

1731349



На правах рукописи

Лунин Борис Сергеевич

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ВОЛНОВЫХ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ**

05.11.03 – приборы навигации

05.11.14 – технология приборостроения

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва – 2006

Работа выполнена в Московском государственном университете
им. М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Коновалов Сергей Феодосьевич

зук

ркадьевич

У1751349

Лунин Б.С.

Научно-технологические
основы разработки
полусферических

тических наук, профессор

Павлович

Ведущая:

резонаторов волновых твер...

ФНПЦ

2006

0-00

е конструкторское бюро»

У 1751349

на заседании

д. Баумана по

Н.Э. Баумана,

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

те

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1751349
Пунин Б.С. Научно-технолог

Е.В. Бурый

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), действие которых основано на свойстве инертности упругих волн во вращающихся осесимметричных телах, представляют собой новый тип навигационных устройств и являются перспективными чувствительными элементами бесплатформенных навигационных систем различного назначения.

Сегодня широкое внедрение этих приборов сдерживается их недостаточно высокой точностью, сложностью производства и высокой себестоимостью. Наиболее технологически сложной и дорогой деталью ВТГ является его чувствительный элемент – полусферический высокодобротный резонатор из кварцевого стекла, характеристики которого и определяют параметры гироскопа. Резонатор ВТГ авиационной точности должен обладать высокой добротностью [$Q \approx (1-2) \cdot 10^7$] и изотропностью упруго-массовых и диссипативных свойств: расщепление его собственных частот не должно превышать $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Гц, а разнотонность $\sim 5\%$. При вытачивании полусферических резонаторов можно использовать различные способы обработки кварцевого стекла, хорошо известные в оптической промышленности, однако для достижения высокого уровня добротности необходимо уменьшить все факторы, приводящие к рассеянию энергии упругих колебаний. Это: внутреннее трение в собственно кварцевом стекле и его поверхностном слое, в металлическом покрытии, на межфазной границе металл/стекло, а также в местах крепления резонатора. Специфичность требований, предъявляемых к резонатору ВТГ, необходимость использования ряда прецизионных технологических операций и высокий процент брака резонаторов приводит к высокому соотношению цена/качество, что в условиях рыночной экономики является серьезным фактором, ограничивающим широкое внедрение ВТГ.

Для решения этих проблем необходим комплекс специальных технологий, направленных на создание недорогих полусферических резонаторов из кварцевого стекла, с высокой добротностью и упруго-массовой изотропностью. Такой комплекс должен включать в себя метод расчета элементов полусферического резонатора, методы измерений его основных параметров, специальные методы обработки кварцевого стекла, технологию нанесения металлического покрытия с малой диссипацией, а также методику балансировки полусферической оболочки.

Разработка такого комплекса невозможна без детального понимания механизмов процессов, определяющих характеристики полусферического резонатора. Хотя структура и свойства кварцевого стекла и тонких металлических пленок, а также связанные с ними технологические задачи,

были предметами исследования на протяжении многих лет, протекающие в них слабые диссипативные процессы, которые по существу и определяют параметры качества резонатора, практически не изучены. Имеющаяся в литературе информация недостаточна и разрознена, поэтому изучение закономерностей этих процессов в рамках единого подхода является актуальным, так как создает научно-технологическую основу для разработки недорогих высококачественных резонаторов ВТГ.

Цель работы.

Разработка научно обоснованных технических решений, направленных на создание недорогих высокодобротных полусферических резонаторов высокоточных волновых твердотельных гироскопов, на основе новых адекватных моделей физических и химических процессов, определяющих параметры качества резонатора.

Задачи исследования.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- выявление основных проблем, решение которых позволяет существенно улучшить точность ВТГ;
- оценка качества математических моделей, используемых для расчета собственных частот полусферического резонатора;
- усовершенствование методов измерения основных параметров полусферических резонаторов;
- установление закономерностей и построение моделей диссипативных процессов в материале резонатора, определяющих его характеристики в рабочей (для ВТГ) области температур, и разработка способов уменьшения их интенсивности;
- установление закономерностей диссипативных процессов, протекающих в нарушенном слое, и разработка химического метода удаления нарушенного слоя;
- установление закономерностей диссипативных процессов, связанных с адсорбцией молекул атмосферных газов на кварцевом стекле и тонких пленках, и определение условий обезгаживания поверхности;
- установление закономерностей диссипативных процессов в тонких металлических пленках, нанесенных на поверхность кварцевого стекла, и разработка метода нанесения покрытия с малой диссипацией;
- разработка метода уменьшения упруго-массового дисбаланса полусферических резонаторов, балансировочного оборудования и экспериментальная проверка процедуры балансировки.

Научная новизна.

- Разработаны и апробированы новые методы измерения основных параметров резонаторов ВТГ (добротность, разночастотность, массовый дисбаланс, низкочастотный спектр собственных частот, масштабный

коэффициент), проанализировано влияние различных факторов на точность измерений;

- измерено внутреннее трение в кварцевых стеклах, используемых для изготовления резонаторов ВТГ, в области температур $-100...+300^{\circ}\text{C}$, выявлены слабые диссипативные процессы, связанные со структурой кварцевого стекла и внутренними напряжениями;
- на основе модели дефектообразования в процессе отжига разработана методика термообработки кварцевого стекла, позволившая впервые достигнуть рекордную добротность полусферического резонатора $(8.2 \pm 0.2) \cdot 10^7$;
- изучены диссипативные процессы в нарушенном поверхностном слое, образующемся при механической обработке кварцевого стекла, и разработана методика химической обработки поверхности для удаления нарушенного слоя;
- установлено влияние адсорбции атмосферных газов и паров на поверхности кварцевого стекла и тонких металлических пленок на добротность резонатора, определены режимы термообработки для дегидратации поверхности;
- на основе результатов исследования внутреннего трения в тонких металлических пленках разработана технология нанесения двухкомпонентного металлического покрытия с малой диссипацией;
- разработана аппаратура и методика балансирования полусферического резонатора методом ионного распыления;
- на основе исследования внутреннего трения в системе Al–Sc установлен состав сплава с наименьшей диссипацией, пригодный для изготовления металлических резонаторов ВТГ;
- оценено качество известных математических моделей, используемых для расчета собственных частот резонатора ВТГ, разработана аналитическая модель расчета спектра собственных частот полусферического резонатора.

Практическая ценность работы.

Полученные результаты исследований позволили раскрыть механизмы внутреннего трения в кварцевом стекле и нанесенных на его поверхность тонких металлических пленках и стали основой разработки способов существенного уменьшения внутреннего трения в резонаторах. Разработанные технологии термообработки, химической обработки поверхности резонаторов, балансировки и нанесения токопроводящего покрытия внедрены на предприятии НПП «Медикон». Разработанный метод ионной балансировки резонаторов запатентован и лег в основу промышленной балансировочной установки «Микробаланс».

Химическая обработка поверхности, позволяющая удалять нарушенный

поверхностный слой стекла, внедрена в НПО «Астрофизика».

Разработанные методы измерений параметров ВТГ и полусферических резонаторов внедрены в Институте проблем механики РАН, Раменском приборостроительном конструкторском бюро, Московском институте электромеханики и автоматики.

Полученные в диссертации результаты по внутреннему трению в сплаве Al-Sc, а также разработанные методы измерения внутреннего трения использованы Всероссийским институтом легких сплавов при выпуске технических условий на сплав AC 0.5 и подготовки его производства.

Использование разработанных технологий признано целесообразным на предприятии «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И.Забабахина» для разработки инерциального приборного оборудования.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для повышения добротности чувствительных элементов детекторов гравитационных волн, создаваемых в рамках международного проекта LIGO.

Результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Установление и экспериментальное подтверждение следующих новых диссипативных эффектов в кварцевом стекле:
 - взаимосвязь структурной температуры и внутреннего трения;
 - диссипация, связанная с внутренними напряжениями в стекле;
 - диссипация, связанная с поверхностным нарушенным слоем кварцевого стекла;
 - диссипация, связанная с гидратным поверхностным слоем и гидратированием напыленных тонких металлических пленок хрома и золота;
 - частотная зависимость внутреннего трения и модуля Юнга в кварцевом стекле в диапазоне температур $-100...+300^{\circ}\text{C}$.
2. Новый метод химической обработки поверхности резонаторов, позволяющий удалить нарушенный слой и повысить добротность резонаторов.
3. Метод отжига резонаторов, позволяющий уменьшить внутреннее трение в кварцевом стекле.
4. Результаты исследования внутреннего трения в тонких металлических пленках, позволившие установить природу доминирующих неупругих процессов в тонких пленках, и разработанный способ металлизации полусферического резонатора путем нанесения двухкомпонентного токопроводящего покрытия на основе золота.
5. Способ балансировки полусферических резонаторов по 1-4-й гармоникам массового дефекта.
6. Комплекс экспериментальных методов для измерений характеристик

высокодобротных полусферических резонаторов из кварцевого стекла, позволивший:

- измерить дрейф стоячей волны в ВТГ и определить его масштабный коэффициент;
- определить расщепление собственных частот и низкочастотный спектр собственных частот полусферического резонатора;
- измерить внутреннее трение в резонаторе в диапазоне температур $-100...+300^{\circ}\text{C}$ на нескольких низших модах изгибных колебаний;
- измерить параметры 1÷3-й гармоник массового дефекта оболочки полусферического резонатора;
- измерить добротность и модуль Юнга чистых кварцевых стекол в диапазоне температур $-100...+300^{\circ}\text{C}$ на частотах до 60 кГц.

7. Оценка точности расчета низкочастотного спектра собственных частот полусферического резонатора, выполненного с помощью известных математических моделей.

Апробация работы.

Основные результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

- Международных конференциях по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, Россия - 1995, 1997, 1999, 2003, 2005);
- Международной конференции по технологии инерциальной навигации (Наньпин, КНР -2004);
- Международных конгрессах по стеклу (Пекин, КНР-1995, Сан-Франциско, США – 1998, Эдинбург, Шотландия – 2001, Киото, Япония – 2004);
- X Национальной научно-технической конференции по стеклу и керамике (Варна, Болгария – 1990);
- VII Всесоюзной научно-технической конференции по кварцевому стеклу (Санкт-Петербург, Россия – 1991);
- Конференции по основам науки и технологии стекол (Векше, Швеция – 1997);
- X Международной конференции по взаимодействию дефектов и неупругим явлениям в твердых телах (Тула, Россия – 2001);
- Всероссийской научно-практической конференции «Высшая школа России и конверсия» (Москва, Россия – 1993).

Публикации.

Материалы диссертации изложены в 43 печатных работах, включая 5 патентов и авторских свидетельств.

Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве и включенные в диссертацию, состоял в формировании путей решения поставленных в работе задач, активном участии на всех этапах исследования, анализе и обобщении полученных результатов.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Общий объем работы 361 стр., включая 31 таблицу, 136 рисунков, список цитируемой литературы из 165 наименований, 18 стр. приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность решаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель, задачи, научная новизна исследований, основные положения диссертации, выносимые на защиту, и дается краткая аннотация результатов, изложенных в последующих главах.

В первой главе рассматривается современный уровень и проблемы развития ВТГ. Обсуждаются экспериментальные данные, полученные при испытании отечественных и зарубежных ВТГ, которые показывают, что одной из основных проблем, связанных с их точностью, является нестабильность скорости дрейфа стоячей волны. На основе полученных экспериментальных и расчетных данных рассматриваются различные источники дрейфа стоячей волны, их связь с параметрами полусферического резонатора, погрешностью расположения электродов, неравномерностью зазоров и неодинаковостью коэффициентов передачи входных усилителей. Обсуждается проблема температурной и временной нестабильности характеристик ВТГ, которые определяются процессами внутреннего трения в материале резонатора и в проводящем покрытии.

Рассмотрены описанные в литературе конструкции ВТГ. Одним из наиболее серьезных недостатков известных конструкций является необходимость обеспечения равномерности двух полусферических зазоров между поверхностями оболочки резонатора и поверхностями внутреннего и внешнего блоков электродов, что является сложной технической задачей. Неравномерность этих зазоров ведет к дрейфу стоячей волны, который связан с: а) неоднородным демпфированием колебаний электрическими системами ВТГ; б) неоднородностью сил возбуждения колебаний, создаваемых кольцевым электродом; в) неоднородным затуханием, создаваемым остаточным газом.

Влияние остаточного газа на добротность резонатора и дрейф стоячей волны изучено на основе разработанной модели газового трения. Модель позволяет рассчитать внутреннее трение, вносимое остаточным газом в резонатор, и скорость систематического дрейфа в зависимости от давления газа, параметров резонатора и зазоров. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют определить необходимый уровень вакуума в приборе, а также допустимую

неравномерность зазоров для заданной конструкции ВТГ.

Одной из наиболее актуальных задач при разработке ВТГ является снижение его себестоимости. Полусферический резонатор является наиболее дорогой частью прибора, что связано с высокой стоимостью сырья, необходимостью использования дорогостоящего оборудования и длительным производственным циклом. Показано, что снижение себестоимости резонатора ВТГ может быть достигнуто за счет использования недорогого отечественного кварцевого стекла, рационального выбора конструкции резонатора и использования новых технологий при его изготовлении.

Выделены основные задачи, которые должны быть решены для существенного повышения точности ВТГ, а также для снижения его себестоимости.

- Повышение качества полусферического резонатора, который должен иметь следующие характеристики:

- добротность – на уровне 10^7 ;
- разнодобротность – не более 5%;
- расщепление собственных частот – на уровне 0.001-0.005 Гц.

Для решения этой задачи необходимо:

- обеспечить малый уровень внутреннего трения в материале резонатора;
 - разработать эффективный метод химического удаления нарушенного поверхностного слоя, характеризующегося интенсивным внутренним трением;
 - обеспечить массовую балансировку резонатора, так как его массовый дисбаланс является одной из основных причин разнодобротности и его влияние возрастает по мере уменьшения диаметра резонатора (специфической проблемой балансировки является удаление несбалансированных масс без внесения нарушений в структуру материала резонатора, снижающих его добротность);
 - обеспечить малый уровень внутреннего трения в металлическом покрытии;
 - разработать методы измерения параметров высокочастотных резонаторов.
- Рационализация конструкции резонатора с целью максимального упрощения его изготовления. Одновременно необходимо обеспечить максимальное разнесение собственных частот конструкции и рабочей частоты изгибных колебаний оболочки резонатора.

Во второй главе рассмотрены разработанные методы измерения характеристик высокочастотных механических резонаторов. В качестве

объектов исследования использовались резонаторы различных конструкций, изготовленные на российских и зарубежных предприятиях [НПОЭ, НПП «Медикон», МИЭА, РПКБ, Litton Guidance and Control Systems (США), SIPAT (КНР)]. Полусферические резонаторы диаметром от 20 до 70 мм использовались для разработки метода химического травления поверхности резонаторов, способа их массовой балансировки, методов измерения их характеристик, изучения поверхностных диссипативных процессов, в том числе в тонких металлических пленках. Для исследования внутреннего трения в кварцевом стекле и металлических сплавах использовались цилиндрические резонаторы, имеющие большое соотношение объем/поверхность, что делает их подходящими модельными объектами для исследования объемных диссипативных процессов в материалах.

Приведено описание разработанной автором измерительной аппаратуры, позволяющей измерять внутреннее трение в цилиндрических и полусферических резонаторах в диапазоне температур от -100 до $+300^{\circ}\text{C}$ на частотах от 1 до 60 кГц с аппаратурной погрешностью на уровне 10^{-9} . В качестве примера на рис.1 приведены температурные зависимости добротности 30-мм полусферического резонатора, изготовленного из кварцевого стекла КУ-1, измеренные на этой установке на трех нижних модах изгибных колебаний оболочки.

Рассмотрены факторы, влияющие на внутреннее трение в резонаторах. Показано, что одним из основных источников дополнительного внутреннего трения является затухание, связанное с остаточным газом. Рис.2 показывает

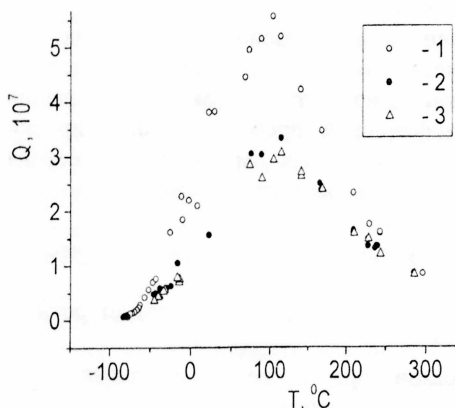


Рис. 1. Зависимость добротности резонатора ВТГ от температуры:
1–2-я мода (8.4 кГц); 2–3-я мода (17 кГц); 3–4-я мода (30 кГц)

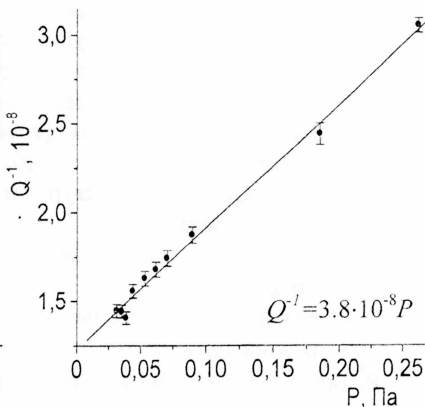


Рис.2. Зависимость внутреннего трения в полусферическом резонаторе от давления остаточного газа

влияние давления остаточного газа на внутреннее трение в 30-мм полусферическом резонаторе с добротностью $8.2 \cdot 10^7$ при температуре $T=135^\circ\text{C}$ в условиях неограниченной газовой среды. При измерении добротности резонаторов этот эффект учитывался введением поправок.

Рассмотрены разработанная аппаратура и методы, позволяющие измерять другие характеристики полусферических резонаторов, в том числе расщепление собственных частот и низкочастотный спектр собственных частот. В качестве примера эти характеристики полусферического резонатора из кварцевого стекла КУ-1 диаметром 30 мм показаны на рис.3,4. Для идентификации собственных частот конструкции (рис.4) используется моделирование колебаний полусферического резонатора. Сопоставление рассчитанных и измеренных спектров собственных частот позволяет идентифицировать их частотные компоненты.

Существование температурной зависимости расщепления собственных частот (Δf) связано с неизотропностью свойств полусферического резонатора. Так как внутреннее трение вдоль собственных осей резонатора изменяется с температурой неодинаково (из-за различных локальных нарушений поверхности, объемных дефектов и т.п.), то, согласно зинеровской теории неупругости, температурные зависимости собственных частот также будут различаться. Это приводит к температурной зависимости Δf (рис.3), что ограничивает возможность уменьшения расщепления собственных частот массовой балансировкой, которая проводится только при одной температуре. Поэтому массовую балансировку следует рассматривать как предварительную стадию, в ходе которой расщепление собственных частот снижают до 0.003-0.005 Гц.

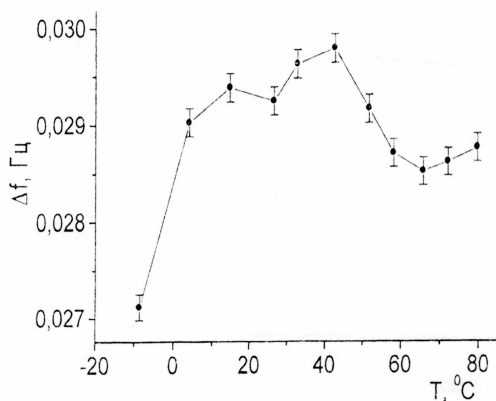


Рис.3. Температурная зависимость расщепления собственных частот

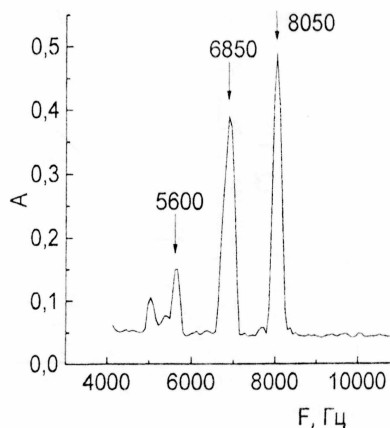


Рис.4. Спектр собственных частот резонатора ВТГ диаметром 30 мм

Дальнейшее уменьшение Δf должно осуществляться электрическим методом путем приложения напряжений к электродам коррекции при работе ВТГ.

Рассмотрено устройство и работа стенда для исследования дрейфа стоячей волны в резонаторе ВТГ и методика проведения экспериментов. Стенд работает под управлением персонального компьютера, электронный блок управления содержит контур стабилизации амплитуды стоячей волны, контур фазовой автоподстройки частоты тактового генератора и контур подавления квадратуры колебаний. Стенд используется для измерения угловой зависимости скорости дрейфа стоячей волны и измерения масштабного коэффициента ВТГ.

Третья глава посвящена рассмотрению диссипативных процессов на поверхности и в объеме кварцевого стекла и алюминиевых сплавов.

Механическая обработка кварцевого стекла сопровождается интенсивным образованием и развитием микротрещин, возникновением пластических деформаций и сдвиговых напряжений в приповерхностных слоях материала. В результате формируется нарушенный поверхностный слой, свойства которого отличаются от свойств самого твердого тела. Интенсивность внутреннего трения в поверхностном слое на несколько порядков выше, чем в объеме, и оно обусловлено другими диссипативными процессами. Затухание в нарушенном слое связано с изменением температуры поверхностных микрочастиц кварца, приводящим к возникновению локальных тепловых потоков, конформацией молекул поликремниевых кислот, а также с диффузионным движением кончиков поверхностных микротрещин. Для удаления нарушенного слоя и повышения добротности резонаторов в диссертации разработан новый метод химической обработки поверхности кварцевого стекла.

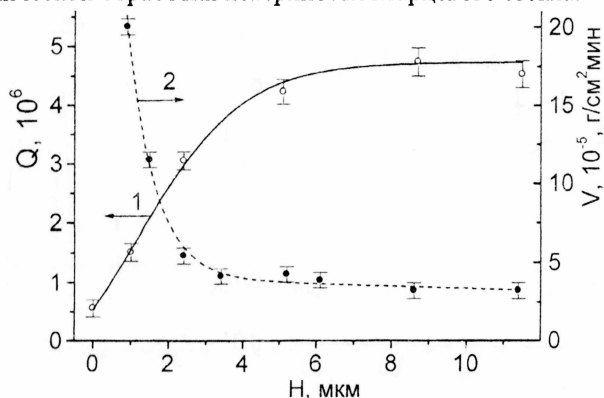


Рис.5. Зависимость добротности резонатора (1) и скорости растворения кварцевого стекла (2) от глубины удаленного нарушенного слоя

Рис.5 показывает изменение добротности резонатора и скорости растворения кварцевого стекла в зависимости от глубины удаляемого нарушенного слоя. Наибольшие изменения этих параметров происходят при удалении верхней слабосвязанной зоны поверхностного слоя толщиной ~2 мкм при общей толщине нарушенного слоя 8-10 мкм. Высокая эффективность химической обработки достигнута введением в обрабатывающие растворы поверхностно-активных веществ, которые позволяют эффективно удалять с поверхности стекла продукты травления.

Эффективность разработанной технологии подтверждается данными по изменению добротности резонаторов до и после химической обработки, приведенными в табл.1.

Таблица 1.

Результаты удаления нарушенного слоя химическим способом

№ рез.	Марка стекла	Добротность, 10^6		Внутреннее трение в поверхностном слое, $Q_S^{-1} = Q^{-1} - Q_{CH}^{-1}$	Соотношение внутреннего трения в поверхностном слое и в объеме, $Q_S^{-1}/Q_{CH}^{-1}, \%$
		До х/о, Q	После х/о, Q_{CH}		
2	КУВИ	12.5	15.1	$2 \cdot 10^{-8}$	30
4	КУ-1	0.85	2	$70 \cdot 10^{-8}$	140
9	КС4В	2.6	5.1	$20 \cdot 10^{-8}$	100
28	Р	1.2	14.6	$75 \cdot 10^{-8}$	1100
29	Р	12	22.3	$4 \cdot 10^{-8}$	90
31	Р	2	15.1	$40 \cdot 10^{-8}$	600
32	МГУ	9.1	20.2	$6 \cdot 10^{-8}$	120
35	Р	9	19.3	$6 \cdot 10^{-8}$	120
38	Р	9.7	16.1	$4 \cdot 10^{-8}$	65
40	МГУ	0.55	0.7	$4 \cdot 10^{-7}$	30

Видно, что соотношение интенсивностей внутреннего трения в нарушенном поверхностном слое и в объеме кварцевого стекла колеблется от 30% до 1100% (табл.1). Выполненные эксперименты по глубокому химическому травлению кварцевого стекла показали, что увеличенная шероховатость поверхности (в пределах десятков мкм) сама по себе не снижает добротность резонатора, если нарушенный слой отсутствует. То есть для достижения высокой добротности резонатора необязательно достижение на финишном этапе механической обработки оптически полированной поверхности, если удаление нарушенного слоя проводится разработанным химическим методом. Этот вывод подтверждается высоким значением добротности резонаторов, прошедших шлифовку поверхности в

качестве финишного этапа мехобработки и химическое травление. Разработанная технология химического удаления нарушенного поверхностного слоя позволяет упростить и удешевить процесс механической обработки резонатора за счет отказа от операции полировки его поверхности. Величина шероховатости поверхности резонатора ограничивается только особенностями нанесения металлического проводящего покрытия.

Установлен механизм влияния адсорбции паров атмосферной воды на добротность резонаторов из кварцевого стекла. Даже при кратковременном пребывании резонатора на воздухе на его поверхности возникает гидратный слой, приводящий к двум диссипативным процессам: образованию адсорбционных комплексов с координационной связью и механически инициированной десорбции молекул воды, связанных со структурой кварцевого стекла молекулярными и водородными связями. Концентрация молекул воды на поверхности стекла определяется адсорбционным равновесием молекул воды в газовой фазе и в адсорбционном слое, поэтому добротность резонатора зависит от остаточной концентрации молекул воды над его поверхностью.

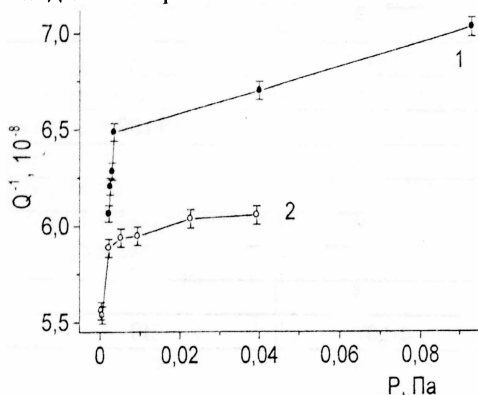


Рис. 6. Зависимость внутреннего трения в резонаторе от давления остаточного газа: 1 – исходное состояние; 2 – после 10 дней в вакууме

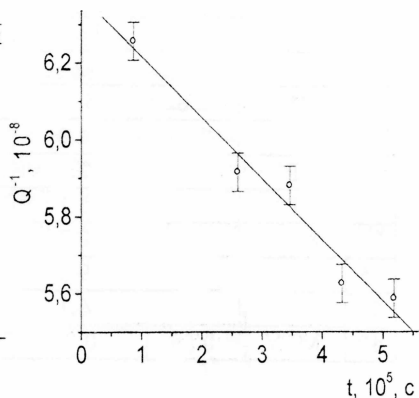


Рис. 7. Зависимость внутреннего трения от времени пребывания резонатора в вакууме

На рис. 6 показаны зависимости внутреннего трения в полусферическом резонаторе от давления остаточного газа, измеренные при комнатной температуре для резонатора, предварительно хранящегося на воздухе (1), и после 10-дневного пребывания в вакууме (2). При давлении остаточного газа свыше $\sim 3,5 \cdot 10^{-3}$ Па скорость сорбции молекул воды на активных центрах

поверхности кварцевого стекла гораздо выше скорости десорбции, монослой полностью сформирован и вносимое гидратным слоем затухание постоянно и не зависит от давления; при этом рост внутреннего трения с повышением давления связан только с газовым демпфированием. При давлении меньше $\sim 3.5 \cdot 10^{-3}$ Па внутреннее трение зависит от степени заполнения монослоя и поэтому крутизна зависимости $Q'(P)$ резко возрастает. В целом вид зависимости $Q'(P)$ соответствует изотерме адсорбции микропористого твердого тела, что согласуется с современными представлениями о структуре поверхности кварцевого стекла.

Из рис.6 видно, что внутреннее трение зависит и от времени пребывания резонатора в вакууме. Рис.7 показывает эту зависимость, измеренную при давлении $3.5 \cdot 10^{-3}$ Па. Показано, что этот эффект связан с существованием на поверхности кварцевого стекла адсорбционных комплексов с координационной связью. В диссертации продемонстрировано резкое увеличение добротности резонатора при вакуумном прогреве при температуре 200°C , когда происходит разрушение этих комплексов, что однозначно подтверждает установленный механизм диссипативного процесса.

Уменьшение поверхностного внутреннего трения впервые позволило изучить слабые диссипативные процессы в структуре кварцевого стекла при средних температурах и раскрыть их закономерности. Показано, что в области средних температур, которые являются рабочими для ВТГ, добротность кварцевого стекла ограничивается двумя фундаментальными процессами: высокотемпературным краем области структурной релаксации и высокотемпературным фоном внутреннего трения. Максимум добротности в килогерцовом диапазоне частот достигается при $\sim 100^{\circ}\text{C}$ (рис.8) и возрастает с уменьшением частоты колебаний.

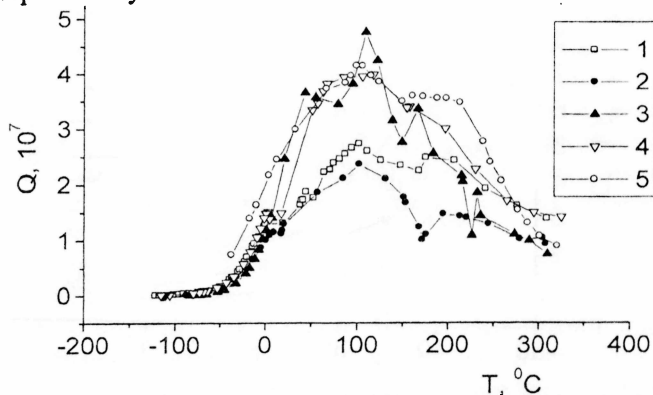


Рис.8. Добротность некоторых марок кварцевых стекол на частоте ~ 30 кГц:
1 – Suprasil-300; 2 – КУВИ; 3 – P; 4 – KC4B; 5 – КУ-1

Установлены факторы, определяющие максимальную добротность кварцевого стекла. Экспериментально подтверждена корреляция между внутренним трением в кварцевом стекле и его структурной температурой. Этот параметр характеризует структуру стекла, которое в нормальных условиях является неравновесной переохлажденной жидкостью. Структурная температура стекла соответствует температуре равновесного расплава с такими же концентрациями структурных единиц (колец с разным числом членов и т.п.). Для определения структурной температуры кварцевого стекла в диссертации предложен новый метод, который основан на свойствах полос 490 и 606 см^{-1} его спектра комбинационного рассеяния. Сделан вывод, что структура кварцевых стекол с низкой структурной температурой наиболее близка к случайной сетке. Высокотемпературный край области структурной релаксации для таких стекол спадает резко, обеспечивая более высокую их добротность при температуре ниже 0°C (рис.9). Показано, что наилучшими характеристиками обладает кварцевое стекло марки КУ-1, которое имеет более низкую температуру размягчения и структурную температуру из-за большой концентрации ОН-групп.

Экспериментально установлено, что внутренние напряжения в кварцевом стекле, возникающие при его производстве и механической обработке, существенно снижают добротность резонаторов [до $(1-2) \cdot 10^6$]. Показано, что уменьшение добротности не зависит от состава кварцевого стекла и в той или иной мере присуще большинству резонаторов. Для снятия внутренних напряжений в кварцевом стекле обычно используют отжиг, однако термообработка напряженных стекол может приводить к разрушению их структуры за счет термофлуктуационных разрывов силоксановых связей.

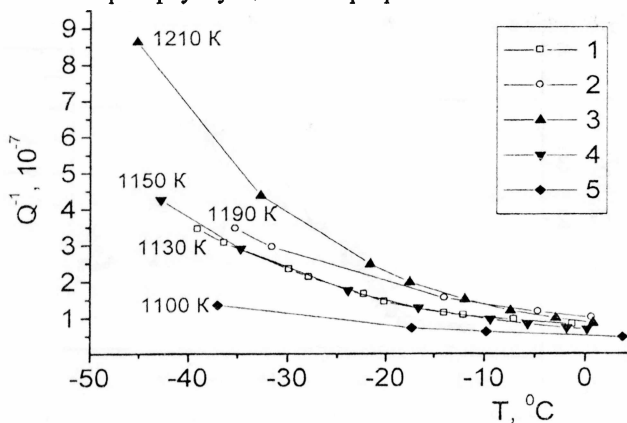


Рис.9. Внутреннее трение в кварцевых стеклах с различной структурной температурой: 1 – Suprasil-300; 2 – КУВИ; 3 – Р; 4 – КС4В; 5 – КУ-1

В результате при отжиге протекают два параллельных процесса: снятие внутренних напряжений и увеличение добротности, а также увеличение концентрации дефектов сетки кварцевого стекла, приводящих к развитию субмикротрещин и к росту внутреннего трения. Моделирование этих параллельных процессов показало, что концентрация структурных дефектов, образующихся при отжиге, резко возрастает с увеличением начального уровня внутренних напряжений. Образование дефектов наиболее интенсивно протекает на поверхности кварцевого стекла, где к исходным внутренним напряжениям в материале добавляются напряжения, созданные при механической обработке.

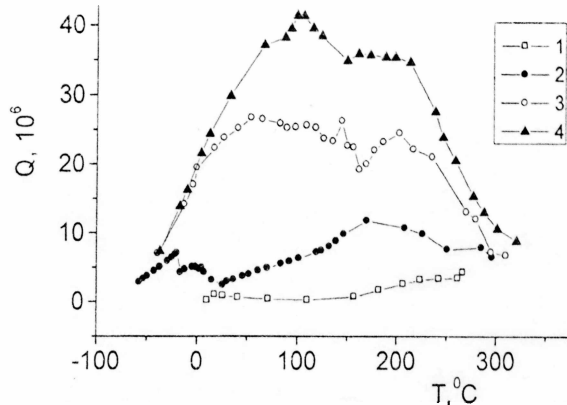


Рис.10. Добротность резонатора: 1–исходное состояние; 2 – после трех отжигов; 3 – после полировки; 4 – после дополнительного отжига

На рис.10 приведены экспериментальные данные, показывающие исходную добротность резонатора из кварцевого стекла КУ-1 (1), добротность после трех 4-часовых отжигов при температуре 920°C (2), добротность после удаления слоя толщиной 0.5 мм с поверхности резонатора механической полировкой (3) и добротность после дополнительного отжига (4 часа, 900°C) (4). Хорошо видно, что наиболее резкий скачок добротности имел место после удаления поверхностных дефектов, образовавшихся при отжиге.

На рис.11 приведены микрофотографии шлифованной поверхности резонаторов с низким (А) и высоким (Б) начальным уровнем внутренних напряжений в кварцевом стекле после 10-часового отжига при 920°C . Структура поверхности ненапряженного кварцевого стекла после отжига имеет вид, типичный для травленной поверхности силикатных стекол. Отжиг не привел к формированию заметных поверхностных дефектов.

Напротив, поверхность напряженного кварцевого стекла после отжига

приобрела ярко выраженный трещиноватый характер. Возрастание внутреннего трения в такой структуре связано с механически инициированным ростом микротрещин при колебаниях и рассеянием энергии колебаний в увеличенном по объему трещиноватом слое.

Таким образом, для достижения минимального внутреннего трения в кварцевом стекле, необходимо отжечь заготовку резонатора (изготовленную с припуском ~1 мм), далее провести финишную механическую обработку и затем еще один отжиг для устранения напряжений в поверхностном слое, созданных в ходе механической обработки. Эффективность разработанной технологии иллюстрируется данными, приведенными в табл.2. Ее внедрение позволило довести выход годных резонаторов до 85-90%.

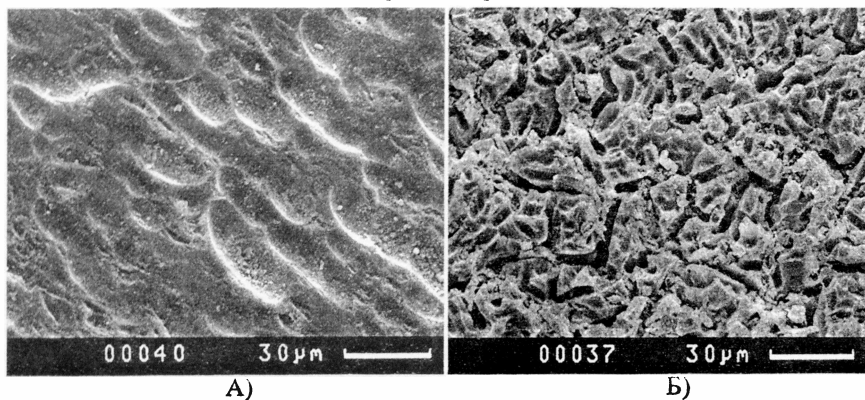


Рис.11. Фрагменты шлифованной поверхности кварцевого стекла КУ-1 с низким (А) и высоким (Б) уровнем внутренних напряжений после отжига

Таблица 2.

Добротность полусферических 30-мм резонаторов и их заготовок

№ заготовки	Добротность заготовки, 10^6	№ резонатора	Конечная добротность резонатора, 10^6
1	2.0	M184	22.6
2	1.3	M188	16.5
3	1.7	M189	12.1
4	1.4	M191	16.8
5	2.6	M193	16.3
6	2.1	M194	15.4
7	1.9	M195	11.8
8	1.7	M200	12.1
9	1.3	M202	20.3
10	1.3	M203	20.8

Учитывая, что в ряде дешевых ВТГ низкой точности используют металлические резонаторы, в последнем разделе главы 3 рассматриваются экспериментальные данные по внутреннему трению в таких резонаторах. В диссертации раскрыты закономерности внутреннего трения в сплаве Al-Sc. Показано, что наилучшее подавление дислокационного внутреннего трения имеет место в эвтектическом сплаве Al-0.52%Sc. Сплав этого состава может быть использован для изготовления резонаторов ВТГ невысокой точности.

Четвертая глава посвящена разработке метода балансировки полусферических резонаторов. Необходимость балансировки связана с наличием массового дисбаланса резонаторов после их изготовления. Массовый дисбаланс приводит к появлению расщепления собственных частот, неоднородному (по углу) снижению добротности, зависимости дрейфа стоячей волны от вибрации основания и от вращения резонатора в плоскости ножки.

Распределение массы оболочки вдоль азимутального угла ϕ (считая, что вся она сосредоточена вблизи кромки) может быть описано рядом Фурье

$$M(\phi) = M_0 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i \cos i(\phi - \phi_i), \quad (1)$$

где M_i и ϕ_i – амплитуда и фаза i -й гармоники массового дефекта оболочки.

Согласно теории, разработанной в работах В.Ф.Журавлева, Ю.К.Жбанова, Н.Е.Егармина, при возбуждении в несбалансированном полусферическом резонаторе стоячей волны (в общем случае n -й моды), будет иметь место как продольная, так и поперечная вибрация его ножки. Гармоника ряда (1) с номером n будет определять продольную вибрацию ножки резонатора, гармоники с номерами $(n+1)$ и $(n-1)$ – ее поперечную вибрацию, а гармоника с номером $2n$ – расщепление собственных частот резонатора. Вибрация ножки и рассеяние энергии колебаний в опорах являются наиболее неприятными следствиями несбалансированности резонатора. Для 2-й моды колебаний в диссипацию вносят вклад три первые гармоники массового дефекта оболочки и образованная при этом разносторонность вызывает существенный систематический дрейф стоячей волны. Это делает необходимым проведение балансировки резонатора по первым четырем гармоникам массового дефекта. В диссертации сделана оценка необходимого уровня балансировки. Показано, что при $M_{1,2,3} < 30-60$ мкг амплитуда скорости систематического дрейфа, связанного с массовым дисбалансом, не превышает 1 град/ч.

Предложен новый способ измерения параметров массового дисбаланса, которые определяются путем измерения продольной и поперечной вибрации ножки резонатора при изгибных колебаниях его оболочки (рис.12).

Резонатор 1, с предварительно уменьшенным до 0.001-0.005 Гц расщеплением собственных частот, упруго закреплен за **МЕТУ** концов

ножки, а к другому концу присоединен пьезоэлектрический датчик 2. Датчик имеет круговую диаграмму чувствительности и измеряет амплитуду вибрации ножки вдоль осей X и Z.

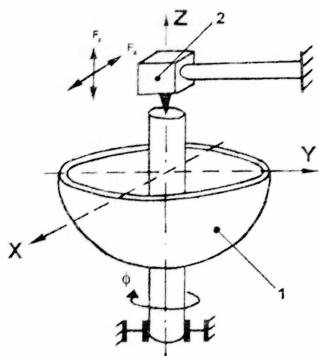


Рис.12. К определению 1+3-й гармоник массового дефекта резонатора

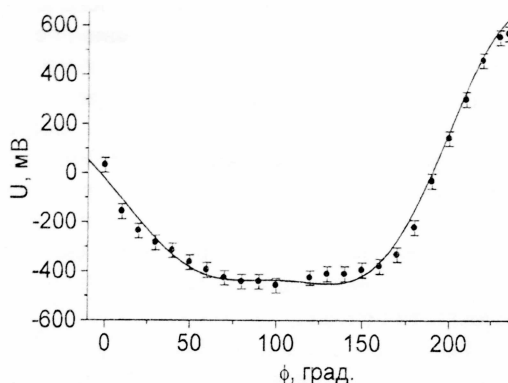


Рис.13. Зависимость сигнала пьезодатчика от угла поворота резонатора

Амплитуда сигнала пьезоэлектрического датчика U пропорциональна амплитуде колебаний ножки и при возбуждении стоячей волны вдоль направления X (когда $\theta = 0$) равна

$$U = K_1 [3M_1 \cos \phi_1 + M_3 \cos 3\phi_3] + K_2 [M_2 \cos 2\phi_2]. \quad (2)$$

Коэффициенты K_1 и K_2 , устанавливающие связь между напряжением и вибрацией, определяют экспериментально.

Если повернуть резонатор вокруг оси на некоторый угол ϕ (рис.12), то при повторном возбуждении стоячей волны вдоль направления X величины всех углов в (2) изменятся на этот угол поворота и тогда:

$$U(\phi) = K_1 [3M_1 \cos(\phi + \phi_1) + M_3 \cos 3(\phi + \phi_3)] + K_2 [M_2 \cos 2(\phi + \phi_2)] = U_{01} \cos(\phi + \phi_1) + U_{02} \cos 2(\phi + \phi_2) + U_{03} \cos 3(\phi + \phi_3) \quad (3)$$

Формула (3) показывает зависимость амплитуды сигнала пьезодатчика от угла поворота резонатора ϕ . Такая сравнительно простая зависимость получается именно благодаря измерению проекции поперечной вибрации ножки на направление стоячей волны. Пример экспериментальной зависимости $U(\phi)$, измеренной для полусферического резонатора диаметром 30 мм, приведен на рис.13. Отрицательным значениям U соответствует изменение фазы вибрации на 180° . Аппроксимируя экспериментальные точки функцией (3), определяют параметры $U_{01,02,03}$ и $\phi_{1,2,3}$. Для приведенного примера они составляют: $U_{01} = 550 \pm 12$ мВ; $\phi_1 = 88 \pm 1^\circ$; $U_{02} = 125 \pm 10$ мВ; $\phi_2 = 106 \pm 2^\circ$; $U_{03} = 63 \pm 10$ мВ; $\phi_3 = 6 \pm 3^\circ$.

В диссертации также экспериментально показано, что параметры 2-й гармоники массового дефекта могут быть определены измерением угловой зависимости скорости нарастания амплитуды стоячей волны при продольных колебаниях резонатора внешней переменной силой с частотой 2-й моды изгибных колебаний оболочки, и приведены данные, полученные этим методом.

В диссертации разработан метод удаления неуравновешенной массы потоком ионов аргона с энергией 1-1.5 кэВ. Несмотря на невысокую скорость распыления, ионное травление обеспечивает малую глубину структурных нарушений кварцевого стекла, что позволяет удалять неуравновешенную массу прямо с поверхности полусферической оболочки и отказаться от трудоемких в изготовлении балансировочных зубцов, что существенно упрощает и удешевляет весь технологический процесс. Рис.14 поясняет разработанный метод удаления неуравновешенной массы.

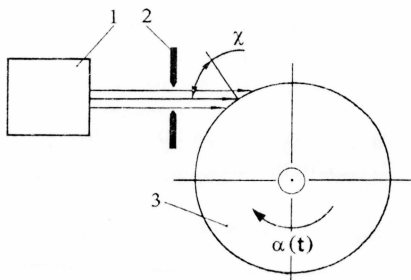


Рис.14.Распыление неуравновешенной массы потоком ионов

Поток ионов от источника 1 направляют под углом $\chi \approx 65^\circ$ через диафрагму 2 к поверхности вращающегося резонатора 3. Вращение осуществляется дискретно шаговым двигателем. Время ионного травления на каждом угле поворота резонатора α прямо пропорционально толщине слоя H , который необходимо удалить:

$$H(\alpha) = \frac{1}{R^2 \rho \sin(\pi/15)} \sum_{i=1}^3 M_i [1 + \sin i(\alpha + \phi_i)], \quad (4)$$

где R – радиус резонатора; ρ – плотность кварцевого стекла.

Задавая закон вращения двигателя $\alpha(t)$, регулируют глубину ионного распыления стекла по окружности резонатора, удаляя гармоники массового дефекта как одновременно, так и независимо друг от друга.

На рис.15 приведены данные, демонстрирующие эффективность разработанной технологии балансировки. Кривые 1 и 2 показывают амплитуду вибрации ножки полусферического резонатора диаметром 30 мм до и после балансировки в зависимости от угла поворота резонатора. Там же приведены данные о максимальной и минимальной добротности этого резонатора до и после балансировки и рассчитанная для него амплитуда

скорости систематического дрейфа стоячей волны. Достигнутые в результате балансировки характеристики резонатора приемлемы для большинства применений ВТГ. В качестве примера в табл.3 приведены результаты балансировки нескольких 30-мм полусферических резонаторов.

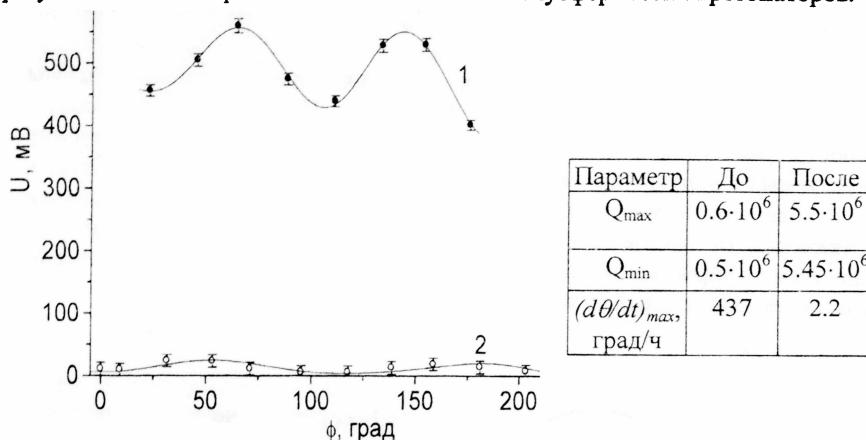


Рис.15. Зависимость амплитуды вибрации ножки от угла поворота резонатора до (1) и после (2) балансировки

Таблица 3.

Результаты балансировки 30-мм полусферических резонаторов

№ резонатора	До балансировки			После балансировки					
	Δf , Гц	M_1 , мкг	Q , 10^6	Δf , Гц	M_1 , мкг	M_2 , мкг	M_3 , мкг	Q , 10^6	ΔQ , %
L001	0.45	820	8.0	0.005	25	15	15	13.1	4.0
L002	0.05	760	6.8	0.004	15	20	15	9.7	5.1
L003	0.24	420	9.2	0.005	5	10	5	16.2	4.8
L004	0.33	1100	6.0	0.005	20	15	20	15.0	5.0
L005	0.56	630	6.2	0.003	20	20	10	13.5	2.7
L006	0.3	2700	5.8	0.003	20	15	10	17.6	3.0
M54	0.12	7470	5.3	0.005	30	25	20	14.4	4.5
M65	0.25	1200	6.3	0.001	20	15	20	15.6	6.1
M66	0.41	720	11.9	0.004	15	10	5	12.8	4.0
M68	0.05	4750	9.3	0.005	30	25	25	18.2	4.2

В табл.3 приведены данные по величинам гармоник массового дефекта (M_{1-3}), добротности (Q), расщеплению собственных частот (Δf) и разнородности (ΔQ). Хорошо видно, что в ходе балансировки начальный

массовый дисбаланс уменьшается более, чем в 100 раз, остаточные значения трех первых гармоник массового дефекта составляют 25-30 мкг. Практически для всех резонаторов конечная добротность превышает 10^7 , разнородность находится на уровне нескольких процентов, а остаточное расщепление собственных частот находится в пределах 0.001-0.005 Гц. Приведенные данные подтверждают пригодность разработанной техники и методики для балансировки полусферических резонаторов. На основе патента, выданного на разработанный способ балансировки (патент РФ №2147117), промышленно выпускается балансировочная машина «Микробаланс».

В пятой главе рассмотрены проблемы, связанные с внутренним трением в металлическом проводящем покрытии, которое наносится на поверхность полусферического резонатора для обеспечения эффективного функционирования емкостных преобразователей.

Проанализированы экранирующие свойства металлического покрытия, влияние внешних электрических цепей и сопротивления покрытия на затухание и дрейф стоячей волны. Показано, что при сопротивлении покрытия менее 10 кОм, его влияние на эволюцию стоячей волны не существенно.

Сформулированы требования к равномерности толщины металлического покрытия. Показано, что неравномерность толщины вызывает массовый дисбаланс оболочки резонатора и рассеяние энергии колебаний в опорах. Установлено, что 4-я гармоника массового дефекта покрытия (d_{f4}) приводит к дополнительному расщеплению собственных частот ($\Delta\tilde{f}$) и к дополнительному систематическому дрейфу:

$$\Delta\tilde{f} = \frac{d_{f4} f \rho_f}{h \rho_g}; \quad \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{\max} = \frac{3\pi f Q_f^{-1} Y_f d_{f4}}{4Y_g h}. \quad (5)$$

где h – толщина стенки резонатора; f – частота колебаний; Q_f^{-1} – внутреннее трение в тонкой пленке; Y_f, Y_g и ρ_f, ρ_g – соответственно модуль Юнга и плотность тонкой пленки и стекла.

Исследованы возможности нанесения металлического покрытия на поверхность полусферического резонатора различными методами: вакуумным испарением, магнетронным распылением, химическим и газofазным осаждением металла. Разработан метод металлизации, позволяющий получать покрытия с высокой осевой равномерностью их толщины.

Проведенное в диссертации рассмотрение природы диссипативных процессов, протекающих в тонких металлических пленках, показало, что внутреннее трение в них включает две основные составляющие.

- Внутреннее трение, связанное с низкой адгезией. Низкая адгезия

приводит к отслаиванию покрытия в микрообластях, а при наличии внутренних напряжений – к пластическим деформациям в покрытии. Этот вид внутреннего трения характерен в частности для пленок золота, которые имеют низкую адгезию к кварцевому стеклу. В диссертации впервые экспериментально продемонстрировано влияние адгезионного внутреннего трения на добротность резонатора. Покрытие наносилось на торцы цилиндрического резонатора, которые при продольных колебаниях практически не деформируются. В этом случае тонкая пленка испытывает только отрывные нагрузки и вносимое ею внутреннее трение обусловлено лишь адгезией к подложке. На рис.16 приведена температурная зависимость внутреннего трения, вносимого тонкой пленкой с низкой адгезией. По оси ординат указано разностное внутреннее трение:

$$\Delta Q_f^{-1} = Q^{-1} - Q_g^{-1}, \quad (6)$$

здесь Q^{-1} - внутреннее трение в резонаторе с покрытием, а Q_g^{-1} – без покрытия.

Интенсивность области адгезионного внутреннего трения и положение ее максимума на температурной оси зависят от толщины покрытия и условий его осаждения.

- Внутреннее трение, связанное с движением дислокаций. Показано, что доминирующую роль играет движение зернограницных дислокаций, которое имеет место на границах зерен. Интенсивность дислокационного внутреннего трения зависит от внутренних напряжений в покрытии, которые снижают критическое напряжение сдвига дислокаций. Этот вид внутреннего трения характерен для конденсатов тугоплавких металлов, которые имеют высокий уровень внутренних напряжений. Хотя внутреннее трение, вносимое таким покрытием, может быть снижено за счет уменьшения толщины металлической пленки, его уровень достаточно велик.

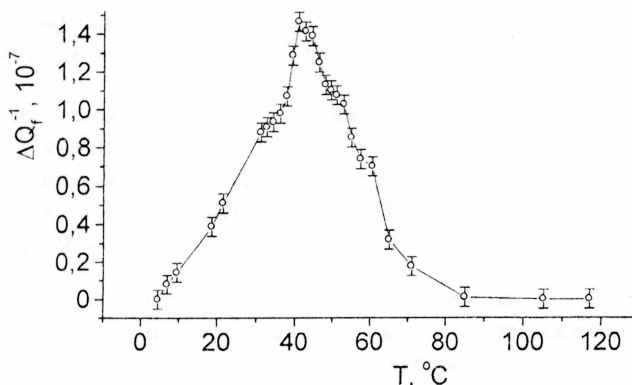


Рис.16. Внутреннее трение, вносимое тонкой пленкой с низкой адгезией

Таблица 4.

Добротность резонаторов до (Q_g) и после (Q) напыления 200 Å пленки хрома

№ резонатора	$Q_g, 10^6$	$Q, 10^6$	$Q^{-1}-Q_g^{-1}, 10^{-8}$
M1/20	7.4	4.7	8
M3/20	8.4	5.8	5
M8/20	2.6	2.3	5
M16/20	5.0	4.0	5
M19/20	3.8	3.1	6

В качестве примера в табл.4 приведены данные по изменению добротности полусферических резонаторов при напылении тонкой (~200 Å) пленки хрома. Внесенное таким покрытием внутреннее трение составляет $(5-8) \cdot 10^{-8}$. Кроме достаточно высокого уровня внутреннего трения, к недостаткам тонких пленок хрома следует отнести и высокую скорость их окисления с потерей проводимости, а также возможное изменение механических свойств пленок за счет релаксации внутренних напряжений.

В диссертации показано, что наиболее перспективным является нанесение на полусферический резонатор золотых покрытий, но для достижения низкого уровня внутреннего трения адгезия таких пленок к кварцевому стеклу должна быть существенно улучшена.

Предложены два метода получения золотых покрытий с малой диссипацией.

- Нанесение тонких (до ~500 Å толщиной) пленок золота на подслой хрома. Получаемая при этом методе металлизации добротность резонатора достаточна для большинства применений ВТГ. В качестве примера на рис.17

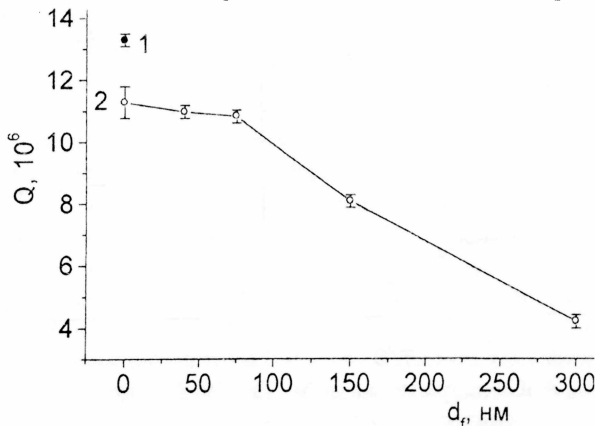


Рис.17. Зависимость добротности полусферического резонатора от толщины пленки золота, нанесенной на подслой хрома толщиной 100 Å

приведена зависимость добротности полусферического резонатора от толщины пленки золота, напыленной на подслоя хрома толщиной 100 Å. Точке 1 соответствует добротность резонатора без покрытия. После нанесения подслоя хрома добротность скачкообразно падает (точка 2). Дальнейшее снижение добротности связано с нанесением золотого покрытия, однако внутреннее трение, внесенное пленкой золота толщиной до 500 Å, мало и общее внутреннее трение, вносимое двухслойным покрытием, составляет $(1-2) \cdot 10^{-8}$. Эта технология позволяет решить поставленную задачу, однако нанесение сплошного сверхтонкого подслоя хрома требует тщательной полировки поверхности резонатора.

• Нанесение двухкомпонентных покрытий на основе золота. Цель введения второго компонента состоит в улучшении за его счет адгезии золотой пленки. Кроме того, введение примеси в чистый металл в умеренной концентрации закрепляет дислокации и снижает внутреннее трение. Поэтому в двухкомпонентной пленке на основе золота можно одновременно получить хорошую адгезию, химическую стабильность, низкие уровни внутренних напряжений и дислокационного внутреннего трения.

В диссертации изучены закономерности внутреннего трения в AuCu пленках и разработан новый метод нанесения металлического двухкомпонентного покрытия с малой диссипацией. В качестве примера на рис.18 показано влияние на добротность резонатора AuCu пленки толщиной 2000 Å, нанесенной на его шлифованную поверхность. Хотя добротность резонатора уменьшилась, при комнатной температуре она составляет $\sim 1.2 \cdot 10^7$, что отвечает требованиям по добротности, предъявляемым к резонаторам ВТГ.

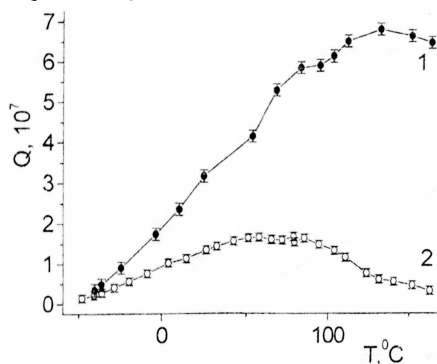


Рис.18. Влияние AuCu покрытия на добротность полусферического резонатора: 1 — резонатор без покрытия; 2 — резонатор с покрытием

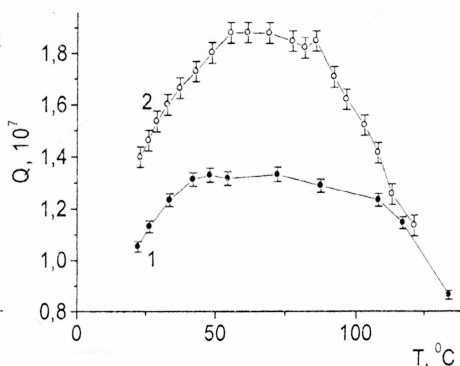


Рис.19. Добротность резонатора с AuCu покрытием до (1) и после (2) вакуумного прогрева

Уровень внутреннего трения в материале двухкомпонентного покрытия равен $\sim 7 \cdot 10^{-5}$, что близко к величине внутреннего трения в массивных металлах. Возможность нанесения сравнительно толстых металлических покрытий с малой диссипацией на шлифованную поверхность кварцевого стекла позволяет отказаться от полировки поверхности резонатора при его изготовлении и использовать наиболее полно преимущества разработанных в диссертации технологий.

В диссертации раскрыт механизм внутреннего трения, связанный с адсорбцией паров воды на поверхности тонких пленок хрома и золота. Показано, что внутреннее трение возникает при механически стимулированном перераспределении молекул воды, капиллярно сконденсированных в микропорах тонкой пленки. Для удаления этих сорбированных молекул необходимо прогревать собранные ВТГ в вакууме при температуре не менее 150°C . Рис.19 показывает существенное возрастание добротности металлизированного резонатора после вакуумного прогрева в течение 1 часа при этой температуре.

Использование комплекса разработанных технологий и методов позволяет производить резонаторы с характеристиками, достаточными для применения в ВТГ авиационной точности. Эти технологии существенно снижают себестоимость резонатора за счет использования недорогого кварцевого стекла и упрощения технологического процесса за счет отказа от изготовления балансировочных зубцов и полировки поверхности.

В шестой главе рассматриваются особенности разработки полусферических резонаторов для инклинометров забойных телеметрических систем на основе ВТГ, резонаторов, работающих на высоких модах изгибных колебаний, а также резонаторов ВТГ с плоским электродным узлом. Основная задача, которая при этом ставится, состоит в сочетании высоких технических характеристик резонаторов с их низкой себестоимостью.

Большое внимание уделяется разнесению собственных частот конструкции и частоты рабочей моды изгибных колебаний оболочки. Это необходимо, так как остаточный массовый дисбаланс вызывает малые колебания центра масс резонатора с частотой колебаний оболочки; если эта частота близка к одной из других собственных частот конструкции, то, вследствие резонанса, рассеяние энергии колебаний в опорах существенно возрастает, что сопровождается уменьшением добротности резонатора. Показано, что разнесение частоты 2-й моды изгибных колебаний оболочки и других собственных частот конструкции должно быть ~ 1 кГц. В связи с этим в диссертации рассматривается вопрос о расчете низкочастотного спектра собственных частот полусферического резонатора.

Общим недостатком известных из литературы методов расчета спектра

собственных частот полусферических резонаторов является почти полное отсутствие экспериментальных данных, подтверждающих точность проведенных расчетов. В связи с этим оценка точности результатов, получаемых различными расчетными методами, путем сравнения их с экспериментальными данными является актуальной задачей.

Автор сравнил результаты расчетов, выполненных разными расчетными методами с экспериментально измеренными спектрами собственных частот. Некоторые результаты представлены в качестве примера в табл.5, 6. Расчеты выполнены с помощью конечно-элементной (КЭМ) и аналитической (А) моделей, разработанных в ИПМех РАН, а также по разработанной в диссертации аналитической модели (Б).

Таблица 5.

Собственные частоты 30-мм полусферического резонатора
с внутренней крепежной ножкой

Вид колебания	Экспериментальное значение f , Гц	Результаты расчета					
		КЭМ		Модель А		Модель Б	
		f , Гц	ε , %	f , Гц	ε , %	f , Гц	ε , %
Кручение ножки	5600	5858	4.6	-	-	5310	5.2
Изгиб ножки	6850	6683	2.4	8294	21.1	6430	6.1
2-я мода изгибных колебаний оболочки	8050	7962	1.1	8458	6.2	7390	8.1
3-я мода изгибных колебаний оболочки	17340	16624	4.1	-	-	16570	4.4

Таблица 6.

Собственные частоты 30-мм полусферического резонатора
с двухсторонней крепежной ножкой

Вид колебания	Экспериментальное значение f , Гц	Результаты расчета			
		КЭМ		Модель Б	
		f , Гц	ε , %	f , Гц	ε , %
Кручение ножки	3750	4173	11.3	3920	4.5
Изгиб ножки	3200	3568	11.5	3260	1.9
2-я мода изгибных колебаний оболочки	4500	5403	20.1	4549	1.1
Колебание оболочки вокруг ножки	6875	6019	12.5	6150	10.5

(ε - отклонение расчетного значения от результатов эксперимента.)

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что точность расчета зависит от конструкции резонатора. Для резонатора простой конструкции (табл.5) наилучший результат получен с помощью конечно-элементной модели (ошибка менее 5%). Ошибка значений собственных частот, вычисленных по модели А, составила свыше 20%, а ошибка расчета по разработанной в диссертации модели Б не превысила 10%. В случае более сложной конструкции резонатора ошибка расчета по разработанной аналитической модели Б осталась той же (~10%), а погрешность расчета по конечно-элементной модели составила 12-20%. Таким образом, разработанный в диссертации аналитический метод расчета спектра собственных частот полусферического резонатора позволяет получить при разумных приближениях достаточно точный результат.

Различия в результатах расчетов и экспериментов связаны со следующими причинами.

- Неадекватное задание граничных условий. Зажим ножки в экспериментах не столь жесткий, как принимается в расчетах.
- В материале резонатора возможны внутренние напряжения, искажающие частотные компоненты. Сдвиг частот может при этом составлять несколько процентов.
- Ряд параметров (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) при расчетах полагают постоянными. В то же время они зависят от частоты и в пределах данного частотного диапазона изменяются на несколько процентов. Учет этих зависимостей затруднен, поэтому достижимая в подобных расчетах точность находится на уровне нескольких процентов, что достаточно с практической точки зрения.

В главе рассмотрены особенности разработки полусферических резонаторов, предназначенных для работы в высокомодовом ВТГ. Повышение номера моды колебаний приводит к росту изотропности свойств полусферического резонатора и, как следствие, к существенному уменьшению систематического и случайного дрейфа стоячей волны. Чтобы избежать существенного увеличения частоты колебаний резонатора и возрастания напряжений в материале, резонаторы таких ВТГ должны иметь увеличенный диаметр и малую толщину оболочки. Показано, что повышение номера моды колебаний на единицу требует увеличения диаметра резонатора примерно на 40%.

Стремление упростить конструкцию ВТГ и снизить его себестоимость привело к появлению ВТГ с плоским электродным узлом, действие которых основано на особенностях колебаний кромки полусферического резонатора: при изгибных колебаниях кромка движется не только перпендикулярно ножке, но и параллельно ей. Этот эффект позволяет разместить электроды на плоском электродном узле вблизи кромки резонатора, что упрощает всю

конструкцию ВТГ, снижает влияние газового демпфирования и позволяет металлизировать лишь небольшую часть поверхности резонатора. Конструкция такого ВТГ, разработанная в диссертации, защищена патентом РФ №2166734. Однако из-за небольшой площади электродов, резонаторы, предназначенные для работы в этих ВТГ, должны иметь высокую добротность ($\sim 2 \cdot 10^7$) и увеличенный диаметр оболочки, позволяющий получить площадь торцевой поверхности оболочки 350-400 мм².

Разработанные в диссертации научно-технологические основы позволяют создать рациональную конструкцию полусферического резонатора и технологический процесс его изготовления, обеспечивая необходимые параметры качества резонатора и его низкую себестоимость, что открывает перспективы широкого внедрения ВТГ в народное хозяйство в качестве высокоточных чувствительных элементов БИНС различного назначения.

ВЫВОДЫ

1. Развита теория внутреннего трения в кварцевом стекле при средних температурах. Установлено, что максимум добротности кварцевого стекла в килогерцовом диапазоне частот превышает $8 \cdot 10^7$ и достигается при $\sim 100^\circ\text{C}$.
2. Предложен новый метод определения структурной температуры кварцевого стекла, основанный на зависимости от структурной температуры интенсивностей пиков 490 и 606 см⁻¹ в его спектре комбинационного рассеяния. Впервые установлено, что кварцевые стекла с более низкой структурной температурой имеют более высокую добротность при температуре ниже 0°C , что связано с сужением области структурной релаксации.
3. Впервые показано, что внутренние напряжения в кварцевом стекле, возникающие в процессе его производства и при механической обработке, снижают добротность резонаторов до $(1-2) \cdot 10^6$. На основе модели отжига кварцевого стекла предложен новый метод термообработки резонаторов, позволяющий на порядок увеличить их добротность.
4. Развита теория внутреннего трения в поверхностном нарушенном слое кварцевого стекла, который образуется при его механической обработке. Показано, что при отсутствии нарушенного слоя увеличение шероховатости поверхности кварцевого стекла в пределах нескольких десятков микрон не снижает добротность резонатора. Предложен новый эффективный метод химического удаления нарушенного слоя, который позволяет отказаться от полировки поверхности резонатора при его изготовлении.
5. Развита теория внутреннего трения, вызванного образованием на

поверхности кварцевого стекла адсорбционных комплексов с координационной связью и механически инициированной десорбцией молекул воды, связанных со структурой стекла молекулярными и водородными связями. Определены условия дегидратации поверхности резонаторов.

6. Впервые разработана техника и методика балансировки полусферических резонаторов ВТГ, использующая ионное распыление неуравновешенной массы, при этом остаточная величина расщепления собственных частот достигает 0.001 Гц, остаточные значения трех первых гармоник массового дефекта не превышают 30 мкг, остаточная величина разнородности составляет в среднем 5%.
7. Развита теория внутреннего трения в тонких металлических пленках. Установлено влияние адгезии покрытия к подложке и внутренних напряжений на внутреннее трение в тонкой металлической пленке. Разработан новый метод нанесения двухкомпонентного AuCu покрытия с малой диссипацией на шлифованную поверхность кварцевого стекла.
8. Впервые установлен механизм внутреннего трения, возникающего при гидратации поверхности тонкой металлической пленки. Диссипация связана с механически инициированным перераспределением молекул капиллярно сконденсированной воды в порах тонкой пленки.
9. Разработаны и апробированы методы для измерения характеристик высокочастотных полусферических резонаторов, в частности, внутреннего трения, расщепления собственных частот и низкочастотного спектра собственных частот, которые могут быть успешно применены при производстве таких резонаторов.
10. Показано, что основная задача, которая решается при разработке резонатора ВТГ состоит в выборе геометрических размеров элементов резонатора, обеспечивающих разнесение рабочей частоты резонатора и других собственных частот конструкции на ~ 1 кГц. Точность расчета собственных частот резонатора, определяемых с помощью аналитических и конечно-элементных методов, составляет 5-10%.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Лунин Б.С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов – М.:МАИ, 2005.–224 с.
2. Лунин Б.С. Влияние параметров полусферического резонатора на дрейф волнового твердотельного гироскопа// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2004.–Т.47, №2.–С.31-36.
3. Лунин Б.С. Неупругие процессы в тонких пленках золота и меди, нанесенных на кварцевое стекло//Вестник Московского Университета.

Серия 2 – Химия.–2005.–Т.46, №4.С.220-226.

4. Lunin B.S. Problems and ways of development of hemispherical resonator gyroscope design//Proc. 12th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems–Saint Petersburg,2005.– P.311-312.
5. Патент 2166734 (РФ). Чувствительный элемент волнового твердотельного гироскопа/ Б.С.Лунин // Б.И.–2001.– №13.
6. Патент 2147117 (РФ). Способ балансировки полусферического резонатора волнового твердотельного гироскопа/ Б.П.Бодунов, В.М.Лопатин, Б.С.Лунин //Б.И.–2000.– №9.
7. Прецессия упругих волн во вращающемся теле/ И.В.Батов, Б.П.Бодунов, Б.С.Лунин и др.//Известия РАН. Механика твердого тела.–1992.–№4.–С.3-6.
8. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О механизме акустических потерь в гидроксिलированном поверхностном слое // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–2001.–Т.42, №2.–С.89-91.
9. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Влияние напряжений в кварцевом стекле на внутреннее трение // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.– 2003.–Т.44, №2.–С.108-114.
10. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Неупругие явления в поверхностном слое некристаллического твердого тела //Известия Тульского государственного Университета. Материаловедение. – 2002.– №3.–С.98-103.
11. Bodunov B.P., Lopatin V.M., Lunin B.S. Development of tineless fused quartz hemispherical resonator // Proc. 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation – Saint Petersburg, 1995.– Part II.– P.89-92.
12. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–2000.–Т.41, №3.–С.172-173.
13. Патент 2056038 (РФ). Полусферический резонатор из кварцевого стекла волнового твердотельного гироскопа/ Б.С.Лунин, И.В.Павлов //Б.И.–1996.– №7.
14. Патент 2025664 (РФ). Способ изготовления резонатора твердотельного волнового гироскопа/ И.В.Павлов, Б.С.Лунин // Б.И.–1994.– №24.
15. Low-cost hemispherical resonator for use in small commercial HRG-based navigation systems/B.P. Bodunov, V.M.Lopatin, B.S.Lunin et al. // Proc.4th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems – Saint Petersburg, 1997.– P.41-47.
16. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Внутреннее трение в кварцевом стекле при умеренных температурах//Вестник Московского Университета. Серия 2– Химия.–2000.–Т.41, №2.–С.93-94.
17. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Образование дефектов поверхности кварцевого

- стекла при термообработке//Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–2005.–Т.46, №6.–С.378-381.
18. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Влияние сорбции атмосферных газов и паров на внутренние трение в тонких пленках хрома // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–2004.–Т.45, №5.–С.297-299.
 19. Шаталов М.Ю., Лунин Б.С. Влияние внутренних напряжений на динамику волновых твердотельных гироскопов// Гироскопия и навигация.– 2000.– №1.–С.78-87.
 20. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О механизме внутреннего трения в поверхностном слое резонаторов из кварцевого стекла // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–2000.–Т.41, №4.–С.224-227.
 21. Лунин Б.С., Торбин С.Н., Филатов Ю.А. Внутреннее трение в сплавах Al-Sc// Материаловедение.–2000.–№9.–С.2-4.
 22. Shatalov M.Y., Lunin B.S. Influence of prestress on dynamic of hemispherical resonator gyroscope // Proc.6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems – Saint Petersburg, 1999.– P.5.1-5.10.
 23. Zhang Ting, Yu Bo, Jiang Chunqiao, Lunin B.S. Influence of the metallic coating on the Q-factor of the HRG resonator // Proc. International Symposium on Inertial Navigation Technology and Intelligent Traffic–Nanjing, 2004.– A18.–P.1-6.
 24. Lunin B.S., Shatalov M.Y. Investigation into low frequency spectrum of hemispherical resonators of vibrating gyroscopes // Proc. 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems–Saint Petersburg, 2003.– P.326-331.
 25. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Неупругие явления в гидратированном поверхностном слое кварцевого стекла // Журнал физической химии. – 2003.–Т.77, №4.– С.722-726.
 26. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Акустические потери в некоторых марках кварцевых стекол // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.– 2000.–Т.41, №5.– С.286-289.
 27. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Влияние сорбции атмосферных газов и паров на внутренние трение в тонких пленках золота // Журнал физической химии.– 2005.–Т.79, №1.– С.132-135.
 28. Влияние нарушенного поверхностного слоя на добротность резонаторов из кварцевого стекла/ Б.С.Лунин, С.Н.Торбин, М.Н.Данчевская и др. //Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.– 1994.–Т.35, №1.–С.24-28.
 29. Данчевская М.Н., Лунин Б.С., Торбин С.Н. Поверхностные диссипативные процессы в механических резонаторах из кварцевого стекла // Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–1997.– Т.38, №5.– С.309-311.

30. Лунин Б.С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов // Деп. рук. ВИНТИ. 2005.–№98-В2005.–246 с.
31. А.с. 1742230 (СССР). Способ подготовки шихты для получения кварцевого стекла/ М.Н.Данчевская, В.А.Крейсберг, Б.С.Лу닌 и др. //Б.И.–1992.– №23.
32. Fused silica used as material for acoustic resonators/M.N. Danchevskaya, B.S.Lunin, I.V.Batov et al. // Proc. X National Scientific and Technical Conference Glass and Fine Ceramics–Varna, 1990.–V.1.– P.196-198.
33. Лунин Б.С., Данчевская М.Н. Волновой твердотельный гироскоп // Конверсия. – 1994. – №6. – С.24-26.
34. Danchevskaya M.N., Lunin B.S., Torbin S.N. Structure of surface defect layer of silica glass resonators // Proc. XVII International Congress on Glass–Beijing, 1995.– V.4.– P.137-141.
35. Lunin B.S., Torbin S.N. Dependence of acoustic loss in silica glass resonators on hydroxylation of the surface // Proc. XIX International Congress on Glass–Edinburg, 2001.– P.756-757.
36. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Неупругие явления в поверхностном слое некристаллического твердого тела // Тез.докл. X Международной конференции по взаимодействию дефектов и неупругих явлениях в твердых телах – Тула, 2001.– С.27.
37. Данчевская М.Н., Лунин Б.С., Батов И.В. Акустические свойства кварцевых стекол//Тез. докл. VII Всесоюзной научно-технической конференции по кварцевому стеклу. – СПб., 1991. – С.45-46.
38. Lunin B.S., Torbin S.N., Smirnov V.N. Internal friction in silica glass.//XVIII International Congress on Glass – San Francisco, 1998. – P.36-41.
39. Lunin B.S., Danchevskaya M.N. Influence of micropore structure of surface on internal friction in silica glass // Proc. Conference on Fundamental of Glass Science and Technology–Vaxjo, 1997.– P.603-605.
40. Lunin B.S., Torbin S.N., Kreisberg V.A. Influence of heat treatment on internal friction in silica glass // Proc. XX International Congress on Glass–Kyoto, 2004.– P.108.
41. Целебровский А.Н., Лунин Б.С. Автоматический регулятор режима нагрева печи //Новые приборы, устройства, разработанные учеными МГУ.– М., 1984 – С.52-53.
42. Лунин Б.С., Куричева О.В. Методы изменения интенсивности ИК излучения // Деп. рук. ВИНТИ.1988.–№5673-В88.–8 с.
43. Определение пространственного распределения температуры в газе в условиях импульсного термохимического эксперимента/ О.В.Куричева, Б.С. Лунин, В.В.Тимофеев, Ю.Н.Житнев //Вестник Московского Университета. Серия 2 – Химия.–1988.–Т.29, №1.–С.58-61.

Подписано к печати **3.04.06** г. Заказ № **143** Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана