

**VI. Измерительные средства в гравиметрии**

УДК 520, 520.08, 535.03

**КРИОГЕННЫЕ ФАБРИ-ПЕРО РЕЗОНАТОРЫ С  
ЗЕРКАЛАМИ НА ПОДЛОЖКАХ РАЗЛИЧНЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ****В.Н. Руденко<sup>1,2</sup>, М.В. Кувшинский<sup>1</sup>, С.И.Орешкин<sup>1</sup>,  
С.М. Попов<sup>1</sup>, К.В. Руденко<sup>2</sup>, И.С. Юдин<sup>1,3</sup>**<sup>1</sup>*Московский государственный университет им М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический Институт им. П.К. Штернберга, Москва,*<sup>2</sup>*Московский государственный университет им М.В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва,*<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский универси-  
тет), Московская область,  
Долгопрудный*

*Приводятся экспериментальные результаты изменения интегральных свойств резонаторов Фабри-Перо с зеркалами из различных материалов при их глубоком охлаждении в присутствии мощной оптической накачки. Обсуждаются преимущества зеркал на подложках из фторида кальция.*

*Ключевые слова: охлаждаемые зеркала, резонаторы Фабри-Перо, гравитационные антенны*

**CRYOGENIC FABRY-PEROT RESONATORS WITH  
MIRRORS SUBSTRATES OF VARIOUS OPTICAL  
MATERIALS****V.N. Rudenko<sup>1,2</sup>, M.V. Kuvshinski<sup>1</sup>, S.I. Oreshkin<sup>1</sup>, S.M. Popov<sup>1</sup>,  
K.V. Rudenko<sup>1,2</sup>, I.S. Yudin<sup>1,3</sup>**<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University Sternberg Astronomical Institute  
Moscow,*<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, GSP-1,*<sup>3</sup>*The Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

*The measured integrated optical parameters of the deep cooling Fabry-Perot resonators with the mirrors of different optical materials under high power laser pumping are presented. The advantages of the calcium fluoride substrates for the mirrors are discussed.*

*Key words: cryogenic mirrors, Fabry-Perot resonators, gravitational-wave antennas*

**Введение**

В настоящее время оптические резонаторы Фабри-Перо используются как для различных технических приложений, так и для прецизионных измерений в фундаментальной физике. В частности они входят в состав оптических

стандартов частоты с рекордной стабильностью [1] и являются ключевыми элементами гравитационно-волновых антенн в форме лазерных интерферометров с большой базой [2,3].

Атомные переходы, используемые в качестве опорных частот в оптических часах, обычно имеют оптическую добротность порядка  $10^{15}$ , что соответствует ширине линии около 1 Гц и меньше. Сужение линии доступных коммерческих лазеров в сотни килогерц чаще всего достигается с помощью метода Паунда-Дривера-Холла (PDH) [4], в котором оптический генератор (лазер) стабилизируется внешним резонатором Фабри-Перо (ФП) с большой резкостью (финесс). Типичный размер такого опорного резонатора составляет около 10 см при высоком значении финесса порядка  $10^5$ , что позволяет сузить линию генерации до единиц килогерц. При хорошей температурной стабилизации в области, где у материала опорного резонатора коэффициент температурного коэффициента расширения близок к нулю, а также эффективной сейсмической защите, частотная стабильность опорного резонатора ограничивается только изменениями его размеров, вызванных тепловыми колебаниями подложек зеркал и их покрытий [5].

В настоящее время для оптических опорных резонаторов используются стекла ULE, так как они имеют нулевой коэффициент температурного расширения вблизи комнатной температуры. В последнее время рассматривалась возможность использования двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ), который имеет меньшие механические потери при низких температурах. При этом броуновские акустические флуктуации самого резонатора снижаются, и тепловой шум будет определяться в основном покрытием (напылением) зеркал. Однако кремний обладает относительно большим тепловым расширением, и поэтому потребуются очень точный температурный контроль. В литературе обсуждается комбинированный подход с изготовлением корпуса эталонного резонатора из стекла ULE с низким тепловым шумом и использованием  $\text{SiO}_2$  для подложек зеркал [6].

Зеркальные покрытия представляют собой чередующиеся слои двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и оксида тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), причем наибольший вклад в тепловой шум вносят слои тантала [7]. Охлаждение опорного резонатора уменьшает тепловой шум пропорционально квадратному корню температуры. Однако в случае материала ULE это означало бы уход из зоны, где производная коэффициента теплового расширения равна нулю, что может привести к высоким скоростям дрейфа частоты при недостаточной стабилизации температуры. Альтернативой является использование охлажденного монокристаллического кремния, у которого нулевой коэффициент температурного расширения располагается при температуре  $\sim 120$  К [8], однако этот материал имеет окно прозрачности, начинающееся с длин волн более 1,2 мкм. Кроме этого, остаётся проблема шума в многослойных плёнках интерферометриче-

ских зеркалах. Она становится еще более важной при низких температурах, так как коэффициент механических потерь тантала имеет резонанс при 70 °К [9]. В настоящее время проводится работа по созданию покрытий с меньшими потерями, например, достигнут положительный эффект при легировании слоев тантала титаном (TiO<sub>2</sub>) [10].

Перспективы повышения чувствительности лазерных интерферометрических гравитационно-волновых антенн третьего поколения также связаны с идеей подавления теплового шума подвесных пробных масс-зеркал, путем их глубокого охлаждения до температуры жидкого азота или даже гелия [11]. Пионерами этого направления являются японские группы, которые выдвинули проект первого гравитационно-волнового интерферометра с подвесными криогенными зеркалами [12] в конце 20 века. Этот проект был опробован в пилотном варианте [13], а в настоящее время реализуется в виде подземного криогенного интерферометра KAGRA [14,15].

Следует упомянуть также твердотельную резонансную гравитационную антенну умеренной чувствительности с оптической системой регистрации, OGRAN [16]. Для этой антенны возможно частичное улучшение теплового контакта между твердотельным детектором и зеркалами [17]. Этот контакт, однако, не может быть полным ввиду необходимости сохранения высокой добротности колебательных мод зеркал [2,18]. Кроме того, серьезной проблемой, требующей экспериментального исследования, является механическая и оптическая устойчивость многослойного отражающего покрытия зеркал работающих при низких температурах и под действием мощного лазерного излучения. Эти задачи под общим термином "интерферометр с криогенными зеркалами" входят в программу исследований по разработке третьего поколения гравитационно-волновых антенн [19,20].

В данной работе мы представляем результаты экспериментального исследования поведения оптических резонаторов ФП с зеркалами на подложках из различных материалов.

## 1. Экспериментальная установка

Для проведения эксперимента была изготовлена модель детектора OGRAN [21]. Мы использовали металлическую цилиндрическую болванку из дюрала Д16Т со сквозным отверстием (туннель) вдоль её центральной оси. Зеркала были закреплены на торцах цилиндра, образуя оптический ФП резонатор. Модель имела следующие параметры: длина 200 мм, наружный диаметр 160 мм, диаметр туннеля 20 мм, вес 8 кг. Модель подвешивалась внутри вакуумной камеры специального криостата, имея проводящий тепловой контакт с стенками камеры. Подробное описание конструкции криостата и системы подвески детектора внутри камеры охлаждения можно най-

ти в работе [21]. Криостат был оснащен окном для ввода и вывода оптического излучения. Температура детектора контролировалась двумя коммерческими датчиками производства компании Lakeshore. Один датчик был установлен непосредственно на зеркале ФП резонатора, а второй был прикреплен к корпусу детектора.

Выбор материала подложек зеркал в первую очередь диктуется требованием малых механических потерь [2] для подавления теплового (броуновского) шума собственных акустических мод зеркал. Опыт показал, что некоторые оптические стекла, кристаллический кварц, сапфир, кремний и фторид кальция  $\text{CaF}_2$  удовлетворяют этому требованию [18].

Для оптических стекол в астрономических приборах (телескопах) используют материалы с низким коэффициентом теплового расширения (zerodur, или российский аналог - ситалл).

В наших тестовых экспериментах мы использовали зеркала с подложками из ситалла, сапфира и фторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ). Все они имеют широкий спектр пропускания в оптическом диапазоне частот и могут выдерживать низкие температуры без необратимых изменений при циклах охлаждения-нагрева.

Экспериментальные оценки внутренних механических потерь для материалов (мнимая часть коэффициента упругости) составляют  $\phi \sim 10^{-8}$  [18] при криогенных температурах. Однако кристаллический кварц имеет скачок до  $10^{-5}$  в области температур вблизи 40 К. Кремний считается перспективным материалом при работе при температурах вблизи точки кипения азота ( $< 120$  К), но он непрозрачен для видимого света. Его применение предполагает переход на рабочую длину волны  $\lambda = 1,55$  мкм, что приводит к серьезной переделке всех элементов оптической части гравитационно-волновых интерферометров. Наши эксперименты проводились в инфракрасном свете при длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм. На этой длине волны работают все лазерные гравитационные антенны, включая резонансный опто-акустический детектор OGRAN [16].

В эксперименте использовались зеркала, изготовленные в НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха с использованием многослойных диэлектрических интерференционных покрытий из чередующихся слоев оксидов  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , которые наносились методом ионно-лучевого напыления. Параметры зеркального слоя следующие: рассеяние  $K_s < 10$  ppm, коэффициент поглощения  $K_a < 10$  ppm, коэффициент отражения  $R \sim 99,95$  % и лучевая прочность (предельная плотность мощности)  $\sim 1-2$  ГВт/см<sup>2</sup>.

Экспериментальная установка по исследованию оптических свойств состоит из следующих основных компонент (см. рис. 1): а) криостат с размещенной в нем моделью детектора с ФП резонатором; б) оптический узел, содержащий лазер оптической накачки вместе с элементами световода и

фотодетектором; в) блок управляющей электроники. Лазерное излучение проходит через ячейку Фарадея и электрооптический модулятор. В исследуемый резонатор ФП вводится оптическое излучение с фазовой модуляцией на частоте 8 МГц. Вышедшее из резонатора излучение регистрируется фотодетектором, сигнал с которого подается на монитор визуального контроля и на анализатор спектра.

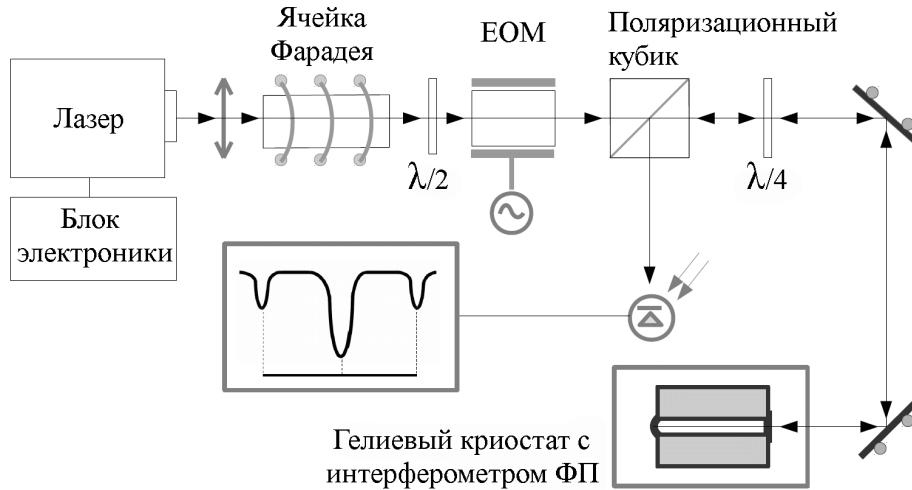


Рис.1. Схема экспериментальной установки

В эксперименте использовался одномодовый перестраиваемый Nd:YAG-лазер на длине волны 1,064 мкм с максимальной мощностью  $P$  до 1 Вт, который был разработан в Институте лазерной физики СО РАН, Новосибирск. Конструкция основана на принципе лазера бегущей волны [22]. Подстройка на низких частотах (0-5 кГц) обеспечивается двумя пьезокерамическими пакетами (медленными и быстрым), на которых закреплены зеркала лазерного резонатора.

В ходе эксперимента измерялись две основные интегральные характеристики ФП резонатора: финесс ( $F$ ) (или резкость резонанса) и контраст интерференции  $S$ . Оценка этих характеристик производилась посредством регистрации и анализа зависимости пропускания ФП резонатора от частоты лазера накачки. При этом использовалась оригинальная методика визуализации и анализа наблюдаемой зависимости. При синхронизации скорости развертки со скоростью изменения частоты лазера (и соответствующих соотношениях ширины линии излучения, стабильности частоты, ширины оптического резонанса) на экране осциллографа можно наблюдать стационарную картину резонанса и, соответственно, вычислять требуемые параметры  $F$  и  $S$ . Используемый нами лазерный комплекс с предварительной стабили-

зацией имел ширину линии излучения 10 кГц, которая меньше, но близка к ширине ФП резонанса  $\sim 40$  кГц при  $F \sim 2000$  (в среднем). Калибровка сигнала на экране осциллографа по оси частот (ось развертки) производилась по положению боковой модуляционной компоненты, отстоящей на частоту фазовой модуляции - 8 МГц от основной резонансной частоты. Развертка подбиралась так, чтобы несущая и боковая полосы были одновременно видны на экране, что позволяло производить градуировку частоты развертки осциллографа в единицах частоты света. Финесс  $F$  рассчитывается как отношение межмодового интервала к ширине резонанса. Параметр контраста  $C$  дает долю света, участвующую в интерференции (оптическом резонансе). Он существенно влияет на чувствительность эталона ФП при точных измерениях. При отсутствии потерь интенсивность отраженного света равна нулю на резонансной частоте (т.е. волна, выходящая из резонатора, компенсируется противофазной волной, отраженной от входного зеркала). Эта ситуация соответствует параметру контраста  $C=1$  [23]. В действительности полная компенсация не достигается даже в условиях согласования частоты накачки с модой интерферометра ФП из-за потерь и, таким образом, интенсивность отраженного света всегда имеет не нулевое значение. Величина контраста  $C$  оценивается по относительной глубине провала при сканировании частоты источника накачки вблизи резонанса ФП. Контраст существенно зависит не только от параметров зеркал интерферометра, но также от согласования с характеристиками падающего лазерного луча, такими как диаметр пятна на входном зеркале интерферометра ФП и радиус его кривизны. Обычно среднее значение контраста при удовлетворительной настройке падающего луча с модой интерферометра ФП составляет порядка 20–30 %. В наших экспериментах по наблюдению динамики изменений параметров  $F$  и  $C$  можно было судить о температурных искажениях зеркал.

Сборка резонатора ФП происходила в специальной камере с контролируемой концентрацией пылевых частиц в атмосфере (чистая комната), где проводилась настройка взаимной осевой ориентация зеркал путем поворота их относительно оси резонатора для компенсации исходной деформационной асимметрии. После этой операции модель переносилась в открытый криостат и подвешивалась на специальной конструкции (так называемой U-петле) в центре симметрии металлической болванки. Такая конструкция обеспечивала автоматическое поддержание теплового контакта с криостатом на всех стадиях охлаждения (подробнее см. [21]). Далее криостат помещался на откачку и затем проходил процедуру охлаждения. Этому предшествовала точная настройка частоты излучения на основную оптическую моду резонатора ФП – моду  $TEM_{00}$ .

## 2. Измерения и результаты

В ходе экспериментов мощность излучения лазера накачки менялась от 5 до 450 мВт для того, чтобы оценить степень влияния наведенной тепловой линзы на измеряемые интегральные характеристики резонаторов ФП. Проведенные измерения дали следующие результаты.

### 2.1. Зеркала на подложках из ситалла

Материал ситалл СО-115М или “астроситалл” относится к категории “Zerodur” - материалов с низким коэффициентом теплового расширения ( $1,5 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ ). В экспериментах с зеркалами на таких подложках наблюдалось довольно быстрое падение обоих параметров  $F$  и  $C$  при охлаждении резонатора ФП. Значение фине́сс падало почти в семь раз при понижении температуры до 100 К. Контраст  $C$  ослабевает чуть медленнее - в три раза при приближении к азотной температуре. Измерения при более низких температурах уже потеряли свой смысл и не проводились. В обратном ходе эксперимента, во время нагрева, интегральные параметры восстанавливались, приходя в исходное состояние с некоторым гистерезисом (небольшой вертикальный сдвиг по величине параметра для той же температуры), т.е. наблюдаемые изменения были обратимыми.

### 2.2. Зеркала на подложках из сапфира

По своим твердотельным свойствам сапфир считается наиболее совершенным материалом. Он обладает высокой дебаевской температурой и низкими внутренними потерями, которые быстро уменьшаются при охлаждении. Его модуль упругости заметно (в 3-4 раза) больше, чем у оптических стекол и флюоритов. Однако в сапфире проявляются свойства двойного лучепреломления — разница в показателях преломления обыкновенного и необыкновенного лучей составляет  $\sim 0,01$ , что на порядок выше, чем у ситалла. Это создает определенные проблемы при использовании сапфировых зеркал в опорных оптических резонаторах при низких температурах. На практике это приводит к расщеплению резонансных пиков ФП, которое перед началом охлаждения может быть компенсировано взаимным осевым вращением зеркал. Однако, при последующем охлаждении расщепление возникает снова и растет приблизительно линейно по температуре. Это приводит к деградации значений фине́сс и контраста.

### 2.3. Зеркала на подложках из фторида кальция

Фторид кальция является широко распространенным материалом в ИК-спектроскопии с длинами волн излучения 0,15 - 9 мкм. Кристалл  $\text{CaF}_2$  обладает высокой механической прочностью (выдерживает высокое давление) и негигроскопичен. Считается, что он чувствителен к тепловым воздействиям (хотя температура плавления довольно высока - при 1148 °С). При комнатной температуре он оптически изотропен. Разница между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного лучей мала  $\sim 0,001$ .

Наши эксперименты по охлаждению ФП резонатора с зеркалами на подложках из фторида кальция показали, что его интегральные характеристики (финесс и контраст) практически сохраняются в широком диапазоне температур, от комнатной до гелиевой. Небольшое (на 20%) падение контраста наблюдалось при переходе за отметку 60 К. Следует отметить, что теплопроводность фторида кальция в области от 60 К до 40 К возрастает от  $\sim 1$  Вт/см·К до  $\sim 10$  Вт/см·К [24]. Возможно, это может изменить баланс деформаций в подложке зеркала, что разрушает синхронизацию оптических мод. Результаты представлены на рис. 2, где показана эволюция измеряемых характеристик при охлаждении для двух мощностей накачки в 10 и 350 мВт. При прогреве до комнатной температуры величина контраста восстанавливалась с небольшим гистерезисом, как и для зеркал других материалов.

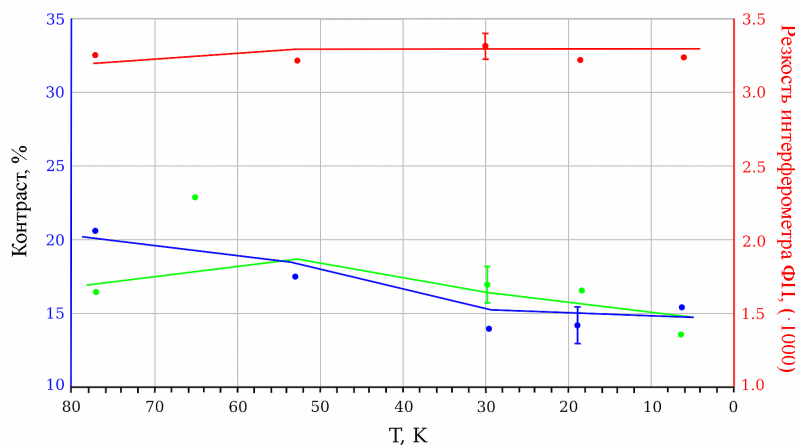


Рис.2. Зависимость интегральных оптических характеристик интерферометра Фабри-Перо с зеркалами на подложках из  $\text{CaF}_2$  от температуры: красным цветом – резкость (Finesse) интерферометра; синим цветом – изменение контраста интерферометра при мощности лазера 10 мВт; зелёным цветом – изменение контраста интерферометра при мощности лазера 350 мВт



### 3. Обсуждение результатов и заключение

В данной работе представлено исследование температурной эволюции интегральных характеристик – резкости (финесс) и контраста ФП резонаторов с тремя типами зеркал. Актуальность исследования обусловлена активным использованием опорных ФП резонаторов для предварительной стабилизации лазеров в схемах оптических стандартов частоты и для регистрации малых опто-акустических возмущений в гравитационных антеннах. Применяется известная методика Паунда-Дривера-Хола (PDH) [4,23]. Стремление подавить электромагнитный и механический тепловой шум заставляет охлаждать ФП резонаторы до криогенных температур. Возможность сохранения их оптических свойств при этом требует экспериментального исследования.

Главным результатом является демонстрация пригодности зеркал на подложках из фторида кальция для использования в экспериментах с охлаждением вплоть до температур  $\sim 5-10$  °К. Резонаторы с зеркалами на основе ситалла и сапфира показали значительную деградацию финесс и контраста при снижении температуры.

Причины падения качества ФП резонаторов с ситалловыми зеркалами до конца не ясны. Учитывая, что их оптическая нелинейность невелика, можно предположить, что ухудшение оптических качеств таких зеркал связано с термомеханическими воздействиями. Оптическое стекло – ситалл скорее всего теряет свои свойства при температурах ниже  $-60$  °С. Однако эта гипотеза требует дополнительных исследований.

Причиной сложности использования сапфировых зеркал в экспериментах с низкими температурами является эффект двулучепреломления в сапфире. Очевидно, при высоком финесс частотное расщепление на резонансы (вплоть до появления отдельного изолированного пика) затрудняет применения техники Паунда-Дривера-Холла и снижает значение контраста за счет распределения мощности накачки по многим резонансам.

Полученные результаты следует учитывать при реализации криогенного варианта гравитационного детектора OGRAN [17]. В настоящий момент в нем используются зеркала LMA [25] на подложках из плавленого кварца с высоким значением финесс опорного резонатора  $\sim 30000$ .

Авторы выражают благодарность зав. лаб. НПО "Полус" В.В. Азаровой за изготовление зеркал для экспериментов, представленных в этой работе. Работа поддержана грантом РФФИ 19-29-11010.

**Литература**

1. Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J., Peik E. Optical atomic clocks // *Rev. Mod. Phys.* 2015. 87. 637–692.
2. Adhikari R. Gravitational radiation detection with laser interferometry // *Rev. Mod. Phys.* 2014. 86. 121.
3. Will C.M. The Confrontation between General Relativity and Experiment // *Living Rev. Relat.* 2014. 17. 4.
4. Drever R.W.R., Hall J. L., Kowalski F.W., Hough J., Ford G.M., Munley A.J. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // *Appl. Phys.* 1983. 31. 97.
5. Numata K., Kemery A., Camp J. Thermal-Noise Limit in the Frequency Stabilization of Lasers with Rigid Cavities // *Phys. Rev. Lett.* 2004. 93. 250602.
6. Notcutt M., Ma L.S., Ludlow A.D., Foreman S.M., Ye J., Hall J.L. Contribution of thermal noise to frequency stability of rigid optical cavity via hertzlinewidth lasers // *Phys. Rev. A* 2006, 73, 031804.
7. Penn S.D., Sneddon P.H., Armandula H., Betzwieser J.C., Cagnoli G., Camp J., Crooks D.R.M., Fejer M.M., Gretarsson A.M., Harry G.M. et al. Mechanical loss in tantala/silica dielectric mirror coatings // *Class. Quantum Grav.* 2003. 20. 2917–2928.
8. Okada Y., Tokumaru Y. Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K // *J. Appl. Phys.* 1984. 56. 314–320.
9. Franc J., Morgado N., Flaminio R., Nawrodt R., Martin I., Cunningham L., Cumming A., Rowan S., Hough J. Mirror thermal noise in laser interferometer gravitational wave detectors operating at room and cryogenic temperature // *arXiv.2009*, arXiv:0912.0107.
10. Harry G.M., Abernathy M.R., Becerra-Toledo A.E., Armandula H., Black E., Dooley K., Eichenfield M., Nwabugwu C., Villar A., Crooks D.R.M. Titania-doped tantala/silica coatings for gravitational-wave detection // *Class. Quantum Grav.* 2007. 24. 405–415.
11. Somiya K. Detector configuration of KAGRA – the Japanese cryogenic gravitational-wave detector // *Class. Quantum Grav.* 2012. 29. 124007.
12. Kuroda K., Ohashi M., Miyoki S., Tatsumi D., Sato S., Ishizuka H., Fujimoto M.K., Kawamura S., Takahashi R. Large-scale cryogenic gravitational wave telescope // *Int. Jr. Mod. Phys. D* 1999. 8. 557–579.
13. Yamamoto K., Uchiyama T., Miyoki S., Ohashi M., Kuroda K., Ishitsuka H., Akutsu T., Telada S., Tomaru T., Suzuki T. Current status of the CLIO project // *J. Phys. Conf. Ser.* 2008. 122. 012002.
14. KAGRA // URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/KAGRA>

15. Aso Y., Michimura Y., Somiya K., Ando M., Miyakawa O., Sekiguchi T., Tatsumi D., Yamamoto H. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector // *Phys. Rev. D* 2013. 88. 043007.
16. Bagaev S.N., Bezrukov L.B., Kvashnin N.L., Krysanov V.A., Oreshkin S.I., Motylev A.M., Popov S.M., Rudenko V.N., Samoilenko A.A., Skvortsov M.N., Yudin I.S. A high frequency resonance gravity gradiometer // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. 85. 065114.
17. Kvashnin N.N., Kuvshinskyi M.V., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Skvortsov M.N., Yudin I.S., Blagov S.V. Cryogenic Model of the Gravitational Antenna OGRAN // *Phys. Atom. Nucl.* 2017. 80. 1606–1612.
18. Schwarz C., Hainert D., Seidel P., Tünnermann A., Nawrodt R. Mechanical loss of calcium fluoride at cryogenic temperatures // *Phys. Status Solidi A* 2011. 208. 2719–2723.
19. Punturo M., Abernathy M., Acernese F., Allen B., Andersson N., Arun K., Barone F., Barr B., Barsuglia M., Beker M. The third generation of gravitational wave observatories and their science reach // *Class. Quantum Grav.* 2010. 27. 084007.
20. LIGO White Paper. URL: <https://dcc.ligo.org/public/0125/T1600119/004/wp2016.pdf>
21. Krysanov V.A., Motylev A.M., Oreshkin S.I., Rudenko V.N. A Helium Cryostat for Investigating the Properties of Massive Solid Resonators with Deep Cooling. // *Measurement Tech.* 2015. 57. 1416–1422.
22. Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin A.M., Kvashnin N.L., Bagayev S.N. Tunable single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser at 1064/532 nm for optical frequency standard applications // *Opt. Commun.* 2002. 203. 359–362.
23. Black E.D. An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization // *Am. J. Phys.* 2001. 69. 79–87.
24. Slack G.A. Thermal Conductivity of CaF<sub>2</sub>, MnF<sub>2</sub>, CoF<sub>2</sub> and ZnF<sub>2</sub> crystals // *Phys. Rev.* 1961. 122. 1451–1464.
25. LMA // URL: <http://www.lma.in2p3.fr>