

# Современное состояние и тенденции рынка неохлаждаемых микроболометров

Николай КУЛЬЧИЦКИЙ,  
Московский государственный институт радиотехники,  
электроники и автоматики (Технический университет)

Аркадий НАУМОВ,  
Вадим СТАРЦЕВ,  
АО «ОКБ «Астрон»

За прошедшие 50 лет рынок ИК-техники рос прежде всего из-за военных приложений и лишь во второй, значительно меньшей степени, коммерческих. Сегодня высокий спрос на безопасность и камеры наблюдения с расширенными возможностями в военном и охранном секторе по-прежнему обеспечивает рост рынка тепловых камер. Но в настоящее время парадигма развития изменилась — основной прирост обеспечивает гражданская термография, охранное и пожарное наблюдение, персональные системы ночного видения (PVS) и локальные рынки безопасности. Растущий спрос на ИК-системы, вызванный как военными, так и гражданскими применениями, в свою очередь, в ближайшие годы вызовет рост мирового рынка тепловых фотопреобразовательных устройств.

## Общие понятия об ИК-диапазоне

Инфракрасный (ИК) диапазон спектра является крайне информативным, так как здесь сосредоточена основная доля собственного электромагнитного излучения большинства окружающих человека объектов естественного и искусственного происхождения. ИК-диапазон охватывает длины волн от 0,76 до 1000 мкм (что соответствует частотам от 300 до 0,3 ТГц). Эта широкая область спектра условно делится на промежуточные диапазоны: ближний (0,76–1,1 мкм), коротковолновый (1,1–2,5 мкм), средневолновый (3,0–5,5 мкм), длинноволновый (8–14 мкм) и дальний (15–1000 мкм). Иногда два первых диапазона для удобства объединяют в один (0,76–2,5 мкм).

ИК-диапазоны 3–5,5 мкм и 7–14 мкм являются рабочими зонами тепловизионного метода. Особый интерес вызывает более информативный диапазон 7–14 мкм, полностью совпадающий с наиболее широким окном прозрачности атмосферы и соответствующий максимальной излучательной способности наблюдаемых объектов в температурном диапазоне от –50 °С до +500 °С (рис. 1).

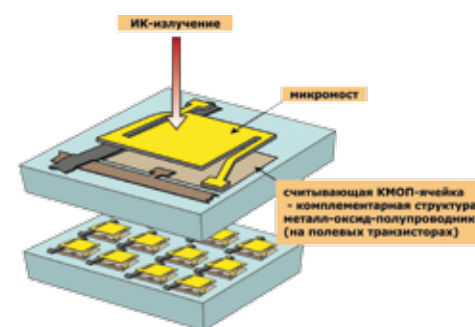


Рис. 2. Схема работы неохлаждаемого болометра

В первом болометре, разработанном в 1880 г. американским астрономом С. П. Лэнгли для наблюдений Солнца, использовался поглощающий элемент из черной платины и простой мост Уинстона в качестве измерительного блока. Хотя с тех пор появились и другие тепловые приемники, болометры остаются одними из самых распространенных тепловых приемников.

Начало развития тепловизионной техники в современном понимании было положено в начале 60-х гг. XX столетия исследованиями и разработкой приборов по двум основным направлениям: с использованием дискретных приемников излучения совместно с системами сканирования (развертки) изображения и аппаратуры без механического сканирования на базе двумерных ИК-приемников. Последнее поколение тепловизионной аппаратуры основано на применении фокально-плоскостных (FPA — Focal Plane Array), двумерных твердотельных многоэлементных (матричных) приемников излучения без использования оптико-механических систем развертки. В начале 1990 гг. успехи в создании тепловизоров коммерческого применения привели к окончательной замене систем с механическим сканированием недорогими камерами прямого обзора на основе неохлаждаемых матриц фокальной плоскости (МФП). В основе всех современных систем (в спектральном диапазоне 7–14 мкм) лежат неохлаждаемые преобразователи ИК-излучения, представляющие собой фокально-плоскостные двумерные микроболометрические фокальные матрицы большого формата, способные воспринимать температурные контрасты до 50–80 мК. Для обеспечения хорошей термоизоляции микроболометра остаточное давление не должно превышать 75 мТорр.



Рис. 1. ИК-диапазоны излучения и датчики, работающие в этих диапазонах

## Конструкции микроболометров

Принцип работы тепловых фотопреобразовательных устройств основан на изменении электрических характеристик материала приемника за счет энергии поглощенного теплового излучения. Одним из активно разрабатываемых типов тепловых детекторов являются микроболометры. За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов инфракрасного диапазона, которые приблизились по пороговым характеристикам к фотонным детекторам при значительно меньшей стоимости. Болометр представляет собой резистор, изготовленный из материала с очень малой теплоемкостью и большим температурным коэффициентом сопротивления. В этом случае поглощенное им излучение сильно

## Пути развития болометрических детекторов

Болометры являются перспективным типом детекторов для создания неохлаждаемых и относительно недорогих МФП. Стоимость МФП на основе болометров при промышленном производстве

на два порядка меньше, чем стоимость матриц на основе HgCdTe, InSb, PtSi, при этом типичные значения NETD для болометрических матриц составляет 50–100 мК (для МФП на основе HgCdTe типичны значения порядка 10 мК). Важнейшим преимуществом болометрических инфракрасных детекторов является возможность работы без охлаждения (при температурах около 300 К), в то время как большинство фотонных детекторов действуют при криогенных температурах (обычно не менее 77 К). Болометры (как и другие тепловые детекторы) являются неселективными детекторами и могут действовать в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм, в то время как фотонные детекторы действуют только в определенном спектральном диапазоне (например, детекторы на основе барьеров Шоттки PtSi имеют граничную длину волны 5,5 мкм).

К настоящему времени разработаны инфракрасные болометрические детекторы различных типов: металлические болометры; термисторы; полупроводниковые болометры; композитные болометры; кремниевые неохлаждаемые микроболометры, созданные с помощью микроэлектронной технологии; сверхпроводящие болометры; высокотемпературные сверхпроводящие болометры. На основе высокотемпературного сверхпроводника YBaCuO была изготовлена линейная матрица микроболометров из 64 элементов, но такие детекторы перспективны для детектирования излучения при длине волны большей, чем 20 мкм, при температуре детектора 77–100 К. Вследствие явных преимуществ монолитного совмещения на одном кристалле фоточувствительной матрицы и схемы обработки сигнала, а также возможности использования высокоразвитой кремниевой технологии особое внимание разработчиков привлекают болометрические детекторы, технология которых совместима с кремниевой микроэлектронной технологией. Перспективы развития монолитных Si болометров выглядят привлекательно. Так, компания Honeywell Sensor and System Development Center начала работы по применению кремниевых микротехнологий для производства ИК-сенсоров в начале 80-х годов. Целью этих работ, продолженных в рамках программы, поддерживаемой DARPA и US Army Night Vision and Electronic Sensor Directorate, было создание недорогих систем ночного видения, пригодных для военного применения и имеющих NETD ~ 0,1 °C. Эти параметры были достигнуты как в Si болометрических матрицах, так и в пирозлектрических матрицах фирмы Texas Instruments. Отмечается значительная активность в этой области в Европе и Азии. Создана матрица 240 \* 336 из 50-мкм микроболометров на пластине промышленного стандарта (диаметром 4 дюйма) и дополнена интегральной микросхемой считывания сигнала, сформированной в кремниевой подложке. В настоящее время существуют промышленные технологии изготовления неохлаждаемых приемников, включающие применение матриц кремниевых микроболометров (чувствительный элемент формировался из VO<sub>x</sub>).

Микроболометры на основе поликристаллического SiGe обладают следующими преимуществами: неохлаждаемый режим работы, низкая стоимость, хорошее совмещение тепловой постоянной времени с кадровой частотой тепловизионных систем реального времени (30 Гц). На основе микроболометров из поликристаллического SiGe бельгийской компанией XenICs разработаны линейные и малые двумерные (до 14 x 14) матрицы микроболометров. Обнаружительная способность детекторов данного типа достигает 2,26 X 10<sup>9</sup> см X Гц<sup>0.5</sup>/Вт, а пороговая разность температур может быть менее 70 мК.

В настоящее время для создания тепловых формирователей изображения наиболее широко используются оксид ванадия и легированный α-Si:H (рис. 3). Оксид ванадия VO<sub>x</sub> обладает высокими значениями температурного коэффициента сопротивления (TKC = 2–3%), на основе этого материала созданы матрицы форматом 320 x 240 с размером пикселя 50 мкм. Однако оксид ванадия – нестандартный материал для КМОП-технологии, изготовление оксида ванадия в виде тонких пленок является сложным для управления процессом из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида. Кроме того, наличие гистерезиса приводит к проблемам при построении тепловых изображений горячих объектов, а теплопроводность таких пленок на порядок больше, чем значения этого параметра для полупроводников (обычно 0,05 Вт/смК). Металлы (Pt, Ni) сов-

местимы с КМОП-технологией, но обладают низкими значениями ТКС, а болометры на основе сверхпроводящих пленок требуют значительного охлаждения, что существенно повышает стоимость приборов. Болометры на основе α-Si:H обладают высоким сопротивлением, но этот материал нестабилен при тепловых обработках и действию ультрафиолетового облучения. Этот материал имеет две фазы: стабильную и метастабильную, которые разделены потенциальными барьерами, что препятствует формированию равновесного состояния. Болометры на основе карбида кремния SiC обладают высокими значениями ТКС (4–6%), но для стабилизации свойств материала требуется отжиг при температурах около 1000 °C, что несовместимо с КМОП-технологией.

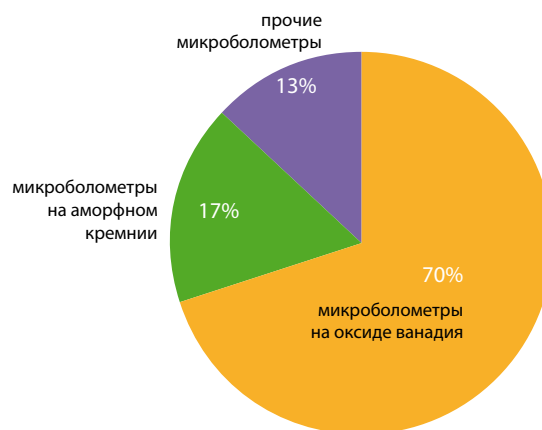


Рис. 3. Доля болометров из различного материала

Подлинная революция в производстве тепловых детекторов началась в 90-х гг. прошлого века с открытия и создания интегральных схем, совместимых с технологией микрообработки (micromachining). Микрообработка делает возможным уменьшение теплопроводности материала, служащего в качестве опоры прибора, что обеспечивает высокую тепловую изоляцию микроструктур. Пионерские исследования в этой области сделаны в компании Honeywell, в которой использовали оксид ванадия в качестве чувствительного материала. Лаборатория InfraRouge (LIR) Laboratory d'Electronique et des Technologies de l'Information (LETI), а также компания Raytheon использовали при создании инфракрасных детекторов легированный аморфный Si:H. В компании NEC для этой цели также использовались металлы. Много работ посвящено использованию для создания инфракрасных детекторов поликристаллических материалов: поликристаллического кремния и поликристаллического SiGe. Значительные усилия направлены на разработку болометров на основе нелегированных аморфных полупроводников, таких как α-Si, α-Ge и их соединений α-SiC:H, α-γCBO. Эти материалы привлекательны вследствие их высокого ТКС. Для разработки законченного технологического цикла изготовления болометрических матриц необходимо эффективное использование особенностей чувствительного материала для инфракрасных формирователей изображения. В настоящее время внимание разработчиков сконцентрировано в области технологических проблем совместимости процесса изготовления болометрических матриц с КМОП-технологией, а также в области оптимизации сопротивления материала, ТКС, тепловой проводимости и других характеристик прибора. В ряде работ рассмотрены возможности использования при создании болометров аморфного соединения Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub>, а также потенциальных ям на основе n-Si в подложке из p-Si.

### Тенденции рынка микроболлометров

В 2016–2017 гг. продавалось каждый год по 800 000–900 000 штук неохлаждаемых ИК-камер стоимостью ~ \$2,7 млрд в год. Именно гражданские коммерческие применения стимулировали этот рост, включая термографию, различные системы наблюдения и пожаротушения и PVS. Термография – ведущий рынок как по стоимости, так и по объему. Аналитики оценивают, что к 2022 г. в этом секторе ежегодно будет продаваться 500 000 ИК-камер. В то же время цены на камеры продолжают падать, общие продажи растут. Аналитики ожидают рост рынка ИК-камер к 2022 г. до уровня свыше \$4 млрд в финансовом исчислении и свыше 1,7 млн штук в натуральном исчислении. При этом ожидается, что военные применения будут расти со скоростью 5,6% в год, а гражданские – 8,8% в год. По выводам аналитического агентства Yole, тенденция роста применения микроболлометров продолжится еще долгое время (рис. 4, 5).

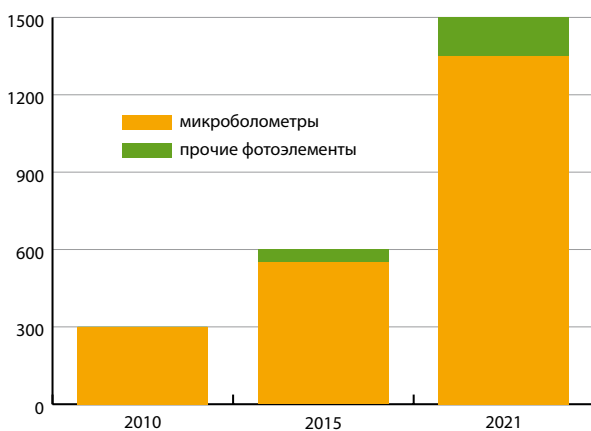


Рис. 4. История и прогноз развития производства фотоприемных устройств (источник – Yole Development, 2017)

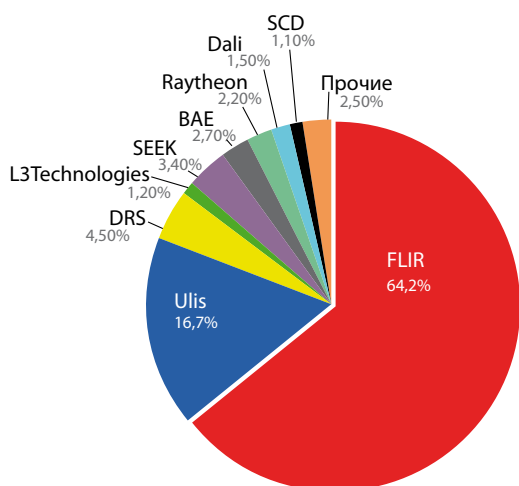


Рис. 5. Мировые производители неохлаждаемых микроболлометров (источник – Yole Development, 2017)

### Ситуация в России

До недавних пор программы по обеспечению отечественной техники тепловизионными системами выполнялись в формате закупки и совместного производства с иностранными соисполнителями. Необходимость разработки и серийного производства отечественных тепловизионных ФПУ стала особенно актуальной после запрета их поставок из-за рубежа. Решить эту задачу взялось предприятие АО «ОКБ «Астрон». Опытные партии первых ФПУ

в ОКБ «Астрон» выполнялись в металлических корпусах. Их чувствительность была ниже зарубежных аналогов, а технологический процесс не позволял наладить их серийное производство. С освоением в 2016 г. производства микроболлометрических детекторов в корпусах из вакуум-плотной отечественной керамики ВК-94, а также новой топологии мультиплексоров удалось существенно увеличить чувствительность ФПУ (до 40 мК) и начать серийное производство. В 2016 г. было освоено производство микроболлометрических детекторов в корпусах из вакуумплотной отечественной керамики ВК-94. За счет новой топологии (рис. 6) мультиплексоров удалось существенно увеличить чувствительность ФПУ (до 40 мК) и начать серийное производство микроболлометров, работающих в традиционном диапазоне 8–14 мкм. С 2016 г. все тепловизионные приборы для систем безопасности изготавливаются на предприятии на основе микроболлометрических детекторов собственного производства Астрон-38425-1 и Астрон-64025-1 с размером чувствительных элементов матрицы 25 мкм. В 2017 г. начат выпуск чувствительного элемента 17 мкм.

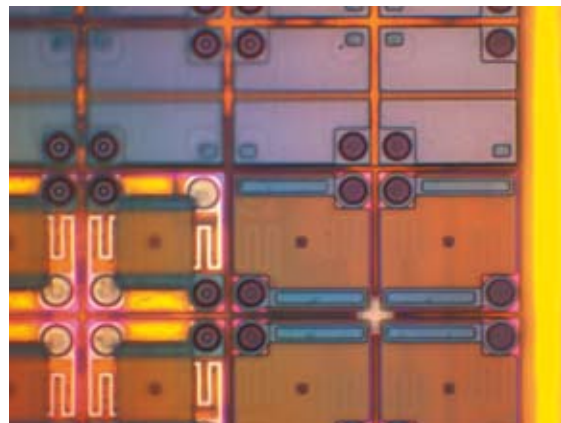
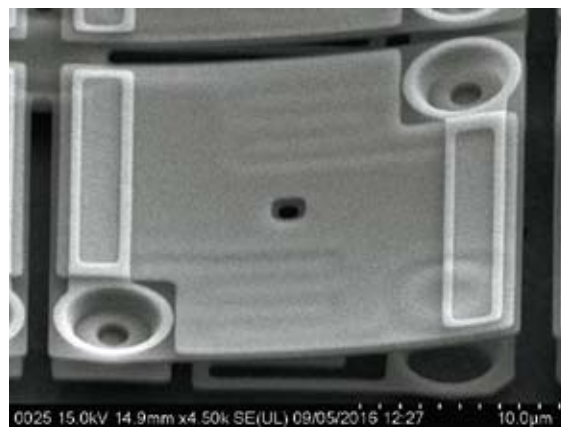


Рис. 6. Топология микроболлометрического тепловизионного детектора Астрон-64017-1



На данный момент АО «ОКБ «Астрон» удалось разработать конструкцию пикселя микроболлометрического детектора, имеющего равные коэффициенты поглощения в двух спектральных диапазонах: 3–5 мкм и 8–14 мкм. Планируется, что АО «ОКБ «Астрон» в 2018 г. выпустит первый в России микроболлометр, способный работать в двух диапазонах (3–5 мкм и 8–14 мкм), а затем и первый России модуль для двух диапазонов ИК-изображения.

Работы по созданию микроболлометрических матриц на основе оксидов ванадия ведутся также в ИФП СО РАН, г. Новосибирск. Продолжаются работы по организации производства в НИИ «Циклон» (г. Москва).

### Заключение

Болометры являются перспективным типом детекторов для создания неохлаждаемых и относительно недорогих матриц фокальной плоскости. Благодаря перечисленным преимуществам инфракрасные болометрические детекторы активно разрабатываются в последние годы и особо перспективны для применения в следующих областях: обнаружение пожаров, поиск полезных ископаемых, ночное видение для военных целей, охрана границ и правопорядка, поисковые и спасательные службы.