

На правах рукописи

Прохоров Леонид Георгиевич

**ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОБНЫХ МАССАХ.**

Специальность

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

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

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор Митрофанов Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,

Черныш Владимир Савельевич

Кандидат физико-математических наук

Коростин Сергей Владимирович

Ведущая организация:

Институт Ядерных Исследований РАН (г. Москва)

Защита состоится “10” апреля 2008 г. в 16.00 час. на заседании диссертационного
совета Д 501.001.66 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва,
Ленинские горы, МГУ, Физический факультет, аудитория 5-19.

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

Автореферат разослан “___” _____ 2008 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 501.001.66

А.П. Ершов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время одной из наиболее интересных и актуальных научных задач является регистрация гравитационного излучения. С точки зрения современной физики, наибольшей интенсивностью гравитационного излучения сопровождаются такие астрофизические процессы, как слияние нейтронных звезд, черных дыр, несимметричный взрыв сверхновых звезд [1]. Регистрация гравитационных волн от таких астрофизических событий даст не только возможность проверки теории гравитации, но и новый способ получения информации о Вселенной. Развитие гравитационно-волновых детекторов предполагает создание новой ветви науки – гравитационно-волновой астрономии.

Однако интенсивность гравитационного излучения крайне мала, и его регистрация является сложнейшей экспериментальной задачей. В настоящее время в разных странах реализуется несколько проектов создания гравитационно-волновых детекторов – LIGO (США) [2, 3], VIRGO (Италия-Франция), GEO (Германия). Достигнутая на сегодняшний день чувствительность лазерных интерферометрических детекторов по вариации метрики пространства составляет $h \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ Гц}^{-1/2}$ вблизи частоты наблюдения 120 Гц, что соответствует измерению смещения пробной массы $\Delta x \approx 10^{-18} \text{ м}$ [4].

Для улучшения чувствительности гравитационно-волновых детекторов необходимо всестороннее исследование тонких эффектов, создающих флуктуационные силы порядка или более, чем 10^{-7} дины. Такие воздействия на диэлектрические пробные массы детектора может оказывать, в частности, флуктуационная электрическая сила. Находящийся на пробной массе электрический заряд может вносить дополнительную диссипацию [5] (а следовательно, и дополнительные шумы) из-за электрического взаимодействия пробной массы с окружением.

Кроме того, дополнительные флуктуации могут создаваться при изменении заряда пробной массы или его распределения, т.к. при этом изменяется электрическая сила взаимодействия пробной массы и окружения. Величина флуктуационной силы зависит от плотности электрического заряда на пробной

массе, которая определяется начальными условиями. Заряд пробной массы может изменяться из-за ряда причин, например, адсорбции и десорбции заряженных молекул с поверхности пробной массы; из-за каскадных процессов, развивающихся при пролете высокоэнергетических частиц космических лучей [6].

Отметим, что вызванные электрическими зарядами флуктуационные силы могут ухудшать чувствительность не только в наземных гравитационно-волновых детекторах, но и в других высокоточных экспериментах. Так, их влияние нужно учитывать при создании космического детектора гравитационных волн LISA [7], при разработке спутников свободных от сноса, в частности Gravitational Probe B [8], и в других установках, связанных с измерением малых сил.

Цель и задачи исследований

Целью работы являлось исследование эволюции распределения электрических зарядов, находящихся на диэлектрических пробных массах, и изучение механизмов диссипации, обусловленных взаимодействием этих зарядов с окружающими телами. Для выполнения поставленной цели было необходимо решить следующие основные задачи:

- 1) Разработка методики исследований и измерение дополнительных потерь, вносимых в моды колебаний пробных масс, возникающих из-за наличия на пробных массах электрических зарядов и их взаимодействия с окружающими телами.
- 2) Разработка методики исследований и проведение долговременных измерений электрического заряда, находящегося на макете пробной массы. Исследование причин изменения электрического заряда пробной массы.
- 3) Создание экспериментальной установки, разработка методики исследований и изучение эволюции распределения зарядов на поверхности диэлектрических образцов.

Научная новизна

В представленной работе впервые:

1. Проведены длительные (месяцы) измерения величины электрического заряда, находящегося на макете пробной массы гравитационно-волнового детектора, изготовленном из плавленого кварца и подвешенном на тонких

кварцевых нитях внутри металлической вакуумной камеры. Обнаружено, что пробная масса отрицательно заряжается со средним темпом около 10^{-14} Кл/см² в месяц.

2. Проведено исследование диссипации в маятниковой моде колебаний, обусловленной взаимодействием находящихся на пробной массе электрических зарядов с окружением, в частности, с электростатическим актюатором. При использовании актюатора из плавленного кварца с напыленными на него золотыми электродами, величина дополнительных потерь не превышала $\delta Q^{-1} < 5 \cdot 10^{-9}$, при увеличении заряда на пробной массе до $q \approx 5 \cdot 10^{-9}$ Кл.

3. Создана экспериментальная установка и методика исследований, позволяющая измерять распределение электрического заряда на массивных диэлектрических образцах, находящихся в вакууме, с чувствительностью к плотности электрического заряда $\Delta\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ Кл/см² $\sqrt{Гц}$.

4. Прямыми измерениями было установлено, что время релаксации заряда, нанесенного в вакууме на образец плавленного кварца, составляет более 3-х лет. Эта величина получена для локально нанесенных методом контактной электризации зарядов обоих знаков, при величине электрического заряда $q = 10^{-13} \div 10^{-11}$ Кл.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальная методика, позволяющая проведение долговременных измерений электрического заряда, находящегося на теле высокочастотного ($Q \approx 8 \cdot 10^7$) маятника, изготовленного из плавленного кварца (являвшегося макетом пробной массы гравитационно-волнового детектора).

2. Результаты экспериментальных исследований временной зависимости величины электрического заряда, находящегося на макете пробной массы гравитационно-волнового детектора.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния электрического заряда, находящегося на теле маятника, на его добротность.

4. Экспериментальная установка и методика исследований, позволяющая измерять распределение электрического заряда на диэлектрическом образце с чувствительностью к плотности электрического заряда $\Delta\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ Кл/см² $\sqrt{Гц}$.

5. Результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие влияние предварительной подготовки и внешних условий на электрическую проводимость диэлектрических образцов сапфира и плавленого кварца, находящихся на воздухе.

6. Результаты экспериментального исследования релаксации распределения электрических зарядов на образце плавленого кварца, находящемся в высоком вакууме.

Достоверность полученных результатов

Результаты, приведенные в диссертации, получены на основе тщательных многократно повторенных измерений, проведенных на современном научном оборудовании с использованием компьютерных методов обработки экспериментальных данных. Экспериментальные данные сопоставлены с теоретическими расчетами, основанными на адекватно выбранных физических моделях анализируемых процессов, и с результатами других групп исследователей. Они многократно обсуждались на конференциях участников проекта создания детектора гравитационных волн LIGO. Это позволяет считать все полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Научная и практическая значимость работы

1. Созданные экспериментальные установки и разработанные методики измерений позволяют измерять проводимость диэлектриков на уровне $\rho^{-1} \approx 10^{-18} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ и исследовать изменение заряда диэлектрических масс, обусловленное, например, действием космических лучей
2. Результаты долговременных изменений пространственных и временных вариаций электрического заряда, находящегося на макетах пробных масс интерферометрических детекторов гравитационных волн, дают возможность рассчитывать флуктуационные силы, вызванные электрическим взаимодействием пробных масс с окружающими телами, а также разрабатывать методы их уменьшения в работающих в настоящее время детекторах LIGO, VIRGO, GEO.
3. Полученные данные о дополнительной диссипации и флуктуационных силах, вызванных взаимодействием электрических зарядов, находящихся на

диэлектрических пробных массах, с элементами окружения, и о влиянии на них различных факторов могут быть использованы при создании прецизионных и высокостабильных измерительных устройств и приборов с механическими чувствительными элементами.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры физики колебаний физического факультета МГУ, а также на следующих научных конференциях:

- Международная конференция научной коллаборации LIGO, (США, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007).
- Международная конференция по проблемам электризации пробных масс в экспериментальной гравитации (США, 2007)
- Международная конференция «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» (Воронеж, 2005, 2007).
- XI международная конференция им. Марселла Гроссмана по Общей Теории Относительности (Германия, Берлин, 2006).
- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2005)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 5 статей в реферируемых журналах и 4 – тезисы докладов на конференциях. Список работ приводится в конце автореферата.

Личный вклад автора

Определение цели работы, постановки задач и выбор методов исследования осуществлены автором совместно с д.ф.-м.н., профессором В.П. Митрофановым.

Автором разработана и создана установка для измерения распределения электрических зарядов на диэлектрических образцах, проведены эксперименты (на воздухе и в вакууме) по изучению факторов, влияющих на распределения зарядов и его эволюцию.

Автором разработана и осуществлена автоматизированная система сбора и обработки больших массивов данных для проведения долговременных измерений величины электрического заряда, находящегося на макете пробной массы, и диссипации в маятниковой моде колебаний.

Автором выполнены теоретические расчеты коэффициентов преобразования емкостных зондов, проведен анализ шумов в элементах измерительных установок, получены их численные оценки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 148 страницах, содержит 46 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 102 наименования.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, приводятся основные сведения о структуре диссертации, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан литературный обзор по теме диссертационной работы. В разделе 1.1 описаны принцип действия и устройство современных детекторов гравитационных волн, их чувствительность, а также предполагаемые источники гравитационного излучения. Рассматриваются шумы, ограничивающие чувствительность интерферометрических гравитационно-волновых детекторов. Одним из возможных источников флуктуационных сил могут быть электрические заряды, находящиеся на диэлектрических пробных массах таких детекторов. Возможные механизмы флуктуационного влияния электрических зарядов описываются в разделе 1.2. Причиной дополнительных флуктуационных сил может быть изменение величины находящегося на пробной массе электрического заряда или его перераспределение, которые приводят к изменению силы электрического взаимодействия пробной массы с элементами ее окружения. Кроме того, дополнительное затухание в моды колебаний может вноситься из-за электрического взаимодействия пробных масс с окружением. Для оценки величины флуктуационных сил, действующих на пробную массу гравитационной антенны, было необходимо провести исследования поведения электрических зарядов на пробных массах. После рассмотрения современных бесконтактных методов

измерения электрических зарядов был выбран метод емкостного зонда, как обеспечивающий максимальную чувствительность на объемных образцах при минимальном влиянии зонда на распределение заряда.

Глава 2 посвящена исследованию электрических зарядов и их влияния на диссипацию в механических осцилляторах из плавленного кварца. Ключевым элементом экспериментальной установки (см. Рис. 1) являлся высокочастотный ($Q \approx 8 \times 10^7$) крутильный маятник (макет пробной массы), представляющий собой цилиндр из кварцевого стекла (диаметр цилиндра 6,5 см, длина 7,5 см, масса 0,5 кг), подвешенный на двух кварцевых нитях (длиной 25 см и диаметром ~ 200 мкм). Система находилась в вакуумной камере, откачиваемой турбомолекулярным насосом до остаточного давления ниже $3 \cdot 10^{-8}$ Торр. Угловая амплитуда крутильных колебаний цилиндра измерялась оптическим датчиком, что позволяло минимизировать воздействие на маятник со стороны системы регистрации.

На расстоянии $1 \div 3$ мм от кварцевого цилиндра был расположен планарный конденсатор с гребенчатыми электродами, который использовался как емкостной зонд для измерения электрического заряда пробной массы. Возбуждение колебаний маятника производилось за счет воздействия с резонансной частотой неоднородного электрического поля на диэлектрическую пробную массу. Для создания градиента электрического поля использовался тот же планарный конденсатор, на который подавалось постоянное напряжение $U_0 = 300$ В и переменное напряжение $U_1 = 100$ В на частоте крутильной моды колебаний маятника $f = 1,14$ Гц. Планарный конденсатор являлся ближайшим к колеблющемуся маятнику объектом, с которым взаимодействовали находящиеся на теле маятника электрические заряды. Такая конструкция моделировала электростатический актюатор, который предполагается использовать для силового воздействия на пробные массы лазерного интерферометрического детектора гравитационных волн с целью настройки интерферометра.

В экспериментах использовалось различное расположение планарного конденсатора: он мог располагаться параллельно торцу цилиндра, как это изображено на Рис. 1, или под цилиндром параллельно его оси. Изменение величины электрического заряда, находящегося на пробной массе, осуществлялось

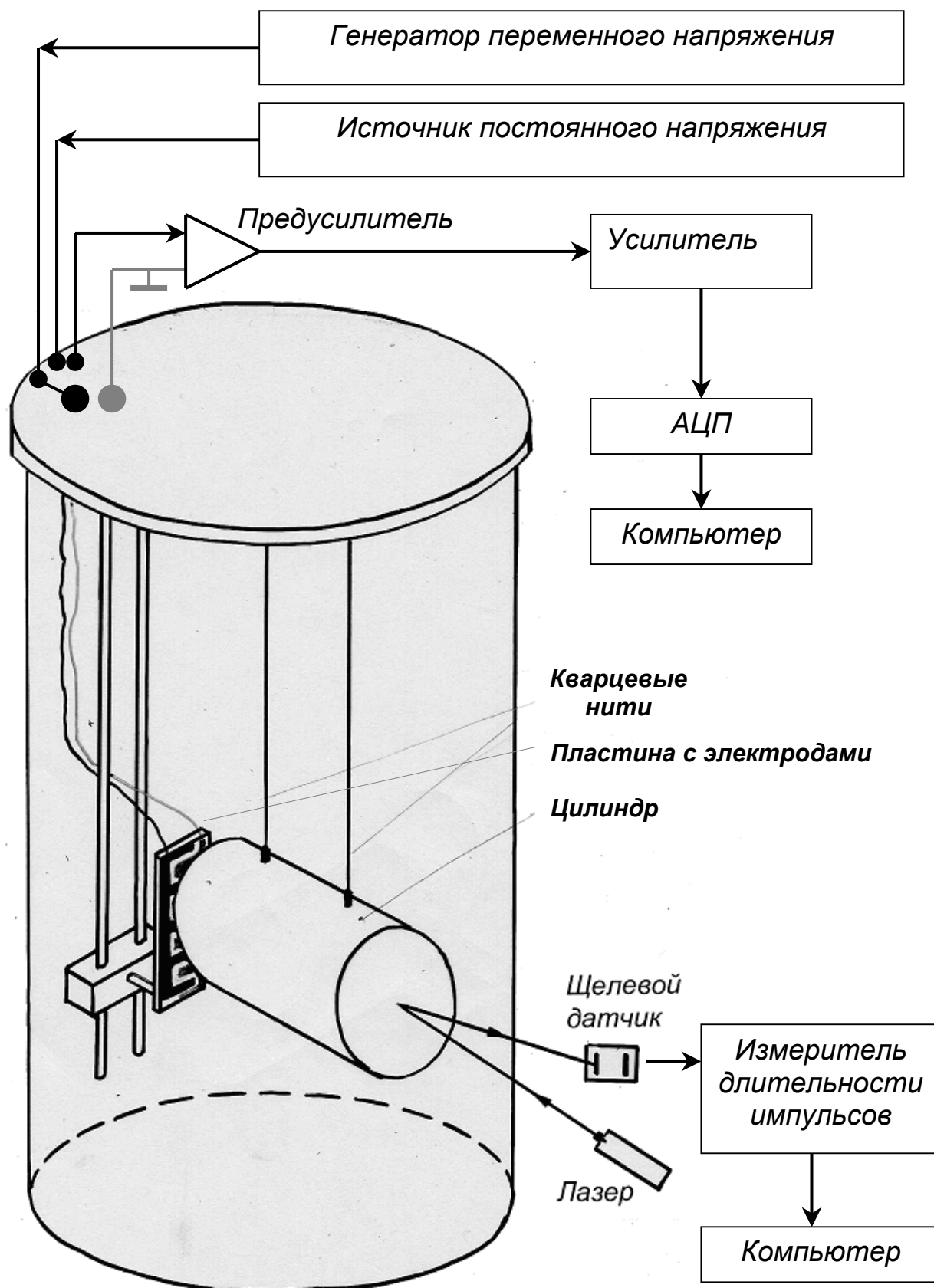


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения величины электрического заряда, находящегося на макете пробной массы.

в вакууме посредством точечной контактной электризации поверхности кварцевого цилиндра заземленной нихромовой проволокой.

Сигналы с зонда и датчика, измеряющего амплитуду колебаний маятника, поступали на ЭВМ. Для сбора и обработки экспериментальных данных была разработана программа в рамках специализированной среды программирования LabView. Это позволило автоматически вычислять спектр сигнала и регистрировать электрическое напряжение на зонде, индуцированное различными модами колебаний маятника.

Расчет электрических шумов предусилителя дает оценку для минимальной различимой величины заряда $q_{min} \approx 3 \cdot 10^{-16}$ Кл при полосе пропускания 1 Гц. Однако более существенным источником погрешностей являлась сейсмическая раскачка маятника, которая приводила к флуктуациям амплитуды колебаний.

Отметим ключевые особенности созданной экспериментальной установки:

1. Использование свободных колебаний высокочастотного маятника приводило к модуляции величины зазора между пробной массой и емкостным зондом на частоте крутильной моды маятника. Эта частота стабильна, и не требуется системы постоянного возбуждения колебаний, создающей дополнительные электрические помехи. Изменение амплитуды колебаний маятника составляло $\delta A/A \approx 10\%$ в месяц, что позволяло производить длительные измерения без дополнительной раскачки маятника.

2. Для уменьшения заряда пробной массы использовались в основном два метода. Электрический разряд при давлении 10^{-1} Торр, зажигаемый в камере, позволял уменьшить поверхностную плотность электрического заряда на пробной массе до уровня $10^{-13} \div 10^{-12}$ Кл/см². Нейтрализация электрических зарядов пробной массы ионами воздуха при атмосферном давлении, когда пробная масса более месяца висит без внешних воздействий, позволяла уменьшать поверхностную плотность заряда до $\sigma \approx 10^{-14}$ Кл/см².

3. В экспериментах использовался бесконтактный метод раскачки маятника, что позволяло возбуждать его колебания, не меняя величины находящегося на нем заряда.

Для изучения влияния электрического заряда пробной массы на механические потери, заряд маятника по возможности уменьшался, и измерялась механическая

добротность Q крутильной моды колебаний. Далее на маятник (в вакууме; при помощи манипулятора) наносился дополнительный заряд, и проводились измерения величины находящегося на пробной массе заряда и механической добротности маятника. Каждая серия измерений длилась около месяца, что позволяло обеспечить малую погрешность измерения добротности свободных колебаний маятника – менее 5% в каждой серии.

Величина поверхностной плотности электрического заряда на кварцевом цилиндре вблизи зонда изменялась приблизительно от 10^{-12} Кл/см² до 10^{-10} Кл/см². Эксперименты показали, что в пределах ошибки измерений добротность оставалась на том же уровне $Q \approx 8 \times 10^7$ и не зависела от величины нанесенного заряда (при обоих вариантах расположения пластины с электродами). Причем добротность маятника сохранялась все время после нанесения заряда, в том числе и во время его перераспределения по образцу. Можно утверждать, что дополнительное затухание Q^{-1} колебаний маятника, обусловленное взаимодействием находящегося на нем электрического заряда с макетом электростатического актюатора (кварцевая пластина с напыленными на нее золотыми электродами), не превышало 5×10^{-9} . Расстояние от маятника до актюатора составляло не менее 1 мм. Расчет средне-квадратичного значения величины флуктуационной силы в полосе частот $\Delta f = 100$ Гц дает $\sigma_F \approx 0,5 \cdot 10^{-7}$ дин. Эта величина существенно меньше, чем величина силы, которая может имитировать воздействие гравитационной волны в детекторе Advanced LIGO. Следовательно, дополнительное затухание, вносимое электрическим зарядом пробной массы, не должно ухудшать чувствительность гравитационно-волнового детектора Advanced LIGO.

На этой установке были проведено 12 длительных (более месяца) серий по измерению электрического заряда пробной массы. Обычно наблюдалось относительно медленное изменение амплитуды индуцированного на зонде напряжения, характеризующего плотность электрического заряда на маятнике (Рис. 2). Это изменение не являлось монотонным, в течение суток заряд мог увеличиваться и уменьшаться, но в среднем пробная масса отрицательно заряжалась со скоростью около 10^{-14} Кл/см² в месяц. Наблюдающееся в эксперименте изменение заряда пробной массы может быть объяснено

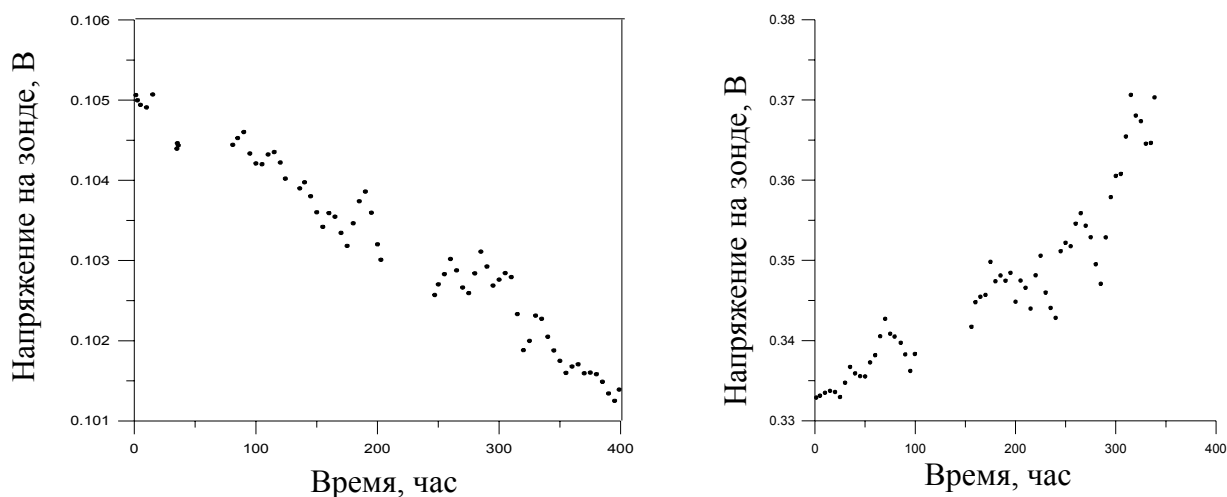


Рис. 2. Зависимость амплитуды индуцированного на зонде напряжения от времени на длительных временных интервалах. а) Пробная масса заряжена положительно. б) Пробная масса заряжена отрицательно.

прохождением высокоэнергетических частиц космических ливней сквозь рабочий объем вакуумной камеры [6].

В экспериментах наблюдались, хотя и крайне редко, относительно быстрые значительные изменения заряда пробной массы, которые могли происходить, если расстояние между актюатором и пробной массой составляло порядка 50 мкм. При зазоре 1 мм и более (как это планируется в детекторах LIGO), таких изменений заряда пробной массы не наблюдалось, поэтому влиянием этого эффекта в детекторах LIGO можно пренебречь.

Для исследования корреляций между значительными изменениями электрического заряда пробной массы и проходом через вакуумную камеру электронно-фотонных каскадов, вызванных космическими лучами, вокруг вакуумной камеры были размещены сцинтилляционные детекторы. Статистически значимой корреляции между изменениями электрического заряда Δq более $5 \cdot 10^{-14}$ Кл и каскадами с большим суммарным сигналом на сцинтилляционных детекторах не обнаружено. Эксперимент показал, что необходимо улучшить чувствительность к вариациям электрического заряда на временах измерения менее 1 с и использовать схему детектирования электронно-фотонных каскадов, вызванных космическими лучами, позволяющую регистрировать прохождение каскада непосредственно через кварцевую пробную массу.

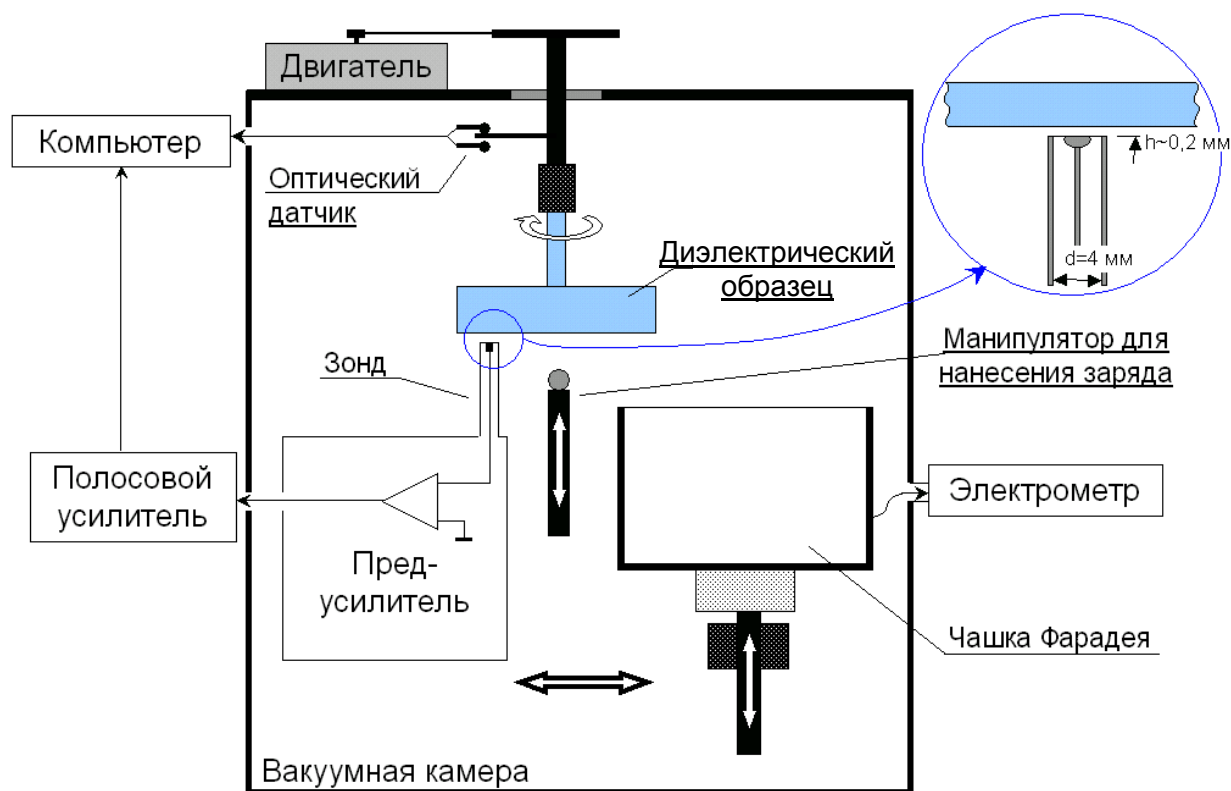


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения распределения электрических зарядов.

Для дальнейшего исследования электрических зарядов на пробных массах было необходимо достигнуть более высокого разрешения по заряду и измерять распределение электрических зарядов по поверхности диэлектрического образца.

В Главе 3 описывается созданная экспериментальная установка – электрометр, предназначенный для бесконтактного измерения поверхностного распределения зарядов методом неподвижного емкостного зонда, находящегося под вращающимся диэлектрическим образцом (Рис. 3). Исследуемый образец (использовались плавный кварц и сапфир) имел грибообразную форму и вращался вокруг собственной оси симметрии при помощи электродвигателя. На регулируемом расстоянии $h = 0,2 \div 0,5$ мм под образцом находился зонд. Чувствительная пластина зонда имела диаметр $d' \approx 2$ мм и находилась в заземленном охранном кольце. Период вращения образца составлял $T \approx 0,5$ с. Угол поворота образца φ измерялся при помощи теневого датчика.

Напряжение $U(t)$ на чувствительной пластине зонда было непосредственно связано с изменением плотности электрического заряда $\sigma(\varphi)$ на образце над зондом вдоль полосы сканирования. Постоянная составляющая напряжения на выходе предусилителя могла быть обусловлена различными причинами – такими как контактная разность потенциалов, дрейфы усилителя, наличие зарядов на неподвижных частях установки, отличить которые от заряда на образце не представлялось возможным. Поэтому исследовалась только переменная составляющая выходного напряжения, модулированная частотой вращения образца. Она несла информацию о неравномерности распределения зарядов по поверхности образца, т.е. о вариациях плотности электрического заряда вдоль сканируемой полосы.

Полный заряд образца измерялся при отодвинутом зонде с помощью цилиндра Фарадея. Измерительная система была разработана так, чтобы измерения полного электрического заряда, находящегося на образце, могли чередоваться с измерениями вариаций распределения этого заряда.

Дополнительный заряд наносился на полосу сканирования на образце методом контактной электризации при помощи специального манипулятора. Все устройство находилось внутри металлического заземленного экрана.

Обработка сигнала с зонда и датчика координаты производилась на компьютере с использованием системы LabView. Схема обработки позволяла измерять распределение зарядов по образцу, усредненное за время θ . Рассмотрены источники погрешности измерения распределения заряда, такие как шумы дискретизации и квантования, а также неравномерность вращения образца. Неравномерность вращения приводила к ошибке $\Delta\varphi$ определения угла поворота образца, и, как следствие, ошибке в расчете напряжения в заданной точке образца, что ограничивало точность измерений.

Исследование зависимости коэффициента преобразования электрометра от величины зазора между зондом и образцом позволило выбрать оптимальный зазор $h = 250 \div 400$ мкм и получить оценку величин емкостей C_p (емкость между областью образца, индуцирующей заряд, и зондом) и C_g (между той же областью образца и заземленным окружением).

Пиковое напряжение U_m на зонде связано с величиной заряда q , индуцирующего напряжение: $q = U_m C_m / K$, где $C_m \approx 5$ пФ – эквивалентная входная емкость предусилителя, K – коэффициент, зависящий от параметров зонда и входной цепи предусилителя, а также частоты вращения образца. Точность расчета величины K невелика из-за погрешностей при оценке величины емкостей C_g и C_p , необходимых при расчете. Поэтому, кроме проведения теоретических оценок, было необходимо провести калибровку электрометра. Для этого на полосу сканирования на образце наносился методом контактной электризации локальный электрический заряд. Измерения величины пикового напряжения на зонде, индуцированного этим зарядом, чередовались с измерением заряда при помощи цилиндра Фарадея. Такая калибровка была возможна благодаря тому, что время релаксации распределения зарядов τ было много больше, чем время измерений каждым из методов. Измеренное значение коэффициента K составило $0,48 \pm 0,09$.

Расчет электрических шумов показывает близость экспериментальной и теоретической величин. Измеренное среднеквадратичное отклонение напряжения на зонде (при времени усреднения $\theta = 10$ с) составило $\sigma_{U,\theta} \approx 3,4 \cdot 10^{-6}$ В. При измерении плотности заряда на образце нас интересовала не столько величина плотности заряда в данной точке, сколько ее вариация $\Delta\sigma$, поэтому для оценки шумов использовалось среднеквадратичное отклонение $\sigma_{x,\theta}$ вариаций напряжения $x = U(t+\theta) - U(t)$ (аналогично дисперсии Аллана [9]). На Рис. 4 приведена зависимость $\sigma_{x,\theta}$ от времени усреднения θ , измеренная на воздухе, когда зонд был экранирован от образца металлическим экраном. Напряжение при этом определялось шумами электрометра, и эта кривая характеризует предельную чувствительность установки. Из графика видно, что $\sigma_{x,\theta}(\theta) \sim \theta^{1/2}$, что совпадает с теоретической зависимостью. При времени

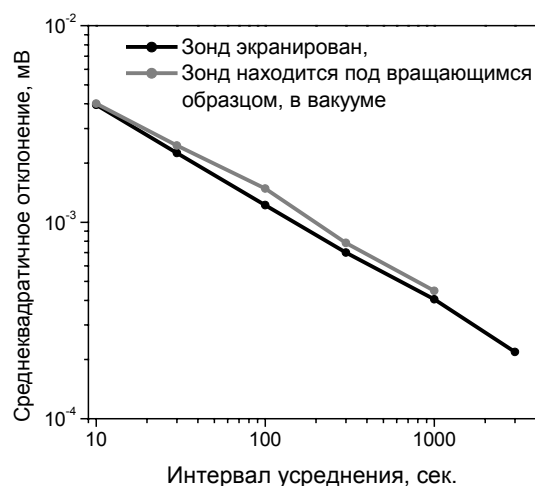


Рис. 4. Зависимость $\sigma_{x,\theta}$, приведенного к напряжению на зонде, от времени усреднения θ .

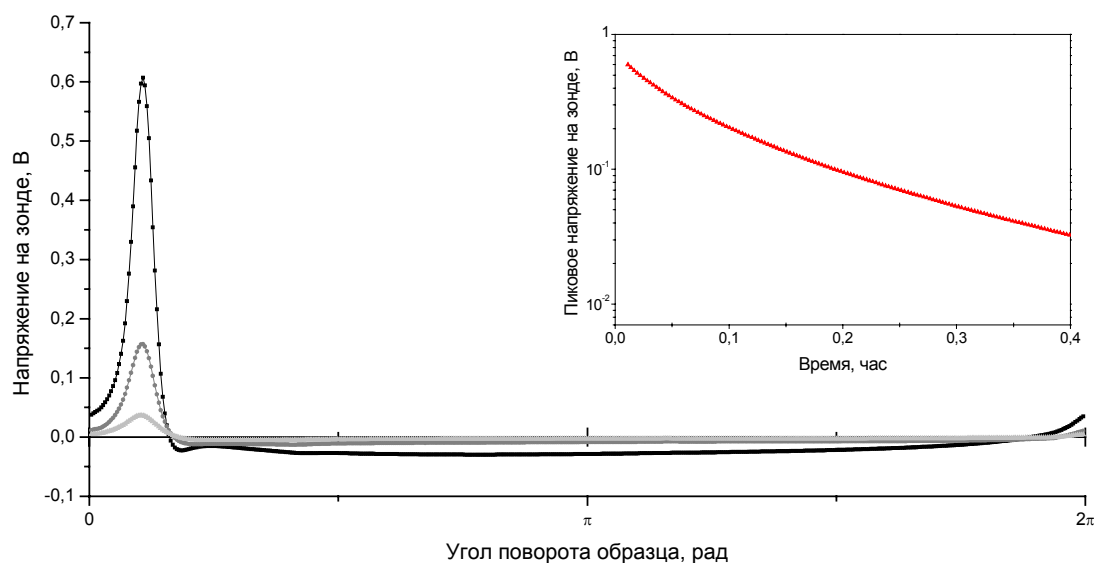


Рис. 5. Типичная зависимость индуцированного на зонде напряжения от угла поворота образца и ее изменение со временем. На вставке – зависимость высоты пика от времени.

усреднения $\theta = 10$ с среднеквадратичное отклонение вариации напряжения на зонде соответствовало изменению плотности заряда $\delta\sigma \approx 5 \cdot 10^{-16}$ Кл/см².

Было проведено исследование различных факторов, влияющих на релаксацию распределения электрических зарядов на образце. Сначала электрический заряд по возможности снимался с образца. Потом на небольшую область образца при помощи контактной электризации (точечным касанием) локально наносился электрический заряд. Тем самым на образце формировалось гладкое распределение заряда с единственным пиком, соответствующим области нанесения заряда (Рис. 5). Зависимость высоты этого пика от времени (См. вставку на Рис. 5) несла информацию о перераспределении нанесенного заряда, и ее измерение позволяло оценить электрическое сопротивление кварца и изучать его зависимость от предварительной подготовки образца и условий эксперимента.

В Главе 4 приводятся результаты исследований пространственных и временных вариаций распределения электрического заряда на диэлектрических образцах и влияющих на них факторов. Часть измерений, относящаяся к изучению факторов, влияющих на эволюцию распределения электрических зарядов на диэлектрическом образце, проводилась на воздухе, так как характерное время

релаксации τ распределения зарядов на образце на воздухе существенно меньше, чем в вакууме. Это позволяло проводить эксперименты за приемлемое время. Было обнаружено, что на распределение зарядов и его эволюцию на диэлектрических образцах влияют следующие факторы:

1. Метод подготовки образца. Объемная проводимость диэлектриков зависит от содержащихся примесей, от того, находятся ли электроны в глубоких энергетических ловушках или относительно мелких; на нее может влиять наличие электронов, инжектированных в образец из контакта металл-диэлектрик; температура образца и другие факторы. Поверхностная проводимость существенно зависит от состояния поверхности образца: дефекты поверхности могут создавать глубокие энергетические ловушки, находящиеся на поверхности вода, углеводороды и продукты химических реакций, оставшиеся после очистки образца существенно меняют электрическую проводимость поверхности. Многие из этих факторов плохо поддаются контролю, а расчет их влияния затруднен. При экспериментах на воздухе, время релаксации заряда, нанесенного на образец плавленого кварца, зависело в первую очередь от воды, адсорбированной на его поверхности, и составляло от минут до нескольких часов. На время релаксации нанесенного заряда в вакууме существенно влиял способ очистки образца. В экспериментах использовалась очистка ацетоном в ультразвуковой ванне с последующей промывкой образца метанолом, после чего образец прогревался при температуре 300°C в течение 3-х часов.

2. Элементы установки, находящиеся вблизи исследуемого образца, влияют на распределение на нем электрических зарядов из-за электрических сил изображения. Так, время релаксации пика распределения заряда, посаженного методом контактной электризации, увеличивалось в десятки раз, когда вблизи него постоянно находился какой-либо металлический элемент установки – например, электрометрический зонд. Кроме того, из-за сил изображения, распределенные по образцу заряды притягивались к неподвижным заземленным элементам установки, создавая вблизи них пики распределения заряда. Вращение образца в режиме сканирующего зонда существенно снижало влияние сил изображения.

3. Еще одним фактором, влияющим на распределение зарядов по образцу, являлись электрические поля внутри экранированного объема рабочей камеры,

возникающие из-за контактной разности потенциалов (КРП) между различными металлическими поверхностями или сидящего на диэлектрических частях установки электрического заряда. Свободные заряды в диэлектрическом образце перераспределялись таким образом, чтобы скомпенсировать электрическое поле внутри него. Для уменьшения влияния этих электрических полей использовалось длительное (несколько времен релаксации τ) вращение образца.

Отметим, что существуют факторы, влияющие не на проводимость образца в целом, а на какую-то его часть. Так, локальное влияние могут иметь механические дефекты образца, следы от касаний или химических реакций. Из-за этого времена релаксации для зарядов, нанесенных на разные точки образца, могут отличаться.

Для исследования эволюции распределения зарядов на кварце в условиях вакуума образец чистился, прогревался при $T \approx 300$ С, после чего помещался в вакуумную камеру, и она откачивалась. При наличии на образце локализованного заряда достаточно большой величины, наблюдалось его скачкообразное уменьшение при откачке либо впуске воздуха в вакуумную камеру, что может объясняться электрическим пробоем при низком давлении. Кроме того, наблюдались и более медленные изменения распределения зарядов. Предположительно, они могли быть связаны с происходящей при откачке вакуумной камеры десорбцией заряженных молекул с поверхности образца. Отметим, что медленные изменения распределения электрических зарядов происходили в течение длительного времени после откачки.

Было проведено несколько 8-часовых серий измерений вариаций распределения электрических зарядов на образце плавленого кварца в вакууме. Перед этими экспериментами заряд по возможности снимался с образца, и никакого распределения не наносилось. Полученные данные (см. Рис. 4) позволяют утверждать, что стандартное отклонение вариаций напряжения на зонде $\sigma_{x,\theta}$ определялось шумами усилителя. Соответствующая этим шумам спектральная плотность флуктуаций заряда составляла $\sqrt{S_{\Delta\sigma}} \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ Кл/см² $\sqrt{Гц}$, а вариаций заряда, превышающих эту величину, на временах $\theta = 10 \div 1000$ с не обнаружено.

Эксперименты по изучению релаксации электрических зарядов, нанесенных на образец методом контактной электризации в вакууме, проводились с несколькими образцами плавленого кварца и различными методами их очистки.

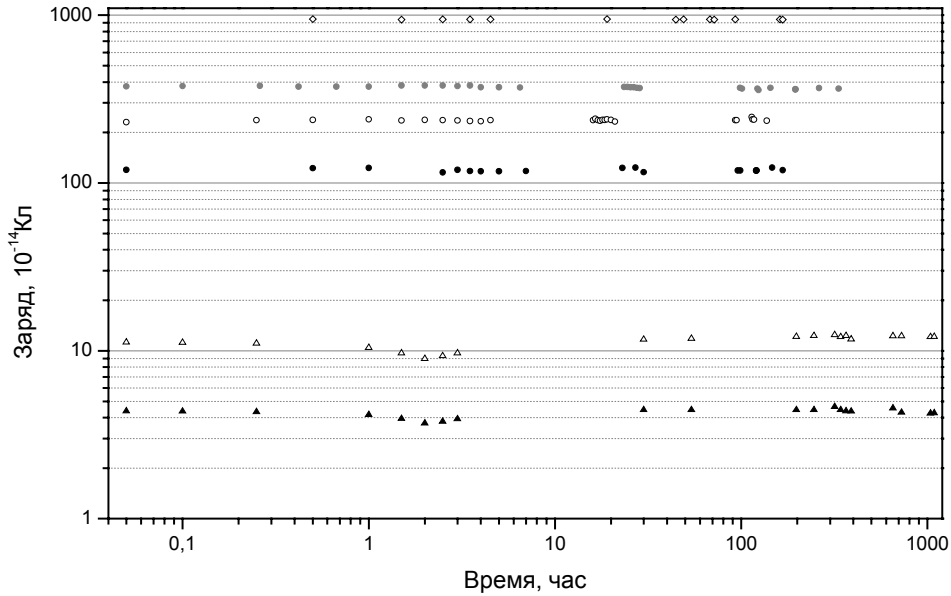


Рис. 7. Релаксация зарядов различной величины, нанесенных методом контактной электризации на образец плавленого кварца, находящийся в вакууме.

Перед нанесением заряда на образец проводилась продолжительная откачка камеры. Релаксационные кривые, полученные для зарядов обоих знаков, представлены на Рис. 7 (на оси ординат отложен модуль величины посаженного заряда). Оценка времени релаксации τ заряда, нанесенного на образец плавленого кварца, дает не менее 8000 часов для кварца марки «КВ» и более трех лет для кварца марки «Suprasil 312» (с предельно малым содержанием примесей). Исходя из этих времен релаксации, получаем оценку для удельного сопротивления кварца марки «КВ» $\rho > \tau/\epsilon\epsilon_0 \approx 10^{18}$ Ом·м, а для кварца марки «Suprasil 312» $\rho > 3 \cdot 10^{18}$ Ом·м. Расчет флуктуационных сил, создаваемых из-за релаксации находящегося на пробной массе заряда (согласно модели, описанной в [10]), показывает, что релаксация электрических зарядов, находящихся на пробных массах из плавленого кварца, не будет ограничивать чувствительность детекторов LIGO.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика, позволяющая проводить долговременные измерения электрического заряда, находящегося на макете пробной массы (на теле высокочастотного маятника, изготовленного из плавленого кварца) в вакууме при давлении $\leq 3 \cdot 10^{-8}$ Торр. Обнаружено, что в среднем пробная масса отрицательно

заряжается со скоростью около $\Delta\sigma \approx 10^{-14}$ Кл/см² в месяц. Это может быть объяснено прохождением сквозь пробную массу электронно-фотонных каскадов, вызванных космическими лучами (Braginsky V.B., Ryazhskaya O.G., Vyatchanin S.P., Phys. Lett. A, 2006, **350**, 1).

2. Проведено исследование диссипации в маятниковой моде колебаний, обусловленной взаимодействием электрических зарядов, находящихся на пробной массе, с окружением (ближайший элемент окружения – кварцевая пластина с напыленными на нее золотыми электродами). Величина дополнительных потерь не превышала $\delta Q^{-1} < 5 \cdot 10^{-9}$ при увеличении заряда на пробной массе до $q \approx 5 \cdot 10^{-9}$ Кл. Этот результат означает, что для гравитационно-волновых детекторов LIGO тепловой шум, обусловленный избыточной диссипацией из-за наличия электрических зарядов на кварцевых пробных массах, может быть сделан меньше шума, связанного с потерями энергии в подвесе пробных масс. Для этого необходимо использовать окружение пробных масс, изготовленное из материалов с малыми электрическими потерями – кварц, золото.

3. Разработана методика измерений и создана экспериментальная установка, позволяющая производить бесконтактное измерение вариаций распределения электрических зарядов на диэлектрических образцах с разрешением: пространственным ~ 4 мм, временным ~ 10 с. Достигнута чувствительность при измерениях вариаций плотности заряда $\sqrt{S_{\Delta\sigma}} \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ Кл/см² $\sqrt{Гц}$.

4. Выявлены основные факторы, влияющие на распределение зарядов по образцу плавленого кварца на воздухе и его эволюцию. К ним относятся: метод предварительной подготовки образца, количество воды, адсорбированной на поверхности, влияние металлических элементов окружения образца за счет действия сил изображения, и электрические поля (возникающие внутри экранированного объема из-за разной работы выхода у металлических элементов, окружающих образец). Установлено, что постоянно находящийся вблизи электрически заряженной области образца неподвижный зонд может в несколько раз увеличить время релаксации этого заряда. Режим сканирующего зонда позволяет существенно ослабить этот эффект.

5. Прямыми измерениями было установлено, что время релаксации электрических зарядов, локально нанесенных методом контактной электризации на образцы кварца и сапфира, находящиеся на воздухе, составляло от минут до

десятков часов в зависимости от метода подготовки образца. После длительного выдерживания образца на воздухе время релаксации обычно составляло $0,5 \div 3$ часа как в случае кварцевого, так и сапфирового образцов. Предполагается, что релаксация обусловлена протонной проводимостью воды, адсорбированной на поверхности образца.

6. Время релаксации заряда, нанесенного в вакууме на образец плавленого кварца, составило более 3-х лет. Эта величина получена для локально нанесенных методом контактной электризации зарядов обоих знаков, при величине электрического заряда $q \approx 10^{-13} \div 10^{-11}$ Кл. Расчет флуктуационных сил, создаваемых из-за релаксации находящегося на пробной массе заряда (R. Weiss [10]), показывает, что релаксация электрических зарядов, находящихся на пробных массах из плавленого кварца, не будет ограничивать чувствительность детекторов LIGO

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Mitrofanov V.P., Prokhorov L.G., Tokmakov K.V., Variation of electric charge on prototype of fused silica test mass of gravitational antenna // Phys. Lett. A, 2002, 300, 370-374.
2. Mitrofanov V., Prokhorov L., Tokmakov K., and Willems P., Investigations of effects associated with variation of electric charge on a fused silica test mass // Class. Quantum Grav., 2004, 21, S1083-1089.
3. Митрофанов В.П., Прохоров Л.Г., Исследование распределения электрических зарядов на диэлектриках // Материалы VI международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» – Воронеж, 2005, 69-71.
4. Митрофанов В.П., Прохоров Л.Г., Токмаков К.В., Влияние электрических зарядов на диссипацию в механических осцилляторах из плавленого кварца // Материалы VI международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» – Воронеж, 2005, 74-76.
5. Прохоров Л.Г., Распределение электрических зарядов на пробных массах из плавленого кварца // Материалы международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2005», секция «физика» – Москва, 2005, 20-21.

6. Прохоров Л.Г., Митрофанов В.П., Измерение вариаций распределения электрических зарядов на диэлектриках // Вестн. Моск. Унив., сер. 3, 2006, № 3, 75-77.
7. Митрофанов В.П., Прохоров Л.Г., Токмаков К.В., Влияние электрических зарядов на затухание колебаний высокодобротных маятников из плавленого кварца // Известия РАН, Физ., 2006, 70, №8, 1097-1099.
8. Prokhorov L.G., Khramchenkov P.E., Mitrofanov V.P., Measurement of relaxation of electrical charge distribution on fused silica sample // Phys. Lett. A, 2007, 366, Iss.1-2, 145-149.
9. Митрофанов В.П., Прохоров Л.Г., Эволюция распределения электрических зарядов на поверхности плавленого кварца // Материалы VII международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» – Воронеж, 2007, 3-7.

Цитируемая литература

1. Thorn K.S., Gravitational radiation // 300 years of gravitation. eds. S.W. Hawking and W. Israel – Cambridge univ. press, Cambridge, 1987, p. 330-458.
2. Abramovichi A., et al. (LIGO Scientific collaboration), LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory // Science, 1992, **256**, p.325-333.
3. <http://www.ligo.caltech.edu>
4. Abbot B., et al. (LIGO Scientific collaboration), Search for gravitational waves from galactic and extra-galactic binary neutron stars. // Phys. Rev. D, 2005, **72**, 082001.
5. Rowan S. et al., Investigations into the effects of electrostatic charge on the Q factor of a prototype fused silica suspension for use in gravitational wave detectors. // Class. Quantum. Grav., 1997, **14**, p. 1537-1541.
6. Braginsky V.B., Ryazhskaya O.G., Vyatchanin S.P., Notes about noise in gravitational wave antennas created by cosmic rays // Phys. Lett. A, 2006, **350**, p. 1-4.
7. Sumner T., et al., Description of charging/discharging processes of the LISA sensors // Class. Quantum Grav., 2004, **21**, № 5, S597-S602.
8. Buchman S., et al., Charge measurement and control for the Gravity Probe B gyroscopes // Rev. Sci. Instr., 1995, **66**, p. 120.
9. Allan D.W., Statistics of Atomic Frequency Standard // Proc. IEEE, 1996, **54**, №2, p. 221-231.
10. R. Weiss. LIGO document T960137-00-E. 1996. <http://admdbsrv.ligo.caltech.edu/dcc/>.