

УДК 629.5.052.5

МАТРИЧНЫЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ С ВЫСОКИМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

© Р. З. Хафизов, В. В. Старцев, В. Ю. Москвичев

*Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро "АСТРОН"»,
140080, г. Лыткарино Московской обл., ул. Парковая, 1
E-mail: info@astrohn.ru*

Рассмотрены теоретические соотношения, оптимизирующие конструкцию микроболометрического элемента матричного детектора и обеспечивающие улучшение его характеристик быстродействия. Сформулированы требования к параметрам элементов и к используемым для их изготовления материалам, которые предоставляют принципиальную возможность минимизации постоянной времени тепловой релаксации болометрического сенсора в целях увеличения кадровой частоты матриц. Представлены результаты их моделирования, позволяющие провести оптимизацию конструкции и её реализацию с использованием современных технологических процессов формирования высокоэффективных микроболометрических элементов с учётом требований конкретных применений.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, микроболометр, фотоприёмное устройство, оптико-электронные системы, микроэлектромеханические системы, отношение сигнал/шум, эквивалентная шуму разность температур.

DOI: 10.15372/AUT20210509

Введение. Степень интеграции и чувствительность современных болометрических детекторов достигли значений, характерных для аналогичных фотонных приборов. По сравнению с фотонными детекторами болометры обеспечивают поглощение энергии в более широком спектральном диапазоне, могут работать без охлаждения и весьма привлекательны по стоимости и энергопотреблению. Вместе с тем они существенно уступают фотонным детекторам по быстродействию. Сегодня ведущими технологическими компаниями проводятся работы по развитию неохлаждаемых болометрических матричных детекторов для применений, где требуется фиксация быстроизменяющихся событий [1–3], например для использования в оптико-электронных системах (ОЭС), предназначенных для пеленгации быстродвижущихся тепловых объектов.

В ОКБ «Астрон» ведутся разработки чувствительных микроболометрических структур, исходя из современных требований, предъявляемых к тепlopеленгационной аппаратуре в части чувствительности и быстродействия детекторов. Рассмотрены возможности оптимизации параметров и характеристик матричных неохлаждаемых микроболометрических фотоприёмных устройств (ФПУ), определены конструктивные и технологические решения по их разработке, направленные на реализацию требований по функционированию перспективных ОЭС.

Цель предлагаемой работы — проведение анализа по выявлению конструктивно-технологических возможностей, обеспечивающих уменьшение времени отклика (постоянной времени тепловой релаксации) болометрических сенсоров. Исследования в этом направлении отвечают актуальным запросам разработчиков современной тепlopеленгационной аппаратуры по увеличению быстродействия инфракрасных ОЭС на основе матричных микроболометрических детекторов.

Электрофизические, тепловые и конструктивно-технологические параметры микроболометрического сенсора, определяющие характеристики функционирования матричного приёмника ИК-изображения на его основе. Микроболометр — это микроэлектромеханический сенсор (МЭМС), чувствительный к тепловому излучению и изготовленный с использованием методов микрообработки кремния. Важнейшее преимущество процессов изготовления МЭМС-структур состоит в том, что они приемлемо вписываются в стандартную КМОП кремниевую технологию. Основным элементом сенсора — тонкая диэлектрическая мембрана, на которую нанесён активный терморезистивный слой. В результате вытравливания жертвенного слоя, расположенного под мембраной, она вывешивается над поверхностью подложки, соединяясь с последней узкими опорными микроконсолями, которые определяют и контролируют тепловую проводимость сенсора. Обладая малой тепловой массой, мембрана способна быстро нагреваться под действием ИК-излучения. В целях повышения чувствительности структуры на мембрану наносят покрытие, эффективно поглощающее ИК-излучение. Применение секторальных (локализованных в определённых секторах матрицы) поглощающих покрытий предполагает возможность изготовления мультиспектральных микроболометрических сенсоров.

Параметры микроболометрического сенсора в составе приёмника ИК-изображения определяются целым рядом факторов, а именно:

- температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) α активного слоя;
- коэффициентом поглощения η ИК-излучения;
- площадью сенсора S , включающей в себя площадь чувствительной мембраны A и площадь S_c , занимаемую консолями: $S = A + S_c$;
- теплоёмкостью C мембраны (включая поглощающее покрытие);
- теплопроводностью консолей G , определяемой, прежде всего, тепловой проводимостью токопроводящих шин;
- электрическим сопротивлением сенсора R ;
- постоянной времени тепловой релаксации сенсора τ_r ;
- временем кадра τ_f матричного детектора, определяемого через постоянную времени тепловой релаксации сенсора τ_r , как $\tau_f = \pi \tau_r$.

Перечисленные параметры находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, оказывая влияние на чувствительность сенсора.

При конструировании матричного болометрического приёмника в качестве основных задаются следующие характеристики: количество N и шаг d следования элементов матрицы, определяющие требуемое пространственное разрешение, время кадра τ_f , задающее временное разрешение, и чувствительность в терминах эквивалентной шуму разности температур (NETD — Noise Equivalent Temperature Difference) прибора. Количество элементов матрицы при определённом размере её чувствительного массива ограничивает максимальную площадь ячейки и соответственно площадь A её активной части. Требуемое для конкретных применений быстроедействие детектора накладывает ограничение сверху на время тепловой релаксации детектора излучения τ_r .

Величина, на которую активная часть плёночной структуры изменяет своё сопротивление при нагреве, зависит от температурного коэффициента удельного сопротивления материала. Обеспечение высокого значения ТКС необходимо для достижения высокой чувствительности сенсора. Активный слой также характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ , которое желательно оптимизировать для достижения, с одной стороны, максимального ТКС, а с другой, — не сильно увеличивать для минимизации шума.

Одним из наиболее широко используемых материалов для формирования активных терморезистивных плёнок в современных микроболометрах является оксид ванадия VO_x .

Он обладает довольно низким удельным электрическим сопротивлением, при этом достаточно высоким и стабильным ТКС (плёнки не подвержены гистерезисным явлениям при изменении температуры). Вместе с тем в настоящее время ведутся интенсивные исследования по поиску новых материалов, поскольку для реализации терморезистивных плёнок на основе VO_x требуются сложные технологические процессы, освоение которых вызывает существенные трудности.

Теплофизический анализ. Преобразование ИК-излучения в тепловых сенсорах в отличие от квантовых аналогов происходит в два этапа: сначала происходит нагрев мембраны, а затем образующаяся вследствие этого разность температур ΔT между подложкой и мембраной конвертируется в сигнал, несущий информацию об интенсивности излучения. Разность температур ΔT , возникающая в результате поглощения мембраной ИК-излучения, определяется тепловым балансом между поглощённой тепловой энергией и потерями тепла, связанными с теплопроводностью консолей.

Уравнение теплового баланса выглядит следующим образом:

$$C \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \eta \Delta P - G \Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta P(t)$ — изменение мощности теплового излучения [Вт] в плоскости детектора, а ΔT — изменение температуры между детектором и теплоотводом (подложкой). Реакцию температуры мембраны на резко возрастающее изменение мощности излучения можно определить интегрированием уравнения (1) с учётом граничного условия $t = 0$, $\Delta T = 0$. Результатом этого интегрирования является выражение

$$\Delta T = \frac{\eta \Delta P}{G} (1 - e^{-t/\tau_r}), \quad (2)$$

где $\tau_r = C/G$ — постоянная времени тепловой релаксации, характеризующая время реакции мембраны на изменение мощности теплового излучения.

В стационарном состоянии, когда $t \gg \tau_r$, $\Delta T = \eta \Delta P/G = \eta \Delta P \tau_r/C$.

Теплоёмкость мембраны определяется через удельную объёмную теплоёмкость c_V , зависящую от тепловых свойств материалов, из которых она изготовлена:

$$C = c_A A, \quad (3)$$

где A — её площадь, а c_A — теплоёмкость на единицу площади.

При регистрации переменного сигнала на частоте f выражение для ΔT можно записать в виде

$$\Delta T = \frac{\Delta P_f}{G \sqrt{1 + w^2 \tau_r^2}}, \quad (4)$$

где ΔP_f — соответствующая частотная составляющая мощности теплового излучения, поглощённая мембраной сенсора; $w = 2\pi f$. Это соотношение является общеприменимым для всех тепловых сенсоров, и, таким образом, первый этап преобразования теплового излучения, заключающийся в нагреве мембраны, идентичен для всех типов тепловых сенсоров. Различия между ними определяются физическими механизмами преобразования разности температур ΔT между подложкой и мембраной в электрический сигнал, что и составляет суть второго этапа преобразования ИК-излучения. Именно эти механизмы оказывают влияние на возможности достижения предельных характеристик тепловых сенсоров в части их чувствительности и быстродействия.

В болометрических сенсорах, использующих терморезистивный эффект, в результате которого происходит изменение электрического сопротивления термочувствительного слоя под действием теплового излучения, связь между изменением температуры ΔT и изменением сопротивления болометра ΔR_B определяется соотношением

$$\Delta R_B = \alpha R_B \Delta T, \quad (5)$$

где α — температурный коэффициент электрического сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления плёнок оксида ванадия обычно находится в диапазоне от $-0,02$ до $-0,03 \text{ K}^{-1}$.

Для формирования электрического сигнала ΔU болометра необходимо напряжение, смещающее его на величину U_B . С учётом этого связь между ΔU и ΔT определяется выражением

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T. \quad (6)$$

Важно отметить существенное обстоятельство, связанное с необходимостью электрического смещения болометрического сенсора, которое состоит в том, что протекание тока через сенсор вызывает его дополнительный разогрев. Выделяемое при разогреве джоулево тепло определяется выражением $P = U_B^2/R_B$, и соответственно индуцированный смещением дополнительный температурный разогрев равен

$$\Delta T = \frac{U_B^2}{R_B G} = \frac{U_B^2 \tau_r}{R_B C}. \quad (7)$$

Элемент площадью S болометрической матрицы схематично представлен на рис. 1. Мембрана с поглощающим ИК-излучение слоем площадью A подвешена на микроконсолях длиной L и шириной w_t , выполненных из теплоизолирующего материала. На поверхности мембраны сформирован терморезистор, токопроводящие шины которого проложены по консолям. Считывание изменений тока терморезистора при нагревании мембраны под действием ИК-излучения осуществляется КМОП ИС, расположенной в том же кристалле и соединённой с мембраной посредством столбчатых контактов. Несущий диэлектрический

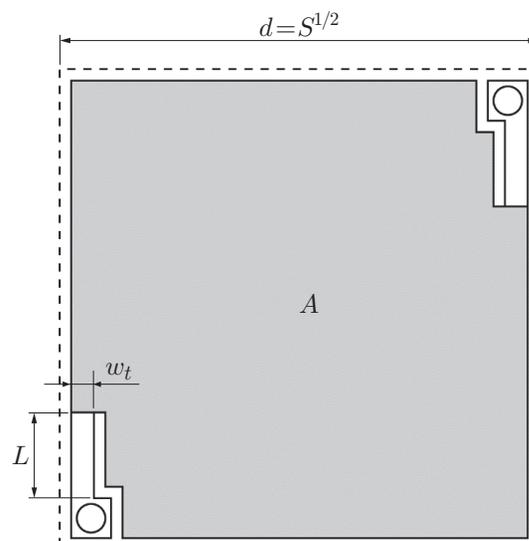


Рис. 1. Схематическое изображение активной части элемента болометрической матрицы

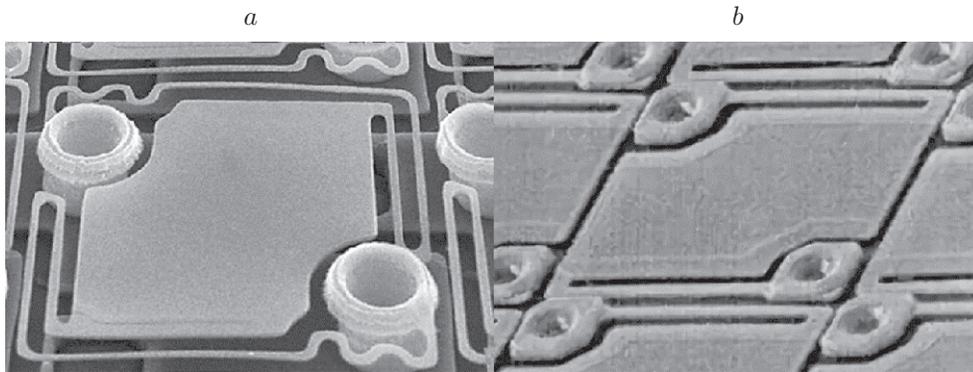


Рис. 2. Фотографии болометрических сенсоров: *a* — с длинными, *b* — с короткими консолями

слой мембраны и консоли выполнен, например, из нитрида кремния путём вытравливания жертвенного слоя из полиимида или из термического диоксида кремния локальным травлением кремниевой подложки под мембраной.

Здесь и в дальнейшем будем рассматривать элемент с двумя консолями шириной w_t , длина каждой из которых равна L . При этом будем считать, что электрическое сопротивление элемента определяется, главным образом, сопротивлением терморезистивного слоя, а сопротивлением токопроводящих шин можно пренебречь.

С учётом соотношения $\tau_r = C/G$ для увеличения быстродействия необходимо уменьшать теплоёмкость и увеличивать теплопроводность структуры. Теплоёмкость мембраны определяется её объёмом, а теплопроводность зависит от геометрии и материала консолей. Уменьшение теплоёмкости при заданной площади элемента возможно лишь за счёт использования более тонких слоёв, входящих в структуру мембраны, что лимитируется возможностями технологии и ограничениями в связи с необходимостью обеспечения достаточной прочности структуры, в то время как увеличение теплопроводности можно реализовать простыми конструктивными решениями (рис. 2). На этом пути, однако, надо исходить из того, что уменьшение чувствительности, неизбежно связанное с увеличением теплопроводности, не должно выходить за пределы, определяемые требованиями решаемой с помощью ФПУ задачи. Важно подчеркнуть также, что использование конструктивных возможностей для увеличения быстродействия имеет смысл наряду с поиском технологий и материалов, обеспечивающих максимальные значения ТКС, коэффициента поглощения ИК-излучения и оптимальной для решения конкретных задач спектральной чувствительности элемента.

На рис. 3 представлены графики релаксации теплового сенсора площадью $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ при воздействии на него тепловой мощности $\Delta P = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$ для различных значений теплопроводности консолей.

На графике видно, что имеется взаимно однозначное соответствие между достижимой чувствительностью сенсора и его быстродействием. Поэтому для каждого конкретного применения при конструировании сенсора выбирается оптимальное соотношение между его чувствительностью и быстродействием. В работах [4, 5] для заданных размеров пиксела матрицы и времени кадра выявлено оптимальное соотношение между площадью мембраны и площадью, занимаемой консолями, которое обеспечивает максимально возможную чувствительность.

Ориентируясь на современные технологические возможности для проведения оценок, были приняты следующие технологические параметры мембраны:

— несущий слой Si_3N_4 толщиной 150 нм,

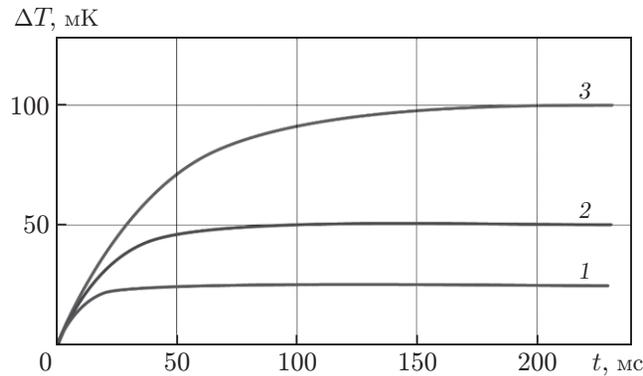


Рис. 3. Изменение времени релаксации теплового сенсора в зависимости от теплопроводности консолей: 1 — $G = 10^{-7}$ Вт/К, 2 — $G = 5 \cdot 10^{-8}$ Вт/К, 3 — $G = 2,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/К

- терморезистивный слой VO_x толщиной 50 нм,
- защитный слой SiO_2 толщиной 100 нм,
- слой поглощающего материала толщиной 10 нм.

С учётом значений объёмных теплоёмкостей материалов структуры: $c_V(Si_3N_4) \approx 1,8$, $c_V(SiO_2) \approx 1,9$, $c_V(VO_x) \approx 2,6$ [Дж · см³ · К⁻¹], — для теплоёмкости мембраны получим значение

$$C \approx 6 \cdot 10^{-5} \cdot A \text{ [Дж/К]}, \quad (8)$$

где A выражено в см².

Для уменьшения теплового сопротивления консолей токопроводящие участки консолей считаем выполненными из VO_x с удельной теплопроводностью $g_t = 0,05$ [Вт/см · К] [6], тогда для теплопроводности получим

$$G_t = \frac{2g_t w_t h_t}{L} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{w_t}{L} \text{ [Вт/К]}, \quad (9)$$

где h_t — толщина термочувствительного слоя, а для τ_r будем иметь

$$\tau_r = \frac{C}{G} = 1,2 \cdot 10^2 \cdot \frac{AL}{w_t} \approx 1,2 \cdot 10^2 \cdot d^2 \frac{L}{w_t}, \quad (10)$$

где d выражено в см.

Температурный коэффициент сопротивления и электрическое сопротивление терморезистивного материала. Электрическое сопротивление микроболометрического элемента выбирается из возможности достижения высоких значений ТКС в соответствии с зависимостью ТКС от удельного электрического сопротивления терморезистивного материала и минимизации мощности смещения и шума для достижения низких значений NETD. Взаимосвязь между ТКС и удельным сопротивлением для VO_x иллюстрируется графиком на рис. 4.

Сопротивление микроболометра с топологией термочувствительного элемента, близкой к квадрату, можно представить в виде

$$R_t = \rho_t / h_t, \quad (11)$$

где h_t — толщина материала терморезистора; ρ_t — его удельное электрическое сопротивление. Типичные значения для плёнок VO_x , используемых в современных болометрах, составляют $\rho_t = 1$ Ом · см, $h_t = 50$ нм, что даёт для R_t значение 200 кОм.

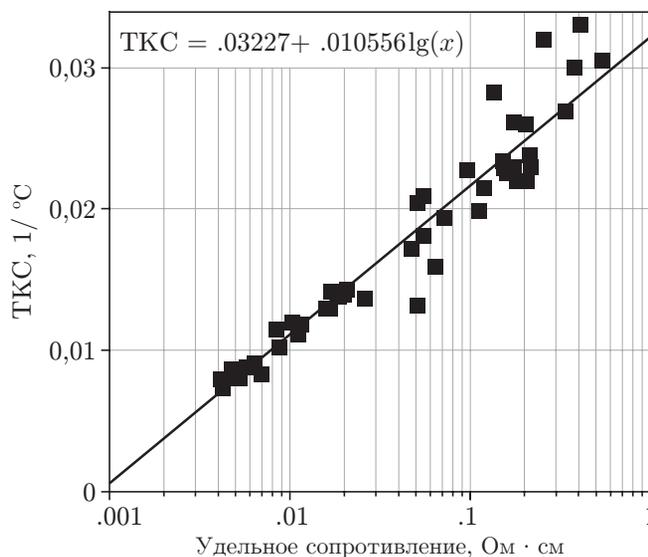


Рис. 4. Температурный коэффициент сопротивления как функция удельного сопротивления для VO_x -плёнок [7]

Чувствительность. Чувствительность микроболометров в составе ОЭС характеризуется эквивалентной шуму разностью температур, которая определяется на основе отношения сигнал/шум (SNR) для заданной падающей мощности. Более высокое значение SNR для конкретного прибора указывает на его лучшую чувствительность. Следовательно, для повышения чувствительности прибора необходимы высокие значения отклика (выходного сигнала) наряду со снижением уровня шума.

Выходной сигнал болометрического сенсора имеет вид

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T_B = \alpha U_B \frac{\eta \Delta P}{G} = \alpha U_B \eta \frac{\Delta E}{\Delta T} \frac{AL}{2g_t w_t h_t} \Delta T. \quad (12)$$

Тогда для NETD справедливо:

$$\text{NETD} = \frac{U_{\text{noise}}}{\alpha U_B \eta \Delta E / \Delta T} \frac{2g_t w_t h_t}{AL}, \quad (13)$$

где $\Delta E / \Delta T$ — изменение облучённости в фокальной плоскости матрицы при изменении температуры сены, которое зависит от параметров объектива и спектра ИК-излучения, U_{noise} — напряжение шума.

На рис. 5 представлены расчётные зависимости напряжения основных типов шумов в единичной полосе частот [8] для болометрического сенсора с типовыми значениями параметров: $T = 300$ К, ТКС $\alpha = -0,02$ K^{-1} , теплопроводность $G = 5,0 \cdot 10^{-7}$ Вт/К, время тепловой релаксации $\tau_r = 5$ мс, коэффициент поглощения $\eta = 0,9$, активная площадь сенсора $A = 35 \times 35$ $\mu\text{м}^2$ толщиной $h_t = 100$ нм. Приложенное напряжение смещения $V_B = 1$ В.

Видно, что шумовые характеристики болометра в основном определяются джонсоновским шумом. Известное аналитическое выражение для этого типа шума позволяет провести оценки NETD:

$$\text{NETD} = \frac{2\sqrt{kTR_B \Delta f}}{\alpha U_B \eta \Delta E / \Delta T} \frac{2g_t w_t h_t}{AL} = \frac{4g_t \sqrt{kTR_B \Delta f}}{\alpha U_B \eta \Delta E / \Delta T} \frac{w_t \sqrt{h_t}}{AL}. \quad (14)$$

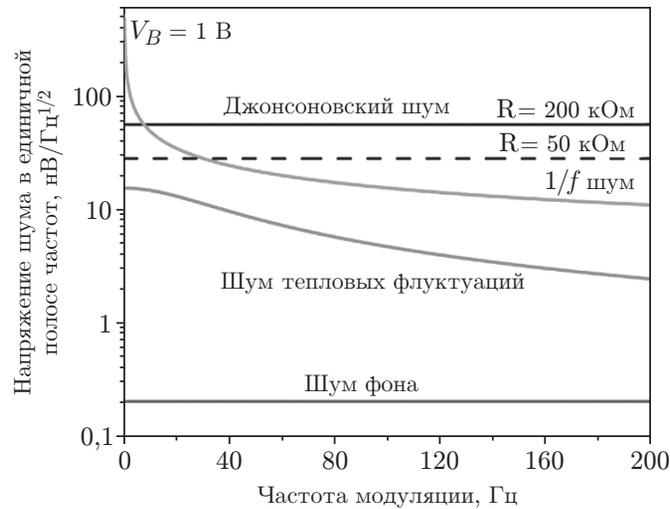


Рис. 5. Напряжение шума в единичной полосе частот для основных типов шумов болометрического сенсора в зависимости от частоты модуляции при смещении 1 В [8]

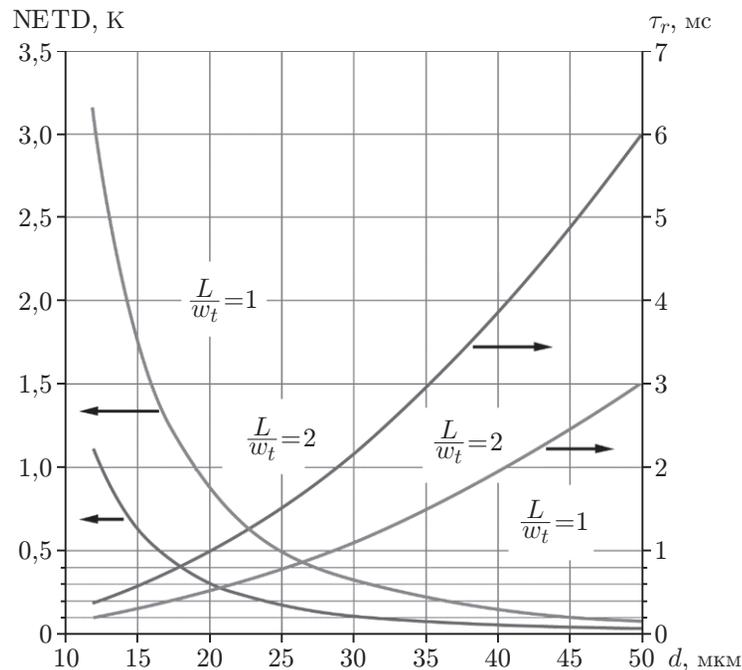


Рис. 6. Зависимость NETD и времени релаксации от шага элементов

Здесь k — константа Больцмана, Δf — полоса частот, зависящая от времени кадра и количества строк матрицы. Важно отметить также, что значение NETD определяется параметрами материалов, входящих в структуру мембраны, а именно α , g_t и ρ_B , топологическими размерами сенсора (A , L , w_t) и технологическими ограничениями, задающими значение толщины терморезистивного слоя h_t . В составе аппаратуры на значение NETD существенно влияют характеристики оптической системы и условия её функционирования (фоновая обстановка, тепловые характеристики объектов и др.).

На рис. 6 представлена расчётная зависимость NETD от шага элементов болометрической матрицы, площадь чувствительного массива которой для оценок принята

$S = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. График рассчитан с учётом зависимости полосы частот от времени интегрирования сигналов матрицы $\tau_i \approx \tau_f/\sqrt{N} = \pi\tau_r/\sqrt{N}$, где $N = \sqrt{S}/d$. Зависимости NETD от шага элементов изображены совместно с аналогичными зависимостями для времён релаксации, определяемых формулой (10).

На рисунке видно, что приемлемые значения NETD (100–150 мК) при достаточно низких значениях времени тепловой релаксации (2,0–2,5 мс) можно достичь для матриц с шагом элементов 40–45 мкм при $L/w_t = 1$ и таким образом увеличить кадровую частоту, по крайней мере, до 120–150 Гц. При этом не следует увеличивать число элементов матрицы, ограничившись массивом с числом пикселей не более 64×64 , либо, если критически важно увеличить формат матрицы, можно реализовать, например, формат 160×120 с разбиением на четыре сектора с индивидуальными выходами, не увеличивая полосу частот при считывании сигналов. Такие небольшие форматы матриц, однако, достаточны для ряда специальных применений, в частности при их использовании в тепlopеленгационных ОЭС, работающих с малыми полями зрения, где на первый план выступает необходимость фиксации объектов, перемещающихся в пространстве с высокими скоростями. Необходимо также отметить, что зависимости NETD, представленные на рис. 6, получены в предположении, что изменение поверхностной плотности потока излучения на приёмнике при изменении температуры объекта, определяемое в выражении (14) соотношением $\Delta E/\Delta T$, имеет вид

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = q \frac{dW_T}{dT}, \quad (15)$$

где q — оптический фактор, $q = Ht_0/4$, H — светосила, t_0 — пропускание объектива. При этом принималось, что $H = 1$ и $t_0 = 1$, для dW_T/dT взято значение $dW_T/dT \approx 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$ [9] для диапазона 8–14 мкм. При работе с объектами, нагретыми до 600 К, максимум ИК-излучения сдвигается в диапазон 3–5 мкм, для которого $dW_T/dT \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{К}$, что при расширении спектральной чувствительности матрицы в этот диапазон существенно (до 6,5 раз) улучшает возможности тепловой пеленгации таких объектов при высоких кадровых частотах (рис. 7). А при регистрации ИК-излучения в более широком спектральном диапазоне (2–16 мкм) можно достичь улучшения более чем на порядок. При этом, однако, необходимо оптимизировать спектральную чувствительность болометрического сенсора, применяя широкополосное поглощающее покрытие, например золотую чернь [10], которая обладает высоким поглощением в широком спектральном диапазоне (рис. 8) и характеризуется низкой теплоёмкостью, не влияя при этом на уровень шума и время тепловой релаксации. Как показывают результаты ряда исследований, перспективны также плёнки наноматериалов и, в частности, плёнки из углеродных нанотрубок [11], характеризующиеся большой интегральной площадью поверхности и высокой пористостью, обеспечивающей чрезвычайно низкую теплоёмкость. Необходимо также оптимизировать размер интерференционного вакуумного зазора между мембраной и отражающим ИК-излучение слоем на подложке.

Возможности использования обработки сигнала. Дополнительные улучшения тактико-технических характеристик ОЭС с болометрическими ФПУ, применяемых в тепlopеленгационной аппаратуре, можно реализовать за счёт адаптивной обработки сигналов, учитывающей текущее изменение условий регистрации тепловых объектов. Так, при значительных удалениях цели её тепловое точечное изображение в фокальной плоскости оптической системы смещается с незначительными скоростями, что даёт возможность работать с малыми кадровыми частотами. Болометрическую матрицу, оптимизированную для высоких кадровых частот, можно перевести в малокадровый режим путём суммирования сигналов во внешнем микропроцессоре, подним тем самым её чувствительность,

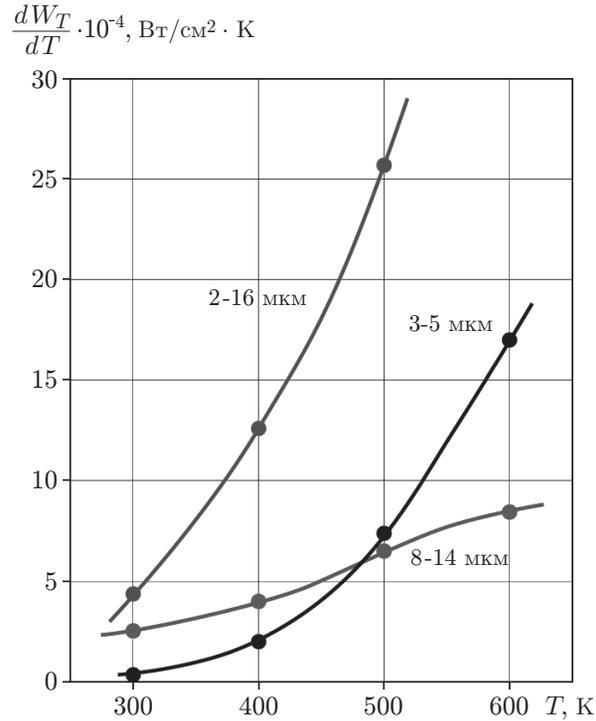


Рис. 7. Зависимость производной плотности потока ИК-излучения по температуре от температуры теплового объекта для различных спектральных диапазонов

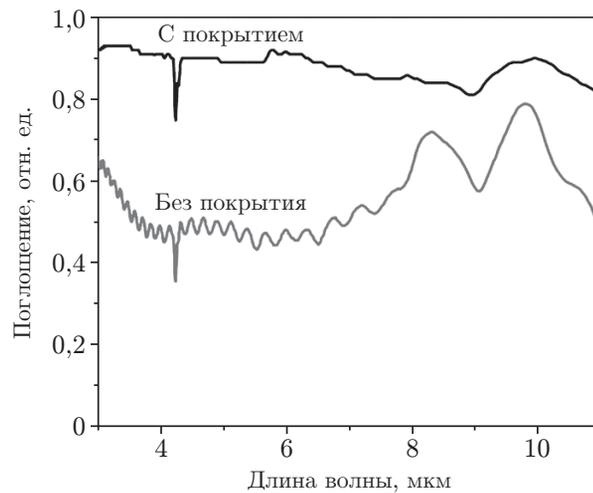


Рис. 8. Спектры поглощения болометрического сенсора с покрытием из золотой черни и без него. Пик поглощения на длине волны $\sim 4,2$ мкм обусловлен атмосферным CO_2 [10]

что важно, поскольку при больших удалениях цели тепловые сигналы, поступающие от неё на вход ОЭС, существенно ослаблены. При сближении ОЭС с целью её угловая скорость увеличивается и на первый план выступает быстроедействие матрицы, увеличение которого достигается за счёт некоторого снижения чувствительности. Сниженное значение чувствительности при этом не столь критично, поскольку сигнал от цели становится более высоким.

Заключение. В предлагаемой работе рассмотрены теоретические соотношения, оптимизирующие конструкцию микроболометрического элемента матричного детектора, обеспечивающие улучшение его характеристик быстрогодействия с учётом конкретных применений. Сформулированы требования к параметрам элементов и используемым для его изготовления материалам, которые предоставляют принципиальную возможность минимизации времени тепловой релаксации болометрического сенсора в целях увеличения кадровой частоты матриц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tinnes S., Boudou N., Durand A.** ULIS bolometer improvements for fast imaging applications. OECD Conference Center. Paris, France, 6 – 8 Febr., 2018.
2. **Пат. 2574524 С1 РФ.** Быстродействующий широкодиапазонный инфракрасный микроболометрический детектор /С. А. Демин, Б. В. Трошин, С. А. Жукова, В. Е. Турков. Заявл. 15.12.2014; Оpubл. 10.02.2016, Бюл. № 4.
3. **Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А., Трошин Б. В.** Микроболометрический детектор, чувствительный в двух спектральных диапазонах // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 67–72.
4. **Федирко В. А., Хафизов Р. З., Фетисов Е. А.** Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приёмника ИК изображения на основе термопары // Тр. VII Всеросс. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2016». Ч. IV. М.: ИППМ РАН, 2016. С. 59–63.
5. **Пат. № 2681224 РФ.** Оптимизированный термопарный сенсор /В. А. Федирко, Р. З. Хафизов. Приоритет 27.12.2017. Оpubл. 05.03.2019.
6. **Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems** /Eds. P. W. Kruse, D. D. Sktrud. Semiconductors and Semimetals. San Diego: Academic Press, 1997. Vol. 47. P. 99.
7. **Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems** /Eds. P. W. Kruse, D. D. Sktrud. Semiconductors and Semimetals. San Diego: Academic Press, 1997. Vol. 47. P. 55.
8. **Smith E. M.** Vanadium Oxide Microbolometers with Patterned Gold Black or Plasmonic Resonant Absorbers: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Orlando: University Central Florida, 2015. 151 p.
9. **Ллойд Дж.** Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 416 с.
10. **Smith E. M., Panjwani D., Ginn J. et al.** Enhanced performance of VO_x-based bolometer using patterned gold black absorber // Proc. SPIE. 2015. **9451**. 945111. DOI: 10.1117/12.2177401.
11. **Mizuno K., Ishii J., Kishida H. et al.** A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2009. **106**, N 15. P. 6044–6047. DOI: 10.1073/pnas.0900155106.

Поступила в редакцию 20.08.2021

После доработки 16.09.2021

Принята к публикации 20.09.2021