

На правах рукописи

Лясковская Наталья Юрьевна

**Тепловые и избыточные механические шумы
в прототипах кварцевых подвесов зеркал
гравитационных антенн.**

Специальность 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006 г.

Работа выполнена на кафедре физики колебаний
Физического факультета Московского
Государственного Университета имени М. В. Ломоносова.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор В. Б. Брагинский;
кандидат физ.-мат. наук, доцент И.А. Биленко.
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник В. С. Багаев;
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник В. В. Колесов.
Ведущая организация: Институт Физики Земли РАН (г. Москва).

Защита состоится 21 декабря 2006 г. в 16-00 час. на заседании Диссертационного совета Д 501.001.66. в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан 16 ноября 2006 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 501.001.66.
А. П. Ершов

Общая характеристика работы

Актуальность исследования: Одной из интереснейших задач современной экспериментальной физики является детектирование гравитационных волн, существование которых было предсказано А. Эйнштейном еще в 1918 году и подтверждено пока только косвенными наблюдениями.

Интерес к этой задаче обусловлен тем, что создание детекторов, способных регистрировать гравитационное излучение, возникающее при различных астрофизических катастрофах (взрывах сверхновых звезд, столкновениях черных дыр и т.п.) позволит изучать системы, обладающие большими гравитационными потенциалами в случаях, когда иные виды излучения не могут наблюдаться с Земли или вообще отсутствуют. Информация о динамике таких систем необходима для развития квантовой гравитации и космологии. Причина, по которой гравитационные волны до сих пор непосредственно обнаружить не удалось, состоит в том, что величины смещений пробных тел, вызываемых ими, чрезвычайно малы. Чувствительность действующих в настоящее время гравитационных антенн (LIGO-I) составляет примерно $h \approx 10^{-21}$ в безразмерных единицах вариации метрики, что соответствует относительным колебаниям пробных тел, расположенных на расстоянии 4 км с амплитудой $\Delta x \approx 10^{-16}$ см (на частотах от 100 Гц до 1 кГц). Для надежной регистрации гравитационного излучения от известных источников эта величина должна быть примерно на порядок меньше.

Чувствительность гравитационных антенн ограничивается многими факторами, имеющими как технический, так и фундаментальный характер. Одним из таких факторов является избыточный механический шум в подвесах пробных тел.

Избыточные шумы, величина которых составляла порядка 10% от равновесных тепловых колебаний, были обнаружены в струнных модах колебаний стальных и вольфрамовых проволок при натяжениях, близких к разрывным.

В настоящее время в лазерных интерферометрических детекторах роль пробных тел играют 10-ти килограммовые зеркала, подвешенные на тонких стальных проволоках. В антеннах следующего поколения планируется увеличить массу зеркал до 40 кг, а проволоки заменить на нити из высокочистого плавленого кварца, что должно снизить тепловые шумы до необходимого уровня.

Очевидно, что микроструктура и физические свойства металлов и плавлен-

ного кварца отличаются очень сильно. Известно, что механические свойства металлов резко меняются когда прикладывается натяжение, превышающее предел текучести материала. Не совсем ясно, существует ли аналогичный порог натяжения для плавленого кварца. Поэтому, для ответа на вопрос о наличии и интенсивности избыточных шумов в кварцевых нитях необходимы прямые измерения.

Объектом исследования являлись прототипы подвесов зеркал лазерных гравитационных антенн второго поколения, представляющие собой тонкие нити из плавленого кварца высокой очистки.

Предметом исследования были механические флуктуации в высокочастотных модах колебаний прототипов подвесов зеркал лазерных гравитационных антенн.

Идея исследования состояла в том, что использование резонансной лазерной интерферометрии для наблюдения за движением легкого зеркала, сваренного в исследуемую нить, позволяет достигнуть разрешения, достаточного для регистрации равновесных тепловых флуктуаций с высоким разрешением.

Цели диссертационной работы:

- разработка метода регистрации тепловых и избыточных механических шумов в кварцевых нитях с разрешением порядка 1% от равновесных тепловых колебаний.
- Исследование с помощью этого метода механических шумов в прототипах подвесов зеркал гравитационных антенн.

Научная новизна: Впервые проведены исследования низкочастотных механических флуктуаций в струнных модах колебаний нитей из плавленого кварца при различных натяжениях с разрешением порядка 1% от kT - средней тепловой энергии этих колебаний.

Научно-практическая ценность:

1. Информация о наличии и уровне избыточных шумов в кварцевых нитях (прототипах подвесов зеркал гравитационных антенн) позволяет оценить максимально достижимый уровень чувствительности. Можно утверждать, что избыточные шумы, связанные с процессами в нитях подвеса, не

должны препятствовать достижению запланированной чувствительности LIGO II.

2. Поскольку нити из плавленого кварца, в силу его уникальных свойств (малые механические и электрические потери, малый коэффициент теплового расширения, большая прочность нитей на разрыв), используются в самых различных приборах и экспериментах, информация об избыточных механических шумах в таких нитях представляет ценность для широкого круга физических измерений и технических приложений.
3. Разработанная методика изготовления тонких нитей с вваренным в середину зеркалом может быть использована в различных прецизионных экспериментах, в которых необходимо измерение отклика на воздействие малых сил.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Для создания высокочувствительных оптомеханических преобразователей может быть использована разработанная технология приготовления нитей из плавленого кварца высокой очистки с вваренным зеркалом, позволяющая сохранить высокую добротность механических мод и отражающую способность многослойного покрытия зеркала.
2. Использование интерферометра Фабри-Перо с накачкой одночастотным He-Ne лазером позволяет регистрировать вариации амплитуды тепловых колебаний в высокодобротных модах образцов с точностью $\sim 1\%$.
3. В кварцевых нитях диаметром от 50 до 200 мкм при нагрузках от $\sim 4\%$ до $\sim 50\%$ при времени усреднения 10 мс и более вариаций, значимо превышающих равновесные тепловые, не обнаружено.
4. Избыточный механический шум в подвесах зеркал лазерных гравитационных антенн второго поколения не должен ограничивать их чувствительность на уровне $1 \cdot 10^{-17}$ см.

Апробация работы: Основные результаты работы были представлены на семинарах кафедры Колебаний МГУ и Калифорнийского Технологического Института (США).

Публикации: Содержание работы опубликовано в 3 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура работы: Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы из 73 наименований. Работа изложена на 96 страницах, включает 22 рисунка и 1 таблицу.

Содержание работы

Во *введении* обосновывается актуальность темы и формулируется цель работы.

Первая глава содержит обзор литературных данных о проблеме детектирования гравитационных волн, устройстве существующих гравитационных антенн, факторах, ограничивающих их чувствительность и способах борьбы с ними. Особое внимание уделено шумам, возникающим в подвесах зеркал и способам регистрации этих шумов.

В первой части главы приведена историческая справка о гравитационных волнах, их возможных источниках и экспериментах по обнаружению.

Работы по разработке и строительству твердотельных антенн начали проводиться в 60-х годах XX века, к концу 80-х все разрабатываемые антенны имели приблизительно одинаковую чувствительность $h_{min} \sim 10^{-18}$. С помощью таких антенн было зарегистрировано довольно много импульсов, которые, как предполагалось, могли быть откликами на гравитационно-волновое воздействие, однако эти импульсы не совпадали по времени на различных антеннах. Как было выяснено в последствии, большинство из них возникали под воздействием сейсмике и релаксации напряжений в материале антенны. Решить эту проблему не удалось и начались работы по строительству интерференционных детекторов. Наиболее перспективными в настоящее время представляются лазерные антенны в США, составляющие комплекс LIGO (от англ. Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory). Каждый интерферометр LIGO - это интерферометр Майкельсона, в плечах которого находятся 4-х километровые резонаторы Фабри-Перро, с резкостью $F \simeq 300$. Все зеркала и делитель пучка являются свободными массами. Зеркала, изготовленные из плавленого кварца, подвешены на тонких стальных нитях длиной около 1 м. Вся система находится в вакуумной камере. Воздействие гравитационного излучения приведет к смещению пробных масс друг относительно друга и вызовет изменение длин

плеч резонатора L_1 и L_2 . Изменение фазы оптической волны $\Delta\Phi$, регистрируемой фотодетектором, пропорционально величине $\Delta L = L_1 - L_2$, которая, в свою очередь, пропорциональна вариации метрики пространства h :

$$\Delta\Phi \approx F \frac{\Delta L}{\lambda} = F \frac{hL}{\lambda}$$

где λ - длина волны лазера. На сегодняшний день достигнута чувствительность $h_{min} \sim 10^{-21}$. По теоретическим расчетам ее необходимо повысить хотя бы на один порядок, чтобы была реальная возможность зарегистрировать гравитационное излучение от известных астрофизических источников.

В третьей части главы обсуждаются факторы ограничивающие чувствительность гравитационных детекторов. Одним из них являются собственные шумы подвесов тестовых масс. Недостатками стальных нитей, которые на данный момент выполняют функцию подвесов, являются, во первых, не достаточно высокая добротность, а, во вторых, наличие избыточных шумов, которые могут имитировать всплески гравитационного излучения. Применение нитей из плавленого кварца, механические потери в котором минимальны при комнатной температуре, позволяет повысить добротность собственных мод колебаний подвеса, что, в соответствии с Флуктуационно-Диссипационной Теоремой (ФДТ), позволяет снизить уровень шумов теплового происхождения вдали от частот собственных мод. За счет применения таких нитей на следующем этапе (LIGO-II), чувствительность антенн должна быть повышена до 10^{-22} . В то же время, в напряженных нитях возможно, по аналогии со стальными нитями, появление избыточных механических шумов нетеплового происхождения, которые могут быть вызваны вязким течением материала в нити подвеса, движением неоднородностей и развитием микротрещин. Избыточные шумы в подвесах пробных масс интерферометра могут не только снизить его чувствительность, но и имитировать импульсные сигналы, поскольку такие шумы могут быть нестационарными и вызывать редкие сильные смещения зеркала.

Ранее, были проведены измерения эффективной шумовой температуры для струнных мод таких нитей при времени усреднения порядка или больше времени релаксации $\tau^* \simeq 10^3$ с. Превышений ее над температурой термостата обнаружено не было, однако, для гравитационно волновых антенн характерные

длительности сигналов $t \simeq 10$ мс, соответственно, необходимы исследования с более высоким временным разрешением.

В последней части первой главы приводится обзор литературы, касающийся структуры кварцевого стекла и возможных причин возникновения избыточного шума. Плавленый кварц (SiO_2) представляет собой сетчатое полимерное неорганическое стекло. Однако, кварцевое стекло не может считаться идеально-беспорядочной сеткой, так как являясь полимером, имеет ячеистую (или каркасную) структуру. В процессе микрорасслоения участки сетки группируются в отдельных местах, образуя пучки цепочек, связанных в полимерный каркас или распределенных в виде отдельных объемных островков. При нагревании каркас может перейти в совершенно беспорядочную сетку.

Механические свойства кварцевых стекол существенно зависят от того, как происходил процесс формирования их структуры (скорость стеклования, температура и длительность закалки). Большое значение имеет концентрация объемных и, особенно, поверхностных дефектов. Дефекты и микротрещины могут также появляться как в результате действия напряжений при изготовлении стекла, так и в процессе последующей структурной релаксации. Чем толще стекло, тем большее количество дефектов и микротрещин спровоцированных напряжениями при изготовлении будут иметь место. Высокопрочные стекла, как правило, почти не имеют поверхностных микротрещин. В данной работе свойства кварцевых стекол исследовались при комнатной температуре, которая для SiO_2 много меньше температур плавления и закалки. Тем не менее, поскольку ожидаемые эффекты (механические шумы) весьма слабые, исключать их связь с остаточной структурной релаксацией нельзя.

Во второй главе приводится расчет требуемых параметров эксперимента, метод изготовления образцов и описание экспериментальной установки.

Поскольку задачей данной работы было исследование шумов в прототипах подвесов зеркал гравитационных детекторов, важно оценить, какой амплитуды должны быть всплески избыточного шума и как часто они должны происходить для того, что бы имитировать настоящую гравитационную волну.

Минимальное отношение сигнал/шум, при котором сигнал на выходе интерферометра LIGO-II считается информативным, выбрано равным 5. В данной работе так же предполагается, что всплески (скачкообразные изменения

амплитуды колебаний выбранной моды) могут рассматриваться как избыточные шумы, если они превышают среднее значение, определяемое тепловыми флуктуациями, в 5 и более раз.

Для фильтрации импульсных помех в LIGO используется метод совпадений. Одновременно должны будут работать три антенны - две с длиной плеч 4 км каждая, разнесенные на ~ 3000 км, и одна с длиной плеч 2 км, находящаяся в той же вакуумной системе, что и одна из четырехкилометровых. Для того, что бы сигнал на выходе антенны рассматривался, как возможный отклик на гравитационно-волновое воздействие, необходимо, что бы в пределах временного окна сигналы присутствовали на остальных двух антеннах. Поскольку направление на источник гравитационных волн заранее не известно, минимальное временное окно (разрешающая способность по времени) составляет 10 мс и определяется как максимально возможная разница во времени прихода волны к разнесенным на 3000 км антеннам. При обработке данных LIGO-I в настоящее время используется временное окно, равное 200 мс. В этом случае вероятность хотя бы одной "ложной тревоги" (случайного появления на трех антеннах в пределах одного временного окна всплесков, превышающих стационарный шум более, чем в 5 раз), вызванной событиями в нитях подвесов зеркал в течение 1 года $P \geq 0.1$ если такие события происходят в каждой нити в среднем 3 раза в час или чаще.

Существовали так же дополнительные требования к установке. Для выделения избыточного шума на фоне шумов теплового происхождения, необходимо иметь чувствительность системы регистрации, достаточную для измерений малых вариаций средней амплитуды колебаний нити на собственной частоте, вызванных тепловыми флуктуациями. Среднеквадратичное изменение координаты центра нити, вызываемое тепловыми флуктуациями в основной струнной моде за время t : $\sqrt{A_t^2} \simeq \sqrt{\frac{kT}{m\omega^2}} \times \sqrt{\frac{2t}{\tau^*}}$. Для исследуемой нити эта величина примерно равна:

$$\sqrt{A_t^2} \simeq 10^{-12} \frac{\text{см}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Таким образом, целью данной работы была разработка и реализация метода регистрации колебаний кварцевых нитей, обладающего чувствительностью

лучшей, чем 1×10^{-12} см/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ в области частот 0.5 – 2 кГц и исследование с его помощью собственных колебаний кварцевой нити на высокодобротных ($Q \sim 10^7$) модах.

Для реализации такой чувствительности было принято решение использовать резонатор Фабри-Перо, одним из зеркал которого является маленький кварцевый ромб, вваренный в центр исследуемой нити, на который напылено отражающее покрытие. Размеры кварцевого ромба ($4 \times 2 \times 0.5$ мм) выбирались так, что бы его масса была порядка массы исследуемой нити. Исследуемая нить и ромбическое зеркало приваривались к кварцевой основе, изображенной на рис.1. Основа также была изготовлена из цельного кварца для того, чтобы добротность исследуемой нити не снижалась из-за потерь в местах касания с инородным материалом. По этой же причине все элементы сваривались, а не склеивались. Груз весом около 200 г тоже был изготовлен из цельного куска кварца и прикреплен к основанию двумя горизонтальными фиксаторами. Это позволило демфировать крутильные и поперечные колебания нити с зеркалом. Такая система крепления позволяет сохранить добротность струнной моды зеркала на уровне $Q \sim 10^7$.

Использование датчиков на основе многопроходных оптических схем в сочетании с высокостабильными источниками накачки позволяет достигать рекордных величин чувствительности при измерении малых смещений. В качестве источника накачки был выбран одночастотный гелий-неоновый (He-Ne) лазер. Если считать, что единственным фактором, ограничивающим чувствительность, является дробовой фотонный шум, то минимальная величина, которую можно достичь с помощью данного метода, зависит от резкости резонатора F , мощности на фотодетекторе W и, в нашем случае, равна:

$$\Delta x_{min}^f = \frac{\lambda}{4F} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{qW}} \simeq 1 \cdot 10^{-13} \frac{\text{см}}{\sqrt{\Gamma\text{ц}}} \quad (1)$$

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Для устойчивой работы лазера необходимо было исключить попадание отраженного света обратно в его резонатор, поскольку уже при интенсивности отраженного пучка порядка 0.01% наблюдалось появление больших скачков интенсивности. Было использовано два изолятора на основе эффекта Фарадея, включенных последовательно. Потери в изоляторах составляли около 10%. Далее, пучок проходил

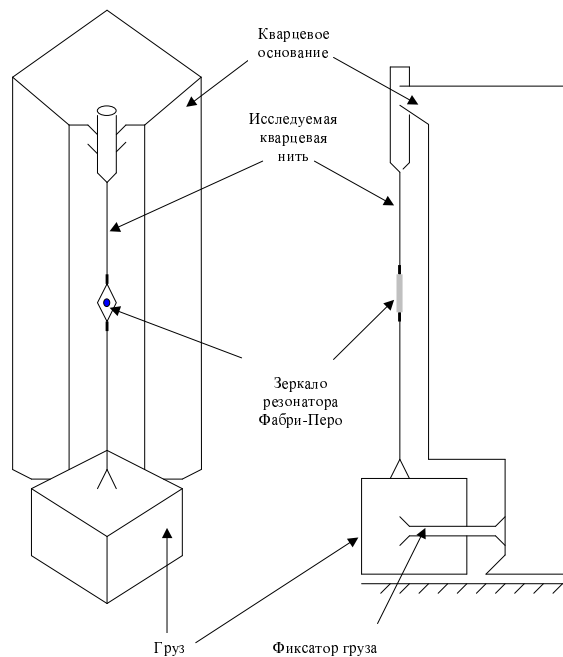


Рис. 1: Кварцевая система закрепления исследуемой нити и зеркала интерферометра Фабри-Перо.

через амплитудный модулятор на основе кристалла $LiNbO_3$, который использовался для стабилизации интенсивности. Поскольку глубокая модуляция амплитуды не требовалась, апертура модулятора была выбрана достаточно большой (около 6 мм при диаметре пучка около 1 мм), что позволило избежать искажений волнового фронта. После модулятора был установлен светоделитель, который направлял $\sim 20\%$ мощности на детектор схемы стабилизации интенсивности. Выходной сигнал подавался на амплитудный модулятор а также через АЦП на один из контрольных каналов записи в компьютер. Коэффициент усиления разомкнутой цепи можно было регулировать в пределах 5...30, частоты ФНЧ и ФВЧ первого прядка составляли 3 кГц и 40 Гц, соответственно. При замыкании цепи спектральная плотность амплитудных шумов в диапазоне частот 0.3 – 1 кГц уменьшалась в 2 – 5 раз, пики на гармониках частоты сети практически исчезали. Поскольку объем доступной вакуумной камеры был весьма ограничен, было решено использовать более простую в реализации схему - из-

мерение интенсивности пучка, прошедшего через резонатор, настроенный так, чтобы частота лазера накачки находилась на склоне его резонансной кривой.

Основной пучок после светоделителя через согласующую асферическую линзу заводился в одномодовое волокно и по волокну подавался в вакуумную камеру. Из волокна излучение через согласующую шаровую линзу попадало в интерферометр со стороны сферического зеркала. Со стороны подвижного зеркала был установлен фотодетектор. Сигнал с этого фотодетектора подавался на два малошумящих предусилителя, расположенных в непосредственной близости от него. Выход одного из них был подключен к фазочувствительным вольтметрам, регистрировавшим сигналы на собственных частотах струнных колебаний нити. Выход другого подавался на усилитель обратной связи, управляющий напряжением на пьезокерамической подаче, с помощью которой можно было в небольших пределах (0..0.5 мкм) перемещать сферическое зеркало. Наличие цепи обратной связи позволяло осуществлять настройку интерферометра таким образом, чтобы рабочая точка оказывалась на склоне его резонансной кривой.

Для подавления колебаний сейсмического и лабораторного происхождения использовался двухступенчатый пассивный фильтр, состоящий из массивных (10 кг) латунных дисков подвешенных на витоновых кольцах. Частоты маятниковых колебаний были ограничены высотой подвеса (которая, в свою очередь, ограничивалась высотой вакуумной камеры) $L_p = 30$ см и составляли примерно $f_{p1} \simeq 0.45$ Гц для одной ступени, $f_p \simeq 1$ Гц для колебаний всей конструкции как целого. Частоты вертикальных колебаний составляли $f_{v1} \simeq 2.1$ Гц и $f_{v2} \simeq 2.9$ Гц.

Для регистрации лабораторных вибраций использовался дополнительный сейсмометр, установленный на вакуумной камере. Он представлял собой лазерный теневой датчик колебаний консоли, имеющей собственную частоту около 15 Гц. Сигнал этого датчика через усилитель и фильтр поступал на формирователь импульсов, которые записывались компьютером параллельно с основным сигналом (второй контрольный канал) и использовались в качестве "вето" при обработке записей. Для того, что бы исключить демпфирование колебаний образца остаточным газом и получить механическую добротность на уровне $Q \simeq 10^7$ в камере поддерживалось давление 10^{-7} Торр.

В третьей главе представлены результаты измерений и их экстраполяция к параметрам LIGO-II. В процессе исследований были получены записи ва-

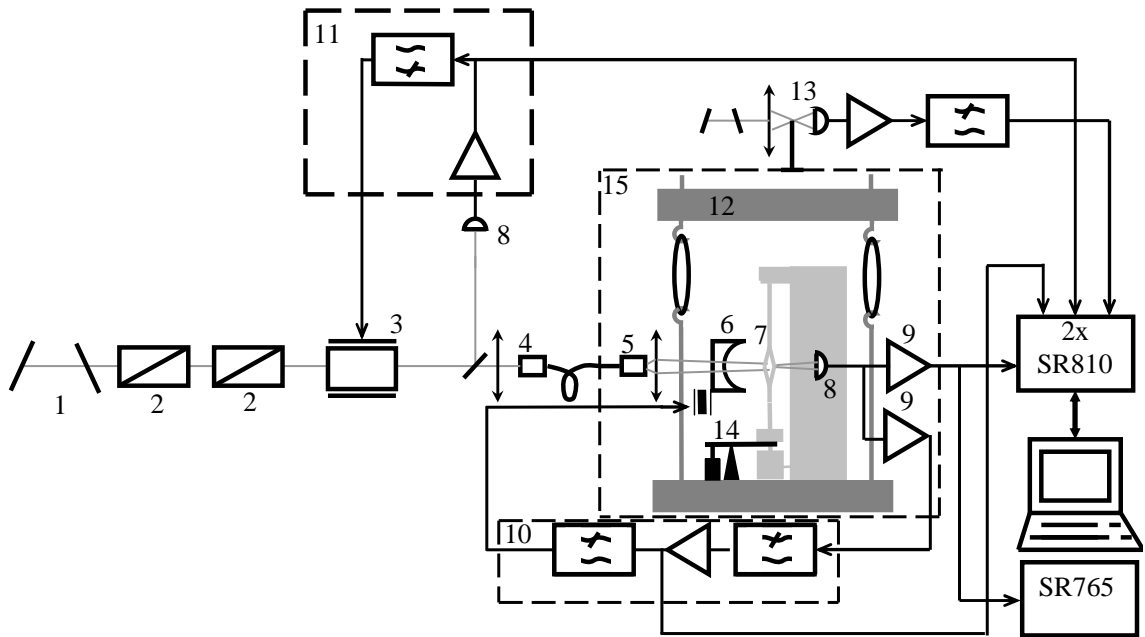


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки. 1 - лазер, 2 - оптические изоляторы, 3 - электро-оптический модулятор, 4 - оптоволоконный ввод, 5 - согласующая линза, 6 - сферическое зеркало 7 - подвижное зеркало. 8 - фотодетекторы, 9 - малозумящие предусилители, 10 - цепь обратной связи, 11 - цепь стабилизации интенсивности, 12 - антисейсмический фильтр, 13 - сейсмометр, 14 - устройство для дистанционного увеличения натяжения нити, 15 - вакуумная камера.

риаций амплитуды собственных колебаний для 25 образцов диаметром от 50 до 200 мкм при нагрузках от $\sim 4\%$ до $\sim 50\%$ от разрывной, общей длительностью более 100 часов. В данной работе исследовался характер распределения вариаций амплитуды колебаний для двух мод осцилляторов, представляющих собой модели системы подвеса зеркал, и производился поиск отклонений этого распределения от нормального закона, соответствующего тепловым колебаниям, при различных нагрузках. В соответствии с изложенным выше, критическими считались скачки амплитуды, происходящие не реже одного раза в пол-часа и превышающие среднеквадратичную величину в 5 раз. Результаты всех проведенных измерений собраны в Таблице 1. Фрагменты записей сгруппированы в серии. В пределах одной серии все измерения производились на одном образце при одном и том же натяжении. Для серий 1-7 в каждый момент времени производилась запись амплитуды только одной моды. В дальнейшем был добавлен еще один канал, поэтому серии 8-17 могут содержать данные, полученные для двух мод одновременно. Образцам присваивались номера вида qn , где n - порядковый номер, пропущенные номера соответствуют образцам, для которых провести измерения не удалось. В первой серии экспериментов для каждой нити измерения проводились только при одном значении натяжения. В последствии проводилось по две-три группы измерений, в промежутке между которыми камера вскрывалась и на груз устанавливались металлические шайбы с прокладками из вакуумной резины общим весом не более 30 г. Было установлено, что наличие этих шайб не снижает добротности исследуемых мод образца.

В финальной серии измерений был использован автоматический манипулятор, позволявший устанавливать шайбы непосредственно во время измерений, и, таким образом, исследовать поведение образца сразу после нагружения.

Номер серии	Номер образца	Диаметр и натяжение нити(% от разрывного)	Частота [Гц] (тип моды)	Добротность	Общая длительность записи (сек)	Отношение сигнал/шум	Число точек-кандидатов	Число подтв. событий
1	q2	180 мкм, 4%	1087(m)	2×10^6	17000	5×10^{-2}	62	0
2	q4	120 мкм, 8%	762(v)	3.4×10^6	7450	1.5×10^{-2}	7	0
3			2319(m)	1×10^7	31300	4×10^{-2}	48	0
4	q5	90 мкм, 15%	1538(m)	7.4×10^6	14400	4×10^{-2}	26	0
5	q6	70 мкм, 19%	1932(m)	2×10^7	23600	1×10^{-2}	0	0
6	q9	85 мкм, 16%	748(v)	1.4×10^6	6700	3×10^{-2}	17	0
7			1980(m)	1×10^7	5050	5×10^{-2}	1	0
8	q9	85 мкм, 19%	759(v)	1.9×10^6				
			2197(m)	1.3×10^7	33450	5×10^{-2}	0	0
9	q11	70 мкм, 24%	1600(m)	1.4×10^7	16750	2×10^{-2}	0	0
10	q11	70 мкм, 29%	1747(m)	1.3×10^7	18250	2×10^{-2}	0	0
11	q11	70 мкм, 35%	1946(m)	9×10^6	16500	3×10^{-2}	0	0
12	q11	70 мкм, 42%	2083(m)	5×10^6	15850	6×10^{-2}	0	0
13	q20	75 мкм, 20%	624(v)	8.2×10^5	2400	3×10^{-2}	2	0
			1852(m)	8.5×10^6	2400	5×10^{-2}	0	0
14*	q20	75 мкм, 21%	627(v)	8.0×10^5	4800	3×10^{-2}	5	0
			1861(m)	8.5×10^6	4800	5×10^{-2}	0	0
15	q21	60 мкм, 33%	450(v)	1.3×10^5	28200	2×10^{-2}	28	0
			2130(m)	5×10^6	28200	6×10^{-2}	2	0
16	q25	50 мкм, ~ 50%**	404(v)	1×10^5	8750	1×10^{-2}	3	0
			1811(m)	8.5×10^6	8750	9×10^{-2}	0	0
17*	q25	50 мкм, > 50%**	413(v)		14550	1×10^{-2}	11	0
			1860(m)		14550	9×10^{-2}	0	0

Таблица 1.

Типичный вид спектра колебаний приведен на рис. 3. Пик на частоте 480 Гц соответствует основной поперечной моде (струнные колебания нити с дополнительной сосредоточенной массой в центре). Поскольку точка отражения луча в интерферометре находилась ниже геометрического центра зеркала, можно было наблюдать также крутильную моду (вращение зеркала в вертикальной плоскости, возвращающую силу создает натяжение нитей, см. рис. 4), которой соответствует пик на частоте 2.2 кГц. Для каждого образца запись состояла из фрагментов длиной $1 \div 4 \times 10^3$ с, после записи каждого фрагмента для исключения влияния дрейфа производилась перекалибровка установки. Все записи состояли из фрагментов, пример одного фрагмента записи приведен на рис. 5. На врезке показана часть этого фрагмента длительностью 1 с. Видно, что вариации амплитуды за малые времена много меньше средней амплитуды

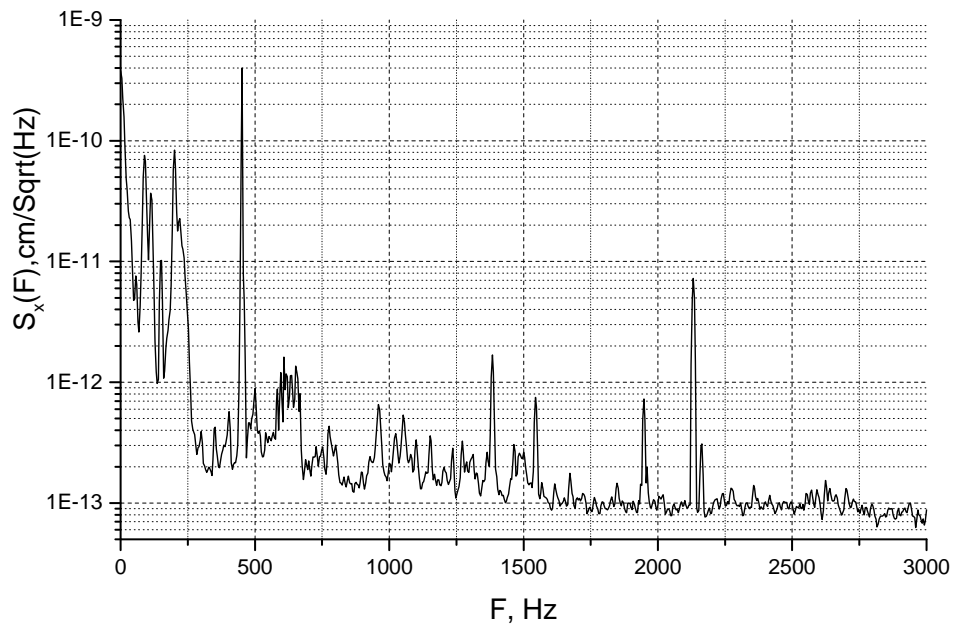


Рис. 3: Спектр колебаний для образца q9.

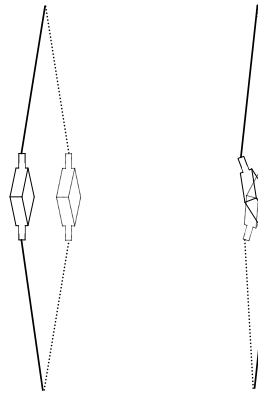


Рис. 4: Слева: струнная мода (индекс "v" в Таблице 1). Справа: крутильные колебания зеркала (индекс "m" в Таблице 1).

колебаний.

Как правило, записи производились в ночное время для уменьшения вли-

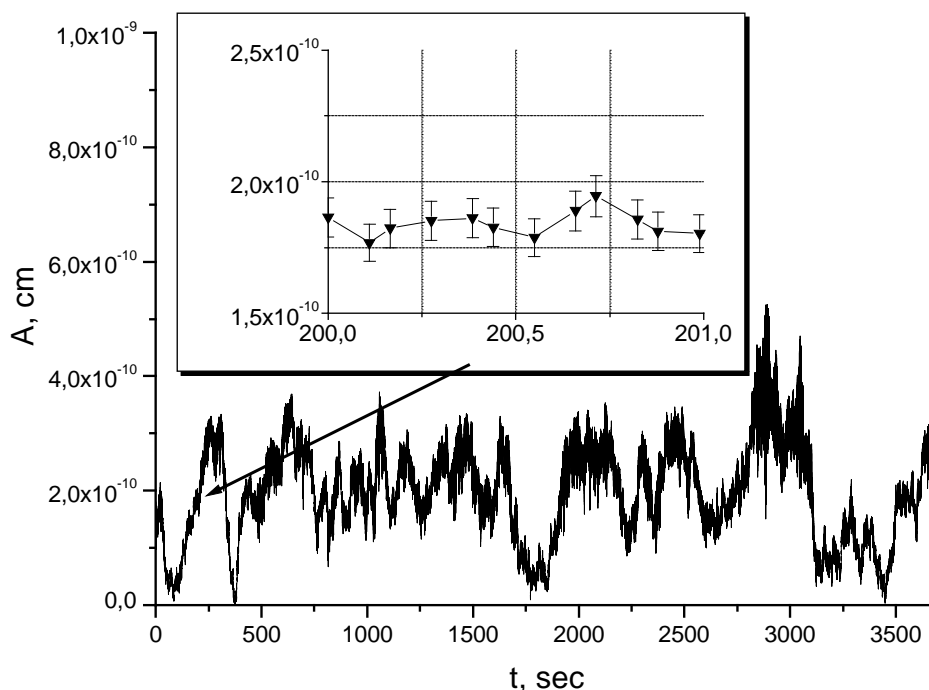


Рис. 5: Зависимость амплитуды колебаний нити на основной поперечной моде от времени.

яния микросейсмики. При обработке записей использовалось "правило вето": интервалы времени, в течение которых сигналы на выходе каналов, контролирующих интенсивность лазера, сигнал в цепи обратной связи или сейсмометра, превышали заранее установленный порог, автоматически исключались из рассмотрения. Наиболее существенным мешающим фактором были вибрации лабораторного происхождения. В зависимости от уровня вибраций в лаборатории, а так же диаметра и натяжения образцов (степень подавления внешних вибраций существенно зависела от частоты, на которой проводились измерения, а также частоты моды, соответствующей вертикальным колебаниям груза) исключалось от 0 до 30% времени. После этого для каждого фрагмента вычислялись средняя амплитуда колебаний, ее дисперсия и среднеквадратичное изменение амплитуды $\overline{A_t^2}$ за единичный интервал (время измерения). В случае тепловых колебаний распределение вариаций амплитуды подчиняется нормальному за-

кону:

$$P[A_t] \cong \sqrt{\frac{1}{2\pi A_t^2}} \exp\left[-\frac{A_t^2}{2A_t^2}\right] \quad (2)$$

(будем считать $A \sim \bar{A}$ - амплитуда колебаний не сильно отличается от средней величины). Обозначим $\sqrt{\bar{A}^2} = \sigma$, $A_t^2 = Z$. Тогда математическое ожидание количества попаданий величины Z в интервал $X \div X + \Delta X$:

$$N(X \leq Z < X + \Delta X) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_X^{X+\Delta X} \exp\left(-\frac{Z}{2\sigma^2}\right) d(Z) = \frac{N_0\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{X}{2\sigma^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta X}{2\sigma^2}\right)\right] \quad (3)$$

где N_0 - полное количество интервалов. Для тепловых колебаний в высокодобротном осцилляторе на гистограмме $N = f(X)$ построенной в логарифмическом масштабе должна наблюдаться линейная зависимость. Отклонения от линейной зависимости в области больших значений X соответствуют избыточным шумам.

На рис. 6 приведены гистограммы для фрагментов серий 1-8, по одному фрагменту для каждой моды из каждой серии. Диаметры нитей, использованных в этих измерениях, составляли от 180 мкм до 85 мкм, соответственно, нагрузка, приложенная к образцам, не превышала 20% от разрывной. Видно, что распределения хорошо согласуются с нормальным законом. Схожее поведение наблюдалось для всех исследованных образцов.

Таким образом, на имеющемся уровне чувствительности избыточные шумы в высокодобротных модах колебаний образцов обнаружены не были.

Можно сделать грубую оценку для верхней границы величины возможных "вздрагиваний" зеркала гравитационно-волновой антенны LIGO-II, считая, что она обратно пропорциональна его массе M_L , и подставляя максимальную величину вариации амплитуды колебаний зеркала массой m_m , которая наблюдалась в эксперименте:

$$A_L \approx \bar{A} \sqrt{2t/\tau^*} \times \frac{m_m}{M_L} \approx 1 \times 10^{-17} \text{ см} \quad (4)$$

Можно утверждать, что избыточные шумы, связанные с процессами в нитях подвеса не должны препятствовать достижению запланированной чувствительности LIGO II.

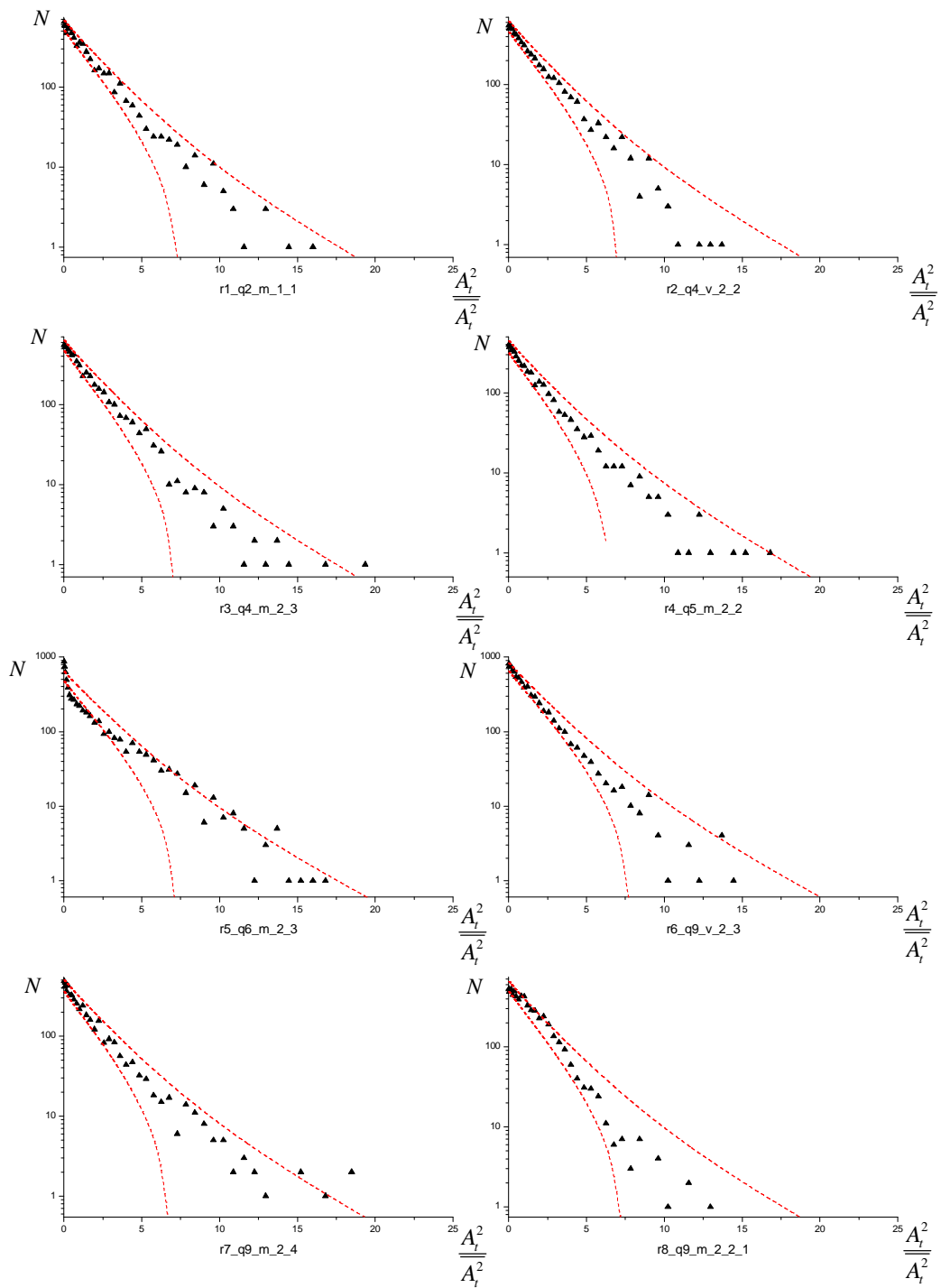


Рис. 6: Гистограммы для фрагментов серий 1-8.

Основные результаты и выводы

1. Разработана технология приготовления нитей из плавленого кварца высокой очистки с вваренным зеркалом, позволяющая сохранить высокую добротность механических мод и отражающую способность многослойного покрытия зеркала.
2. Создана оригинальная установка для исследования тепловых и избыточных флуктуаций в высокодобротных ($Q = 10^5 \div 10^7$) модах механических осцилляторов. Относительные вариации амплитуды равновесных тепловых колебаний на таких модах составляют, соответственно, $0.3\% \div 0.03\%$ за период. Достигнутая чувствительность установки составила $1 \cdot 10^{-12}$ см/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ вблизи частоты 700 Гц, $9 \cdot 10^{-14}$ см/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ вблизи частоты 2 кГц, что позволило регистрировать вариации амплитуды тепловых колебаний с точностью $\sim 1\%$.
3. Получены записи вариаций амплитуды собственных колебаний для 25 образцов диаметром от 50 до 200 мкм при нагрузках от $\sim 4\%$ до $\sim 50\%$ от разрывной, общей длительностью более 100 часов. Вариаций, значимо превышающих равновесные тепловые, не обнаружено.
4. Экстраполяция полученных результатов позволяет утверждать, что избыточный механический шум в подвесах зеркал лазерных гравитационных антенн второго поколения не должен ограничивать их чувствительность на уровне $1 \cdot 10^{-17}$ см.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Bilenko I. A., Braginsky V. B. and Markova N. Yu., Thermal and excess noise suspension fibres., Class. Quantum Grav., N 19 p. 2035-2038, (2002),

2. Биленко И.А., Лясковская Н.Ю., Датчик малых смещений на основе резонатора Фабри-Перо для исследования механических шумов в прототипах подвесов зеркал гравитационных антенн., Вестник Московского Университета., N 3, стр. 47-50, (2004),

3. Bilenko I. A., Lyaskovskaya N. Yu., The investigation of thermal and non-thermal noises in fused silica fibers for Advanced LIGO suspension., Phys. Letters A, N 339, p. 181-187, (2005).

Примечание: в 2004 году Маркова Наталья Юрьевна сменила фамилию на Лясковская в связи со вступлением в брак.