

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 621.384.3
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-234-240>

Поступила в редакцию 24.10.2017
 Received 24.10.2017

В. А. Пилипович¹, **В. Б. Залесский²**, **А. И. Конойко²**, **В. М. Кравченко²**, **К. А. Решиков³**

¹Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ – ПЕРО

Аннотация. Предлагается метод преобразования информации из одной области оптического спектра в другую на базе микрорезонаторов Фабри – Перо, использующий излучение, падающее от какого-либо объекта, как воздействующее на материал микрорезонатора (который должен поглощать это излучение) и видимое излучение оптической части спектра как зондирующее, или считывающее (поглощение этого излучения материалом микрорезонатора должно отсутствовать). Поглощенная энергия воздействующего излучения приводит к изменению температуры микрорезонатора, вследствие чего изменяется его оптическая база. Высокая чувствительность микрорезонаторов Фабри – Перо обусловлена тем, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Общим недостатком эталонов Фабри – Перо является их чувствительность к условиям работы, например к изменению температуры окружающей среды, что так же, как и влияние ИК-излучения, приводит к изменению оптической базы резонатора. Это вызывает смещение спектральной характеристики коэффициента пропускания или отражения эталонов Фабри – Перо, что ухудшает их эксплуатационные характеристики. Метод позволяет минимизировать влияние температурных флуктуаций окружающей среды на характеристики микрорезонатора Фабри – Перо, являющегося элементом, преобразующим информацию из одной области спектра в другую. Минимизация осуществляется в случае, когда начальная температурная рабочая точка микрорезонатора соответствует максимуму величины изменения интенсивности зондирующего излучения от температуры.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, многолучевая интерференция, резонатор Фабри – Перо, матрица микрорезонаторов, термооптический преобразователь

Для цитирования. Преобразователь ИК-излучения на базе микрорезонаторов Фабри – Перо / В. А. Пилипович [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 234–240. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-234-240>

V. A. Pilipovich¹, **V. B. Zaleski²**, **A. I. Konojko²**, **V. M. Kravchenko²**, **C. A. Reshikov³**

¹*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, Belarus*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

INFRARED RADIATION CONVERTER BASED ON FABRY – PEROT MICRORESONATORS

The method of transformation of information from one spectral range to another based on Fabry – Perot microresonators is offered. The method uses incident radiation of an object as affecting a microresonator material (a microresonator material must absorb this radiation), and visible radiation of the optical part of the spectrum as sensing, or reading radiation (a microresonator material should not absorb this radiation). The absorbed energy of incident radiation leads to a change in a microcavity temperature, which results in a change in the optical base of the resonator. The high sensitivity of the Fabry – Perot microcavities is a consequence of the fact that the principle of their operation is based on the physical phenomenon of multipath interference. A common shortcoming of the Fabry – Perot standards is their sensitivity to operating conditions, for example, to a change in the ambient temperature, which also leads to a change in the optical base of the resonator, as well as the influence of IR radiation. This leads to a shift in the spectral characteristics of transmittance or reflection of the Fabry – Perot standards, which worsens their performance characteristics. The method allows one to minimize the environmental temperature fluctuation influence on characteristics of the Fabry – Perot microresonator, which is an element that transforms the information from one spectral range to another. Minimization is performed when the starting temperature point of the microresonator corresponds to a maximum change in the probing radiation intensity due to the temperature.

Keywords: infrared radiation, multibeam interference, Fabry – Perot resonator, matrix of microresonators, thermo-optic converter

For citation. Pilipovich V. A., Zaleski V. B., Konojko A. I., Kravchenko V. M., Reshikov C. A. Infrared radiation converter based on Fabry – Perot microresonators. *Vestsi Natsyional'nei akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 234–240 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-234-240>

Введение. Наиболее перспективным способом получения информации, имеющейся в разных спектральных оптических диапазонах, для технического зрения является метод преобразования информации из одной области спектра в другую, например из ИК-области в более коротковолновую [1]. Данный подход обеспечивает наибольшую чувствительность в случае применения матриц микрорезонаторов Фабри – Перо, которые могут быть изготовлены на базе технологий микроэлектроники. В методе используется излучение, падающее от какого-либо объекта, как воздействующее на материал микрорезонатора (который должен поглощать это излучение) и видимое излучение оптической части спектра как зондирующее, или считывающее (поглощение этого излучения материалом микрорезонатора должно отсутствовать). Высокая чувствительность микрорезонаторов Фабри – Перо обусловлена тем, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Общим недостатком эталонов Фабри – Перо является их чувствительность к условиям работы, например к изменению температуры окружающей среды, что так же, как и влияние ИК-излучения, приводит к изменению оптической базы резонатора [2, 3]. Это вызывает смещение спектральной характеристики коэффициента пропускания или отражения эталонов Фабри – Перо, что ухудшает их эксплуатационные характеристики [4].

Целью исследования является минимизация влияния температурных флуктуаций окружающей среды на работу микрорезонатора Фабри – Перо, являющегося элементом, преобразующим информацию из одной области спектра в другую.

Описание метода. Для преобразования ИК-излучения в более коротковолновое используется резонатор Фабри – Перо, работающий на пропускание или отражение зондирующего излучения. Минимизация влияния температурных флуктуаций окружающей среды осуществляется в том случае, когда начальная температурная рабочая точка микрорезонатора соответствует максимуму величины изменения интенсивности зондирующего излучения от температуры.

Основным термочувствительным элементом термооптического преобразователя является матрица пленочных микрорезонаторов Фабри – Перо, которая может работать в режиме пропускания или отражения зондирующего излучения (рис. 1, а).

Если на резонатор падает излучение со спектральным распределением интенсивности I_0 , то выражения для нахождения интенсивности прошедшего I_{t0} и отраженного I_{r0} излучения будут иметь следующий вид [5]:

$$I_{t0} = I_0 \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi)}; \quad (1)$$

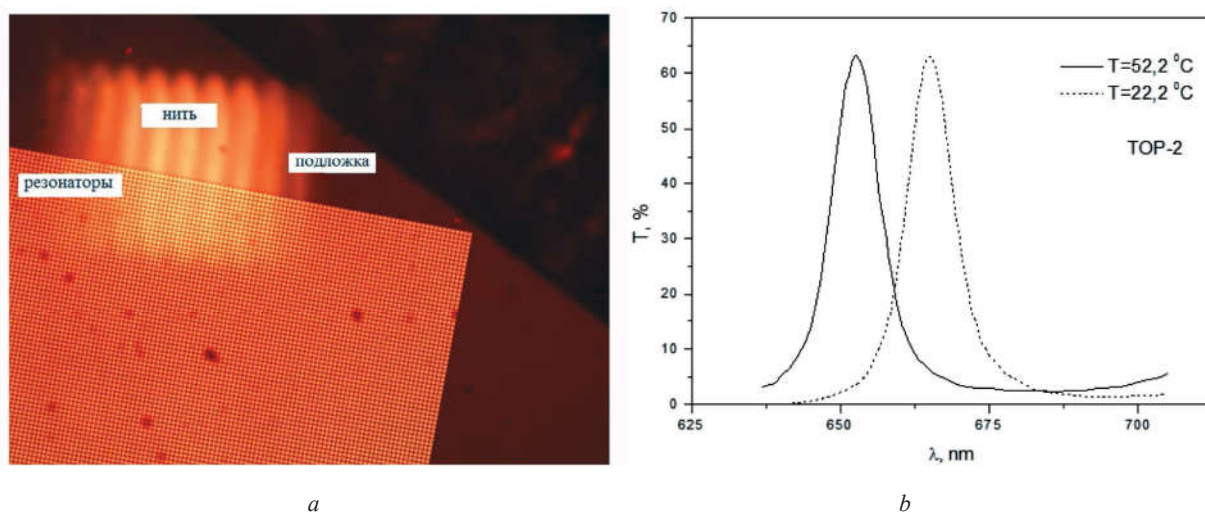


Рис. 1. Матрица микрорезонаторов Фабри – Перо: а – увеличенное изображение; б – спектральные характеристики ее коэффициента пропускания при температуре 22,2 и 52,2 °С

Fig. 1. Matrix of Fabry – Perot microcavities: а – enlarged image; б – spectral characteristics of its transmittance at a temperature of 22.2 and 52.2 °С

$$I_{r0} = I_0 \frac{R_1 + T^2 R_2 (1 - A_1)^2 - 2T \sqrt{R_2} \sqrt{R_1} (1 - A_1) \cos(\varphi + \Delta\varphi)}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1} \sqrt{R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi)}. \quad (2)$$

А при воздействии на резонатор ИК-излучения выражения (1) и (2) примут вид

$$I_{t1} = I_0 \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}; \quad (3)$$

$$I_{r1} = I_0 \frac{R_1 + T^2 R_2 (1 - A_1)^2 - 2T \sqrt{R_2} \sqrt{R_1} (1 - A_1) \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1} \sqrt{R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}, \quad (4)$$

где R_1, R_2, T_1, T_2 – коэффициенты отражения и пропускания первого и второго зеркал резонатора; T – коэффициент пропускания среды между зеркалами; $(\varphi + \Delta\varphi) = \frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda} [1 + \alpha_p(\Delta T)]$, $(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi) = \frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda} [1 + \alpha_p(\Delta T + \delta T)]$ – разность фаз между интерферирующими световыми волнами, наводимая, соответственно, в невозбужденном и в возбужденном резонаторе; λ – длина волны зондирующего излучения; l – геометрическая база микрорезонатора; n – показатель преломления материала между зеркалами; β – угол падения зондирующего излучения; α_p – коэффициент температурного преобразования оптической базы резонатора; ΔT – величина изменения температуры в невозбужденном резонаторе; δT – величина изменения температуры под воздействием ИК-излучения.

Таким образом, светомодуляционные характеристики микрорезонатора определяются коэффициентом температурного преобразования оптической базы резонатора и величиной изменения его температуры.

Результаты и их обсуждение. Значение коэффициента температурного преобразования оптической базы резонатора определяется в основном физическими свойствами активного слоя, расположенного между зеркалами резонатора, а именно: температурным коэффициентом линейного расширения материала α_l и температурным коэффициентом изменения показателя преломления α_n активного слоя. Его значение можно также определить из спектральных характеристик коэффициента пропускания матрицы микрорезонаторов Фабри – Перо при температуре 22,2 и 52,2 °С (рис. 1, б).

Максимум пропускания резонатора при начальной температуре ΔT определяется условием

$$\frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda} [1 + \alpha_p \Delta T] = 2\pi m. \quad (5)$$

При изменении температуры окружающей среды на δT характеристика пропускания микрорезонатора сдвигается по спектру. Максимум пропускания резонатора при конечной температуре $\Delta T + \delta T$ будет соответствовать другой длине волны излучения, равной $\lambda + \Delta\lambda$, и определяться условием

$$\frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda + \Delta\lambda} [1 + \alpha_p (\Delta T + \delta T)] = 2\pi m. \quad (6)$$

Приравняв (5) и (6), будем иметь следующее выражение:

$$\frac{1 + \alpha_p \Delta T}{\lambda} = \frac{1 + \alpha_p (\Delta T + \delta T)}{\lambda + \Delta\lambda}. \quad (7)$$

Решая его относительно коэффициента температурного преобразования оптической базы резонатора α_p , получим

$$\alpha_p = \frac{1}{\delta T} \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (8)$$

Подставляя в это выражение параметры, определенные из спектральных зависимостей (см. рис. 1, *b*), получим, что для рассматриваемых микрорезонаторов значение коэффициента температурного преобразования базы резонатора $\alpha_p = 6,266 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$, что в 6,949 раза превышает данные, приведенные в [4].

Таким образом, значение коэффициента температурного преобразования оптической базы резонатора можно установить, определив величину спектрального смещения максимума коэффициента пропускания резонатора, значение изменения его температуры и длину волны зондирующего излучения. Следовательно, светомодуляционные характеристики каждого микрорезонатора рассматриваемой матрицы определяются величиной изменения его температуры, значением спектрального смещения максимума коэффициента пропускания или отражения резонатора и длиной волны зондирующего излучения.

Если на резонатор падает излучение со спектральным распределением интенсивности $I_{\text{лаз}}(\lambda)$, то выражения для определения интенсивности прошедшего $I_{t0}(\lambda)$ и отраженного $I_{r0}(\lambda)$ излучения будут иметь следующий вид:

$$I_{t0}(\lambda) = I_{\text{лаз}}(\lambda) \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi)}; \quad (9)$$

$$I_{r0}(\lambda) = I_{\text{лаз}}(\lambda) \frac{R_1 + T^2 R_2 (1 - A_1)^2 - 2T \sqrt{R_2} \sqrt{R_1} (1 - A_1) \cos(\varphi + \Delta\varphi)}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1} \sqrt{R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi)}. \quad (10)$$

А при воздействии ИК-излучения выражения (9) и (10) примут вид

$$I_{t1}(\lambda) = I_{\text{лаз}}(\lambda) \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}; \quad (11)$$

$$I_{r1}(\lambda) = I_{\text{лаз}}(\lambda) \frac{R_1 + T^2 R_2 (1 - A_1)^2 - 2T \sqrt{R_2} \sqrt{R_1} (1 - A_1) \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1} \sqrt{R_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi + \delta\varphi)}. \quad (12)$$

Тогда значения проходящего или отраженного светового потока в том и в другом случае Φ_{ji} (где $j = t; r$ и $i = 0; 1$) и их изменения $\Delta\Phi_j$ можно определить из соотношений

$$\Phi_{ji} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{ji}(\lambda) d\lambda; \quad \Delta\Phi_j = \Phi_{j1} - \Phi_{j0}.$$

На рис. 2, 3 представлены зависимости соответственно светового потока Φ_{ji} и изменения светового потока $\Delta\Phi_j$, прошедшего, а также отраженного резонатором без и под воздействием ИК-излучения, от величины изменения начальной температуры резонатора ΔT . Эти зависимости иллюстрируют случай, когда длина волны лазерного излучения, соответствующая максимуму его интенсивности при начальной температуре резонатора, совпадает со спектральным максимумом пропускания резонатора.

Из приведенных зависимостей следует, что при воздействии ИК-излучения максимум или минимум зависимости светового потока Φ_{ji} от величины изменения начальной температуры резонатора ΔT смещается относительно 0° , что приводит к изменению светового потока $\Delta\Phi_j$. Вблизи

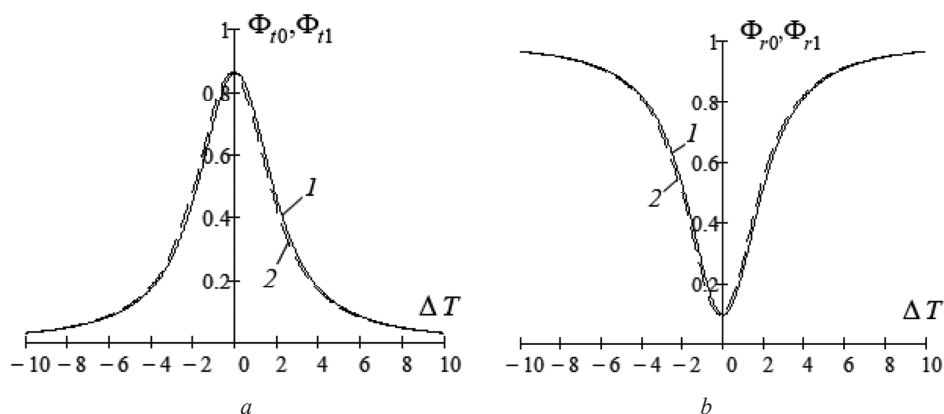


Рис. 2. Зависимости светового потока Φ_{ji} , прошедшего через резонатор (a) и отраженного резонатором (b) без воздействия (кривая 1) и под воздействием (кривая 2) ИК-излучения, от изменения начальной температуры ΔT

Fig. 2. Dependences of the light flux Φ_{ji} passing through the resonator (a) and reflected by the resonator (b) without (curve 1) and under the IR radiation influence (curve 2), on the change in the initial temperature ΔT

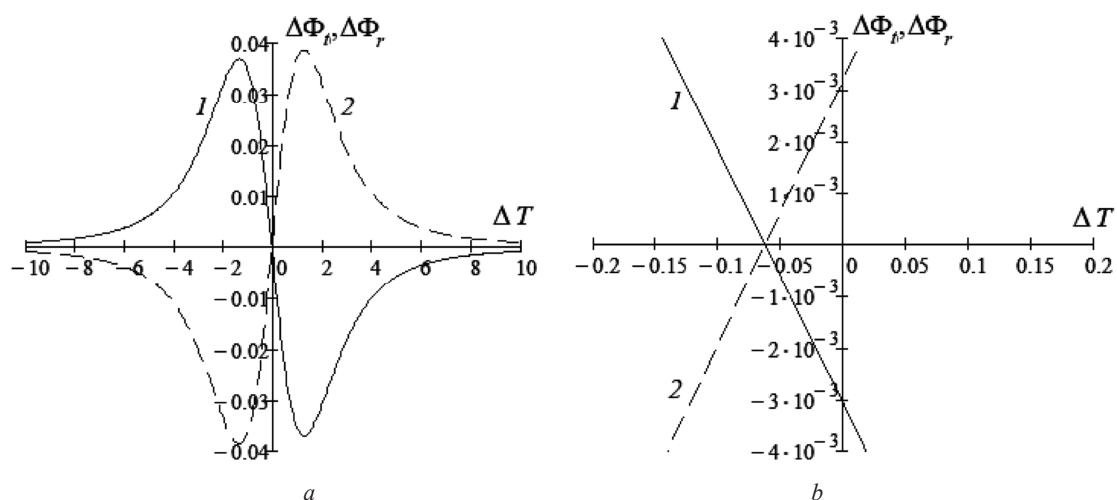


Рис. 3. Зависимости изменения светового потока $\Delta\Phi_j$, прошедшего через резонатор (кривая 1) и отраженного им (кривая 2) при воздействии ИК-излучения, от изменения начальной температуры резонатора ΔT : a – общий вид; b – увеличенный вид зависимости вблизи начала координат

Fig. 3. Dependences of the light flux $\Delta\Phi_j$ passing through the resonator (curve 1) and reflected by it (curve 2) under the IR radiation influence on the change in the initial resonator material temperature ΔT : a – general view; b – scaled view of the dependences near the coordinate origin

точки $\Delta T = 0^\circ$ изменение светового потока $\Delta\Phi_j$ имеет линейный характер, что и обуславливает температурную нестабильность работы резонатора.

Зависимости изменения светового потока $\Delta\Phi_j$ от изменения начальной температуры резонатора ΔT обладают экстремумами, вблизи которых значение его изменения по абсолютной величине максимально и для рассматриваемого резонатора практически не меняется. Поэтому для получения более температуростабильной работы резонатора необходимо, чтобы его начальная температура соответствовала экстремуму зависимости изменения светового потока от температуры. Чтобы реализовать это, достаточно нагреть резонатор до соответствующей температуры. Тогда, например, зависимости светового потока Φ_{ji} и изменения светового потока $\Delta\Phi_j$, отраженного резонатором зондирующего излучения без и под воздействием ИК-излучения, от изменения начальной температуры резонатора ΔT будут иметь вид, как показано на рис. 4.

На рис. 5 представлены графики зависимости изменения светового потока $\Delta\Phi$, отраженного резонатором, который находится под воздействием ИК-излучения, от изменения начальной тем-

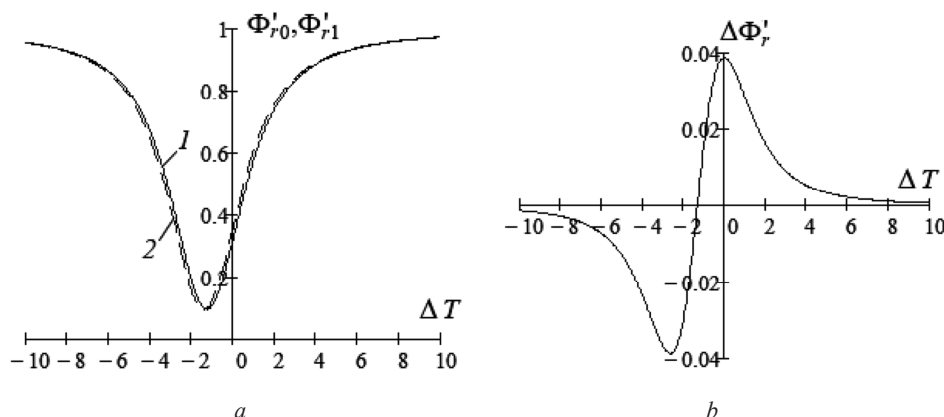


Рис. 4. Зависимости: *a* – светового потока зондирующего излучения, отраженного резонатором, без воздействия Φ'_{r0} и под воздействием Φ'_{r1} ИК-излучения, *b* – изменения светового потока, отраженного резонатором, $\Delta\Phi'_r$, под воздействием ИК-излучения от изменения начальной температуры резонатора ΔT

Fig. 4. Dependences of: *a* – light flux of probe radiation reflected by the resonator without (Φ'_{r0}) and under the IR radiation influence (Φ'_{r1}); *b* – variation of the light flux reflected by the resonator $\Delta\Phi'_r$ under the IR radiation influence on the change in the initial resonator temperature ΔT

пературы ΔT материала резонатора при базе резонатора, равной λ (кривая 1), 4λ (кривая 2), 8λ (кривая 3). Как видим, температурный диапазон, при котором значение изменения светового потока $\Delta\Phi$ практически постоянно, зависит от базы резонатора и может составлять (для его минимальной базы) порядка трех градусов. Этот температурный диапазон является динамическим температурным диапазоном микрорезонатора.

Заключение. Таким образом, для получения более температуростабильной работы резонатора, работающего в режиме преобразования информации из ИК-области спектра в другую, например более коротковолновую, необходимо, чтобы его начальная температура соответствовала экстремуму зависимости изменения светового потока от температуры. Динамический температурный диапазон микрорезонатора может составлять, в зависимости от оптической базы резонатора, от десятых долей градуса до трех градусов. При изменении этой величины соответственно изменяется чувствительность резонатора.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф17-138).

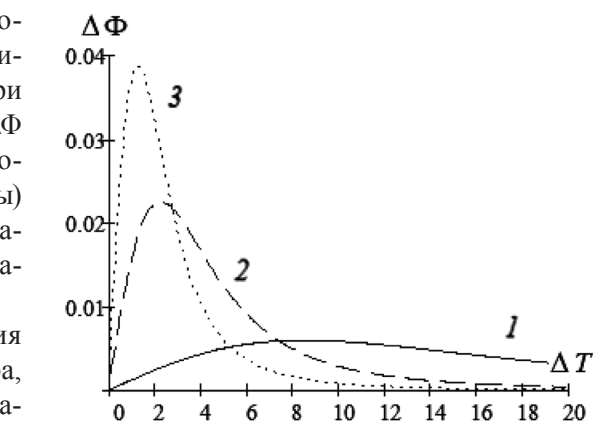


Рис. 5. Зависимости изменения светового потока, отраженного резонатором, находящимся под воздействием ИК-излучения, от изменения начальной температуры ΔT материала резонатора при базе резонатора, равной λ (кривая 1), 4λ (кривая 2) и 8λ (кривая 3)

Fig. 5. Dependences of the light flux reflected by the resonator under the IR radiation influence on the change in the initial resonator material temperature ΔT for the resonator base of λ (curve 1), 4λ (curve 2) and 8λ (curve 3)

Acknowledgements. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No. F17-138).

Список использованных источников

1. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.
2. Мустель, Е. П. Методы модуляции и сканирования света / Е. П. Мустель, В. Н. Парыгин. – М.: Наука, 1970. – 296 с.
3. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
4. Novel low-cost uncooled infrared camera / Ming Wu [et al.] // Infrared Technology and Applications XXXI. – 2005. – Vol. 5783 – P. 69401I-1. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
5. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

References

1. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Modern Problems of Infrared Technology*. Moscow, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2011. 84 p. (in Russian).
2. Mustel' E. P., Parygin V. N. *Methods of Light Modulation and Light Scanning*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 296 p. (in Russian).
3. Yariv A., Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York, Wiley, 1984. 589 p.
4. Ming Wu, Cook J., DeVito R., Jun Li, Ma E., Murano R., Nemchuk N., Tabasky M., Wagner M. Novel low-cost uncooled infrared camera. *Infrared Technology and Applications XXXI*, 2005, vol. 5783, pp. 69401I-1. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
5. Born M., Vol'f E. *Principles of Optics*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 720 p. (in Russian).

Информация об авторах

Пилипович Владимир Антонович – академик, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь).

Залесский Валерий Борисович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaleski@inel.bas-net.by

Конойко Алексей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kon54@yandex.by

Кравченко Владимир Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь).

Решиков Константин Александрович – аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Vladimir M. Pilipovich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Valery B. Zalesski – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaleski@inel.bas-net.by

Alexey I. Kanojka – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher, State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kon54@yandex.by

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

Konstantin A. Reshikov – Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus).