

УДК 621.384.3

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ–ПЕРО

В.Б. ЗАЛЕССКИЙ, А.И. КОНОЙКО, В.М. КРАВЧЕНКО, К.А. РЕЩИКОВ

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 28 февраля 2018*

**Аннотация.** Предлагаются методы преобразования информации из одной области оптического спектра в другую на базе микрорезонаторов Фабри–Перо. Методы позволяют минимизировать влияние температурных флуктуаций окружающей среды на характеристики как одного, так и двух микрорезонаторов Фабри–Перо, преобразующих информацию из одной области спектра в другую. Минимизация осуществляется в первом случае, когда начальная температурная рабочая точка микрорезонатора соответствует максимуму величины изменения интенсивности зондирующего излучения от температуры, а во втором, когда фиксированным сдвигом начальной температуры обладает только один резонатор из двух.

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

**Abstract.** The methods of transformation of information from one spectral range to another based on Fabry–Perot microresonators are offered. The methods allow to minimize environmental temperature fluctuations influence on characteristics of one or two Fabry–Perot microresonators, which are transforming information from one spectral range to another. In the first case, minimization is performed when the initial temperature point of the microresonator corresponds to the maximum of the probing radiation intensity change depended on temperature. In the second case, minimization is performed when only one of two microresonators has a fixed shift of the initial temperature point.

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

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 118, No. 8, pp. 24-29**

**Infrared radiation converter based on Fabry–Perot microresonators**

**V.B. Zalesski, A.I. Konojko, V.M. Kravchenko, C.A. Reshikov**

### Введение

Наиболее перспективным методом получения информации, имеющейся в различных спектральных оптических диапазонах, для технического зрения является метод преобразования информации из одной области спектра в другую, например, из ИК или ультрафиолетовой области электромагнитного спектра в видимую [1]. Этот метод дает наибольшую чувствительность при использовании матриц микрорезонаторов Фабри–Перо вследствие того, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Кроме того, они могут быть изготовлены на базе технологий микроэлектроники. В методе используется излучение, падающее от какого-либо объекта, как воздействующее на материал микрорезонатора (материал, находящийся между зеркалами микрорезонатора, должен поглощать это излучение) и излучение видимой оптической части спектра – как зондирующее, или считывающее (поглощение этого излучения материалом микрорезонатора должно отсутствовать). Поглощенная энергия падающего излучения приводит в конечном счете к изменению оптической базы микрорезонатора.

Общим недостатком эталонов Фабри–Перо является их чувствительность к условиям работы, например, к изменению температуры окружающей среды, что так же приводит к изменению оптической базы резонатора [2, 3], как и влияние, например, ИК излучения. В результате происходит 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 микрорезонаторов Фабри–Перо, являющихся элементами, реализующими преобразование информации из одной области электромагнитного спектра в другую.

### Сущность 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 на работу одного резонатора Фабри–Перо осуществляется в том случае, когда его начальная температурная рабочая точка соответствует максимуму величины изменения интенсивности зондирующего излучения от температуры. Минимизация влияния температурных флуктуаций окружающей среды на работу преобразователя из двух установленных последовательно резонаторов Фабри–Перо осуществляется в том случае, когда максимумы их спектральных коэффициентов пропускания сдвинуты друг относительно друга на половину ширины спектра, пропускаемого одним резонатором.

Основным термочувствительным элементом термооптического преобразователя является матрица пленочных микрорезонаторов Фабри–Перо, которая работает в режиме пропускания или отражения зондирующего излучения. Величину коэффициентов пропускания  $Q_{t0}(\lambda)$  и отражения  $Q_{r0}(\lambda)$  каждого микрорезонатора можно определить соответственно из следующих выражений [5]:

$$Q_{t0}(\lambda) = \frac{I_{t0}(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\phi + \Delta\phi)}, \quad (1)$$

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

При воздействии ИК излучения выражения (1) и (2) примут вид:

$$Q_{t1}(\lambda) = \frac{I_{t1}(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{T_1 T_2 T}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1 R_2} \cos(\phi + \Delta\phi + \delta\phi)}, \quad (1a)$$

$$Q_{r1}(\lambda) = \frac{I_{r1}(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{R_1 + T^2 R_2 (1 - A_1)^2 - 2T \sqrt{R_2} \sqrt{R_1} (1 - A_1) \cos(\phi + \Delta\phi + \delta\phi)}{1 + T^2 R_1 R_2 - 2T \sqrt{R_1} \sqrt{R_2} \cos(\phi + \Delta\phi + \delta\phi)}, \quad (2a)$$

где  $I(\lambda)$  – спектральное распределение интенсивности падающего света;  $I_{t0}(\lambda)$ ,  $I_{r1}(\lambda)$  – интенсивности прошедшего света в случаях соответственно отсутствия и наличия ИК излучения;  $I_{r0}(\lambda)$ ,  $I_{r1}(\lambda)$  – интенсивности отраженного света в случаях соответственно отсутствия и наличия ИК излучения;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  – коэффициенты отражения и пропускания первого и второго зеркал резонатора;  $T$  – коэффициент пропускания среды между зеркалами;

$(\phi + \Delta\phi) = \frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda} [1 + \alpha_p(\Delta T)]$ ,  $(\phi + \Delta\phi + \delta\phi) = \frac{4\pi l n \cos(\beta)}{\lambda} [1 + \alpha_p(\Delta T + \delta T)]$  – разность фаз между интерферирующими световыми волнами, наводимая соответственно в невозбужденном и в возбужденном резонаторе;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения;

$l$  – геометрическая база микрорезонатора;  $n$  – показатель преломления материала между зеркалами резонатора;  $\beta$  – угол падения зондирующего излучения;  $\alpha_p$  – коэффициент температурного преобразования оптической базы резонатора;  $\Delta T$  – величина изменения температуры в невозбужденном резонаторе;  $\delta T$  – величина изменения температуры под воздействием ИК излучения.

### Результаты и их обсуждение

В случаях отсутствия и наличия ИК излучения величину проходящего или отраженного светового потока  $\Phi_{ji}$  (где  $j = t; r$  и  $i = 0; 1$ ) и ее изменение  $\Delta\Phi_j$  можно определить из соотношений:

$$\Phi_{ji} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) Q_{ji}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$$\Delta\Phi_j = \Phi_{j1} - \Phi_{j0}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены зависимости изменения величины светового потока  $\Delta\Phi_j$ , отраженного и прошедшего через резонатор, находящийся под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры резонатора  $\Delta T$  (кривая 1). Эти зависимости соответствуют случаю, когда средняя длина волны падающего излучения соответствует спектральному максимуму пропускания резонатора. Они обладают экстремумами. Расстояние между экстремумами определяется шириной спектра падающего излучения, так как  $\delta T = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ , где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра зондирующего излучения.

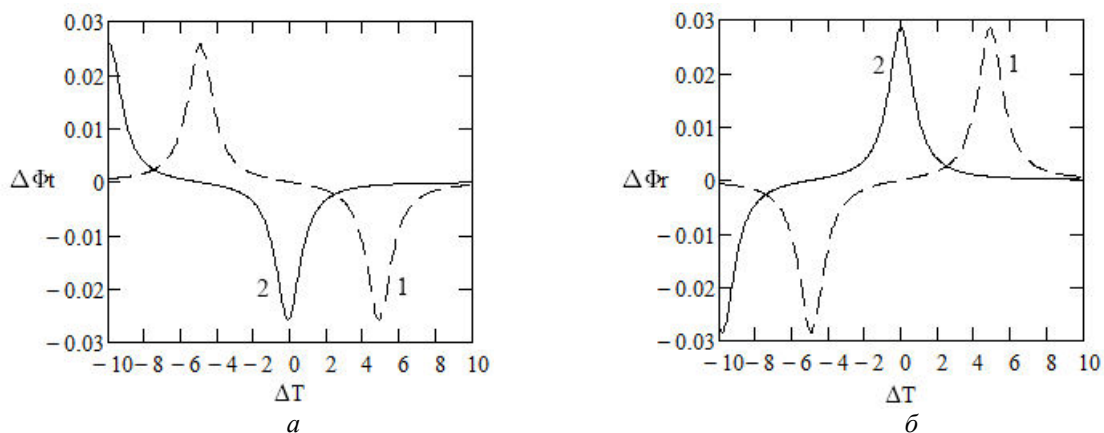


Рис. 1. Зависимости изменения величины светового потока  $\Delta\Phi_j$ , прошедшего через резонатор (а), отраженного им (б) под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры резонатора  $\Delta T$  без (кривая 1) и при наличии (кривая 2) фиксированного сдвига начальной температуры резонатора

Вблизи экстремумов величина изменения светового потока по абсолютной величине максимальна 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 изменения температуры. Чтобы реализовать это, достаточно нагреть резонатор до соответствующей температуры. При этом зависимости величины изменения светового потока  $\Delta\Phi_j$  примут вид, соответствующий кривым 2.

На рис. 2 представлены графики зависимости изменения величины светового потока  $\Delta\Phi_r$ , отраженного резонатором, находящимся под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры  $\Delta T$  материала резонатора при оптической базе резонатора, равной  $\lambda$  (кривая 1),  $2\lambda$  (кривая 2),  $4\lambda$  (кривая 3). Как видно из графиков, температурный

диапазон, при котором величина изменения светового потока  $\Delta\Phi$  практически постоянна, зависит от величины базы резонатора и может составлять, для минимальной базы резонатора, порядка десятых долей градуса. Этот температурный диапазон является динамическим температурным диапазоном микрорезонатора.

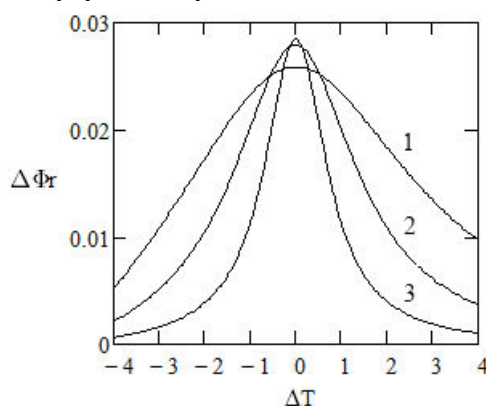


Рис. 2. Зависимости изменения величины светового потока, отраженного резонатором, находящимся под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры  $\Delta T$  материала резонатора при оптической базе резонатора, равной  $\lambda$  (кривая 1),  $2\lambda$  (кривая 2) и  $4\lambda$  (кривая 3)

В случае использования для преобразования ИК излучения двух установленных последовательно микрорезонаторов Фабри–Перо, работающих на пропускание зондирующего излучения, на один из которых падает ИК излучение (рис. 3, *a*), величину проходящего светового потока  $\Phi_{i\Sigma}$  и его изменение  $\Delta\Phi_{i\Sigma}$  можно определить из соотношений:

$$\Phi_{i\Sigma} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) Q_{i\Sigma}(\lambda) d\lambda, \quad (3a)$$

$$\Delta\Phi_{i\Sigma} = \Phi_{i1\Sigma} - \Phi_{i0\Sigma}, \quad (4a)$$

где  $Q_{i\Sigma} = Q_{i0}Q_{i1}$ ,  $Q_{i0}Q_{i1}$  – суммарный коэффициент пропускания двух установленных последовательно резонаторов соответственно в отсутствии и при наличии ИК излучения.

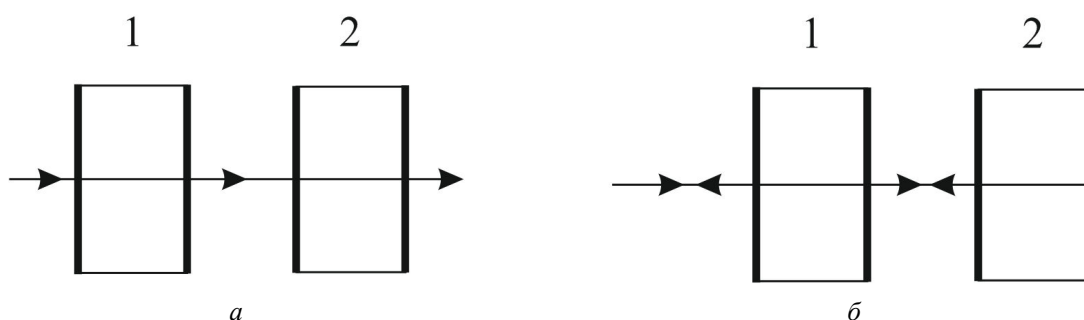


Рис. 3. Схемы преобразования ИК излучения при помощи двух микрорезонаторов Фабри–Перо: *a* – работающая на пропускание; *b* – работающая на отражение зондирующего излучения

При использовании для преобразования ИК излучения двух установленных последовательно микрорезонаторов Фабри–Перо, один из которых работает на пропускание, а другой, находящийся под воздействием ИК излучения, – на отражение зондирующего излучения (рис. 3, *b*), величину проходящего светового потока  $\Phi_{r\Sigma}$  и его изменение  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  можно определить из соотношений:

$$\Phi_{r\Sigma} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) Q_{r\Sigma}(\lambda) d\lambda, \quad (3b)$$

$$\Delta\Phi_{r\Sigma} = \Phi_{r1\Sigma} - \Phi_{r0\Sigma}, \quad (4b)$$

где  $Q_{r1\Sigma} = Q_{r0}^2 Q_{r0}$ ,  $Q_{r0}^2 Q_{r1}$  – суммарный коэффициент пропускания двух установленных последовательно резонаторов, один из которых работает на отражение соответственно в отсутствии и при наличии ИК излучения.

На рис. 4 представлены зависимости величины изменения светового потока зондирующего излучения на выходе двух резонаторов  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$ , работающих на пропускание (а) и отражение (б) под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры резонатора  $\Delta T$  без (кривая 1), при наличии (кривая 2) фиксированного сдвига начальной температуры обоих резонаторов и при наличии (кривая 3) фиксированного сдвига начальной температуры одного из резонаторов.

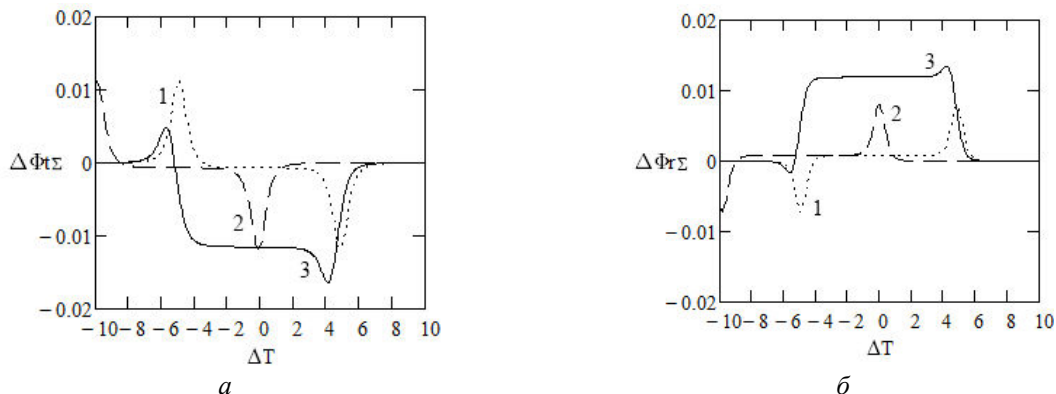


Рис. 4. Зависимости величины изменения светового потока на выходе двух резонаторов  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$ , работающих на пропускание (а) и отражение (б) под воздействием ИК излучения, от величины изменения начальной температуры резонатора  $\Delta T$  при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) фиксированного сдвига начальной температуры обоих резонаторов и при наличии (кривая 3) фиксированного сдвига начальной температуры одного из резонаторов

В случае если в обеих схемах преобразования ИК излучения отсутствует фиксированный сдвиг начальной температуры, зависимости величины изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  от изменения начальной температуры резонаторов  $\Delta T$  обладают экстремумами, как и в случае одного резонатора, но с меньшей амплитудой. Вблизи экстремумов величина изменения светового потока по абсолютной величине максимальна. Поэтому для получения более температуростабильной работы резонаторов необходимо, чтобы их начальная температура соответствовала экстремуму зависимости изменения зондирующего светового потока от изменения температуры. Чтобы реализовать это, достаточно нагреть оба резонатора до соответствующей температуры. При этом зависимости величины изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  примут вид, соответствующий кривым 2 на рис. 4. В этом случае температурный диапазон достаточно стабильной работы рассматриваемых резонаторов будет составлять десятые доли градуса, а величина изменения светового потока будет существенно меньше, чем в случае одного резонатора.

Если использовать для преобразования два установленных последовательно микрорезонатора Фабри–Перо, работающих на пропускание, причем фиксированным сдвигом начальной температуры будет обладать только один резонатор, то в этом случае зависимость величины изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  под воздействием ИК излучения будет соответствовать кривой 3, представленной на рис. 4, а. В этом случае температурный диапазон достаточно стабильной работы рассматриваемых резонаторов будет составлять порядка 6 градусов, а величина изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  будет составлять порядка 0,011 от максимального светового потока, который может пропустить резонатор. При использовании для преобразования двух установленных последовательно микрорезонаторов Фабри–Перо, один из которых будет работать на пропускание, а другой, находящийся под воздействием ИК излучения, на отражение, причем фиксированным сдвигом начальной температуры будет обладать только один резонатор, зависимость величины изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  под воздействием ИК излучения будет иметь вид, представленный кривой 3 на рис. 4, б. В этом случае температурный диапазон достаточно стабильной работы рассматриваемых резонаторов будет составлять порядка 6 градусов, а величина изменения светового потока  $\Delta\Phi_{r\Sigma}$  будет составлять порядка 0,012 от максимального светового потока, который может пропустить резонатор.

## Заклучение

Для получения более температуростабильной работы одного резонатора Фабри–Перо, работающего в качестве преобразователя информации, например, из ИК области спектра в видимую, 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.

Температурный диапазон достаточно стабильной работы двух установленных последовательно резонаторов, работающих как в режиме пропускания, так и в режиме отражения, при наличии фиксированного сдвига начальной температуры одного из них, определяется в основном шириной спектра зондирующего излучения. Причем сдвиг начальной температуры должен обеспечить смещение максимума спектрального коэффициента пропускания одного резонатора относительно максимума коэффициента пропускания или отражения другого на половину ширины спектра излучения, пропускаемого одним резонатором.

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору № Ф17-138 от 18 апреля 2017 г.*

## Список литературы

1. Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники. М.: Изд. МИИГА и К, 2011. 84 с.
2. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. 296 с.
3. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.
4. Novel low-cost uncooled infrared camera / Ming Wu [et al.] // SPIE Proc. 2005. Vol. 5783. P. 69401I-1.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

## References

1. Tarasov V.V., Jakushenkov Yu. G. Sovremennyye problemy infrakrasnoj tehniki. M.: Izd. MIIGA i K, 2011. 84 s. (in Russ.)
2. Mustel E.R., Parygin V.N. Metody moduljacji i skanirvanija sveta. M.: Nauka, 1970. 296 s. (in Russ.)
3. Yariv A., Yeh P. Opticheskie volny v kristallah. M.: Mir, 1987. 616 s. (in Russ.)
4. Novel low-cost uncooled infrared camera / Ming Wu [et al.] // SPIE Proc. 2005. Vol. 5783. P. 69401I-1.
5. Born M., Wolf E. Osnovy optiki. M.: Nauka, 1973. 720 s. (in Russ.)

## Сведения об авторах

Залесский В.Б., к.т.н., заведующий лабораторией фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Конойко А.И., к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Кравченко В.М., к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Рещиков К.А., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

## Information about the authors

Zallesski V.B., PhD, head of the photoelectronics laboratory of SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology».

Konojko A.I., PhD, associate professor, senior researcher of the photoelectronics laboratory of SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology».

Kravchenko V.M., PhD, leading researcher of the photoelectronics laboratory of SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology».

Reshikov C.A., PG student of the information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

## Адрес для корреспонденции

220090, Республика Беларусь,  
г. Минск, Логойский тракт, 22,  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»  
тел. +375-44-746-63-72  
e-mail: kon54@yandex.by  
Конойко Алексей Иванович

## Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,  
Minsk, Logoyskiy tract, 22,  
SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology»  
tel. +375-44-746-63-72  
e-mail: kon54@yandex.by  
Konojko Alexey Ivanovich