

**ФИЗИКА****PHYSICS**

УДК 621.384.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

Поступило в редакцию 05.04.2022

Received 05.04.2022

**В. М. Кравченко, А. И. Конойко, А. С. Кузьмицкая, В. В. Малютина-Бронская***Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника, Минск, Республика Беларусь***ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ–ПЕРО  
ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ***(Представлено академиком Н. С. Казаком)*

**Аннотация.** Представлены результаты исследований разработанной ИК-системы на базе микрорезонатора Фабри–Перо, функционирующей на основе термооптического эффекта, для ее возможного применения в тепловизионной технике. Рассчитанный по экспериментальным данным коэффициент перестройки микрорезонатора Фабри–Перо составил  $k_p = 0,44$  нм/°С. Изготовлена матрица микрорезонаторов Фабри–Перо с резонаторами-пикселями в виде квадратов  $8 \times 8$  мкм<sup>2</sup> с зазором 2 мкм в количестве  $640 \times 480$  штук. Показано, что характеристики разработанной системы термовизуализации не уступают тепловизионным системам сопоставимого класса.

**Ключевые слова:** микрорезонатор Фабри–Перо, термооптический преобразователь, тепловизионная техника

**Для цитирования.** Перспективы применения микрорезонаторов Фабри–Перо для тепловизионной техники / В. М. Кравченко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

**Vladimir M. Kravchenko, Alexei I. Konoiko, Anna S. Kuzmickaya, Victoriya V. Malyutina-Bronskaya***State Scientific and Production Association of Optics, Optoelectronics and Laser Technology,  
Minsk, Republic of Belarus***PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FABRY–PEROT MICRORESONATORS  
FOR THERMAL IMAGING EQUIPMENT***(Communicated by Academician Nikolay S. Kazak)*

**Abstract.** The results of study of the developed IR system based on the Fabry–Perot microresonator, functioning on the basis of the thermal-optical effect, are presented for its possible application in thermal imaging technology. The tuning factor of the Fabry–Perot microresonator calculated from the experimental data was  $k_p = 0.44$  nm/°C. An array of Fabry–Perot microresonators with pixel resonators in the form of  $8 \times 8$  μm<sup>2</sup> squares with a 2 μm gap in the amount of  $640 \times 480$  pieces was made. It is shown that the characteristics of the developed thermal imaging system are not inferior to thermal imaging systems of a comparable class.

**Keywords:** Fabry–Perot microresonator, thermo-optical converter, thermal imaging equipment

**For citation.** Kravchenko V. M., Konoiko A. I., Kuzmickaya A. S., Malyutina-Bronskaya V. V. Prospects for the application of Fabry–Perot microresonators for thermal imaging equipment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 280–286 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

**Введение.** В настоящее время активно развивается направление тепловизионной техники и инфракрасных систем (ИК-систем) в связи с их широким применением в различных областях науки и техники. В ряде случаев выделяют две группы ИК-систем. К одной из которых относят системы, предназначенные для визуализации инфракрасных изображений (тепловизионные системы), а к другой – системы, служащие для радиометрических измерений, т. е. для измерений

температуры объектов, их яркости и других параметров (радиометрические системы). Каждая из этих систем обладает своими техническими требованиями по пространственному и временному разрешению, отношению сигнал/шум, пороговой чувствительности и другим. Исходя из физического принципа работы приемника излучения, ИК-системы можно классифицировать как электронно-оптические преобразователи, к которым по ряду признаков относятся многоэлементные твердотельные приемники оптического излучения (тепловые и фотонные, охлаждаемые и неохлаждаемые, болометрические, фотодиодные, фоторезисторные и другие устройства) [1–3].

Именно приемник – преобразователь оптического сигнала во многом определяет возможности и критерии качества работы ИК-системы. Среди промышленно выпускаемых ИК-систем наибольшее распространение получили неохлаждаемые тепловые многоэлементные фотоприемники излучения на основе микроболометрических матриц (на базе аморфного кремния, оксида ванадия) форматов  $320 \times 240$ ,  $640 \times 480$  и  $1024 \times 768$  с размерами пикселей 12–17 мкм [4–9]. Одной из основных задач, стоящих в настоящее время перед разработчиками ИК-систем, является совершенствование элементной базы: создание новых фотоприемных устройств высокого пространственного разрешения; оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне; снижение масс-габаритных параметров и энергопотребления; уменьшение стоимости компонентов и систем в целом и другие. Уменьшение размера пикселя в два раза позволит уменьшить диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива, а также до 8 раз уменьшить общий объем ИК-системы при сохранении прежнего разрешения. В связи с этим создание неохлаждаемого приемника ИК-излучения с меньшим размером пикселя и высоким разрешением является актуальной задачей мирового уровня. Одним из возможных решений поставленной задачи может быть разработка систем визуализации ИК-изображений, в которых применяется термооптический эффект, вместо преимущественно используемых в настоящее время в микроболометрах терморезистивного или пироэлектрического эффектов [4–6].

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследований неохлаждаемой ИК-системы на базе микрорезонатора Фабри–Перо, функционирующего на основе термооптического эффекта, для его возможного применения в тепловизионной технике длинноволнового ИК-диапазона (от 8 до 14 мкм).

**Материалы и методы исследования.** В основе разработанной ИК-системы лежит матрица перестраиваемых теплоизолированных между собой микрорезонаторов Фабри–Перо (пикселей) на теплопроводной и прозрачной для оптического излучения подложке (рис. 1, а).

Рассмотрим принцип работы такой ИК-системы. Формируемое объективом изображение в длинноволновом ИК-диапазоне строится на матрице резонаторов-пикселей, из-за нагрева которых происходит сдвиг их пиковых длин волн. Поглощенная энергия падающего ИК-излучения приводит в конечном счете к изменению оптической базы микрорезонатора. Система считывания направляет на резонаторы-пиксели считывающее излучение с длиной волны, близкой к пиковым длинам волн спектральных характеристик резонаторов-пикселей. Коэффициент пропускания резонаторов-пикселей зависит от их температуры. Высокая чувствительность микрорезонаторов Фабри–Перо является следствием того, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Поэтому на фотоприемной матрице (ПЗС или КМОП), принимающей считывающее излучение, формируется изображение, соответствующее нагреву резонаторов-пикселей, т. е. входному изображению в длинноволновом ИК-диапазоне. Таким образом, светомодуляционные характеристики микрорезонатора определяются коэффициентом температурного преобразования, т. е. температурной зависимостью, базы резонатора.

Коэффициент перестройки такой системы тем выше, чем уже спектр считывающего излучения и чем круче фронты спектральных характеристик этого излучения и пропускания резонаторов-пикселей.

Матрица микрорезонаторов Фабри–Перо, предназначенная для преобразования информации из ИК области спектра в более коротковолновую (видимую), представляет собой совокупность микрорезонаторов, расположенных в одной плоскости.

Технология создания матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо заключается в использовании известных технологических операций вакуумного электронно-лучевого напыления оптических

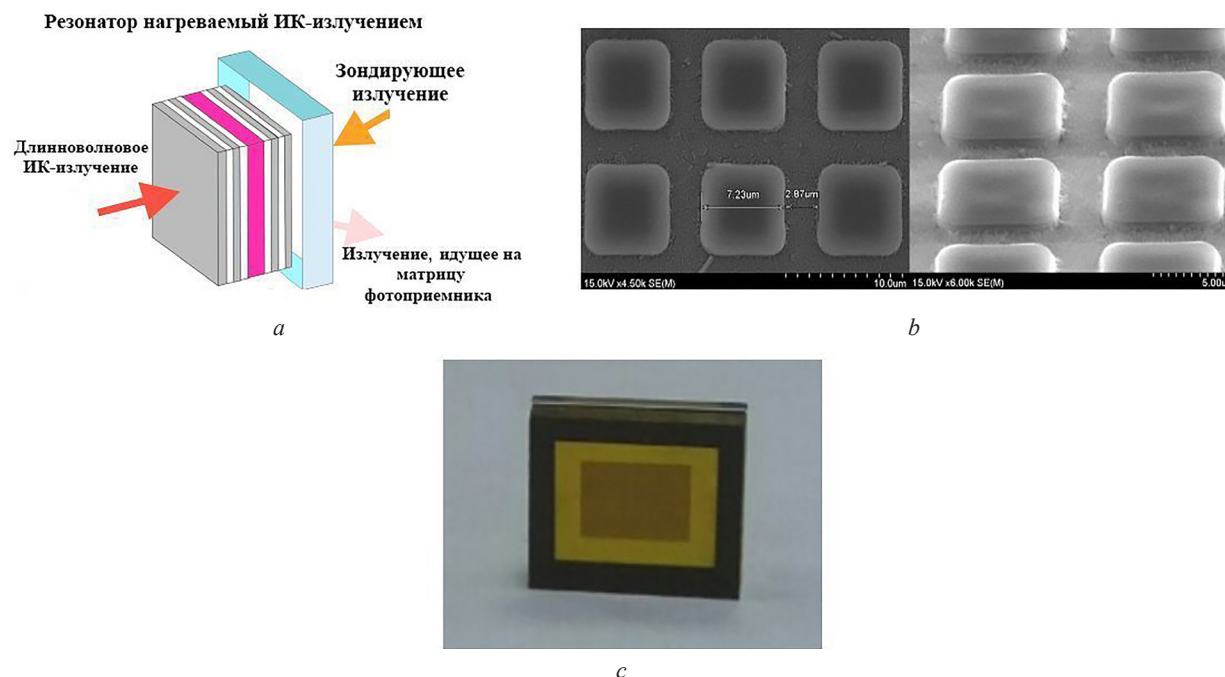


Рис. 1. Структура и принцип работы микрорезонатора Фабри–Перо (*a*), РЭМ изображение резонаторов-пикселей матрицы микрорезонатора Фабри–Перо (*b*), внешний вид экспериментального образца матрицы микрорезонатора Фабри–Перо (*c*)

Fig. 1. Structure and principle of operation of the Fabry–Perot microresonator (*a*), SEM image of the resonators-pixels of the Fabry–Perot microresonator array (*b*), appearance of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator array (*c*)

покрытий, последующей фотолитографии и плазмохимического травления с целью разделения получившегося «многослойного пирога» на отдельные структуры резонаторов Фабри–Перо, промежуточных испытаний и вакуумной герметизации.

Каждый микрорезонатор представляет собой многослойную слоистую структуру, состоящую из двух плоских зеркал и промежуточного слоя, являющегося оптической базой резонатора. Зеркала состоят из чередующихся слоев оксидов металлов с высоким и низким показателями преломления, с оптической толщиной, равной четверти длины волны. Между каждым микрорезонатором и подложкой находится теплоизолятор. Структура микрорезонатора Фабри–Перо изготавливалась методом электронно-лучевого напыления пленок оксидов металлов при температуре испарения более 1500 °С для получения однородных пленок, что трудно реализуемо другими способами испарения материалов. Контроль осаждения пленок оксидов металлов осуществляли методами оптического контроля и «кварцевых микровесов», которые позволяют контролировать толщину осаждаемых пленок с точностью 1 %. Формирование матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо (резонаторов-пикселей) осуществляли с помощью контактной фотолитографии на линии «Лада электроника–75». Матрица микрорезонаторов создавалась в виде квадратных островков размером  $8 \times 8$  мкм<sup>2</sup> с зазором 2 мкм в количестве  $640 \times 480$  штук (рис. 1, *b*). РЭМ изображение резонаторов-пикселей получено с помощью микроскопа «Hitachi S-4800» (рис. 1, *b*). На заключительном этапе изготовления экспериментального образца полученная матрица корпусировалась в вакууме совместно с окном пропускания в рабочем спектральном диапазоне, для защиты от внешнего воздействия окружающей среды (рис. 1, *c*).

Измерение зависимости коэффициента пропускания от длины волны получаемых микрорезонаторов производилось на приборе «Photon-RT» в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм с шагом 0,25 нм. Для оценки термооптического эффекта полученных структур была разработана специализированная оснастка, которая позволяет прямо в камере спектрофотометра нагревать экспериментальный образец от комнатной температуры до 65 °С, с шагом 0,1 °С. Температура экспериментального образца контролировалась термодатчиком.

**Результаты и их обсуждение.** Изготовление экспериментального образца базировалось на разработанной математической модели стабилизации светомодуляционных характеристик матриц микрорезонаторов Фабри–Перо, предназначенных для преобразования ИК-излучения в видимое как в режиме пропускания, так и в режиме отражения зондирующего излучения [10]. Было показано, что для получения более температуростабильной работы резонатора Фабри–Перо, работающего в качестве преобразователя информации, необходимо, чтобы его начальная температура соответствовала экстремуму зависимости изменения светового потока от изменения температуры. Динамический температурный диапазон одного микрорезонатора может составлять, в зависимости от величины оптической базы резонатора, от десятых долей до одного градуса [10].

Одной из основных характеристик такой ИК-системы является крутизна преобразования ИК-излучения. Данный параметр определяется по алгоритму, описанному ниже.

Для оценки крутизны преобразования микрорезонатора требуется измерить спектральную зависимость коэффициента пропускания от длины волны  $T(\lambda)$  при комнатной температуре ( $t_1$ ). Также необходимо измерить пик коэффициента пропускания на промежутке  $T(\lambda)$  и определить величину длины волны, соответствующую данному пику ( $\lambda_1$ ) (рис. 2).

Затем требуется включить нагрев образца и дождаться повышения его температуры, например, на 20 °С, определить величины температуры после нагрева ( $t_2$ ) и  $T(\lambda)$ . Далее необходимо измерить величину длины волны после нагрева, соответствующую пику коэффициента пропускания на  $\lambda_2$ . Разность температур  $\Delta t$  и длин волн  $\Delta \lambda$  определяется по формулам

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

$$\Delta \lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|.$$

Для оценки крутизны преобразования ИК-излучения требуется найти наиболее линейный участок на спаде графика спектра пропускания, как это показано на рис. 2. Затем необходимо определить изменение длины волны  $\Delta \lambda_1$  и величины коэффициента пропускания  $\Delta T$  на данном участке. Крутизну преобразования инфракрасного излучения  $k_p$  можно найти по формуле

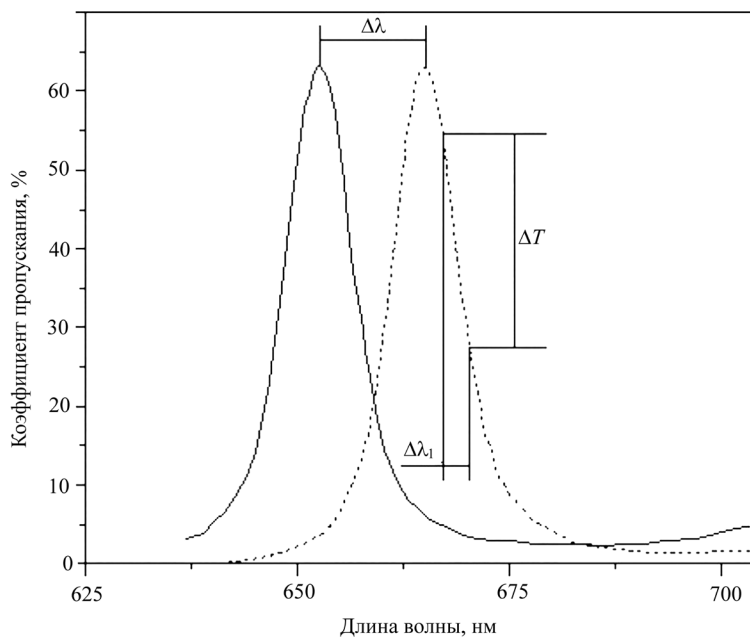


Рис. 2. Определение крутизны преобразования микрорезонатора Фабри–Перо по спектральным зависимостям коэффициента пропускания

Fig. 2. Determination of the steepness of the Fabry–Perot microresonator transformation from the spectral dependences of the transmittance coefficient

$$k_p = \frac{\Delta T k_T}{\Delta \lambda_1} k_c,$$

где  $k_T$  – коэффициент перестройки, определяемый как  $\frac{\Delta \lambda}{1^0 K}$ ;  $k_c$  – коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности падающего излучения на рабочую поверхность микрорезонатора, величина которого определяется наличием светонепроницаемой области в зазоре между резонаторами-пикселями, и по оценке составляет  $k_c = 3$ .

На рис. 3 показаны характерные зависимости коэффициента пропускания от длины волны при двух температурах измерения экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо (рис. 1, с).

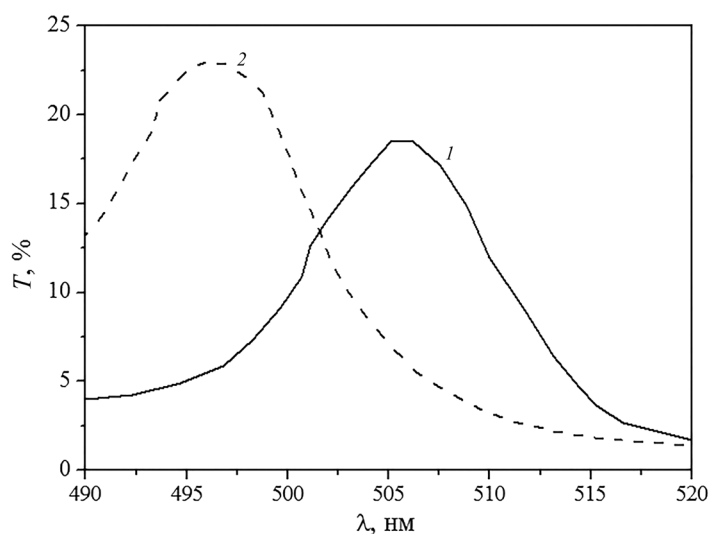


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента пропускания экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо при разных температурах измерения (1 – 25,9 °С, 2 – 45,9 °С)

Fig. 3. Spectral dependences of the transmittance coefficient of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator at different measurement temperatures (1 – 25.9 °C, 2 – 45.9 °C)

Для исследуемой ИК-системы, работающей на термооптическом эффекте, при нагреве экспериментального образца на 20 °С произошло смещение максимума спектральной зависимости коэффициента пропускания на промежутке длин волн от 480,0 до 530,0 нм на 8,80 нм. Аналогичные характеристики наблюдались и для серии экспериментальных образцов микрорезонаторов Фабри–Перо, что говорит о хорошей воспроизводимости результатов. По полученным экспериментальным результатам был произведен расчет крутизны преобразования.

Технические параметры, характерные для разработанных образцов микрорезонаторов Фабри–Перо, представлены в табл. 1. Из полученных данных был рассчитан коэффициент перестройки экспериментального образца микрорезонатора, который составил  $k_T = 0,44$  нм/°С. Это значение

Т а б л и ц а 1. Технические параметры экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо

Table 1. Technical parameters of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator

Параметр Parameter	Величина Value
Максимальный коэффициент пропускания резонатора-пикселя, %	70
Диапазон изменения рабочей температуры, °С	20
Температурный сдвиг максимума коэффициента пропускания на рабочей длине волны, нм	8,8
Крутизна преобразования ИК-излучения, %/°С	8,91
Коэффициент перестройки, нм/°С	0,44



в 7,33 раз превышает коэффициент перестройки фильтра, описанного в литературе [11], который составлял порядка 0,06 нм/°С.

Был проведен сравнительный анализ промышленно выпускаемых ИК-систем на базе микроболометрических матриц и экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо. Данные результаты представлены в табл. 2. Матрицы фирм АТОМ 640 (Lynred, США) [2], TENUM™640 (Sierra-Olympic, США) [3] и TWV640 (BAE SYSTEMS, Великобритания) [4] разработаны на основе оксида ванадия и функционируют с использованием микроболометрических принципов преобразования ИК-излучения.

Т а б л и ц а 2. Параметры различных матриц ИК-систем

T a b l e 2. Parameters of various arrays of the IR systems

Тип матрицы ИК-системы, страна производства IR system matrix type, country of production	Разрешение матрицы Matrix resolution (H × V)	Размер пикселя, мкм Pixel size, μm	Тепловая чувствительность (NETD), мК Thermal sensitivity (NETD), mK	Рабочий спектральный диапазон, мкм Working spectral range, μm	Рабочая температура, °С Operating temperature, °C	Рабочее напряжение, В Operating voltage, V
АТОМ 640, США	640 × 480	12–17	<50	8–14	–40...–60	4,0–5,5
TENUM™640, США	640 × 512	10	<30	8–14	–40...+80	3,0–5,5
TWV640, Великобритания	640 × 480	12	<50	7,5–13,5	–40...–65	2,0–3,8
Микрорезонатор Фабри–Перо (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»)	640 × 480	8	<50	8–14	–30...+50	4,0–5,5

Крутизна преобразования разработанной ИК-системы, определяемая изменением коэффициента пропускания резонатора-пикселя, приходящимся на 1 К изменения температуры, составляет от 6 до 9 %, что гораздо выше температурных коэффициентов сопротивления материалов традиционных микроболометров (2,7 % для оксидов ванадия и 1,5 % для аморфного кремния). Необходимо отметить, что в разработанной ИК-системе отсутствуют проводниковые соединения со схемой считывания: это снижает уровень шума и дает возможность увеличить коэффициент годных пикселей, превышающий 98 %. Для получения температуростабильной работы разработанной ИК-системы в диапазоне отрицательных температур окружающей среды необходимо использование термостабилизирующего кожуха.

Таким образом можно отметить, что разработанная ИК-система по своим основным параметрам не уступает имеющимся мировым аналогам.

**Заключение.** Исследована принципиальная конструкция преобразователя ИК-излучения в видимое на основе микрорезонаторов Фабри–Перо. На основании проведенных экспериментальных исследований по реализации микрорезонаторов Фабри–Перо изучены и отработаны методы формирования многослойных матричных элементов из оксидов металлов, что обеспечивает воспроизводимость технологии от процесса к процессу. По отработанной технологии изготовлена матрица микрорезонаторов Фабри–Перо с резонаторами-пикселями в виде квадратов  $8 \times 8$  мкм<sup>2</sup> с зазором 2 мкм в количестве 640 × 480 шт. Получен экспериментальный образец ИК-системы на базе матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо с приемлемыми характеристиками. Коэффициент перестройки экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо составил  $k_T = 0,44$  нм/°С, а крутизна преобразования 8,91 %/°С.

Таким образом, разработанная ИК-система термовизуализации не уступает тепловизионным системам сопоставимого класса (болометрическим) по основным параметрам (размер пикселя, разрешение матрицы, рабочий спектральный диапазон), а стоимость изготовления, в случае серийного выпуска, такой системы ниже (за счет меньшего количества фотолитографических процессов, 3 против 12), что открывает новые возможности для развития тепловизионной техники.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2004. – 480 с.
2. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы 3-го поколения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2011. – 242 с.
3. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2011. – 84 с.
4. Ostrower, D. Optical Thermal Imaging-replacing microbolometer technology and achieving universal deployment / D. Ostrower // *III-Vs Review*. – 2006. – Vol. 19, N 6. – P. 24–27. [https://doi.org/10.1016/s0961-1290\(06\)71764-1](https://doi.org/10.1016/s0961-1290(06)71764-1)
5. Novel Low-Cost Uncooled Infrared Camera / M. Wu [et al.] // *Infrared Technology and Applications XXXI* / ed. B. F. Andresen, G. F. Fulop. – Bellingham, 2005. – Vol. 5783. – P. 496–505. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
6. Infrared camera system: pat. US 2007/0023661 A1 / M. Wagner, M. Wu, N. Nemchuk, J. Cook, R. DeVito, R. Murano, L. Domash. – Publ. date: 01.02.2007.
7. ATTO640™ – Infrared sensor [Electronic resource] // LYNRED-USA. Official website. – Mode of access: <https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution/atto640-infrared-sensors.html>. – Date of access: 02.04.2022.
8. TENUM® 640 10 micron pixel pitch LWIR [Electronic resource] // Sierra-Olympic Technologies. Official website. – Mode of access: <https://sierraolympic.com/thermal-cameras-lwir/tenum-640/>. – Date of access: 02.04.2022.
9. TWV640 Thermal Camera Core [Electronic resource] // BAE Systems. Official website. – Mode of access: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core>. – Date of access: 02.04.2022.
10. Преобразователь ИК излучения на базе микрорезонаторов Фабри–Перо / В. Б. Залесский [и др.] // Докл. БГУИР. – 2018. – № 8 (118). – С. 24–29.
11. Erdtmann, M. Uncooled dual-band MWIR/LWIR optical readout imager / M. Erdtmann, L. Zhang, G. Jin // *Infrared Technology and Applications XXXIV* / ed. B. F. Andresen, G. F. Fulop, P. R. Norton. – Orlando, 2008. – Vol. 6940. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.781886>

## References

1. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Infrared systems of “looking” type*. Moscow, 2004. 480 p. (in Russian).
2. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Third generation infrared systems*. Moscow, 2011. 242 p. (in Russian).
3. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Modern problems of infrared technology*. Moscow, 2011. 84 p. (in Russian).
4. Ostrower D. Optical Thermal Imaging-replacing microbolometer technology and achieving universal deployment. *III-Vs Review*, 2006, vol. 19, no. 6, pp. 24–27. [https://doi.org/10.1016/s0961-1290\(06\)71764-1](https://doi.org/10.1016/s0961-1290(06)71764-1)
5. Wu M., Cook J., DeVito R., Li J., Ma E., Murano R., Nemchuk N., Tabasky M., Wagner M. Novel Low-Cost Uncooled Infrared Camera. Andresen B. F., Fulop G. F., ed. *Infrared Technology and Applications XXXI*. Bellingham, 2005, vol. 5783, pp. 496–505. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
6. Wagner M., Wu M., Nemchuk N., Cook J., DeVito R., Murano R., Domash L. *Infrared camera system*: patent US 2007/0023661 A1. Publication date: 01 February 2007.
7. ATTO640™ – Infrared sensor (2022). Available at: <https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution/atto640-infrared-sensors.html> (accessed 02 April 2022).
8. TENUM® 640 10 micron pixel pitch LWIR (2022). Available at: <https://sierraolympic.com/thermal-cameras-lwir/tenum-640/> (accessed 02 April 2022).
9. TWV640 Thermal Camera Core (2022). Available at: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core> (accessed 02 April 2022).
10. Zalesski V. B., Konojko A. I., Kravchenko V. M., Reshikov C. A. Infrared radiation converter based on Fabry–Perot microresonators. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 8, pp. 24–29 (in Russian).
11. Erdtmann M., Zhang L., Jin G. Uncooled dual-band MWIR/LWIR optical readout imager. Andresen B. F., Fulop G. F., Norton P. R., ed. *Infrared Technology and Applications XXXIV*. Orlando, 2008, vol. 6940, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.781886>

## Информация об авторах

Кравченко Владимир Михайлович – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Конайко Алексей Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kon54@yandex.by.

Кузьмицкая Анна Сергеевна – мл. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7074-0034.

Малютина-Бронская Виктория Владимировна – заместитель заведующего лабораторией. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by. ORCID: 0000-0003-2788-4945.

## Information about the authors

Kravchenko Vladimir M. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Konoiko Aleksey I. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kon54@yandex.by.

Kuzmitskaya Hanna S. – Junior Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7074-0034.

Malyutina-Bronskaya Viktoria V. – Deputy Head of the Laboratory. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by. ORCID: 0000-0003-2788-4945.