

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.38.3; 53.082.62

ТЕПЛОВЫЕ ПРИЁМНИКИ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МНОГОРАЗМЕРНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ МАТРИЦ. Ч. I. ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Рассматривается современное состояние элементной базы неохлаждаемых тепловизионных матриц, основанных на теплоизоляции их чувствительных элементов и на накоплении за время кадра тепла в объёме элемента. Описываются особенности функционирования и конструкции как резистивных микроболометров, так и пироэлектрических элементов, их характерные параметры. Рассматриваются перспективы улучшения параметров теплоизолированных чувствительных элементов мегапиксельных матриц. Отмечается, что основным фактором, ограничивающим дальнейшее улучшение параметров пикселей в тепловизионных матрицах и увеличение размера последних, является величина теплового сопротивления между чувствительным элементом и подложкой. При современном уровне технологии величина теплового сопротивления практически достигла предельных значений и для дальнейшего повышения чувствительности элементов и их быстродействия, увеличения размеров мегапиксельных неохлаждаемых ИК-матриц требуется другой физический принцип функционирования ИК-приёмников, исключающий необходимость их теплоизоляции. Принцип, основанный на использовании пироэлектрических эффектов, будет рассмотрен в следующей работе.

Ключевые слова: инфракрасная техника, тепловые приёмники излучения, теплоизоляция, микроболометры, пироэлектричество, тепловое сопротивление, мегапиксельная матрица, тепловизор.

Введение. Неохлаждаемые тепловизионные устройства получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Это направление, базирующееся на технологии современной микроэлектроники, интенсивно развивается в последние годы.

При решении задач по обнаружению и визуализации удалённых слабоконтрастных объектов с использованием неохлаждаемых тепловизионных устройств на первый план выводятся параметры элементов фотоприёмной матрицы: размеры, пороговая чувствительность, однородность, разрешающая способность. Усилия разработчиков устройств в настоящее время направлены на создание мегапиксельных матриц размера более 1500×1500 элементов. Из нескольких физических эффектов, которые используются в элементах матриц, можно выделить основные: болометрические (резистивные устройства, сопротивление которых чувствительно к температуре) и пироэлектрические (чувствительные к скорости изменения температуры). В них энергия излучения преобразуется в тепловую (это тепловые приёмники), а далее в электрический сигнал.

Быстрый прогресс изготовления многоэлементных неохлаждаемых матриц тепловых приёмников на базе микроболометров в промышленных масштабах сделал их на длительное время основными устройствами для работы с ИК-изображениями [1–23].

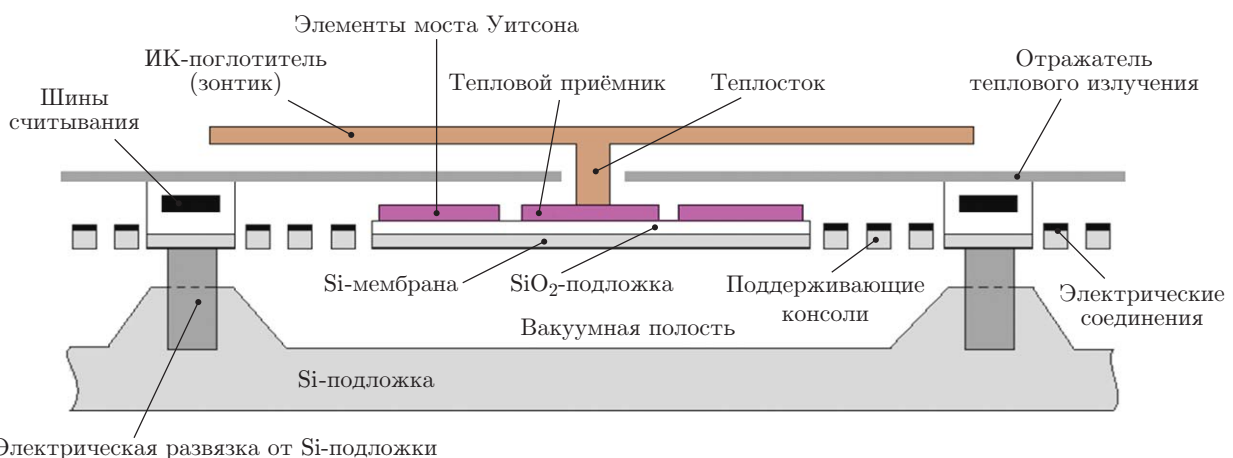
В таких матрицах излучение регистрируется при накоплении в объёме приёмника тепла от воздействия энергии излучения за время кадра. Для этого чувствительный элемент максимально теплоизолируется от подложки. Теплоизоляция достигается за счёт исполь-

зования технологии MEMS, которая базируется на глубоком и сухом травлении кремния с применением «жертвенных» слоёв (до трёх). На поверхности созданных таким путём мембранных конструкций толщиной менее 1 мкм, удерживаемых над подложкой на расстоянии ~ 2 мкм с помощью пары микробалок (поддерживающих консолей), размещается фоточувствительный элемент — тонкоплёночная структура. В большинстве матриц используются микроболометры на основе тонких плёнок аморфного кремния или окислов ванадия (VO_x) толщиной ~ 50 нм [1].

За последние годы ключевой задачей развития матриц микроболометров стало дальнейшее увеличение их размеров за счёт снижения размеров элементов — пикселей. Такой подход даёт возможность увеличить дальность обнаружения объекта и уменьшить размеры оптических систем с сокращением их веса. Динамику уменьшения размеров пикселей в указанных тепловизорах отражают две цифры — 50 мкм в 1996 году и 12 мкм и менее в настоящее время, начиная с 2012 года [2, 4, 13]. Снижение размера пикселей до 12 мкм обеспечило возможность создания ИК-матриц размера 1440×1080 пикселей при величине произведения предельного значения эквивалентной шуму разности температур (NETD) и постоянной времени тепловой релаксации элемента τ_T до 353 мК · мс с частотой кадров 30 Гц [2].

Однако с уменьшением размеров пикселей возникает необходимость всё большей их теплоизоляции, увеличения теплового сопротивления R_T между чувствительным элементом и подложкой [1, 6]. Величина R_T в значительной мере определяется теплопроводностью консолей, их длиной и шириной: длинные тонкие консоли с низкой теплопроводностью обеспечивают большую величину R_T и позволяют получить более высокую пороговую чувствительность. В современных микроболометрах ширина консолей достигает значений 0,5 мкм при толщине 0,3 мкм и длине до 100 мкм. В большинстве матриц консоли изготавливаются из нитрида кремния (Si_3N_4), который имеет низкие теплопроводность и теплоёмкость, при этом они металлизуются с помощью тонких плёнок никрома, обладающих низкой тепловой и высокой электрической проводимостями, и через них осуществляются как тепловой, так и электрический контакты со схемой считывания информации [6].

В 1996 г. компания DRS разработала и запатентовала конструкцию пикселя, в которой энергия ИК-излучения, поступающая на всю поверхность пикселя, подводится к объёму чувствительного элемента с помощью теплостока — конструкции «зонтик» [13] (см. рисунок). Несмотря на то что тепловая ёмкость зонтика является паразитной, т. е. превышает теплоёмкость самого элемента, и имеют место значительные потери энергии потока и увеличение времени формирования сигнала, такая конструкция пикселя дала возмож-



Типичная конструкция приёмника ИК-излучения, теплоизолированного от поверхности подложки с помощью микроконсолей

ность обеспечить максимальный коэффициент заполнения фокальной плоскости матрицы до 90–98 % и усилить сигнал от пикселя. Эта конструкция в различных модификациях позволила существенно снизить тепловые потери и достигнуть для элементов площадью 12×12 мкм величины R_T до 10^8 К/Вт [1], что приближается к предельному значению, определяемому радиационным энергообменом поверхностей.

Значительное повышение качества указанных матриц в последние годы определено введением электронной обработки поступающего ИК-изображения с использованием схем калибровки и динамической электронной коррекции параметров сигналов в цепях считывания и первичной обработки с учётом линейной зависимости сопротивления микроболометра от температуры [14–23].

Целью данной работы является анализ современного состояния и перспектив развития элементной базы неохлаждаемых тепловизионных матриц, базирующихся на максимальной теплоизоляции чувствительных элементов, а также возможностей дальнейшего улучшения их параметров.

Особенности создания матриц тепловых приёмников ИК-излучения.

Несмотря на очевидные успехи в разработке и создании неохлаждаемых тепловизионных матриц на основе теплоизолированных микроболометров их существенное развитие не представляется очевидным. К настоящему времени практически исчерпаны все резервы дальнейшего улучшения их параметров: по увеличению коэффициентов заполнения фокальной плоскости, поглощению ИК-излучения, величинам ТКС и R_T , уменьшению сопротивления микроболометра, оптимизации напряжения питания с учётом снижения напряжений современных КМОП-схем до 1,5 В.

С ростом размера матриц всё более важными являются проблемы однородности параметров элементов на поверхности матрицы, усложняется возможность их коррекции. В общем плане дальнейшее увеличение размера неохлаждаемых матриц на основе теплоизолированных чувствительных тепловых элементов и их быстродействия вне зависимости от физического эффекта, применяемого в этих элементах, затруднено из-за следующих факторов.

1. В конструкции пикселей матриц тепловых приёмников применяются элементы, которые являются тепловым балластом: зонтик, мембрана, тепловые «развязки» — консоли, значительно снижающие, несмотря на их минимальную массу, тепловую ёмкость, эффективность преобразования энергии излучения и соответственно качество приёмного элемента. Изготовление этих элементов — сложная технологическая задача (создание 3D-структур с высокими проектными нормами), увеличивающая стоимость процесса и снижающая воспроизводимость параметров элементов матрицы.

2. Для тепловых приёмников с теплоизоляцией чувствительных элементов есть ограничения на дальнейшее увеличение размера ИК-матрицы, связанные с трудностями снижения размеров пикселя и сопровождаемые необходимостью повышения теплового сопротивления, которое при современном уровне технологии уже близко к предельно возможному значению. Кроме того, снижение размера пикселя приводит к уменьшению отношения сигнал/шум, что уменьшает поток излучения и увеличивает шум микроболометра ($1/f$ -шум) [4].

3. Указанная технология создания многомерных матриц ограничивает возможности наблюдения за быстро движущимися объектами и регистрации быстропротекающих процессов, поскольку с увеличением R_T растёт время формирования сигнала, время кадра. Практика показывает, что тепловая постоянная времени должна быть меньше времени кадра, по крайней мере в 3 раза, в то же время она увеличивается линейно с ростом R_T . Достигнутое в настоящее время высокое значение R_T определяет задержку начала регистрации инфракрасного видеоизображения до 10–20 кадров, а выхода на постоянный режим работы тепловизора — до 0,1–1 с и более.

4. Пиксель современных неохлаждаемых ИК-матриц является сложной 3D-конструкцией, в которой трудно поддерживать постоянное равновесие механических напряжений между слоями в каждом элементе. Избыточное механическое напряжение может привести к деформации поддерживающих консолей и, как следствие, к прямому термическому контакту чувствительного элемента и подложки [3]. В таких матрицах имеет место неоднородность и нестабильность параметров их элементов во времени, с ростом размера матриц эта проблема становится всё более существенной. Она решается за счёт использования специальных электронных процессоров с применением алгоритмов коррекции результатов наблюдения, а также дополнительной настройки процессора в режиме периодического тестирования каждого элемента. В то же время, как известно, тепловизионные изображения имеют низкий уровень контраста, что налагает жёсткие требования на однородность характеристик чувствительных элементов матриц и среднеквадратичное значение вариации чувствительности элементов.

В литературе уже обсуждается вопрос, что в конечном итоге при дальнейшем увеличении размера подобных матриц необходимо будет снизить температуру элементов и отказаться от базовой идеи неохлаждаемых приёмников излучения.

Пироэлектрические приёмники ИК-излучения. Среди одноэлементных неохлаждаемых тепловых приёмников пироэлектрические имеют наиболее высокие параметры. Они являются лучшими в классе неохлаждаемых ИК-приёмников [24], превосходя аналогичные устройства с иными принципами действия по эффективности обнаружения источника излучения, быстродействию, низкой стоимости, надёжности, меньшему энергопотреблению.

В последнее время как отечественными, так и зарубежными фирмами производится несколько десятков типов одноэлементных пироэлектрических инфракрасных устройств, которые широко используются в современной охранной технике различного назначения (реагируют на перемещение человека в контролируемом помещении, образуют объёмные датчики движения), в коммутаторах освещения и т. п. Среди мировых лидеров, производящих для широкого спектра практических применений высококачественные одноэлементные пироэлектрические ИК-приёмники с активным элементом, встроенным в микросхему, можно выделить компании "Murata Manufacturing Co., Ltd.", "Fluke Corporation", "Infrared Integrated Systems Ltd. (Irisys)", "DIAS Infrared GmbH", "FLIR Systems, Inc.". В одноэлементных приёмниках чувствительная площадка, как правило, имеет размеры порядка 1–3 мм², диапазон длин волн регистрируемого излучения 3–14 мкм, модулированного с частотой 10–50 Гц [25–37].

Одноэлементные приёмники основаны на использовании как одного из лучших пироэлектрических материалов — танталата лития (LiTaO₃), так и органических пироэлектриков. Они имеют обнаружительную способность D^* в частотном диапазоне 10–100 Гц, близкую к предельным для тепловых приёмников теоретическим значениям до $2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (например, [38, 39]).

В России серия высококачественных одноэлементных пироэлектрических приёмников марок МГ-32, МГ-33, ФПУ-74, ФПУ-76 (двухканальный) на основе свободных органических плёнок типа поливинилиденфторида (PVDF) промышленно выпускается на предприятии ФГУП «НПП "Восток"». Такие приёмники при размере площадки чувствительного элемента 1 × 1 мм имеют порог чувствительности меньше $5 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{0,5}$, вольт-ваттную чувствительность не менее 10^5 В/Вт , величину D^* не менее $3 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$. При этом небольшая толщина пироэлектрика (~2 мкм) обеспечивает возможность по сравнению с другими промышленно выпускаемыми одноэлементными приёмниками значительно расширить частотный диапазон (до 1000 Гц) [27].

В настоящее время известно достаточное число примеров практического создания многоэлементных пироэлектрических приёмников на основе тонкой пироэлектрической кера-

мики [28–37]. Поскольку с уменьшением толщины пироэлектрического слоя качество ИК-приёмника улучшается, то главной задачей стало максимальное снижение толщины керамики. За последние годы в ряде компаний были разработаны уникальные технологии истончения слоёв керамики танталата лития, титаната бария-стронция (лучших пироэлектрических материалов) до 5 мкм с помощью технологии ионно-лучевого травления. При этом сам пироэлектрический слой выполняет роль теплоизолированной мембраны. Такая технология позволила значительно улучшить параметры неохлаждаемых пироэлектрических ИК-приёмников и организовать промышленный выпуск многоэлементных приёмников: как линеек с числом элементов более 500 с шагом до 25 мкм, так и матриц с числом элементов более 10^4 . Их отличает высокая пороговая чувствительность. Например, при размере чувствительного элемента 90×100 мкм и частоте модуляции излучения 40 Гц эквивалентная мощность шума (NEP) составляет менее $2 \cdot 10^{-10}$ Вт \cdot Гц $^{-0,5}$, температурная чувствительность NETD — менее 70 мК. В схеме считывания и обработки сигналов используется КМОП-мультиплексор [26].

К настоящему времени известен ряд тепловизоров с матрицей на основе сверхтонкой пироэлектрической керамики "Fluke VT02", "IRISYS 2012", "FLIR TG165", "IRISYS REDEYE-6A" [31–37]. Они обладают функциями тепловизора с цифровой видеокамерой с частотой кадров 8–40 Гц, размерностью более 10^4 пикселей, NETD \leq 250 мК.

Элементы указанных пироэлектрических матриц теплоизолированы и гибридизированы с КМОП-схемами считывания и обработки сигналов. Данные устройства значительно дешевле в производстве и надёжнее в эксплуатации, чем матрицы такого же размера на основе резистивных микроболометров. Их функционирование не зависит от уровня окружающей освещённости, и они не требуют стабилизации температуры матрицы.

На базе тонкой пироэлектрической керамики созданы бесконтактные термометры — новый дешёвый, надёжный и универсальный инструмент для термографического анализа, получения тепловой карты функционирующего промышленного оборудования, например электротехнического, автомобильного, с автоматическим поиском максимальной температуры на поверхности объекта (на поверхности кожи человека).

Дешёвая многоэлементная пироэлектрическая матрица, встроенная в смартфон, превращает его в тепловизор, который позволяет оцифровывать температуру окружающих предметов с объединением тепловых и визуальных изображений и локализовать область повышенной температуры. Возможно использование смартфона как устройства в системе безопасности и т. п. Такие конструкции открывают путь к широкомасштабному применению многоэлементных пироэлектрических устройств, в которых низкочастотная модуляция ИК-излучения осуществляется за счёт движения руки человека (тряски) благодаря специальному алгоритму обработки изображения.

Многоэлементные ИК-приёмники на основе тонких пироэлектрических плёнок. Из вышеизложенного следует, что малоразмерные пироэлектрические теплоизолированные матрицы уже известны и широко распространяются. В России аналогичных разработок пока нет и при создании образцов пироэлектрических тепловизоров используются зарубежные матрицы. Очередной шаг в развитии многоэлементных пироэлектрических матриц должен быть направлен на разработку устройств размера свыше 10^5 элементов и с высокой обнаружительной способностью.

Применение тонких пироэлектрических плёнок позволит снизить стоимость изготовления ИК-матриц, исключить гибридизацию, упростить совместимость элементов со схемами считывания IC (ROIC). Такие устройства должны обладать чувствительностью, приближающейся к теоретическому пределу для неохлаждаемых ИК-приёмников. По оценкам [24] теоретический предел чувствительности пироэлектрических приёмников и величина NETD в них в несколько раз выше, чем у микроболометров.

Сравнительный общий анализ тепловизионных ИК-систем на основе микроболометрических и пироэлектрических матриц показывает, что последние обладают существенно лучшими характеристиками. Их преимущества следующие.

1. Принцип работы микроболометрических матриц обуславливает необходимость их термостабилизации с очень высокой точностью. Термостабилизация определяет также необходимость использования высокостабилизированного источника питания либо специальных схем обработки информации, прецизионно фиксирующих изменения фоновой температуры. Матрица пироэлектрических элементов не нуждается в стабилизации температуры, поскольку принцип работы её элементов основан не на изменении их параметров при вариации температуры $T(t)$, а на регистрации скорости изменения температуры: пироток пропорционален величине $\gamma dT(t)/dt$.

2. Принцип работы микроболометров требует наряду с использованием стабилизированного напряжения поддержания достаточно большого значения тока, протекающего через элемент, для увеличения чувствительности, что сопровождается значительным нагреванием элемента и, следовательно, дополнительными шумами.

Пироэлектрические элементы — пассивные элементы, они не нуждаются в использовании источников напряжения, поскольку пироэлектрики сами в момент воздействия излучения являются генераторами тока. Это определяет и отсутствие характерных для микроболометров шумов и априори даёт возможность оценивать предельную теоретическую чувствительность пироэлектрических элементов значительно выше, чем болометрических, поскольку снижаются шумы (в основном $1/f$ -шумы).

3. Пироэлектрические матрицы в отличие от болометрических не чувствительны к фоновому излучению. В последних для снижения влияния фонового излучения приходится использовать специальные электронные схемы и дополнительные компоненты, например зонтики, что значительно усложняет конструкцию матрицы, увеличивает паразитную тепловую массу и геометрический шум, снижает чувствительность элементов и увеличивает размер пикселя.

4. Поскольку сигнал в пироэлектрических приёмниках носит дифференциальный характер и отражает только изменение температуры, то он менее чувствителен к степени неоднородности параметров отдельных элементов матрицы, а проблема малых контрастов ИК-излучения на уровне фона не стоит так остро, не требуется специальной обработки выходного сигнала, связанной с вычитанием сигнала фона, и дополнительной калибровки приёмника, применяемой в микроболометрах.

5. Пироэлектрические элементы более устойчивы к воздействию радиации. Для того чтобы изменения пироэлектрических параметров материала были заметными, необходима очень высокая доза облучения, способная существенно изменить параметры кристаллической решётки, уменьшить величину поляризации.

Несмотря на очевидные преимущества одноэлементных пироэлектрических приёмников ИК-излучения перед близкими аналогами, многоэлементные пироэлектрические матрицы, основанные на принципе накопления тепла и теплоизоляции чувствительного элемента, не получили крупномасштабного практического применения.

Задержка создания таких матриц связана с высокими технологическими требованиями к синтезу пироэлектрических плёнок, поскольку они должны обладать высококачественной кристаллической структурой и их осаждение должно производиться при достаточно высокой температуре на поверхность электродов, расположенных на тонкой мембране. Лучшие пироэлектрические материалы в большинстве случаев являются сегнетоэлектриками и имеют очень высокий коэффициент линейного расширения (30–50 раз), превышающий этот коэффициент в Si и Si₃N₄, что способствует возникновению в микробалках больших механических напряжений, ограничивающих толщину пироэлектрической плёнки в пределах толщины мембраны (до 0,3–0,6 мкм). В то же время известно, что величина

пироэлектрического коэффициента для тонких (менее 0,2–0,5 мкм) плёнок низка и только с ростом толщины до 2–3 мкм и более она приближается к значению, характерному для монокристалла соответствующего материала.

Таким образом, технология получения теплоизолированных пироэлектрических плёнок пока ещё недостаточно эффективно совмещается с базовыми процессами микроэлектроники.

Тем не менее первые попытки создания матриц размера 320×240 пикселей (с размером пикселя 50×50 мкм) на базе тонкоплёночных пироэлектрических теплоизолированных элементов на основе пленок PLZT толщиной 1 мкм, осаждаемых на поверхность мембраны с помощью золь-гель-технологии, относятся ещё к 1995–2001 годам (компания "Raytheon-TI Systems") [38]. Но эти разработки не получили дальнейшего практического развития, хотя имели высокие значения параметров элементов матрицы ($D^* = 3,5 \cdot 10^9$ см \cdot Гц 0,5 \cdot Вт $^{-1}$) и NETD (по оценкам 12 мК). Препятствием для промышленного изготовления таких матриц является и недостаточно высокий пироэлектрический коэффициент синтезированных плёнок различных материалов, его значения, несмотря на длительный период развития этого направления [40–52], находятся в пределах $(2-5) \cdot 10^{-4}$ Кл/м 2 \cdot град. Известна только одна ранняя работа [39], в которой плёнки $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ толщиной 0,5 мкм, размещённые на кремниевой мембране, имели значение γ близкое к $1,8 \cdot 10^{-3}$ Кл/м 2 \cdot град, что давало возможность сделать и оценку D^* как $6,5 \cdot 10^9$ см \cdot Гц 0,5 \cdot Вт $^{-1}$ при размере чувствительной площадки 100×100 мкм.

В последние годы появились сообщения о создании матриц на основе теплоизолированных пироэлектрических плёнок. В [51] описан элемент матрицы со структурой Au—PZT(001)—Pt, синтезированной на поверхности эпитаксиального тонкого слоя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ как мембраны. Частота модуляции ИК-излучения 100 Гц, величина $\text{NEP} = 7,22 \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц 0,5 и $D^* = 1,38 \cdot 10^8$ см \cdot Гц 0,5 \cdot Вт $^{-1}$. В [52] рассматривается возможность на основе плёнок $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,3}\text{Ti}_{0,7})\text{O}_3$ толщиной 0,4 мкм с Pt-электродами толщиной по 0,15 мкм построения матрицы размера 64×64 элемента с размерами элементов 100 мкм с зазором 0,8 мкм, отделяющим элементы матрицы от подложки. При значении пироэлектрического коэффициента $4 \cdot 10^{-4}$ Кл/м 2 \cdot град величина $D^* = 10^7$ см \cdot Гц 0,5 \cdot Вт $^{-1}$ на частоте 1 Гц.

Заключение. Анализ развития теплоизолированных тепловых приёмников как чувствительных элементов неохлаждаемых многомерных современных ИК-матриц на основе резистивных микроболометров и пироэлектрических элементов показывает, что улучшение качества указанных матриц обеспечивает увеличение теплового сопротивления R_T между чувствительным элементом и подложкой. К настоящему времени оно достигло практически предельных для технологии современной микроэлектроники значений (до 10^8 К/Вт) ценой создания сложных трёхмерных MEMS-конструкций и недостаточно эффективного использования энергии теплового потока. Дальнейшее увеличение R_T уже ограничивается фундаментальным фактором — радиационным энергообменом поверхностей. Кроме того, высокое значение R_T увеличивает время формирования кадра, сокращает быстродействие устройства, затрудняет дальнейшее снижение размеров пикселя и построение мегапиксельных матриц тепловых приёмников. Можно утверждать, что идея теплоизоляции тепловых приёмников уже не может быть положена в основу создания нового поколения указанных матриц быстродействующих приёмников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tisse C.-L., Tissot J.-L., Crastes A. An information-theoretic perspective on the challenges and advances in the race towards $12\mu\text{m}$ pixel pitch megapixel uncooled infrared imaging // Proc. SPIE. 2012. **8353**. 83531M-1.

2. **Becker S., Imperinetti P., Yon J.-J. et al.** Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI // Proc. SPIE. 2013. **8541**. 85410C-1.
3. **Holst G. C., Driggers R. G.** Small detectors in infrared system design // Opt. Eng. 2012. **51**, N 9. 096401.
4. **Driggers R. G.** Infrared detector size: how low should you go? // Opt. Eng. 2012. **51**, N 6. 063202.
5. **Endoh T., Tohyama S., Yamazaki T. et al.** Uncooled infrared detector with 12 μ m pixel pitch video graphics array // Proc. SPIE. 2013. **8704**. 87041G-1.
6. **Tohyama S., Sasaki T., Endoh T. et al.** Uncooled infrared detectors toward smaller pixel pitch with newly proposed pixel structure // Proc. SPIE. 2011. **8012**. 80121M-1.
7. **Morikawa J., Hayakawa E., Hashimoto T. et al.** Micro-scale thermal analysis with cooled and uncooled infrared cameras // Proc. SPIE. 2012. **8354**. 835410-1.
8. **Li C., Han C. J., Skidmore G.** Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development // Opt. Eng. 2011. **50**, N 6. 061017.
9. **Breiter R., Ihle T., Wendler J. et al.** Next generation cooled long range thermal sights with minimum size, weight and power // Proc. SPIE. 2013. **8704**. 87040P-1.
10. **Ajmera S., Brady J., Hanson C. et al.** Performance improvement in amorphous silicon based uncooled microbolometers through pixel design and materials development // Proc. SPIE. 2011. **8012**. 80121L-1.
11. **Fujisaw D., Maegaw T., Oht Y. et al.** 2-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with 15 μ m pixel pitch // Proc. SPIE. 2012. **8353**. 83531G-1.
12. **Kim T., Kyung K., Park J. H. et al.** Development of microbolometer with high fill factor and high mechanical stability by shared-anchor structure // Proc. SPIE. 2012. **8353**. 83531B-1.
13. **Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess C.** DRS uncooled VOx infrared detector development and production status // Proc. SPIE. 2010. **7660**. 76600V-1.
14. **Dumont G., Rabaud W., Yon J.-J. et al.** Current progress on pixel level packaging for uncooled IRFPA // Proc. SPIE. 2012. **8353**. 83531I-1.
15. **Lohrmann D., Littleton R., Reese C. et al.** Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges // Opt. Eng. 2013. **52**, N 6. 061305.
16. **Mesgarzadeh B., Sadeghifar M. R., Fredriksson P. et al.** A low-noise readout circuit in 0.35- μ m CMOS for low-cost uncooled FPA infrared network camera // Proc. SPIE. 2009. **7298**. 72982F-1.
17. **Tepegoz M., Oguz A., Toprak A. et al.** An uncooled microbolometer focal plane array using heating based resistance nonuniformity compensation // Proc. SPIE. 2012. **8353**. 83531E-1.
18. **Cao Y., Tisse C.-L.** Solid-state temperature-dependent NUC (Non-Uniformity Correction) in uncooled LWIR (Long-Wave Infra-Red) imaging system // Proc. SPIE. 2013. **8704**. 87042W-1.
19. **Lv J., Que L., Wei L. et al.** Uncooled microbolometer infrared focal plane array without substrate temperature stabilization // IEEE Sensors Journ. 2014. **14**, N 5. P. 1533–1544.
20. **Nugent P. W., Shaw J. A., Pust N. J.** Correcting for focal-plane-array temperature dependence in microbolometer infrared cameras lacking thermal stabilization // Opt. Eng. 2013. **52**, N 6. 061304.
21. **Lee J., Kyung C.-M.** Characterization of non-uniformity and bias-heating for uncooled bolometer FPA detectors using simulator // Proc. SPIE. 2013. **8706**. 87060X-1.
22. **Black S. H., Kraft R., Medrano A. et al.** Advances in high rate uncooled detector fabrication at raytheon // Proc. SPIE. 2010. **7660**. 76600X-1.
23. **Tohyama S., Miyoshi M., Kurashina S. et al.** New thermally isolated pixel structure for high resolution (640 \times 480) uncooled infrared focal plane arrays // Opt. Eng. 2006. **45**, N 1. 014001.

24. Муртазин А., Олихов И., Соколов Д. Пироэлектрический электронно-оптический преобразователь // Электроника: НТБ. 2006. № 1. С. 26–30.
25. IRA-E700ST0 // Murata: каталог производителя. URL: <http://www.murata.com/en-eu/products/productdetail.aspx?cate=luInfraredSensors&partno=IRA-E700ST0> (дата обращения: 10.02.2015).
26. Norkus V., Gerlach G., Köhler R. A new chip layout for pyroelectric single element detectors with high D^* and very low microphonics // Proc. SPIE. 2009. **7298**. 72982D.
27. Малогабаритный приёмник оптического излучения пироэлектрический // ФГУП «НПП «Восток»». URL: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf> (дата обращения: 16.02.2015).
28. Whatmore R. W. Recent advances in pyroelectric ceramics and thin films for applications in uncooled infra-red sensor arrays // Adv. Sci. Technol. 2006. **45**. P. 2503–2513.
29. Whatmore R. W., Waiton R. Pyroelectric ceramics and thin films for uncooled thermal imaging // Ferroelectrics. 2000. **236**. P. 259–279.
30. Whatmore R. W. Pyroelectric ceramics and devices for thermal infra-red detection and imaging // Ferroelectrics. 1991. **118**. P. 241–259.
31. Holden A. J. Pyroelectric sensor arrays for detection and thermal imaging // Proc. SPIE. 2013. **8704**. 87041N.
32. Norkus V., Gerlach G. High-resolution pyroelectric linear arrays based on LiTaO₃ // Proc. SPIE. 2001. **4369**. 322.
33. Norkus V., Gerlach G., Köhler R., Hofmann G. Pyroelectric linear arrays and their application // Proc. SPIE. 2007. **6678**. 66780M.
34. Norkus V. Pyroelectric infrared detectors based on lithium tantalate: state of the art and prospects // Proc. SPIE. 2004. **5251**. 121.
35. Norkus V., Schossig M., Gerlach G., Köhler R. A 256 pixel pyroelectric linear array with new black coating // Proc. SPIE. 2011. **8012**. 80123V.
36. Chang C. C., Chu K. P., Lai Y. C. The characterization and fabrication of pyroelectric infrared sensor // Tamkang Journ. Sci. Eng. 2005. **8**, N 3. P. 203–206.
37. Watton R., Mansi M. V. Performance of a thermal imager employing a hybrid pyroelectric detector array with MOSFET readout // Proc. SPIE. 1987. **865**. P. 78–85.
38. Murali P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // Rep. Prog. Phys. 2001. **64**, N 10. P. 1339–1388.
39. Noda M., Kubo R., Tanaka H. et al. A new type of dielectric bolometer mode of detector pixel using ferroelectric thin film capacitors for infrared image sensor // Proc. SPIE. 1998. **3436**. 660.
40. Kohli M., Seifert A., Willing B. et al. Thin film pyroelectric arrays as infra-red detectors // Integrated Ferroelectrics. 1997. **17**, N 1–4. P. 359–367.
41. Bruchhaus R., Pitzer D., Primig R. et al. Sputtering of PZT thin films for surface micromachined IR-detector arrays // Integrated Ferroelectrics. 1999. **25**, N 1–4. P. 1–11.
42. Cheng J.-G., Tang J., Guo S.-L., Chu J.-H. Sol-gel derived pyroelectric barium strontium titanate thin films for infrared detector applications // Ferroelectrics. 2001. **252**, N 1. P. 313–320.
43. Ko J. S., Liu W., Zhu W., Kwak B. M. Influence of the silicon substrate thickness on the response of thin film pyroelectric detectors // Solid State Electron. 2002. **46**, N 8. P. 1155–1161.
44. Köhler R., Padmini P., Gerlach G. et al. Pyroelectric IR-detector arrays based on sputtered PZT and spin-coated P(VDF) thin films // Integrated Ferroelectrics. 1998. **22**, N 1–4. P. 382–393.
45. Acquaviva J. R., Ahmed A., Jan W. et al. Hybrid thin-film ferroelectric detector with pixel level ADC // Proc. SPIE. 2009. **7298**. 729828-1.

46. **Whatmore R. W., Landi S., Shaw C. P., Kirby P. B.** Pyroelectric arrays using ceramics and thin films integrated radiation collectors: Design fabrication and testing // *Ferroelectrics*. 2005. **318**. P. 11–22.
47. **Chu J., Meng X.** Study on the ferroelectric thin films for uncooled infrared detection // *Ferroelectrics*. 2007. **352**. P. 12–24.
48. **Hanson C. M., Beratan H. R., Arbuthnot D. L.** Uncooled thermal imaging with thin-film ferroelectric detectors // *Proc. SPIE*. 2008. **6940**. 694025.
49. **Beratan H. R., Belcher J. F.** Uncooled infrared imaging using thin-film ferroelectrics // *Proc. SPIE*. 2001. **4288**. P. 298–303.
50. **Stenger V., Shnider M., Sriram S.** Thin film lithium tantalate (TFLTTM) pyroelectric detectors // *Proc. SPIE*. 2012. **8261**. 82610Q.
51. **Akai D., Kawazu N., Sugai T. et al.** Si integrated pyroelectric sensor array using epitaxial γ -Al₂O₃/Si substrates and epitaxial PZT thin films // *Proc. SPIE*. 2009. **7419**. 7419-05.
52. **Ryu S. O., Cho S. M., You I. K. et al.** Pyroelectric sensor arrays for detection and thermal imaging // *Proc. SPIE*. 2013. **8704**. 87041N.

Поступила в редакцию 16 февраля 2015 г.
