

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 535.41, 520.362

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МАКЕТА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

© Авторы, 2016

Голяк Ил.С. — к.ф.-м.н., м.н.с. НИЧ НУК «Фундаментальные науки», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва. E-mail: iliyagol@mail.ru

Дворук С.К. — ведущий инженер Центра прикладной физики, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва.

Есаков А.А. — ассистент кафедры «Физика», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва. E-mail: a.esakov@inbox.ru

Морозов А.Н. — д.ф.-м.н. проф., заведующий кафедрой «Физика», Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана, Москва. E-mail: amor59@mail.ru

Пустовойт В.И. — академик РАН, д.ф.-м.н., проф., научный руководитель, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва. E-mail: vladpustovoi@gmail.com

Строков М.А. — инженер Центра прикладной физики, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва. E-mail: makstrokov@yahoo.com

Табалин С.Е. — научный сотрудник НИЧ НУК «Фундаментальные науки», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва. E-mail: tabalin@mail.ru

Аннотация

В работе описываются основные элементы, используемые в разработке макета для отработки методики регистрации высокочастотных флуктуаций метрики пространства-времени и приведены их основные характеристики. Был собран макет представляющий собой интерферометр Фабри-Перо с высокоотражающими зеркалами и двухмерным резонатором. Проведены эксперименты по юстировке макета с использованием источников излучения с длинами волн 633 нм и 1064 нм и по регистрации интерференционных колец. Приведены примеры регистрируемого сигнала для источника с длиной волны 633 нм. Показано, что при долговременной записи сигнала с интерферометра необходима его установка на виброгасящее основание.

Ключевые слова: интерферометр Фабри-Перо, низкочастотный оптический резонанс, гравитационно-волновые возмущения, высокочастотные гравитационные детекторы

Abstract

The basic elements used in designing the model for recording high-frequency fluctuations of space-time metric and their basic characteristics are described. Was assembled model that represents Fabry-Perot interferometer with highly reflective mirrors and two-meter resonator. Experiments on adjustment of the model with using laser sources of radiation with wavelengths of 633 nm and 1064 nm, and experiments with the registration of the interferometer fringes were performed. Examples of the recorded signal for a source with a wavelength of 633 nm are given. It is shown that in the long-term recording signal from the interferometer having to install the vibration damping base.

Key words: Fabry-Perot interferometer, low-frequency optical resonance, gravitational-wave perturbations, high-frequency gravitational detectors

В настоящее время большое внимание уделяется поиску гравитационных волн астрофизического происхождения. В связи с чем разрабатываются новые методы и гравитационно-волновые детекторы.

На поиск гравитационных волн направлены такие международные проекты как LIGO (США), VIRGO (Италия, Франция), TAMA-300 (Япония), GEO 600 (Германия) и др. [1–4]. Основная особенность данных проектов — попытка регистрации коротких всплесков гравитационных волн астрофизического происхождения от достаточно редких событий, которые имеют частоты 100–1000 Гц.

С предсказанием существования реликтовых гравитационных волн, возникающих на первоначальной стадии формирования Вселенной, связаны попытки разработки высокочастотных гравитационных детекторов [5, 6]. Для таких волн должно наблюдаться достаточно резкое возрастание спектральной плотности энергии гравитационных волн для частот 10^5 – 10^{10} Гц [7–9].

Идея применения интерферометра Майкельсона для регистрации гравитационных волн была предложена в 1962 г. в [10]. В настоящее время она используется во всех лазерных интерференционных гравитационных антеннах, в которых в плечах интерферометра Майкельсона располагаются интерферометры Фабри-Перо [11].

В [12] предлагается модификация оптического интерферометра Фабри-Перо за счет использования отражающих периодических структур в качестве зеркал резонатора.

В качестве альтернативы использованию интерферометра Фабри-Перо может рассматриваться интерферометр Саньяка. Так в [13] рассматривается перспективность использования данного интерферометра в качестве детектора гравитационных волн и проведена оценка его чувствительности. Показано, что детектор на основе интерферометра Саньяка позволяет достичь чувствительности сравнимой с той, которую позволяет получить детектор на двух интерферометрах Майкельсона в ксилофонной конфигурации [13].

Один из методов повышения чувствительности гравитационных антенн в высокочастотной области спектра является использование явления низкочастотного оптического резонанса, наличие которого в интерферометрах Фабри-Перо установлено в [14].

Анализ чувствительности интерферометра Фабри-Перо в высокочастотной области спектра был проведен в [15, 16]. В них показана возможность регистрации высокочастотных гравитационно-волновых возмущений на основе низкочастотного оптического резонатора с использованием интерферометра Фабри-Перо. Достоинством предложенного детектора гравитационных волн является отсутствие необходимости установки зеркал на подвижных массах, что существенно упрощает процедуру их юстировки [16].

Практическое применение явления низкочастотного оптического резонанса даст возможность повысить минимально регистрируемые вариации метрики пространства-времени до уровня современных (проекты LIGO, VIRGO, TAMA, GEO-600 и др.) гравитационно-волновых детекторов при снижении размеров их плеч на 1-2 порядка.

Для регистрации высокочастотных гравитационных волн предлагается использовать интерферометр Маха-Цандера, в плечах которого установлены интерферометры Фабри-Перо со сдвинутыми относительно максимума рабочими точками. Такая оптическая схема позволит существенно снизить оптические шумы и, тем самым, повысить отношение сигнал/шум.

Оценка спектральной чувствительности интерферометра Маха-Цандера с размером плеч порядка 100 метров показывает, что он позволит обеспечивать возможность регистрации вариаций метрики пространства-времени на уровне $10^{-23} 1/\sqrt{\text{Гц}}$. Эта величина совпадает с уровнем чувствительности лазерных интерференционных гравитационных антенн в проектах LIGO и VIRGO, имеющих размер плеч 4 и 3 км.

Для регистрации гравитационных волн на основе явления низкочастотного оптического резонанса может использоваться схема приведенная на рис. 1. В каждом плече устанавливаются несколько датчиков, что позволяет проводить независимую одновременную регистрацию редких событий и исключать случайные выбросы отдельных детекторов. За счет этого повышается надежность детектирования.

Использование такой схема позволяет увеличить чувствительность вдвое по сравнению с одноканальной схемой, используемой в зарубежных интерферометрах. Данное преимущество объясняется тем, что рабочие точки двух каналов выбираются на противоположных склонах резонансного пика эталона Фабри-Перо, а сигналы с двух фотодетекторов складывают (с противоположным знаком) с помощью мостовой схемы так, что результирующий отклик удваивается. Локализация рабочих точек двух каналов осуществляется за счет введения в один из каналов фазовой пластинки соответствующей толщины, что приводит к разным набегам фаз в двух каналах.

Такая схема обеспечивает большую устойчивость к внешним наводкам, что объясняется тем, что возникающие детерминированные сигналы проявляются одинаково на обоих каналах и их разность оказывается близкой к нулю. Сигналы имеющие случайный характер дают существенно разный сигнал в двух каналах.

Другая схема лазерной интерференционной гравитационной антенны на основе интерферометра Маха-Цандера с включенными в его плечи интерферометрами Фабри-Перо изображена на рис. 2.

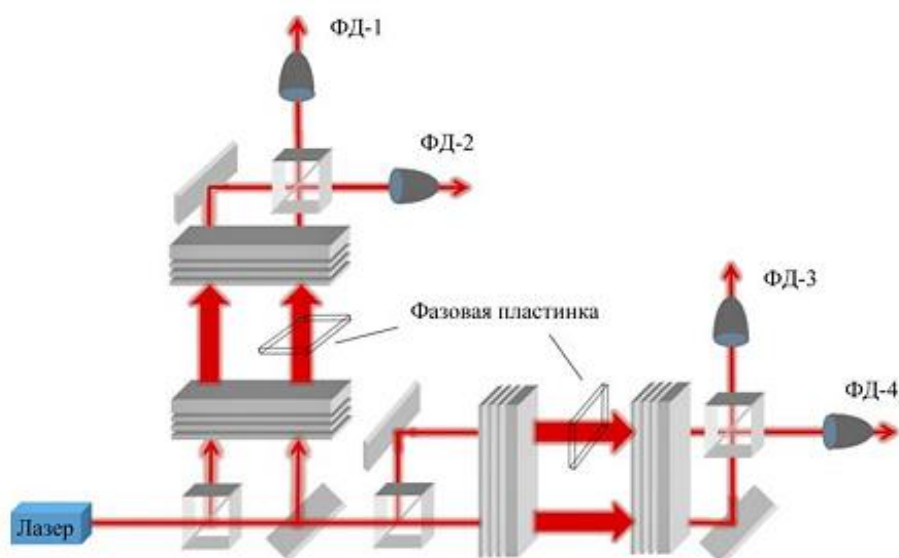


Рис. 1. Принципиальная схема лазерной интерферометрической гравитационной антенны — схема Маха-Цандера с резонаторами Фабри-Перо и двойными каналами регистрации в каждом из плеч.

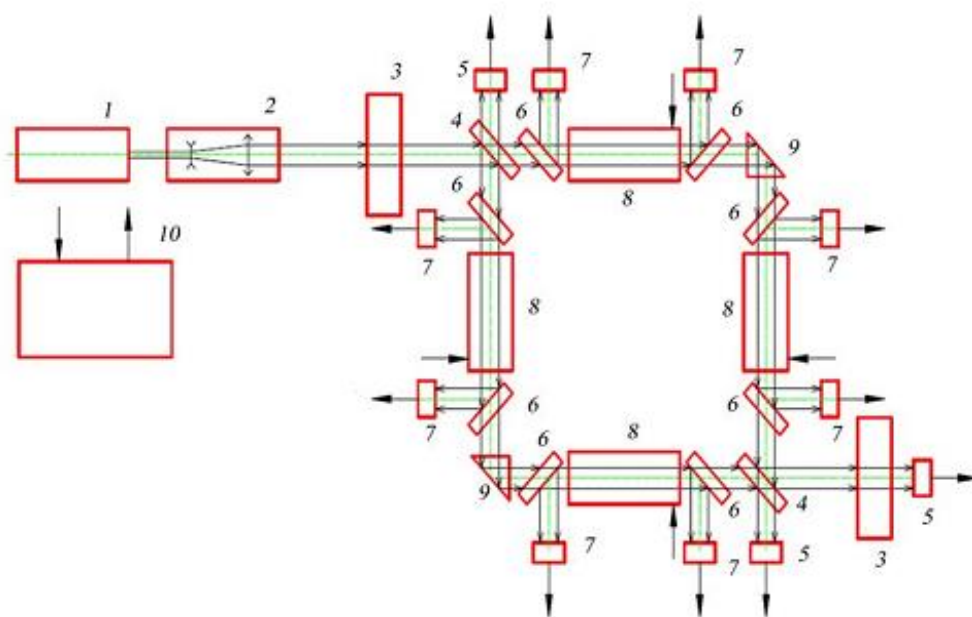


Рис. 2. Схема лазерной интерференционной гравитационной антенны.

В отличие от интерферометра Майкельсона на светодетектор попадает не отраженное от второго резонатора, а прошедшее через него излучение. Следовательно, интерференция возникает между пучками лучей, прошедшими две ветви интерферометра.

Детектор состоит из следующих основных элементов:

1. лазер с системой автоматической подстройки частоты;
2. объектив для расширения лазерного луча;
3. зеркала для рециклирования;
4. делительные элементы;

5. прецизионные фотоприемные устройства;
6. зеркала для отражения части светового потока на прецизионные фотоприемные устройства;
7. инфракрасные ПЗС камеры, предназначенные для выработки сигналов юстировки интерферометров Фабри-Перо;
8. интерферометры Фабри-Перо с системой автоматической юстировки;
9. призмы для переотражения лазерного луча;
10. электронно-вычислительный блок для автоматической подстройки частоты лазера, юстировки интерферометров Фабри-Перо, снятия сигналов с инфракрасных ПЗС камер и прецизионных фотоприемных устройств и обработки измерительной информации.

На рис. 3 представлена трехмерная модель лазерной интерференционной гравитационной антенны.



Рис. 3. Трехмерная модель лазерной интерференционной гравитационной антенны.

Для отработки методов регистрации высокочастотных гравитационных волн и согласования системы управления и обработки экспериментальной информации был собран резонатор Фабри-Перо и проведены работы по его настройке. С использованием собранного макета проводились эксперименты по возможности регистрации интерференционных картин.

Общая схема макета для отработки методов регистрации высокочастотных гравитационных волн изображена на рис. 4. Внешний вид представлен на рис. 5. Излучение от Nd:YAG лазера (1) с длиной волны $\lambda = 1064$ нм проходит через диафрагму (2), размером 1 мм, отражается от зеркала (3), проходит через расширитель (4) и попадает в оптический резонатор (5). При многократном отражении излучения от зеркал резонатора на фотоприемной матрице (6) формируется изображение интерференционных колец. Получаемые данные передаются в систему сбора и обработки National Instruments (7), которую в дальнейшем предполагается использовать как систему реального времени для непрерывной записи и обработки информации.

В качестве источника излучения используется перестраиваемый кольцевой Nd:YAG лазер с рабочей длиной волны 1064 нм. В его состав входят два блока.

1. Блок лазерного излучателя:

1.1. Кольцевой Nd:YAG лазер.

1.2. Полупроводниковые лазеры накачки АТС-С4000-200-АОФ-808-3.

1.3. Оптические схемы накачки.

2. Блок питания лазера:

2.1. Блок термостабилизации Nd:YAG лазера.

2.2. Блок термостабилизации полупроводниковых лазеров.

2.3. Источники тока полупроводниковых лазеров.

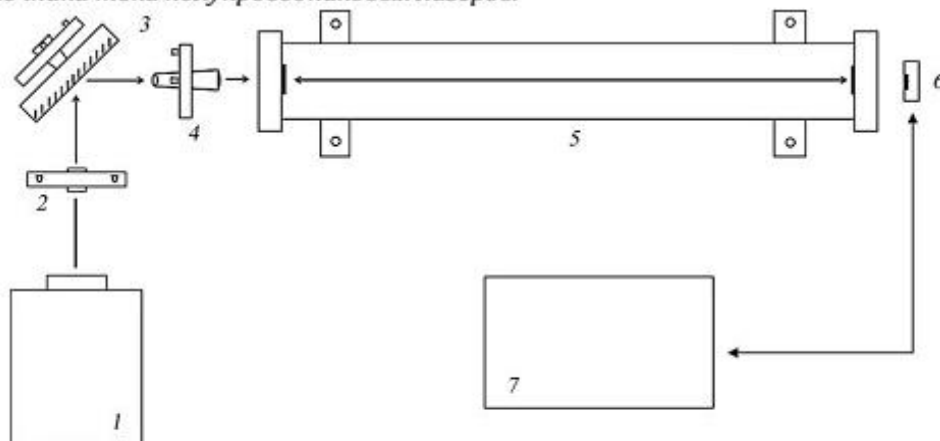


Рис. 4. Схема макета для регистрации гравитационных волн: 1 — Nd:YAG лазер 1064 нм, 2 — диафрагма, 3 — зеркало, 4 — расширитель пучка, 5 — оптический резонатор, 6 — камера Ophir LW130, 7 — система сбора и обработки данных National Instruments.



Рис. 5. Внешний вид макета для регистрации гравитационных волн: 1 — Nd:YAG лазер с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, 2 — диафрагма, 3 — зеркало, 4 — расширитель пучка, 5 — оптический резонатор, 6 — камера Ophir LW130, 7 — система сбора и обработки данных National Instruments.

В лазере используется кольцевая схема с однонаправленной бегущей волной для одночастотного режима работы. Преимущество такой схемы состоит в том, что полностью устраняется эффект пространственной неоднородности насыщения усиления, который приводит к многомодовому режиму генерации. Выбор длины волны $\lambda = 1064$ нм лазерного источника излучения объясняется рабочим диапазоном частот, на которых должна происходить регистрация детектором.

При работе с лазером первоначально проводилась юстировка обоих каналов накачки блока лазерного излучателя на генерацию нулевой моды TEM_{00} .

Основные характеристики лазерного излучателя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики лазерного источника излучения

Выходная мощность лазера ($\lambda=1064$ нм)	2 мВт
Модовый состав	TEM ₀₀
Поляризация на длине волны 1064 нм	линейная
Ширина линии	10 кГц
Область свободной дисперсии лазера	2.4 ГГц
Чувствительность температурной перестройки	0.005 нм/°С

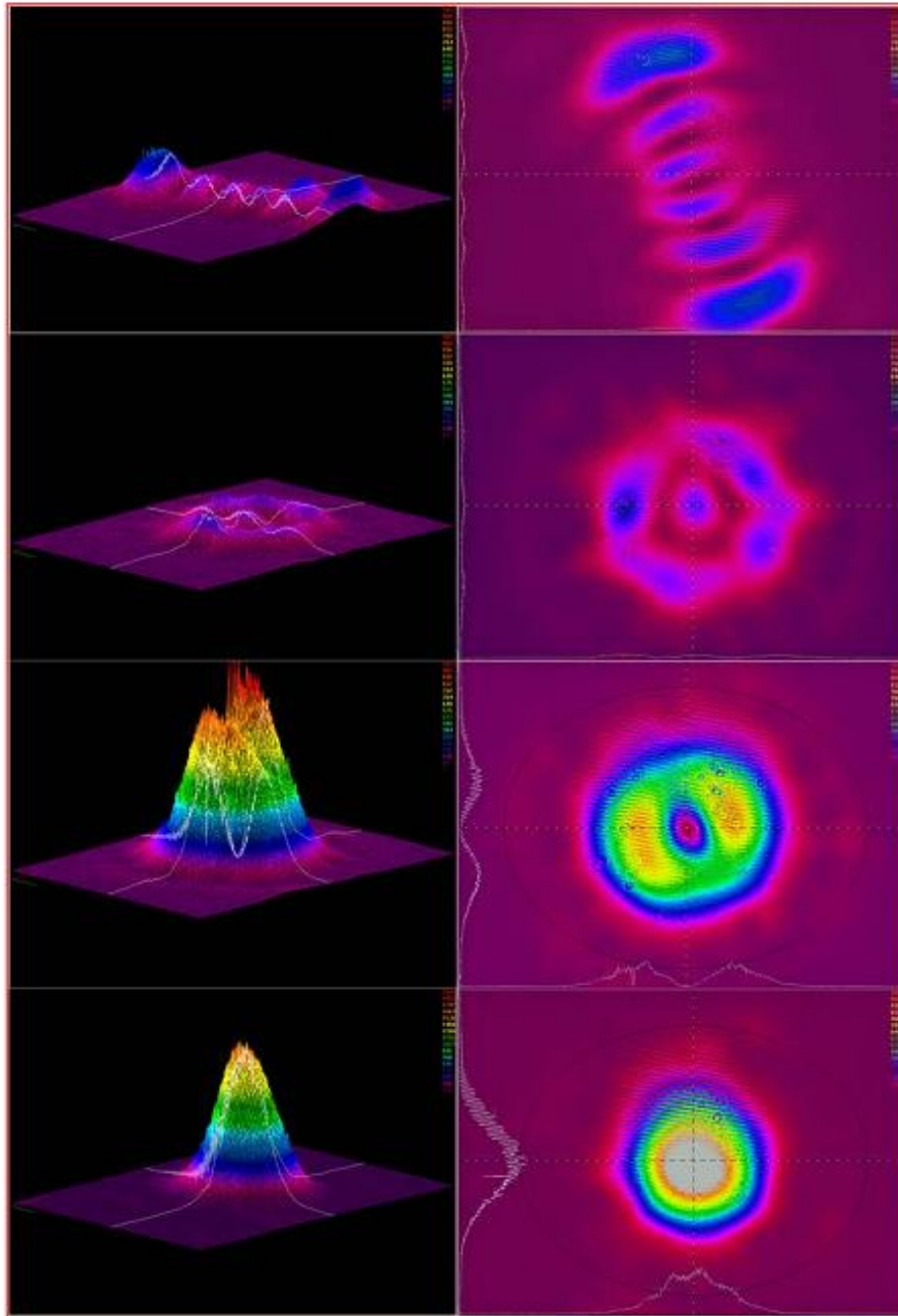


Рис. 6. Вид различных мод в оптическом резонаторе.

В качестве резонатора было выбрано основание от He-Ne лазера ЛГН-222 с длиной плеча 2 м. Наличие инварового стержня в конструкции оптического резонатора обеспечивает жесткость и большую стабильность за счет малого температурного коэффициента линейного расширения материала. В конструкции резонатора предусмотрена возможность двухуровневой юстировки: грубой юстировки положения зеркал и точной юстировки.

Обратное излучение, отраженное от зеркал резонатора, может частично попасть на выходную оптику лазерного источника и отразиться обратно в резонатор. Это приведет к размытию профиля лазерного пучка и формируемой интерференционной картины. Поэтому на входе в оптический резонатор устанавливается регулируемая диафрагма.

Для макета гравитационных волн были изготовлены высококачественные зеркала с коэффициентом отражения 99.99 % на рабочей длине волны $\lambda = 1064$ нм. Высокий коэффициент отражения зеркал обеспечивает большое плечо резонатора и тем самым позволяет добиться большой чувствительности интерферометра.

Излучение, формируемое интерферометром, регистрируется камерой LW130 фирмы Spiricon с числом фоточувствительных элементов 1392×1040 и чувствительностью в широком спектральном диапазоне 190–1100 нм. Динамический диапазон камеры составляет 59 дБ. Для уменьшения интенсивности регистрируемого лазерного излучения перед камерой устанавливаются светофильтры, которые помимо ослабления лазерного излучения обеспечивают вырезание излучения видимой части спектра.

Данные с камеры поступают в систему сбора и обработки National Instruments. Она позволяет проводить долговременную запись регистрируемых интерференционных картин и их обработку. В дальнейшем предполагается установка зеркал на пьезоэлементах с временной подстройкой их положения с использованием системы сбора и обработки данных National Instruments.

Первоначально проводилась настройка интерферометра для He-Ne лазера с длинной волны $\lambda = 633$ нм. На рис. 6 приведены примеры двумерных и трехмерных изображений, получаемых на выходе интерферометра и регистрируемых камерой.

Несмотря на жесткую конструкцию и крепление всех элементов макета, появляется дрожание зеркал за счет вибраций, что приводит к отклонению хода лучей в резонаторе от осевого положения. В результате в резонаторе возникают различного вида оптические моды (см. рис. 6). Визуальное изображение, видимое глазом, представлено на рис. 7.

Таким образом в работе описан собранный макет детектора высокочастотных гравитационных волн на основе интерферометра Фабри-Перо и проведены работы по юстировке резонатора и отработке системы регистрации данных.

Проведенные эксперименты показывают, что при долговременной записи получаемого сигнала с интерферометра необходима установка всей системы на виброгасящем основании.

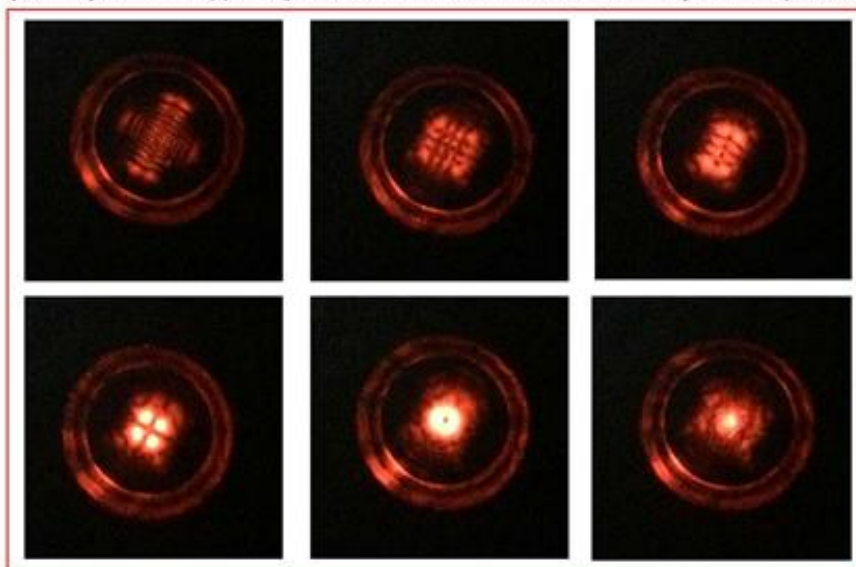


Рис. 7. Изображение на выходе резонатора.

Список литературы

1. LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory / B.P. Abbott, R. Abbott, R. Adhikari, P. Ajith, B. Allen *et al.* // *Rep. Prog. Phys.* 2009. Vol. 72. No. 7. P. 076901.
DOI: 10.1088/0034-4885/72/7/076901
URL: [Stacks.Iop.Org/RoPP/72/076901](http://stacks.iop.org/RoPP/72/076901) (дата обращения: 12.01.2016).
2. A State Observer for the Virgo Invented Pendulum // *Review of Scientific Instruments* / T. Accadia, F. Acernese, P. Astone, G. Ballardin *et al.* 2011. Vol. 82. P. 094502.
DOI: 10.1063/1.3637466
URL: http://pdfserv.aip.org/rsinak/vol_82/iss_9/094502_1.pdf (дата обращения: 12.01.2016).
3. Observation Results by the TAMA300 Detector on Gravitational Wave Bursts From Stellar-Core Collapses / M. Ando, K. Arai, Y. Aso, P.T. Beyersdorf *et al.* // *Rhys. Rev. D.* 2005. Vol. 71. No. 8. P. 082002-1-082002-17
DOI: 10.1103/PhysRevD.71.082002
URL: [Prd71-082002.Pdf](http://arxiv.org/abs/1201.2016) (дата обращения: 12.01.2016).
4. First Long-Term Application of Squeezed States of Light in a Gravitational-Wave Observatory // H. Grote, K. Danzmann, K.L. Dooley, R. Schnabel, J. Slutsky, H. Vahlbruch // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110. P. 181101-1-181101-5.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.181101
URL: <http://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/physrevlett.110.181101> (дата обращения: 12.01.2016).
5. *Li, F, Tang, M., and Shi, D.* Electromagnetic Response of a Gaussian Beam to High-Frequency Relic Gravitational Waves in Quintessential Inflationary Models // *Phys. Rev. D.* 2003. Vol. 67. P. 104008.
6. A New Theoretical Technique for the Measurement of High-Frequency Relic Gravitational Waves / R.C. Woods, R.M.L. Baker, F. Li, G.V. Stephenson, E.W. Davis, A.W. Beckwith // *J. Of Modern Physics.* 2011. No. 2. P. 498-518.
7. *Boyle, L. A., Steinhardt, P.J., and Turok, N.* The Cosmic Gravitational-Wave Background in a Cyclic Universe // *Phys. Rev. D.* 2004. Vol. 69. P. 127302.
8. *Sa, P.M., Henriques, A. B.* Gravitational-Wave Generation in Hybrid Quintessential Inflationary Models // *Phys. Rep. D.* 2010. Vol. 81. P. 124043.
9. *Nishizawa A, Motohashi H.* Constraint on Reheating After f(R) Inflation From Gravitational Waves // *Phys. Rev. D.* 2014. Vol. 89. P. 063541.
10. *Пустовойт В. И., Герценштейн М. Е.* К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот // *ЖЭТФ.* 1962. Т. 43. Вып. 8. С. 605-607.
11. *Гладышев В. О., Морозов А. Н.* Классификация гравитационных антенн по методам регистрации гравитационного излучения // *Измерительная техника.* 2000. № 9. С. 21-25.
12. *Пустовойт В. И.* Резонатор Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал как основа для обнаружения гравитационных волн // *Доклады Академии Наук.* 2006. Т. 407. № 4. С. 472-477.
13. *Ворончев Н. В., Данилишин Ш. Л., Халили Ф. Я.* Интерферометр Саньяка как гравитационно-волновой детектор третьего поколения // *Вестник Московского Университета. Сер. 3. "Физика и Астрономия".* 2014. № 6. С. 81-89.
14. *Гладышев В. О., Морозов А. Н.* Низкочастотный оптический резонанс в многолучевом интерферометре Фабри-Перо // *Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 19. Вып. 14. С. 39-42.
15. *Морозов А. Н.* Применение интерферометра Фабри-Перо для регистрации высокочастотных флуктуаций метрики пространства — времени // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2012. № 5. С. 24-38.
URL: <http://engjournal.ru/articles/203/203.pdf> (дата обращения: 12.01.2016).
16. *Есаков А. А., Морозов А. Н., Табалин С. Е., Фомин И. В.* Применение низкочастотного оптического резонанса для регистрации высокочастотных гравитационных волн // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки".* 2015. № 1. С. 26-35.

Поступила 10 февраля 2016 г.

DEVELOPMENT AND CREATION MODEL TO REGISTRATION HIGH-FREQUENCY GRAVITATIONAL WAVES

IL.S. GOLYAK, S.K. DVORUK, A.A. ESAKOV,
A.N. MOROZOV, V.I. PUSTOVOIT, M.A. STROKOV, AND S.E. TABALIN

The basic elements used in designing the model for recording high-frequency fluctuations of space-time metric and their basic characteristics are described. Was assembled model that represents Fabry-Perot interferometer with highly reflective mirrors and two meter resonator. Experiments on adjustment of the model with using laser sources of radiation with wavelengths of 633 and 1064 nm, and experiments with the registration of the interferometer fringes were performed. Examples of the recorded signal for a source with a wavelength of 633 nm are given. It is shown that in the long-term recording signal from the interferometer having to install the vibration damping base.