

УДК 535.41

В.С. Терентьев, В.А. Симонов

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

**ВОЛОКОННЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ
СТРУКТУРЫ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ МОД ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность получения необращенной аппаратной функции в отраженном свете от волоконного интерферометра типа Фабри–Перо – отражательного интерферометра – с использованием полностью диэлектрических фазовых структур и без использования омически поглощающих элементов, значительно снижающих лучевую стойкость структуры его переднего зеркала. Проведен численный поиск приближения теоретического профиля к экспериментальному с помощью формул аппаратной функции в приближении плоских волн. Результаты приближения подтверждают предположение об асимметричном отражении переднего зеркала экспериментального образца, а также с хорошей точностью подтверждают и другие параметры резонатора. Данный образец отражательного интерферометра имеет предельно возможную лучевую стойкость из-за использования в его структуре только непоглощающих диэлектрических материалов и может применяться для селекции мод в лазерном линейном резонаторе в качестве одного из зеркал с такими же ограничениями по мощности излучения, как для волоконного интерферометра Фабри–Перо.

Ключевые слова: многолучевая интерференция, отражательный интерферометр, дифракция, лазерный резонатор, волоконные лазеры, диодные лазеры.

V.S. Terent'ev, V.A. SimonovInstitute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**FIBER REFLECTION INTERFEROMETER BASED
ON DIELECTRIC DIFFRACTIVE STRUCTURE FOR MODE
SELECTION IN FIBER LASER**

The paper demonstrates the possibility to obtain non-inverted response function in reflected light of Fabry–Perot-like fiber multibeam interferometer – reflection interferometer – with fully dielectric mirrors. The absence of metal layers with Ohmic absorption in front mirror structures leads to significant increase of its radiation resistance. Approximation of theoretical profile to experimental one is performed in plane waves approach. Approximation results prove the assumption that front mirror sample has asymmetric reflection, also they confirm other interferometer's parameters. This reflection interferometer's sample has supreme radiation resistance because of non-absorbing dielectric materials in its structure, and it can be applied for mode selection in linear laser cavity as a mirror with power limitations similar to those for fiber Fabry–Perot interferometer.

Keywords: multiple-beam interference, reflection interferometer, diffraction, laser resonator, fiber lasers, diode lasers.

Статья подготовлена по материалам доклада на Российском семинаре по волоконным лазерам – 2016.

Введение

Отражательные многолучевые интерферометры (ОИ) [1] – это интерферометры с двухзеркальным резонатором, аналогичным интерферометру Фабри–Перо (ИФП) (рис. 1, а). Как известно, спектральное пропускание ИФП (T) имеет вид функции Эйри (узкие спектральные полосы высокого пропускания и широкие – низкого пропускания) (рис. 1, б), в отражении же (R) имеется необращенный профиль, что затрудняет использовать ИФП без дополнительных оптических элементов в качестве селектора продольных мод в лазерных резонаторах из-за широкополосного спектрального отражения.

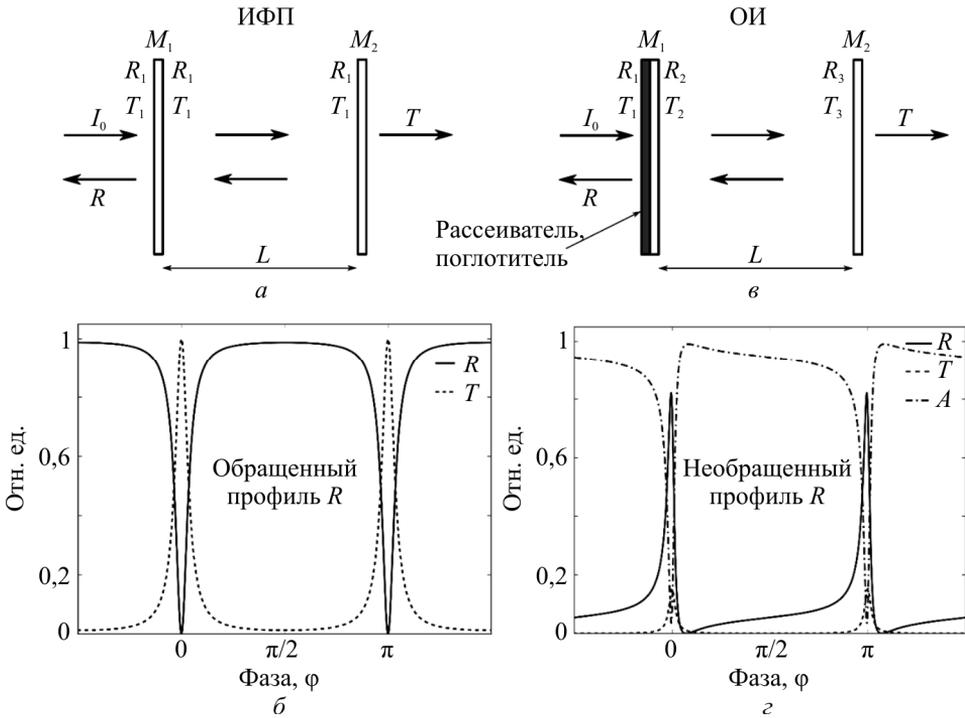


Рис. 1. Сравнение интерферометров Фабри–Перо и отражательного многолучевого интерферометра: а – схема ИФП; б – аппаратные функции ИФП; в – схема ОИ; г – аппаратные функции ОИ с кривой потерь ($A = 1 - R - T$); R – отражение; T – пропускание интерферометров; φ – зеркала, $\varphi = 2\pi L/\lambda M_{1,2}$; R_1, T_1 – коэффициенты отражения и пропускания зеркала M_1 со стороны падения света, R_2, T_2 – со стороны резонатора; R_3, T_3 – коэффициент отражения и пропускания зеркала M_2 со стороны резонатора

ОИ может иметь необращенную спектральную форму полос в отражении, аналогичную ИФП в пропускании, из-за использования в переднем зеркале ОИ поглощающего или рассеивающего свет элемента

(рис. 1, в), что делает переднее зеркало ОИ M_1 сильно асимметричным по коэффициенту отражения для бегущей световой волны: он очень мал со стороны источника света и близок к единице со стороны, обращенной в резонатор ($R_1 \ll R_2$). Форма полос ОИ в отражении R более сложная, и в общем случае она асимметрична (рис. 1, з). Можно добиться и симметричной («трансмиссионной») формы профиля R , т.е. аналогичной пропусканию ИФП, если $R_1 = 0$. В оптической схеме ОИ всегда присутствуют потери $A > 0$, хотя можно добиться их снижения практически до нуля. В отличие от ИФП, заднее зеркало ОИ M_2 должно иметь максимальный коэффициент отражения ($R_3 = 1$), чтобы обеспечить коэффициент отражения ОИ близким к единице. В общем случае максимальный коэффициент отражения ОИ меньше единицы, что обусловлено потерями. Подбором параметров селектора, находящегося в зеркале M_1 , можно добиться пренебрежимо малого отличия максимального отражения ОИ от единицы.

Следует также заметить, что, в отличие от рис. 1, б, форма полос в отражении у реального ИФП практически всегда асимметрична, так как в его зеркалах всегда присутствуют потери, связанные с паразитным поглощением или рассеянием света. Напротив, эти потери не оказывают влияния на симметрию формы полос в пропускании ИФП, и аппаратная функция всегда симметрична, если оптическая система идеально отъюстирована.

Ранее ОИ применялись для селекции мод газовых лазеров с объемными резонаторами [2]. Существенное преимущество ОИ не только перед ИФП [3], но и, возможно, перед другими методами селекции мод, такими как волоконные брэгговские решетки [4], лазеры с распределенной обратной связью [5], многокольцевыми волоконными резонаторами на основе эффекта Вернье [6] или микрооптическими устройствами с дифракционными решетками [7], состоит в том, что при работе в отраженном свете имеется возможность, используя ОИ в качестве одного из зеркал в линейном резонаторе лазера, на порядки уменьшать длину резонатора по сравнению с вышеупомянутыми методами, тем самым увеличивая частотное расстояние между собственными модами резонатора. Последнее дает возможность получать генерацию на одной продольной моде даже при сравнительно скромных селектирующих возможностях ОИ [8]. Применение ОИ в волоконной оптике дает возможность получать перестраиваемые в широком спектральном диапазоне (>100 нм) лазерные источники, генерирующие одну продольную моду.

Сравнительно недавно начаты работы по внедрению технологии ОИ в волоконную оптику, и создан волоконный прототип ОИ в одномодовом волокне для использования в спектральном диапазоне 1500–1600 нм [9]. Недостаток такого варианта волоконного ОИ состоит в том, что его работа основана на омическом поглощении света в металлической (никелевой) пленке, что ограничивает лучевую стойкость переднего зеркала всего несколькими милливаттами излучения.

Для уменьшения тепловой нагрузки были предложены варианты волоконных ОИ [10, 11], в которых не вся энергия омически поглощается в пленке, но часть рассеивается за счет дифракции на структуре в составе переднего зеркала.

На данный момент дифракционные варианты волоконных ОИ являются наиболее перспективными с точки зрения получения приемлемых мощностей генерации в волоконных лазерах. Однако технология создания дифракционных согласованных структур в волоконных устройствах еще не разработана, несмотря на попытки [12]. В данной работе демонстрируется, что существует возможность практически изготовить дифракционный аналог волоконного ОИ. Это доказывают экспериментальные результаты, полученные с поврежденным зеркалом.

1. Теория отражательных многолучевых интерферометров

Для понимания общих принципов функционирования ОИ приведем формулы его аппаратной функции коэффициента пропускания T и отражения R в приближении плоских волн (рис. 2):

$$T = \frac{T_1 T_3}{1 + R_2 R_3 - 2(R_2 R_3)^{1/2} \cos(2\psi)}, \quad (1)$$

$$R = R_1 + 2T_1 (R_1 R_3)^{1/2} \frac{\cos(\theta + 2\psi) - (R_2 R_3)^{1/2} \cos(\theta)}{1 + R_2 R_3 - 2 \cos(2\psi) (R_2 R_3)^{1/2}} + \frac{R_3 T_1^2}{1 + R_2 R_3 - 2 \cos(2\psi) (R_2 R_3)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $\psi = 2\pi L/\lambda - (\Psi_3 + \Psi_3)/2$; $\theta = \Psi_1 + \Psi_2 - 2\Phi_1$; $R_{1,2}$, $\Psi_{1,2}$ – коэффициенты отражения и их фазы для зеркала M_1 соответственно (см. рис. 2); $T_1 = T_2$, $\Phi_1 = \Phi_2$ – коэффициенты пропускания и их фазы зеркала M_1 со-

ответственно; R_3 , T_3 – коэффициенты отражения и пропускания для зеркала M_2 соответственно.

В частном случае, когда $R_1 = R_2 = 1 - T_1 = 1 - T_2$, то формулы (1), (2) описывают аппаратные функции ИФП. В общем же случае правая часть уравнения (2) для R состоит из трех членов, два из которых включают отражение R_1 . Если R_1 стремится к нулю, то остается только третий член в отражении, который с точностью до константного множителя эквивалентен коэффициенту пропускания T . На практике достаточно трудно занулить R_1 , поэтому в основном всегда есть небольшая добавка от первых двух членов, что приводит к асимметрии профиля аппаратной функции ОИ. На асимметрию влияет комбинированная фаза θ (фаза Ами) фаз отражения и пропускания зеркала M_1 , если она отличается от величины $(2m + 1)\pi$, характерной для непоглощающих зеркал.

Формулы (1), (2) наиболее полно описывают аппаратные функции R и T двухзеркального многолучевого интерферометра. В них подразумевается произвольность выбора параметров $R_{1, 2, 3}$, $T_{1, 2, 3}$ и θ с условиями выполнения закона сохранения энергии $R + T \leq 1$ для всего интерферометра, а также для каждого из зеркал в отдельности. Эти параметры определяются структурой многослойного диэлектрического, металло-диэлектрического или дифракционно-диэлектрического покрытия зеркал $M_{1, 2}$.

2. Изготовленный образец волоконного ОИ

На рис. 2, а представлена оптическая схема волоконного ОИ, собранного на основе ферул, центрирующей цилиндрической пружины и одномодового волокна (SMF-28e). Зеркала $M_{1, 2}$ имели коэффициент отражения около 70 % и были сформированы пятислойными четверть-волновыми покрытиями TiO_2 , SiO_2 . Зеркала и резонатор ОИ формировались поэтапно. На первом этапе волокна клеивались в ферулы на канадский бальзам с помощью температурного нагрева, затем торцы ферул полировались на шлифовальной машинке. После этого на торцы в вакуумной магнетронной установке в разряде аргона и кислорода (с парциальными давлениями 3:1 соответственно, 4 мм рт. ст. общего давления) наносились тонкослойные покрытия с катодов из титана и кремния. При нанесении кремния наблюдается его горение, в результате чего очень быстро повышалась температура до 160 °С. Повышение температуры, с одной стороны, способствовало образованию более

стойких покрытий, а с другой – приводило к паразитному эффекту расплавления и вытекания канадского бальзама из канала ферулы на торец волокна. В связи с этим покрытия получились достаточно хрупкими. После формирования покрытий одно из волокон нагревалось выше температуры плавления канадского бальзама. Когда волокно расклеивалось, его вводили в канал другой ферулы на нужную длину (около 200 мкм). Далее волокно остывало и заклеивалось на канадский бальзам в новой феруле, обламывалось и полировалось, при этом его длина сокращалась. Таким образом, формировался короткий резонатор, длина которого могла изменяться вплоть до 10 мкм путем стачивания торца на шлифовальной машинке. Затем ферулы с зеркалом и резонатором сводились в керамическом центраторе. При столкновении с торцом резонатора переднее зеркало M_1 было повреждено и случайным образом отслоилось в области световедущей сердцевины (рис. 2, б). Это отслоение подразумевает появление рассеяния внутри резонатора, что привело к спектральной селективности излучения в отражении (рис. 3).

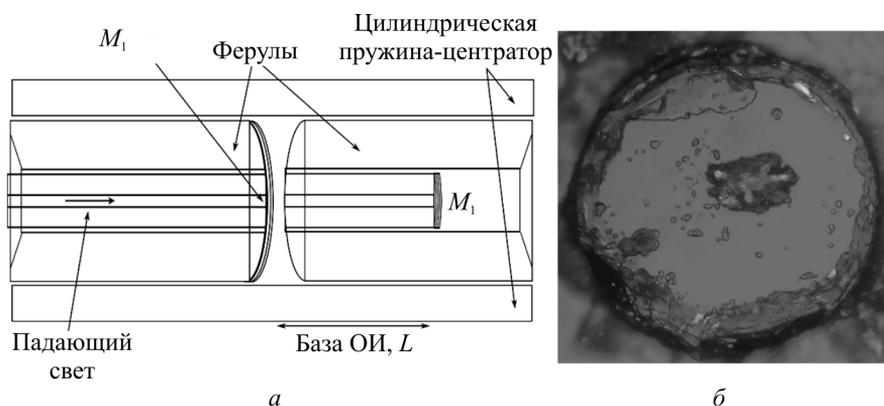


Рис. 2. Схема волоконного ОИ (а), фотография поврежденного зеркала на торце (б)

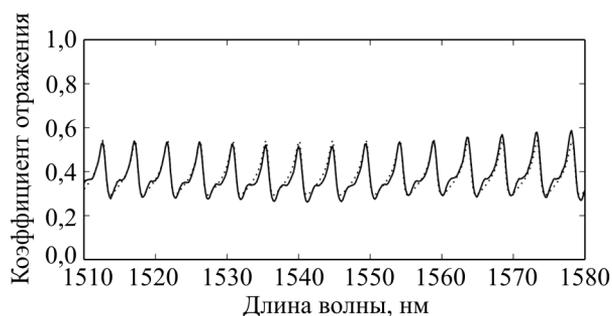


Рис. 3. Спектр отражения волоконного ОИ

3. Описание экспериментальной установки

Изготовленный образец исследовался по отражению на установке, представленной на рис. 4. Был использован универсальный спектроанализаторный модуль, состоящий из суперлюминесцентного диода (СЛД) и оптического спектроанализатора (ОСА) на основе линейки фотодетекторов (512 элементов). Свет СЛД имел спектральную ширину в диапазоне 1500–1600 нм, который освещал ОИ по одномодовому волокну. Отраженный свет фиксировался ОСА.

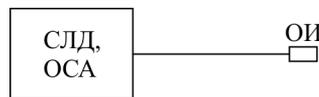


Рис. 4. Экспериментальная схема измерения отражения от ОИ: СЛД – суперлюминесцентный диод 1500–1600 нм; ОСА – спектроанализатор

4. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 3 сплошной линией показан измеренный спектр отражения образца. Он имеет острые пики, которые потенциально уже в данном варианте могли бы быть использованы для селекции продольных мод (или мультиволновой генерации) в лазерном диоде или полупроводниковом оптическом усилителе, если бы ОИ использовался в качестве одного из зеркал.

В то же время у профиля недостаточно хороший контраст. Стоит сказать о низкой воспроизводимости эксперимента из-за случайности факторов образования согласованной дифракционной структуры. Тем не менее данный профиль получен впервые и создает предпосылки для разработки волоконного ОИ без использования поглощательных элементов. Предполагается в дальнейшем использовать предварительно модифицированный торец волокна (например, абляцией фемтосекундными лазерными импульсами), на который наносить отражательное покрытие. Предстоит провести исследование по формированию параметров абляции, необходимых для получения необращенных полос в отраженном свете ОИ.

Пунктиром на рис. 3 показана расчетная кривая, которая получилась из численного приближения расчетного профиля R из формулы (2) к экспериментальному с помощью метода наименьших квадратов путем варьирования параметров $R_{1,2,3}$, $\Psi_{1,2,3}$, T_1 , Φ_1 , L (функция `curve_fit` из пакета `scipy` языка `python 2.7`). Полученные значения соответствуют ожидаемым величинам: $R_1 = 0,081$; $\Psi_1 = 17,7$ рад; $R_2 = 0,393$; $\Psi_2 = -25,6$ рад; $T_1 = 0,576$; $\Phi_1 = -5,69$ рад; $R_3 = 0,668$; $\Psi_3 = -31,1$ рад; $L = 174,6$ мкм (фазы

можно редуцировать до 2π). Численное моделирование показывает асимметрию коэффициента отражения $R_1 < R_2$. Коэффициент отражения R_3 близок к определенному из независимых измерений. При этом, несмотря на то что зеркала M_1 и M_2 изначально были близки по коэффициенту отражения, после повреждения параметры первого зеркала изменились в худшую сторону. База L достаточно точно была определена путем подгонки пиков, при этом предполагалось, что коэффициент преломления волокна $n = 1,46$. Возможно, приближенные вычисления по формуле (2) не описывают точной формы экспериментального профиля, так как не учитывают нюансов многомодовой интерференции и дифракции в волокне на стыке двух волокон, а также дисперсионных зависимостей материалов, геометрической несоосности в расположении сердцевин и др.

Заключение

Основной результат данной работы заключается в том, что впервые экспериментально продемонстрирована возможность получения необращенной аппаратной функции в отраженном свете от волоконного интерферометра типа Фабри–Перо – отражательного интерферометра – с использованием полностью диэлектрических фазовых структур и без использования омически поглощающих элементов. Это значительно повышает лучевую стойкость структуры его переднего зеркала. Проведен численный поиск приближения теоретического профиля отражения интерферометра к экспериментальному с помощью формул аппаратной функции в приближении плоских волн. Результаты приближения показывают асимметрию отражения переднего зеркала экспериментального образца, а также с хорошей точностью подтверждают и другие параметры резонатора.

Представленный образец отражательного интерферометра имеет предельно возможную лучевую стойкость из-за использования в структуре его зеркал только непоглощающих диэлектрических материалов и может применяться для селекции мод в лазерном линейном резонаторе в качестве одного из зеркал с такими же ограничениями по мощности излучения, как для волоконного интерферометра Фабри–Перо.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00118).

Список литературы

1. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. – Новосибирск: Наука, 1985. – 208 с.
2. Троицкий Ю.В. Одночастотная генерация в газовых лазерах. – Новосибирск: Наука, 1975. – 159 с.
3. Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy / H.Y. Ryu, W.-K. Lee, H.S. Moon, H.S. Suh // *Optics Communications*. – 2007. – № 275. – P. 379–384.
4. Hsu K., Yamashita S. Single-polarization generation in fiber Fabry–Perot laser by self-injection locking in short feedback cavity // *Journal of Lightwave Technology*. – 2001. – № 19 (4). – P. 520–526.
5. Single-frequency and single-polarization DFB fiber laser based on tapered FBG and self-injection locking / B. Yin, S. Feng, Z. Liu, Y. Bai, S. Jian // *IEEE Photonics Journal*. – 2015. – № 7 (3). – P. 1501909-9.
6. Li A., Huang Q., Bogaerts W. Design of a single all-silicon ring resonator with a 150 nm free spectral range and a 100 nm tuning range around 1550 nm // *Photonics Research*. – 2016. – № 4 (2). – P. 84–92.
7. Shirazi M.F., Jeon M., Kim J. 850 nm centered wavelength-swept laser based on a wavelength selection galvo filter // *Chinese Optics Letters*. – 2016. – № 14 (1). – P. 011401.
8. Терентьев В.С., Симонов В.А. Селекция излучения волоконного лазера с линейным резонатором с помощью отражательного интерферометра // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43, № 8. – С. 706–710.
9. Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers // *Optic Express*. – 2016. – Vol. 24, № 5. – P. 4512–4518.
10. Терентьев В.С. Численное моделирование волоконного отражательного дифракционного интерферометра // *Автометрия*. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 41–54.
11. Терентьев В.С., Симонов В.А. Численное моделирование волоконного отражательного фильтра на основе металлодиэлектрической дифракционной структуры с повышенной лучевой стойкостью // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46, № 2. – С. 142–146.
12. Terentiev V.S., Dostovalov A.V., Simonov V.A. Reflection interferometers formed on the single-mode fiber tip // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23. – P. 085108 (5 p).

Referenses

1. Troitskii Iu.V. *Mnogoluchevye interferometry otrazhennogo sveta* [Multibeam interferometers of reflected light]. Novosibirsk: Nauka, 1985. 208 p.
2. Troitskii Iu.V. *Odnochastotnaia generatsiia v gazovykh lazerakh* [Single-frequency oscillation in gas lasers]. Novosibirsk: Nauka, 1975. 159 p.
3. Ryu H.Y., Lee W.-K., Moon H.S., Suh H.S. Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy. *Optics Communications*, 2007, no. 275, pp. 379-384.
4. Hsu K., Yamashita S. Single-polarization generation in fiber Fabry–Perot laser by self-injection locking in short feedback cavity. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, no. 19 (4), pp. 520-526.
5. Yin B., Feng S., Liu Z., Bai Y., Jian S. Single-frequency and single-polarization DFB fiber laser based on tapered FBG and self-injection locking. *IEEE Photonics Journal*, 2015, no. 7 (3), pp. 1501909-9.
6. Li A., Huang Q., Bogaerts W. Design of a single all-silicon ring resonator with a 150 nm free spectral range and a 100 nm tuning range around 1550 nm. *Photonics Research*, 2016, no. 4 (2), pp. 84-92.
7. Shirazi M.F., Jeon M., Kim J. 850 nm centered wavelength-swept laser based on a wavelength selection galvo filter. *Chinese Optics Letters*, 2016, no. 14 (1), p. 011401.
8. Terent'ev V.S., Simonov V.A. Seleksiia izlucheniia volokonnoogo lazera s lineinym rezonatorom s pomoshch'iu otrazhatel'nogo interferometra [Selection of radiation with linear fiber laser resonator via reflection interferometer]. *Kvantovaiia elektronika*, 2013, vol. 43, no. 8, pp.706-710.
9. Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers. *Optic Express*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 4512-4518.
10. Terent'ev V.S. Chislennoe modelirovanie volokonnoogo otrazhatel'nogo difraktsionnogo interferometra [Numerical modeling of fiber reflective diffraction interferometer]. *Avtometriia*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 41-54.
11. Terent'ev V.S., Simonov V.A. Chislennoe modelirovanie volokonnoogo otrazhatel'nogo fil'tra na osnove metallodielektricheskoi difraktsionnoi struktury s povyshennoi luchevoi stoikost'iu [Numerical modeling of fiber reflective filter based on metal-dielectric diffractive structure with increased radiation resistance]. *Kvantovaiia elektronika*, 2016, vol. 46, no. 2, pp. 142-146.
12. Terentiev V.S., Dostovalov A.V., Simonov V.A. Reflection interferometers formed on the single-mode fiber tip. *Laser Physics*, 2013, vol. 23, p. 085108.