УДК 681.7-181.4

Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре РФ «НПО "Орион"»

С. Я. Андрюшин, Н. В. Кравченко, А. В. Кулыманов, Г. В. Либерова, И. И. Таубкин, М. А. Тришенков, А. М. Филачев, Ю. М. Эскин

Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

Рассмотрены состояние и перспективы развития работ по микроболометрической тематике в Государственном научном центре РФ «НПО "Орион"». Приведены сведения о разработанной микроболометрической матрице (МБМ) формата 64x64. Описаны структурная схема элемента, принципиальная электрическая схема МБМ, элементы технологии изготовления МБМ, измеренные значения параметров микроболометрического слоя. Область спектральной чувствительности полученных микроболометрических структур соответствует интервалу длин волн ~(9,1—14,5) мкм, тепловая постоянная времени — интервалу значений ~(5—20) мс, оценка эквивалентной шуму разности температур дает величину ~0,3 К. Сообщается о планируемых на предприятии дальнейших работах в развитие данной тематики.

В течение последнего десятилетия большие усилия разработчиков многоэлементных смотрящих приемников инфракрасного излучения были направлены на создание МБМ.

Решающим преимуществом таких тепловых преобразователей изображения по сравнению с квантовыми преобразователями на основе узкозонных полупроводниковых материалов являются возможность работы при комнатной температуре и, следовательно, отсутствие системы охлаждения. Это принципиально упрощает конструкцию тепловизионной аппаратуры, повышает надежность, приводит к резкому снижению стоимости и энергопотребления.

Другое важное преимущество микроболометрических матриц — принципиальная возможность накопления оптического сигнала практически в течение времени телевизионного кадра. В квантовых ИК-матрицах с высоким квантовым выходом эта задача по существу не решена.

В настоящее время разработкой микроболометрических матриц и тепловизионных устройств на их основе занимаются ведущие фирмы США, Европы, Японии, Кореи, Австралии [1—3]. МБМ непрерывно совершенствуются. Данные, приведенные в табл. 1 и 2, иллюстрируют прогресс, который был достигнут за последние год-полтора. В табл. 1 и 2 даны примеры зарубежных разработок микроболометрических матриц и модулей на их основе по состоянию на апрель 1999 г. и апрель 1998 г.

Повышается уровень всех основных характеристик:

температурного разрешения ("рекорд" прежнего периода — 30—50 мК, а текущего — 20—30 мК);

пространственного разрешения (минимальный шаг элемента за год снизился с 46—47 мкм до 25—28 мкм);

формата (фирма Lockheed Martin сообщила о проводимой разработке матрицы с числом элементов разложения 640x480).

Таблица 1

Зарубежные микроболометрические матрицы (модули), 1999 г.

Тип	Разработчик	Формат	Материал	Шаг, мкм	NETD(*f*/1), мК
AE-189	Raytheon (США)	320x240	VO_x	50	<90
SB-151				50	<20
SB-212				25	<50
U4000	Boeing (США)	320x240	VO_x	50	~30
В разработке	Lockheed Martin (США)	640x480	VO_x(?)	28	~(60—100)
—	Raytheon (США)	15x31	*a*-Si	48	<100
В разработке		120x160			<100 (оценка)
—	LETI LIR (Франция)	256x64	*a*-Si	47	<50
—	FOA (Швеция) — DSTO (Австралия)	320x240	*a*-Si:N	40	<100 (оценка)
—	Advanced Tech. R&DC (Япония)	320x240	Si (*p*—*n*-диоды)	40	200
В разработке	Daewoo (Корея)	256x256	Ti		

Таблица 2

Зарубежные микроболометрические матрицы (модули), до 1999 г.

Тип	Разработчик	Формат	Материал	Шаг, мкм	NETD(*f*/1), мК
—	Honeywell (США)	240x336	VO_x	50	<50
—	Lockheed Martin (США)	327x245	VO_x(?)	46	<100
U3000	Boeing (США)	320x240	VO_x	50	~30
—	LETI LIR (Франция)	256x64	*a*-Si	47	90
—	Japan Defense Agency (Япония)	256x256	VO_2	50	150

Расширяется география разработчиков, при этом большинство производителей в США традиционно опираются на разработанную фирмой Honeywell технологию получения температурочувствительного слоя из оксидов ванадия. В Европе, Азии, Австралии используется более широкий спектр материалов. В производственный процесс активно вовлекается аморфный кремний. Такая замена весьма показательна. ИК-преобразователь в этом случае полностью базируется на кремниевой технологии — основной технологии современной микроэлектроники. Большой интерес представляет сообщение японских разработчиков из фирмы Advanced Tech. R&DC [12], хотя приводимые ими значения эквивалентной шуму разности температур NETD пока еще уступают лучшим достижениям. В данной разработке не только используется кремний в качестве температурочувствительного материала, но и формируются *p*—*n*-переходы. Это в принципе позволяет в несколько раз повысить чувствительность МБМ за счет большей величины температурного коэффициента отклика микроболометрического элемента (до $7 \cdot 10^{-2}$ K^{-1}).

В Государственном научном центре «НПО "Орион"» также были начаты работы по созданию микроболометрических матриц, чувствительных в спектральном диапазоне 8—14 мкм. Ведущиеся разработки опираются на имеющуюся у предприятия технологическую базу и накопленный опыт создания ИС многоэлементных фотоприемников, устройств коммутации и предварительной обработки сигнала применительно к матрицам на основе материалов InSb и HgCdTe.

Ниже описывается состояние разработок МБМ в «НПО "Орион"».

Структура и технология изготовления МБМ

В состав микробиологического многоэлементного приемника излучения входят собственно МБМ с электронными ключами опроса, строчный и столбцовый мультиплексоры, вакуумированный корпус с возможностью термостабилизации. Основой устройства является микроболометрический элемент.

Структура микроболометрического элемента

При проектировании микроболометрических структур авторы исходили из соображений оптимизирования конструктивно-топологических решений фотоприемных ячеек при имеющихся технологических возможностях. Выбор был сделан в пользу так называемой мостовой конструкции чувствительного элемента, позволяющей эффективно использовать площадь регулярной части кристалла для размещения элементов коммуникации. Это основной тип конструкции, применяемый в настоящее время большинством разработчиков. В качестве терморезистивного материала используются оксиды ванадия, технологически совместимые в производстве с кремниевыми ИС и обладающие значениями теплового коэффициента сопротивления на уровне 2—3 %/К [3]. Схематически конструкция мостового микроболометра представлена на рис. 1. Там же указаны принятые значения геометрических размеров его элементов. Такие размеры были вынужденными и определялись доступными значениями проектных норм. Расчетная величина теплового сопротивления конструкции, приведенной на рис. 1, составляет ~$(1—1{,}3)\cdot10^6$ К/Вт. В сообщениях зарубежных авторов приводятся данные о существенно меньшей ширине "ног" микроболометрических элементов, в соответствии с чем современный мировой уровень значений темнового сопротивления составляет величину ~$(0{,}7—1{,}3)\cdot10^7$ К/Вт [3] и даже $4\cdot10^7$ К/Вт [9], что всего лишь втрое ниже предельного значения, определяемого радиационным обменом.

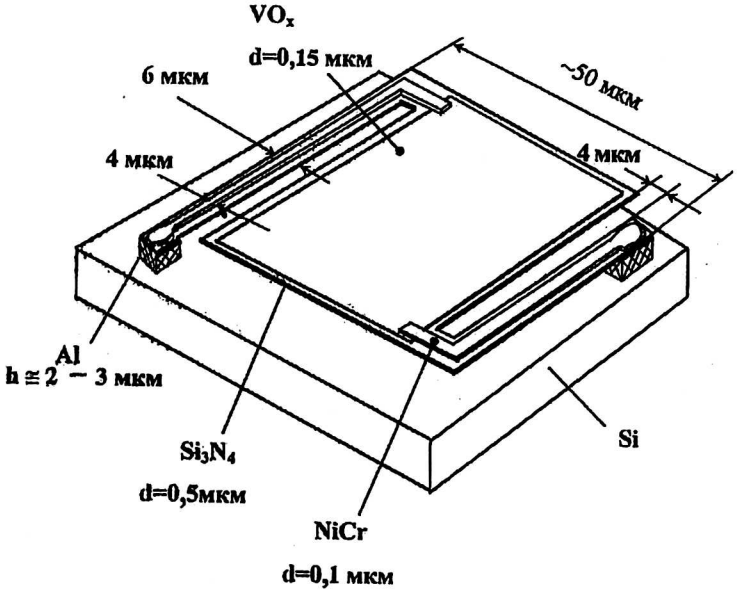


Рис. 1. Схематическое изображение микроболометра мостового типа

Собственно болометрический элемент представляет собой площадку, чей тепловой и электрический контакты с остальной схемой осуществляются только через пару длинных узких "ног". Термочувствительный слой из материала VO_x нанесен на подслой из нитрида кремния, удерживаемый на высоте $h \sim 2$ мкм над поверхностью кремниевого кристалла с помощью двух электропроводящих опор. В дальнейшем предусматривается увеличение высоты h до 3 мкм. Металлизация ног выполнена из нихрома. Этот металл наилучшим образом удовлетворяет двум противоречивым требованиям: обеспечить одновременно низкую тепловую и высокую электрическую проводимости. При указанном собственном тепловом сопротивлении моста существенным становится влияние конвекционного теплообмена болометра с кристаллом. Для устранения этого влияния была разработана вакуумная конструкция. Названная задача решается при степени откачки не хуже ~1 мм рт. ст. На область под мостом нанесено (не показано на рис. 1) покрытие — металлизация, отражающее излучение, за счет чего должен формироваться четвертьволновый оптический резонатор, эффективный внутри интересующего нас спектрального диапазона (с учетом указанного зазора $h = 2$—3 мкм). В реализованной конструкции шаг ячеек равен 80 мкм, площадь моста-приемника теплового излучения $A_б \approx 3{,}6 \cdot 10^{-5}$ см^2, так что коэффициент заполнения близок к 60 %.

Кремниевая электроника

На рис. 2 представлена принципиальная электрическая схема устройства, включающая матрицу микроболометров и электронных ключей, мультиплексор опроса (строк) (Мпл) и выходной мультиплексор (столбцов). Электронные ключи выполнены в виде биполярных *npn*-транзисторов, базы которых соединены построчно и управляются сигналами, подаваемыми с выходов МПл строк. Поочередное считывание сигнала с элементов опрашиваемой строки на общий видеовыход производится с помощью выходного мультиплексора. Оба мультиплексора выполнены по технологии МДП-транзисторов с индуцированным каналом *n*-типа, каждый из которых управляется по двум входам фаз (Ф1 — Ф2 или Ф3 — Ф4) и одному входу запуска ($ЗАП_{стл}$ или $ЗАП_{стр}$). Строчный мультиплексор требует также подачи двух постоянных напряжений — питания $E_{п.стр}$ и строчного $E_б$. Видеовыход подключен к трансимпедансному усилителю, преобразующему токовый сигнал опрашиваемого микроболометра.

Такой способ считывания имеет преимущество перед способом считывания с делителя напряжения, так как исключает шумы, вносимые нагрузочным резистором, уменьшает перекрестные связи и напряжение питания. В то же время приведенная схема не содержит компонентов предварительной обработки сигнала (например, предусилителей в каждом из столбцов матрицы), позволяющих понизить эффективную шумовую полосу. Такая задача явится предметом дальнейших разработок.

Ограничиваясь для простоты анализа случаем преобладания тепловых (найквистовых) шумов микроболометров, оценим значения их номинального сопротивления. Отношение сигнала к шуму Найквиста при опросе элемента в этом случае запишется как:

$$i_с \,/\, i_{ш-найкв} \approx \frac{\alpha \Delta T_б}{\sqrt{4kT_б}} \frac{U_б}{\sqrt{R_б \Delta f}},$$

где α — тепловой коэффициент сопротивления микроболометра (K^{-1});

$\Delta T_б$ — изменение температуры микроболометра, вызванное падающим потоком излучения от наблюдаемой сцены;

$T_б$ — температура болометра;

$U_б$ — падение напряжения на болометре;

Δf — полоса частот электронного тракта.

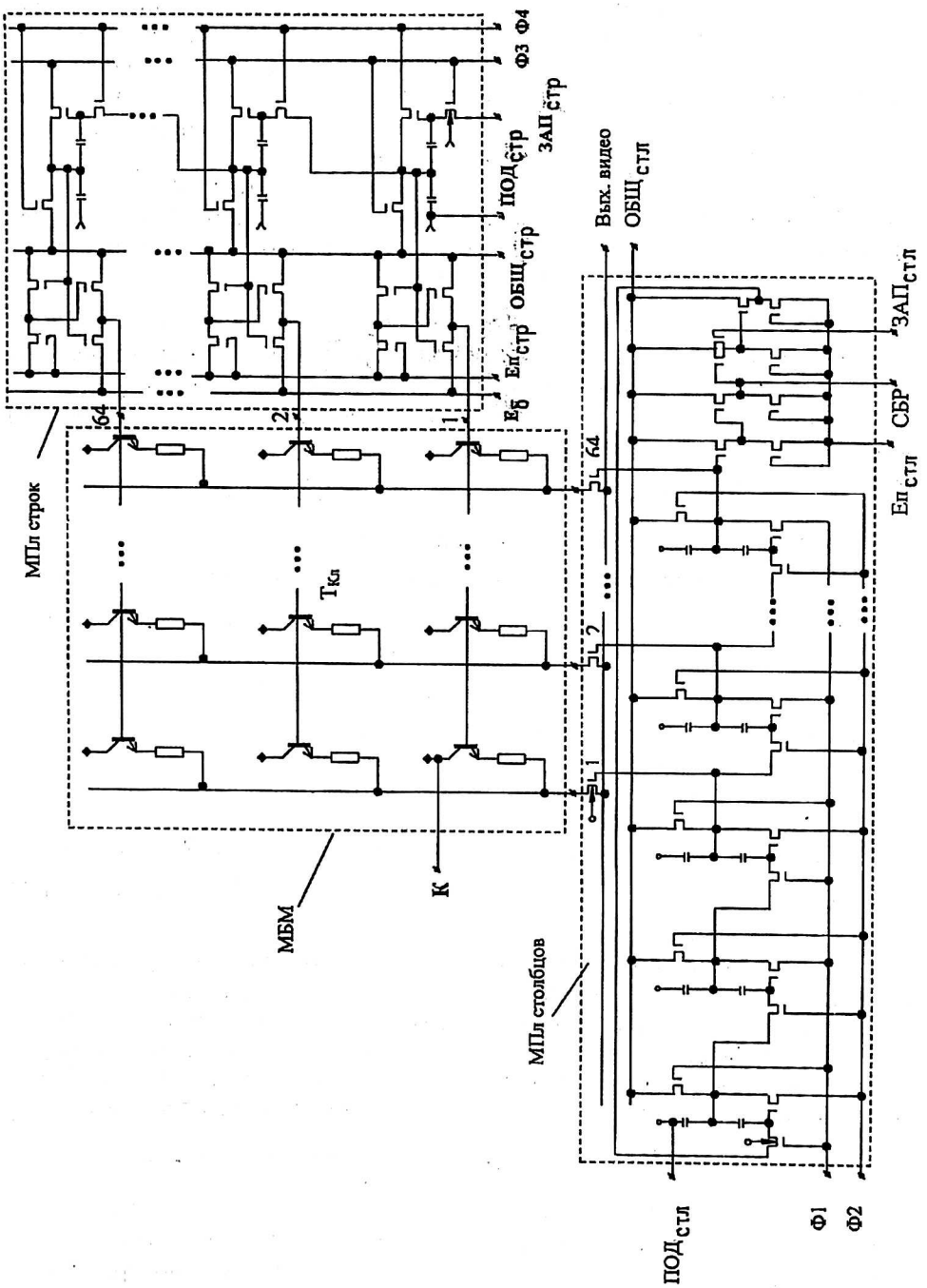


Рис. 2. Схема МБМ формата 64x64:
♦- подложка МБМ n-типа; О и > - подложки МПл столбцов и строк, соответственно, p-типа

Естественно, с ростом отношения сигнала к шуму улучшается величина эквивалентной шуму разности температур NETD.

Как следует из приведенного уравнения, для повышения величины $i_c/i_{\text{найкв}}$ надо увеличивать напряжение $U_б$ и устремлять к нулю значение $R_б$. Последнее ограничено снизу конечными величинами выходного сопротивления устройства опроса, сопротивления ключей и токоведущих дорожек, так как они при малых значениях $R_б$ снижают отклик и дают существенный вклад в шум. Увеличивается также и доля ЭДС шума усилителя. При снижении величины $R_б$ обычно снижается и величина α. С уменьшением величины $R_б$ происходит также рост потребляемой мощности и перегрев микроболометра при опросе за счет джоулева тепла. Так, при формате МБМ $m{\times}n$, частоте кадров $f_к$, теплоемкости микроболометра $C_т$ и его тепловой постоянной времени $\tau_т \sim 1/f_к$ разогрев чувствительного элемента при опросе определяется как:

$$\Delta T_{Дж} = U_б^2/(R_б C_т\, m{\times}n\, f_к).$$

При $m{\times}n$ = 64×64 и типовых значениях $U_б \sim 3$ В, $C_т \sim 1{\cdot}10^{-9}$ Дж/К, $f_к$ = 25 Гц получим, что перегрев элементов с $R_б \leq 2$ кОм при их опросе будет близок к 50 °С или даже выше. При величине температурного контраста тепловой сцены, равной $\Delta T_{сц}$, соответствующее ему изменение температуры микроболометрического элемента можно оценить по выражению

$$\Delta T_б \approx R_т\, \eta_{опт}^{\Delta\lambda} K_{погл}^{\Delta\lambda}\, [D/(2F)]^2 (\partial M_{\Delta\lambda}/\partial T_{сц}) A_б \Delta T_{сц},$$

где $R_т$ — тепловое сопротивление микроболометра;

$\eta_{опт}^{\Delta\lambda}$ — эффективное значение коэффициента пропускания входного оптического окна в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ поглощения микроболометра;

$K_{погл}^{\Delta\lambda}$ — эффективное значение коэффициента поглощения излучения микроболометрическим элементом в указанном диапазоне;

$A_б$ — площадь элемента;

$D/(2F)$ — числовая апертура входного оптического устройства;

$M_{\Delta\lambda}$ — плотность потока излучения сцены в интервале $\Delta\lambda$.

При характерных для современного состояния значениях $R_т \sim 1{\cdot}10^7$ К/Вт, $\eta_{опт}^{\Delta\lambda} \sim 1$, $K_{погл}^{\Delta\lambda} \sim 0{,}8$, $\lambda \in (8—14)$ мкм, $A_б \sim 1{\cdot}10^{-5}$ см$^{-2}$, $D/(2F) = 0{,}5$ при $T_{сц} =$ $= 300$ К и $\Delta T_{сц} = 0{,}1$ К получим $\Delta T_б \sim 5{\cdot}10^{-4}$ К.

Таким образом, отношение "сигнал/подставка" в отклике не превысит величины $\Delta T_б/\Delta T_{Дж} \sim 10^{-5}$, а попытка увеличения за счет снижения напряженности $U_б$ приведет к пропорциональному ухудшению отношения сигнал/шум. Поэтому значения сопротивления микроболометров в нашем случае выбирались из диапазона 5—20 кОм. Этого значения достаточно, чтобы пренебречь влиянием других указанных выше факторов на отношение сигнала к шуму.

Технология изготовления микроболометрических матриц

В основу технологии изготовления элементов МБМ положена поверхностная микромеханическая технология, которая позволяет формировать болометрические элементы в виде мостиков, подвешенных над поверхностью кремниевой подложки, в которой предварительно созданы соответствующие планарные ИС. Создание таких мостиков является первой ключевой проблемой технологии МБМ. Сначала микроболометры формируются на так назы-

ваемом "жертвенном" слое, который поддерживает их в течение всего технологического цикла, а затем "жертвенный слой" удаляется, и микроболометры остаются изолированными от подложки воздушной прослойкой. Изготовление собственно МБМ проводится после формирования матрицы ключей.

Совместимость технологий создания собственно матрицы микроболометров и кремниевой электроники — вторая ключевая проблема. Технологические процессы создания мостов не должны вносить изменения в характеристики транзисторов. Все процессы должны быть согласованы по температурам. Так, в качестве материала разводки в матрице ключей используется алюминий, поэтому температура проведения процессов при формировании матрицы микроболометров не должна превышать 400 °С.

Изготовление МБМ включает следующие основные этапы:

формирование матрицы ключевых n^+—p—n-биполярных транзисторов;

нанесение "жертвенного слоя";

формирование матрицы болометрических элементов;

разделение пластины на кристаллы;

вытравливание "жертвенного слоя".

В качестве материала "жертвенного слоя" использовался полиимидный лак, который наносился на подложку методом центрифугирования, толщина лака составляла ~ 2 мкм.

После вскрытия контактных окон в лаке к биполярным транзисторам осаждался слой мостового нитрида кремния толщиной 0,5 мкм методом магнетронного распыления. Затем вскрывали контактные окна, напыляли слой контактного металла (нихрома) толщиной 0,1 мкм и методом фотолитографии выделяли токоведущие дорожки. После этого проводилось осаждение слоя оксида ванадия методом катодного распыления мишени ванадия в атмосфере аргона и кислорода, формировался рисунок и осаждался защитный слой нитрида кремния толщиной 0,1 мкм, а затем методом фотолитографии выделялись мостовые структуры. После проверки электрических параметров пластины разделялись на кристаллы и проводилось удаление "жертвенного слоя" в кислородной плазме.

В соответствии с изложенным выше были проведены технологические партии по изготовлению МБМ и получены структуры выбранного нами формата 64×64.

Фотография фрагмента такой структуры, полученная с помощью растрового электронного микроскопа, приведена на рис. 3. Помимо микроболометрической матрицы, каждая из таких структур содержит тестовые 8-ячеечные линейки микроболометров и микроболометров с электронными ключами.

Экспериментальные результаты

Методы измерений

Среди измерявшихся параметров и характеристик микроболометров как основных элементов МБМ отметим тепловой коэффициент сопротивления (ТКС), тепловую постоянную времени $\tau_т$, тепловое сопротивление $R_т$ и спектральную характеристику чувствительности.

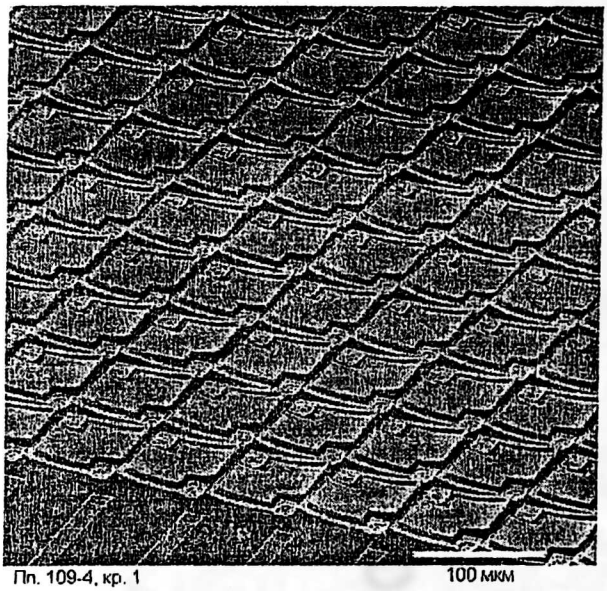


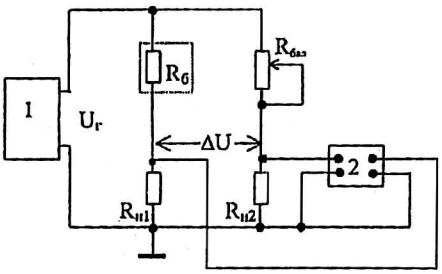
Рис. 3. Фрагмент микроболометрической матрицы формата 64x64

Метод определения величины ТКС микроболометров основан на измерении сопротивления элементов тестовых линеек в условиях вакуума при нескольких значениях температуры кристалла. Термостатирование обеспечивалось с помощью установки типа DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy), а постоянный ток через микроболометр при измерении выбирался таким, чтобы вызванный им перегрев микроболометра был незначителен.

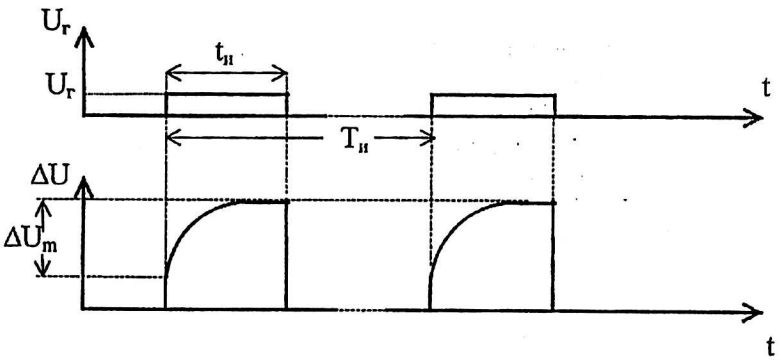
Метод определения тепловой постоянной времени основан на измерении скорости изменения электрического отклика схемы, приведенной на рис. 4. Импульс электрического тока прямоугольной формы разогревает микроболометр за время $\sim(2—3)\tau_т$ до установившегося значения температуры. По окончании импульса тока температура элемента будет спадать с той же постоянной времени. Форма отклика, снимаемого с диагонали электрического моста при соответствии номинальных значений сопротивлений элементов в различных плечах, отражает вид временной зависимости изменения температуры микроболометра. При известных значениях ТКС и параметрах схема рис. 4 по отклику на ее выходе может быть определено также тепловое сопротивление $R_т$ микроболометра.

Исследования спектральных характеристик проводили с помощью спектрофотометра типа 270-50 фирмы "Хитачи".

Для анализа качества МБМ при визуализации тепловых изображений был разработан автоматизированный процессорный комплекс, схема которого представлена на рис. 5.



а



б

Рис. 4. К измерению тепловой постоянной времени микроболометра:
а — схема; б — временные диаграммы напряжений:
1— генератор импульсов; 2 — осциллограф с симметричным входом; $R_б$ — элемент микроболометрического устройства в вакуумированном корпусе; $R_{бал}$ — балансовый резистор; $R_{н1}$, $R_{н2}$ — нагрузочные резисторы моста; $U_г$, ΔU — напряжения на выходе генератора 1 и диагонали моста

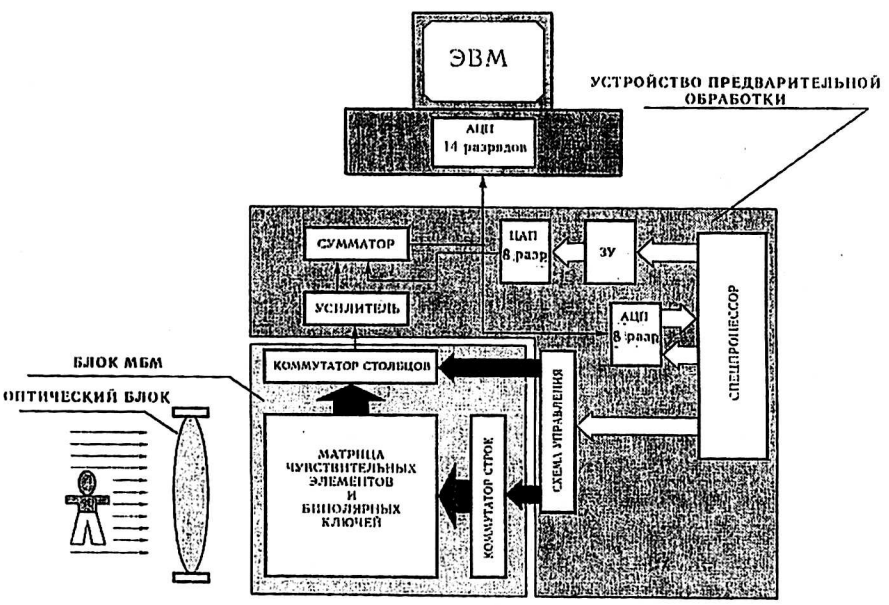


Рис. 5. Схема автоматизированного процессорного комплекса для визуализации отклика МБМ

Комплекс состоит из оптического блока (ИК-объектива с оправкой), блока МБМ (собственно МБМ с электронными ключами и мультиплексоры в вакуумированном термостабилизированном корпусе), устройства предварительной обработки сигнала и ПК с 14-разрядным АЦП. Тепловое излучение сцены через оптическую систему попадает на микроболометрическую матрицу. С помощью схемы управления, входящей в состав устройства предварительной обработки, видеосигнал считывается и усиливается, после чего поступает на устройство предварительной компенсации неоднородности пьедестала отклика. Наличие этого устройства является особенностью такого рода комплексов для МБМ. В квантовых матрицах емкостная ячейка накапливает заряд ~$(1—5)\cdot10^7$ электронов, так что отношение шума к "пьедесталу" в отклике составляет ~$1:[(3—7)\cdot10^3]$. В разработанных матрицах это отношение значительно хуже, порядка $1:10^5$, поэтому приходится выполнять предварительную (перед вводом в компьютер) компенсацию пьедестала. Рассматриваемое устройство выполнено в виде сумматора, связанного с 8-разрядным ЦАП. На вход последнего с частотой видеосигнала поступают из буферного ЗУ данные об откликах соответствующих ячеек МБМ, полученные в ходе калибрационного ("темнового") кадра, когда системе предъявляли сцену в виде объекта с одинаковой для всех точек температурой. Данные об этом кадре были предварительно введены в систему с помощью 8-разрядного АЦП.

Таким образом, удается улучшить соотношение шума (и сигнала) и пьедестала в отклике МБМ примерно на два порядка — до величины ~1:1000. Такой аналоговый сигнал с выхода сумматора поступает на вход 14-разрядного АЦП, смонтированного в системном блоке. Разработанное программное обеспечение позволяет производить одно- и двуточечную компенсацию "геометрического шума", поэлементное усреднение отклика по заданному числу кадров, вычитание кадров, построение функций распределения и гистрограмм откликов и ряд других операций. Результаты обработки сигнала визуализируются на экране монитора и могут быть сохранены в виде файлов.

Параметры микроболометрического элемента

Проведенные на микроболометрических элементах измерения и оценки дали следующие значения основных теплофизических параметров: тепловая постоянная времени $\tau_т = 5—20$ мс, тепловое сопротивление $R_т = (1—1{,}5)\cdot10^6$ К/Вт. При этом соответствующие оценки на основе топологических параметров МБМ, справочных данных по теплофизическим параметрам используемых материалов и измеренных значений ТКС микроболометров приводят к величинам $\tau_т \approx 10$ мс и $R_т = (1—1{,}3)\cdot10^6$ К/Вт, что находится в удовлетворительном соответствии с результатами эксперимента.

Измеренные величины электрического сопротивления микроболометрических элементов и его температурного коэффициента соответствуют ожидаемым значениям, заложенным при проектировании, и составляют $R_б =$ $= 5—20$ кОм, $\alpha \approx (1—1{,}5)\cdot10^{-2}$ $К^{-1}$.

Выше отмечалось, что технологические ограничения не позволили достичь современного мирового уровня значений теплового сопротивления $R_т$. Полученные значения уступают ему в 5—10 раз.

Параметры МБМ

Результаты проектирования, измерения и оценки параметров МБМ приведены ниже.

Параметры поглощения излучения:
- спектральный диапазон (по уровню 0,1), мкм ..... 9,1—14,5
- коэффициент поглощения излучения, % ..... ~25

Топологические параметры:
- формат МБМ ..... 64×64
- шаг ячеек, мкм 80
- коэффициент заполнения, % 56

Теплофизические параметры:
- тепловая постоянная времени, мс ..... 5—20
- тепловое сопротивление, К/Вт ..... $(1—1,5)\cdot10^6$

Электрические параметры:
- электрическое сопротивление, кОм ..... 5—20
- тепловой коэффициент сопротивления, %/К ..... 1—1,5

Параметр обнаружения:
- эквивалентная шуму разность температур ($F/0,7$), К 0,3

Диапазон спектральной чувствительности лежит в области длин волн 9,1—14,5 мкм.

Отметим, что для квантовых матриц на основе материала HgCdTe получение такой длинноволновой границы связано с серьезными проблемами (большие фоновые токи, снижение величины параметра R_0A). Экспериментальная спектральная характеристика, полученная по описанной выше методике, приведена на рис. 6. Наши эксперименты подтверждают данные [14, 15] о том, что слой нитрида кремния Si_3N_4 является поглотителем ИК-излучения. При этом слой оксидов ванадия выполняет роль электротермометра, регистрирующего его температуру. За поглощение в слое Si_3N_4, согласно [14], ответственны межатомные связи вида Si—N, Si—H, дающие значения показателя поглощения $\sim(1—2)\cdot10^{-4}$ см. Однако пики поглощения, вызванные указанными связями, узкие по сравнению с профилем характеристики на рис. 6.

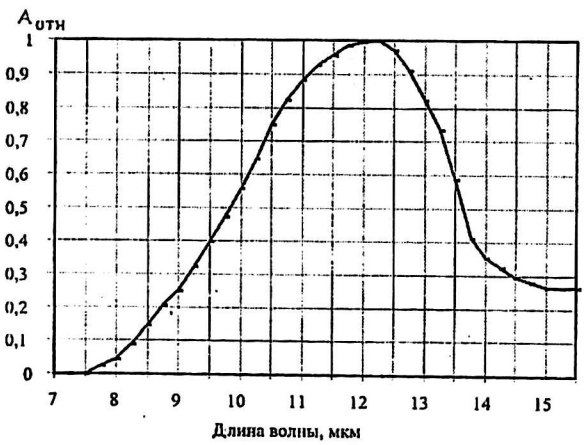


Рис. 6. Относительная спектральная характеристика поглощения чувствительного слоя микроболометра

Природа этого несоответствия требует дальнейшего анализа. Для излучения абсолютно черного тела с температурой 300 К в приведенном спектральном диапазоне оценка дает величину коэффициента поглощения не хуже 25 %. Имеется возможность его дальнейшего увеличения за счет оптимизации конструкции моста как элемента оптического резонатора. По данным [3, 6, 16],

коэффициент поглощения микроболометрических элементов может составлять ~50—80 %.

Проведена проверка работоспособности МБМ при номинальном значении кадровой частоты $f_к$ = 25 Гц и использовании описанного выше автоматизированного процессорного комплекса. Получены изображения стационарного и динамического тепловых сюжетов.

Оценка величины эквивалентной шуму разности температур по результатам первых экспериментов при использовании ИК-объектива с относительным отверстием, соответствующим величине $F/0{,}7$, приводит к значению NETD ≈ 0,3 К. Указанные выше потери (в пять—десять раз в величине $R_т$ и около двух раз в величине поглощения) привели к соответствующим потерям (примерно в 10—20 раз) в величине NETD.

Заключение

В литературе отсутствуют сведения о разработанных российских двумерных микроболометрических матрицах, и представленная разработка является первой в Российской Федерации этой области. По уровню значений параметров она уступает зарубежным МБМ. Отметим, что за рубежом разработка неохлаждаемых микроболометрических элементов была начата в 70-х гг., а матриц на их основе — не позднее начала 90-х гг. [16, 17]. Вместе с тем достигнутые в НПО "Орион" значения параметров — пространственное разрешение (шаг 80 мкм), формат 64×64 и эквивалентная шуму разность температур ~0,3 К — позволяют использовать данную МБМ в ряде промышленных тепловизионных систем, например, для решения задач контроля утечек тепла в производстве и строительстве, на теплосетях, в электроэнергетике, тепловизионной разбраковке изделий при производстве полупроводниковых ИС, в пожарной технике и др., что имеет важное народно-хозяйственное значение.

Преимуществом систем небольшого формата является их относительная дешевизна. В этой связи отметим, что в силу названной причины, обладая развитой технологией изготовления МБМ формата 320x240, специалисты ведущей в этой области фирмы Raytheon считают коммерчески целесообразным вести разработку и изготовление приборов формата 160x120 для использования в системах военного назначения [18].

Наряду с доработкой и освоением выпуска МБМ указанного формата НПО "Орион" планирует также работы по качественному улучшению параметров своих изделий и доведению их до принятого мирового уровня. Для этой цели на предприятии проводятся работы в следующих направлениях:

- создание собственной усовершенствованной и привлечение имеющейся отечественной технологической базы прежде всего в целях реализации микронной и субмикронной проектных норм;
- проектирование с учетом возможностей этой базы МБМ формата ~320x240 с шагом ~50 мкм;
- совершенствование конструкции МБМ с учетом возможностей модернизированной технологии, в первую очередь, — уменьшения геометрических размеров элементов микроболометра в целях повышения его теплового сопротивления;
- встраивание в полупроводниковый кристалл с МБМ линеек устройств предварительной обработки сигнала для улучшения значения NETD за счет снижения эффективной шумовой полосы частот электронного тракта.

Литература

1. *Klass F. J.* Uncooled, cheap FLIRs to open new markets//Av. Week & Space Tech. 1994. V. 140. №10. Febr. 28. P. 61.

2. *Breen T. et al.* More applications of uncooled microbolometer sensors//SPIE. 1998. V. 3436. P. 530—540.

3. *Howard P. E. et al.* Advances in microbolometer focal plane technology at Boeing//Ibid. V. 3379. P. 47—57.

4. *Tissot J.-L. et al.* LETI/LIR amorphous silicon uncooled microbolometer development//Ibid. P. 139—144.

5. *Wada H. et al.* Design and performance of 256x256 bolometer-type uncooled infrared detector// Ibid. P. 91—100.

6. *Radford W. et al.* Sensitivity improvements in uncooled microbolometer FRA//Ibid. 1999. V. 3698. P. 119—130.

7. *Howard P. E. et al.* Advanced high performance 320x240 VO_x microbolometer uncooled IR focal plane//Ibid. P. 131—136.

8. *Altman M. et al.* Lockheed Martin's 640x480 uncooled microbolometer camera//Ibid. P. 137—143.

9. *Brady J. et al.* Advances in amorphous silicon uncooled IR systems//Ibid. P. 161—167.

10. *Vedel C. et al.* Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA//Ibid. P. 276—283.

11. *Jansson C. et al.* FOA/DSTO uncooled IRFPA development//Ibid. P. 264—275.

12. *Ishikawa T. et al.* Low-cost 320x240 uncooled IRFPA using conventional IC process//Ibid. P. 556—564.

13. *Ju S.-B.* Design and fabrication of a high fill-factor microbolometer using double sacrificial layers//Ibid. P. 180—189.

14. *Taft E.* Characterization of silicon nitride films//J. Electrochem. Soc. 1971. V. 118. № 8. P. 1341—1345.

15 *Jerominek H. et al.* Micromachined, uncooled, VO_2-based, IR bolometer arrays//SPIE, 1999. V. 2746. P. 60—71.

16 *Herring R. J. et al.* Design and performance of the ULTRA 320x240 uncooled focal plane array and sensor//Ibid. P. 2—12.

17. *Liddiard K. C.* Thin film monolithic detector arrays for uncooled thermal imaging//Ibid. 1993. V. 1969. P. 206—216.

18. *Hardin R. W.* Uncooled IR FPA going global//SPIE OE Reports, March. 2000. № 195. P. 3.

Авторы выражают благодарность сотрудникам «НПО "Орион"» А. Е. Трошкову, Т. В. Киселевой, Т. Н. Мищенковой, З. В. Чижовой — за участие в разработке технологических процессов; М. Ф. Биденко, Ю. В. Лобикову, В. Ф. Кочерову — за разработку конструкции МБМ; Ю. Д. Козыреву, А. А. Лопухину, С. Д. Сиваченко, Н. Б. Залетаеву, Ю. В. Кузнецову, Ю. А. Глебову — за участие в проведении измерений.

Microbolometer matrices development at russian federation state scientific centre "Orion"

S. Ya. Andryushin, N. V. Kravchenko, A. V. Kulymanov, G. V. Liberova, I. I. Taubkin, M. A. Trishenkov, A. M. Filachov, Yu. M. Eskin

State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

State and perspectives of microbolometer matrices development at State Scientific Centre "Orion" are discussed. Information on carried out microbolometer matrix (MBM) of 64x64 format is presented. Microbolometer element design, MBm electric layout, technology features and bolometer layer parameters values are described. Microbolometer structure spectral sensitivity range belongs to ~9,1 through 14,5 μm wavelength band, thermal time constant is ~ 5 through 20 ms, and noise equivalent temperature difference (NETD) value is estimated as 0,3 K. The further works on MBMs development to be carried out at "Orion" are announced.