



# Быстродействующие болометрические матричные детекторы

Р. З. Хафизов, В. В. Старцев, В. Ю. Москвичев  
АО «ОКБ «Астрон», г. Лыткарино, Моск. обл., Россия

В статье представлены результаты исследования возможностей уменьшения времени отклика (постоянной времени тепловой релаксации) на тепловое воздействие болометрического сенсора. Анализ проведен в рамках общепринятой теории поглощения ИК-излучения и теплофизических процессов, протекающих в мембранных МЭМС-структурах. Представлены результаты аналитических оценок, оптимизирующие конструкцию микроболометрического элемента матричного детектора для улучшения его характеристик быстродействия с учетом требований конкретных применений. Выявленные закономерности будут применены в производстве микроболометров семейства «Астрон».

**Ключевые слова:** микроболометры, неохлаждаемые микроболометрические ФПУ, пеленгация быстро движущихся тепловых объектов, оксид ванадия

Статья получена: 21.06.2021

Статья принята: 05.08.2021

## 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 они 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

# Fast Bolometric Focal Plane Arrays

R. Z. Khafizov, V. V. Startsev, V. Yu. Moskvichev  
EDB "Astrohn" JSC, Lytkarino, Moscow region, Russia

The article presents the results of studying the possibilities of reducing the response time (time constant of thermal relaxation) to the thermal effect of a bolometric sensor. The analysis was carried out within the framework of the generally accepted theory of absorption of IR radiation and thermophysical processes occurring in membrane MEMS structures. The results of modeling the optimal design of high-performance microbolometric elements, taking into account the requirements of specific applications and its implementation using modern technological processes of formation, are presented. The discovered regularities will be applied in the production of microbolometers of the Astron family.

**Keywords:** microbolometers, uncooled microbolometric photodetector, direction finding of fast moving thermal objects, vanadium oxide

Received on: 21.06.2021

Accepted on: 05.08.2021

## INTRODUCTION

The degree of integration and sensitivity of modern bolometric detectors have reached values typical of similar photonic devices. Compared to photonic detectors, bolometers provide energy absorption in a wider spectral range, can operate without cooling, and are very attractive in terms of cost and power consumption. At the same time, they are significantly inferior to photon detectors in terms of speed. Today, leading technology companies are working on the development of uncooled bolometric array detectors for applications that require the capture of rapidly changing events [1-3], for example, for use in optoelectronic systems (OES) for the direction finding of fast moving thermal objects.

This article is devoted to the determination of the main characteristics of sensitive microbolometric structures, the development of which is being carried out at EDB "Astron" JSC. The possibilities of optimizing the parameters and characteristics of uncooled

требуется фиксация быстроизменяющихся событий [1–3], например для использования в оптико-электронных системах (ОЭС) для пеленгации быстро движущихся тепловых объектов.

Настоящая статья посвящена определению основных характеристик чувствительных микроболлометрических структур, разработка которых ведется в АО «ОКБ «Астрон». Рассмотрены возможности оптимизации параметров и характеристик матричных неохлаждаемых микроболлометрических фотоприемных устройств (ФПУ) (англ. – Uncooled Microbolometric Focal Plane Arrays), определены конструктивные и технологические решения по их разработке, направленные на реализацию требований по функционированию перспективных ОЭС.

## 1. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОВЫЕ И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА – ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Микроболлометр – 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 нанесен активный терморезистивный слой. В результате вытравливания жертвенного слоя, расположенного под мембраной, она вывешивается

microbolometric focal plane arrays are considered, constructive and technological solutions for their development are determined, aimed at meeting the requirements for the functioning of promising OES.

## 1. ELECTROPHYSICAL, THERMAL AND DESIGN-TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A MICROBOLOMETRIC SENSOR – PROBLEM STATEMENT

A microbolometer is a microelectromechanical sensor (MEMS) that is sensitive to thermal radiation and is manufactured using silicon micromachining techniques. A major advantage of MEMS fabrication processes is that they fit well with standard CMOS silicon technology. The main element of the sensor is a thin dielectric membrane on which an active thermoresistive layer is deposited. As a result of etching the sacrificial layer located under the membrane, it is hung over the surface of the substrate. It is connected to the substrate by narrow micro support consoles that detect and control the thermal conductivity of the sensor. Having a low thermal mass, the membrane is able to quickly heat up under the influence of infrared radiation. In order to increase the sensitivity of the structure, a coating is applied to the membrane that efficiently absorbs IR radiation. The use of sectoral (localized in certain sectors of the array) absorbing coatings suggests the possibility of manufacturing multispectral microbolometric sensors.

A number of factors determine the parameters of a microbolometric sensor as part of an IR image receiver, namely:

- temperature resistance coefficient (TRC)  $\alpha$  of the active layer;



**АСТРОН**  
Оптико-механическое конструкторское бюро

**ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ**  
140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д.1; тел: +7 (495) 215-13-82; info@astrohn.ru, www.astrohn.ru



над поверхностью подложки. С подложкой она соединяется узкими опорными микроконсолями, которые определяют и контролируют тепловую проводимость сенсора. Обладая малой тепловой массой, мембрана способна быстро нагреваться под действием ИК-излучения. С целью повышения чувствительности структуры на мембрану наносят покрытие, эффективно поглощающее ИК-излучение. Применение секторальных (локализованных в определенных секторах матрицы) поглощающих покрытий предполагает возможность изготовления мультиспектральных микроболومترических сенсоров.

Целый ряд факторов определяет параметры микроболومترического сенсора в составе приемника ИК-изображения, а именно:

- температурный коэффициент сопротивления (ТКС)  $\alpha$  активного слоя;
- коэффициент поглощения  $\eta$  ИК-излучения;
- площадь сенсора  $S$ , включающая в себя площадь чувствительной мембраны  $A$  и площадь  $S_c$ , занимаемую консолями,  $S=A+S_c$ ;
- теплоемкость мембраны  $C$  (включая поглощающее покрытие), равную  $C=cA$ , где  $c$  – теплоемкость мембраны на единицу площади;
- теплопроводность консолей  $G$ , определяемая прежде всего тепловой проводимостью консолей;
- электрическое сопротивление сенсора  $R$ ;
- время тепловой релаксации сенсора  $\tau_r$ ;
- время кадра  $\tau_f$  матричного детектора, определяемое через время тепловой релаксации сенсора  $\tau_r$  как  $\tau_f = \pi \tau_r$ .

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

При конструировании матричного болومترического приемника изображения в качестве основных задаются следующие характеристики: количество  $N$  и шаг  $d$  следования элементов матрицы, определяющие требуемое пространственное разрешение, время кадра  $\tau_f$ , задающее временное разрешение, и чувствительность в терминах эквивалентной шуму разности температур (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference) прибора. Количество элементов матрицы при определенном размере ее чувствительного массива ограничивает максимальную площадь ячейки и соответственно площадь  $A$  ее активной части. Требуемое для конкретных применений быстродействие детектора накладывает ограничение сверху на время тепловой релаксации детектора излучения  $\tau_r$ .

- absorption coefficient  $\eta$  of infrared radiation;
- sensor area  $S$ , including the area of the sensitive membrane  $A$  and the area  $S_c$  occupied by the consoles,  $S=A+S_c$ ;
- heat capacity  $C$  of the membrane (including the absorbing coating), equal to  $C=cA$ , where  $c$  is the heat capacity of the membrane per unit area;
- thermal conductivity of the consoles  $G$ , determined primarily by the thermal conductivity of the consoles;
- electrical resistance of the sensor  $R$ ;
- time constant of thermal relaxation of the sensor  $\tau_r$ ;
- frame time  $\tau_f$  of the array detector, determined through the time constant of thermal relaxation of the sensor  $\tau_r$  as  $\tau_f = \pi \tau_r$ .

The listed parameters are closely related to each other, influencing the sensitivity of the sensor.

When designing the microbolometric focal plane arrays receiver, the following characteristics are set as the main ones: the number  $N$  and the pitch  $d$  of the array elements, which determine the required spatial resolution, the frame time  $\tau_f$ , which gives the time resolution, and the sensitivity in terms of the noise equivalent temperature difference (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference) device. The number of array elements at a certain size of its sensitive array limits the maximum cell area and, accordingly, the area  $A$  of its active part. The detector response required for specific applications imposes an upper limit on the thermal relaxation time of the radiation detector  $\tau_r$ .

The amount by which the active part of the film structure changes its resistance when heated depends on the temperature coefficient of the material resistivity (TRC). Providing a high TRC value is necessary to achieve high sensor sensitivity. The active layer is also characterized by a specific electrical resistance  $\rho$ , which it is desirable to optimize to achieve, on the one hand, the maximum TRC, and on the other, not to greatly increase the noise minimization.

Vanadium oxide  $VO_x$  is one of the most widely used materials for the formation of active thermoresistive films in modern microbolometers. It has a fairly low electrical resistivity with a sufficiently high and stable TRC (films are not subject to hysteresis phenomena with temperature changes). At the same time, intensive research is currently underway to find new materials, since the implementation of thermoresistive films based on  $VO_x$  requires rather complex technological processes, the development of which causes significant difficulties.



Величина, на которую активная часть пленочной структуры изменяет свое сопротивление при нагреве, зависит от температурного коэффициента удельного сопротивления материала (ТКС). Обеспечение высокого значения ТКС необходимо для достижения высокой чувствительности сенсора. Активный слой также характеризуется удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ , 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 пленок в современных микроболометрах является оксид ванадия  $VO_x$ . Он обладает довольно низким удельным электрическим сопротивлением, при этом достаточно высоким и стабильным ТКС (пленки не подвержены гистерезисным явлениям при изменении температуры). Вместе с тем в настоящее время ведутся интенсивные исследования по поиску новых материалов, поскольку для реализации терморезистивных пленок на основе  $VO_x$  требуются достаточно сложные технологические процессы, освоение которых вызывает существенные трудности.

## 2. 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  $\Delta T$  между подложкой и мембраной конвертируется в сигнал, несущий информацию об интенсивности излучения. Разность температур  $\Delta T$ , возникающая в результате поглощения мембраной ИК-излучения, определяется тепловым балансом между поглощенной 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  $C$  - теплоемкость мембраны [Дж/К],  $\Delta P(t)$  - изменение мощности теплового излучения [Вт] в плоскости детектора,  $\eta$  - коэффициент поглощения ИК-излучения, а  $\Delta T$  - изменение температуры между детектором и теплоотводом (подложкой).  $G$  - теплопроводность консолей [Вт/К]. Реакцию температуры мембраны на резко возрастающее изменение мощности излучения можно определить интегрированием уравнения (1) с уче-

## 2. THERMOPHYSICAL ANALYSIS

The conversion of infrared radiation in thermal sensors, in contrast to quantum analogs, occurs in two stages. First, the membrane is heated, and then the resulting temperature difference  $\Delta T$  between the substrate and the membrane is converted into a signal carrying information about the radiation intensity. The temperature difference  $\Delta T$  resulting from the absorption of infrared radiation by the membrane is determined by the thermal balance between the absorbed thermal energy and the heat loss associated with the thermal conductivity of the consoles.

The heat balance equation is as follows:

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

where  $C$  is the membrane heat capacity [J/K],  $\Delta P(t)$  is the change in the thermal radiation power [W] in the detector plane,  $\eta$  is the IR absorption coefficient, and  $\Delta T$  is the temperature change between the detector and the heat sink (substrate),  $G$  is the thermal conductivity of the consoles [W/K]. The reaction of the membrane temperature to a sharply increasing change in the radiation power can be determined by integrating equation (1) taking into account the boundary condition  $t=0$ ,  $\Delta T=0$ . The result of this integration is the expression:

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{G} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right),$$

where  $\tau_r = \frac{C}{G}$  is a time constant of thermal relaxation characterizing the reaction time of the membrane to a change in the power of thermal radiation.

In a steady state, when  $t \gg \tau_r$ ,

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{G} = \frac{\Delta P \tau_r}{C}.$$

The heat capacity of a membrane is determined through the specific volumetric heat capacity  $c_v$ , which depends on the thermal properties of the materials from which it is made:

$$C = c_v = c_v A h_t = c_A A,$$

where  $A$  is its area,  $h_t$  is thickness, and  $c_A$  is specific heat per unit area.

When registering an alternating signal at a frequency  $f$ , the expression for  $\Delta T$  can be written in the form:

$$\Delta T = \frac{\Delta P_f}{G \sqrt{1 + \omega^2 \tau_r^2}},$$



том граничного условия  $t=0, \Delta T=0$ . Результатом этого интегрирования является выражение:

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{C} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right),$$

где  $\tau_r = \frac{C}{G}$  - постоянная времени, характеризующая время реакции мембраны на изменение мощности теплового излучения.

В стационарном состоянии, когда  $t \gg \tau_r$ ,

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{C} = \frac{\Delta P \tau_r}{C}.$$

Теплоемкость мембраны определяется через удельную объемную теплоемкость  $c_V$ , зависящую от тепловых свойств материалов, из которых она изготовлена:

$$C = c_V = c_V A t_h = c_A A,$$

где  $A$  - ее площадь,  $t_h$  - толщина, а  $c_A$  - удельная теплоемкость на единицу площади.

При регистрации переменного сигнала на частоте  $f$  выражение для  $\Delta T$  можно записать в виде:

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

где  $\Delta P_f$  - соответствующая частотная составляющая мощности теплового излучения, поглощенная 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  $\Delta T$  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 характеристики тепловых сенсоров в части их чувствительности и быстродействия.

В болометрических сенсорах, использующих терморезистивный эффект, определяют изменение электрического сопротивления термочувствительного слоя под действием теплового излучения. Связь между изменением температуры  $\Delta T$  и изменением сопротивления болометра  $\Delta R_B$  определяется соотношением:

$$\Delta R_B = \alpha \Delta R_B \Delta T,$$

where  $\Delta P_f$  is the corresponding frequency component of the thermal radiation power absorbed by the sensor membrane,  $w = 2\pi f$ .

This ratio is generally applicable for all thermal sensors, and thus the first stage of conversion of thermal radiation, which consists in heating the membrane, is identical for all types of thermal sensors. The differences between them are determined by the physical mechanisms of converting the temperature difference  $\Delta T$  between the substrate and the membrane into an electrical signal, which is the essence of the second stage of the conversion of infrared radiation. It is these mechanisms that influence the possibility of achieving the limiting characteristics of thermal sensors in terms of their sensitivity and speed.

In bolometric sensors using the thermoresistive effect, the change in the electrical resistance of the thermosensitive layer under the influence of thermal radiation is determined. The relationship between the change in temperature  $\Delta T$  and the change in the resistance  $\Delta R_B$  of the bolometer is determined by the ratio:

$$\Delta R_B = \alpha \Delta R_B \Delta T,$$

where  $\alpha$  is the temperature coefficient of electrical resistance (TRC).  $\alpha$  is defined as:

$$\alpha = \frac{1}{R_B} \frac{dR_B}{dT}.$$

The TRC value of vanadium oxide films is usually in the range from  $-0.02 \text{ K}^{-1}$  to  $-0.03 \text{ K}^{-1}$ .

For the formation of the electrical signal  $\Delta U$  of the bolometer, a voltage is required that displaces it by the value  $U_B$ . With this in mind, the relationship between  $\Delta U$  and  $\Delta T$  is determined by the expression:

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T.$$

It is important to remember an essential circumstance associated with the necessity of electrical displacement of the bolometric sensor. It consists in the fact that the flow of current through the sensor causes its additional heating. The Joule heat released during heating is determined by the expression  $P = U_B^2 / R_B$  and, accordingly, the additional temperature heating induced by the displacement is equal to:

$$\Delta T = \frac{U_B^2}{R_B G} = U_B^2 \tau_r / R_B C.$$

The element with area  $S$  of the bolometric array is schematically shown in Fig. 1. A membrane with an IR-absorbing layer of area  $A$  is suspended on micro

где  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления (ТКС).  $\alpha$  определяется как:

$$\alpha = \frac{1}{R_B} \frac{dR_B}{dT}.$$

Значение ТКС пленок оксида ванадия обычно находится в диапазоне от  $-0,02 \text{ K}^{-1}$  до  $-0,03 \text{ K}^{-1}$ .

Для формирования электрического сигнала  $\Delta U$  болометра необходимо напряжение, смещающее его на величину  $U_B$ . С учетом этого связь между  $\Delta U$  и  $\Delta T$  определяется выражением:

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T.$$

Важно помнить существенное обстоятельство, связанное с необходимостью электрического смещения болометрического сенсора. Оно 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:

$$\Delta T = \frac{U_B^2}{R_B C} = U_B^2 \tau_r / R_B C.$$

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  $w_t$ , выполнена 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. ИС расположена непосредственно на кристалле и соединена с мембраной с помощью индиевых столбчатых контактов. Несущий диэлектрический слой мембраны и консоли выполнены, например, из нитрида кремния путем вытравливания жертвенного слоя из полиимида или из термического диоксида кремния путем локального травления 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 учетом соотношения  $\tau_r = \frac{C}{G}$  для увеличения быстродействия необходимо уменьшать теплоем-

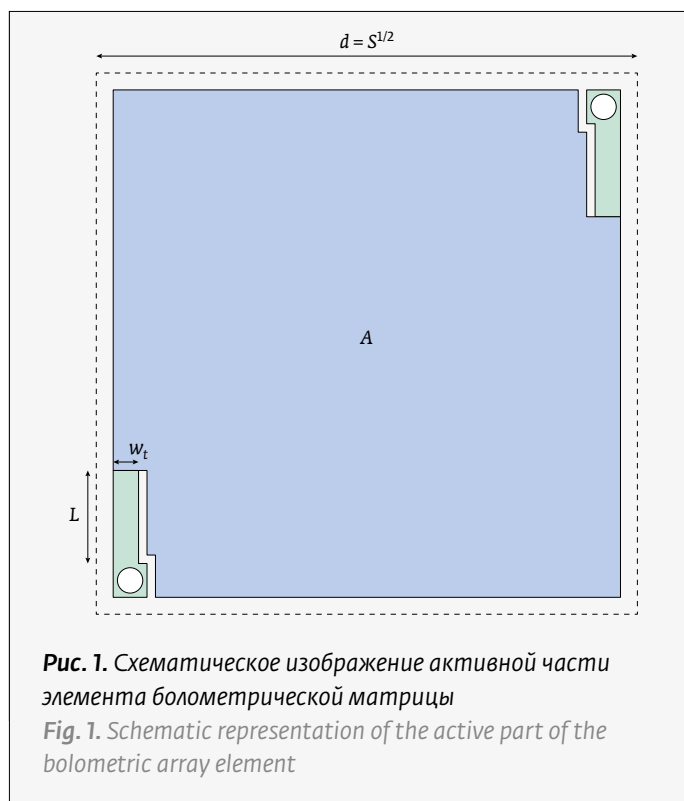


Рис. 1. Схематическое изображение активной части элемента болометрической матрицы

Fig. 1. Schematic representation of the active part of the bolometric array element

consoles of length  $L$  and width  $w_t$  made of heat-insulating material. A thermistor is formed on the surface of the membrane, the conductive buses of which are laid along the consoles. The readout of changes in the thermistor current when the membrane is heated under the influence of infrared radiation is carried out by the CMOS IS. The IS is located directly on the chip and is connected to the membrane using indium columnar contacts. The supporting dielectric layer of the membrane and the consoles are made, for example, of silicon nitride by etching a sacrificial layer of polyimide or of thermal silicon dioxide by local etching of a silicon substrate under the membrane.

Here and in what follows, we will consider an element with two consoles of width  $w_t$ , the length of each of which is  $L$ . In this case, we will assume that the electrical resistance of the element is determined mainly by the resistance of the thermoresistive layer, and the resistance of the busbars can be neglected.

Taking into account the ratio  $\tau_r = \frac{C}{G}$ , to increase the response speed, it is necessary to decrease the heat capacity and increase the thermal conductivity of the structure. The heat capacity of the membrane is determined by its volume, and the thermal conductivity depends on the geometry and material of the consoles. Reducing the heat capacity for a given element area is possible only through the use of thinner layers

кость и увеличивать теплопроводность структуры. Теплоемкость мембраны определяется ее объемом, а теплопроводность зависит от геометрии и материала консолей. Уменьшение теплоемкости при заданной площади элемента возможно лишь за счет использования более тонких слоев, входящих в структуру мембраны. Это лимитируется возможностями технологии и ограничениями, вызванными необходимостью обеспечить достаточную прочность структуры. В то же время увеличение теплопроводности можно реализовать достаточно простыми конструктивными решениями (см. 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.

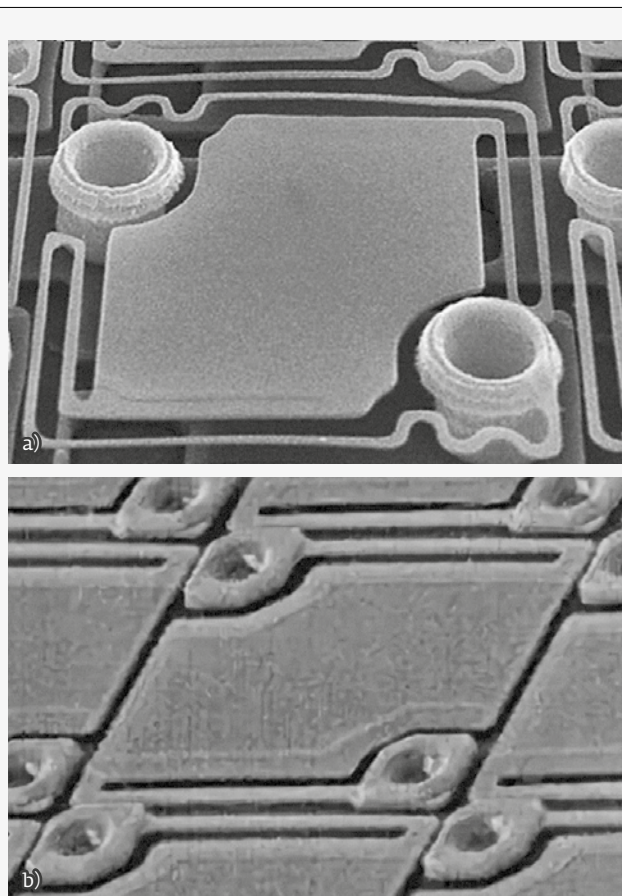
На рис. 3 представлены графики релаксации теплового сенсора площадью  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  при воздействии на него тепловой мощности  $\Delta P = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$  для различных значений теплопроводности консолей.

Из графика 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:

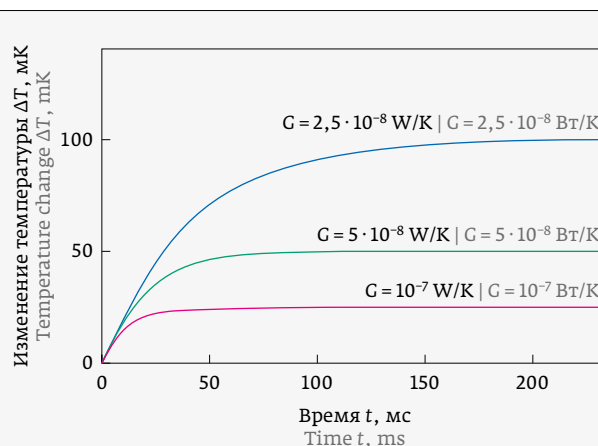
- несущий слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 150 нм,
- терморезистивный слой  $\text{VO}_x$  толщиной 50 нм,
- защитный слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм,
- слой поглощающего материала толщиной 10 нм.

С учетом теплофизических параметров материалов структуры для теплоемкости мембраны полу-



**Рис. 2.** Болومترические сенсоры: а) – с длинными консолями; б) – с короткими консолями

**Fig. 2.** Bolometric sensors: a) – with long consoles; b) – with short consoles



**Рис. 3.** Изменение времени релаксации теплового сенсора от величины теплопроводности  $G$  консолей

**Fig. 3.** Change in the relaxation time of the thermal sensor from the value of the thermal conductivity  $G$  of the consoles

чим значение:  $C=6 \cdot 10^{-5} \cdot A$  [Дж/К], где  $A$  выражено в  $\text{см}^2$ .

Для уменьшения теплового сопротивления консолей токопроводящие участки консолей считаем выполненными из  $\text{VO}_x$  с удельной теплопроводностью  $g_t=0,05$  Вт/см·К, тогда для теплопроводности получим:

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

и соответственно для  $\tau$ , получим:

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

где  $d$  выражено в см.

На рис. 4 представлена зависимость времени релаксации от шага элементов, определяемая формулой (2).

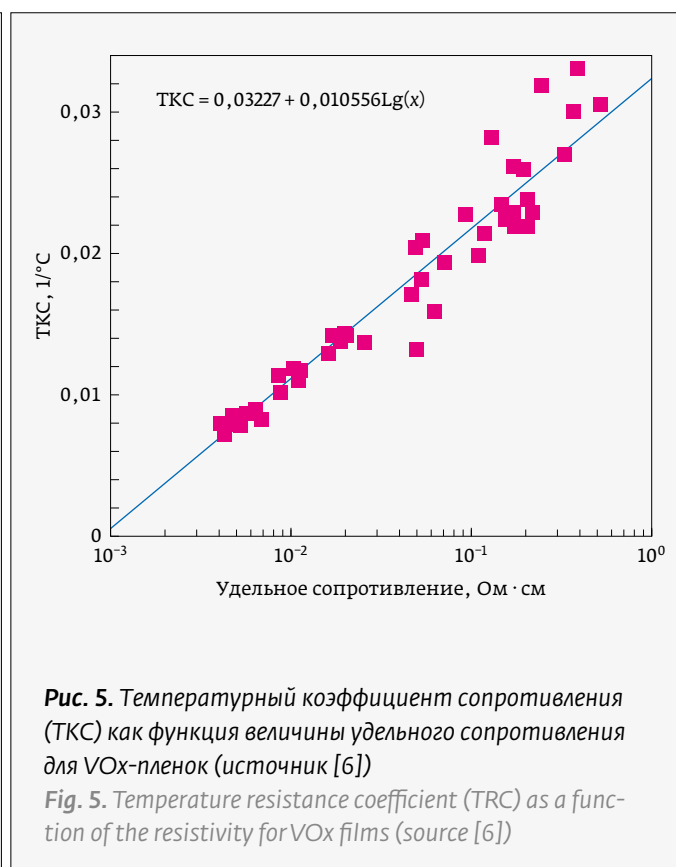
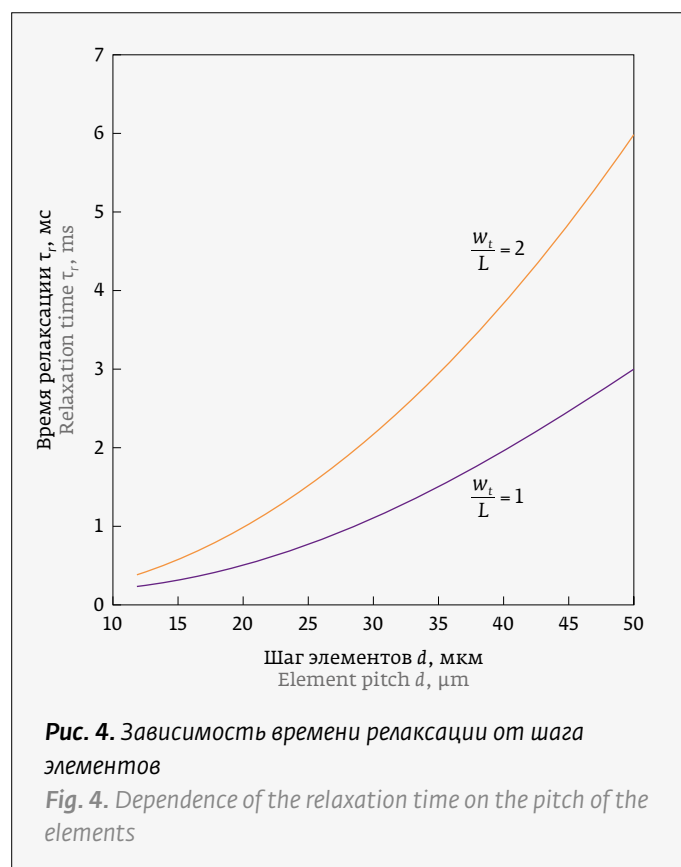
### 3. ТКС И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Электрическое сопротивление микроболометрического элемента выбирается, исходя из возможности достижения высоких значений ТКС

included in the membrane structure. This is limited by the capabilities of the technology and limitations imposed by the need to provide sufficient structural strength. At the same time, an increase in thermal conductivity can be realized by fairly simple design solutions (see Fig. 2). On this path, however, one must proceed from the fact that the decrease in sensitivity, which is inevitably associated with an increase in thermal conductivity, should not go beyond the limits determined by the requirements of the problem solved with the help of the photodetector. It is also important to emphasize that the use of design possibilities to increase the speed of response makes sense, along with the search for technologies and materials that provide the maximum values of the TRC, the absorption coefficient of infrared radiation and the spectral sensitivity of the element that is optimal for solving specific problems.

Fig. 3 shows the plots of relaxation of a thermal sensor with an area of  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  when exposed to thermal power  $\Delta P=2,5 \cdot 10^{-9}$  W for different values of the thermal conductivity of the consoles.

The plot shows that there is a one-to-one correspondence between the achievable sensor sensitivity and its speed. Therefore, for each specific application,





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  $VO_x$  иллюстрирует рис. 5.

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

$$R_t = \frac{\rho_t}{h_t},$$

где  $h_t$  - толщина материала терморезистора,  $\rho_t$  - его удельное электрическое сопротивление. Типичные значения для пленок  $VO_x$ , используемых в современных болометрах, составляют  $\rho_t \approx 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $h_t \approx 50 \text{ нм}$ , что дает для  $R_t$  значение  $\approx 200 \text{ кОм}$ .

#### 4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Чувствительность микроболометров в составе ОЭС характеризуется эквивалентной шуму разностью температур (NETD - Noise Equivalent Temperature Difference), 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 равен:

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T_B = \alpha U_B \frac{\Delta P}{G} = \alpha U_B \frac{\Delta p}{\Delta T} \frac{AL}{2g_t w_t h_t} \Delta T.$$

Тогда для NETD справедливо:

$$NETD = \frac{U_{noise}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T} \frac{2g_t w_t h_t}{AL},$$

где  $\Delta p / \Delta T$  - изменение облученности в фокальной плоскости матрицы при изменении температуры сцены, которое зависит от параметров объекта и спектра ИК-излучения,  $U_{noise}$  - напряжение шума.

На рис. 6 представлены расчетные зависимости напряжения основных типов шумов в единичной полосе частот [7] для болометрического сенсора с типовыми значениями параметров:  $T=300 \text{ К}$ ,  $\Delta f=30 \text{ Гц}$ , ТКС  $\alpha=-2,0\%$ , теплопроводность  $G=5,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/К}$ , время тепловой релаксации  $\tau_t=5 \text{ мс}$ , коэффициент поглощения  $\eta=0,9$ , активная площадь сенсора  $A=35 \times 35 \text{ мкм}^2$  толщиной  $h_t=100 \text{ нм}$ . Приложенное напряжение смещения  $V_B=1 \text{ В}$ .

when designing a sensor, the optimal ratio between its sensitivity and speed is chosen. In [4, 5], for a given array pixel size and frame time, the optimal ratio between the membrane area and the area occupied by the consoles was revealed, which provides the highest possible sensitivity.

Focusing on modern technological capabilities for conducting assessments, the following technological parameters of the membrane were adopted:

- bearing layer  $Si_3N_4$  150 nm thick,
- thermoresistive layer  $VO_x$  50 nm thick,
- protective layer  $SiO_2$  100 nm thick,
- a layer of absorbing material with a thickness of 10 nm.

Taking into account the thermophysical parameters of the materials of the structure for the heat capacity of the membrane, we obtain the value:  $C=6 \cdot 10^{-5} \cdot A \text{ [J/K]}$ , where  $A$  is expressed in  $cm^2$  (9).

To reduce the thermal resistance of the consoles, the conductive sections of the consoles are considered to be made of  $VO_x$  with a specific thermal conductivity  $g_t=0,05 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ , then for the thermal conductivity we get:

$$G_t = \frac{2g_t w_t \cdot h_t}{L} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{w_t}{L} \text{ [W/K]},$$

and, accordingly, for  $\tau_t$  we get:

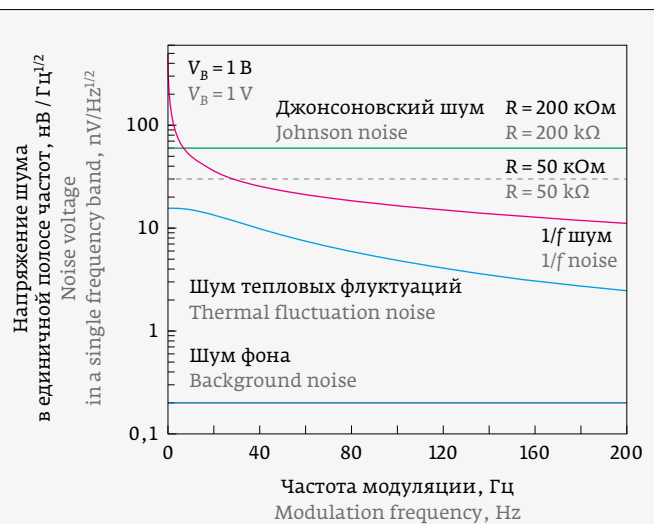


Рис. 6. Напряжение шума в единичной полосе частот для основных типов шумов болометрического сенсора в зависимости от частоты модуляции при смещении 1 В (источник [7])

Fig. 6. Noise voltage in a single frequency band for the main types of noise of a bolometric sensor depending on the modulation frequency at an offset of 1V (source [7])

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

В этом приближении для NETD получим:

$$NETD = \frac{2\sqrt{kTR_B\Delta f}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T_{obj}} \frac{2g_t w_t h_t}{AL} = \frac{4g_t \sqrt{kTR_B\Delta f}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T_{obj}} \frac{w_t \sqrt{h_t}}{AL}. \quad (3)$$

Здесь  $k$  – константа Больцмана,  $\Delta f$  – полоса частот, зависящая от времени кадра и количества элементов матрицы. Важно отметить также, что значение NETD определяется параметрами материалов, входящими в структуру мембраны, а именно:  $\alpha$ ,  $g_t$  и  $\rho_B$ , топологическими размерами сенсора ( $A$ ,  $L$ ,  $w_t$ ) и технологическими ограничениями, задающими значение толщины мембранной структуры  $h_t$ . В составе аппаратуры на значение NETD существенно влияют характеристики оптической системы и условия ее функционирования (фоновая обстановка, тепловые характеристики объектов и др.)

На рис. 7 представлена расчетная зависимость NETD от шага элементов болометрической матрицы, полученная с учетом зависимости полосы частот от времени интегрирования сигналов матрицы  $\tau_i \approx \frac{\tau_f}{\sqrt{N}} = \frac{\pi\tau_r}{\sqrt{N}}$ . Графики зависимости от шага элементов изображены совместно с анало-

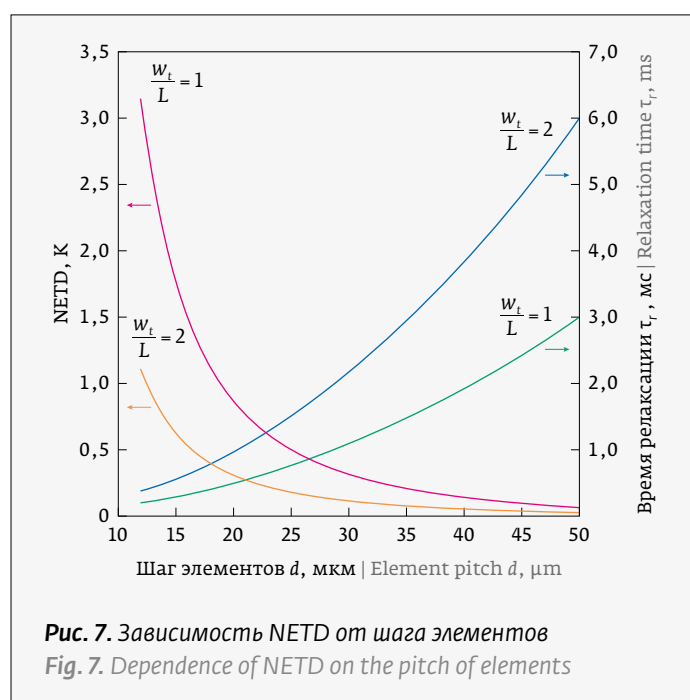


Рис. 7. Зависимость NETD от шага элементов  
Fig. 7. Dependence of NETD on the pitch of elements

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

where  $d$  is expressed in cm (11)

Fig. 4 shows the dependence of the relaxation time on the pitch of the elements, determined by formula (2).

### 3. TRC AND ELECTRICAL RESISTANCE OF THERMORESISTIVE MATERIAL

The electrical resistance of the microbolometric element is selected based on the possibility of achieving high TRC values in accordance with the dependence of TRC on the resistivity of the thermoresistive material, and minimizing the bias power and noise to achieve low NETD values. The relationship between TCS and resistivity for  $VO_x$  is illustrated in Fig. 5.

The resistance of a microbolometer with a near-square topology of a thermosensitive element can be represented as:

$$R_t = \frac{\rho_t}{h_t},$$

where  $h_t$  is the thickness of the thermistor material,  $\rho_t$  is its electrical resistivity. Typical values for  $VO_x$  films used in modern bolometers are  $\rho_t \approx 1 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h_t \approx 50 \text{ nm}$ , which gives for a  $R_t$  value of  $\sim 200 \text{ k}\Omega$ .

### 4. SENSITIVITY

The sensitivity of microbolometers in an OES is characterized by a noise equivalent temperature difference (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference), which is determined based on the signal-to-noise ratio (SNR) for a given incident power. A higher SNR for a particular instrument indicates better sensitivity. Therefore, to increase the sensitivity of the instrument, high response (output) values are needed along with a reduction in noise.

The output signal of the bolometric sensor is:

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T_B = \alpha U_B \frac{\Delta P}{G} = \alpha U_B \frac{\Delta p}{\Delta T} \frac{AL}{2g_t w_t h_t} \Delta T.$$

Then for NETD it is true:

$$NETD = \frac{U_{noise}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T} \frac{2g_t w_t h_t}{AL},$$

where  $\Delta p / \Delta T$  is the change in irradiance in focal plane of the array when the scene temperature changes, which depends on the parameters of the lens and the IR spectrum,  $U_{noise}$  is the noise voltage.

Fig. 6 shows the calculated voltage dependences of the main types of noise in a single frequency band [7]

гичными зависимостями для времен времени релаксации, представленными на рис. 4.

Из рисунка видно, что приемлемые значения NETD (менее 100 мК) при достаточно низких значениях времени тепловой релаксации (менее 2 мс) можно достичь для матриц с шагом элементов 35–40 мкм и таким образом увеличить кадровую частоту по крайней мере до ~200 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, то 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 тепловизионных 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. 5, получены в предположении, что изменение поверхностной плотности потока излучения на приемнике при изменении температуры объекта, определяемое в выражении (3) соотношением  $\Delta p/\Delta t$ , равно:

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \eta q \frac{dW_T}{dT},$$

где  $\eta$  – доля поглощаемого мембраной падающего излучения,  $q$  – оптический фактор  $q = Ht_0/4$ ,  $H$  – светосила, а  $t_0$  – пропускание объектива. При этом принималось, что  $H=1$  и  $t_0=1$ , а для  $\frac{dW_T}{dT}$  взято значение  $\frac{dW_T}{dT} \approx 2,62 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>·К [8] для диапазона 8–14 мкм. При работе в этом диапазоне с объектами, нагретыми до 600 К, оценка дает значение  $\frac{dW_T}{dT} \approx 1,7 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>·К, что существенно (до 6,5 раз) улучшает возможности тепловой пеленгации таких объектов при высоких кадровых частотах (см. рис. 8). А при регистрации ИК-излучения в более широком спектральном диапазоне можно достичь улучшения более чем на порядок. При этом, однако, необходимо оптимизировать спектральную чувствительность болометрического сенсора, применяя широкополосное поглощающее покрытие, например золотую чернь [9]. Золотая чернь обладает высоким поглощением в широком

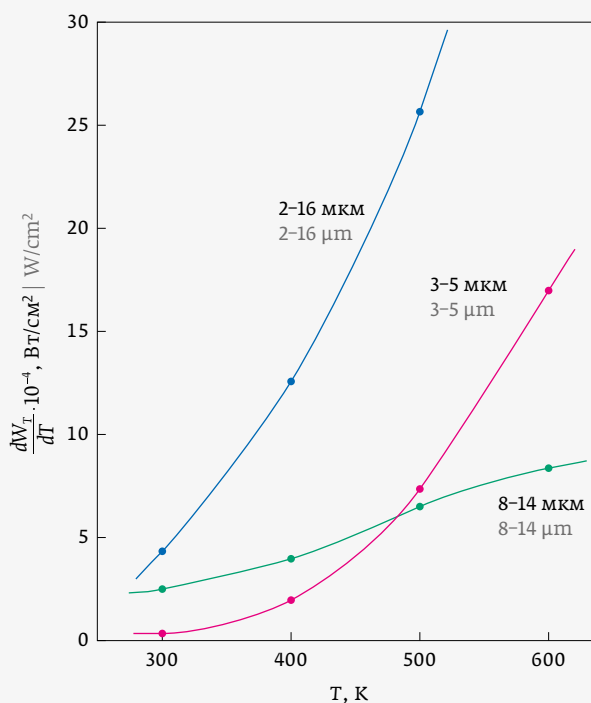
for a bolometric sensor with typical parameter values:  $T=300$  К,  $\Delta f=30$  30 Hz, TRC  $\alpha=-2.0\%$ , thermal conductivity  $G=5.0 \cdot 10^{-7}$  W/K, thermal relaxation time  $\tau_r=5$  ms, absorption coefficient  $\eta=0.9$ , active area of the sensor  $A=35 \times 35$   $\mu\text{m}^2$  with thickness  $h_t=100$  nm. The applied bias voltage is  $V_B=1$  В.

It can be seen that the noise characteristics of the bolometer are mainly determined by the Johnson noise. The well-known analytical expression for this type of noise allows one to estimate NETD, considering its contribution to be decisive.

In this approximation for NETD we get:

$$\text{NETD} = \frac{2\sqrt{kTR_B\Delta f}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T_{obj}} \frac{2g_t w_t h_t}{AL} = \frac{4g_t \sqrt{kTR_B\Delta f}}{\alpha U_B \Delta p / \Delta T_{obj}} \frac{w_t \sqrt{h_t}}{AL}. \quad (3)$$

Here  $k$  is the Boltzmann constant,  $\Delta f$  is the frequency band depending on the frame time and the number of array elements. It is also important to note that the NETD value is determined by the parameters of the materials included in the membrane structure,



**Рис. 8.** Зависимость производной плотности потока ИК-излучения по температуре от температуры теплового объекта для различных спектральных диапазонов  
**Fig. 8.** Dependence of the derivative of the infrared radiation flux density with respect to temperature on the temperature of the thermal object for different spectral ranges

спектральном диапазоне (см. рис. 9) и характеризуется низкой теплоемкостью, не влияя при этом на уровень шума и время тепловой релаксации. Как показывают результаты ряда исследований, перспективны также пленки наноматериалов и, в частности, пленки из углеродных нанотрубок [10]. Они характеризуются большой интегральной площадью поверхности и высокой пористостью, обеспечивающей чрезвычайно низкую теплоемкость. Необходимо также оптимизировать размер интерференционного вакуумного зазора между мембраной и отражающим ИК-излучение слоем на подложке.

## 5. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Дополнительные улучшения тактико-технических характеристик ОЭС с болометрическими ФПУ, применяемых в тепловизионной аппаратуре, можно реализовать за счет адаптивной обработки сигналов, учитывающей текущее изменение условий регистрации тепловых объектов. Так, при значительных удалениях цели ее тепловое точечное изображение в фокальной плоскости оптической системы смещается с незначительными скоростями, что дает возможность работать с малыми кадровыми частотами. Болометрическую матрицу, оптимизированную для высоких кадровых частот, можно перевести в малокадровый режим путем суммирования сигналов во внешнем микропроцессоре, подтянув тем самым ее чувствительность. Это важно, поскольку при больших удалениях цели тепловые сигналы, поступающие от нее на вход ОЭС, суще-

namely,  $\alpha$ ,  $g_t$  and  $\rho_B$ , the topological dimensions of the sensor ( $A$ ,  $L$ ,  $w_t$ ) and technological constraints that specify the value of the membrane structure thickness  $h_t$ . As part of the equipment, the NETD value is significantly influenced by the characteristics of the optical system and the conditions of its operation (background environment, thermal characteristics of objects, etc.)

Fig. 7 shows the calculated dependence of NETD on the pitch of the bolometric array elements, obtained taking into account the dependence of the frequency band on the integration time of the array signals  $\tau_i \approx \frac{\tau_f}{\sqrt{N}} = \frac{\pi\tau_r}{\sqrt{N}}$ . Plots of NETD versus element spacing are shown together with similar dependencies for relaxation times shown in Fig. 4.

It can be seen from the figure that acceptable NETD values (less than 100 mK) at sufficiently low values of thermal relaxation time (less than 2 ms) can be achieved for matrices with an element pitch of 35–40  $\mu\text{m}$  and, thus, the frame rate can be increased to at least ~ 200 Hz. In this case, you should not increase the number of array elements, limiting yourself to an array with the number of pixels no more than 64×64, or, if it is critically important to increase the array format, then you can implement, for example, a 160×120 format with division into four sectors with individual outputs, without increasing the bandwidth frequencies when reading signals. Such small array formats, however, are sufficient for a number of special applications, in particular, when they are used in thermal direction-finding OES operating with small fields of view, where the need to fix objects moving in space at high speeds comes to the fore. It should also be noted

	Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники		Разработка и изготовление тонкопленочных изделий	
	Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»		Разработка технологий формирования тонких пленок	
	Программное обеспечение и автоматизация		Оптические элементы	
	Изготовление технологических устройств		Напылительный сервис	
	Сложные и уникальные покрытия			
ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845			<a href="http://www.izovac.com">www.izovac.com</a> <a href="http://www.izovac-coatings.com">www.izovac-coatings.com</a>	

ственно ослаблены. При сближении ОЭС с целью ее угловая скорость увеличивается, и на первый план выступает быстродействие матрицы, рост которой, как видно из предыдущего рассмотрения, достигается за счет некоторого снижения чувствительности. Сниженное значение чувствительности при этом не столь критично, поскольку сигнал от цели становится существенно более высоким.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены теоретические соотношения, оптимизирующие конструкцию микроболометрического элемента матричного детектора, обеспечивающие улучшение его характеристик быстродействия с учетом конкретных применений. Сформулированы требования к параметрам элементов и используемых для его изготовления материалов, которые предоставляют принципиальную возможность минимизации времени тепловой релаксации болометрического сенсора с целью увеличения кадровой частоты матриц. Найденные закономерности будут применены в производстве микроболометров семейства «Астрон».

that the NETD dependencies shown in Fig. 5, were obtained under the assumption that the change in the surface radiation flux density at the receiver with a change in the object temperature, determined in expression (3) by the ratio  $\Delta p/\Delta t$  is equal to:

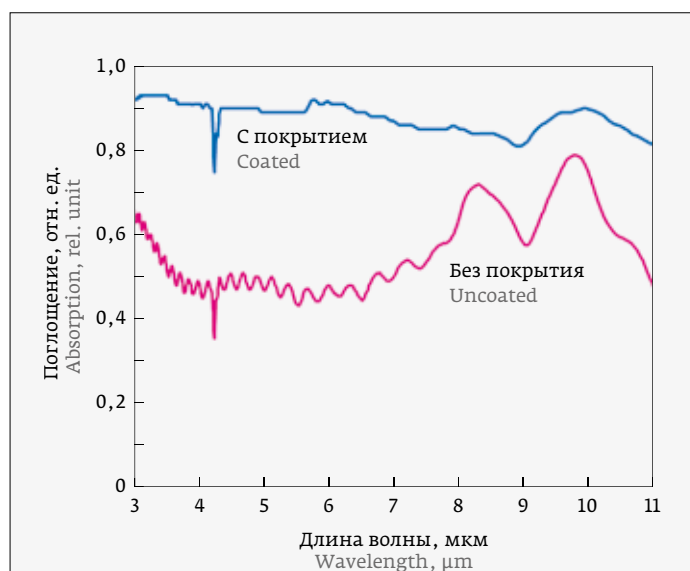
$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \eta q \frac{dW_T}{dT},$$

where  $\eta$  is the fraction of incident radiation absorbed by the membrane,  $q$  is the optical factor  $q = Ht_0/4$ ,  $H$  is the aperture ratio, and  $t_0$  is the transmission of the objective. It was assumed that  $H=1$  and  $t_0=1$ , and for the value  $\frac{dW_T}{dT}$  of  $\frac{dW_T}{dT} \approx 2.62 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  [8] was taken for the range 8–14  $\mu\text{m}$ . When working in this range with objects heated to 600 K, the estimate gives the value  $\frac{dW_T}{dT} \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$ , which significantly

(up to 6.5 times) improves the capabilities thermal direction finding of such objects at high frame rates (see Fig. 8). And when recording infrared radiation in a wider spectral range, an improvement of more than an order of magnitude can be achieved. In this case, however, it is necessary to optimize the spectral sensitivity of the bolometric sensor by using a broadband absorbing coating, for example, gold black [9]. Gold black has high absorption in a wide spectral range (see Fig. 9) and is characterized by low heat capacity, without affecting the noise level and thermal relaxation time. As the results of a number of studies show, films of nanomaterials are also promising and, in particular, films of carbon nanotubes [10]. They are characterized by a large integral surface area and high porosity for extremely low heat capacity. It is also necessary to optimize the size of the interference vacuum gap between the membrane and the IR-reflecting layer on the substrate.

## 5. POSSIBILITIES OF USING SIGNAL PROCESSING

Additional improvements in the tactical and technical characteristics of OES with bolometric photodetectors used in heat direction finding equipment can be implemented through adaptive signal processing, taking into account the current change in the conditions for registering thermal objects. So at significant distances from the target, its thermal point image in the focal plane of the optical system shifts at low speeds, which makes it possible to work with low frame rates. A bolometric array optimized for high frame rates can be converted to low-frame mode by summing signals in an external microprocessor,



**Рис. 9.** Спектры поглощения болометрического сенсора с покрытием из золотой черни и без него: пик поглощения на длине волны  $\sim 4,2$  мкм обусловлен атмосферным  $\text{CO}_2$  (источник [9])

**Fig. 9.** Absorption spectra of bolometric sensor with and without gold black coating: the absorption peak at a wavelength of  $\sim 4.2 \mu\text{m}$  is due to atmospheric  $\text{CO}_2$  (source [9])

## АВТОРЫ

Ренат Закирович Хафизов, к.ф.-м.н., начальник исследовательского центра «Болометрические детекторы» АО «ОКБ «Астрон», www.astrohn.com, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.  
ORCID: 0000-0002-8319-5901

Вадим Валерьевич Старцев, к.т.н, главный конструктор АО «ОКБ «Астрон», www.astrohn.com, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.  
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Вадим Юрьевич Москвичев, заместитель главного конструктора АО «ОКБ «Астрон», www.astrohn.com, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.

## REFERENCES

1. **Tinnes S., Boudou N., Durand A.** *Ulis Bolometer Improvements for Fast Imaging Applications*. OECD Conference Center. Paris. France / 6–8 February, 2018.
2. RU Patent 2574524C1. *High-speed broadband infrared microbolometric detector*. 15.12.2014 / Demin S. A., Troshin B. V., Zhukova S. A., Turkov V. E.
3. **Zhukova S. A., Turkov V. E., Demin S. A., Troshin B. V.** *Mikrobolometricheskij detektor, chuvstvitel'nyj v dvuh spektral'nyh diapazonah. Prikladnaya fizika*. 2016; 4: 67–72.  
*Жукова С. А., Турков В. Е., Демин С. А., Трошин Б. В.* *Микроболометрический детектор, чувствительный в двух спектральных диапазонах. Прикладная физика*. 2016; 4: 67–72.
4. **Fedirko V. A., Hafizov R. Z., Fetisov E. A.** *Optimal'noe proektirovanie MEMS-elementa priemnika IK izobrazheniya na osnove termopary. Trudy VII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2016»*. – М.: ИППМ РАН. 2016; IV: 59–63.  
*Федирко В. А., Хафизов Р. З., Фетисов Е. А.* *Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приемника ИК изображения на основе термопары. Труды VII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoelektronnykh sistem – 2016»*. – М.: ИППМ РАН. 2016; IV: 59–63.
5. RU Patent 2681224. *Optimized Thermocouple Sensor*. 27.12.2017 / Fedirko V. F., Khafizov R. Z.
6. **Kruse P. W., Sktrud D. D.** *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*. 1997. Ser. Semiconductors and Semimetals. Vol. 47. ISBN: 9780080864440.
7. **Smith E. M.** *Vanadium Oxide Microbolometers with Patterned Gold Black or Plasmonic Resonant*. Electronic Theses and Dissertations. 2004–2019. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/1404>.
8. **Lloyd J. M.** *Thermal imaging system*. – М.: Mir. 1978. (In Russ.)
9. **Smith E. M. et al.** *Enhanced performance of VOx-based bolometer using patterned gold black absorber. Proceedings of SPIE*. 2015; 9451: 945111-1-945111-7. doi: 10.1117/12.2177401.
10. **Mizuno K., Ishii J., Kishida H., Hayamizu Y., Yasuda S., Futaba D. N., Yumura M., Hata K.** *A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes. Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2009;106:6044–6047. doi.org/10.1073/pnas.0900155106.

thereby raising its sensitivity. This is important, since at large distances from the target, the thermal signals coming from it to the input of the OES are significantly weakened. When the OES approaches the target, its angular velocity increases, and the speed of the array comes to the fore, the growth of which, as can be seen from the previous consideration, is achieved due to a certain decrease in sensitivity. The reduced sensitivity value is not so critical in this case, since the signal from the target becomes significantly higher.

## 6. CONCLUSION

The paper considers the theoretical relations that optimize the design of the microbolometric element of the array detector, providing an improvement in its performance characteristics, taking into account specific applications. Requirements for the parameters of elements and materials used for its manufacture are formulated, which provide a fundamental possibility of minimizing the thermal relaxation time of the bolometric sensor in order to increase the frame rate of the matrices. The found patterns will be applied in the production of microbolometers of the Astron family.

## AUTHORS

Renat Zakirovich KHAFIZOV, Candidate of Science (Phys.&Math), Head of the Research Center «Bolometric detectors», EDB «Astron» JSC, www.astrohn.com, Lytkarino, Moscow region, Russia.  
ORCID: 0000-0002-8319-5901

Vadim V. STARTSEV, Candidate of Technical Science, Chief Designer of EDB «Astron» JSC, www.astrohn.com, Lytkarino, Moscow region, Russia.  
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Vadim Yurievich MOSKVICHEV, Deputy Chief Designer of EDB «Astron» JSC, www.astrohn.com, Lytkarino, Moscow region, Russia.

### Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



### Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 340-4200 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 15 ТВт

