

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра молекулярной физики и физических измерений

На правах рукописи

Городецкий Михаил Леонидович

**Высокочастотные резонаторы в прецизионных
измерениях**

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2001

Работа выполнена на кафедре молекулярной физики и физических измерений физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова.

Официальные оппоненты: Член-корреспондент РАН,
доктор физ.-мат. наук В. И. Пустовойт,
доктор физико-математических наук
А. В. Виноградов,
доктор физико-математических наук
профессор В. В. Михайлин,

Ведущая организация - Институт спектроскопии РАН

Защита состоится 21 июня 2001г. в 16 час. на заседании диссертационного совета Д 053.05.39 при Московском Государственном Университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119899, г.Москва, Воробьевы горы, Физический факультет МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан 14 мая 2001г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.501.001.66

профессор

В.А. Карavaев

1 Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Неотъемлемым элементом почти любой оптической или СВЧ экспериментальной установки является резонатор. Именно прогресс в их совершенствовании часто приводил к достижению качественно новых результатов. Так, создание квантовых генераторов было бы невозможно без применения высокодобротных оптических и СВЧ резонаторов. Высокодобротные резонаторы активно используются для сужения и стабилизации линии генерации, в качестве фильтров и дискриминаторов, в прецизионных физических экспериментах.

Одним из ключевых направлений физики сегодня является развитие квантовой теории измерений и связанный с ним интерес к экспериментам с отдельными квантовыми объектами. Именно с помощью высокодобротных резонаторов в оптическом диапазоне были впервые продемонстрированы неклассические состояния электромагнитного поля (см. например обзоры в [1, 2]) и были впервые проведены впечатляющие эксперименты по наблюдению эффектов взаимодействия отдельных фотонов и отдельных атомов [3]. Тесно связаны с этим направлением и такие, вызывающие активное внимание и ожидания приложения, как квантовые компьютеры [4], квантовая криптография [5], квантовая телепортация [6]. В последние годы с разработкой технологии получения ридберговских атомов впечатляющие результаты были получены с помощью резонаторов и в СВЧ диапазоне. Особенно следует отметить квантово-неразрушающие измерения [7] и приготовление состояний с малым числом квантов [8].

Необходимость повышения добротности резонаторов в квантовых экспериментах однозначно вытекает из простого критерия, определяющего возможность наблюдения неклассических квантовых свойств электромагнитного поля в резонаторе, который следует из условия малости термодинамических флуктуаций за время измерения по сравнению со стандартным квантовым пределом [9]:

$$\frac{2kT\tau}{\hbar Q} \leq 1,$$

где \hbar и k – константы Планка и Больцмана, T – температура, Q – добротность, τ – время измерения. К настоящему времени неизвестны фундаментальные ограничения для величины Q , и достигнутые значения определя-

ются, как правило, уровнем развития технологии. В то же время, кроме технических ограничений, добротность обычных электромагнитных резонаторов связана прямой пропорциональностью с их линейными размерами (геометрический фактор в СВЧ и длина в оптическом диапазоне). Это вступает в противоречие как с потребностями экспериментальной техники – необходимостью работать с малым числом квантов и малым объемом локализации поля, так и с потребностями в миниатюризации компонент, диктуемыми развитием волоконной и интегральной оптики.

Сформулированное условие является лишь необходимым для реализации неклассических сжатых состояний электромагнитного поля, которые должны позволить в перспективе качественно улучшить чувствительность прецизионных измерений. Для их реального использования требуется разработка непоглощающих энергию методов внутререзонаторных измерений.

Цели работы. В диссертации представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований высокодобротных резонаторов оптического и СВЧ диапазонов целью которых было решение следующих важных, по мнению автора, проблем:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование нового класса оптических устройств – оптических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи (микросфер). Эти резонаторы, сочетающие малый размер с высокой добротностью, уже превратились из объекта узкоспециальных исследований в перспективный элемент фотоники.

2. Разработка менее дорогостоящих и трудоемких, по сравнению с техникой ридберговских атомов, инструментальных методов квантовых измерений в СВЧ диапазоне. Анализ экспериментальной возможности реализации стробоскопической процедуры квантово-невозмущающего измерения.

3. Проекты будущих модернизаций, вступающих в эксплуатацию, лазерных гравитационных антенн имеют заявленную чувствительность на уровне и даже выше чем стандартный квантовый предел. Однако, никаких практических разработок в этом направлении пока не существует. Цель заключительной части работы состоит в том, чтобы проанализировать возможности практической реализации топологий антенны, позволяющих обойти стандартный квантовый предел и (или) снизить принципиальные требования к мощности накачки. Особенно важен анализ всех неучтенных

ранее источников шумов, могущих воспрепятствовать в будущем достижению заявленной чувствительности.

Научная новизна. В настоящей работе впервые:

1. В микрорезонаторах нового типа – микросферах из плавленого кварца достигнута добротность $Q \simeq 10^{10}$ на длине волны 0.63 мкм, соответствующая фундаментальным потерям в материале.

2. Разработана теория связи с модами типа шепчущей галереи в микросферах и новый прецессионный подход к описанию этих мод.

3. Исследовано влияние внутреннего рассеяния на добротность и спектр мод микрорезонаторов.

4. На основе теоретического исследования новых схем квантово-невозможных измерений в СВЧ и оптическом, введен новый вид квантовых состояний и, соответствующая им новая наблюдаемая, которая позволяют измерять разность фаз двух квантовых осцилляторов с точностью порядка $1/N$.

5. Обнаружен новый класс фундаментальных шумов в твердом теле, связанный с ангармонизмом решетки и термодинамическими флуктуациями температуры.

Научная и практическая ценность работы. Разработанные в диссертации методы исследования и полученные с их помощью результаты могут быть непосредственно использованы и уже используются в прецизионных оптических экспериментах, для стабилизации и сужения линии генерации полупроводниковых лазеров, получения высокочувствительных сенсоров и детекторов.

На защиту выносятся следующие результаты и положения

1. Предложена и разработана методика изготовления высокодобротных оптических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи. С помощью этой методики получено рекордное значение добротности ($Q \simeq 10^{10}$), обусловленное в основном фундаментальными потерями в материале резонатора. Показано, что доминирующим фактором, препятствующим получению и сохранению высокой добротности является адсорбция атмосферной воды поверхностью резонатора.

2. Развита теория мод оптических резонаторов. Разработан принципиально новый подход к описанию мод типа шепчущей галереи в неидеальных

сфероидах, основанный на идее фазовой прецессии фундаментальных мод. Разработан метод идентификации мод по их пространственному спектру переизлучения в призмный элемент связи.

3. Разработана теория, описывающая взаимодействие микрорезонаторов с различными типами элементов связи (волоконными, призмными и планарными), предсказания которой находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными, которая позволяет рассчитывать свойства новых проектируемых эффективных элементов связи.

4. Показано, что рэлеевское рассеяние в микрорезонаторах заметно подавляется вследствие дискретности спектра мод, и наряду с ограничением добротности приводит к появлению дублетов из-за образования связи между встречными циркулярными модами. Этот эффект резонансного обратного рассеяния может найти применение для стабилизации и сужения линии генерации полупроводниковых лазеров.

5. Предложена и проанализирована новая схема квантово-невозмущающего измерения квадратурной компоненты поля в высокодобротном СВЧ резонаторе с использованием модулированных монокинетических электронных пучков.

6. Предложен новый метод бесконтактного невозмущающего измерения малых тепловых и избыточных механических флуктуаций прозрачных объектов, который может найти применения для исследования подвесов гравитационных антенн и в других прецизионных экспериментах.

7. Предложены две перспективные схемы внутрирезонаторных измерений для строящейся лазерной интерферометрической гравитационной антенны (международный проект LIGO). Чувствительность в этих схемах измерений не ограничена стандартным квантовым пределом. Показано, что электромагнитная жесткость, созданная оптической накачкой, позволяет превратить лазерный интерферометр в аналог твердотельной антенны, но с длиной в несколько километров. Введен новый вид квантовых состояний и соответствующая новая наблюдаемая, которые позволяют измерять разность фаз двух квантовых осцилляторов с точностью порядка $1/N$.

8. Проанализировано несколько ранее неисследованных типов фундаментальных шумов, ограничивающих предельную чувствительность лазерной гравитационной антенны, вызванных термодинамическими флук-

туациями температуры и дробовым фотонным шумом. Показано, что эти эффекты в некотором частотном интервале могут играть доминирующую роль, и, следовательно, проекты повышения чувствительности лазерных гравитационных антенн должны быть частично пересмотрены. Предложены методы, позволяющие ослабить влияние этих эффектов.

Апробация работы. Отдельные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры молекулярной физики и физических измерений физического факультета, ГАИШ, на Ломоносовских чтениях в МГУ, на общемосковском теоретическом семинаре Физического Института РАН, семинарах лаборатории квантовой оптики Дж.Кимбла, группы теории гравитации К.С.Торна и лаборатории реактивного движения (JPL) Калифорнийского Технологического Института США, международных конференциях Laser Optics и Photonics West.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 21 научной публикации, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения в котором сформулированы защищаемые положения, списка публикаций автора, вошедших в диссертацию, и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 210 страниц текста.

2 Содержание работы

Введение. Содержит объяснение актуальности рассматриваемой темы диссертации. В нем формулируются цели диссертационной работы и дается краткая аннотация последующих глав.

Глава 1. Сферические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи. Глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию свойств нового типа оптических резонаторов - оптических микрорезонаторов (микросфер) с модами типа шепчущей галереи [10]. В разделе 1.1 в форме краткого обзора дано описание теории мод электромагнитных колебаний в диэлектрическом шаре и отмечены особенности мод типа шепчущей галереи (параграф 1.1.1). В параграфе 1.1.2 изложена теория собственных частот и излучательных потерь в сферическом резонаторе

и приведены методы их приближенного и численного расчета. В параграфе 1.1.3 приведены точные выражения распределения поля в модах диэлектрического шара и приближения, справедливые для мод тира шепчущей галереи, которые используются в дальнейшем в теоретическом анализе их свойств.

Раздел 1.2 посвящен экспериментальному исследованию микросфер. Большинство приложений и особенно планируемые одноквантовые эксперименты [11, 12] с использованием микросфер требуют реализации максимально возможных добротностей в них. Начиная с первой демонстрации мод в кварцевых микросферах в 1987 г. [13], достигнутая добротность была улучшена с 1×10^6 до $(2 \div 3) \times 10^9$ [14, 12]. Это значение, однако по крайней мере в три раза меньше чем предел, определяемый внутренними потерями в материале. Действительно, на длине волны He-Ne лазера суммарные потери составляют около 7дБ/км из них 5дБ/км – рэлеевское рассеяние на замороженных при стекловании термодинамических флуктуациях плотности и 2дБ/км – край УФ поглощения [15]. Таким образом, фундаментальное ограничение добротности на этой длине волны составляет 9×10^9 .

Также ранее сообщалось, что в обычных лабораторных условиях предельная добротность деградирует примерно в течении часа, уменьшаясь в несколько раз, предположительно вследствие осаждения на поверхность резонатора микропыли или водяных паров. Поэтому до недавнего времени оставалось неясным – возможно ли в принципе экспериментально получить добротность, ограниченную лишь фундаментальными потерями в материале.

В параграфе 1.2.1 описана технология изготовления микросфер диаметром 50-500 мкм из нитей высокочистого плавленного кварца отечественного производства типа КУВИ и типа KS-4V (США) в пламени кислородно-водородной микрогорелки, позволившая достичь предельно возможных значений добротности на длине волны 0.63 мкм. Описана технология подготовки и очистки заготовок.

В параграфе 1.2.2 приводятся результаты экспериментов, направленных на достижение предельной добротности в микрорезонаторах. Измерения добротности проводилось двумя методами. В экспериментах использовался He-Ne лазер с частотой, перестраиваемой в пределах доплеровской

линии усиления газовой He-Ne смеси пьезотрансляцией одного из зеркал. Возбуждение микрорезонаторов осуществлялось с помощью призмного элемента связи. Для нахождения собственной добротности микросфер использовалось асимптотическое стремление нагруженной добротности к собственной при уменьшении коэффициента связи при удалении резонатора от поверхности возбуждающей призмы на расстояние порядка $\lambda/2\pi$.

Динамический метод измерения, который предусматривает непосредственное наблюдение резонансной кривой “на отбор” на экране осциллографа при линейном частотном свипировании измерительного лазера не позволяет измерять добротности выше 10^9 , однако является удобным для предварительной настройки и поиска мод. Для измерения значений добротности $> 10^9$ использовался другой метод – измерение времени затухания света в минирезонаторе. Для этого излучение перестраиваемого лазера, настроенного на одну из мод резонатора, резко (за время порядка нескольких десятков наносекунд) выключалось с помощью акустооптического затвора в момент возбуждения одной из мод резонатора. Затухающее излучение из резонатора регистрировалось с помощью ФЭУ и сигнал подавался на осциллограф, развертка которого запускалась одновременно с прерыванием лазерного луча. Быстродействие модулятора и фотодетектора позволяли измерять с 10% погрешностью $Q \geq 3 \times 10^8$. Максимальная добротность была измерена в микросфере диаметром 750 мкм, примерно через 1 минуту после изготовления (время юстировки). Найденное значение времени релаксации энергии – $\tau = 2.7 \pm 0.1 \mu\text{s}$, с учетом инструментальных ошибок приводит к оценке $Q = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{10}$. Эта величина Q вплотную приближается к максимальному пределу, определяемому фундаментальными потерями в материале, и она была воспроизведена с разбросом, не превышающим 20%, по крайней мере в трех резонаторах от 600 мкм до 900 мкм, изготовленных за 50-60с. до начала измерения.

В параграфе 1.2.3 приведены результаты исследования динамики деградации рекордной добротности в лабораторной атмосфере. Точка $t = 0$ соответствует изготовлению резонатора (его извлечению из пламени после формирования под действием сил поверхностного натяжения). Добротность быстро спадает за первые пять минут до величины $\sim 1/5$ от рекордной и плавно снижается до величины насыщения $Q \sim 10^9$ за несколько часов.

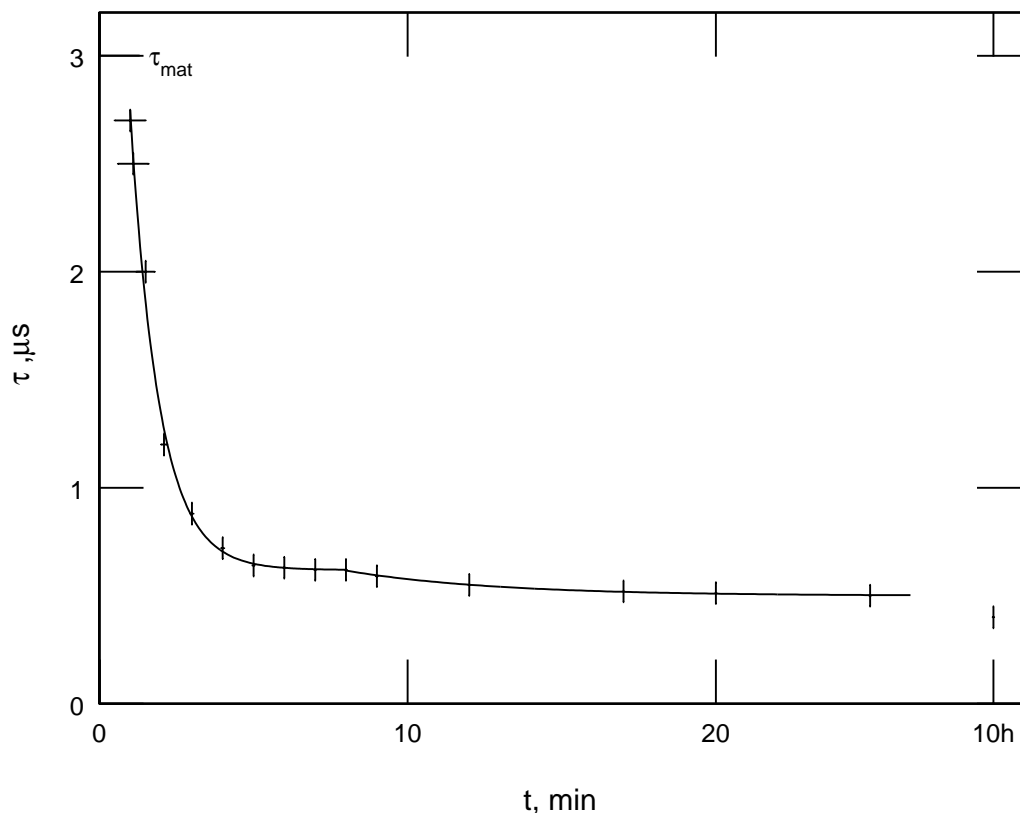


Рис. 1: Уменьшение времени релаксации оптических мод ШГ вследствие адсорбции атмосферной воды на поверхности резонатора.

Тридцатисекундный отжиг при 400С вызывает частичное восстановление добротности, что подтверждает гипотезу об изменении добротности вследствие адсорбции атмосферной воды.

Для получения дополнительной информации о процессах, происходящих на поверхности микросферы были проведены измерения временной зависимости частоты термостабилизированного микрорезонатора. Оказалось, что на том же временном масштабе, что и ухудшение добротности моды, происходит плавное уменьшение ее частоты, что можно интерпретировать как увеличение эффективного радиуса микросферы. Чувствительность метода, около 0.01 монослоя (Рис.2).

Логарифмический ход и масштаб кривой согласуется с моделью двухступенчатой адсорбции гидроксильных групп. Полученные результаты подтверждают гипотезу об определяющей роли адсорбции атмосферной воды в деградации добротности микросфер.

В разделе 1.3 развит прецессионный подход к описанию мод в микросфе-

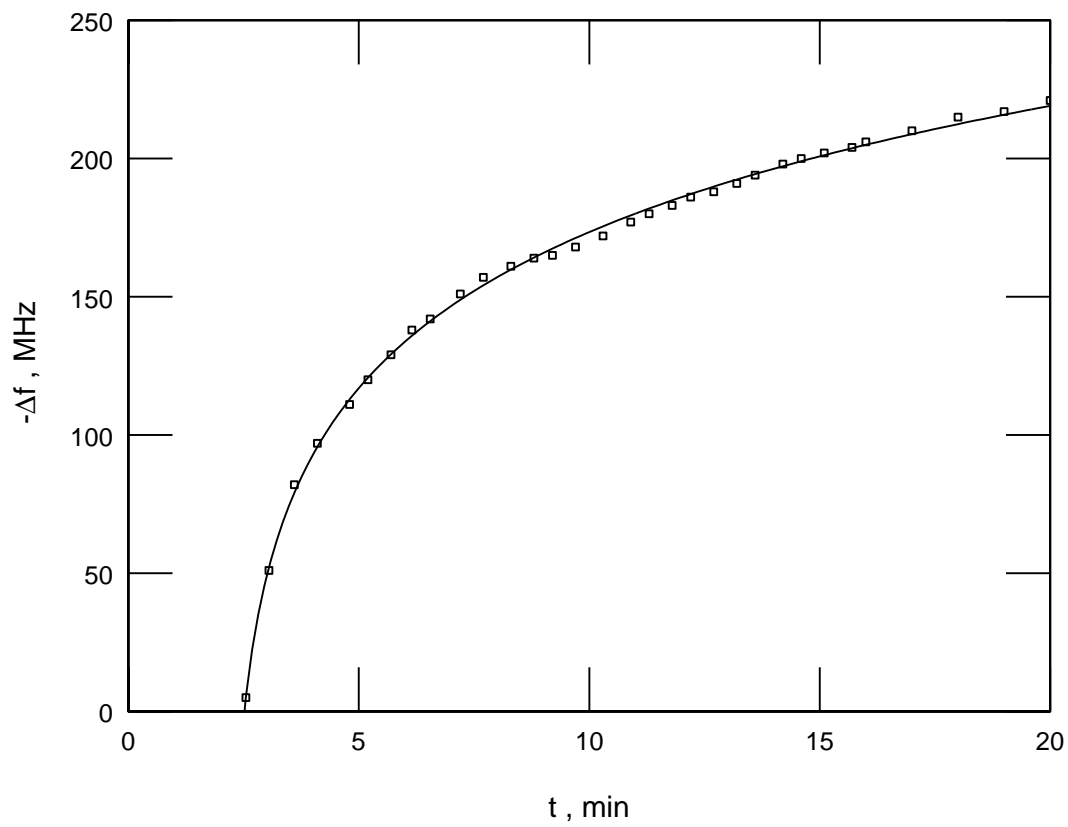


Рис. 2: Сдвиг резонансной частоты микросферы вследствие адсорбции атмосферной воды на его поверхности.

рах, позволивший просто объяснить многие экспериментально наблюдаемые эффекты в микросферах. У мод типа шепчущей галереи $TE(TM)_{\ell m q}$ ($\ell \sim m$, $q \ll \ell$) электромагнитное поле сосредоточено в кольцевой “экваториальной” области вблизи поверхности резонатора. При этом максимальная концентрация поля достигается для мод типа $TE(TM)_{\ell \ell 1}$, ($\ell = m$, $q = 1$), которые имеют один узкий максимум ($\Delta\theta \sim 1/\sqrt{\ell}$) в “меридианальном” и радиальном ($\Delta r/r \sim \ell^{-2/3}$). Такие моды, названные в работе фундаментальными, можно интерпретировать как циркулирующие волны, испытывающие многократное полное внутреннее отражение от внутренней поверхности сферы (параграф 1.3.1). Расширение этой интерпретации на моды с $\ell \neq m$ вызывает определенные затруднения. В параграфе 1.3.2 теоретически показано, что в вырожденном случае идеальной сферы такие моды могут быть разложены по фундаментальным модам, наклоненным к экватору под углом $\cos \beta = m/\ell$.

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = \frac{\sqrt{(\ell+m)!(\ell-m)!}}{2\pi\sqrt{(2\ell)!} \sin^{\ell-m}(\beta/2) \cos^{\ell+m}(\beta/2)} \int_0^{2\pi} e^{im\alpha} Y_{\ell\ell}(\vartheta(\alpha, \beta), \varphi(\alpha, \beta)) d\alpha$$

Такое преобразование можно рассматривать как вариант обратного преобразования Вигнера. А в случае снятия вырождения такие моды можно рассматривать как результат прецессии наклонной фундаментальной моды. Этот подход оказывается плодотворным для понимания особенностей возбуждения и переизлучения мод типа шепчущей галереи в призмный элемент связи. В параграфе 1.3.3 выведены приближения для расчета расщепления вырожденных мод шепчущей галереи как в случае слабой, так и сильной эллиптичности сфероида. На основе нового прецессионного подхода в параграфе 1.4.4 показано, что переизлучение мод с $\ell \neq m$ в призму имеет характер двух расходящихся эллиптических гауссовых лучей. К этому же выводу приводит и приближенный расчет на основе теории дифракции. В параграфе 1.1.4 на основе полученных теоретических результатов экспериментально показана возможность избирательного возбуждения требуемых мод типа шепчущей галереи. Кроме того, в этом разделе описан способ идентификации мод по оптически построенному в дальней зоне изображению распределения ближнего поля на поверхности резонатора.

В разделе 1.4 предложена теория элементов связи для эффективного возбуждения мод типа шепчущей галереи в микросферах. Моды типа шеп-

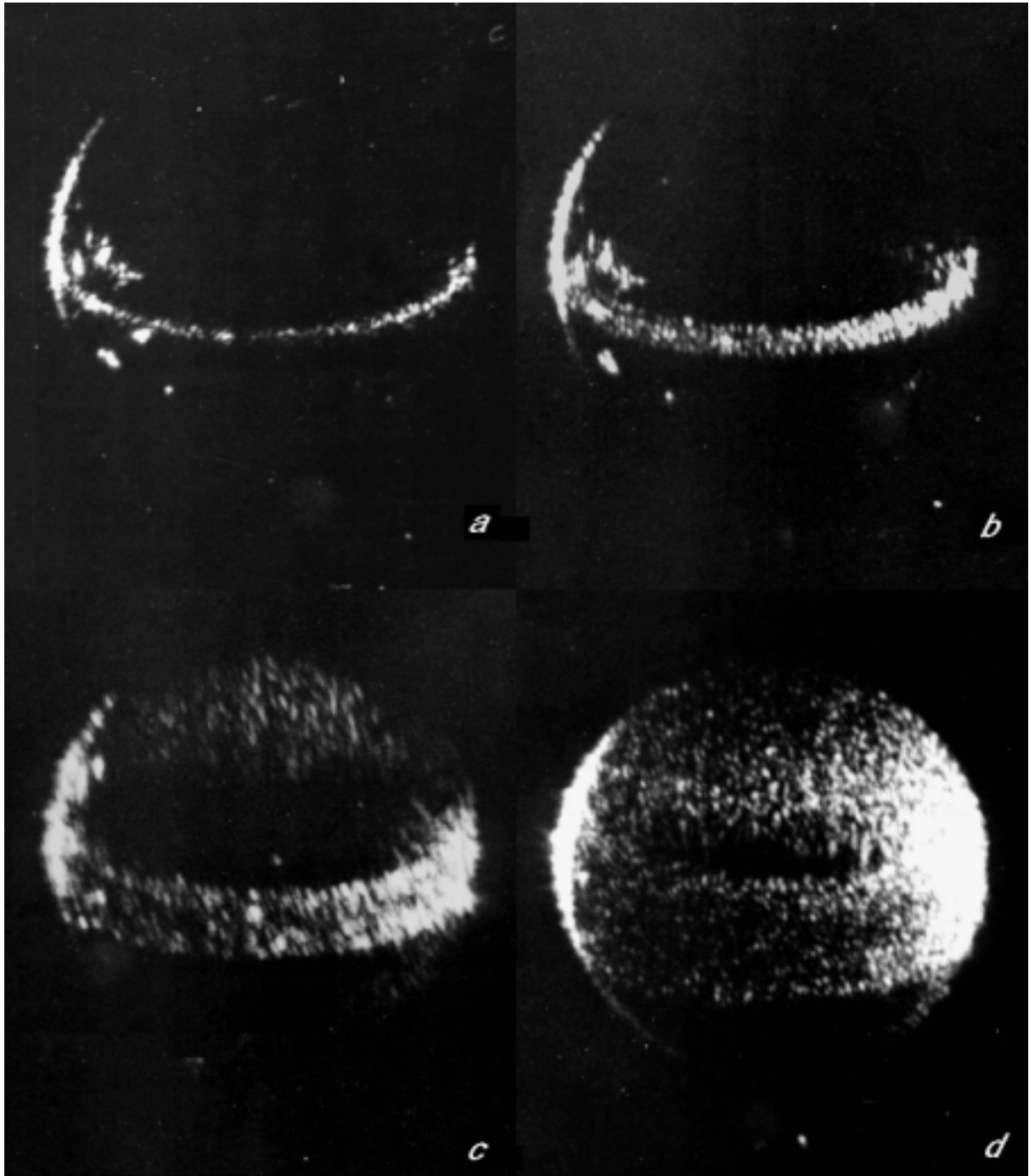


Рис. 3: Спекл-картины мод шепчущей галереи, наблюдаемые вследствие рассеяния на поверхностных неоднородностях: для $\ell - m$ равных 0, 2, 15 и 60

щущей галереи можно возбудить в сферическом резонаторе несколькими способами. Для связи со свободными оптическими пучками наиболее естественным представляется использование призменного элемента связи [16], основанного на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения. Кроме этого, для эффективного возбуждения испытывалась связь через: а) сполитрованный сбоку участок волокна; б) вытянутый на конус участок волокна; в) сполитрованный под углом торец волокна и г) планарные волноводы. Хотя разумная связь и была продемонстрирована с разными элементами связи (до нескольких десятков процентов отбора мощности входного пучка в резонансе), их разработка и оптимизация сдерживалась отсутствием систематического теоретического подхода, позволившего бы количественно характеризовать работу разных устройств. Оставалось также неясным - возможно ли вообще обеспечить полный обмен энергией между бегущей волной в элементе связи и данной модой шепчущей галереи в сферическом высокочастотном микрорезонаторе. В диссертации последовательно разработана теория связи в разных приближениях: квазигеометрическое описание связи с многомодовым элементом связи посредством передаточной матрицы (параграф 1.4.1); моделирование связи волноводным ответвителем (параграф 1.4.1); вариационный подход (1.4.3). Показано, что эффективность элемента связи по отношению к резонатору данного размера может быть полностью описана нагруженной добротностью. В параграфе 1.4.4 результаты теоретического анализа доведены до численных расчетов и сравнения на их основе эффективности различных элементов связи. Как оказалось, наиболее универсальным и эффективным элементом связи является призмный элемент связи и другие аналогичные ему (сполитрованный под углом торец волокна и градиентной линзы). В разделе 1.4.5 для призмного элемента связи теоретические выводы были проверены экспериментально. В явном виде показана зависимость глубины резонансного провала от величины нагруженной добротности демонстрирующая хорошее согласие с параболическим ходом, предсказываемая теорией. Максимальный контраст (эффективность отбора мощности от элемента связи), достигнутый в этом эксперименте составил 79%.

В разделе 1.5 проанализировано рассеяние мод микросферы на объемных и поверхностных неоднородностях и связанные с этим экспериментально

наблюдаемые эффекты резонансного обратного рассеяния и снятия вырождения мод. Во всех предшествующих оценках предела добротности вследствие внутренних потерь предполагалось, что потери в микрорезонаторах могут быть адекватно описаны тем же самым коэффициентом, которым описывают ослабление плоских волн в материале α , тогда $Q = 2\pi n/\alpha\lambda$. Однако, такой подход не вполне справедлив, поскольку из двух компонентов из которых складываются потери – поглощение и рассеяние, последняя составляющая внутри резонатора, основанного на эффекте полного внутреннего отражения должна модифицироваться. В параграфе 1.5.1 проанализировано внутреннее рэлеевское рассеяние в микросфере на замороженных при стекловании термодинамических флуктуациях плотности с учетом эффекта полного внутреннего отражения и показано, что оно будет частично подавляться. При этом коэффициент подавления $K_{TE, TM}$ равен отношению полной интенсивности рассеянной волны, к интенсивности волны с углами рассеяния, соответствующими углам падения на поверхность микрорезонатора, меньшим чем угол полного внутреннего отражения. Результаты численного расчета для плавленого кварца, с $n = 1.45$ в случае, когда размер резонатора много больше длины волны, дают:

$$K_{TE} = 2.8 \quad K_{TM} = 9.6 \quad (1)$$

Полученные результаты позволяют произвести переоценку возможного предельного значения добротности из-за фундаментальных потерь. Оказывается, что открывается теоретическая возможность достижение добротности $Q \sim 10^{12}$ на длине волны $\lambda = 1.55\text{мкм}$. В то же время, поскольку на длине волны He-Ne лазера 0.63 мкм доминирует поглощение, вывод о достижении предельного уровня в разделе 1.1 остается справедливым.

Наименее разработанным в различных работах остается анализ поверхностного рассеяния, что непосредственно следует из расхождения численных и аналитических оценок потерь поверхностного рассеяния в зависимости от размера резонатора и длины волны. В параграфе 1.5.2 проведен детальный расчет рассеяния на поверхностных неоднородностях в приближении малых слабокоррелированных неоднородностей.

$$Q = \frac{2K_{TE, M}}{K_{TE, M} + 1} \frac{3\lambda^3 a}{16n\pi^2 B^2 \sigma^2}, \quad (2)$$

где a – диаметр резонатора, λ – длина волны, B – длина корреляции и σ – размер неоднородностей. Последние два параметра могут быть определены экспериментально с помощью атомно-силового микроскопа и составляют у микросфер единицы нанометров ($B = 5\text{нм}$ и $\sigma = 1.7\text{нм}$ [17]).

Рассеяние приводит не только к ограничению добротности резонатора, но и к связи между различными модами резонатора. Этот эффект может играть положительную роль и уже используется для стабилизации полупроводниковых лазеров и их привязки к узким резонансам микросфер [18, 19]. При этом наиболее важной является появляющаяся связь между изначально вырожденными даже в неидеальном сфероиде бегущими модами, распространяющимися в противоположных направлениях. Это приводит к образованию дублетов мод и создает резонансное отражение в элемент связи. В 1.5.3 дан общий формализм описания связи встречных мод и вариационным методом найдены основные выражения для амплитуд и частот мод. В параграфах 1.5.4 показано, что при некоторых условиях возможна почти полная перекачка мощности во встречную моду. При этом достигается резонансное отражение излучение обратно в лазер. В параграфе 1.5.5 рассчитано расщепление мод из-за внутреннего и поверхностного рассеяния:

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{3\lambda^4\alpha_s}{8\pi^3n^4V_{\text{eff}}}}, \quad (3)$$

где V_{eff} - эффективный объем локализации поля моды, α_s - затухание из-за рассеяния.

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_{\text{пов}} \simeq \frac{1.1\sigma B}{\lambda^{1/4}a^{7/4}}, \quad (4)$$

В реальных резонаторах расщепление из-за поверхностного рассеяния много меньше расщепления из-за внутреннего рассеяния. Полученные численные оценки находятся в согласии с величинами наблюдаемых эффектов.

Глава 2. Квантово-невозмущающие измерения в СВЧ диапазоне. Основной интерес в квантовой теории измерений и квантовой электродинамике традиционно сосредоточен на экспериментах в оптическом диапазоне [1]). СВЧ диапазон до недавнего времени не привлекал внимание из-за малости энергии оптических квантов и, соответственно, сложности наблюдения неклассических состояний электромагнитного поля. Однако малость энергии фотонов компенсируется в СВЧ диапазоне увеличением возможного

времени измерения. За последние годы были разработаны методы высокопрецизионных измерений, основанные на резонансном взаимодействии э.м. поля с пучками свободных атомов и молекул, которые позволяют не только реализовать квантово-невозмущающие измерения, но и достичь разрешения вряд ли возможного в оптическом диапазоне – на уровне долей кванта.

Наибольших успехов удалось добиться в экспериментах с циркулярными ридберговскими атомами (возбужденными атомами щелочных металлов, в которых один валентный электрон находится на уровне с большим номером n) [20, ?]. Однако, техника ридберговских атомов является весьма трудоемкой и сложной в реализации.

В диссертации рассмотрена новая процедура квантово-невозмущающих измерений электромагнитного поля в СВЧ диапазоне – измерение квадратурной амплитуды с использованием электронов вместо атомов, которая должна позволить достичь эквивалентного разрешения на уровне долей квантов. Важно отметить, что в пределе большого числа фотонов (“линейное приближение”) измерение малой вариации квадратурной амплитуды эквивалентно измерению флуктуаций энергии или числа квантов $2\delta A/A = \delta N/N$. Возможность экспериментальной реализации процедуры измерения квадратурной амплитуды электромагнитного поля в случае малого числа фотонов ранее никем не рассматривалась.

В основе предложенной в разделе 2.1 этой главы схемы измерения лежит стробоскопическое измерение квадратурной амплитуды [21]. Принцип стробоскопического слежения основан на том факте, что кратковременные измерения текущего значения электромагнитного поля, повторяющиеся точно через период колебаний, дают информацию только об одной квадратурной амплитуде. В этом случае эта компонента не возмущается, а обратное воздействие измерителя приводит к возмущению сопряженной квадратурной амплитуды.

На роль измерителя в стробоскопической схеме, описанной в параграфе 2.1.1, и, проанализированной в параграфе 2.1.2, предлагается специально приготовленный пучок электронов, проходящий через СВЧ резонатор. В приготовленном пучке электронные пакеты должны следовать друг за другом на расстоянии точно эквивалентном одному периоду колебаний ($\Delta S = vT$, где v – скорость электронов). Длительность отдельного измерения

в этой схеме равна времени пролета электрона через область взаимодействия. При этом считываемая наблюдаемая – дополнительный импульс, полученный электронами за время взаимодействия, который в случае пролета электрона перпендикулярно линиям электрического поля в резонаторе приводит к угловому отклонению электронного пучка (параграф 2.1.3).

Другой вариант схемы измерения, изложенный в параграфе 2.1.4, использует пролет электронов вдоль линий электромагнитного поля. В этом случае измеряется набег фаз с помощью электронного интерферометра.

Для получения максимальной концентрации электромагнитной энергии в резонаторе предлагается использовать СВЧ резонатор с сосредоточенной емкостью, например, коаксиальный резонатор клистронного типа.

Схема предъявляет достаточно жесткие требования к электронному лучу. Анализ этих требований приводится в параграфе 2.1.5.

Как показали расчеты, приведенные в параграфе 2.1.6, учитывающие различные паразитные эффекты и диссипацию, в коаксиальном резонаторе, имеющим при температуре жидкого гелия в 3-х сантиметровом диапазоне добротность 10^6 при емкости $C = 0.06$ пФ, оказывается возможным измерить квадратурную амплитуду электромагнитного поля квантово-невозмущающим образом с разрешением в 2 раза лучшим чем стандартный квантовый предел – даже если электронный пучок будет иметь расходимость в 3 раза большую чем диффракционный предел. При $Q = 10^7$ и более низких температурах требования к электронному пучку еще больше снижаются.

Глава 3. Квантовые и термодинамические флуктуации в резонаторах гравитационных антенн В 2000 году в США закончилось сооружение самых больших в мире оптических резонаторов длиной в 4 километра, которые включены в схему лазерной интерферометрической гравитационной антенны на свободных массах (международный проект LIGO, антенны несколько меньшего размера сооружаются в Германии, Италии, Японии [22]). Вследствие большой длины, добротность таких резонаторов будет рекордной ($\sim 10^{13}$, время звона около 10^{-2} с). Этот новый инструмент не только открывает новый канал информации об устройстве Вселенной, но и выводит разрешение физического эксперимента на новый уровень. При планируемых рубежах чувствительности антенн, на которые предстоит выйти в ближайшие годы и достигнутой культуре изоляции от

термостата механических степеней свободы, вступают в действие законы квантовой механики, и макроскопические пробные массы необходимо рассматривать как квантовые объекты. При классической схеме регистрации квантовые законы накладывают ограничение на предельно достижимую антенной чувствительность и предъявляют жесткие требования к величине оптической мощности накачки. Обойти эти препятствия, как показывает квантовая теория измерений [9] можно при использовании неклассических квантовых состояний электромагнитного поля и, так называемых, квантово-невозмущающих измерений. Однако на пути к квантовым ограничениям экспериментаторам предстоит еще решить немало непростых задач, в частности связанных с термодинамическими флуктуациями в подвесах и зеркалах резонаторов антенны.

Все известные схемы лазерных гравитационно-волновых антенн построены на одном принципе: гравитационная волна, периодически в противофазе изменяет длины резонаторов в плечах интерферометра Майкельсона, что приводит к разности фаз лучей, приходящих на делитель, и соответственно на выходе может быть зарегистрирован амплитудный сигнал. Основным фундаментальным ограничением чувствительности гравитационной антенны, как кажется, является дробовой шум ($\delta\phi > 1\sqrt{N}$, где N – число использованных фотонов), а следовательно, чтобы повысить чувствительность антенны нужно увеличивать лазерную мощность накачки. Однако такое повышение приводит к росту флуктуаций ponderomotorного давления на зеркала интерферометра, и новому ограничению чувствительности. Баланс этих двух механизмов определяет оптимальную мощность и квантовый предел чувствительности - Стандартный Квантовый Предел (СКП) [9].

$$\Delta x_{\text{СКП}}(M) = Lh_{SQL} \simeq \sqrt{\frac{\hbar}{M\omega_{gr}^2\tau_{gr}}}, \quad (5)$$

где ω_{gr} – частота гравитационного сигнала и τ_{gr} – его длительность

Известно, что для преодоления СКП можно использовать оптическую нелинейность, создающая амплитудно-фазовую корреляцию. При планируемых параметрах лазерных гравитационных антенн в системе уже существует сильная кубическая нелинейность, обусловленная ponderomotorным эффектом светового давления. В разделе 3.1 анализируется возможность

использование этой “естественной” нелинейности для преобразования вызванной гравитационной волной вариации метрики в силу, действующую на дополнительное зеркало, помещенное в оптический резонаторю. Рассмотрено статическое (п.3.1.1) и динамическое (п.3.1.2) поведение новой схемы детектирования гравитационных волн. Исследована предельная чувствительность антенны, обусловленная квантовыми пределами (п.3.1.3) и влияние на нее оптических потерь (п.3.1.4) и потерь в подвесах (п.3.1.5). Проведено сравнение чувствительности нового детектора с координатными детекторами других типов (п.3.1.6). Подробно проанализированы различные режимы работы антенны (п.3.1.7).

Основные результаты теоретического анализа можно сформулировать следующим образом:

1. При оптимальной величине оптической энергии \mathcal{E} в обоих плечах резонатора, всплеск гравитационного излучения с амплитудой h ведет к появлению силы, действующей на центральное зеркало и в случае широкополосного сигнала вызывает его колебания с амплитудой Δx_D равной $hL/2$. При этом возможно преодоление стандартного квантового предела для малой массы. В случае узкополосного сигнала возможно резонансное усиление отклика. Таким образом, гравитационная антенна с оптической жесткостью имеет все преимущества твердотельной антенны с характерными размерами как у лазерной ($4km$ для проекта LIGO). Если $m = 10^3 g$, то, при $\omega_{gr} = 10^3 s^{-1}$, оптимальная энергия составляет $\mathcal{E} \leq 10^7 erg$.

2. Чувствительность этой схемы не ограничивается стандартным квантовым пределом если $\omega_{gr}\tau_{meas} \gg 1$. В координатном измерителе может быть использована любая из предложенных ранее нестационарных схем измерений, позволяющих пересечь СКП.

3. Предельная чувствительность и требуемая оптическая мощность накачки в этой схеме не зависят от квантового состояния оптического поля. Требуемое состояние электромагнитного поля с хорошо определенной разностью энергий в двух плечах антенны создается автоматически, непосредственно в процессе измерения при слежении за координатой зеркала, обеспечивающего связь.

Обеспечение достаточно большой мощности накачки, а, следовательно, и запасенной энергии \mathcal{E} является достаточно серьезной проблемой для ла-

зерных гравитационных антенн. Оказывается, что эта проблема носит не технический, а фундаментальный характер. В разделе 3.2 показано, что для достижения чувствительности равной СКП в обычных антеннах с когерентной накачкой требуется, чтобы в антенне циркулировала энергия

$$\mathcal{E} \simeq \frac{ML^2\omega_{gr}^3}{\omega_o}. \quad (6)$$

Подставляя сюда параметры антенн проекта LIGO, получаем

$$\mathcal{E}_{SQL} \simeq 10^9 \text{ erg}, \quad (7)$$

для $\omega_{gr} = 10^3 \text{ s}^{-1}$.

В этом разделе проанализирована новая схема внутриврезонаторных измерений, которая, в некотором роде, комплиментарна к рассмотренной ранее схеме с оптической жесткостью. В новой схеме оптическое поле формируется в необычном квантовом состоянии. В разделе 3.2.1 исследован этот новый класс квантовых состояний и наблюдаемых. Рассмотренный оператор кроссквадратурной наблюдаемой близок к оператору разности фаз, теоретически исследованному в 1968 году Карузерсом и Нието [23], которые обнаружили парадоксальный эффект – квантованию разности фаз независимых осцилляторов. В рамках рассмотренной практической схемы этот эффект получает физическое объяснение: нелинейная связь между осцилляторами возникает в процессе измерения. В отличие от других известных КНИ наблюдаемых, эта является общим интегралом движения для двух квантовых осцилляторов с равными частотами. Кросс-квадратурная наблюдаемая весьма чувствительна к разности фаз в двух осцилляторах системы. Может быть зарегистрирована разность фаз порядка $1/N$ (теоретический предел для фазовых измерений), где N – число фотонов в системе. Для измерения новой наблюдаемой могут быть использованы известные методы квантово-невозмущающих измерений.

Как показывают оценки в параграфе 3.2.2, в сочетании с усовершенствованными координатными измерителями, новая схема обеспечивает чувствительность того же порядка, что и в планируемых антеннах, но при существенно меньших уровнях накачки.

В последующих двух разделах рассмотрены фундаментальные эффекты, реально ограничивающие чувствительность существующих гравитацион-

ных антенн, на которые ранее не обращали внимание, связанные с флуктуациями температуры в зеркалах резонаторов, трансформирующимися при ненулевом коэффициенте линейного расширения во флуктуации поверхности. В рамках нового подхода, состоящего в приложении метода ланжевена к уравнению теплопроводности, в разделе 3.3 проанализированы в общем виде флуктуации поверхности твердого тела из-за флуктуаций в нем температуры при ненулевом коэффициенте теплового расширения. Этот подход был подтвержден независимым расчетом с помощью традиционных методов. В параграфе 3.3.1 проанализированы флуктуации поверхности, связанные с флуктуациями температуры вследствие флуктуаций поглощаемой оптической мощности, – фототермический дробовой шум. В параграфе 3.3.2 исследованы фундаментальные флуктуации, связанные с термодинамическими флуктуациями температуры. Показано, что флуктуационно-диссипационная теорема связывает эти флуктуации с термоупругими потерями. Как следует из численных оценок и графиков в параграфе 3.3.3, эффектами связанными с коэффициентом теплового расширения не следует пренебрегать. Особенно неблагоприятная ситуация складывается для лейкосапфира, который планировалось использовать на следующих этапах проекта LIGO – флуктуации из-за термоупругих потерь доминируют в широком частотном интервале и превышают СКП в два раза. Для плавленого кварца ситуация обратная – СКП на порядок больше чем термодинамические флуктуации. Существенно то, что в отличие от броуновских флуктуаций, рассчитываемых в эмпирическом предположении о частотнонезависимом структурном механизме потерь, угол которых пока непосредственно на низких частотах не измерялся, описанные термодинамические флуктуации фундаментальный характер, и их спектральная плотность может быть точно вычислена из параметров материала без привлечения модельных предположений.

В разделе 3.4 проанализирован эффект, связанный с трансформацией температурных флуктуаций во флуктуации показателя преломления в отражающем многослойном покрытии зеркал. Проведенный аналитический расчет (п.3.4.1) показал, что спектральная плотность этого шума медленнее чем с других случаях падает с температурой и поэтому, как показывают численные оценки, на высоких частотах этот шум может доминировать в

сапфировых зеркалах.

Другим важным возможным ограничителем чувствительности гравитационных антенн являются тепловые и избыточные шумы в подвесах зеркал. На пути их экспериментального измерения в кварцевых подвесах, которые будут использованы в следующем поколении антенн встают чисто экспериментальные проблемы. Возможный способ решения этих проблем изложен в разделе 3.5, где проанализирован бесконтактный метод измерения малых флуктуаций прозрачных тел (нитей, пластин, пленок), основанный на сдвиге резонансной частоты Фабри-Перо резонатора при изменении координаты, помещенного в него исследуемого тела. Предварительная экспериментальная проверка метода подтвердила его перспективность.

Результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, “High-Q optical whispering-gallery microresonators: precession approach for spherical mode analysis and emission patterns with prism couplers”, – *Opt.Commun.*, 1994, v.113, p.133-143.
2. M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, A.A. Savchenko, “On the ultimate Q of optical microsphere resonators”, – *Proc. of SPIE* **2799** (1995) 389.
3. M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, A.A. Savchenko, “Ultimate Q of optical microsphere resonators”, – *Opt. Lett.* **21** (1996) 453.
4. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky and F.Ya. Khalili, “The scheme of QND meter of microwave quadrature amplitude” – *Applied Physics* **B 64**, (1997) 243.
5. V.V. Vassiliev, V.L. Velichansky, V.S. Ilchenko, M.L. Gorodetsky, L. Hollberg and A.V. Yarovitsky, “Narrow-line-width diode laser with a high-Q microsphere resonator”, *Opt. Comm.* **158** (1998) 305.
6. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky and F.Ya. Khalili, “Optical bars in gravitational wave antennas”, – *Phys. Lett.* **A232** (1997) 340.

7. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky and F.Ya. Khalili, “Quantum limits and symphotonic states in free-mass gravitational-wave”, – Phys. Lett. **A246** (1998) 485.
8. M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko, “Optical microsphere resonators: optimal coupling and the ultimate Q”, – Proc. SPIE **3267** (1998) 251.
9. M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, “Optical microsphere resonators: optimal coupling to high-Q whispering-gallery modes”. – JOSA **B16**, (1999) 147.
10. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S., Pryamikov A.D. “Intracavity Rayleigh scattering in microspheres: limits imposed on quality-factor and mode coupling”, – Proc. SPIE **3611** (1999) 206.
11. И.А.Биленко, М.Л.Городецкий, “Метод измерения малых колебаний оптически прозрачных объектов”, – ДАН, **368** (1999) 612.
12. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky and S.P. Vyatchanin, “Thermodynamical fluctuations and photo-thermal shot noise in gravitational wave antennae”, – Phys. Lett. **A264** (1999) 1.
13. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, F.Ya. Khalili, K.S. Thorne, “Dual-resonator speed meter for a free test mass”, – Phys. Rev. **D61** (2000) 4002.
14. M.L. Gorodetsky, A.D. Pryamikov, V.S. Ilchenko, “Rayleigh scattering in high-Q microspheres” – J.Opt.Soc.Am. **B17** (2000) 1051.
15. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky and S.P. Vyatchanin, “Thermo-refractive noise in gravitational wave antennae”, – Phys. Lett. **A271** (2000) 303.
16. Э.Н. Алырзаев, М.Л. Городецкий, В.С. Ильченко, А.А. Савченко, “Измерение малых оптических потерь в жидкостях методом погруженного сферического микрорезонатора”, – Вестник МГУ, Сер.3, Физика. Астрономия, N5 (2000) 55.

Результаты, включенные в диссертацию докладывались на международных конференциях

17. M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko and A.A.Savchenkov, “On the ultimate Q of spherical dielectric microresonators”, ICONO/LaserOptics’95, С.-Петербург, Тезисы конференции.
18. V.V. Vasiliev, V.L. Velichansky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, A.V. Yarovitsky and L. Hollberg, “Laser diode with external microresonator” ICONO/LaserOptics’95, С.-Петербург, Тезисы конференции.
19. M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko, “Optical microsphere resonators: optimal coupling and the ultimate Q”, Photonics West’98, Сан-Хосе, США, Тезисы конференции.
20. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S., Pryamikov A.D. “Intracavity Rayleigh scattering in microspheres: limits imposed on quality-factor and mode coupling”, Photonics West’99, Сан-Хосе, США, Тезисы конференции.
21. V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, F.Ya. Khalili, K.S. Thorne, Energetic Quantum Limit in Large-Scale Interferometers, Proc. of the 1999 Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves; gr-qc/9907057.

Цитированная литература

- [1] V.B. Braginsky, F.Ya. Khalili, Rev. Mod. Phys., **68** (1996) 1.
- [2] P. Grangier et al., Nature, **396** (1998) 537.
- [3] J. Ye, D.W. Vernoy, and H.J. Kimble, Phys. Rev. Lett., **83** (1999) 4987.
- [4] P.W. Shor, Proc. 35th Annual Symp. on Foundations of Computer Science, Santa Fe, IEEE Computer Soc. Press, 1994; lanl e-print quant-ph/9508027.
- [5] C.H. Bennett, F. Bessette. G. Brassard, L. Savail and J. Smolin, J.Cryptology, **5** (1992) 3.
- [6] C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres and W.K. Wootters, Phys. Rev. Letts. **70** (1993) 1895.
- [7] A. Rauschenbeutel, G. Nogues, S. Osnaghi, P. Bertet, M. Brune, J.M. Raimond, S. Haroche, Phys. Rev. Letts. **83** (1999) 5166.

- [8] B.T.H. Varcoe, S. Brattke, M. Weldinger, Walther H., *Nature* **403** (2000) 743.
- [9] V.B. Braginsky, F.Ya. Khalili, “Quantum Measurement”, chap. VI, ed. by K.S. Thorne, Cambridge Univ. Press, 1992.
- [10] V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, *Phys. Lett.* **A137**, (1989) 393.
- [11] H. Mabuchi, H.J. Kimble, *Opt. Lett.* **19** (1994) 749.
- [12] L. Collot, V. Lefèvre-Seguin, M. Brune, J. -M. Raimond, S. Haroche, *Europhys. Lett.* **23** (1993) 327.
- [13] В.Б. Брагинский, В.С. Ильченко, Доклады академии наук, **32** (1987) 36.
- [14] V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, *Proc. SPIE*, **2097** (1993) 283.
- [15] D.A. Pinnow, T.C. Rich, F.W. Ostermayer, M. DiDomenico, *Appl. Phys. Lett.* **22** (1973) 527.
- [16] С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий и В.С. Ильченко, *ЖПС* **56** (1992) 274.
- [17] D. W. Vernooy, V. S. Ilchenko, H. Mabuchi, E. W. Streed and H. J. Kimble, *Opt. Lett.* **23** (1998) 247.
- [18] V.V. Vasiliev, V.L. Velichansky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko, L. Hollberg, A.V. Yarovitsky, *Quantum Electronics, Quantum Electronics* **26** (1996) 657.
- [19] V. V. Vasiliev, V. L. Velichansky, V. S. Ilchenko, M. L. Gorodetsky, L. Hollberg, A. V. Yarovitsky, *Opt. Commun.* **158** (1998) 305.
- [20] J.A.C. Gallas, G. Leuchs, H. Walther and H. Figger in *Advances in Atomic and Molecular Physics* 20, ed. by D. Bates and B. Bederson (Academic Press, New York 1985), p.413
- [21] В.Б. Брагинский, Ю.И. Воронцов, Ф.Я. Халили, *Письма в ЖЭТФ*, **52** (1980) 341.

[22] В.Б. Брагинский, УФН, **170** (2000) 743.

[23] P. Carrusers, M. Nieto, Rev. Mod. Phys. **40** (1968) 411.