

УДК 535.417.26

© Н. А. Грязнов, Д. А. Горячкин, Е. Н. Соснов, В. В. Харламов, 2019

ЮСТИРОВКА ДЛИН ПЛЕЧ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

В ряде применений интерферометра Майкельсона, в частности при его использовании в широкополосном по спектру излучении, высокий контраст полос возможен при точно выравненных оптических длинах его плеч. В настоящей работе экспериментально продемонстрирована методика уменьшения разности длин плеч до уровня в несколько микрон, состоящая в последовательном применении нескольких источников излучения с различной длиной когерентности. Обсуждается возможность применения интерферометра Майкельсона в качестве составного резонаторного зеркала с управляемым коэффициентом отражения для генерации ультракоротких лазерных импульсов.

Кл. сл.: интерферометр Майкельсона, разность оптических длин плеч, интерферограмма, ширина спектра излучения

ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры Майкельсона (ИМ) являются чрезвычайно чувствительными устройствами, широко используемыми в прецизионных измерительных спектральных приборах, а также в приборах для измерения очень малых линейных перемещений. В частности, они нашли широкое применение в фурье-спектроскопии [1], в схемах оптических корреляторов для измерения длительностей ультракоротких лазерных импульсов [2]. В подобных приборах, как правило, одно из зеркал устанавливается на линейный транслятор, позволяющий изменять разность оптической длины плеч (РОДП), осуществляя линейное сканирование.

В прецизионных фурье-спектрометрах важно исключить влияние собственных ошибок и шумов ИМ на результаты измерений. По этой причине в технической литературе (см. [1] и библиографию в ней) имеется большое количество разработанных оригинальных схем ИМ, обладающих пониженной чувствительностью к угловым разъюстировкам и повышенной точностью измерения относительного изменения оптической разности длин плеч интерферометра. При этом вопрос об абсолютной точности измерения РОДП и прецизионном выравнивании длин плеч интерферометра в приборах данного класса остро не стоит.

В то же время в ряде специфических применений ИМ, в частности при его использовании в широкополосном по спектру излучении, именно равноплечность интерферометра является свойством, определяющим возможность его успешной работы с достаточно высоким контрастом.

В качестве примера подобного использования

отметим схему, в которой ИМ является составным зеркалом лазерного резонатора [3–5]. В работе [3] предложена, а в [4] предварительно протестирована схема лазерного резонатора, в котором в качестве выходного зеркала резонатора твердотельного лазера, предназначенного для генерации пикосекундных импульсов, используется управляемый ИМ. В одном из плеч интерферометра установлен фазовый электрооптический модулятор (ЭОМ), который обеспечивает модуляцию добротности и активную синхронизацию продольных резонаторных мод лазера. При этом, благодаря интерферометру, удастся преобразовать фазовую модуляцию в амплитудное изменение активных потерь резонатора с очень высоким "контрастом". Теоретически коэффициент отражения выходного зеркала, выполненного в виде управляемого ИМ, может изменяться от 0 до 100 %.

В этом случае оптические длины плеч интерферометра должны быть тщательно выравнены, во-первых, для получения достаточно высокого контраста интерференционной картинки в пределах спектральной ширины линии усиления активной среды лазера, а во-вторых, для увеличения количества продольных мод, участвующих в генерации лазера, без чего получение ультракоротких импульсов становится невозможным. Кроме этого, отметим, что использование неравноплечного ИМ в качестве составного выходного зеркала резонатора приводит, как известно (см. [5]), к обратному эффекту, т.е. к селекции продольных мод лазера. Таким образом, задача выравнивания длин плеч ИМ с микронной точностью может быть достаточно актуальной.

Настоящая работа посвящена описанию экспе-

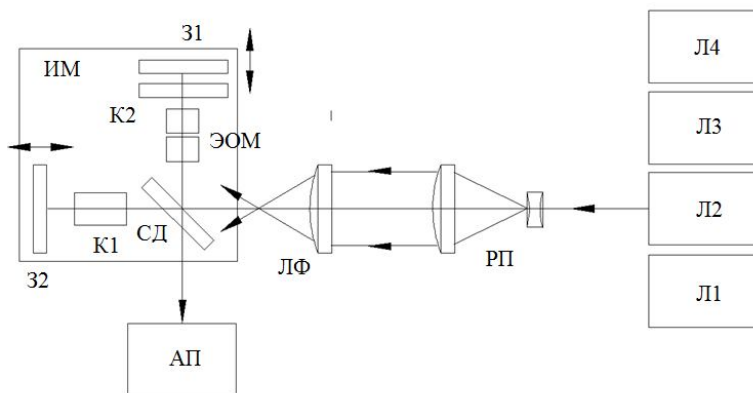


Рис. 1. Схема выравнивания длин плеч ИМ. 31, 32 — зеркала; СД — 50% светоделитель; ЭОМ — электрооптический модулятор из 2 кристаллов RTP; К1 — стеклянный компенсатор; К2 — стеклянная пластинка-компенсатор, АП — анализатор распределения интенсивности пучка; ЛФ — линза; РП — расширитель светового пучка; Л1... Л4 — источники излучения

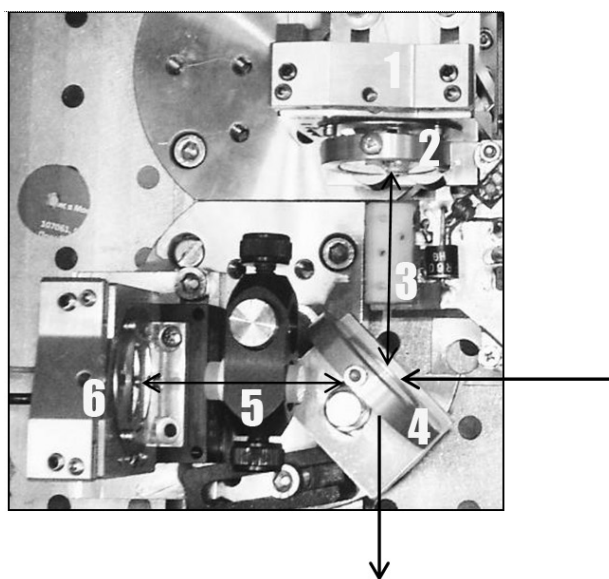


Рис. 2. Внешний вид ИМ. 1 — зеркало 31, 2 — компенсатор К2, 3 — ЭОМ, 4 — светоделитель СД, 5 — компенсатор К1, 6 — зеркало 32

риментальных результатов по выравниванию длин плеч ИМ, полученных на примере управляемого интерферометра, устанавливаемого в резонатор твердотельного лазера на основе Nd:YAG, предназначенного для генерации лазерных импульсов с пикосекундной длительностью (подробнее см. [4]).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Схема экспериментов по выравниванию РОДП показана на рис. 1, внешний вид ИМ показан на рис. 2. Интерферометр, составленный зеркалами 31, 32 и 50%-м светоделителем СД, смонтирован на инваровом основании. Зеркала интерферометра 31 и 32 имеют точные угловые юстировочные подвижки, кроме этого, зеркало 31 установлено на линейном трансляторе, позволяющем осуществить предварительное выравнивание длин плеч ИМ с точностью до десятка микрон. Зеркало 32 уста-

новлено на линейной пьезоплатформе типа P-611.1S с драйвером E-609SO (PI, Германия), что позволяет повысить точность выравнивания РОДП до единиц и долей микрон. Оптические покрытия элементов ИМ по спектральным характеристикам рассчитаны на эффективную работу с излучением на длине волны 1.06 мкм.

В вертикальном (в плоскости рисунка) плече установлены кристаллы электрооптического модулятора ЭОМ (два термоскомпенсированных кристалла RTP с размерами $4 \times 4 \times 10$ мм каждый). Во втором плече имеется стеклянный компенсатор К1, имеющий точно такую же оптическую толщину, как кристаллы RTP. Еще одна просветленная стеклянная пластинка К2 позволяет скомпенсировать несимметричную установку светоделителя СД в интерферометре.

Как уже отмечалось выше, интерферометр предназначен для работы в лазерном резонаторе в коллинеарных световых пучках, поэтому требования к точности выравнивания оптических

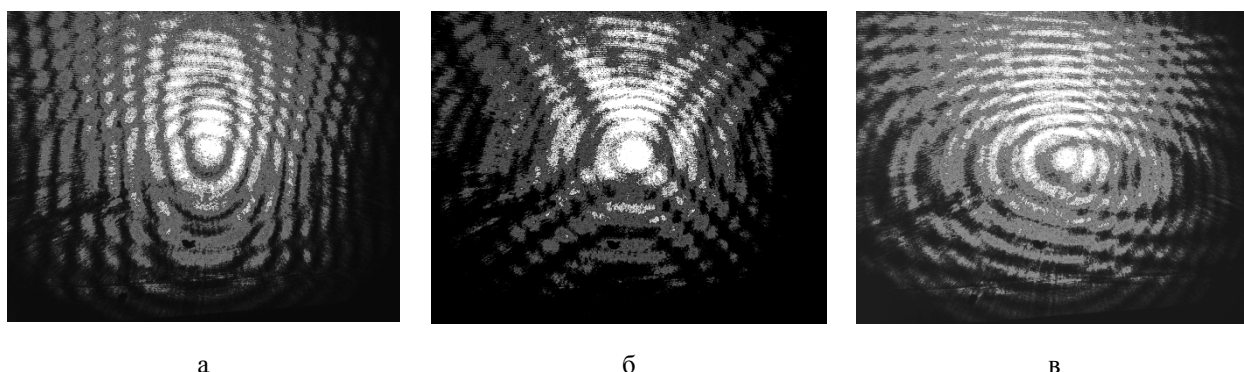


Рис. 3. Выравнивание длины плеч ИМ при свете He-Ne лазера (см. пояснения в тексте)

длин плеч определяются шириной спектра и длиной когерентности лазерного излучения. Для поэтапного повышения точности выравнивания РОДП представляется целесообразным применить последовательно несколько источников излучения Л1...Л4, имеющих все более и более широкие спектры излучения.

Для каждого источника излучения в широком параллельном пучке, формируемом расширителем РП, зеркала ИМ юстировались по углам, а затем при перемещении зеркала З1 с помощью линейного транслятора подбирался наилучший контраст интерференционной картинки.

Затем после расширителя в пучок вводилась линза ЛФ с фокусным расстоянием 40 мм, так что на входе в интерферометр пучок приобретал сходящийся сферический волновой фронт (см. методику выравнивания плеч ИМ в [6]). Интерферограммы на выходе ИМ регистрировались с помощью матричного анализатора распределения интенсивности пучка (АП на рис. 1) типа Laser-BeamProfiler (LLG, Германия) с набором сменных нейтральных фильтров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая серия экспериментов

В первой серии экспериментов кристаллы ЭОМ и компенсатор К1 в схеме ИМ отсутствовали. В качестве первого источника излучения Л1 применялся He-Ne лазер ЛГН-207 (ООО "ЛазерВарио-Ракурс", Рязань). Его излучение имеет узкий спектр, и интерференционная картинка в плоских фронтах сохраняла высокий контраст при варьировании разности плеч в пределах нескольких сантиметров. На рис. 3 показаны интерферограммы, полученные в сферических волнах при наличии в схеме короткофокусной линзы ЛФ, соответ-

ствующие выравненным длинам плеч ИМ (б) и симметричным расстройкам в противоположные стороны (а и в) на ± 2 мм, вводимым линейным транслятором, сдвигающим зеркало З1. На рис. 3 видны паразитные кольца и полосы, наличие которых связано с большим количеством бликов, возникающих из-за несовпадения спектральных характеристик покрытий на оптических элементах ИМ, рассчитанных на длину волны 1.06 мкм, с длиной волны зондирующего красного излучения.

В качестве второго источника излучения Л2 применялся непрерывный лазер DTL-313, излучающий на второй гармонике Nd:YLF в зеленом свете (527 нм) со спектральной шириной линии генерации 0.125 нм (ООО "Лазер-Экспорт", Москва), сравнимой с шириной линии люминесценции Nd:YAG. Преимуществом данного источника была визуальная видимость излучения, облегчающая настройку ИМ, а недостатком, как и в первом случае, — несовпадение спектральных характеристик покрытий и длины волны излучения.

Глубина контраста интерференционной картинки в плоских волнах по разности длин плеч интерферометра составляла около 2 мм, что по оценкам совпадает с длиной когерентности используемого зеленого излучения. На рис. 4 показаны интерферограммы, полученные в сферических волнах (при наличии в схеме короткофокусной линзы ЛФ), соответствующие выравненным длинам плеч ИМ (б) и симметричным расстройкам в противоположные стороны (а и в) на ± 0.5 мм, вводимым линейным транслятором зеркала З1.

Следующим шагом в повышении точности выравнивания РОДП интерферометра было применение в качестве источника излучения Л3 бытового красного светодиодного фонарика с мощностью до 50 мВт и типичной шириной спектра порядка 40 нм. Интерференционная картина наблюдалась

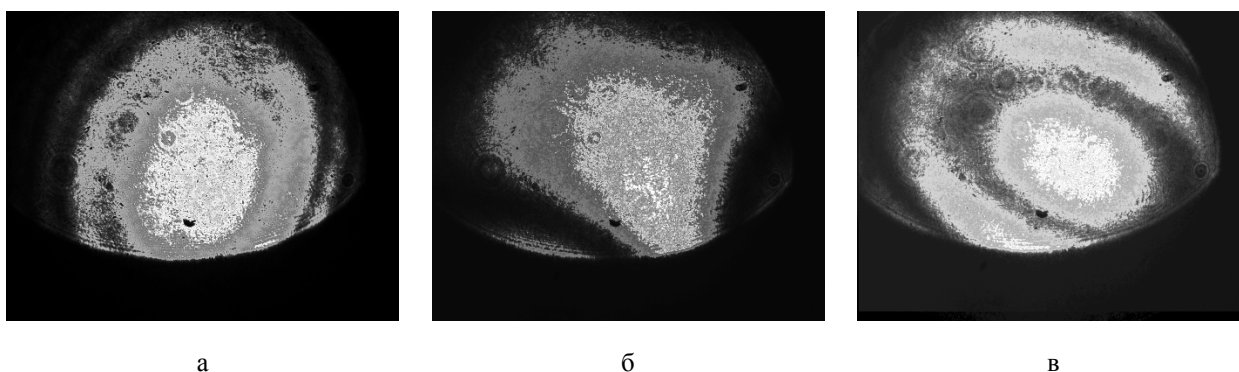


Рис. 4. Выравнивание длины плеч ИМ в свете зеленого лазера DTL-313 (см. пояснения в тексте)

в почти параллельном пучке; для точной подстройки длины одного из плеч ИМ использовался транслятор зеркала 32 (см. рис. 1) на пьезокерамике. Глубина контраста прямых полос составляла в этом случае от 5 до 7 мкм, что по порядку величины совпадает с оценками длины когерентности излучения светодиода.

Вторая серия экспериментов

Во второй серии экспериментов в ИМ вводились кристаллы ЭОМ и компенсатор К1 (см. рис. 1), что привело к наличию сильных апертурных ограничений и снижению наглядности интерференционных колец при их наблюдении в сферическом пучке.

Для повышения чувствительности схемы регистрации в качестве источника излучения Л4 использовался достаточно мощный DPSSNd:YLF-лазер "TechAdvanced" (ООО "Лазер-Экспорт", Москва), излучающий на длине волны 1.053 мкм,

близкой к рабочей и соответствующей спектральным характеристикам покрытий оптических элементов ИМ. Лазер работает в импульсно-периодическом режиме со средней мощностью до 4 Вт, имеет угловую расходимость, близкую к дифракционной, и ширину спектральной линии порядка 0.5 нм. Чтобы избежать дополнительной юстировки, излучение лазера заводилось в ИМ точно по той же оси, что и видимое излучение зеленого лазера Л2 (DTL-313).

Глубина контраста интерференционной картины в плоских волнах по разности длин плеч интерферометра составляла от 3 до 4 мм, что соответствует оценкам длины когерентности используемого ИК-излучения, длина волны которого вдвое больше по сравнению с длиной волны зеленого излучения лазера Л2.

На рис. 5 показаны интерферограммы, полученные в сферических волнах, соответствующие выравненным длинам плеч ИМ (б) и симметричным

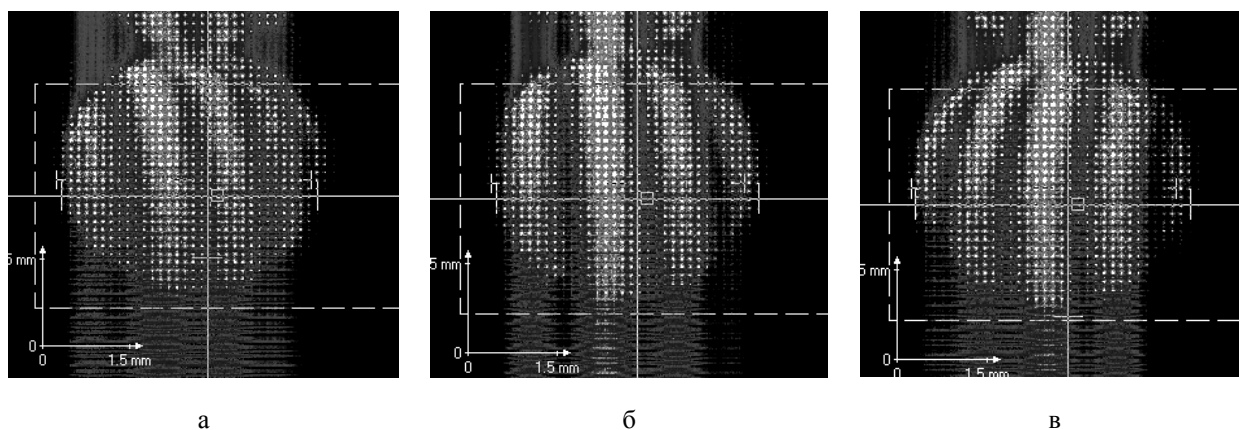


Рис. 5. Выравнивание длины плеч ИМ в свете лазера "TechAdvanced" 1.053 мкм (см. пояснения в тексте)

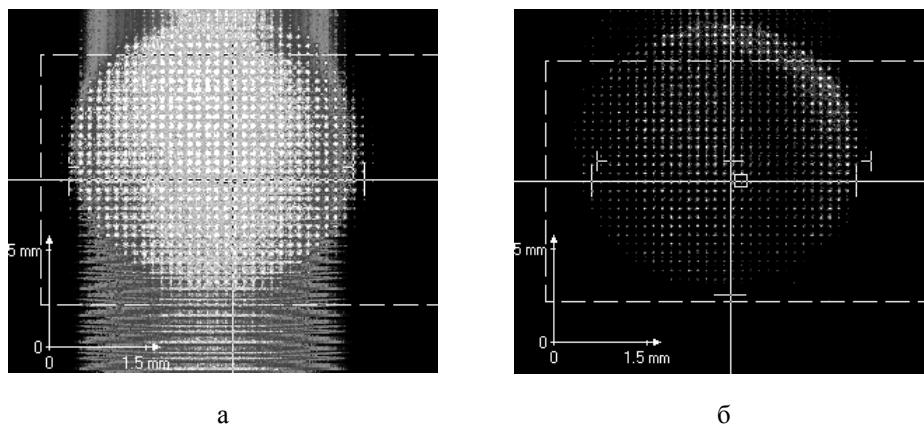


Рис. 6. Нулевое поле ИМ с выравненными РОДП (см. пояснения в тексте)

расстройкам в противоположные стороны (а и в) на ± 0.5 мм, вводимым линейным транслятором, сдвигающим зеркало 31. Видно, что расстройки РОДП приводят к искривлению прямых полос в разные стороны.

На рис. 6 показаны интерферограммы, полученные при оптимальном выравнивании РОДП и настройке ИМ на бесконечно широкую полосу, где наблюдается светлое (а) или темное (б) "нулевое поле" в зависимости от настройки положения управляемого пьезокерамикой зеркала 32.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение резюмируем, что в настоящей работе экспериментально продемонстрирована методика выравнивания РОДП в ИМ, состоящая в последовательном уменьшении длины когерентности источников излучения. В интерферометре с зеркалами диаметром 25 мм, не имеющем апертурных ограничений, получена точность выравнивания на уровне нескольких микрон. При ограничении апертуры диафрагмой диаметром 3 мм достигнутая точность выравнивания оценивается в несколько сотен микрон. Для ее повышения требуется использование светодиодного источника повышенной мощности с высокой направленностью излучения.

Как показали результаты работы [4], полученной точности выравнивания РОДП оказалось достаточно для использования ИМ в управляемом режиме в качестве составного зеркала резонатора твердотельного лазера, излучающего импульсы наносекундной длительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания 2019 г. № 075-00924-19-00 от 28.12.2018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffiths P.R., de Haseth J.A. Fourier transform infrared spectrometry / Ed. by J.D. Winefordner. A series of monographs on analytical chemistry and its applications: Chemical analysis. Vol. 171. Wiley-Interscience, 2007. 656 p.
2. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Крылов В.Н., Путилин С.Э. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии. СПб.: СПбГУИТМО, 2010. 234 с.
3. Грязнов Н.А., Соснов Е.Н. Компактный высокоэффективный пикосекундный лазер для оснащения мобильных робототехнических комплексов инженерной службы // Труды Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". СПб.: Политехника-сервис, 2014. 416 с.
4. Грязнов Н.А., Соснов Е.Н., Горячкин Д.А., Никитина В.М., Родионов А.Ю. Активная фазовая синхронизация мод в резонаторе с управляемым интерферометром Майкельсона // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 4. С. 3–10.
5. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. М.: Физматлит, 2004. 320 с.
6. Рябухо В.П., Лычагов В.В., Кальянов А.Л. Интерферометр Майкельсона с лазерным источником света. Руководство к лабораторной работе по курсу общей физики "Оптика. Интерференция света". Саратов: СГУ, 2009. 15 с.

ФГАНУ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики", Санкт-Петербург

Контакты: Горячкин Дмитрий Алексеевич,
d.goryachkin@rtc.ru

Материал поступил в редакцию 15.07.2019

ADJUSTMENT OF OPTICAL PATHS DIFFERENCE IN MICHELSON INTERFEROMETER

N. A. Gryaznov, D. A. Goryachkin, E. N. Sosnov, V. V. Charlamov

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, Russia

In some applications of a Michelson interferometer, in particular in the case of a large spectral width of radiation, the high contrast of the interference pattern is obtained if only the optical paths difference between interferometer branches is minimal. The proposed paper demonstrates experimentally the technique of decreasing the optical paths difference up to the level of several microns by using the sequence of light sources with different coherence lengths. The possibility of using the Michelson interferometer as a compound resonator mirror with the controllable reflection for generation of ultrashort laser pulses is discussed.

Keywords: Michelson interferometer, the optical paths difference, interferogram, spectral width of radiation

Fig. 1. The alignment scheme of the Michelson interferometer arm lengths. 31, 32 — mirrors; DM — 50 % beam splitter; ЭОМ — an electro-optical modulator consisting of two RTP crystals; K1 — glass compensator; K2 — glass plate-compensator; АП — analyzer of beam intensity distribution; ЛФ — a lens; ПП — light beam expander; Л1...Л4 — radiation sources

Fig. 2. The appearance of the Michelson interferometer. 1 — mirror 31, 2 — compensator K2, 3 — ЭОМ, 4 — beam splitter СД, 5 — compensator K1, 6 — mirror 32

Fig. 3. The alignment of the optical path in the light of a He-Ne laser

Fig. 4. The alignment of the optical path in the light of the green laser DTL-313

Fig. 5. The alignment of the optical path in the light of the TechAdvanced laser of 1.053 μm

Fig. 6. The zero field of the Michelson interferometer with the aligned differences of the optical paths

REFERENCES

1. Griffiths P.R., de Haseth J.A. *Fourier transform infrared spectrometry*. Ed. by J.D. Winefordner. A series of monographs on analytical chemistry and its applications: Chemical analysis. Vol. 171. Wiley-Interscience, 2007. 656 p.
2. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Krylov V.N., Putilin S.E. *Femtosekundnaya optika i femtotekhnologii* [Femtosecond optics and femtotekhnologii]. Saint Petersburg, ITMO University. 234 p. (In Russ.).
3. Gryaznov N.A., Sosnov E.N. [Compact high-performance picosecond laser for equipping mobile robotic systems of engineering services]. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Ekstremal'naya robototekhnika"* [Proceedings of the international scientific and technological conference "Extreme robotics"]. Saint Petersburg, Politekhnik-servis Publ., 2014. 416 p. (In Russ.).
4. Gryaznov N.A., Sosnov E.N., Goryachkin D.A., Nikitina V.M., Rodionov A.Yu. [Active phase mode synchronization in a resonator with a controlled Michelson interferometer]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2019, vol. 86, no. 4, pp. 3–10. (In Russ.).
5. Bykov V.P., Silichev O.O. *Lazernye rezonatory* [Laser resonators]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 320 p. (In Russ.).
6. Ryabuho V.P., Lychagov V.V., Kal'yanov A.L. *Interferometr Majkel'sona s lazernym istochnikom sveta. Rukovodstvo k laboratornoj rabote po kursu obshchej fiziki "Optika. Interferenciya sveta"* [Michelson interferometer with a laser light source. Guide to laboratory work in the course of general physics "Optics. The interference of light."]. Saratov, Saratov State University, 2009. 15 p. (In Russ.).

Contacts: Goryachkin Dmiyiy Alekseevitch,
d.goryachkin@rtc.ru

Article received the editorial board on 15.07.2019