

УДК 535.417.26

© Н. А. Грязнов, Д. А. Горячкин, В. И. Купренюк, Е. Н. Соснов, В. Л. Алексеев, 2020

## ПАССИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

В ряде применений интерферометра Майкельсона, в частности при его использовании в лазерном резонаторе, необходима высокая точность стабилизации фаз пучков, распространяющихся в его оптических плечах. В настоящей работе экспериментально исследована долговременная стабильность нескольких конструктивных решений и выбран оптимальный вариант интерферометра для применения в качестве составного резонаторного зеркала с управляемым коэффициентом отражения для генерации ультракоротких лазерных импульсов.

*Кл. сл.:* интерферометр Майкельсона (ИМ), разность оптических длин плеч (РОДП), стабилизация, случайные и систематические флуктуации интенсивности излучения

### ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры Майкельсона (ИМ) являются устройствами, широко используемыми в целом ряде применений для измерения разности фаз двух волн: в прецизионных измерительных спектральных приборах, Фурье-спектроскопии [1], схемах оптических корреляторов для измерения длительностей ультракоротких лазерных импульсов [2]. Поскольку интерферометры используются для количественного фазового анализа, они должны регистрировать малые разности длин плеч и управлять ими с точностью до долей длин волн светового излучения.

Высокая чувствительность имеет и свои отрицательные стороны. Так, случайные изменения давления и температуры воздуха способны вызывать изменения в показателях преломления в плечах ИМ, причем даже очень малые флуктуации температуры, движение воздуха, механические колебания конструкции могут приводить к смещениям, вносящим заметные случайные и систематические ошибки в результаты измерений. Существует целый ряд способов коррекции подобного рода ошибок, в частности путем непрерывных измерений разности оптических длин плеч (РОДП) интерферометра и ее активной стабилизации. Для этого, как правило, одно из зеркал интерферометра устанавливается на прецизионный линейный транслятор, позволяющий по сигналам управления изменять РОДП, сохраняя разность фаз интерферирующих волн неизменной [3, 4].

Однако в некоторых применениях ИМ такой подход является не вполне приемлемым, например в случае управляемого ИМ, который использовал-

ся нами в [5, 6] для генерации пикосекундных импульсов в качестве составного выходного зеркала резонатора твердотельного лазера. В одном из плеч управляемого интерферометра установлен фазовый электрооптический модулятор (ЭОМ), который обеспечивает модуляцию добротности и активную синхронизацию продольных резонаторных мод лазера. Причем фазовая модуляция в ИМ превращается в амплитудное изменение активных потерь резонатора с очень высоким "контрастом" (теоретически от нуля до 100 %).

Одно из зеркал управляемого ИМ установлено на линейном пьезокерамическом трансляторе с целью оптимальной статической подстройки РОДП в момент включения ЭОМ. Эта подстройка должна быть стабильной от импульса к импульсу, поэтому дополнительное перемещение зеркала при использовании активной стабилизации может нарушить работу лазера.

При тестировании схемы резонатора с зеркалом на основе ИМ в [6] нами наблюдались неперiodические достаточно быстрые (около 1 с) вариации интенсивности, природа которых выяснена не была. Кроме того, мощность излучения не была стабильной и примерно на 50 % изменялась вслед за периодическими вариациями температуры воды холодильного агрегата в пределах  $\pm 0.5$  градусов. Поэтому был сделан вывод о необходимости дополнительной стабилизации управляемого ИМ. Поскольку активная стабилизация управляемого ИМ, как отмечалось выше, вряд ли приемлема, стабильность положения зеркал должна быть обеспечена пассивными методами, рассмотрение которых и является предметом настоящей работы.

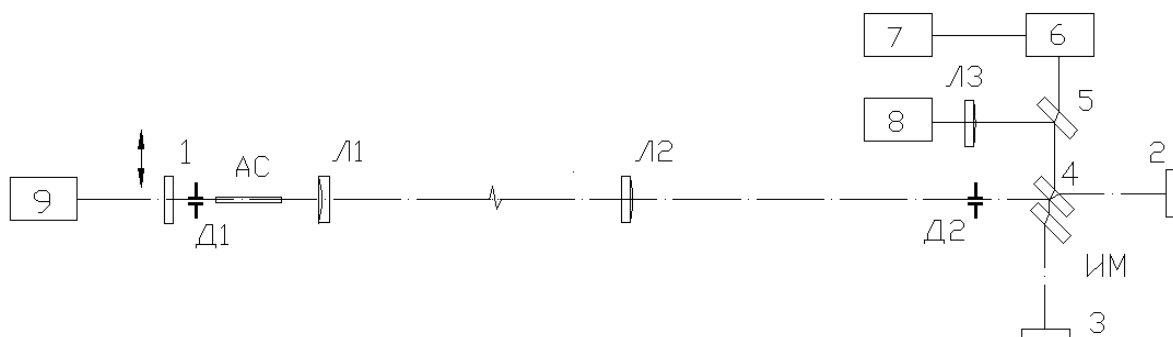
Ниже изложены экспериментальные результа-

ты по пассивной стабилизации ИМ, включенного в состав лазерного излучателя, описанного в [6, 7]. Рассмотрены несколько конфигураций и схем интерферометров, проведено их сравнение, а также анализ факторов, вызывающих возможные нарушения стабильности выходной мощности лазера.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

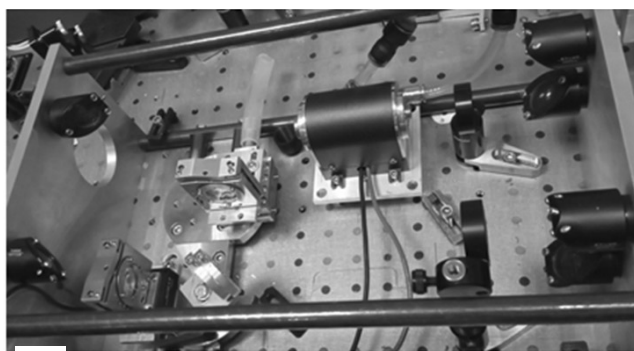
Эквивалентная схема экспериментальных измерений показана на рис. 1, внешний вид лазерного

излучателя на базе серийного Nd:YAG-квантрона показан на рис. 2 (подробнее, см. [6]). Лазер работал в непрерывном режиме. Его резонатор имел оптическую длину (между зеркалами 1 и 2), равную 1500 мм, для компенсации наведенной термической линзы в активной среде АС использовались отрицательная Л1 и положительная Л2 линзы, установленные в расчетных точках оптической оси. Выходное зеркало резонатора представляло собой равноплечий ИМ, излучение с выхода интерферометра поступало на измеритель мощности 6,

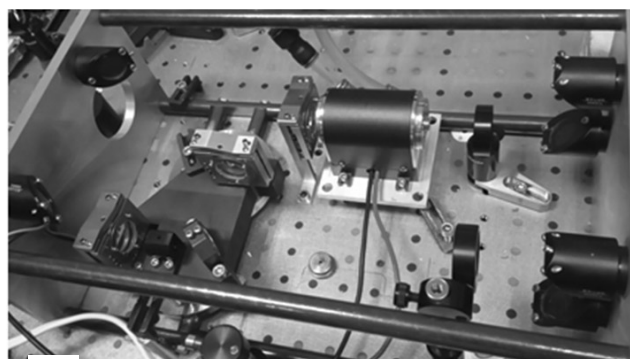


**Рис. 1.** Эквивалентная схема измерений.

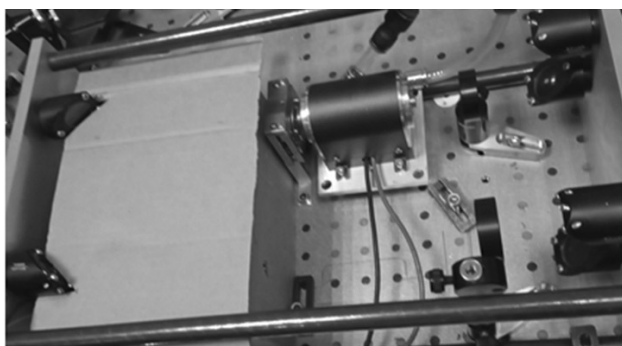
1–3 — плоские зеркала  $R = 99.5\%$ , 4 — 50 % светоделитель ИМ с компенсатором, 5 — ответвитель, 6 — измеритель мощности 3A-P с монитором VEGA (Orphir, Израиль), 7 — осциллограф MSO 4034 (Tektronix), 8 — анализатор распределения интенсивности пучка LaserBeamProfiler (LLG, Германия), 9 — лазер Techadvanced 1053 (ООО "Лазерэкспорт", Россия), Д1, Д2 — диафрагмы  $\varnothing 2.2$  мм, Л1–Л3 — линзы, АС — активная среда квантрона GN-50 (Sino-Laser, Китай)



а



б



в

**Рис. 2.** Внешний вид резонатора с открытым интерферометром ИМ1 (а), ИМ2 (б) и с закрытым корпусом (в)

часть его через изображающую линзу ЛЗ ответвлялась на анализатор распределения интенсивности пучка 8.

По анализатору распределения интенсивности ИМ настраивался на нулевое поле, пятно при этом имело распределение, близкое к гауссовому, уровень выходной мощности при настройке на максимальную интенсивность, как правило, соответствовал 0.5–0.7 Вт.

Измеритель мощности 6 имел аналоговый выход, сигнал с которого подавался на осциллограф 7 для мониторинга долговременной (от единиц до нескольких десятков секунд) стабильности выходного излучения лазера. При оптической юстировке схемы в целом и зеркал ИМ глухое зеркало резонатора 1 удалялось, и по оптической оси системы заводилось излучение вспомогательного ИК лазера 9 на длине волны 1.053 мкм, близкой к рабочей длине волны лазера.

Первая из исследуемых в настоящей работе конфигураций интерферометра (далее ИМ1) была такой же, как в [6]. Зеркала интерферометра для грубого (с точностью до десятка микрон) и точного (до единиц и долей микрон) выравнивания длин плеч были снабжены соответствующими ручным (зеркало 3) и пьезокерамическим (зеркало 2) линейными трансляторами. Конструкция ИМ1 и методика выравнивания длин его плеч подробно описаны в нашей работе [7].

Эксперименты проводились на базе компактной геометрии резонатора, когда длинная эквивалентная схема с помощью зеркальных ретроотражателей была "свернута" в блок с длиной, не превышающей 350 мм. Внешний вид излучателя с конфигурацией ИМ1 приведен на рис. 2, а. Отметим, что на этой фотографии глухое зеркало резонатора, устанавливаемое слева от квантрона, снято, и в схему введено излучение вспомогательного лазера (сравните с рис. 2, б).

На рис. 2, б, показана вторая из исследуемых конфигураций ИМ (далее ИМ2), основные особенности которой состоят в следующем:

- все элементы ИМ размещены на жесткой единой базе;
- база и оправы выполнены из одинаковой стали;
- плечи выравнены конструктивно путем точной установки зеркал, так что ручной линейный транслятор одного из зеркал исключен;
- точная пьезокерамическая подстройка зеркала 2 сохранена.

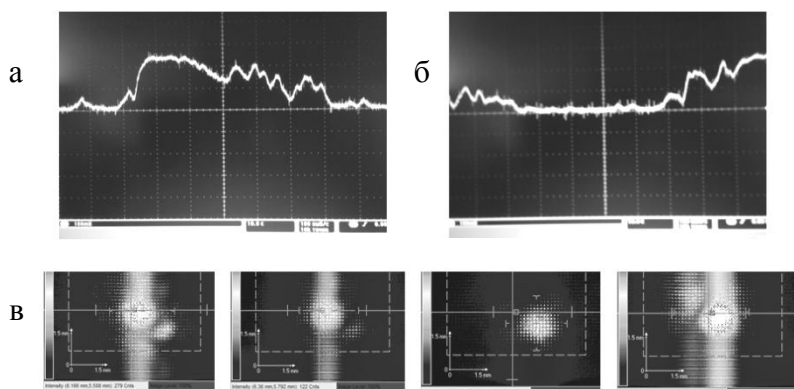
Обе конфигурации ИМ испытывались в двух модификациях: в открытом виде и в корпусе, выполненном из плотного картона (см. рис. 2, в). Кроме этого, в настоящей работе применялся более точный по сравнению с используемым в [6] холодильный агрегат, чиллер Polyscience 6500 Series 1/2 HP (США), позволяющий поддерживать температуру охлаждающей квантрон жидкости на уровне  $\pm 0.1$  град. (ранее было  $\pm 0.5$  град.). Изменялось и расположение чиллера по отношению к излучателю, расстояние варьировалось от одного до трех с половиной метров.

В ряде экспериментов применялась пневматическая виброизоляция опорной плиты излучателя, которая входила в состав виброизолирующей системы 1VIS10W Standa (Литва), способной эффективно поглощать вибрации в диапазоне от единиц до нескольких десятков герц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Первая серия экспериментов

В первой серии исследовались открытая и закрытая конфигурации ИМ1. В работе [6] отмечалось наличие колебаний интенсивности на выходе открытого ИМ с периодом от одной до нескольких секунд. Подобные "быстрые" колебания наблюдались и в описываемых опытах, причем их вид и размах практически не изменился при включении виброизолирующей системы и при замене чиллера охлаждения квантрона на более точный.



**Рис. 3.** Колебания интенсивности излучения на выходе открытого ИМ1. На осциллографе (а, б) при развертке 10 с/дел. и на матрице анализатора (в)

Самопроизвольные колебания интенсивности наблюдались на длинных развертках осциллографа (см. рис. 3, а, б) и в виде пятен разной интенсивности на анализаторе LaserBeamProfiler (см. рис. 3, в). Отметим, что форма распределения интенсивности в пятнах выходного излучения практически всегда соответствовала настройке ИМ на нулевое поле интерференции, т.е. случайных угловых разъюстировок зеркал не наблюдалось.

На рис. 3 видно, что, наряду с "быстрыми" колебаниями, имеют место периодические самопроизвольные плавные изменения интенсивности от максимума (рис. 3, а) до минимума (рис. 3, б) с временным масштабом порядка 40–50 с. Данные колебания связаны, по-видимому, с плавным увеличением температуры воздуха и металлических узлов, которое, в свою очередь, приводит к неодинаковому тепловому удлинению плеч ИМ (за каждые примерно 40 с РОДП увеличивается на  $\lambda/2$ ).

Далее для сравнения исследовалась закрытая конфигурация ИМ1 (см. фотографию на рис. 2, в). Осциллограммы на рис. 4, а–в, соответствуют полностью закрытому корпусу; в случае рис. 4, г, в области вершины импульса верхняя крышка была снята, и организовывался неравномерный поток воздуха сверху вниз вовнутрь корпуса. Видно, что помещение ИМ1 в простой картонный корпус в значительной степени повысило его стабильность по сравнению с открытой конструкцией. Амплитуды "быстрых" колебаний интенсивности стали заметно меньшими (сравните рис. 3, а, и 4, а). Снятие верхней крышки и наличие воздушного

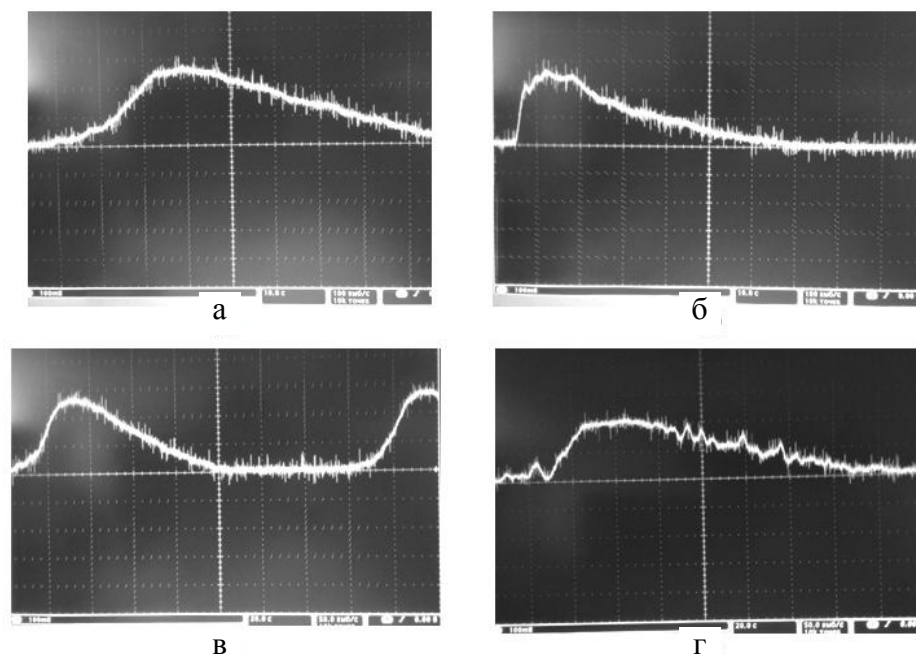
потока приводило к появлению небольших изменений РОДП интерферометра и колебаниям интенсивности выходного излучения.

Медленные тепловые периодические колебания интенсивности (и РОДП) в случае закрытого ИМ1 по-прежнему наблюдались, но стали более длительными по сравнению с открытой геометрией, вероятно, поскольку условия теплообмена в замкнутом объеме стали более инерционными. Как видно на рис. 4, в, переход от максимума до минимума составлял порядка 80 с.

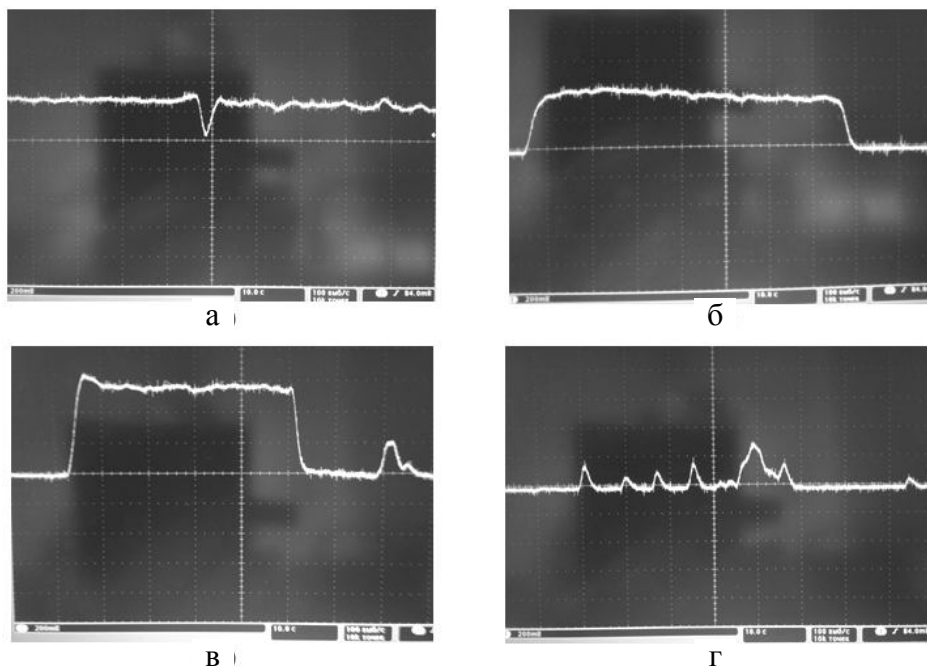
Различия в развитии самопроизвольной "тепловой" генерации и генерации, вызванной ручной субмикронной подстройкой пьезокерамического транслятора зеркала ИМ, можно наблюдать на рис. 4, а и б, соответственно. С помощью подстройки пьезокерамики можно было вернуться на максимум генерации во время любой стадии самопроизвольных колебаний мощности генерации.

### Вторая серия экспериментов

Во второй серии исследовалась стабильность более жесткого и простого по конструкции ИМ2 в открытом и закрытом вариантах (см. фотографии на рис. 2, б, в). Основным преимуществом жесткой и однородной по материалу конструкции оказалось заметное улучшение долговременной стабильности (см. рис. 5, а–в). Периодические тепловые колебания РОДП, наблюдаемые в версии ИМ1, практически отсутствовали.



**Рис. 4.** Колебания интенсивности излучения на выходе закрытого ИМ1, регистрируемые на осциллографе при развертках 10 (а, б, г) и 20 (в) с/дел



**Рис. 5.** Колебания интенсивности излучения для ИМ2 в момент снятия корпуса (а) и для закрытого (б–г) корпуса, раз-  
вертка 10 с/дел

Помещение ИМ2 в простейший корпус позволяло уменьшить уровень "быстрых" нестабильностей. На рис. 5, а, отрицательный пичок соответствует механическому перекрытию оси резонатора во время быстрого снятия корпуса. Видно, что во второй части осциллограммы в открытой конфигурации колебания усилились. Включение и выключение генерации на фотографиях рис. 5, б, в, производилось ручной подстройкой пьезокерамического транслятора.

Отметим в заключение еще один фактор, влияющий на стабильность работы ИМ с пьезокерамическим транслятором. Задний пичок на осциллограмме рис. 5, в, соответствовал эффекту (акустическому и вибрационному) от случайного сдвига стула во время записи серии. Также преимущественно акустической, по-видимому, является и природа импульсов, наблюдаемых на рис. 5, г. Пьезокерамический транслятор был настроен на отсутствие генерации, появление первых импульсов вновь было связано с передвижением стула, а последнего — с громким хлопком в ладоши.

Отдельная серия экспериментов показала влияние шумов работающего чиллера на стабильность положения зеркала ИМ, установленного на пьезокерамическом трансляторе Р-611.1S, используемом с драйвером-усилителем Е-609SO (PI, Германия). Данное наблюдение позволило провести дальнейшее повышение стабильности результатов путем простого удаления чиллера от пьезокерамического транслятора на расстояние до 3.5 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что в настоящей работе экспериментально продемонстрировано повышение стабильности ИМ, предназначенного для работы в составе лазерного излучателя ультракоротких импульсов. Поскольку в концепции управляемого ИМ активная стабилизация является нежелательной, применялась пассивная стабилизация, позволившая выявить следующие особенности.

При наличии точности поддержания температуры охлаждающей жидкости на уровне  $\pm 0.1$  градуса квантрон не оказывает влияния на стабильность интенсивности выходного излучения лазера с ИМ. Наличие низкочастотной виброизолирующей системы опорной плиты излучателя также не вызывало повышения стабильности резонатора с ИМ.

Случайные угловые разъюстировки зеркал ИМ не являются определяющими факторами стабильности, все случайные и систематические колебания интенсивности выходного излучения вызывались микроскопическими поступательными перемещениями зеркал и соответствующими изменениями РОДП.

Систематические медленные колебания интенсивности, связанные с неоднородным тепловым расширением деталей и узлов ИМ, заметно снижались при применении единой жесткой базы интерферометра и его узлов, изготовленных из одного и того же материала с низким коэффициентом теплового расширения, и с минимизацией их количества.

Случайные быстрые флуктуации интенсивности, связанные с колебаниями окружающего воздуха, заметно снижались в случае применения простейшего (негерметичного) корпуса, окружающего ИМ.

Случайные флуктуации интенсивности, связанные с микроколебаниями зеркала ИМ, устанавливаемого на пьезокерамическом трансляторе, снижались при исключении акустических и вибрационных помех, обусловленных работой холодильного агрегата и случайными шумами вблизи пьезотранслятора. Значительное уменьшение влияния chillера наблюдалось при его удалении от излучателя на 3.5 м.

Полученные результаты позволяют рассчитывать на получение более воспроизводимых и стабильных результатов при использовании ИМ в управляемом режиме в качестве составного зеркала резонатора твердотельного лазера, излучающего ультракороткие импульсы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания 2019 г. № 075-00924-19-00 от 28.12.18.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffiths P.R., de Haseth J.A. Fourier transform infrared spectrometry. Chemical analysis: A series of monographs on analytical chemistry and its applications / ed. by J.D. Winefordner. Vol. 171. Wiley-Interscience, 2007.
2. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Крылов В.Н., Путилин С.Э. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии. СПб.: СПбГУИТМО, 2010. 234 с.
3. Freschi A.A., Frejlich J. Adjustable phase control in stabilized interferometry // Optics. Letters. 1995. Vol. 20, is. 6. P. 635–637.
4. Minoni U., Sardini E., Gelmini E., Docchio F., Marioli D. A high-frequency sinusoidal phase-modulation interfero-

meter using an electro-optic modulator: Development and evaluation // Rev. Sci. Instrum. 1991. Vol. 62, is. 11. P. 2579–2583. DOI: 10.1063/1.1142233

5. Грязнов Н.А., Соснов Е.Н. Компактный высокоэффективный пикосекундный лазер для оснащения мобильных робототехнических комплексов инженерной службы // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции. СПб.: Политехника-сервис, 2014. С. 369–371.
6. 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.
7. Грязнов Н.А., Горячкин Д.А., Соснов Е.Н., Харламов В.В. Юстировка длин плеч интерферометра Майкельсона // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 3. С. 41–46.  
URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst3.php#abst4>

**Федеральное государственное автономное научное учреждение "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 15.10.2020



## PASSIVE STABILISATION OF MICHELSON INTERFEROMETER

N. A. Gryaznov, D. A. Goryachkin, V. I. Kuprenyuk, E. N. Sosnov, V. L. Alekseev

*The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, RF*

In some applications of a Michelson interferometer, in particular, when it is used in a laser resonator, the phase difference of radiation beams passing the interferometer optical branches must be stabilized with high accuracy. The proposed paper is devoted to experimental studying the long-term stability of several interferometer designs and choosing the optimal version for applying as a compound resonator mirror with the controllable reflection for generation of ultrashort laser pulses.

*Keywords:* Michelson interferometer (MI), the optical paths difference (OPD), stabilization, random and systematic intensity fluctuations

### INTRODUCTION

Michelson interferometers (MI) are devices widely used in a number of applications for measuring the phase difference of two waves: in precision measuring spectral devices, Fourier spectroscopy [1], schemes of optical correlators for measuring the duration of ultrashort laser pulses [2]. Since interferometers are used for quantitative phase analysis, they must record small differences in the arm lengths and control them with an accuracy of fractions of the wavelengths of light radiation.

High sensitivity has its negative aspects as well. Thus, random changes in air pressure and temperature can cause changes in refractive indices in the arms of the MI, and even very small temperature fluctuations, air movement, mechanical vibrations of the structure can lead to displacements introducing noticeable random and systematic errors in measurement results. There are a number of methods for correcting this kind of errors, in particular, by means of continuous measurements of the optical paths difference (OPD) of the interferometer and its active stabilization. For this, as a rule, one of the interferometer mirrors is installed on a precision linear translator, which allows changing the OPD according to control signals, keeping the phase difference of the interfering waves unchanged [3, 4].

However, in some applications of MI, this approach is not entirely acceptable, for example, in the case of a controlled MI, which we used in [5, 6] to generate picosecond pulses as a composite output mirror of a solid-state laser cavity. A phase electro-optical modulator (EOM) is installed in one of the arms of the controlled interferometer, which provides Q-switching and active synchronization of the longitudinal resonator modes of the laser. Moreover, the phase modulation in the MI turns into change of an amplitude of the active losses of the resonator with a very high "contrast" (theoretically from zero to 100 %).

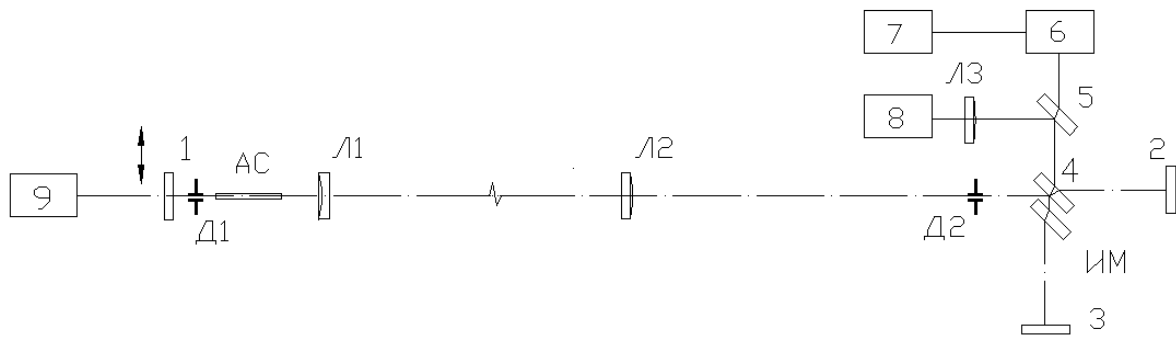
One of the mirrors of the controlled MI is installed on a linear piezoceramic translator for the purpose of optimal static adjustment of the OPD at the moment of switching on the EOM. This adjustment must be stable from pulse to pulse, therefore, additional movement of the mirror when using active stabilization can disrupt the operation of the laser.

When testing the scheme of a resonator with a mirror based on an IM in [6], we observed non-periodic rather fast (about 1 s) intensity variations, the nature of which has not been clarified. In addition, the radiation power was not stable and varied by about 50 % following periodic variations in the water temperature of the refrigeration unit within  $\pm 0.5$  degrees. Therefore, it was concluded that it is necessary to additionally stabilize the controlled MI. Since the active stabilization of a controlled MI, as noted above, is hardly acceptable, the stability of the position of the mirrors should be provided by passive methods, the consideration of which is the subject of this paper.

Experimental results on passive stabilization of the MI, as a part of the laser emitter, described in [6, 7], are presented below. Several configurations and schemes of interferometers are considered, their comparison is carried out, as well as an analysis of the factors causing possible disturbances in the stability of the laser output power.

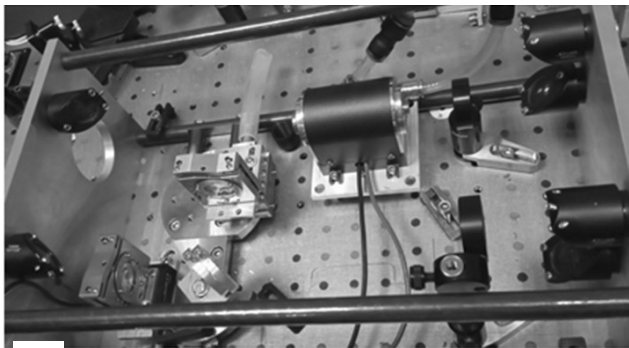
### EXPERIMENTAL EQUIPMENT

An equivalent circuit of experimental measurements is shown in Fig. 1, the appearance of the laser emitter based on a serial Nd:YAG laser head is shown in Fig. 2 (for details, see [6]). The laser was operating in a continuous mode. Its cavity had an optical length (between mirrors 1 and 2) equal to 1500 mm; to compensate for the induced thermal lens in an active medium (AC), negative J11 and positive J12 lenses were used, being installed at the reference points of the optical axis.

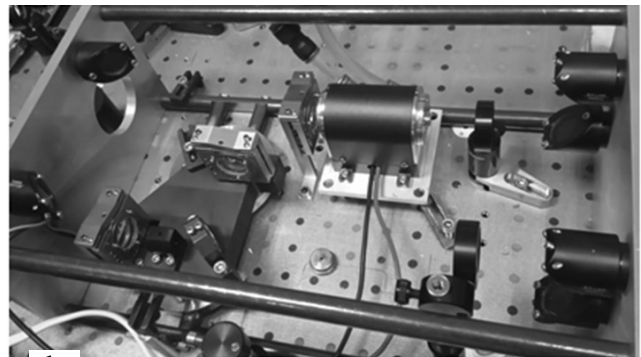


**Fig. 1.** Equivalent measurement scheme.

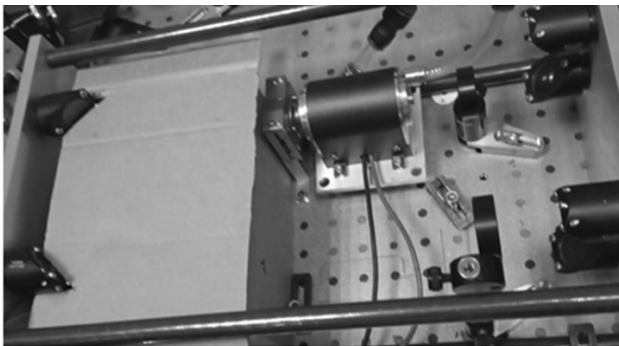
1–3 — flat mirrors  $R = 99.5\%$ , 4 — 50 % light splitter of IM with compensator, 5 — coupler, 6 — 3A-P power meter with VEGA monitor (Ophir, Izrael), 7 — MSO 4034 oscilloscope (Tektronix), 8 — analyzer of beam intensity distribution LaserBeamProfiler (LLG, Germany), 9 — Techadvanced 1053 laser (LLC "Laserexport", Russia),  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$  — diaphragms  $\varnothing 2.2$  mm, L1–L3 — lenses, AC — active medium of the laser head GN-50 (Sino-Laser, China)



a



b



c

**Fig. 2.** External view of the resonator with the open interferometer IM1 (a), IM2 (b) and with a closed housing (c)

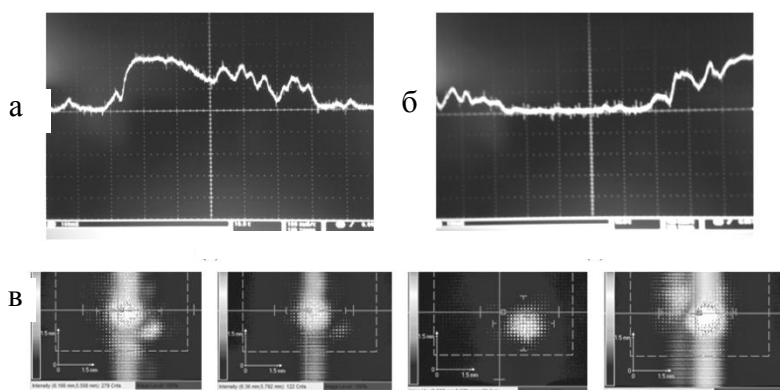
The output mirror of the resonator was an equal-arm IM, the radiation from the output of the interferometer was fed to the power meter 6, a part of it was branched off through the imaging lens L3 to the analyzer of the beam intensity distribution 8.

The MI was tuned to a zero field, using the analyzer of the intensity distribution, the spot had a distribution close to Gaussian. The output power level when

tuned to the maximum intensity, as a rule, corresponded to 0.5–0.7 W.

The power meter 6 had an analog output, the signal from which was fed to the oscilloscope 7 to monitor the long-term (from one to several tens of seconds) stability of the laser output radiation. During optical alignment of the circuit as a whole and of the MI mirrors, the end mirror of the resonator 1 was removed,





**Fig. 3.** Fluctuations of the radiation intensity at the output of the open IM1. On the oscilloscope (a, б) during sweep 10 s/div and on the analyzer matrix (в)

and the radiation of the auxiliary IR laser 9 was introduced along the optical axis of the system at a wavelength of 1.053  $\mu\text{m}$ , close to the operating wavelength of the laser.

The first of the interferometer configurations investigated in this work (hereinafter IM1) was the same as in [6]. The mirrors of the interferometer for rough (with an accuracy of up to ten microns) and precise (up to a few and fractions of microns) equalization of the arm lengths were equipped with appropriate manual (mirror 3) and piezoceramic (mirror 2) linear translators. IM1 design and the method of aligning the lengths of his shoulders are described in detail in our work [7].

The experiments were carried out on the basis of the compact resonator, with a long equivalent circuit "folded" into a block with a length not exceeding 350 mm by means of mirror retroreflectors. The external view of the emitter with the IM1 configuration is shown in Fig. 2, a. It should be noted that in this photograph the end mirror of the resonator, to be installed to the left of the laser head, is removed, and the radiation of the auxiliary laser is introduced into the circuit (compare with Fig. 2, b).

In Fig. 2, b, the second of the studied configurations of MI (hereinafter MI2) is shown, the main features of which are as follows:

- all elements of the IM are placed on a rigid single base;
- base and frames are made of the same steel;
- the shoulders are structurally aligned by precise installation of the mirrors, so that a manual linear translator of one of the mirrors is excluded;
- precise piezoceramic trim of mirror 2 is retained.

Both configurations of the MI were tested in two modifications: in an open form and in a housing made of thick cardboard (see Fig. 2, c). In addition, in this work, we used a more accurate refrigeration unit compared to that used in [6], the Polyscience 6500 Series 1/2 HP chiller (USA), which allows maintaining

the temperature of the liquid cooling laser head at the level of  $\pm 0.1$  deg. (previously it was  $\pm 0.5$  deg.). The location of the chiller in concern to the radiator was also changed, the distance varied from one to three and a half meters.

In a number of experiments, pneumatic vibration isolation of the base plate of the emitter was used, that was part of the vibration isolation system 1VIS10W Standa (Lithuania), capable of effectively absorbing vibrations in the range from a few to several tens of hertz.

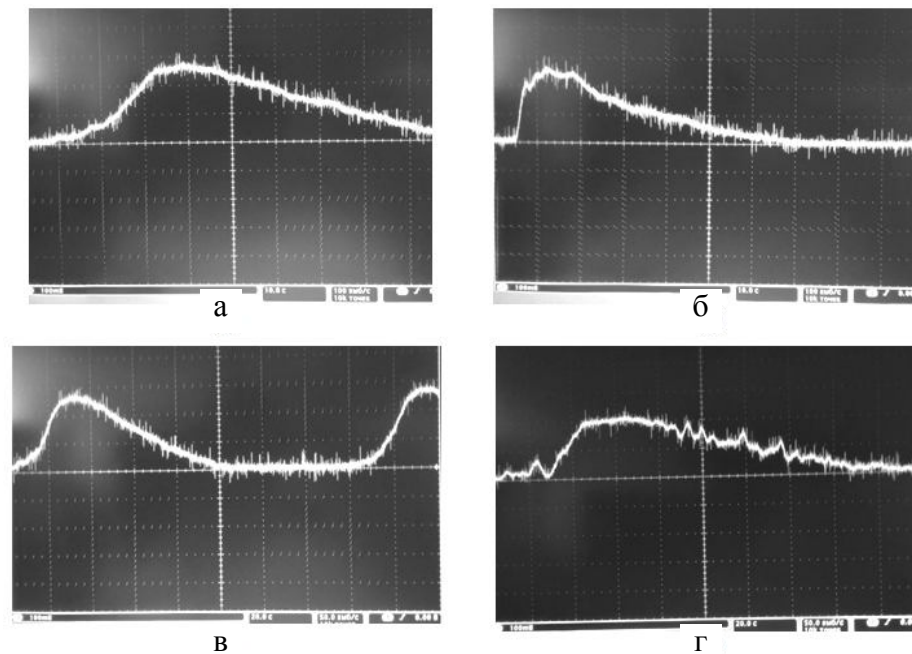
## EXPERIMENTAL RESULTS

### First series of experiments

In the first series, the open and closed configurations of IM1 were investigated. In [6], the presence of intensity fluctuations at the output of an open MI with a period from one to several seconds was noted. Similar "fast" oscillations were observed in the described experiments too, and their form and the range practically did not change when the vibration-isolating system was switched on and when the chiller laser head was replaced with a more accurate one.

Spontaneous intensity fluctuations were observed on long oscilloscope sweeps (see Fig. 3, a, б) and in the form of spots of different intensities when using the LaserBeamProfiler analyzer (see Fig. 3, в). Note that the shape of the intensity distribution in the spots of the output radiation almost always corresponded to the MI tuning to an interference zero field, i.e. no random angular misalignments of the mirrors were observed.

In Fig. 3, it can be seen that, along with "fast" oscillations, there are periodic spontaneous smooth changes in intensity from a maximum (Fig. 3, a) to a minimum (Fig. 3, б) with a time scale of about 40–50 s. These fluctuations are apparently associated with a smooth increase in the temperature of the air and metal nodes, which, in turn, leads to a distinct thermal



**Fig. 4.** Fluctuations of the radiation intensity at the output of the closed IM1, recorded at sweeps of 10 (a, б, в) and 20 (г) s/div

lengthening of the MI arms (for every about 40 s, the OPD increases by  $\lambda/2$ ).

Further, for comparison, the closed configuration of IM1 was investigated (see the photograph in Fig. 2, в). Oscillograms in Fig. 4, a–в, correspond to a completely closed body; in the case of fig. 4, г, in the area of the pulse top, the top cover was removed, and an uneven air flow was organized from top to bottom inside of the case. It can be seen that placing IM1 in a simple cardboard box significantly increased its stability in comparison with an open design. The amplitudes of "fast" fluctuations of intensity became noticeably smaller (compare Fig. 3, a, and 4, a). Removing the top cover and the presence of air flow led to the appearance of small changes in the OPD of the interferometer and fluctuations in the intensity of the output radiation.

Slow thermal periodic fluctuations in intensity (and OPD) in the case of closed MI1 were still observed, but they became slower in comparison with open form, probably because the conditions of heat transfer in a closed volume became more inertial. As seen in Fig. 4, в, the transition from maximum to minimum was about 80 s.

Differences in the development of spontaneous "thermal" generation and generation caused by manual submicron tuning of the piezoceramic translator of the MI mirror can be observed in Fig. 4, a and б, respectively. By adjusting the piezoelectric ceramics, it was possible to return to the maximum generation

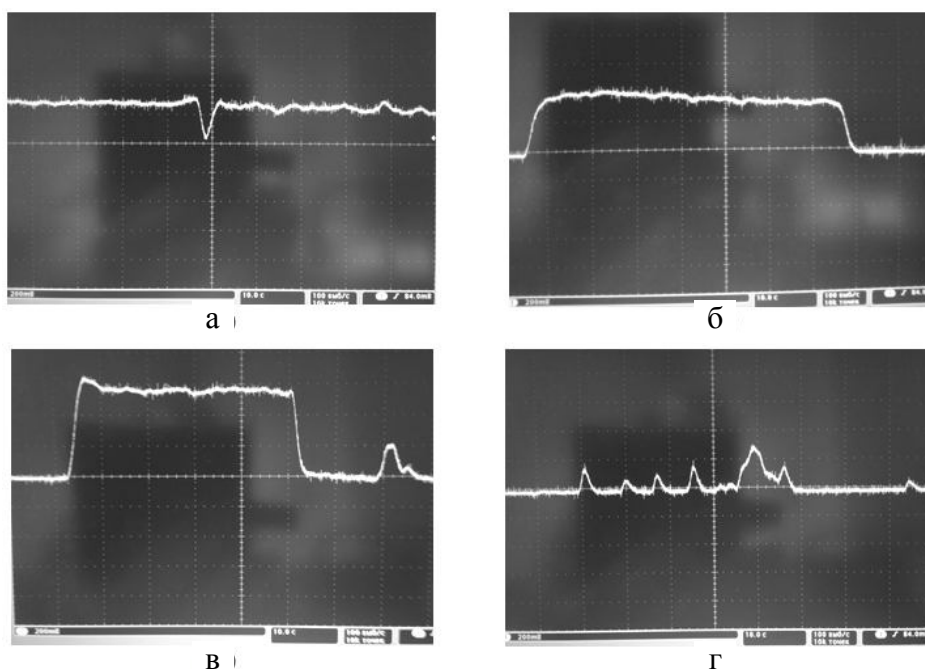
during any stage of spontaneous oscillations of the generation power.

### Second series of experiments

In the second series, the stability of a more rigid and simpler in design IM2 in open and closed versions (see photographs in Fig. 2, б, с) was investigated. The main advantage of a rigid and material-homogeneous structure proved to be the marked improvement in long-term stability (see Fig. 5, a–в). Periodic thermal fluctuations of the OPD observed in the IM1 version were practically absent.

Placement of IM2 in the simplest body made it possible to reduce the level of "fast" instabilities. In Fig. 5, a, the negative spike corresponds to mechanical overlap of the resonator axis during quick removal of the housing. It can be seen that in the second part of the oscillogram in the open configuration, the oscillations increased. Turning on and off generation in the photographs (Fig. 5, б, в) was made by manual adjustment of the piezoceramic translator.

In conclusion, let us note one more factor that affects the stability of operation of the MI equipped with a piezoceramic translator. The rear spike in the oscillogram in Fig. 5, в, corresponded to the effect (acoustic and vibrational) from the accidental movement of a chair during the recording of the series. The nature of the pulses observed in Fig. 5, г is also predominantly acoustic, apparently. The piezoceramic translator was set to the absence of generation,



**Fig. 5.** Fluctuations of the radiation intensity for the IM2 at the moment of removing the case (a) and for the closed case (б-г), sweep 10 s/div

the appearance of the first pulses was again associated with the movement of the chair, and the latter with a loud clapping of hands.

A separate series of experiments showed the influence of the operating chiller noise on the stability of the position of the MI mirror installed on the P-611.1S piezoceramic translator used with the E-609SO driver-amplifier (PI, Germany). This observation made it possible to further increase the stability of the results by simply removing the chiller from the piezoceramic translator up to 3.5 m.

### CONCLUSION

In conclusion, we note that in this work, we have experimentally demonstrated an increase in the stability of an MI intended for operation as part of a laser emitter of ultrashort pulses. Since active stabilization is undesirable in the concept of controlled MI, passive stabilization was used, which made it possible to identify the following peculiarities.

If there is an accuracy of maintaining the coolant temperature at a level of  $\pm 0.1$  degrees, the laser head does not affect the stability of the output radiation intensity of the laser with IM. The presence of a low-frequency vibration-isolating system of the base plate of the radiator also did not increase the stability of the resonator with IM.

Random angular misalignments of the MI mirrors are not the determining factors of stability; all random and systematic fluctuations in the intensity of the out-

put radiation were caused by microscopic translational movement of the mirrors and the corresponding changes in the OPD.

Systematic slow fluctuations in intensity associated with inhomogeneous thermal expansion of parts and units of the MI were noticeably reduced when using a single rigid base of the interferometer and its nodes made from the same material with a low coefficient of thermal expansion, and with minimization of their quantity.

Random fast fluctuations of intensity associated with vibrations of the surrounding air were noticeably reduced in the case of using the simplest (non-hermetic) housing surrounding the MI.

Random intensity fluctuations associated with micro-oscillations of the MI mirror mounted on a piezoceramic translator were reduced with the elimination of acoustic and vibration interference caused by the operation of the refrigeration unit and random noise near the piezoelectric translator. A significant decrease in the effect of the chiller was observed at a distance of 3.5 m from the radiator.

The results obtained allow us to expect more reproducible and stable results when using MI in a controlled mode as a composite mirror of a solid-state laser resonator emitting ultrashort pulses.

*The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment of 2019 No. 075-00924-19-00 dated 28.12.18.*

## REFERENCES

1. Griffiths P.R., de Haseth J.A., ed. by J.D. Winefordner. *Fourier transform infrared spectrometry*. Chemical analysis: A series of monographs on analytical chemistry and its applications. Vol. 171. Wiley-Interscience, 2007. DOI: 10.1002/047010631X
2. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Krylov V.N., Putilin S.E. *Femtosekundnaya optika i femtotekhnologii* [Femtosecond optics and femtotechnology]. St. Petersburg, SPbGUITMO Publ., 2010. 234 p. (In Russ.)
3. Freschi A.A., Frejlich J. Adjustable phase control in stabilized interferometry. *Optics. Letters*, 1995, vol. 20, is. 6, pp. 635–637. DOI: 10.1364/OL.20.000635
4. Minoni U., Sardini E., Gelmini E., Docchio F., Marioli D. A high-frequency sinusoidal phase-modulation interferometer using an electro-optic modulator: Development and evaluation. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, vol. 62, is. 11, pp. 2579–2583. DOI: 10.1063/1.1142233
5. Gryaznov N.A., Sosnov E.N. [Compact, high-performance picosecond laser for mobile robotic engineering systems]. *Ekstremalnaya robototekhnika*. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Extreme robotics. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, Politekhnikaservis Publ., 2014, pp. 369–371.  
URL: <https://er.rtc.ru/ru/component/content/article/2-uncategorised/22-o-konferentsii-2014?Itemid=136> (In Russ.)
6. Gryaznov N.A., Sosnov E.N., Goryachkin D.A., Nikitina V.M., Rodionov A.Yu. [Active phase synchronization of modes in a resonator with a Michelson interferometer]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2019, vol. 86, no. 4, pp. 3–10.  
DOI: 10.1364/JOT.86.000197
7. Gryaznov N.A., Goryachkin D.A., Sosnov E.N., Charlamov V.V. [Adjustment of optical paths difference in Michelson interferometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2019. vol. 29, no. 3, pp. 41–46. DOI: 10.18358/np-29-3-i4146

Contacts: *Goryachkin Dmitry Alekseevich*,  
d.goryachkin@rtc.ru

Article received by the editorial office on 15.10.2020