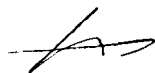


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Концов Дмитрий Владимирович

**Шумы в интерферометрических
гравитационно-волновых детекторах, связанные
с поглощающим покрытием пробных масс и
электрическими зарядами на их поверхности**

01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

7 НОЯ 2017

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



008711624

Москва - 2017

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: *Митрофанов Валерий Павлович,
д.ф.-м.н., профессор*

Официальные оппоненты: *Руденко Валентин Николаевич,
д.ф.-м.н., профессор, Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, зав. отд.*

*Манукин Анатолий Борисович,
д.ф.-м.н., профессор, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, гл.н.с.*

*Самойленко Алексей Андреевич
к.ф.-м.н., Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ФГУП ВНИИОФИ), н. с.*

Защита диссертации состоится « 23 » ноября 2017 г. в 15 - 30 на заседании диссертационного совета МГУ.01.12 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: *119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. ЦФА*

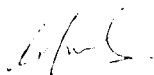
E-mail: *igorkartashov@mail.ru*

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций *научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова* (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС “ИСТИНА”:

https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/34133295

Автореферат разослан « 18 » октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



И. Н. Карташов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Проекты по экспериментальному обнаружению гравитационных волн, предсказанных общей теорией относительности Эйнштейна, такие как гравитационно-волновой детектор LIGO [1], являются одними из самых масштабных международных проектов, посвященных фундаментальным физическим исследованиям. 14.09.2015 на двух детекторах LIGO было зафиксировано событие, которое, как подтвердил последующий анализ, является следствием прохождения через детекторы гравитационных волн, излученных слиянием системы из двух черных дыр [2]. Это стало первым прямым экспериментальным наблюдением гравитационных волн и слияния двух черных дыр. Факт прохождения гравитационной волны также был зафиксирован 26.12.2015 [3] и 04.01.2017 [4]. Эти события открывают новые возможности изучения структуры и эволюции Вселенной. Экспериментальное исследование гравитационных волн, в частности проверка общей теории относительности и исследование физических процессов, происходящих в черных дырах, станет неоценимым источником астрофизической информации.

Существующие на данный момент гравитационно-волновые детекторы основаны на интерферометре Майкельсона, в плечах которого находятся резонаторы Фабри-Перо, образованные двумя пробными массами с зеркальными покрытиями. Изменение расстояния между ними свидетельствует об искривлении пространства-времени вследствие прохождения гравитационной волны. Обнаружение гравитационных волн выводит на первый план задачу улучшения чувствительности гравитационно-волновых детекторов. Зарегистрированное изменение расстояния между пробными массами из-за прохождения гравитационной волны составило $\approx 4 \cdot 10^{-18}$ м [5]. Задача исследования гравитационных волн на основании измерения таких малых смещений требует в первую очередь идентифицировать и устранить источники флуктуаций смещения пробной мас-

сы.

Факторы, ограничивающие чувствительность детектора, могут быть разделены на два класса: шумы смещения (которые приводят к реальному смещению пробной массы) и инструментальные шумы (которые ограничивают возможность детектора измерять малые смещения пробной массы) [6]. Один из шумов, принадлежащих к первой группе - зарядовый шум. В современных интерферометрических гравитационно-волновых детекторах для управления положением пробных масс используются электростатические актюаторы, которые вытягивают диэлектрическую пробную массу, в частности, изготовленную из плавленого кварца, в созданное ими неоднородное электростатическое поле. Источник зарядового шума - флуктуации распределения зарядов на поверхности диэлектрика (пробной массы), находящегося в электростатическом поле [6, 7]. Согласно теоретическим оценкам, спектральная плотность шума растет с уменьшением частоты, поэтому снижение нижней границы рабочей полосы частот в Advanced LIGO с 40 Гц до 10 Гц сделало проблему зарядового шума еще актуальнее.

Важным источником флуктуаций смещения пробной массы является тепловой шум. Он включает в себя шум в системах подвеса пробной массы и в самой пробной массе [5]. Зеркала в детекторе Advanced LIGO имеют многослойное диэлектрическое отражающее покрытие из чередующихся слоев двуокиси кремния и оксида тантала [8]. Тепловой шум в покрытиях пробной массы также является одним из важных факторов, ограничивающих чувствительность существующих гравитационно-волновых детекторов, и станет еще актуальнее при их дальнейшем развитии вследствие ужесточения требований к чувствительности детекторов [9]. Одно из предложенных решений уменьшения теплового шума - охлаждение пробных масс до температуры 123 К с заменой их материала с плавленого кварца на кремний (проект LIGO Voyager [10]). Большая циркулирующая в плечах мощность оптического излучения (3 МВт) и малый, но конечный коэффициент поглощения отражающего покрытия пробной массы приведут к ее нагреву. Поскольку при этом пробная масса должна поддерживать-

ся при низкой температуре, тепло необходимо отводить. Охлаждение пробной массы осуществляется в первую очередь посредством излучения, для чего на боковую поверхность предлагается нанести покрытие с высокой излучательной способностью. Один из перспективных материалов для такого покрытия - Aektar Black [11]. При этом важно обеспечить минимальные вносимые этим покрытием механические потери.

Цели и задачи диссертационной работы:

- Исследование динамики и флуктуаций распределения электрических зарядов на поверхности диэлектрической пробной массы, находящейся в поле электростатического актюатора.
- Исследование шума смещения пробной массы, помещенной в электростатическое поле актюатора, связанного с флуктуациями распределения зарядов на ее поверхности.
- Исследование теплового шума пробной массы в плече гравитационно-волнового детектора третьего поколения LIGO Voyager, обусловленного покрытием с высокой излучательной способностью, нанесенным на боковую поверхность пробной массы.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Разработка и создание экспериментальной установки для измерения флуктуаций силы взаимодействия диэлектрической пробной массы с электростатическим полем актюатора, исследование зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций силы взаимодействия от величины приложенного к актюатору напряжения и времени приложения напряжения.
- Модификация созданной экспериментальной установки с целью измерения динамики распределения плотности электрических зарядов на поверхности диэлектрика под действием электростатического поля актюатора.
- Расчет теплового шума кремниевой пробной массы гравитационно-волнового детектора третьего поколения LIGO Voyager, связанного с покрытием

из материала Acktar Black на ее боковой поверхности.

Научная новизна

- Разработана и создана оригинальная экспериментальная установка для непосредственного измерения флуктуаций момента сил, действующих на модельную пробную массу из плавленого кварца со стороны электрического поля, создаваемого электростатическим актюатором.
- На основании экспериментальных данных получена верхняя граница спектральной плотности шума смещения пробной массы в плече интерферометрического гравитационно-волнового детектора Advanced LIGO, обусловленная флуктуациями силы взаимодействия пробной массы с электростатическим полем актюатора.
- Проведен численный расчет динамики распределения электрического заряда по поверхности диэлектрического образца под действием электростатического поля, создаваемого гребенчатыми электродами актюатора. Результаты численного расчета согласуются с экспериментальными данными.
- На основании экспериментальных данных и численного расчета потерь при упругих колебаниях тонких дисков с покрытием определен тангенс угла механических потерь материала Acktar Black. Рассчитан тепловой шум кремниевой пробной массы проектируемого гравитационно-волнового детектора LIGO Voyager, связанный с нанесенным на ее боковую поверхность покрытием с высокой излучательной способностью из материала Acktar Black.

Практическая значимость

Современные гравитационно-волновые детекторы используют электростатические актюаторы для управления положением пробной массы. При дальнейшем улучшении чувствительности детектора шум, связанный с флуктуациями силы взаимодействия зарядов на пробной массе с электростатическим полем

актюатора, может стать ограничивающим фактором. В настоящей работе этот шум исследован экспериментально, и на основании полученных результатов дана верхняя граница зарядового шума в детекторе Advanced LIGO. Результаты исследования динамики электрических зарядов на поверхности образцов из плавленого кварца могут быть использованы для расчета шумов в других гравитационно-волновых детекторах, а также в системах, где накопление электрического заряда ухудшает их работу, например, в MEMS-переключателях (MEMS - микроэлектромеханические системы) и системах контроля микрорезервов [12, 13, 14, 15].

Тепловой шум является фактором, ограничивающим не только чувствительность гравитационно-волновых детекторов, но и, например, частотную стабильность прецизионных лазеров, стабилизированных оптическими твердотельными резонаторами [16]. Одним из способов уменьшения шума является снижение температуры резонатора, и в этом случае кремний, коэффициент теплового расширения которого при температуре ≈ 123 К переходит через ноль, становится перспективным материалом для изготовления резонатора, поскольку в данных условиях подавляется термоупругий шум и снижается влияние термоупругих деформаций. В криогенном оптическом резонаторе существует проблема отвода поглощенной энергии [17]. Поэтому важно создание покрытия с одной стороны с высокой излучательной способностью, с другой стороны с малыми механическими потерями, чтобы вносимый покрытием тепловой шум не ограничивал стабильность резонатора. В настоящей работе исследован один из возможных материалов для такого покрытия - Acktar Black. Проведенное исследование покрытия из материала Acktar Black позволяет определить его влияние на тепловой шум криогенных кремниевых оптических резонаторов и, в частности, на тепловой шум кремниевых пробных масс гравитационно-волновых детекторов третьего поколения, таких как LIGO Voyager.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод и соответствующая методика измерения момента сил, действующих на диэлектрическую пробную массу - пластину монолитного высокодобротного крутильного осциллятора из плавленого кварца, со стороны гребенчатого электростатического актюатора, позволяет измерять флуктуации момента сил взаимодействия на уровне $1.5 \cdot 10^{-30}(\text{Нм})^2/\text{Гц}$ в диапазоне частот вблизи 18 Гц.
- Формирование пространственного распределения электрического заряда на пробной массе, отражающего геометрию электродов актюатора, подтверждается численным расчетом на основе уравнений Пуассона-Нернста-Планта и измерениями временного изменения амплитуды вынужденных колебаний крутильного осциллятора.
- Релаксационный характер временного изменения силы, действующей на диэлектрическую пластину со стороны электростатического поля актюатора, обусловлен перераспределением зарядов на поверхности пластины под действием поля актюатора.
- Значение $s_{\text{strain}} \approx (1.02 \pm 0.13) \cdot 10^{-22} \text{Гц}^{-1/2}$ верхней границы спектральной плотности шума относительного смещения пробной массы в плече интерферометрического гравитационно-волнового детектора Advanced LIGO, обусловленного флуктуациями силы взаимодействия пробной массы с полем электростатического актюатора, полученное на основе проведенных в работе измерений и численных расчетов.
- Значение тангенса угла механических потерь материала с высокой излучательной способностью Acktar Black при температуре 123 К, полученное на основании экспериментального исследования и численного расчета потерь в дисковых механических резонаторах с покрытием, составляет $\phi_{AB} = (3.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$. Нанесение на боковую поверхность кремниевой пробной массы покрытия из материала Acktar Black увеличивает тепловой шум относительного смещения пробной массы гравитационно-волнового детектора третьего поколения LIGO Voyager на $\approx 9\%$.

Достоверность и апробация результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается их многократной проверкой, сравнением экспериментальных данных с результатами расчетов, а также соответствием результатам, опубликованным другими исследователями. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам, Дубна, 2011, XIX Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2012”, Международная конференция LIGO-Virgo LVC-2012, Бостон, 2012, Международная конференция LIGO-Virgo LVC-2013, Ганновер, 2013, XI Международный семинар “Физико-математическое моделирование систем” (ФММС-11), Воронеж, 2013, Международный семинар “Гравитационно-волновые детекторы второго поколения” (GWADW-14), Такайама, 2014, XII Международный семинар “Физико-математическое моделирование систем” (ФММС-11), Воронеж, 2014, Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам, Дубна 2014, XXII Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2015”, Международная конференция LIGO-Virgo LVC-2016, Пасадина, 2016, Международная конференция LIGO-Virgo LVC-2017, Пасадина, 2017. Статья [22] принята к печати в журнале *Physics Letters A* и доступна онлайн.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых журналах: [A1, A2, A3, A4] (индексированы в Web of Science, Scopus и РИНЦ).

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения,

4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 135 страниц, включая 42 рисунка. Список литературы включает 106 наименований на 11-ти страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации. В ней даны теоретическое обоснование существования гравитационных волн, история их открытия и общее описание существующих лазерных интерферометрических гравитационно-волновых детекторов. Описаны особенности конструкции гравитационно-волнового детектора второго поколения Advanced LIGO и связанные с ними источники шумов. Отдельно рассмотрен шум смещения пробной массы детектора, связанный с флуктуациями распределения находящихся на ней электрических зарядов. Глава завершается обзором проектов по усовершенствованию существующих гравитационно-волновых детекторов.

Во второй главе описана экспериментальная установка для исследования динамики распределения электрических зарядов на поверхности образца из плавленого кварца и флуктуаций силы взаимодействия данного образца с полем электростатического актюатора. Основными элементами установки являются высокочастотный монолитный крутильный осциллятор из плавленого кварца и пластины с гребенчатыми электродами. Их взаимодействие моделирует, соответственно, взаимодействие пробной массы и электростатического актюатора в плече гравитационно-волнового детектора. Установка, повторяя в масштабах лаборатории часть конструкции детектора, позволяет исследовать те процессы, изучение которых *in situ* затруднительно: использование крутильного осциллятора позволяет выделить исследуемый шум взаимодействия зарядов

на пробной массе с полем электростатического актюатора на фоне других шумов, помещение кварцевой пробной массы в среду с повышенной влажностью уменьшает характерное время перераспределения зарядов до сравнимого с доступным временем измерения. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Пластина осциллятора имеет размер $25.4 \times 10 \times 2.5 \text{ мм}^3$, массу $m \approx 1 \text{ г}$. Частота крутильных колебаний осциллятора составляет $f_r \approx 63.13 \text{ Гц}$ и лежит в важном для Advanced LIGO диапазоне частот. Добротность осциллятора $Q \approx 10^6$. Электростатический актюатор состоит из двух стеклотекстолитовых пластин размером $40 \times 18 \times 2 \text{ мм}^3$. На каждой из них находится 9 медных позолоченных полосок: пять из них заземлены, к четырем другим прикладывается напряжение. Ширина каждой полоски 1 мм, расстояние между соседними полосками 1 мм. Зазор между пластиной с электродами и пластиной осциллятора $\approx 1.5 \text{ мм}$.

Установка оснащена оригинальным прецизионным оптическим датчиком на основе интерферометра Майкельсона. Одна из сторон пластины осциллятора имеет высокоотражающее многослойное покрытие, образуя диэлектрическое зеркало. Излучение частотно-стабилизированного He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 633 \text{ нм}$ через световод заводится в вакуумную камеру, коллимируется в пучок, разделяется на 50:50 светоделителем и, проходя дополнительные направляющие зеркала, падает на пластину осциллятора. Отражаясь от пластины, два луча интерферируют на светоделителе и регистрируются двумя фотодетекторами. Конструкция датчика делает его практически нечувствительным к поступательным смещениям осциллятора.

При проведении измерений динамики распределения электрических зарядов к одной из пластин актюатора прикладывается постоянное напряжение U_{DC} , к другой - сумма постоянного напряжения и переменного напряжения на частоте f_0 : $U_{\text{DC}} + U_{\text{AC}}$, где $U_{\text{AC}} = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \psi)$, ψ - фаза переменного напряжения. Производится регистрация вынужденных колебаний пластины осциллятора на частоте f_0 . Амплитуда вынужденных колебаний определяется

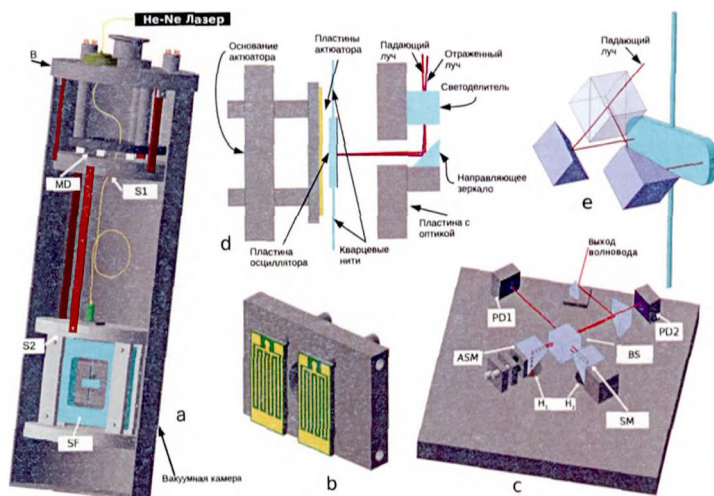


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: а) В - основание, закрепленное на стене лаборатории, S1 - верхняя ступень подвеса, MD - магнитный демпфер, S2 - нижняя ступень подвеса, SF - рама из плавленного кварца с кривильным осциллятором. б) Пластины актюатора. в) Оптический датчик: BS - светоделитель, SM - неподвижное направляющее зеркало, ASM - подвижное направляющее зеркало, H₁, H₂ - отверстия в пластине с оптикой для падающего и отраженного лучей, PD1,2 - фотодетекторы. д) Взаимное расположения пластины осциллятора, актюатора и оптического датчика. е) Путь падающего луча от входа интерферометра до точек отражения.

распределением зарядов на пластине осциллятора, из ее временной зависимости можно определить характерное время релаксации распределения зарядов и относительное изменение плотности распределения. При проведении измерений флуктуаций момента сил взаимодействия пластины осциллятора с электростатическим полем актюатора, к обеим пластинам прикладывается постоянное напряжение. Измеряется спектральная плотность мощности флуктуаций момента сил, действующих на пластину осциллятора, в зависимости от приложенного напряжения и производится статистическое сравнение средних значений спектральной плотности.

Управление установкой осуществляется при помощи разработанной программы для персонального компьютера (ПК), производящей сбор и сохранение

экспериментальных данных, а также отображение пользовательского интерфейса и предоставление удаленного управления установкой. Для подачи постоянного высокого напряжения на электростатический актюатор разработан и собран управляемый источник напряжения, имеющий два высоковольтных выхода, разность выходных напряжений между которыми регулируется, и вход для переменного напряжения, которое после прохождения аудио-усилителя подмешивается к одному из выходных каналов через емкостную связь. Величина и знак выходного высокого напряжения, режим работы (постоянное напряжение, переменное, постоянное + переменное) и аудио усилитель управляются с ПК. В процессе измерений вычисляются спектр сигнала в заданном диапазоне частот, амплитуда сигнала на заданной частоте и оценка плотности распределения заряда на поверхности пластины осциллятора, т.е. минимальный набор физических величин, необходимых экспериментатору для планирования хода эксперимента. Информация отображается на экране в графической форме, остальная часть обработки выполняется уже с сохраненными данными.

Из оцифрованных напряжений на фотодетекторах извлекаются временные зависимости угла поворота пластины осциллятора $\theta(t)$ и подаваемого на актюатор переменного напряжения $U_{AC}(t)$. Методом Уэлча [18] с использованием быстрого преобразования Фурье вычисляется спектральная плотность мощности флуктуаций угла поворота пластины осциллятора $S_\theta(f)$, из которой затем вычисляется спектральная плотность мощности флуктуаций момента сил, действующих на пластину осциллятора. В случае, если в ходе эксперимента на актюатор подавалось переменное напряжение, методом синхронного детектирования вычисляется зависимость амплитуды вынужденных колебаний осциллятора и, соответственно, вынуждающего момента сил от времени на одинарной и удвоенной частотах переменного напряжения. Эта информация используется для оценки плотности заряда на поверхности пластины осциллятора.

Основными источниками флуктуаций угла поворота пластины осциллятора в разработанной экспериментальной установке являются шумы электроста-

тического актюатора, шумы оптического датчика, и внешние шумы (в первую очередь сейсмического происхождения). Шумы электростатического актюатора включают в себя шум источника высокого напряжения и флуктуации силы взаимодействия электростатического поля, создаваемого актюатором, с электрическими зарядами на поверхности пластины осциллятора из плавленого кварца (последний из них является предметом настоящего исследования). Вклад первого источника шума незначителен, поскольку шум источника высокого напряжения приводит к одинаковому шуму напряжений, подаваемых на обе пластины актюатора, следовательно, создаваемые ими флуктуации моментов сил, действующих на пластину осциллятора, компенсируют друг друга. Шум оптического датчика определяется флуктуациями частоты и мощности используемого лазера, шумом фотодетекторов и флуктуациями мощности излучения, возникающими в каждом из плеч интерферометра независимо, в частности, вследствие флуктуаций положения подстраиваемого направляющего зеркала. Достигнута чувствительность оптического датчика к измерению угла поворота пластины осциллятора не хуже $s_\theta \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ рад}/\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот 15 – 130 Гц.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A1] и [A3].

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования динамики зарядов на поверхности плавленого кварца и ее численного моделирования, а также результаты исследования флуктуаций взаимодействия пробной массы из плавленого кварца с полем электростатического актюатора.

На поверхности образца из плавленого кварца под действием электростатического поля актюатора вследствие малой проводимости плавленого кварца формируется распределение электрических зарядов, отражающее конфигурацию электродов актюатора. Распределение зарядов может быть охарактеризовано средним значением ρ_{eff} величины экстремума плотности распределения заряда на поверхности образца. Распределение зарядов приводит к появлению дополнительной компоненты момента сил, действующих на него со стороны

электростатического поля актюатора. Если к половине актюатора $E1$ приложено напряжение U_{E1} , действующий на пластину осциллятора момент сил [7]:

$$N_{E1} = AU_{E1}^2 + BU_{E1}\rho_{\text{eff}} + N_{im} \quad (1)$$

где ρ_{eff} - эффективная плотность распределения электрического заряда, находящегося на соответствующей половине пластины осциллятора, константа B определяется геометрией системы, N_{im} - момент сил изображения. Второй член связан с кулоновским взаимодействием зарядов с электростатическим полем актюатора. Момент сил изображения пренебрежимо мал. Флуктуации распределения зарядов приводят к флуктуациям момента сил, действующих на пробную массу.

Прикладываемое к $E1$ напряжение имеет постоянную и переменную составляющие: $U_{E1}(t) = U_{DC} + U_{AC}(t)$, где $U_{AC}(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \psi)$, f_0, ψ - частота и фаза переменного напряжения соответственно. При этом постоянное напряжение прикладывается и к другой половине актюатора $E2$ для поддержания баланса постоянных составляющих моментов сил, действующих на пластину осциллятора: $N_{E1} = N_{E2}$. Амплитуда вынуждающего момента сил N_0 , действующего на пластину осциллятора на частоте переменного напряжения

$$N_0 = N_{0,U} + N_{0,\rho}, \quad (2)$$

где $N_{0,U} = 2AU_{DC}U_0$ и $N_{0,\rho} = BU_0\rho_{\text{eff}}$. Эффективная плотность распределения заряда ρ_{eff} рассчитывается из этого выражения.

Для проведения измерений динамики зарядов на поверхности пластины из плавленого кварца в вакуумную камеру напускался воздух при атмосферном давлении с контролируемой относительной влажностью. Это позволило снизить время релаксации заряда до сравнимого с временем измерений. Зависимость амплитуды момента сил, действующих на пластину осциллятора на частоте

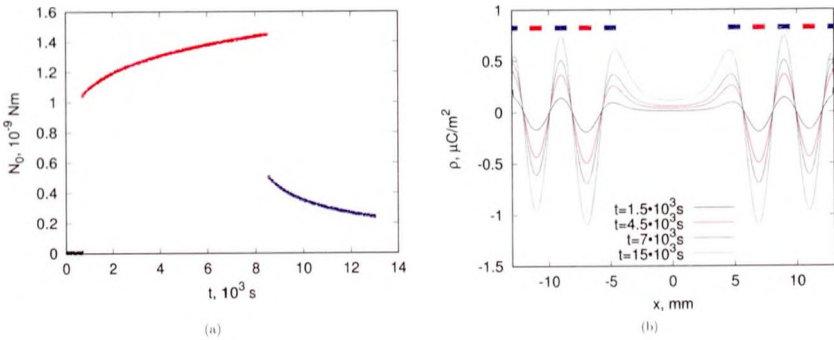


Рис. 2. (а) Зависимость от времени амплитуды момента сил $N_0(t)$ до приложения постоянного напряжения к актюаторам ($t = 0 - 700$ с, черная линия), при приложенном напряжении $U_{DC} = 965$ В ($t = 700 - 8500$ с, красная линия) и после выключения напряжения ($t > 8500$ с, синяя линия). (б) Распределения поверхностной плотности зарядов, полученные при помощи численного моделирования для случая, соответствующего влажности $RH = 30\%$. Показаны распределения для времен 1500 с ($\approx 0.1\tau_{incr}$), 4500 с ($\approx 0.3\tau_{incr}$), 7000 с ($\approx 0.5\tau_{incr}$) и 15000 с ($\approx \tau_{incr}$). Полоски, изображенные сверху, показывают положения электродов актюаторов.

вынуждающего напряжения, от времени представлена на рис. 2(а). Резкое увеличение амплитуды момента сил после подачи напряжения на актюатор и его резкое уменьшение после выключения напряжения связаны с членом $N_{0,U}$ в (2). Медленное увеличение и уменьшение момента сил описываются характерным временем релаксации и относительным изменением амплитуды момента сил, действующих на пластину осциллятора в процессе накопления заряда. Исследованы зависимости данных параметров от влажности в диапазоне значений относительной влажности воздуха $30\% - 60\%$. Отдельно проведено измерение динамики зарядов в вакууме и получены значения характерного времени релаксации и относительного изменения амплитуды момента сил, необходимые для исследования флуктуаций силы взаимодействия пробной массы из плавленого кварца с полем электростатического актюатора.

Разработана численная модель, включающая в себя модель пластины осциллятора из плавленого кварца и электродов электростатического актюатора, математически основанная на системе уравнений Пуассона-Нернста-План-

ка [19, 20]. В модели сделаны следующие предположения: свободные носители заряда в объеме плавленого кварца отсутствуют и обмен свободными зарядами между поверхностью и объемом не происходит; на поверхности присутствуют положительные и отрицательные заряды, количество которых одинаково, т.е. пластина как целое электрически нейтральна; подвижность отрицательных зарядов равна нулю; с влажностью изменяется только плотность зарядов, их подвижность остается постоянной. Используя симметрию системы, модель сведена к двумерной. Показано, что вносимые при этом погрешности несут незначительный вклад.

Распределения поверхностной плотности зарядов на поверхности пластины осциллятора со стороны электродов представлены на рис. 2(b). Заряды перераспределяются и образуются максимумы и минимумы плотности заряда, повторяющие конфигурацию электродов. Модель позволяет рассчитать эволюцию распределения заряда на поверхности пластины из плавленого кварца и соответствующее изменение действующего на нее момента сил, и подтверждает связь изменения момента сил с перераспределением зарядов. Несмотря на простоту модели, результаты численного расчета в целом согласуются с экспериментальными данными.

Проведено исследование флуктуаций силы взаимодействия пробной массы из плавленого кварца с полем электростатического актюатора. Сделано несколько серий измерений, каждая из которых состоит из чередующихся сегментов: один измеренный при приложенном к актюатору напряжении $U_{DC} = 0$ В (ESD_{off}), следующий измеренный при $U_{DC} = 600$ В (ESD_{on}). Длительность сегмента примерно 300 с. Для расчета спектральной плотности мощности флуктуаций угла поворота пластины осциллятора в каждом сегменте применяется дискретное преобразование Фурье с длительностью временного окна $t_W = 40$ с и функцией окна HFT248D [21], чтобы получить среднее значение P_i спектральной плотности в выбранном частотном диапазоне (16.9 – 19.9 Гц). Все полученные значения P_i сортируются в две выборки, содержащие все значения, полученные при выключенном напряжении ($\{P_{off}\}$, черные точки на рис. 3a) и

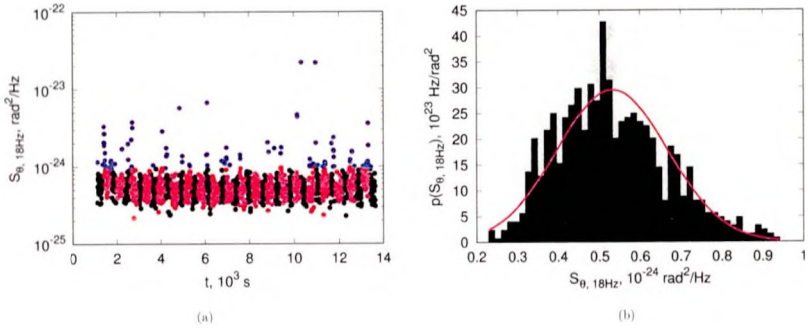


Рис. 3. (a) Зависимость от времени спектральной плотности мощности флуктуаций угла поворота пластины осциллятора в диапазоне частот 16.9 – 19.9 Гц : ESD_{off} - черные точки, ESD_{on} - красные точки. Синими точками показаны исключенные из выборки данные. (b) Функция распределения плотности вероятности для выборки $\{P_{off}\}$ после исключения из нее выбросов и ее аппроксимация нормальным распределением (красная линия).

при поданном на актюатор напряжении ($\{P_{on}\}$) соответственно. Выборки проходят процедуру исключения выбросов, источником которых являются, в первую очередь, кратковременные сейсмические возмущения. Функция распределения плотности вероятности для выборки $\{P_{off}\}$ после исключения выбросов представлена на рис. 3б. При помощи t-теста проверена нулевая гипотеза о том, что средние значения этих двух выборок равны. Результаты теста не опровергли нулевую гипотезу. Доверительный интервал для разности средних значений δ выборок составил $-0.5 \cdot 10^{-26} \text{ рад}^2/\text{Гц} \leq \delta \leq 2.2 \cdot 10^{-26} \text{ рад}^2/\text{Гц}$ с 95% вероятностью. Отсюда получена верхняя граница спектральной плотности мощности флуктуаций момента силы взаимодействия пластины осциллятора с электростатическим полем актюатора $\Delta S_N \lesssim 1.5 \cdot 10^{-30} (\text{Нм})^2/\text{Гц}$ на частотах вблизи 18 Гц.

Результаты исследования позволили вычислить верхнюю границу амплитудной спектральной плотности шума относительного смещения пробной массы в плече интерферометрического гравитационно-волнового детектора второго поколения Advanced LIGO, связанного с действием электростатического актю-

атора: $s_{\text{strain}} \approx (1 \pm 0.13) \cdot 10^{-22} \text{ Гц}^{-1/2}$ на диапазоне частот вблизи 18 Гц.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A2] и [A3].

В четвертой главе описано исследование потерь в тонких механических дисковых резонаторах с поглощающим покрытием и расчет потерь в поглощающем покрытии кремниевых пробных масс интерферометрических гравитационно-волновых детекторов третьего поколения.

На основе программного пакета Comsol Multiphysics разработана численная модель для расчета изгибных мод колебаний, механических и термоупругих потерь в тонких дисках с покрытием. Исследуются моды колебаний с N узловыми диаметрами и 0 узловыми окружностями. Особенность разработанной модели заключается в большой величине соотношения диаметра диска к толщине покрытия, которое делает использование стандартных методов построения сетки для численного решения уравнений модели затруднительным и приводит к некорректным результатам расчета. Реализованный метод построения сетки, заключающийся в построении двумерной сетки на общей границе диска и покрытия и последующей трансляции сетки в объем диска и покрытия, позволяет преодолеть это препятствие. Результаты расчета дают хорошее согласие с экспериментом. На основании численного расчета и сравнения его с результатами эксперимента по исследованию добротности кремниевых дисковых резонаторов с покрытием Aektar Black впервые получена величина тангенса угла механических потерь в материале Aektar Black при температуре 123 К в килогерцовом диапазоне: $\phi_{AB} = (3.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$ [A4]. Метод построения сетки для решения численных задач с большим соотношением геометрических размеров рассматриваемой системы был также успешно применен для расчета потерь в кремниевом камертоне, изготовленном методом «silicate bonding» [22].

Проведен расчет тепловых шумов в пробной массе интерферометрических гравитационно-волновых детекторов, связанных с нанесенным на ее боковую поверхность покрытием из материала Aektar Black. Расчет основан на методе Левина [23]. Для расчета использована аксимально симметричная модель крем-

ниевой пробной массы для проекта LIGO Voyager (цилиндр диаметром 45 см и толщиной 55 см) с отражающим покрытием, нанесенным на торец цилиндра, от которого отражается лучок лазера. На боковую поверхность цилиндра нанесено покрытие из материала Aektar Black толщиной 18 мкм. Следуя методу, предложенному в работе [24], к торцу цилиндра с отражающим покрытием приложена сила с гауссовским профилем, моделирующая собой силу светового давления луча лазера, к самой пробной массе приложена равномерно распределенная объемная сила так, что эти две силы уравниваются друг друга. Корректность разработанной модели проверена путем сравнения результатов расчета на ее основе тепловых шумов в пробной массе и отражающем покрытии с данными разработанного в LIGO программного пакета GWINC, который содержит в себе аналитические расчеты для данных шумов. Также при помощи созданной модели рассчитаны зависимости тепловых шумов в пробной массе и отражающем покрытии от размеров пробной массы (диаметра и толщины). Зависимости качественно совпадают с представленными графически в [25]. Используя полученный тангенс угла механических потерь в материале Aektar Black, проведен расчет теплового шума кремниевой пробной массы, вносимого покрытием из данного материала, нанесенным на всю боковую поверхность пробной массы. Рассчитанное увеличение амплитудной спектральной плотности суммарного шума относительного смещения пробной массы проектируемого гравитационно-волнового детектора третьего поколения LIGO Voyager при нанесении поглощающего покрытия на ее боковую поверхность составило около 9%. Полученное распределение плотности упругой энергии, запасенной в поглощающем покрытии, позволяет провести оптимизацию покрытия.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A4] и [22].

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

- Разработана и реализована экспериментальная установка для исследования взаимодействия диэлектрической пробной массы (пластины высоко-

добротного крутильного осциллятора из плавленого кварца) с электростатическим полем актюатора, состоящего из гребенчатых электродов. Экспериментальная установка включает в себя разработанный прецизионный оптический датчик угла поворота пластины крутильного осциллятора на основе интерферометра Майкельсона, обладающий компенсацией флуктуаций входной мощности оптического излучения, подавлением влияния поступательных движений пластины осциллятора на сигнал, получаемый с датчика, и имеющий чувствительность к углу отклонения пластины осциллятора не хуже $3 \cdot 10^{-13} \text{ рад}/\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот 15 – 130 Гц. Экспериментальная установка позволяет измерять спектральную плотность флуктуаций момента сил, действующих на пластину осциллятора, на уровне $1.5 \cdot 10^{-30} (\text{Нм})^2/\text{Гц}$ в диапазоне частот вблизи 18 Гц. Разработан программный пакет для автоматизации измерений и цифровой обработки экспериментальных данных.

- Проведен численный расчет динамики распределения плотности электрического заряда на поверхности диэлектрической массы под действием электростатического поля актюатора. Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными, полученными на созданной установке.
- Продемонстрирован релаксационный характер взаимодействия образца из плавленого кварца и электростатического поля актюатора. Получено характерное время релаксации распределения электрических зарядов на поверхности образца из плавленого кварца в вакууме, а также его зависимость от относительной влажности при измерениях на воздухе: характерное время релаксации изменяется от 10^4 с до 10^2 с при изменении относительной влажности от 30% до 55%.
- Проведено исследование флуктуаций силы взаимодействия диэлектрической пробной массы с электростатическим полем актюатора. На основании экспериментальных данных рассчитана верхняя граница амплитудной спектральной плотности шума относительного смещения пробной мас-

сы в гравитационно-волновом детекторе Advanced LIGO, обусловленного воздействием электростатического актюатора, на частотах вблизи 18 Гц:
 $s_{\text{strain}} \approx (1.02 \pm 0.13) \cdot 10^{-22} \text{ Гц}^{-1/2}$.

- Проведен численный расчет потерь в механических дисковых резонаторах с поглощающим покрытием. На основании расчета и экспериментальных данных определен тангенс угла механических потерь материала Aektar Black при температуре 123 К в килогерцовом диапазоне частот: $\phi_{AB} = (3.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$. Проведенный расчет теплового шума кремниевой пробной массы гравитационно-волнового детектора третьего поколения LIGO Voyager, обусловленного покрытием с высокой излучательной способностью из материала Aektar Black, нанесенным на боковую поверхность пробной массы, показал, что добавление бокового покрытия увеличивает амплитудную спектральную плотность шума относительного смещения пробной массы на $\approx 9\%$. Предложен способ оптимизации покрытия.

Список опубликованных статей

- A1. Кошцов Д. В., Прохоров Л. Г., Митрофанов В. П. Интерферометрический датчик малых колебаний крутильных осцилляторов // Приборы и техника эксперимента. 2013. Т. 56, № 2. С. 100-104.
 Koptsov D. V., Prokhorov L. G., Mitrofanov V. P. An interferometric sensor for measuring small oscillations of torsional oscillators // Instruments and Experimental Techniques 2013. Vol. 56, no. 2. P. 215-218.
- A2. Koptsov D. V., Prokhorov L. G., Mitrofanov V. P. Effects of humidity on the interaction between a fused silica test mass and an electrostatic drive // Physics Letters A. 2015. Vol. 379, no. 40-41. P. 2535 – 2540.
- A3. Koptsov D. V., Prokhorov L. G., Mitrofanov V. P. Measurement of fluctuations of electrostatic force acting between a dielectric plate and an electrostatic drive // Review of Scientific Instruments. 2017. Vol. 88, no. 4. P. 044701.

- A4. Abernathy M. R., Smith N., Korth W. Z., Adhikari R. X., Prokhorov L. G., Koptsov D. V., Mitrofanov V. P. Measurement of mechanical loss in the Aektar Black coating of silicon wafers // *Classical and Quantum Gravity*. 2016. Vol. 33, no. 18. P. 185002.

Цитированная литература

1. Aasi J., Abbott B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Advanced LIGO // *Classical and Quantum Gravity*. 2015. Vol. 32, no. 7. P. 074001.
2. Abbott B. P., et. al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116. P. 061102.
3. Abbott B. P., et. al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116. P. 241103.
4. Abbott B. P., et. al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 // *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 118. P. 221101.
5. Abbott B. P., et. al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116. P. 131103.
6. Martynov D. V., Hall E. D., Abbott B. P. et al. Sensitivity of the Advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy // *Phys. Rev. D*. 2016. Vol. 93. P. 112004.
7. Hewitson M., Danzmann K., Grote H. et al. Charge measurement and mitigation for the main test masses of the GEO 600 gravitational wave observatory // *Classical and Quantum Gravity*. 2007. Vol. 24, no. 24. P. 6379.
8. Harry G. M., Abernathy M. R., Becerra-Toledo A. E. et al. Titania-doped tan-

- tala/silica coatings for gravitational-wave detection // *Classical and Quantum Gravity*. 2007. Vol. 24, no. 2. P. 405.
9. Granata M., Saracco E., Morgado N. et al. Mechanical loss in state-of-the-art amorphous optical coatings // *Phys. Rev. D*. 2016. Vol. 93. P. 012007.
 10. Adhikari R., Smith N., Brooks A. et al. LIGO Voyager Upgrade Conceptual Design // LIGO Technical Note T1400226. 2016. DCC: <https://dcc.ligo.org/T1400226>.
 11. Acktar Ltd. Black Coating Services. <http://www.acktar.com/category/BlackOpticalCoating>.
 12. Ruan J. J., Trémouilles D., Cocchetti F. et al. Reliability assessment of electrostatically driven MEMS devices: based on a pulse-induced charging technique // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2012. Vol. 22, no. 4. P. 045016.
 13. Blokhina E., Gorreta S., Lopez D. et al. Dielectric Charge Control in Electrostatic MEMS Positioners/Varactors // *Microelectromechanical Systems, Journal of*. 2012. Vol. 21, no. 3. P. 559–573.
 14. Papaioannou G., Papapolymerou J., Pons P., Plana R. Dielectric charging in radio frequency microelectromechanical system capacitive switches: A study of material properties and device performance // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90, no. 23.
 15. Zaghoul U., Bhushan B., Pons P. et al. On the influence of environment gases, relative humidity and gas purification on dielectric charging/discharging processes in electrostatically driven MEMS/NEMS devices // *Nanotechnology*. 2011. Vol. 22, no. 3. P. 035705.
 16. Matei D. G., Legero T., Grebing C. et al. A second generation of low thermal noise cryogenic silicon resonators // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 723, no. 1. P. 012031.
 17. Shapiro B., Adhikari R. X., Aguiar O. et al. Cryogenically cooled ultra low vibration silicon mirrors for gravitational wave observatories // *Cryogenics*. 2017. Vol. 81. P. 83 – 92.

18. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on. 1967. Vol. 15, no. 2. P. 70-73.
19. COMSOL. ACDC Module, User's guide // Version 5.2a. 2016.
20. COMSOL. Chemical Reaction Engineering Module, User's guide // Version 5.2a. 2016.
21. Heinzel G., Rüdiger A., Schilling R. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows // Max Planck Society eDoc Server. 2002. P. 1-84.
22. Prokhorov L. G., Koptsov D. V., Matiushechkina M. S., Mitrofanov V. P., Haughian K., Hough J., Rowan S., Van Veggel A. A., Murray P. G., Hammond G. D., Tokmakov K. Upper limits on the mechanical loss of silicate bonds in a silicon tuning fork oscillator // Physics Letters A. 2017, Available online 12 July 2017 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960117302359>.
23. Levin Y. Internal thermal noise in the LIGO test masses: A direct approach // Phys. Rev. D. 1998. Vol. 57. P. 659-663.
24. Coyne D., Willems P. Thermal Noise Increase due to a Gold Coated Barrel // LIGO Technical Note T080003. 2008. DCC: <https://dcc.ligo.org/T080003/public>.
25. Harry G., Bodiya T. P., DeSalvo R. Optical Coatings and Thermal Noise in Precision Measurement. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. P. 75. ISBN: 9781107003385.

Научное издание

Кошцов Дмитрий Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Шумы в интерферометрических гравитационно-волновых детекторах,
связанные с поглощающим покрытием пробных масс и электрическими
зарядами на их поверхности

