

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,  
METROLOGY  
AND INFORMATION-  
MEASURING DEVICES  
AND SYSTEMS

УДК 535-7

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126

## Экспериментальные исследования оптических резонансных систем Фабри–Перо с зеркалами полного внутреннего отражения\*

А.С. СЫРНЕВА<sup>а</sup>, Д.С. МИХАЙЛОВА<sup>б</sup>

630108, РФ, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, Сибирский государственный университет геосистем и технологий

<sup>а</sup> [aleksandra-syrneva@yandex.ru](mailto:aleksandra-syrneva@yandex.ru) <sup>б</sup> [daria-83.ru](mailto:daria-83.ru)

Практическое применение оптических резонаторов с гранями полного внутреннего отражения возможно в качестве узкополосных оптических фильтров, пригодных для исследования спектров лазерных излучателей, а также при разработках мощных миниатюрных твердотельных лазеров с повышенной оптической прочностью выходного зеркала. В статье представлены результаты экспериментального исследования характеристик разработанного оптического резонатора бегущей волны с зеркалами полного внутреннего отражения. Оптический резонатор представляет собой призму четырехгранной формы с длиной ребра 30 мм, изготовленную из стекла К8, плоскостность граней равна примерно 0,1 интерференционной полосы, погрешность выполнения углов между гранями – не более нескольких угловых секунд. Излучение вводится в оптический резонатор с помощью гелий-неонового лазера. Такой резонатор фактически представляет собой эталон Фабри–Перо с зеркалами ПВО. Отсутствие оптических потерь на зеркалах ПВО увеличило количество эффективных полных замкнутых траекторий в исследованном экспериментальном образце резонатора.

Полученные результаты подтверждают, что использование резонатора в виде четырехгранной призмы с полноотражающими гранями обеспечивает ему существенно меньшие оптические потери в сравнении с эталонами Фабри–Перо.

Практическое применение оптических резонаторов с гранями полного внутреннего отражения возможно в качестве узкополосных оптических фильтров, применимых для исследования спектров лазерных излучателей, а также при разработках мощных миниатюрных твердотельных лазеров с повышенной оптической прочностью выходного зеркала.

**Ключевые слова:** оптический резонатор, полное внутреннее отражение, многолучевая интерференция, оптическая призма, резонансная дифракция, световая волна, интерференционная картина, зеркала резонатора, полноотражающие грани

---

\* Статья получена 11 января 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке узкополосных многолучевых интерференционных оптических фильтров различных диапазонов спектра, зеркала которых обладают малыми потерями благодаря использованию эффектов полного внутреннего отражения (ПВО) света на границе прозрачных сред с различными показателями преломления.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы являются теоретические и экспериментальные исследования интерференционных эффектов в оптических резонансных системах Фабри–Перо с зеркалами полного отражения и разработка на их основе устройств многолучевой интерференционной спектроскопии с улучшенными разрешением и пропусканием в полосе пропускания.

В работе, являющейся продолжением [1–4], предлагается выполнить резонансный элемент структуры в виде резонатора бегущей волны типа «шепчущей галереи» с замкнутой траекторией волны (рис. 1). Излучение вводится в четырехгранный прозрачный резонатор через призмный элемент связи 2, отделенный от него воздушным зазором, который позволяет волне туннелировать в резонатор [5–8]. На гранях кубика волна испытывает полное внутреннее отражение, при угле преломления  $\theta = \pi/4$  траектория волны замкнутая. Часть излучения выводится из резонатора через призму ввода 2. Основная часть излучения оптически туннелирует в призму 3 и выводится через нее. Волны выходят из резонатора в одном и том же месте его грани. Если траектория имеет замкнутый характер, то нет смещения волн и накопление электромагнитной энергии при резонансе не требует увеличения протяженности зеркальной структуры.

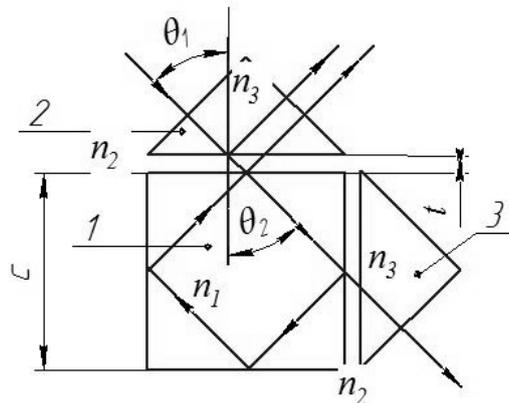


Рис. 1. Схема оптического резонатора полного внутреннего отражения

Fig. 1. Scheme of the optical resonator of total internal reflection

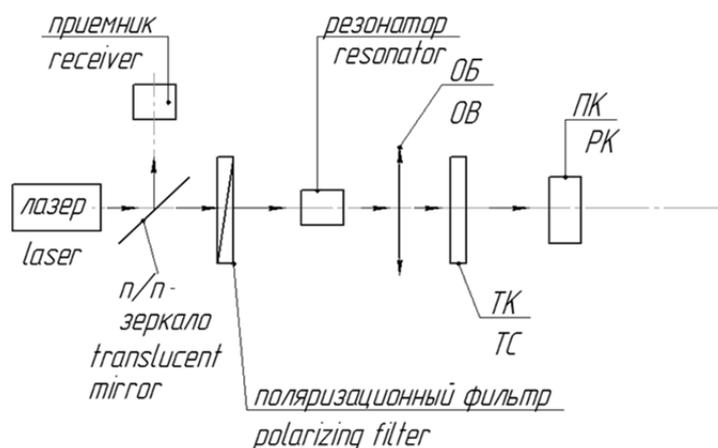


Рис. 2. Схема стенда для исследования оптического резонатора

Fig. 2. The scheme of the stand for studying the optical resonator

На рис. 2 представлена схема стенда для исследования оптического резонатора.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При экспериментальном исследовании характеристик разработанного оптического резонатора использовалось излучение непрерывного гелий-неонового лазера с шириной линии излучения порядка 1 нм. Полученная с помощью экспериментального стенда интерференционная картина была обработана в пакете прикладных программ Matlab.

С помощью этого пакета прикладных программ можно получить распределение интенсивности интерференционной картины, представленной на рис. 3, по строке, расположенной горизонтально.



Рис. 3. Изображение интерференционной картины при фокусном расстоянии камерного объектива 50 мм

Fig. 3. The image of an interference pattern at a camera lens focal length of 50 mm

При обработке экспериментальной зависимости интенсивности от номера пикселя фотоматрицы информация была сохранена в Excel и пересчитана в зависимость от координаты строки в фокальной плоскости (рис. 4).

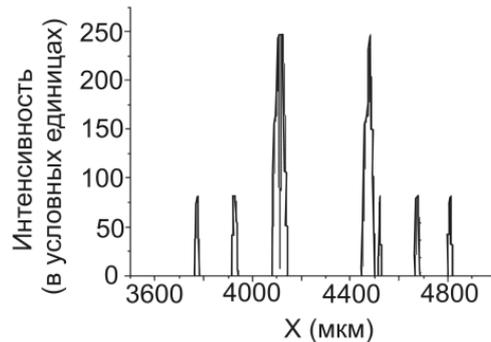


Рис. 4. График распределения интенсивности по строке интерференционной картины при фокусном расстоянии объектива 50 мм. Координата точек строки в мкм

Fig. 4. The plot of the intensity distribution along the line of the interference pattern at a lens focal length of 50 mm. The line point coordinate is in  $\mu\text{m}$

Из графика следует, что диаметр первого кольца 0,4 мм, второго – 0,75 мм.

Из представленного графика можно определить важнейшие практические характеристики интерферометра:

– резкость  $F$  (отношение расстояния между полосами интерференционной картины к их полуширине) [9–15]

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}};$$

– максимальное пропускание

$$\tau = \left( \frac{I_t}{I_i} \right)_{\max};$$

– контрастность

$$\mathfrak{K} = \left( \frac{I_t}{I_i} \right)_{\min} / \left( \frac{I_t}{I_i} \right)_{\max},$$

где  $I_i$  – интенсивность падающего излучения,  $I_t$  – интенсивность прошедшего излучения в максимуме интерференционной картины.

Понаблюдаем на различных этапах юстировок интерференционные картины, полученные при исследовании спектра излучения гелий-неонового лазера с полосой линии спектра порядка  $\delta\lambda \approx 0,1 \text{ нм}$ . Характер изображений

зависит от юстировок интерференционного устройства и коэффициентов ослабления использованных светофильтров.

Исследована интерференционная картина, получаемая резонатором при использовании линзы с фокусным расстоянием 2 м (рис. 5).



Рис. 5. Изображение интерференционной картины при фокусном расстоянии камерного объектива 2 м

Fig. 5. Image of an interference pattern at a camera lens focal length of 2 m

Из рис. 5 видно, что интерференционная картина существенно отличается от классической интерференционной картины эталонов Фабри–Перо, характеризуется наличием пересечений световой полосы темными, имеет две периодичности картины интерференционных максимумов.

С помощью пакета прикладных программ Matlab был получен график распределения интерференционной картины по строке в микрометрах, представленный на рис. 6.

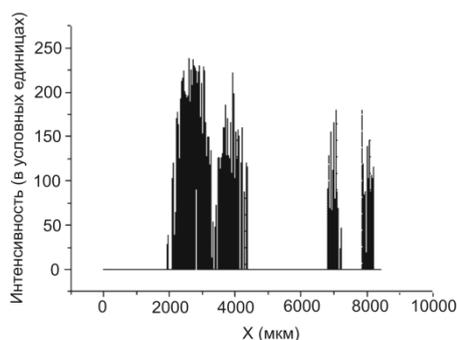


Рис. 6. График распределения интерференционной картины по строке в микрометрах при фокусном расстоянии объектива 2 м

Fig. 6. A graph of the distribution of the interference pattern along a line in micrometers at a lens focal length of 2 m

Результаты расчетов и экспериментальные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

**Теоретические и экспериментальные характеристики резонатора с полигональной призмой ( $L_0 = 127,28$  мм)**

**Theoretical and experimental characteristics of a resonator with a polygonal prism ( $L_0 = 127,28$  mm)**

Характеристики	$f = 0,05$ м	$f = 2$ м
$\mathcal{F}$	300	30
$\Delta\lambda$ , м	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$
$\delta\lambda$ , м	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$
$D_1$ , мм	0,37	–
$D_2$ , мм	0,60	–
$D_3$ , мм	0,77	–
$\Delta x$ , мкм	–	30,8
$\mathcal{F}$	324	10,31
$\Delta\lambda_{\text{экс}}$ , м	$9,4 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$
$\delta\lambda$ , м	$2,9 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
$D_1$ , мм	0,42	–
$D_2$ , мм	0,66	–
$D_3$ , мм	0,79	–
$\Delta x$ , мкм	–	49

На рис. 7 представлена оптическая схема измерения коэффициента пропускания лазерного излучения оптическим резонатором.

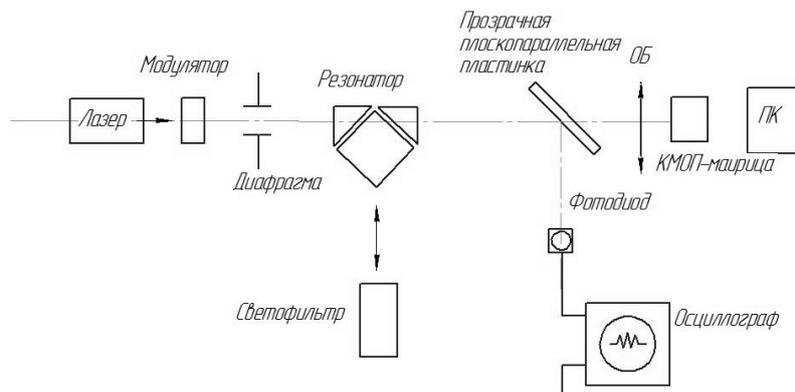


Рис. 7. Оптическая схема измерения коэффициента пропускания лазерного излучения оптическим резонатором

Fig. 7. Optical scheme for measuring the transmittance of laser radiation by an optical resonator

Луч лазера, пройдя модулятор и апертуру, попадает в резонатор. Потом с помощью прозрачной пластинки часть излучения отражается и попадает на фотодиод. Модулятор выполнен в виде электромеханической заслонки,

прерывающей ход излучения. Сигнал с фотодиода фиксируется осциллографом.

Если вместо резонатора на пути лазерного излучения установлен светофильтр, то к фотодиоду проходит световой поток мощностью  $P_1 = K_1 K_2 I_0$ , где  $I_0$  – интенсивность лазерного излучения,  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты пропускания светофильтра и прозрачной пластинки. Заменяв светофильтр на резонатор, получим  $P_2 = K_2 K_3 I_0$ , где  $K_3$  – коэффициент пропускания резонатора.

Для определения коэффициента пропускания резонатора он убирался из схемы, а на его место подбирались светофильтры, обеспечивающие прежнюю величину сигналов на экране осциллографа.

Коэффициент пропускания резонатора был измерен при различных настройках положения призм ввода и вывода излучения. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

**Результаты измерения коэффициента пропускания резонатора**

**Results of measuring the resonator transmittance**

№ п/п	$U_{1c}$	$U_{2c}$	$K_\phi$
$L = 28,28$ мм			
1	0,25	0,0225	0,09
2	0,25	0,0175	0,07
$L = 127,28$ мм			
1	0,25	0,075	0,30
2	0,25	0,625	0,25

Установлено, что коэффициент пропускания резонатора равен 0,09 ( $L = 28,28$  мм) и 0,3 ( $L = 127,28$  мм).

В связи с полученными экспериментальными результатами возникла необходимость исследовать четырехгранную призму, выполняющую роль резонатора на параллельность сторон. Непараллельность граней призмы была исследована с помощью гониометра Г5М, полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

**Погрешности углов четырехгранной призмы со стороной 10 мм**

**Errors of angles of a four-sided prism with a side of 10 mm**

Грань призмы	Угол отклонения грани, градусы / радианы
1	0°2'17" / 0,0007
2	0°1'48" / 0,0005
3	0°1'55" / 0,0006
4	0°2'42" / 0,0008

Также был исследован оптический резонатор, состоящий из входной и выходной призмы и четырехгранной призмы со сторонами 30 мм.

В табл. 4 приведены данные по погрешности изготовления четырехгранной призмы со стороной 30 мм.

Таблица 4

Table 4

**Погрешности углов четырехгранной призмы со стороной 30 мм**

**Errors of angles of a tetrahedral prism with a side of 30 mm**

Грань призмы	Угол отклонения грани, градусы / радианы
1	0°0'3,24" / 0,0000157
2	0°0'3,96 / 0,0000191
3	0°0'3,24" / 0,0000157
4	0°0'3,96 / 0,0000191

Также была исследована зависимость пропускания четырехгранного резонатора от времени нагрева резонатора. Излучение от лазера попадало на четырехгранный резонатор, состоящий из входной и выходной призм и призмы квадратного сечения со стороной 30 мм. Далее устанавливался объектив, в фокальной плоскости которого устанавливалась камера, формирующая изображение, которое передавалось на монитор компьютера. В ходе эксперимента сверху на резонатор устанавливался металлический стакан с водой, температура которой была 100 °С, за счет чего происходил нагрев резонатора. На рис. 8 представлена зависимость интенсивности выходящего из резонатора излучения от времени нагрева.

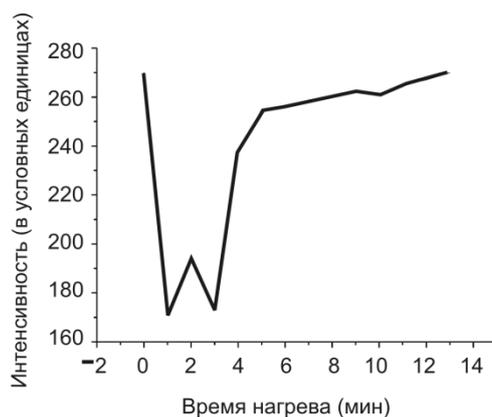


Рис. 8. Зависимость интенсивности от нагрева резонатора

Fig. 8. Dependence of intensity on the resonator heating

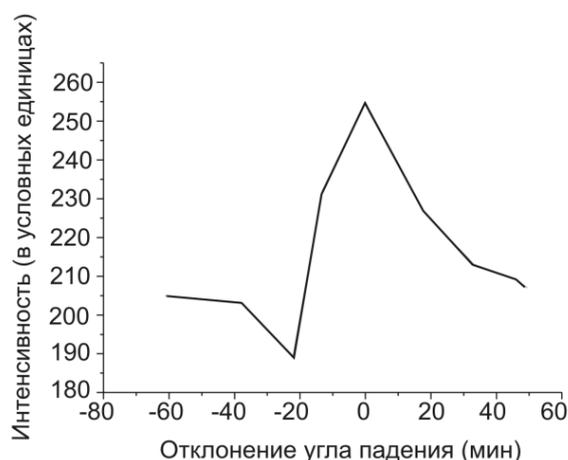


Рис. 9. График зависимости интенсивности от угла поворота резонатора

Fig. 9. Intensity versus the resonator rotation angle

Также исследовалась зависимость изменения интенсивности резонатора от угла поворота резонатора (рис. 9). Резонатор, установленный на столике гониометра, поворачивался относительно падающего излучения на  $1^\circ$  по часовой стрелке и против часовой стрелки от нормального угла падения лазерного излучения на входную грань призмы резонатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как представляется авторам, рассматриваемый оптический резонатор может быть применен в качестве резонаторов лазерных излучателей, так как отсутствие потерь в зеркалах резонаторов позволит увеличить выводимую через зеркала мощность генерируемого излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырнева А.С. Краевой эффект в фильтрах терагерцового диапазона, использующих нарушенное полное внутреннее отражение // ГЕО-Сибирь – 2010: сборник материалов VI Международного научного конгресса. – Новосибирск, 2010. – Т. 5, ч. 2. – С. 85–89.
2. Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В. Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы X Международной конференции АПЭП-2010. – Новосибирск, 2010. – Т. 7. – С. 95–97.
3. Патент 2455669 Российская Федерация. Оптический резонатор / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева. – № 2010143257/28; заявл. 21.10.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.
4. Сырнева А.С., Райхерт В.А. Оптический резонатор полного внутреннего отражения с возможностью компенсации угловых положений его граней // СибОптика – 2014: сборник материалов X Международного конгресса. – Новосибирск, 2014. – Т. 1. – С. 113–116.
5. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. – Таллин: Валгус, 1971. – 233 с.

6. Иогансен Л.В. Резонансная дифракция волн в слоисто-неоднородных средах // ЖЭТФ. – 1961. – Т. 40, вып. 6.
7. Иогансен Л.В. Теория резонансных электромагнитных систем с полным внутренним отражением // ЖТФ. – 1962. – Т. 32., вып. 4. – С. 406–418.
8. Иогансен Л.В., Глобенко Ю.В. Теория резонансных слоисто-неоднородных сред электромагнитных систем с полным внутренним отражением // Известия вузов. Радиофизика. – 1976. – Т. 19, № 2. – С. 256–262.
9. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Физматлит, 1958. – 570 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
11. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
12. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
13. Терентьев В.С. Численное моделирование волоконного отражательного дифракционного интерферометра // Автометрия. – 2012. – № 4. – С. 41–54.
14. Голдина Н.Д. Расчет коэффициента отражения металл-диэлектрических структур при нарушенном полном внутреннем отражении // Автометрия. – 2009. – № 12. – С. 99–104.
15. Патент 1265678 СССР. Интерференционный фильтр полного внутреннего отражения / Г.Б. Шоломицкий. – № 3908062; заявл. 11.06.1985; опубл. 23.10.1986.

*Сырнева Александра Сергеевна*, старший преподаватель кафедры физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов – многолучевая интерференция. E-mail: [aleksandra-syrneva@yandex.ru](mailto:aleksandra-syrneva@yandex.ru).

*Михайлова Дарья Сергеевна*, старший преподаватель кафедры физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов: многолучевая интерференция, спектроскопия. E-mail: [daria-83@mail.ru](mailto:daria-83@mail.ru).

*Syrneva Alexander S.*, senior lecturer at the department of Physics Siberian State University of Geosystems and Technologies. The area of his scientific interests includes multiple-beam interference and spectroscopy. E-mail: [aleksandra-syrneva@yandex.ru](mailto:aleksandra-syrneva@yandex.ru).

*Mikhailova Daria S.*, senior lecturer at the department of Physics. The area of her scientific interests covers multiple-beam interference and spectroscopy. E-mail: [daria-83@mail.ru](mailto:daria-83@mail.ru).

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126

**Experimental research into optical resonance of Fabry–Perot systems with total internal reflection mirrors\***A.S. SYRNEVA<sup>a</sup>, D.S. MIKHAILOVA<sup>b</sup>*Siberian State University of Geosystems and Technologies; 10, Plakhotny Street, Novosibirsk, 630108, Russian Federation*<sup>a</sup> *aleksandra-syrneva@yandex.ru*    <sup>b</sup> *daria-83.ru***Abstract**

Practical application of optical resonators with full internal reflection edges is possible as narrow-band optical filters suitable for studying the spectra of laser emitters, as well as for the development of powerful miniature solid-state lasers with increased optical strength of the output mirror. In this article, we present the results of an experimental study of the characteristics of the developed traveling-wave optical resonator with mirrors of total internal reflection (TIR). The optical resonator is a prism of a quadrangular shape with a rib length of 30 mm made of the K8 glass, the flatness of the faces is approximately 0.1 interference fringe, an error in performing angles between the faces is not more than a few angular seconds. Radiation is introduced into the optical resonator, using a helium-neon laser. Such a resonator, in fact, is a Fabry-Perot etalon with TIR mirrors. The absence of optical losses on the TIR mirrors increased the number of effective complete closed trajectories in the experimental resonator sample studied.

The obtained results confirm that the use of a resonator, in the form of a four-faceted prism with fully reflecting facets, provides it with substantially less optical losses than Fabry-Perot etalons.

Practical applications of optical resonators with full internal reflection edges are possible as narrow-band optical filters applicable for studying the spectra of laser emitters, as well as for the development of powerful miniature solid-state lasers with increased optical strength of the output mirror.

**Keywords:** optical resonator, full internal reflection, multi-beam interference, optical prisms, resonant diffraction, light wave, interferential picture, the resonator mirrors, full-reflecting facet

**REFERENCES**

1. Syrneva A.S. [Regional effect in of terahertz radiation filters using the effect of broken total internal reflection]. *GEO-Sibir' – 2010: sbornik materialov VI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Siberia – 2010. Collection of materials of the VI International Scientific Congress]. Novosibirsk, 2010, vol. 4., pt. 1, pp. 85–89. (In Russian).
2. Chesnokov V.V., Syrneva A.S., Chesnokov D.V. [Optical resonators of total internal reflection with a traveling wave]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii APEP-2010* [Proceedings of 10<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2010)]. Novosibirsk, 2010, vol. 7, pp. 95–97. (In Russian).
3. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Syrneva A.S. *Opticheskii rezonator* [Optical resonator]. Patent RF, no. 2455669, 2012.
4. Syrneva A.S., Reichert V.A. [Optical resonator of total internal reflection with who options angular provisions of its faces]. *SibOptika – 2014: sbornik materialov X Mezhdunarodnogo kongressa* [SibOptika 2014 International Conference: a collection of materials]. Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 113–116. (In Russian).

---

\* Received 11 January 2019.

5. Card P.G. *Analiz i sintez mnogosloinykh interferentsionnykh plenok* [Analysis and synthesis of multilayer interference films]. Tallinn, Valgus Publ., 1971. 233 p. (In Russian).
6. Johansen L.V. Rezonansnaya difraktsiya voln v sloisto-neodnorodnykh sredakh [Resonance diffraction of waves in layered-inhomogeneous media]. *Zhurnal eksperimental'noi i teore-ticheskoi fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1961, vol. 40, iss. 6.
7. Johansen L.V. Teoriya rezonansnykh elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [The theory of resonant electromagnetic systems with total internal reflection]. *Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki – Soviet Physics: Technical Physics*, 1962, vol. 32, iss. 4, pp. 406–418.
8. Johansen L.V., Globenko Yu.V. Teoriya rezonansnykh sloisto-neodnorodnykh sred elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [Theory of resonance of layered non-uniform environments electromagnetic systems with total internal reflection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*, 1976, vol. 1, no. 2, pp. 256–262. (In Russian).
9. Rozenberg G.V. *Optika tonkosloinykh pokrytii* [Optics of thin-layer coatings]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958. 570 p.
10. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of optics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p. (In Russian).
11. Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. *Fizicheskaya optika* [Physical optics]. Moscow, MSU Publ., 1998. 656 p.
12. Skokov I.V. *Mnogoluchevye interferometry v izmeritel'noi tekhnike* [Multibeam interferometers in measurement technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 256 p.
13. Terent'ev V.S. Chislennoe modelirovanie volokonnoogo otrazhatel'nogo difraktsionnogo interferometra [Numerical simulation of a reflective diffraction fiber interferometer]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, no. 4, pp. 41–54. (In Russian).
14. Goldina N.D. Raschet koeffitsienta otrazheniya metall-dielektricheskikh struktur pri naru-shennom polnom vnutrennem otrazhenii [Calculation of the reflection coefficient of metal-dielectric structures in the disturbed total internal reflection]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, no. 12, pp. 99–104. (In Russian).
15. Sholomitskii G.B. *Interferentsionnyi fil'tr polnogo vnutrennego otrazheniya* [Interference filter of total internal reflection]. Patent SU 1265678, 1986.

Для цитирования:

Сырнева А.С., Михайлова Д.С. Экспериментальные исследования оптических резонансных систем Фабри–Перо с зеркалами полного внутреннего отражения // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 115–126. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126.

For citation:

Syrneva A.S., Mikhailova D.S. Eksperimental'nye issledovaniya opticheskikh rezonansnykh sistem Fabri-Pero s zerkalami polnogo vnutrennego otrazheniya [Experimental researches of optical resonance Fabry–Pero systems with mirrors of full internal reflection]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 115–126. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126.