (КРТ) ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) можно применять для создания ИК-детекторов с длиной волны, зависящей от изменений в их химическом составе «х».

Развитие ИК технологий определялось доминирующим вкладом фотонных детекторов

почти до конца 20-го века. Существенным недостатком ИК фотонных детекторов является необходимость криогенного охлаждения. Это необходимо для предотвращения тепловой генерации носителей заряда, являющейся источников шумов, ограничивающих параметры приемников излучения.

Вторая революция в ИК видении началась в последние десятилетия 20-го века после получения результатов исследований для малоразмерных неохлаждаемых тепловых детекторов для военных и гражданских целей. На протяжении конца 1970-х - начала 1990-х годов несколько компаний разработало неохлаждаемые тепловые детекторы, основанные на различных принципах обнаружения тепловых потоков (ИК излучения), что позволило формировать крупноформатные массивы (матрицы) приемников ИК излучения. Первые тепловые детекторы в крупноформатном исполнении были получены с использованием сегнетоэлектриков типа титаната-бария-стронция ( $\text{BaSrTiO}_3$ ) (Texas Instruments, США), микроболометров (Honeywell, США) на основе  $\text{VO}_x$ , а затем микроболометров с использованием  $\alpha\text{-Si}$  (LETI + ULIS, Франция).

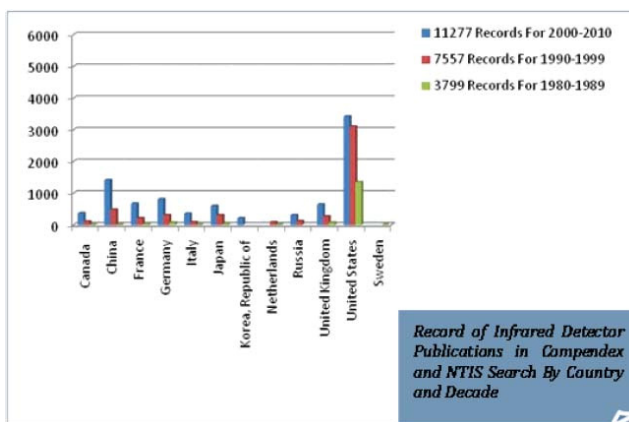


Рис. 1. Статистика опубликованных работ в области ИК детекторов в разных странах [1].

Разработки охлаждаемых и неохлаждаемых детекторов для коммерческих и военных целей также проводились в Великобритании, Японии, Южной Корее, Канаде, Китае, Италии, России и других странах. На рис. 1 представлены государства, которые согласно базе

данных Science, проводят подобные исследования. Сравнивая количество публикаций из разных стран за последние 30 лет, можно увидеть заметное увеличение количества работ в большинстве стран [1].

Сейчас лидерами на этом рынке являются несколько компаний: Raytheon, BAE Systems, DRS Technologies, FLIR, L-3 Communications, Sensors Unlimited–Goodrich и некоторые другие (США), NEC, Mitsubishi (Япония), XenICs (Бельгия), SCD (Израиль), INO (Канада) и др.

По сравнению с фотонными, тепловые детекторы во второй половине XX века применялись в меньшей степени, поскольку они работали относительно медленно (время ответа  $\tau > 5 \times 10^{-2}$  с) и с более низкой чувствительностью. Но, создавая чувствительные пиксели с меньшими размерами, удалось значительно уменьшить время отклика: тепловая константа времени  $\tau_{th} = C_{th}/G_{th}$  сегодня может составлять около  $\tau_{th} \sim 20$  мс и менее. Для микроболометров на основе  $VO_x$  или  $\alpha$ -Si:H с размерами пикселей  $\sim 50 \times 50 \times 0.5$  мкм теплоемкость  $C_{th} \sim 2 \cdot 10^{-9}$  Дж/К и коэффициент теплопроводности  $G_{th} \sim 10^{-7}$  Вт/К.

Начиная с конца 1970-х осуществился значительный прогресс в функционировании ИК-детекторов, обусловленный прогрессом в увеличении количества элементов в линейках и матрицах детекторов, что делает их гораздо более экономически эффективным, в первую очередь, благодаря применению кремниевых интегральных схем считывания и обработки информации (Read out Integrated Circuits – ROICs). Интеграция таких схем с разными типами детекторов позволила создавать ИК матрицы ФПУ, которые могут насчитывать до  $10^8$  ИК-детекторов, что соответствует числу чувствительных рецепторов в глазе человека ( $\sim 2 \times 10^8$ ). Также применение такой технологии сделало возможным дискретизацию процесса получения и обработки изображений.

История ИК детекторов в различные периоды времени представлена в ряде книг и статей (см., напр., [2-6]).

В данной статье представлена сравнительная характеристика преимуществ и недостатков ИК фотонных и тепловых детекторов и

матриц, созданных, в основном, на основе полупроводников с узкой запрещенной зоной – КРТ и микроболометров, а также представлен сравнительный анализ современных ИК матриц. В табл. 1 представлены уровни технологической готовности (technology readiness levels – TRLs) для различных типов матриц ИК детекторов.

Параметры ИК детекторов и ФПУ (например, чувствительность, которую можно охарактеризовать мощностью, эквивалентной шуму ( $NEP$  – noise equivalent power), обнаружительной способностью ( $D^*$ ) или шумом, эквивалентного разнице температур ( $NEDT$  – noise equivalent difference temperature), размерами чувствительных элементов и др.) имеют решающее значение для анализа обнаружения объектов, распознавания и их идентификации.

В статье не будет рассматриваться особенности ROICs – интегральных схем считывания, т.к. это требует отдельного рассмотрения. В настоящее время для ИК мегапиксельных ФПУ требуются ROICs большого размера (Рис. 2).

## 2. Классификация инфракрасных детекторов

В детекторе, трансформация поглощенного электромагнитного излучения, как правило, приводит к возникновению или изменению электрического сигнала. Это поглощенное излучение возбуждает или нагревает электронную или решеточную подсистемы детекторов, что приводит к изменениям их свойств или изменениям в распределении электронов по энергиям, таким образом, модифицируя движение заряженных носителей. Такие изменения фиксируются измерениями изменений физических параметров детектора.

Большинство ИК детекторов можно разделить на две основные категории: фотонные (или квантовые) детекторы и тепловые детекторы. Эти две категории, в свою очередь, можно разделить на большое количество подклассов. Например, среди фотонных детекторов могут быть следующие: фотодиоды, фотопроводники, фотоэмиссионные детекторы,

фото-МДП (МДП – металл-диэлектрик-полупроводник), фото-ПЗС (ПЗС-приборы с зарядовой связью) детекторы, усилители яркости, детекторы на эффекте фотонного увлечения, фототранзисторы и т.д.

Среди тепловых детекторов можно отметить: пироэлектрические (сегнетоэлектрические) детекторы, термометры, термопары, болометры, биметаллические детекторы, сверхпроводящие детекторы, пневматические (ячейки Голя (Golay cells)) и др. Трудно сравнить преимущества и недостатки всех детекторов в одной статье. Чтобы ознакомиться с ИК детекторами и матрицами ФРА, можно обратиться,

например, к монографиям [6, 8]. В данной статье будут рассматриваться только некоторые свойства и характеристики наиболее широко применяемых в настоящее время детекторов.

В *фотонных детекторах*, а это, в основном, полупроводниковые детекторы, излучение поглощается непосредственно чувствительным к данному излучению материалом – электронами, связанными с атомами решетки (находящихся в валентной зоне – «собственные» детекторы) или примесными атомами («несобственные» или примесные детекторы), или свободными носителями (детекторы на свободных носителях) внутри валентной

**Табл. 1.**  
Сравнение существующих детекторов для длинноволнового ИК излучения [7].

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

ДВИК - длинноволновое инфракрасное излучение (LWIR – long wave infrared) (спектральная область 8-14 мкм), СР - сверхрешетка, QWIP - ИК фотоприемник с квантовыми ямами (QWIP – quantum well IR photodetector), QDIP - ИК фотоприемник с квантовыми точками (QDIP – quantum dot IR photodetector)



или зоны проводимости и в металле вблизи границы металл-полупроводник (фотоэмиссионные детекторы – Шоттки-детекторы (SBD – Schottki Barrier Diode детекторы) (рис. 3). Т.е., фотонные детекторы реагируют только на фотоны, энергия которых превышает некоторые пороговые значения, например, ширину запрещенной зоны полупроводника («собственные» детекторы), энергию переходов в квантовых ямах (КЯ), квантовых точках (КТ) и сверхрешетках (СР), высоту барьера  $q\phi_b$  в детекторах на основе диодов Шоттки. Количество носителей заряда, генерированных в фотонном детекторе за счет поглощения излучения может измеряться непосредственно (напряжение или ток), а отклик квадратичных (поглощенная мощность пропорциональна квадрату напряженности электрического поля) фотонных детекторов пропорционален числу поглощенных фотонов.

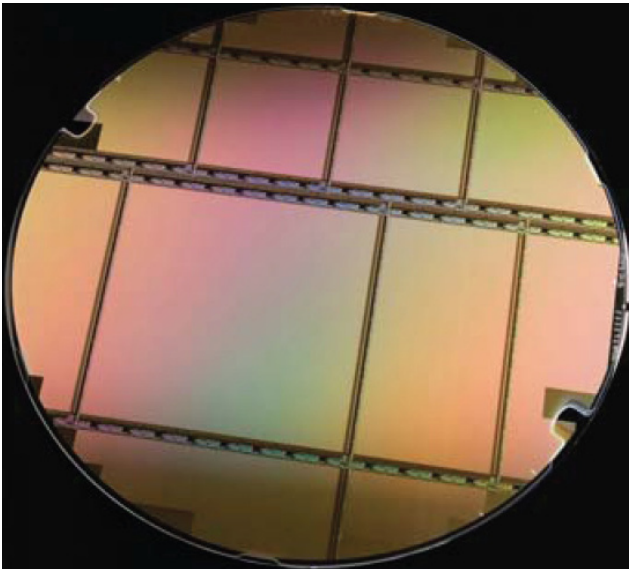


Рис. 2. 8-дюймовая кремниевая пластина со схемами считывания с 4К×4К, 2К×4К и 2К×2К кристаллами интегральных схем [7].

Процессы поглощения излучения в фотонных детекторах не сопровождаются заметными изменениями температуры чувствительного элемента (температуры решетки) по сравнению с тепловыми детекторами. Это и является причиной наличия длинноволновой границы чувствительности («красная» грани-

ца чувствительности) фотонных детекторов (рис. 4). Для достижения хорошего соотношения сигнал-шум, для ИК фотонных детекторов спектральных областей чувствительности 3 – 5 и 8 – 14 мкм (MWIR – средне-волновые ИК и LWIR – длинноволновые ИК) прозрачности атмосферы, как правило, требуется криогенное охлаждение (вплоть до  $T \sim 80 - 150$  К), чтобы уменьшить скорость тепловой генерации носителей заряда. Эти детекторы, как правило, являются относительно быстродействующими (время отклика  $\tau \sim 10^{-4} - 10^{-10}$  сек), по сравнению с неохлаждаемыми тепловыми приемниками излучения (время отклика которых  $\tau \sim 10^{-1} - 10^{-2}$  с). Зависимость температуры функционирования различных квантовых ИК приемников излучения от длинноволновой границы фоточувствительности показана на рис. 5.

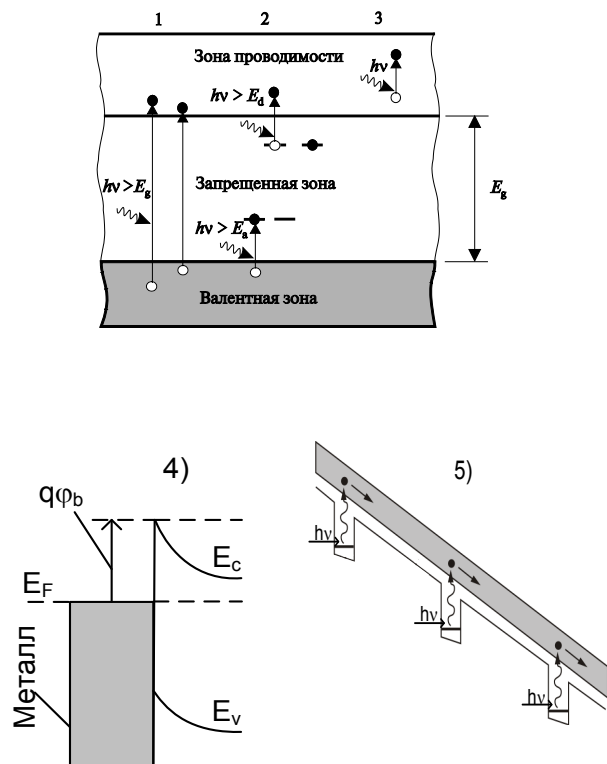


Рис. 3. Фотонные механизмы возбуждения электронной подсистемы в фотонных детекторах: 1) собственное возбуждение, 2) примесное возбуждение, 3) поглощение свободными носителями, 4) возбуждение в диодах Шоттки, 5) возбуждение в квантовых ямах.

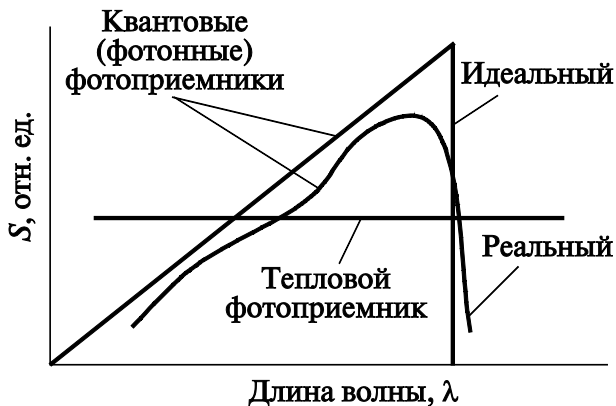


Рис. 4. Относительные спектральные зависимости отклика фотонных и тепловых детекторов.

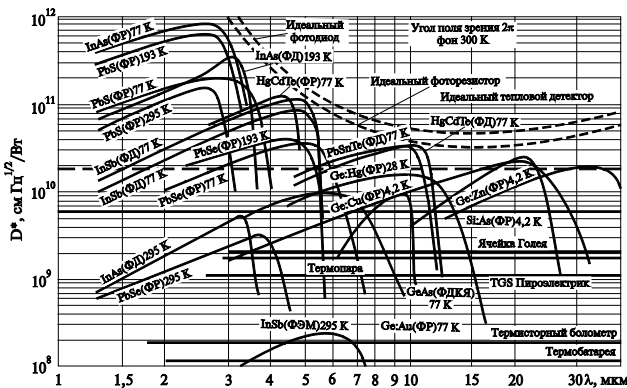


Рис. 5. Температуры функционирования различных квантовых ИК приемников излучения от длинноволновой границы фоточувствительности.

Границы длинноволновой чувствительности для фотонных детекторов, при наличии материалов с изменяющейся узкой запрещенной зоной (например,  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ) или в примесных детекторах с малыми энергиями активации ( $Ge:X$ ,  $Si:X$ ), или КЯ и СР с мелкими квантовыми уровнями, определяются, в основном, их температурами эксплуатации. Для эффективных фотонных детекторов, скорость генерации носителей  $g$ , возбуждаемых излучением, должна быть значительно выше, чем скорость термо-генерации  $g_{th}$

$$g = \eta \alpha N_{ph} \gg g_{th} = n_{th} / \tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения излучения,  $\eta$  – квантовый выход,  $N_{ph}$  – число фотонов, по-

падающих на детектор,  $n_{th}$  – количество термо-генерируемых носителей заряда и  $\tau$  – время рекомбинации. Для типичного квантового (фотонного) детектора (например, КРТ с узкой шириной запрещенной зоны или примесного  $Ge:X$  фотоприемника) типичные значения  $\alpha \sim 10^3 - 10^2 \text{ см}^{-1}$ ,  $\eta \sim 0,5 - 0,1$  и  $N_{ph} \sim 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (для ТГц диапазона спектра  $\lambda \sim 300 \text{ мкм}$ , ширине спектрального диапазона  $\Delta\lambda \sim 40 \text{ мкм}$ , излучения черного тела при  $T = 300 \text{ К}$ , поле обзора  $FOV = \pi sr$ )  $g = \alpha \times \eta \times N_{ph} \sim (0,1 - 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Для  $Ge:X$  (или КРТ, например, с  $E_g \approx 4 \text{ мэВ}$  при  $T \sim 4 \text{ К}$ ), скорости термогенерации из примесных состояний или межзонной термогенерации (собственная концентрация носителей – для КРТ  $n_{th} \sim (10^{12} - 2 \cdot 10^{11}) \text{ см}^{-3}$ ) и характерном времени рекомбинации  $\tau \sim (10^{-7} - 10^{-10})$  величина  $g_{th} \sim (2 \cdot 10^{18} - 10^{22}) \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1} \gg g$ .

Для сверхдальнего ИК спектрального диапазона  $\lambda \sim 45 \text{ мкм}$ ,  $\Delta\lambda \sim 10 \text{ мкм}$ ,  $N_{ph} \sim 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и для того же поля обзора для КРТ (ширина запрещенной зоны  $E_g \sim 0,025 \text{ эВ}$  при  $T = 80 \text{ К}$ )  $n_{th} \sim 3,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  также  $g_{th} \gg g$ . Аналогичные соотношения справедливы и для несобственных детекторов и детекторов на основе КЯ и СР. Этот вид детекторов будет неэффективен в дальнем инфракрасном спектральном диапазоне ( $\lambda \geq 50 \text{ мкм}$ ) при рабочих температурах  $T > 30 \text{ К}$  [9, 10], а также детекторов на основе СР и собственных детекторов [6] (см. также рис. 5).

Интересно отметить, что для фотонных детекторов, функционирующих в режиме ограничения фоном (BLIP режим, BLIP – background limited performance), когда их характеристики ограничены флуктуациями фонового излучения (сейчас почти все ИК собственные фотонные детекторы для спектральных диапазонов 3 – 5 и 8 – 12 мкм работают в BLIP режиме), наиболее предпочтительным спектральным диапазоном в земных условиях с температурой фона  $T_b \approx 300 \text{ К}$  для пассивного видения является спектральный диапазон  $\lambda \approx 8 - 28 \text{ мкм}$  [8]. Сдвиг длинноволновой границы фоточувствительности не приведет к существенному увеличению регистрации тепловых контрастов земной поверхности. Однако, ИК приборы в спектральной области 14 – 28 мкм практически не используются в земных усло-

виях из-за сильного поглощения излучения атмосферой и значительной скорости термодинамики носителей заряда при температурах эксплуатации приемников излучения  $T \sim 78 - 150$  К.

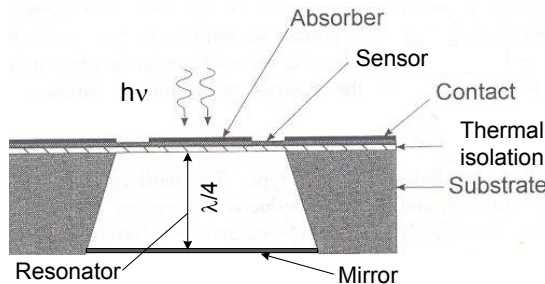


Рис. 6. Схематическое изображение конструктивных частей болометра [6].

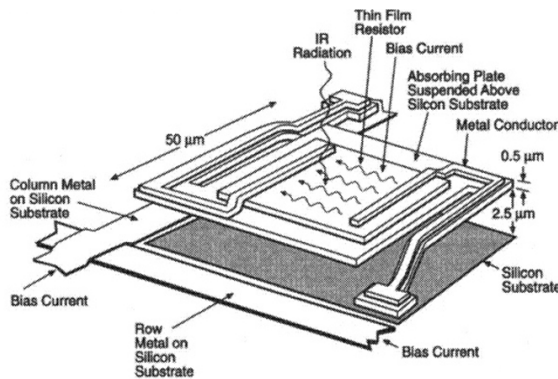


Рис. 7. Дизайн одноуровневого болометра [11].

Среди большого количества материалов, предложенных для фотонных детекторов, фундаментальные свойства узкощелевого полупроводника  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (высокий коэффициент поглощения, высокая подвижность электронов и относительно низкий уровень тепловой генерации), вместе с возможностью изменения химического состава  $x$ , являются почти идеальным для широкого диапазона применений ИК-детекторов. Одна из проблем, выращивание кристаллов и пленок  $HgCdTe$ , связана с высоким давлением паров ртути. Но сейчас, эта проблема в значительной мере преодолена выращиванием эпитаксиальных слоев с использованием различных технологий (например, жидкофазной эпитаксии или молекулярно-лучевой эпитаксии) при контро-

лируемых условиях выращивания в области пониженных температур получения эпитаксиальных слоев.

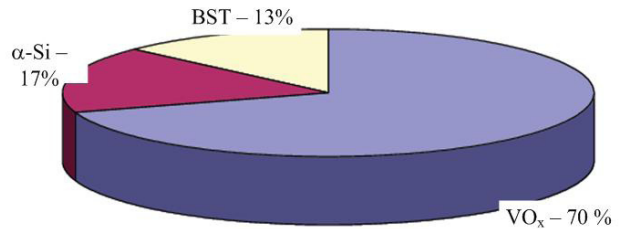


Fig. 8. Рынок ИК-тепловых детекторов [12].

Возможность изменения запрещенной зоны КРТ приводит к возможности изменять спектральные области применения ИК-детекторов: от коротковолнового ИК (1 – 3 мкм) до средневолнового ИК (3 – 5 мкм), длинноволнового (8 – 14 мкм) и дальнего длинноволнового (14 – 30 мкм). Развитие технологий КРТ доминирует для военных применений, где требуется высокая чувствительность, быстродействие, дифракционно ограниченные размеры пикселей и высокие коэффициенты заполнения (площадь заполнения активных элементов по сравнению со всей освещаемой площадью). Рассчитанные темновые токи для ограниченного фона ( $T_b = 300$  К) LWIR фотоприемников КРТ с оптикой с диафрагменным числом  $F/1$  при  $T_d = 77$  К и  $\lambda_{co} \sim 12$  мкм, значительно выше ( $\sim 0,18$  А/см<sup>2</sup>) по сравнению с темновыми токами реальных фотодиодов КРТ ( $\sim 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>) при меньших углах зрения, что позволяет функционировать матрицам  $HgCdTe$  в BLIP режиме [1].



Рис. 9. «Дорожная карта» развития тепловизионных систем на основе микроболومترических матриц [19].



В *тепловых детекторах*, поглощенное излучение преобразовывается, как правило, в изменения их электрических параметров. Для одноуровневых микроболометров, например, процесс регистрации падающего излучения может быть реализован с помощью конструкции, состоящей из трех различных частей таких детекторов (рис. 6). Конструкция включает поглощающий (absorber) ИК излучение слой, слой тепловой изоляции (thermal isolation) и датчик температуры (sensor). Падающее излучение поглощается в ИК поглощающем слое, в котором ИК электромагнитная энергия преобразуется в тепловую энергию термодатчика, тем самым изменяя его физические свойства (например, сопротивление, диэлектрическую проницаемость, термоэлектрический эффект, термомеханический эффект), которые приводят к изменениям в измеряемых выходных параметрах.

Относительная спектральная чувствительность этих детекторов, из-за отсутствия пороговых барьеров в процессе поглощения излучения, не должна зависеть от длины волны (рис. 4). Хотя зависимость отклика от длины волны может наблюдаться из-за особенности конструкции тепловых детекторов, например, изменения коэффициента излучения спектральной зависимости слоев покрытий, используемых для увеличения эффективности излучения поверхностных слоев чувствительных элементов или наличия резонатора толщиной (на рис. 7  $\lambda/4 = 2.5$  мкм для спектральной области  $\lambda \approx 10$  мкм), увеличивающего коэффициент поглощения микроболометра. Типичный дизайн одноуровневого болометра показан на рис. 7. Типичные значения изменений температурного коэффициента изменения сопротивления для микроболометров на основе  $VO_x$  и  $\alpha$ -Si находятся в диапазоне  $\alpha_{th} \sim 0.02 - 0.05$   $K^{-1}$ .

В настоящее время доступны различные типы неохлаждаемых тепловых детекторов. Они изготавливаются из различных, и часто нетрадиционных материалов с разными преимуществами, но сейчас широко распространенными являются только три типа таких детекторов [6, 12]. Это  $VO_x$ ,  $\alpha$ -Si микроболо-

метры и сегнетоэлектрические (группа пирозлектриков) детекторы, основанные, например, на титанате бария-стронция (BST), которые позволяют производить сборку детекторов в большие массивы с устройствами считывания информации (ROIC) на основе кремниевых больших интегральных схем. На рис. 8 показано распределение рыночных долей  $VO_x$ ,  $\alpha$ -Si и BST детекторов.

Для  $VO_x$  микроболометров и BST детекторов в 1980 в США считалось, что у военных будет широкий выбор технологий для системам тепловидения на основе неохлаждаемых детекторов [12]. Но более 10 лет назад ситуация изменилась. Убедившись в преимуществах  $VO_x$  над BST было принято решение не финансировать исследования в BST технологиях. Кроме того, в связи с необходимостью сборки тонких тепловых детекторов с малой площадью в большие массивы детекторов, возникли определенные трудности, так как большинство сегнетоэлектриков, как правило, теряли свои свойства при уменьшении толщины, и существовали трудности в изготовлении дифракционно ограниченных пикселей.

Тонкопленочные резистивные микроболометры впервые были рассмотрены в начале 1980-х [13, 14]. Работы по неохлаждаемым инфракрасным микроболометрам и новым технологиям матриц, разработанных в Honeywell, были значительно расширены после опубликования статьи в конце 1980-х годов [15]. (Более полная информация об исследованиях в этой области опубликована, например, в [6, 16]).

Ряд книг, глав в книгах и обзорных статей, касающихся инфракрасной физики и различных инфракрасных технологий, в том числе принципов работы неохлаждаемых инфракрасных детекторов, были опубликованы в последние годы [6, 8, 11, 17, 18].

Более 10 лет назад была разработана дорожная карта для неохлаждаемых матриц тепловых ИК детекторов [19] (см рис. 9). Видно, что при улучшении характеристик и увеличении плотности пикселей (уменьшении их размера), количество военных применений м.б. значительно расширено. При количестве пикселей в матрице  $2 \times 10^5$  значение  $NETD = 100$  мК для использо-

вания в устройствах с их использованием для наблюдения и ночного вождения считались хорошими применениями. При увеличении плотности пикселей с уменьшением шага до 10 – 20 мкм [20]), при количестве пикселей  $> 10^6$ , стало возможным их широкое применение в нашиваемых устройствах, боевой технике, стрелковых прицелах, датчиках наземных охранных устройств и др. Если цели такой программы будут реализованы ( $NETD < 10$  мК), что встречает значительные технические трудности, то области применения таких тепловых неохлаждаемых матриц могут быть расширены.

### 3. Предельные характеристики. Информационная емкость.

Мера качества биологической или технической системы видения определяется отношением количества информации, воспринятой системой, к количеству информации, содержащейся в потоке излучения, попадающего в нее.

Зрение является наиболее важным из человеческих чувств, поскольку более 80% информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Но спектральный диапазон, в котором человеческий глаз чувствителен к излучению является узким по отношению ко всему спектру электромагнитного излучения, хотя число фотонов, определяющее информационную емкость – высокое, поскольку максимум чувствительности глаза и максимум излучения Солнца близки.

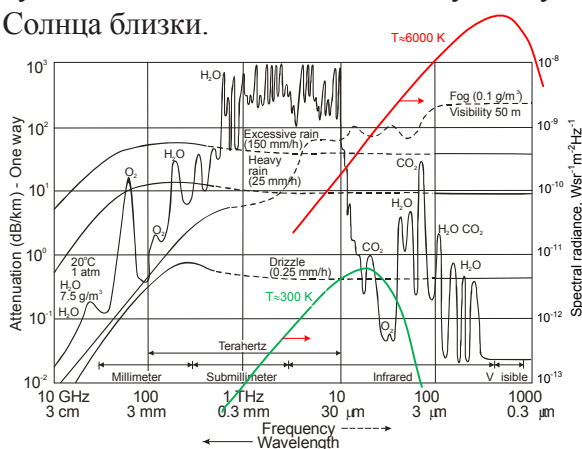


Рис. 10. Прозрачность атмосферы Земли от видимой к радиочастотной области [21]. Также показано спектральная яркость для абсолютного черного тела при температурах  $T \approx 6000$  К

(Солнце) и  $T \approx 300$  К (Земля).

На рис.10 приведены спектральные зависимости спектральных излучений Солнца и Земли, а также прозрачности атмосферы Земли. Показана энергетическая яркость, а не спектральная энергетическая светимость. Это сделано для того, чтобы показать меньшую разницу значений между этими кривыми.

Важным фактом для эффективности человеческого зрения является то, что атмосфера Земли прозрачна (без тумана или дождя) в видимой области спектра. Как видно, она также прозрачна в 3 – 5 и 8 – 12 мкм ИК диапазонах спектра, что делает системы технического зрения информативными в этих спектральных диапазонах. И это одна из причин, почему системы ИК технического зрения являются наиболее распространенными системами видения.

Вторая причина заключается в наличии максимума интенсивности излучения объектов ( $\lambda_{\max} \approx 9.7$  мкм), находящихся при  $T \sim 300$  К (средняя температура поверхности Земли, нагреваемой Солнцем  $T \approx 293$  К).

**Информационная емкость.** Сегодня, ИК технологии находят применение в получении изображений в невидимых для глаза участках спектра, информационных и телекоммуникационных технологиях. Поступающий на фотоприемник каждый фотон несет информацию. В случае только шума,  $\langle \Delta N_{\text{ph}} \rangle \sim \langle (N_{\text{ph}}) \rangle^{1/2}$  ступаями потока фотонов ( $\Delta N_{\text{ph}} \sim ((N_{\text{ph}}))^{1/2}$  (по статистике Пуассона, которая применима при энергии фотонов  $h\nu \gg k_B T$ , где  $N_{\text{ph}}$  – число фотонов в потоке фотонов), информационная емкость системы видения  $C_M$  определяется выражением [22]

$$C_M = \frac{M}{8} \log_2 \left[ \frac{1}{k} \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) \sqrt{\eta A_d \tau_{\text{acc}} N_{\text{ph}}} \right], \text{ бит.} \quad (2)$$

Здесь  $M$  – количество чувствительных элементов в матрице приемников или  $M$  – число элементов разложения в изображении.

Это выражение определяет верхний предел информационной емкости системы видения в одном спектральном диапазоне в случае только шума, связанного с флуктуациями потока

фотонов. Здесь  $k$  – пороговое значение отношения сигнал-шум,  $A_d$  – площадь детектора,  $\eta$  – квантовая эффективность детектора,  $\tau_{acc}$  – время накопления,  $N_{ph}$  – число фотонов, падающих на детектор, и  $\theta$  – плоский угол зрения. Отношение сигнал-шум должно быть  $k > 2$ , так как при  $k = U_{thr} / \sqrt{\langle U_{noise}^2 \rangle} = 1$  вероятность появления ложного сигнала  $P_{fs} = 0.159$ , то есть, имеет относительно большое значение. При  $k = U_{thr} / \sqrt{\langle U_{noise}^2 \rangle} = 2$  вероятность появления ложного сигнала равна 0.023 и быстро убывает с увеличением  $k$ .

Из (2) следует, что количество детекторов или число элементов разложения в изображении  $M$  представляет собой ключевой параметр, который определяет информационные возможности системы, так как другие параметры находятся под знаком логарифма. В то же время, время накопления  $\tau_{acc}$  (или время подсветки  $\tau_d$ ) для каждого чувствительного элемента пропорционально количеству  $M_e$  чувствительных элементов в матрице и обратно пропорционально  $f_r$  частоте кадров и количеству точек  $M$  в изображении:  $\tau_{acc} = 1/f_r \cdot (M_e/M)$ . Интересно отметить, что квантовая эффективность детектора играет не очень значительную роль, поскольку этот коэффициент находится под корнем и логарифмом. Это объясняет тот факт, что несмотря на низкую квантовую эффективность матриц ИК детекторов на основе барьеров Шоттки, КЯ или СР, они являются эффективными в смотрящих системах, где не требуются малые времена обновления кадров.

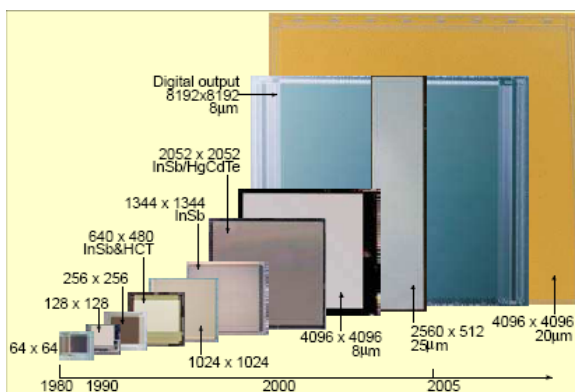


Рис. 11. Иллюстрация прогресса форматов ROIC во времени [7].

Достижения в технологиях ИК датчиков позволили увеличить размеры матриц и уменьшить размеры чувствительных элементов (пикселей) для получения мегапиксельных матриц [1, 23].

На рис. 11 показан график развития ROIC для матриц KPT в Raytheon Vision Systems (RVS, ранее исследовательский центр в Санта-Барбаре, SBRC).

Существуют высокие требования к однородности и плоскостности материалов для детекторов и кремниевых пластин для ROICs. Например, одна 4К×4К матрица ROIC имеет длину более 8 см вдоль одной из сторон. Требования по плоскостности соответствуют требованию к ряби круглого озера диаметром в 1.6 км, не превышающую величину в 75 мм. Учет такого типа плоскостности при значительных диапазонах тепловых расширений разных материалов детекторов и схем считывания требует глубокого понимания всех свойств теплового расширения используемых материалов [7].

Вследствие больших потоков фотонов, падающих на фотоприемник из окружающей среды или тепловых источников в ИК-области, из-за возрастания эффективной площади детекторов, увеличивающихся пропорционально дифракционному пределу  $A_d \sim A_{dif} \approx 2.44 \cdot \lambda \cdot F/\#$ , а также из-за используемого широкого спектрального диапазона  $\Delta\lambda \approx 8 - 14$  мкм, информационная емкость на один чувствительный элемент в видимой и ИК участках спектра сопоставимы ( $C_{vis} \approx 1.8$  байт,  $C_{IR} (8 - 14 \text{ мкм}) \approx 1.9$  байт [8]). Это является следствием того, что коэффициент контрастности в ИК-области спектра значительно меньше. Здесь  $F/\#$  – диафрагменное число оптической системы.

Важными параметрами, характеризующими свойства инфракрасных детекторов и систем, являются токовая или вольтовая чувствительности  $S_{I,V}$ , обнаружительная способность  $D^*$ , эквивалентная шуму мощность ( $NEP$  – noise equivalent power) и эквивалентная шуму разность температур ( $NETD$  – noise equivalent difference temperature) (или также  $NETD$  - noise equivalent temperature difference)

[24]. Чувствительность определяется уровнем выходного электрического сигнала  $[I_s(V_s)]$  при падающем излучении, с мощностью  $W$ :  $S_{I,V} = I_s(V_s)/W$ .  $D^*$  и  $NEP$  связаны друг с другом с помощью соотношения  $D^* = (A_d \cdot \Delta f)/NEP$ , где  $A_d$  – площадь детектора и  $\Delta f$  – полоса пропускания системы.  $NEP = W \cdot (I_n/I_s) = W \cdot (V_n/V_s)$ , где  $I_n(V_n)$  – шумовой сигнал.

$NETD$  – один из наиболее важных критериев, определяющих эффективность инфракрасных систем тепловидения. Этот параметр определяется как изменение разницы температур протяженного черного тела, приводящей к изменению величины сигнала на уровне шума, т.е., в этом случае отношение сигнал/шум  $I_s/I_n = 1$  (или  $V_s/V_n = 1$ ) ИК-детектора или системы.

Классическое выражение для  $NETD$  для случая лишь шума, обусловленного флуктуациями фонового излучения, может быть записано в виде [24]:

$$NETD = \Delta T = \frac{4(F/\#)^2 \cdot (\Delta f)^{1/2}}{A_d^{1/2} \cdot \int_{\lambda_u}^{\lambda_{co}} \frac{\partial W(\lambda, T)}{\partial T} \cdot \tau_{op} \cdot \tau_{atm} \cdot \tau_f \cdot D^*(\lambda, T) \cdot d\lambda}, \quad (3)$$

где  $\tau_p$ ,  $\tau_{op}$  и  $\tau_{atm}$  – коэффициенты пропускания оптического фильтра (как правило, охлажденного), оптики и атмосферы, соответственно,  $A_d$  – площадь детектора,  $\eta$  – его квантовая эффективность,  $\Delta f$  – полоса пропускания,  $\lambda_{co}$  – длинноволновая граница чувствительности детектора,  $\lambda_u$  – его коротковолновая граница чувствительности, определяемая отрезающим фильтром и  $\partial W/\partial T$  – производная энергетической светимости абсолютно черного тела (а.ч.т.) (плотности мощности потока излучения а.ч.т.  $W(\lambda, T)$ ). Это выражение фактически определяет спектральные области наиболее эффективного применения фотонных и тепловых приемников излучения (см. ниже).

Выражение для  $NETD$  состоит из нескольких составляющих, учитывающих вклады различных шумов. Например, для микроболометров оно имеет вид [25]

$$NETD^2 = NETD_{1/f}^2 + NETD_{J-N}^2 + NETD_{thermal}^2 + NETD_{ROIC}^2, \quad (4)$$

но это выражение можно применять к любому виду массива детекторов. Здесь суммарное значение  $NETD$  состоит из  $NETD_{1/f}$  –  $1/f$ -шум,  $NETD_{J-N}$  – шум Джонсона-Найквиста,  $NETD_{thermal}$  – шум тепловых флуктуаций детектора, включая шум фонового излучения и  $NETD_{ROIC}$  – шум интегральной схемы считывания (ROIC). Но не все шумы учитываются в этом выражении. Например, важными могут быть также геометрический шум (fixed pattern noise), шум считывания (read noise), взрывной шум (popcorn noise), дробовой шум (shot noise) и др.

### 3.1. Фотонные детекторы. Предельные параметры

Предельные параметры современных ИК фотодетекторов длин волн 3 – 5 и 8 – 14 мкм при температуре фона  $T \sim 300$  К окружающей среды, в основном определяются флуктуациями фонового излучения (BLIP режим). Значение  $NEP$ , характеризующее чувствительность детектора в случае для идеальных фотонных детекторов, можно представить в виде выражения, для данной длины волны  $\lambda$  (статистика Пуассона,  $T \geq 300$  К,  $\lambda \leq 25$  мкм) [6, 8, 24]):

$$NEP = \frac{I_n}{S_I} = \frac{\langle I_n^2 \rangle^{1/2}}{S_I} = h\nu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot N_{\lambda, T}}{\eta}} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f} = \quad (5)$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot h\nu}{\eta}} \cdot W_{\lambda, T} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f},$$

где  $I_n$  – шумовой ток детектора,  $S_I$  – токовая чувствительность детектора,  $N_{\lambda, T}$  и  $W_{\lambda, T}$  – число фотонов и плотность мощности излучения при длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$ ,  $\eta_{is}$  – квантовая эффективность детектора,  $A_d$  – площадь детектора, и  $\Delta f$  – его полоса пропускания. Для спектрального диапазона ( $\Delta\lambda = \lambda_u - \lambda_{co}$ ), количество фотонов и плотность мощности излучения (от абсолютно черного тела) определяются законом излучения Планка:

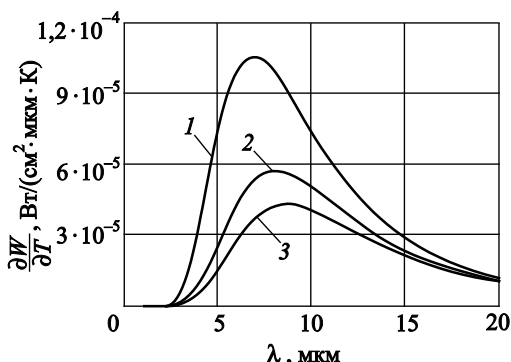


$$N'_{T,\lambda} = \frac{\Omega_i}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_{co}} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot [\exp(\frac{hc}{k_B T \cdot \lambda}) - 1]} \cdot d\lambda, \quad (6)$$

и

$$W'_{T,\lambda} = \frac{\Omega_i}{\pi} \cdot \int_{\lambda_u}^{\lambda_{co}} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot [\exp(\frac{hc}{k_B T \cdot \lambda}) - 1]} \cdot d\lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda_{co}$  и  $\lambda_u$  – определяют область спектральной чувствительности приемника излучения,  $\Omega_i = \pi \times \sin^2 \theta_i / 2$  – поле зрения детектора (FOV – field of view) и  $\theta_i$  – плоский угол зрения детектора.



**Рис. 12.** Зависимость производной  $\partial W/\partial T$  закона излучения Планка для а.ч.т. от длины волны излучения при различных температурах. Т, К: 1 – 320, 2 – 300, 3 – 280 [8].

Для того, чтобы уменьшить  $NEDT$ , компоненты в формуле (3), множители  $D^*$  и контраст светимости объекта, определяемый функцией  $\partial W/\partial T$ , должны иметь максимальные значения. Максимум функции  $\partial W/\partial T$  при температуре объекта  $T = 300$  К находится при  $\lambda = 8.035$  мкм вблизи окна прозрачности 8–14 мкм и быстро спадает в коротковолновой ИК области спектра (рис. 12). Поэтому тепловые приемники излучения, вследствие уменьшающихся значений функции  $\partial W/\partial T$  в области спектра 3 – 5 мкм и постоянных и относительно низких по сравнению с фотонными приемниками излучения обнаружительных способностей (см. рис. 5), не будут эффективными по сравнению с последними. Вследствие этого микро-

болетрические матрицы находят неширокое применение в тепловизионных приборах спектрального диапазона окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм.

Для фотонного детектора с различными длинноволновыми границами чувствительности, обнаружительная способность  $D^*_\lambda(\lambda)$  возрастает с уменьшением длины волны в значительной степени компенсируя значения  $\partial W(\lambda, T)/\partial T$ , по сравнению с областью длин волн  $\lambda \approx 8$  мкм. Это одно из основных отличий фотонного детектора от теплового, для которого  $D^*_\lambda(\lambda) = D^* \approx \text{const}$  и, таким образом, системы видения с фотонными детекторами, работающие при  $\lambda < 8$  мкм, будут иметь принципиально лучшие параметры по сравнению с системами на основе матриц тепловых приемников излучения. Это обстоятельство является основной причиной функционирования матриц тепловых приемников излучения, главным образом, в области спектра прозрачности атмосферы 8 – 14 мкм.

Анализируя значения параметра  $D^*_\lambda(\lambda)$  фотонных детекторов можно сделать заключение, что большинство из современных ИК фотонных детекторов работают в режиме, близком к VLIP режиму. Например, для HgCdTe детекторов обнаружительная способность достигает значений  $D^*_\lambda \approx 2 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт для области спектра  $\lambda_{max} \approx 10.5$  мкм и FOV  $\approx 30^\circ$  ( $\lambda_u \approx 7.8$  мкм,  $\lambda_{co} \approx 11.2$  мкм, плотность потока фотонов  $N_{ph} \approx 3.3 \cdot 10^{16}$  ф·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) для матриц приемников с функцией временной задержки и накопления (TDI – time delay and integration) для 4 чувствительных элементов [26], что дает возможность получить  $NEDT \approx 9$  мК. Режим TDI позволяет увеличить  $D^*$  примерно как квадратный корень из числа элементов.

Высокие значения обнаружительной способности для КРТ матричных приемников излучения были получены в [27] для коротковолнового ИК диапазона  $\lambda_{co} = 1.8$  мкм при рабочей температуре  $T = 295$  К,  $D^*_\lambda \approx 1.4 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт. Для относительно низких фоновых потоков ( $N_{ph} \approx 7.82 \cdot 10^{15}$  ф·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) для матрицы КРТ 256×256 с  $\lambda_{co} = 10.5$  мкм, функционирующей при  $T = 85$  К, определенное значение обнаружительной способности

$D^*_{\lambda} = 3.9 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт, а для матриц с  $\lambda_{co} = 15.8$  мкм, при температуре 40 К,  $D^*_{\lambda} = 2.76 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт [27]. Для сравнения, обнаружительная способность идеального неохлаждаемого термодетектора  $D^* = 1.813 \cdot 10^{10}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт при температуре фона  $T_b = 300$  К, флуктуации излучения которого ограничивают  $D^*$  теплового приемника излучения.

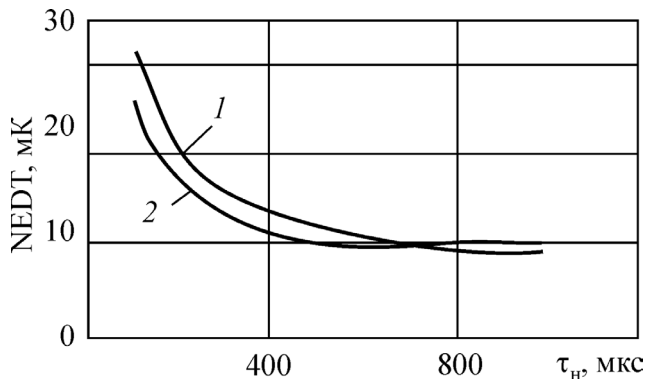


Рис. 13. NETD как функция  $\lambda_{co}$  и  $\tau_{acc}$  для матрицы HgCdTe 320×256 [28].  $\lambda_1 = 7.7$  мкм.  $A_d = (20 \times 20)$  мкм<sup>2</sup>, F/# = 2.

При параметрах в выражении (3)  $F/\# = F/1$ ,  $\tau_{op} \sim 1$ ,  $A_d = 30 \times 30$  мкм, квантовой эффективности  $\eta = 0.65$  и  $D^*_{\lambda}(\lambda, T) = 6 \cdot 10^{10}$  см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт и  $\lambda_{max} \approx 11-12$  мкм, что характерно для фотодиодов КРТ при FOV  $\approx 90^\circ$ , значение  $NETD \approx 17$  мК для спектрального диапазона 8 – 12 мкм, фоновой температуре  $T_b = 300$  К и довольно широкой полосе  $\Delta f = 1/(2\tau_{acc}) \approx 25$  кГц, что является недостижимым для матриц тепловых детекторов (обычное время накопления для зарядовой емкости фотонных детекторов  $\tau_{acc} \sim 20$  мкс). В менее широком спектральном диапазоне чувствительности и большем времени накопления, значения  $NETD$  будут еще ниже (рис. 13).

Оценочная величина параметра  $NETD$  близка к полученному значению для матрицы фотонных детекторов (табл. 2). Для диапазона длин волн  $\lambda = 4.08 - 7.73$  мкм, были получены значительно более низкие значения  $NETD$  (из-за высоких значений  $D^*_{\lambda}$ ,  $NETD = 2.75$  мК для матрицы КРТ 256×256 при  $T = 95$  К [29]).

При оценке  $NETD$  для матричных детекторов, время накопления  $\tau_{acc}$  практически равно времени обновления кадра  $\tau_{fr}$ , предполагая, что отсутствуют ограничения на времена накопле-

ния зарядовой емкости ROIC. Для типичного значения  $\tau_{fr} \sim 1/50$  Гц,  $\tau_{acc} \sim 2 \times 10^{-2}$  с и ширине полосы  $\Delta f \approx 25$  Гц, что примерно в  $10^{12}$  раз меньше, чем, например, для квантовых детекторов в линейках,  $NETD$  будет меньше в  $(\Delta f)^{1/2}$  раз (см. формулу (3)), но в ИК линейках квантовых детекторов с временной задержкой и накоплением  $D^*$  примерно на два порядка больше.

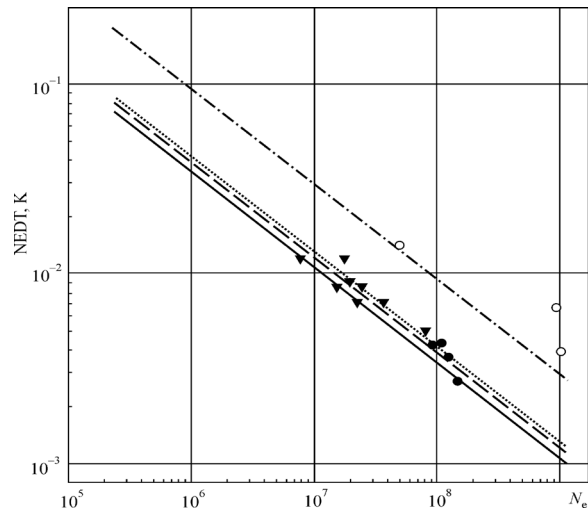


Рис. 14. Зависимость  $NETD$  для матриц КРТ при  $T = 78$  К и накопительной емкости (числа электронов  $N_e$ ) в разных спектральных диапазонах [31]. Верхняя линия и экспериментальные точки для диапазона 7.8 – 10 мкм и нижние точки и линии - для различных диапазонов 3-5 мкм.

В действительности, накопления зарядовой мощности ROIC ограничено, как правило, емкостью накопления заряда  $C \sim 2 - 3$  пК из-за отсутствия достаточной площади под детектором, которую занимает микросхема считывания и обработки информации. В кремниевых ROIC для спектрального диапазона детекторов 8 – 12 мкм, из-за большого потока фотонов,  $\tau_{acc} \sim 10 - 60$  мкс.

Но малые времена накопления фотонных детекторов дают возможность увеличить частоту смены кадров ИК систем. Это и определяет разницу между системами видения с матрицами фотонных детекторов и матрицами из неохлаждаемых тепловых детекторов, в которых время реакции каждого детектора намного больше и эти времена определяют верхнюю границу частоты смены кадров систем (как правило,  $\leq 60$  Гц).

Для увеличения  $\tau_{acc}$  фотонного детектора,

можно уменьшить его  $\lambda_{co}$  и, т.о., понизить влияние шума, связанного с флуктуациями потока фотонов из окружающей среды. Например, для матрицы детекторов на основе КРТ в спектральном диапазоне 7.7 – 9.5 мкм время накопления может быть увеличено до 400 мкс (рис. 13). При более высоких временах накопления  $NEDT$  таких матриц ограничено емкостью заряда хранения устройства считывания (ROIC).

Для ФПУ с ROIC, верхний предел чувствительности матриц фотонных детекторов определяется значением емкости накопления заряда в ROIC. Выражение для  $NEDT$  в этом случае м.б. записано в виде [8, 30]:

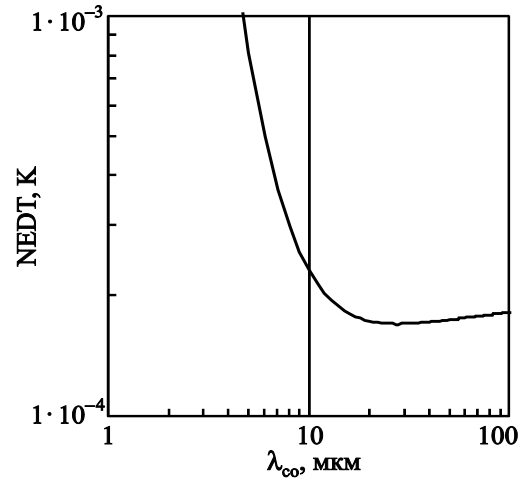
$$NEDT = 2F/\# \cdot \frac{1}{\eta_c^2 \cdot (N_e)^{1/2}} \cdot \frac{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \tau_\phi(\lambda) \cdot d\lambda}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{op} \cdot \tau_{atm} \cdot \tau_\phi \cdot \frac{\partial N(\lambda, T)}{\partial T} \cdot d\lambda} \cdot \left(1 + \frac{\Delta N_n^2}{N_e}\right), \quad (8)$$

где  $N(\lambda, T)$  – число фотонов,  $\Delta N_n$  – шум считывания одного чувствительного элемента,  $N_e$  – количество электронов в зарядовой емкости,  $h^2_{cold}$  – эффективность холодной диафрагмы.

На рис.14 представлены зависимости  $NEDT$  с зарядовой емкостью  $N_e$  в одном элементе ROIC для разных спектральных диапазонов, характерных для диодных линеек КРТ с кремниевыми ROIC [31]. Видно, что значение  $NEDT \sim 3$  мК для матриц КРТ, охлаждаемых до  $T = 78$  К, м.б. практически достигнуто, что соответствует расчетной  $NEDT$ , ограниченной только объемом зарядовой емкости ROIC.

Из (8), в частности, следует, что в случае ограничения характеристик емкостью накопления заряда, значение  $NEDT$  не зависит от  $\tau_{acc}$ , что иллюстрируется рис. 13. Оценка предельных характеристик фотонных детекторов в BLIP режиме показывает, что для «смотрящих» систем ИК диапазона, функционирующих с  $\tau_f \approx \tau_{acc} \sim 20$  мкс ( $\tau_{acc} \sim 40$  мс для тепловых детекторов), оптике  $F/\# = 1$ , активной площади детектора  $A_d = 30 \times 30$  мкм и для  $\lambda_{co} = \lambda_{min} = 28$  мкм предельное значение  $NEDT_{min} \approx 0.17$  мК (рис. 15). Для  $\lambda \sim 10$  мкм

области, это значение всего лишь на  $\sim 12\%$  хуже, и, таким образом, системы на основе матриц таких детекторов, функционирующих в области 8 – 14 мкм, являются эффективными приборами для обнаружения малых тепловых контрастов [32]. Для спектральной области 3 – 5 мкм,  $NEDT$  ухудшается в несколько раз, но все же является низким и приемлемым для специальных и гражданских применений.



**Рис. 15. Зависимость  $NEDT$  идеального фотодиода от длинноволновой границы спектральной чувствительности во всей спектральной области от  $\lambda = 0$  мкм до  $\lambda = \lambda_{co}$  мкм.  $T = 300$  К,  $\tau_n = 40$  мс,  $A_d = 30 \times 30$  мкм<sup>2</sup>,  $\eta = 1$ ,  $\tau_\phi = 1$ ,  $\eta_c = 1$ ,  $\tau_{opt} = 1$ ,  $\tau_{atm} = 1$  [8].**

Количество пикселей в ФПУ уже приближается или превышает  $N \sim 10^6$ , что важно для пространственного разрешения при наблюдении удаленных объектов и их идентификации, и усилия разработчиков ФПУ направлены на увеличение количества пикселей в матрицах. На рис. 16 в качестве иллюстрации тенденции увеличения числа чувствительных элементов в матрице, показаны измеренные и спрогнозированные значения числа пикселей для ФПУ на основе InSb для диапазона тепловизионных приборов 3 – 5 мкм. Некоторые примеры мегапиксельных FPA также представлены в табл. 2.

Одной из основных тенденций в любой системе формирования изображения является уменьшение площади пикселя. Малые размеры пикселей в матрицах детекторов позво-

ляют реализовать высокое разрешение ФПУ, увеличить дальность обнаружения, распознавания и идентификации объекта наблюдения, а также уменьшить весо-габаритные характеристики систем, что приводит к уменьшению их стоимости и улучшению надежности функционирования. В то же время, важным обстоятельством является уменьшение стоимости чипа ФПУ, при этом пропорционально уменьшается и стоимость инфракрасной оптики. На рис.17 показана тенденция сокращения шага пикселей в матрицах КРТ.

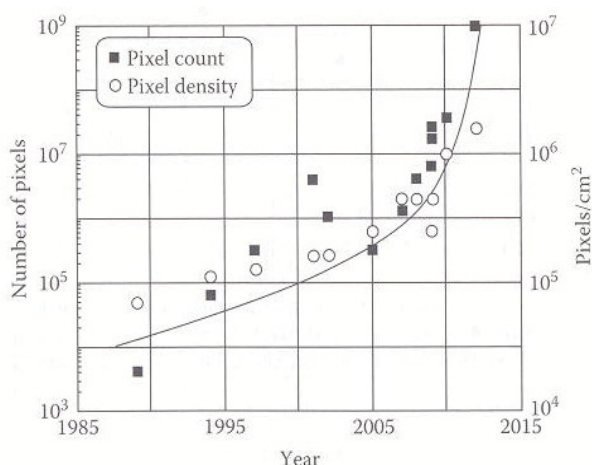


Рис. 16. Значения количества и плотности чувствительных пикселей для матриц InSb [6, 33].

Некоторые параметры для КРТ, КЯ и InSb ИК фотонных ФПУ представлены в табл. 2. Многие из охлаждаемых КРТ ФПУ в режиме суб-кадрового функционирования имеют частоту кадров до нескольких сотен и тысяч Гц. Параметры массивов детекторов на основе InSb для ИК для спектральной области 3 – 5 мкм других производителей близки к представленным в табл. 2 для этой области спектра. Матрицы детекторов на основе КРТ по сравнению с таковыми на основе InSb, как правило, характеризуются более высокими рабочими температурами, а также перестраиваемой спектральной областью, которая регулируется в процессе роста химическим составом полупроводника [23]. Наличие более длинноволновой границы чувствительности детекторов на основе InSb при  $T = 78$  К до  $\lambda \sim 6.5$  мкм при-

водит к наличию дополнительного шума, связанного с флуктуациями фонового излучения в спектральной области  $\lambda \sim 5 - 6.5$  мкм. Также, в связи с разными технологиями изготовления матриц на основе КРТ и InSb, шаг пикселей в матрицах КРТ м.б. уменьшен по сравнению с шагом пикселей в матрицах на основе InSb, что приводит к уменьшению конечных размеров матриц и меньшим требованиям к охлаждаемым устройствам и уменьшению размеров оптики систем видения.

Параметры ФПУ, представленные в табл. 2, приведены для гибридных устройств. Эта технология позволяет реализовать фактор заполнения близкий к 100% и увеличить площадь для кремниевых схем считывания под чувствительным элементом детектора для накопления и обработки сигнала. В гибридной технологии можно оптимизировать характеристики матриц детекторов и схем считывания отдельно с последующей их гибридизацией с помощью, например, In столбиков, служащих контактами между контактными площадками матриц детекторов и схем считывания. Еще одним важным позитивным фактором гибридной технологии является возможность уменьшения размеров пикселей, сохраняя при этом значение  $NEDT$ .

Рассматривая системы, основанные на QWIPs (ИК фотоприемник с квантовыми ямами, следует отметить, что современные QWIP и матрицы КРТ могут обеспечить близкие параметры смотрящих систем (табл. 2), но время интегрирования для матриц QWIP является в 10 – 100 раз большим из-за их низкой квантовой эффективности ( $\eta < 0,1$ ) и узкой спектральной области чувствительности ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.1$ ). Короткое время интегрирования для длинноволновых ИК детекторов КРТ, как правило, ниже 100 мкс и обеспечивает более эффективный захват быстро движущихся объектов системами на основе матриц КРТ.

Многие из приложений требуют одновременного обнаружения объекта в двух ИК спектральных диапазонах, что обеспечивает более точную дискриминацию наблюдаемого



**Параметры фотонных ИК FPA для некоторых крупных производителей ([6, 8,33, Data Sheets of DRS Technologies, SOFRADIR, Teledyne, TELOPS]).**

DRS Infrared Technologies (USA)	256×256	40	8 (77 K), KPT	3-5	120
	640×480	25	10 (77 K), KPT	3-5	60
	640×480	25	13 (77 K), KPT	8-10.5	<60
	640×480	12	25 (F/3.25), KPT	3.4-4.8	30-120
	1024×768	16	15 (<140 K), KPT	3-5	
	640×512	24	12 (<140 K), KPT	3-5	
	640×512	24	13.5/26.6 (80 K), KPT	(3-5)/(8-10)	
FLIR (USA)	640×512	15	18 (F/2.5, 77 K), KPT	3.7-4.8	120, 3.0 кГц – суб-матрица
	640×512	16	<30 (F/2, 77 K), KPT	7.85-9.5	115, 62 кГц – суб-матрица
	640×512	15	<20 (F/2.5, 77 K), InSb	1.5-5.1	100, 1.8 кГц – суб-матрица
SOFRADIR (France)	1024×768	10	KPT	3.4-4.9	
	1280×1024	15	18 (77-110 K), KPT	3.7-4.8	Up to 120
	1000×256	30	(<200 K), KPT	0.8-2.5	Up to 250
	640×512	15	17 (F/2, <100 K), KPT	7.7-9.5	Up to 210
	640×512	15	<18 (F/2, <120 K), KPT	3.7-4.8	Up to 120
	384×288	25	17 (77-80 K), KPT	7.7-9.5	Up to 300
	320×256	30	20 (F/2, 70-90 K), KPT	7.7-11	Up to 200
AIM (Germany)	384×288	24	15/25, KPT	3-5/8-9	120
	640×512	24	<15 (F/1.5, 77 K), KPT	3-5	<200
	640×512	15	25/40	(3-5)/(8-9)	<100
	384×288×2	40	35/25, SL (QWIP)	$\lambda_p=3.4.8/5.0$	<100
Raytheon (USA)	640×480*	20	25 (F/5), KPT	(3-5)/(8-10)	70
	1024×1024	27	35 (80 K), InSb	0.6-5.0	13
	2048×2048	20	(70-80 K), KPT	0.85-2.5	
	2048×2048	15	23 (78 K), KPT (30 K), InSb	3-5	
	2048×2048	25		0.6-5.4	
Teledyne ImagingSensors (USA)	2048×2048	18	(140 K), KPT	1.65-1.85	
	2048×2048	18	(77 K), KPT (77 K), KPT	2.45-2.65	
	4096×4096	10 или 15		1-2.5	
SCD (Israel)	1280×1024	15	20 (77 K), InSb	3-5	
TELOPS (Canada)	320×256,	30	23 (F/2, 77 K), InSb,	3-5,	≤1500,
	640×512	15	20 (F/3, 77 K), InSb	3-5	≤350 (full frame)
JPL (USA)	256×256	38	40 (70 K), QWIP	$\lambda_p \sim 8.5$	
	640×486	18	36 (70 K), QWIP (70 K),	$\lambda_p \sim 8.5$	
	1024×1024		QWIP	(4-5)/(7.5-9)	30
BAE Systems (USA)	640×480	25	30/34 (F/2, 60 K), QWIP	$\lambda_p=5.1/8.5$	50

объекта. И KPT, и ИК фотоприемники с квантовыми ямами или сверхрешетками дают возможность разработать, по крайней мере, двухцветные матрицы на одной и той же подложке, состоящей из нескольких рабочих слоев.

### 3.2. Тепловые детекторы. Предельные характеристики

К сегодняшнему дню матрицы тепловых детекторов производятся в больших объемах, чем все остальные ИК матрицы вместе взятые [6]. Более того, такие матрицы небольшого формата могут уже устанавливаться и в мобильных телефонах [35]. Характеристики

матриц микроболометров для спектрального диапазона 8 – 14 мкм уже близки к теоретически возможным с учетом всех видов шумов, ограничивающих их функционирование хотя эти характеристики принципиально хуже по сравнению с таковыми для охлаждаемых матрицам фотонных детекторов. Их основные преимущества заключаются в малом их весе, малом энергопотреблении и относительно низкой стоимости.

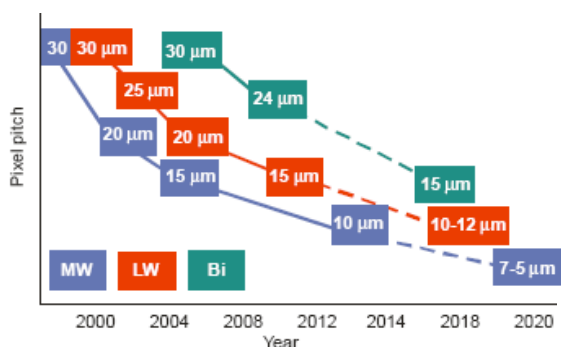


Рис. 17. Шаг пикселя для КРТ фотодиодов [34]. MW – средневолновый диапазон, LW – длинноволновый диапазон, Bi – ИК двуцветный.

Изначально разработанные для военных применений американскими оборонными компаниями («военные неохлаждаемые камеры получили значительное распространение в основном за счет значительного спроса в США, занимающего более 85% мирового рынка» [36]) ИК неохлаждаемые камеры в настоящее время широко используются во многих коммерческих приложениях (термовидение в медицине, коммерческие охранные системы и др.). Ожидается, что коммерческое применение для наблюдения, охранных систем и термографии достигнет общего объема более 1,1 миллиона единиц в 2016 г. (порядка \$ 3,4 млрд. в денежном эквиваленте, рис.18).

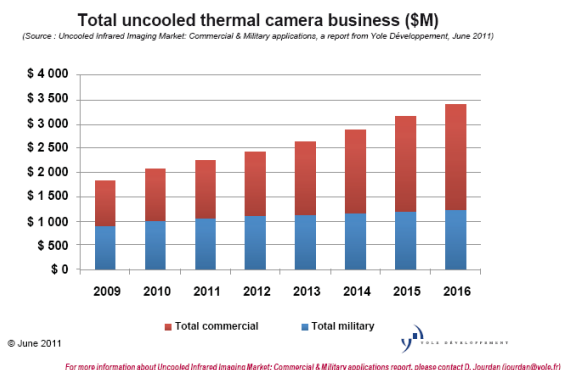


Рис. 18. Прогнозирование рынка для коммерческого и военного применения [36].

Основным направлением развития ИК матриц неохлаждаемых детекторов остается уменьшение размеров чувствительных элементов и увеличение формата (числа детекторов). В сегодняшних матрицах микро-

болметров, прежде всего, длинноволнового (LWIR) диапазона используется шаг 17 мкм в матрицах формата 640×480, 1024×768. Матрицы тепловых детекторов средневолнового (MWIR) диапазона также м.б. использованы, напр., в системах обнаружения пожаров, но их предельные характеристики ниже, чем для LWIR диапазона, что, прежде всего, обусловлено малым значением функции  $\partial W/\partial T$  (производной энергетической светимости а.ч.т.) в этой спектральной области (см. формулу (3), рис. 12 и табл. 3). В ближайшее время, неохлаждаемые массивы детекторов с шагом 10 – 12 мкм, будут доступны с еще большим разрешением (см. табл. 4). Уменьшение шага позволит уменьшить размеры оптики, что, в свою очередь, позволит увеличить дальности обнаружения и идентификации (которые обратно пропорциональны шагу элементов матрицы при одинаковой площади матриц) без увеличения весо-габаритных характеристик систем видения.

Табл. 3.  
NEDT для идеальных тепловых детекторов (BLIP режим) [8].

Спектральный диапазон, мкм	$f(\partial W/\partial T) d\lambda$ , Вт/(см <sup>2</sup> ·К)	NEDT, мК ( $A_d=50\times50$ мкм)	NEDT, мК ( $A_d=25\times25$ мкм)
8 – 14	$2.63\cdot 10^{-4}$	0.84	1.68
3 – 5	$2.13\cdot 10^{-5}$	10.36	20.72
1 – 100	$6.11\cdot 10^{-4}$	0.36	0.72

Технологии микроболметрических матриц доминируют среди инфракрасных тепловых неохлаждаемых детекторов, а стоимость самих матриц быстро падает. Возможно, оксид ванадия  $VO_x$ , который сегодня является основным материалом для микроболметрических матриц (рис. 8), будет заменен кремний-содержащими материалами (например,  $\alpha$ -Si) вследствие их стоимостных характеристик и предпочтительности производства на современных линиях производства кремниевых электронных схем, хотя  $VO_x$  детекторы и ФПУ также могут производиться на этих линиях [12].

**Производители современных неохлаждаемых ИК матриц микроболметров для спектрального диапазона  $\lambda \approx 8-14$  мкм [6, 8, 16, Data Sheets of DRS Technologies, ULIS, Raytheon].**

Производитель	Материал	Формат	Шаг, мкм	$NETD$ , мК; оптика F/# ~ F/1; частота кадров/f = 20 – 60 Гц
DRS Technologies(USA)	$VO_x$	320×240	17	<40
		640×480	25.4	<50
		640×480	17	<50
		1024×768	17	<40
L-3Communications	$\alpha$ -Si	320×240	30	<50
		640×480	17	<50
FLIR (USA)	$VO_x$	640×480	25	35
	$\alpha$ -Si	640×512	17	<50
		320×240	37.5	50
		640×480	30	50
ULIS(France)	$\alpha$ -Si	384×288	17	40
		640×480	25	<60
		640×480	17	<75
		640×480	17(3-14мкм)	<50
		1024×768	17	<60
Raytheon (USA)	$VO_x$	320×240	50	20-35
	$VO_x$	320×240, 640×480	25 25	<50 <50
		$VO_x$	1024×768 2048×1536	17 17
BAE Systems (USA)	$VO_x$	320×240	28	30
	$VO_x$	640×480	28,17	30-50
	$VO_x$	1024×1024	17	50
	$VO_x$	640×512	25	40-70
SCD (Israel)	$VO_x$	384×288	25	<50
		640×480	25	<50
		640×480	17	<50
NEC(Japan)	$VO_x$	320×240, 640×480	23.5	<75

ИК тепловые неохлаждаемые детекторы не достигли фундаментального предела, в основном, из-за технологических проблем при производстве и наличии нескольких видов шумов, которые отсутствуют в ИК фотонных детекторах фотодиодного типа. Значительные усилия должны быть направлены на улучшение характеристик микроболметров, что частично обусловлено, например, ограничениями возможностей технологий и используемых проектных норм при их производстве. Они не ограничены шумом фонового излучения, за исключением некоторых спектральных диапазонов при минимальных суб-Кельвиновских температурах и ограниченных потоках низкотемпературного фонового излучения [37].

Эквивалентная мощность шума  $NEP$

является одним из показателей качества тепловых детекторов и характеризует их чувствительность. Внутренний тепловой шум теплового приемника определяет его верхний предел  $NEP$  как

$$NEP = (4k_B T^2 G_{th})^{1/2}, \quad (9)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура чувствительного слоя, и  $G_{th}$  – коэффициент теплопроводности между детектором и радиатором. Для меньших  $G_{th}$  могут быть достигнуты меньшие значения  $NEP$ . Для  $T \approx 50$  мК и низкой тепловой (фононной) проводимости  $G_{th} \approx 10$  фВт/К могут быть достигнуты значения  $NEP \approx 4 \cdot 10^{-20}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при условии низких фоновых флуктуаций (например, фон оста-

точного космического излучения) [37]. Но для комнатной температуры и типичных условиях эксплуатации  $VO_x$  или  $\alpha$ -Si микроболометров  $G_{th} \sim 10^{-7}$  Вт/К, т.е., значение  $NEP$  на семь порядков хуже. Для этих неохлаждаемых микроболометров с размерами  $\sim 50 \times 50 \times 0,5$  мкм, теплоемкость  $C_{th} \sim 2 \cdot 10^{-9}$  Дж/К [8] и время отклика  $\tau_{th} = C_{th}/G_{th} \sim 20$  мс.

Для идеального теплового детектора, который находится в равновесии с окружающей средой и с учетом только шума температурных флуктуаций фонового излучения, параметр  $NEP$  определяется соотношением [6, 8, 17]

$$NEP = \left( \frac{16\sigma k_B T^5}{\varepsilon} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{A_d} \cdot \sqrt{\Delta f}, \quad (10)$$

а обнаружительная способность

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{NEP} = \left( \frac{\varepsilon}{16\sigma \cdot k_B \cdot T^5} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность детектора. Для  $\varepsilon = 1$  следует, что для любого идеального теплового детектора обнаружительная способность не зависит ни от длины волны, ни от площади детектора  $A_d$  и полосы пропускания  $\Delta f$  и значение  $D^* = 1.813 \cdot 10^{10}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт. Для эквивалентной шуму мощности следует, что  $NEP = 5.55 \cdot 10^{-11} \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}$  и  $NEP$  зависит от площади детектора и ширины полосы пропускания. Коэффициент температуропроводности при обмене излучением с тепловым детектором площадью  $A_d = 50 \times 50$  мкм и окружающей средой при  $T = 300$  К будет  $G_{rad} = 4\varepsilon\sigma_B T^3 A_d = 1.53 \cdot 10^{-8}$  Вт/К. Этот коэффициент теплопроводности определяет наиболее низкие возможные значения  $G_{th}$ . Здесь  $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт м $^{-2}$ ·К $^{-4}$  – постоянная Стефана-Больцмана.

В случае шума, обусловленного флуктуациями температуры и флуктуациями потока фонового излучения из окружающей среды ( $FOV = 2\pi$  ср), для  $NEPT$  можно получить следующее выражение [6, 8, 17]:

$$NEPT = \frac{8F\#^2 \cdot [2k_B \cdot \sigma_B \cdot (T_d^5 + T_b^5) \cdot \Delta f]^{1/2}}{(\varepsilon A_d)^{1/2} \cdot \tau_{op} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial W}{\partial T} \cdot d\lambda}. \quad (12)$$

Из формулы (12) можно оценить верхний предел  $NEPT$  (для идеального детектора). Для детектора с  $A_d = 25 \times 25$  мкм, температуры детектора  $T_d = T_b = 300$  К,  $\varepsilon$ ,  $\tau_{op} = 1$ ,  $\Delta f = 1/(2\tau_d)$  Гц ( $\tau_d \approx \tau_{acc} \approx \tau_{th} \approx 20$  мс), и оптики  $F/\# = 1$ , в спектральном диапазоне 8 – 14 мкм значение  $NEPT = 1.68$  мК. Здесь  $\tau_d$  – время подсветки системы.

Ограничения значений  $NEPT$  для идеальных квантовых и тепловых детекторов приведены в табл. 3 для  $T_d = T_b = 300$  К,  $\varepsilon$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_{op}$ ,  $\tau_{atm} = 1$ ,  $\Delta f = 1/(2\tau_d)$  Гц ( $\tau_d \approx \tau_{acc} \approx \tau_{th} \approx 20$  мс),  $F/\# = 1$ .

Для реальных детекторов наличие других типов шумов (формула (4)) может ухудшить параметр  $NEPT$  до нескольких десятков мК (см табл. 4) и теоретический предел для пикселей размером  $28 \times 28$  мкм может достигать  $NEPT \approx 12$  мК [16, 25]. Чтобы получить  $NEPT$  для матрицы микроболометров по формуле (4), составляющие шума включают:  $(NEPT_{1/F})^2 = (5.4 \text{ мК})^2$ ,  $(NEPT_{J-N})^2 = (5.6 \text{ мК})^2$ ,  $(NEPT_{thermal})^2 = (6.8 \text{ мК})^2$ , и  $(NEPT_{ROIC})^2 = (6.4 \text{ мК})^2$ . В этом случае результирующее значение  $NEPT$  ограничено, главным образом, тепловыми флуктуациями шума  $NEPT_{thermal}$  и, таким образом, теплопроводностью между болометром и окружающей средой.

Некоторые параметры матриц микроболометров от разных производителей, приведены в табл. 4. Они типичны для остальных охлаждаемых матриц и соответствуют данным технических характеристик других компаний.

Матрицы микроболометров в настоящее время производятся в наибольших объемах по сравнению со всеми другими ИК матрицами вместе взятыми. Один из недостатков тепловых детекторов является большое время отклика, что в случае «смотрящих» тепловизионных приборов не очень существенно, особенно для гражданских применений. Но это касается только «смотрящих» тепловизионных приборов. Многие другие приложения требуют высокой скорости срабатывания и более высокой чувствительности, что является



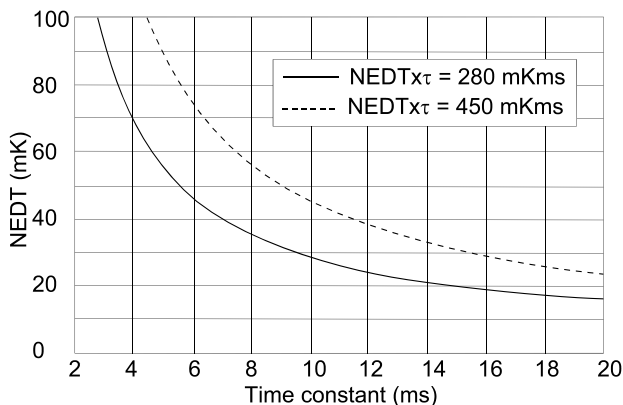
отличительными чертами квантовых (фотонных) детекторов.

Если тепловой (Джонсона-Найквиста) и  $1/f$ -шумы в тепловых  $VO_x$  детекторах преобладают над другими шумами (как правило) тогда вместо параметра  $NEDT$  параметром качества приемника излучения м.б. использован параметр ( $FOM$  – figure of merit) [38]

$$FOM = NEDT \times \tau_{th} \quad (13)$$

Зависимости  $FOM$  и  $NEDT$  от постоянной времени теплового приемника показаны на рис. 19.

Вклад теплового шума обратно пропорционален напряжению смещения. Значения как шума схем считывания, так и теплового шума приближаются к шуму тепловых флуктуаций при достаточно больших смещениях, и шум тепловых флуктуаций детектора обусловлен, в основном, теплопроводностью тонких поддерживающих «ножек» детектора (которая может иметь значение  $G_{th} \sim 3.5 \cdot 10^{-8}$  Вт/К) [38].



**Рис. 19.** Рассчитанное значение  $NEDT$  микроболлометров от постоянной времени  $\tau_{th}$  для параметра  $NEDT \times \tau_{th}$  [38].

Как видно из рис. 19, для матриц микроболлометров из  $VO_x$  значение  $NEDT$  может достигать  $NEDT \approx 20$  мК при времени отклика  $\tau_{th} \sim 20$  мс. Обычно же в промышленно выпускаемых микроболлометрических матрицах этого типа  $NEDT \approx 40 - 50$  мК. Для массива  $320 \times 240$  с размером  $VO_x$  пикселей  $50 \times 50$  мкм, было получено рекордное значение  $NEDT = 8.6$  мК [39] с оптикой  $F/1$ .

#### 4. Применение ФПУ

Многие ФПУ в системах ИК видения применяются для обнаружения, идентификации и распознавания объектов наблюдения. Обнаружение объекта возможно, если он занимает площадь не менее 1.5 - 2 пикселей в матрице детекторов, распознавание – не менее 6 пикселей, а идентификация – не менее 12 пикселей. Эти критерии обеспечивают 50-процентную вероятность того, что оператор примет верное решение, исходя из полученной картинки на экране монитора. Среди факторов, которые необходимо учесть в ходе определения обнаружения, распознавания и идентификации объекта необходимо учитывать тип камеры, объектива, характер и размеры объектов, разницу в температурах объекта и фона, частоту смены кадров, погодные условия и др.

Для систем технического зрения дальность обнаружения ограничивается не только чувствительностью пикселей, но в значительной степени и их размерами, а также оптикой системы видения. Для матриц микроболлометров формата  $320 \times 240$  (с размерами пикселей  $50 \times 50$  мкм) и  $F/1$  оптикой с фокусным расстоянием  $f \sim 10$  см, минимальный размер объекта, «видимый» одним пикселем при расстоянии в 1 км будет около 0.5 м (мгновенное поле зрения IFOV  $\sim 0.5$  мрад). С камерой Thermal-Eye 250D, использующую матрицу микроболлометров ( $NEDT \approx 50$  мК) указанного формата можно обнаружить/распознать человека на расстоянии  $\sim 500/300$  м ( $f = 50$  мм, поле зрения FOV  $\approx 18^\circ \times 14^\circ$ ) и  $\sim 1500/900$  м (оптика  $f = 150$  мм, поле зрения FOV =  $6^\circ \times 4.4^\circ$ ). Дистанция идентификации будет в  $\sim 2$  раза короче дистанции распознавания. При оптике меньшего размера, эти расстояния будут меньше.

Для такой же оптики, но с матрицей  $640 \times 480$  и пикселем  $25 \times 25$  мкм, качество изображения улучшится примерно в четыре раза, а минимальный размер объекта составит  $\sim 0.25$  м.

Для системы с охлаждаемой матрицей КРТ диапазона 3 – 5 мкм с количеством пикселей  $640 \times 480$ , шагом пикселей 15 мкм и оптикой  $F/2$  с диаметром входного зрачка  $\varnothing = 320$  мм (мгновенное поле зрения IFOV = 0.05 мрад (FLIR КРТ 1500/3000 модули) обнаружение/

распознавание/идентификация человека будут на расстояниях 10.5/3.2/1.7 км, соответственно.

Для ИК монокуляра (ATNTh OR 320 6x Thermal Sight) с матрицей неохлаждаемых микроболометров  $\text{VO}_x$  формата  $320 \times 240$  с  $NEDT \leq 50$  мК и частотой кадров 30 Гц, фокусным расстоянием объектива  $f = 50$  мм диафрагменным числом  $F/\# = 1$  с полем зрения  $\leq 4.5^\circ$  дистанция обнаружения человека составляет  $\sim 2$  км, а дистанция распознавания –  $\sim 0.8$  км.

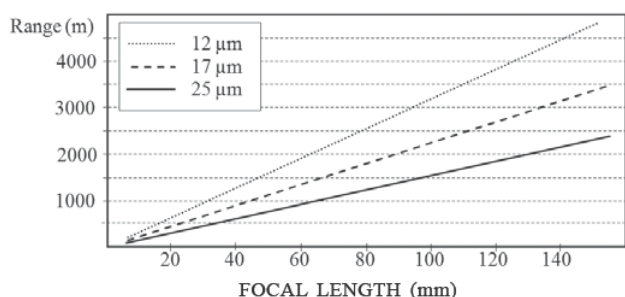


Рис. 20. Дистанции распознавания объекта размером  $2.3 \times 2.3$  м системой ИК видения с матрицей тепловых детекторов  $\alpha\text{-Si}$  формата  $384 \times 288$  в зависимости от фокальной длины объектива для разных шагов пикселей матрицы [41].

При  $NEDT \leq 30$  мК ИК камеры с матрицей  $640 \times 480$  и размером пикселей 17 мкм, оптикой с  $FOV = 12^\circ$  ( $\varnothing = 50$  мм) максимальная дистанция обнаружения человека составляет  $\sim 2.1$  км, распознавания – 400 м и идентификации – 330 м (при разнице температур объекта и фона в  $2^\circ$  С, пропускании атмосферы 90% при дистанции 1 км) [40].

На рис. 20 показана дистанция распознавания объекта  $2.3 \times 2.3$  м прибора с матрицей  $384 \times 288$  в зависимости от шага пикселей в матрице.

Стоимость оптики, изготовленной из германия, которая в значительной мере определяет стоимость систем с неохлаждаемыми матрицами, зависит приблизительно от квадрата диаметра линз. Уменьшение размера пикселя, уменьшает стоимость системы, их размер и вес, особенно для переносных систем. Но уменьшение размера пикселя, увеличивает  $NEDT$  (формула (12)). Raytheon реализует про-

грамму HD LWIR, которая закладывает основу для следующего поколения неохлаждаемых детекторов путем дальнейшего сокращения размеров пикселей до размеров  $< 17$  мкм [42]. В настоящее время шаг пикселей в некоторых матрицах микроболометров достигает 12 мкм [43]. Сейчас матрицы тепловых детекторов с размерами пикселей  $17 \times 17$  мкм доступны коммерчески (табл. 4).

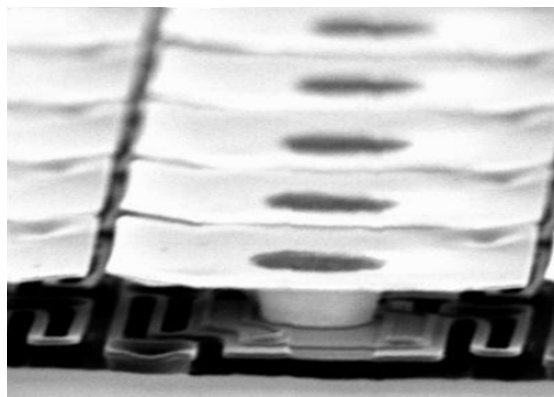


Рис. 21. «Зонтичный» двухуровневый  $\text{VO}_x$  болометр фирмы DRS.

Обычные матрицы одноуровневых микроболометров, как правило, имеют коэффициент заполнения от 60 до 70% [44, 45]. Для увеличения коэффициента заполнения была разработана двухуровневая конструкция микроболометра, позволяющая повысить его до 90% [46, 47]. Двухслойный «зонтик-дизайн» (рис. 21) позволил довести размер пикселя до  $17 \times 17$  мкм [44]. В другом двухслойном дизайне пикселей  $17 \times 17$  мкм (micromachining design), слой тепловой изоляции изготавливается на первом уровне, а слой оптического поглощения реализуется на втором уровне структуры [48].

Модификации трехуровневых микроболометров были предложены в [49]. Оценки поглощения излучения в них показали, что оно может достигать 92 %, а теплопроводность может достигать  $G \sim 2.4 \times 10^{-8}$  Вт/К приводя к уменьшению  $NEDT$  до 50 % по сравнению с таким же параметром двухуровневых болометров, использующих ту же технологию.

### 5. Тепловые и фотонные детекторы

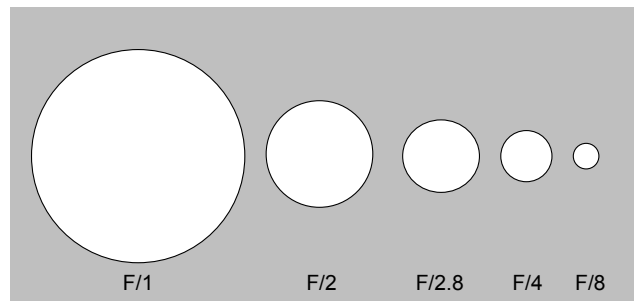
Одним из основных различий тепловых не охлаждаемых и фотонных (охлаждаемых) ИК детекторов состоит в том, что тепловые детекторы главным образом зависят от макроскопических свойств материала, в то время как фотонные детекторы зависят от их микроскопических свойств. Тепловые детекторы (микроболометры) имеют свои преимущества, одним из которых является относительная нетребовательность к материалам детекторов. Одними из необходимых условий является лишь наличие сравнительно высокого значения температурного коэффициента сопротивления  $\alpha_{th} \sim 0.02 - 0.05 \text{ K}^{-1}$ , которому хорошо удовлетворяют микроболометры на основе  $\text{VO}_x$  и  $\alpha\text{-Si}$  (у металлических болометров  $\alpha_{th}$  на порядок меньше), и возможность их микрообработки. И это является одним из следствий относительно невысокой стоимости производства матриц тепловых детекторов [50], но не для систем на их основе, например радиометров, в которых стоимость регулируется главным образом конкретными требованиями к специфическим рабочим характеристикам, и она может быть относительно высокой.

Анализ работы охлаждаемых фотонных и неохлаждаемых тепловых детекторов при сравнении отношения  $NETD_{th}/NETD_{ph}$  с помощью выражений (3) и (12) показывает, что если только флуктуации фонового излучения ограничивают характеристики тепловых и фотонных детекторов в области 8-14 мкм (без учета других шумов – формула (4)), то для других одинаковых параметрах значение  $NETD_{th}/NETD_{ph} = 4.6$  (при VLIP условиях для тепловых детекторов  $T_d \approx T_b \approx 300 \text{ K}$ ). Если рассматривать спектральные полосы 8 – 12 мкм для фотонных детекторов и 8 – 14 мкм для тепловых детекторов, это соотношение будет равным  $\approx 4.1$ .

При сравнении данных таблиц 2 и 4, можно увидеть, что отношение  $NETD_{th}/NETD_{ph}$  не так заметно для области 8-14 мкм, но следует учесть, что данные  $NETD$  для фотонных матриц были получены, как правило, с оптикой  $F/\# \geq F/2$  (меньший входной диаметр оптики и, таким образом, она дешевле в изготовлении,

т.к. стоимость Ge линз примерно пропорциональна квадрату их диаметра), что ухудшает параметр  $NETD$  как  $(F/\#) \sim 2$ .

На рис. 22 показано относительное изменение диаметра линз с увеличением диафрагменного числа  $F/\# = f/D$ , где  $f$  – фокусное расстояние,  $D$  – диаметр линзы. Если для фотонных матричных детекторов сегодня основным шумом, ограничивающим предельные характеристики детекторов, является шум, обусловленный флуктуациями в потоке излучения из окружающей среды, и они функционируют в VLIP режиме, то для тепловых приемников присутствуют и другие виды внутренних шумов (см. формулу (4)), что ухудшает их предельные характеристики. Для области 3–5 мкм, в предположении только флуктуаций в потоке фонового излучения, разница гораздо заметнее ( $NETD_{th}/NETD_{ph} \approx 15$ ) и это соотношение значительно больше для 1 – 2,5 мкм спектрального диапазона.



**Рис. 22. Относительное изменение диаметра линз с увеличением диафрагменного числа  $F/\# = f/D$ , где  $D$  – диаметр линзы,  $f$  – ее фокусное расстояние.**

Из-за этого тепловые детекторы не являются эффективными для 3 – 5 или 1 – 2,5 мкм спектральных областей. Основной причиной этого являются значения функции  $(\partial W(\lambda, T)/\partial T)$  в знаменателе (3) и (12) в коротковолновой области ИК спектра по сравнению с  $\lambda \approx 8 \text{ мкм}$ . Однако, недорогие тепловизионные приборы спектрального диапазона 3 – 5 мкм на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц м.б. эффективны в применениях для определения очагов возгорания и т.п., т.е., в тех случаях, когда температура объектов на-

блюдения является высокой, что не требует высокочувствительных приборов вследствие достаточно высоких мощностей излучения, собираемых оптической системой ИК видения и поступающих на матрицы детекторов.

В фотонных детекторах падение  $(\partial W(\lambda, T)/\partial T)$  в коротковолновой части ИК диапазона длин волн в значительной степени компенсируется ростом  $D^*_\lambda$  с уменьшением  $\lambda_{co}$  (рис. 5). Для тепловых детекторов  $D^*$  не зависит от длины волны. Это обстоятельство отличает фотонные детекторы от тепловых и, следовательно, системы на основе фотонных детекторов, работающих в  $\lambda < 8$  мкм спектральной полосе (3 – 5 и 1 – 2,5 мкм) будут иметь принципиально лучшие параметры по сравнению с системами на основе тепловых матриц. Это означает, что системы технического зрения с фотонными детекторами будут иметь лучшие параметры, как в отношении теплового контраста, расстояний распознавания и идентификации и т.п.

Однако параметры, полученные для тепловых детекторов (микроболометров) сегодня являются достаточно высокими для многих коммерческих и специальных применений, где необходимы небольшая масса, низкое энергопотребление и относительно недорогие тепловизионные системы. Поскольку неохлаждаемые тепловые матрицы работают при условии  $F/\# \approx F/1$  (из-за внутренних шумов (формула (4), в которой, за исключением шума, обусловленного флуктуациями потока фотонов, необходимо учитывать шумы Джонсона-Найквиста и  $1/f$ -шум) их работа не может быть улучшена при меньших значениях полей зрения, по сравнению с охлаждаемыми детекторами с меньшими  $NEP$  (и меньшими полями зрения с применением охлаждаемых диафрагм), и расстояния для обнаружения и распознавания для систем с охлаждаемыми фотонными детекторами будут больше.

Другим недостатком тепловых детекторов и матриц является их время отклика, что для «смотрящих» тепловизионных систем, применяемых для регистрации медленно протекающих процессов или для наблюдения объектов с небольшими скоростями перемещения, часто несущественно.

Фотонные и тепловые детекторы оптимально подходят для различных типов приложений. Пока не преодолены технические и принципиальные трудности в реализации высокочувствительных тепловых матриц, функционирующих в VLIP режиме с малым шагом пикселей в матрицах. И с этой точки зрения, несмотря на серьезную конкуренцию со стороны альтернативных технологий, матрицы КРТ, вряд ли будут иметь серьезных конкурентов в ближайшем будущем для высокоэффективных приложений, требующих реализации предельных характеристик детекторов и мультиспектральных возможностей при высоких кадровых частотах.

## 6. Заключение

Краткий анализ основных свойств фотонных и тепловых матриц детекторов показывает, что они могут быть применены как в различных спектральных областях, так и различаться по назначению.

По-видимому, КРТ останется основным материалом для производства высокочувствительных устройств, по крайней мере, в течение ближайших 10 – 15 лет, так как матрицы, созданные на его базе имеют параметры, которые близки к предельным фундаментальным характеристикам и они могут функционировать в нескольких спектральных диапазонах прозрачности атмосферы. На сегодня в сравнении с КРТ не существует других конкурентноспособных материалов с высокой степенью готовности к производству, способных заменить его для применений, требующих мультиспектральных возможностей в раннем обнаружении, распознавании и идентификации на больших расстояниях и функционирующих с высокой кадровой частотой. Широкие же применения гражданских ИК технологий, в основном, связаны с развитием «смотрящих» камер с использованием неохлаждаемых матриц тепловых детекторов.

Одним из недостатков тепловых детекторов является их время отклика, что в случае «смотрящих» тепловизионных систем практически несущественно, особенно для гражданских применений при измерении тепловых



полей неподвижных объектов или объектов, перемещающихся с малыми угловыми скоростями. Однако, многие другие специальные применения требуют высокой скорости функционирования и чувствительности, что является отличительными особенностями систем на основе фотонных детекторов. Кроме того, для многих применений необходимо «многоцветное» тепловидение и для такой функции тепловые детекторы значительно менее применимы в силу быстрого увеличения *NETD* при переходе в более короткий спектральный диапазоне от  $\lambda \sim 8$  мкм, по сравнению с охлаждаемыми фотонными детекторами, функционирующими в нормальных условиях окружающей среды.

#### Список использованной литературы

1. *Seeing Photons: Progress and Limits of Visible and Infrared Sensor Arrays*, Committee on Developments in Detector Technologies; National Research Council, ISBN 978-0-309-15304-1 (2010).
2. E.S. Barr, Historical survey of the early development of the infrared spectral region. *Amer. J. Phys.* **28**, p. 42-54 (1960).
3. R.A. Smith, F.E. Jones and R.P. Chasmar, *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*. Clarendon, Oxford, 1958.
4. R.D. Hudson, *Infrared System Engineering*. Wiley-Interscience, New Jersey, 1969.
5. L.M. Biberman and R.L. Sendall, Chapter 1. Introduction: A brief history of imaging devices for night vision, in: *Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling*, edited by L.M. Biberman. SPIE Press, Bellingham, p. 1-1-1-26 (2000).
6. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (2-nd edition). CRC Press, Boca Raton, 2011.
7. A.S. Gilmore, High-definition infrared FPAs // *Raytheon Technology Today*, issue 1, p. 4-8 (2008).
8. Ф.Ф. Сизов, Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых» участках спектра, Киев, Академперидика, 2008.
9. A. Rogalski, Far-IR semiconductor detectors and focal plane arrays, in: *THz and Security Applications*, Springer (eds. K. Corsi and F. Sizov), 2014, p. 25-52].
10. N. Sclar, Properties of doped silicon and germanium infrared detectors. *Progr. Quantum Electron.* **9**, p. 149-257 (1984).
11. R.A. Wood, Uncooled microbolometer infrared sensor arrays, in: *Infrared Detectors and Emitters: Materials and Devices* (eds. P. Capper, C.T. Elliott). Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA, 2001, p. 149-175.
12. *Uncooled detectors for thermal imaging cameras*, FLIR Technical Note, [http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Cores\\_and\\_Components/Technical\\_Notes/uncooled%20detectors%20BST.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Cores_and_Components/Technical_Notes/uncooled%20detectors%20BST.pdf).
13. R. Hartmann, M. Selders, High-sensitivity thin-film bolometers. *Proc. Sensor 1982 – Sensor Technology and Temperature Measurement*, Essen, p. 102-116 (1982).
14. K.C. Liddiard, Thin-film resistance bolometer IRdetectors. *Infr. Phys.*, **24**, p. 57-64 (1984).
15. R.A. Wood, J. Carney, R.E. Higashi, T. Ohnstein, J. Holmen, Advances in un-cooled silicon monolithic IR 2D arrays. *Proc. IRIS DSG* (1988).
16. F. Niklaus, C. Vieider, MEMS-Based uncooled infrared bolometer arrays – a review. *Proc. SPIE*, **6836**, p. 68360D (2007).
17. P. Kruse, *Uncooled Thermal Imaging. Arrays, Systems, and Applications*. SPIE Press, Bellingham, USA, 2001.
18. A.M. Filachev, V.P. Ponomarenko, I.I. Taubkin, M.B. Ushakova, Infrared focal plane arrays: state of the art and development trends. *Proc. SPIE*, **5126**, p. 52-85 (2003).
19. S. Horn, D. Lohrmann, J. Campbell, P. Perconti, and R. Balcerack, Uncooled IR technology and applications. *Proc.*

- SPIE*, **4369**, p. 210-221 (2001).
20. A. Hoffman, Semiconductor processing technology improves resolution of infrared arrays. *Laser Focus World*, 81–84, February (2006).
  21. A.H. Lettington, I.M. Blankson, M. Atia, and D. Dunn, Review of imaging architecture. *Proc. SPIE*, **4719**, p. 327-340 (2002).
  22. I.I. Taubkin and M.A. Trishenkov, Information capacity of electronic vision systems. *Infrared Phys. Technol.*, **37**, p. 675-693 (1996).
  23. T. Sprafke, and J.W. Beletic, High performance IR focal plane arrays. *Optics & Photonics News*, **19**, p. 22-27 (2008).
  24. G.C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*. SPIE Opt. Eng. Press, Bellingham, 2003.
  25. F. Niklaus, A. Decharat, C. Jansson, G. Stemme, Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure. *Infrared Phys. Technol.*, **51**, p. 168-177 (2008).
  26. V.V. Vasil'ev, A.V. Predein, V.S. Varavin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii, V.P. Reva, I.V. Sabinina, Yu.G. Sidorov, A.O. Suslyakov, A.L. Aseev, and F.F. Sizov, Linear 288×4-format photodetector with a bidirectional time-delay-and- storage regime. *J. Opt. Technol.*, **76**, p. 757-761 (2009).
  27. A.I. D'Souza, L.C. Dawson, D.J. Berger, S. Clark, P.S. Wijewarnasuriya, J. Bajaj, J.M. Arias, W.E. Tennant, L. Kozlowski, K. Vural, HgCdTe detectors and FPAs for remote sensing applications. *Proc. SPIE*, **3698**, p. 538-544 (1999).
  28. P. Tribolet, P. Chorier, A. Manissadjian, P. Costa, and J.-P. Chatard, High performance infrared detectors at Sofradir. *Proc. SPIE*, **4028**, p. 438-456 (2000).
  29. L.J. Kozlowski, K. Vural, J.M. Arias, W.E. Tennant, and R.E. DeWames, Performance of HgCdTe, InGaAs and quantum well GaAs/AlGaAs staring infrared focal plane arrays. *Proc. SPIE*, **3182**, p. 2-13 (1997).
  30. H.M. Runciman, Influence of technology on FLIR waveband selection. *Proc. SPIE*, **2470**, p. 156-166 (1995).
  31. L. Kozlowski, HgCdTe focal plane arrays for high performance infrared cameras. *Proc. SPIE*, **3179**, p. 200-211 (1997).
  32. I.I. Taubkin, M.A. Trishenkov, and N.V. Vasilchenko, Minimum temperature difference detected by the thermal radiation of objects. *Infrared Phys. Technol.*, **35**, p. 715-732 (1994).
  33. P. Norton, B. Andresen, G. Fulom, Introduction. *Proc. SPIE*, **6940**, p. XIX-XXXVI (2008).
  34. G. Destefanis, P. Tribolet, M. Vuillet, and D.B. Lanfrey, MCT IR detectors in France. *Proc. SPIE*, **8012**, 801235-1–12 (2011).
  35. A. Richards, Micro Thermal Camera Opens Applications to Consumers, *Photonics Spectra*, October (2014), p. 56-58.
  36. A.M. Fitzgerald, Uncooled IP market will boom. *Micronews*, Issue #114, p. 3-5 (2011).
  37. A. Rogalski, F. Sizov, Terahertz detectors and focal plane arrays. *Optoelectron. Rev.*, **19**, p. 346-404 (2011).
  38. M. Kohin, and N. Butler, Performance limits of uncooled VO<sub>x</sub> microbolometer focal-plane arrays. *Proc. SPIE*, **5406**, p. 447-453 (2004).
  39. W. Radford, D. Murphy, A. Finch, K. Hay, A. Kennedy, M. Ray, A. Sayed, et al., Sensitivity improvements in uncooled microbolometer FPAs. *Proc. SPIE*, **3698**, p. 119-130 (1999).
  40. <http://www.drsinfrared.com/About-DRS/RangeViewer.aspx>.
  41. J.L. Tissot, P. Robert, A. Durand, S. Tinnes, E. Bercier, and A. Crastes, Status of Uncooled Infrared Detector Technology at ULIS, France, *Defence Science Journal*, **63**, 545-549 (2013).
  42. S.H. Black, T. Sessler, E. Gordon, R. Kraft, T. Kocian, M. Lamb, R. Wil-

- liams, and T. Yang, Uncooled detector development at Raytheon. *Proc. SPIE*, **8012**, 80121A-1–12 (2011).
43. S. Tohyama, T. Sasaki, T. Endoh, M. Sano, K. Kato, S. Kurashina, M. Miyoshi, T. Yamazaki, Uncooled infrared detectors toward smaller pixel pitch with newly proposed pixel structure, *Opt. Eng.*, **52**, 123105 (2013).
44. C. Li, G.D. Skidmore, C. Howard, C.J. Han, L. Wood, D. Peysha, E. Williams et al., Recent development of ultra small pixel uncooled focal plane arrays at DRS. *Proc. SPIE*, **6542**, p. 65421Y (2007).
45. E. Mottin, A. Bain, J. Martin, J. Ouvrier-Bufferet, S. Bisotto, J.J. Yon, and J.L. Tissot, Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25  $\mu\text{m}$  pixel pitch achievement. *Proc. SPIE*, **4820**, p. 200-207 (2003).
46. D. Murphy, M. Ray, A. Kennedy, J. Wyles, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon et al., High sensitivity 640 $\times$ 512 (20  $\mu\text{m}$  pitch) microbolometer FPAs. *Proc. SPIE*, **6206**, p. 62061A (2006).
47. S. Tohyama, M. Miyoshi, S. Kurashina, N. Ito, T. Sasaki, A. Ajisawa, and N. Oda, New thermally isolated pixel structure for high-resolution uncooled infrared FPAs. *Proc. SPIE*, **5406**, p. 428-436 (2004).
48. S. Black, M. Ray, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon, K. Almada, S. Baur, M. Kuiken, D. Chi, and T. Sessler, RVS uncooled sensor development for tactical applications. *Proc. SPIE*, **6940**, p. 694022 (2008).
49. M.Y. Tanrikulu, Three-level microbolometer structures: design and absorption optimization, *Opt. Eng.*, **52**(8), 083102 (2013)
50. Ch.M. Hanson, Uncooled IR detector performance limits and barriers. *Proc. SPIE*, **4028**, p. 2-11 (2000).

Стаття надійшла до редакції 22.10.2014 р.