

77-303



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи.

ПЕТНИКОВ ВАЛЕРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ДАТЧИКОВ МАЛЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Специальность 01.04.03.

( Радиофизика, включая квантовую радиофизику )

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА · 1977

Работа выполнена на кафедре физики колебаний  
физического факультета МГУ.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор В.Б. Брагинский;  
кандидат физико-математических наук,  
с.н.с. В.И. Панов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В.Г. Веселаго;  
кандидат физико-математических наук  
В.С. Соломатин.

Ведущее предприятие: Институт радиотехники и электроники  
АН СССР.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1977 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1977 г.

в 15 часов 15 мин. в ауд. 5-19 на заседании специализированного Совета № I отделения Радиофизики в Московском Государственном Университете, шифр К-13/49. (Адрес: 117234, Москва, В-234, физический факультет МГУ, Ученому секретарю специализированного Совета № I отделения Радиофизики).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Ученый секретарь  
специализированного совета № I  
отделения радиофизики  
кандидат физико-математических  
наук, доцент

(Е.Р.МУСТЕЛЬ)

Актуальность темы. В ряде фундаментальных физических экспериментов обнаружение полезного эффекта сводится к регистрации малых сил, действующих на пробное тело. К таким опытам, например, относятся релятивистские гравитационные эксперименты на спутнике, свободном от сноса / 1,2 /, поиск гравитационных волн внеземного происхождения /3-5/, эксперименты по проверке принципа эквивалентности / 6 / и т.д. Разрешающая способность подобных экспериментов часто определяется чувствительностью приборов, регистрирующих малые механические колебания пробного тела. В связи с этим создание чувствительных датчиков малых колебаний является весьма актуальной задачей.

Цель работы. Настоящая диссертация посвящена исследованию радиофизических емкостных датчиков малых колебаний. Чувствительность таких датчиков ограничена тепловыми шумами в основном электрическом колебательном контуре и флуктуациями генератора накачки. Тепловой шум можно существенно уменьшить, используя в качестве колебательного контура сверхпроводящий резонатор (СПР), который обладает весьма малым активным сопротивлением и работает при низких температурах. Однако создание высокочувствительного датчика малых колебаний с СПР, работающего в диапазоне сверхвысоких частот и при низких температурах, требует разработки ряда приборов и устройств, которые либо принципиально отличаются от применявшихся ранее, либо превосходят их по параметрам. Кроме того, меняется и сама методика измерения. Одной из задач диссертационной работы являлось создание установки, на которой можно было бы опробовать эти приборы и устройства и разработать методику измерений, позволяющую получить высокую чувствительность.

1-1171



В реальных физических экспериментах необходимо учитывать обратное влияние системы регистрации на пробное тело - механический осциллятор. Это влияние может ограничивать минимально обнаружимую внешнюю силу, действующую на пробное тело. Анализ обратного влияния позволяет разработать оптимальную стратегию измерений, т.е. найти такой режим работы системы регистрации, которому отвечает минимально обнаружимая внешняя сила /1/. Такой анализ для различных вариантов радиофизических емкостных датчиков был проделан в диссертации.

Обратное влияние емкостного датчика на механический осциллятор уменьшается с увеличением частоты используемого радиосигнала и с понижением рабочей температуры. В связи с этим датчики с СПР весьма перспективны, т.к. в них одновременно достигается высокая чувствительность и уменьшается обратное влияние. Это позволит с их помощью регистрировать малую внешнюю силу. Вопросы применения СПР в емкостных датчиках рассматриваются в диссертационной работе.

Устранение влияния флуктуаций генератора накачки является отдельной проблемой в создании высокочувствительной радиофизической системы регистрации малых колебаний. Для диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) наиболее целесообразное ее решение связано с созданием системы стабилизации генератора на основе сверхпроводящего резонатора. Теоретическое и экспериментальное исследование генератора на туннельном диоде, стабилизированного по трехконтурной схеме с СПР, проведено в диссертационной работе.

Научное и практическое значение работы. Радиофизические емкостные датчики, разработанные в диссертации, являются в настоящее время наиболее чувствительными приборами для регистрации

малых механических колебаний. Они непосредственно могут быть применены в целом ряде физических экспериментов, например, при регистрации гравитационных волн, при изучении малых межмолекулярных сил типа Ван-дер-Ваальсовых и при исследовании нелинейной диссипации энергии механических колебаний.

Результаты исследования трехконтурного генератора на туннельном диоде с СПР дадут возможность создать генератор накачки СВЧ диапазона, способный конкурировать по стабильности с квантовыми генераторами. Такой генератор может быть использован как вторичный эталон частоты, как задающий генератор доплеровских локационных систем и т.п.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения и заключения.

Первая глава обзорная. В ней обсуждаются принципиальные классические и квантовые ограничения на минимально измеряемое механическое смещение и рассматриваются результаты научных исследований, посвященных различным методам регистрации малых механических колебаний. Завершает первую главу обзор работ, связанных с созданием высокостабильного генератора СВЧ диапазона.

Во второй главе проведен анализ обратного влияния и разработана оптимальная стратегия измерений в схемах емкостного датчика с регистрацией фазы и частоты. Установлено, что такие датчики не уступают по чувствительности рассмотренным ранее емкостным индикаторам с регистрацией амплитуды /6/ и в то же время обладают значительно меньшим обратным динамическим влия-

нием. Это позволяет осуществить оптимальный режим измерений без сильного динамического влияния, что значительно упрощает проведение тонких физических экспериментов.

Во второй главе также рассмотрены методика измерения, обратное влияние и оптимальная стратегия для радиофизических емкостных датчиков со сверхпроводящим резонатором. Выведенные в этой главе соотношения показывают, что применение высокодобротных СПР позволяет использовать в емкостных датчиках свойства колебательных систем с большой постоянной времени  $\tau$ , таким образом, в  $\sqrt{\tau_e^*/\hat{\tau}}$  раз уменьшить минимально обнаружимую с их помощью силу  $[F_0]_{\min}$ . (здесь  $\hat{\tau}$  - время измерения;  $\tau_e^*$  - время релаксации электрических колебаний в СПР,  $\hat{\tau} \ll \tau_e^*$ ). Величина  $\tau_e^*$  принципиально не ограничена и определяется лишь современным уровнем экспериментальной техники. Следовательно, существует значительный резерв в увеличении чувствительности радиофизических датчиков со сверхпроводящими резонаторами.

Полученные во второй главе результаты дают возможность провести сравнительный анализ различных методов измерений малых колебаний с помощью емкостных датчиков. Этот анализ показывает, что величина  $[F_0]_{\min}$ , во-первых, уменьшается с ростом частоты используемого радиосигнала и с понижением рабочей температуры, и, во-вторых, она практически не зависит от метода измерений, если  $\hat{\tau} \approx \tau_e^*$ .

В третьей главе диссертации описана экспериментальная установка и приведены результаты измерений малых колебаний механической мембраны с помощью емкостного датчика. Роль основного колебательного контура в датчике выполнял коаксиальный

сверхпроводящий ниобиевый резонатор с частотой собственных колебаний 760 мГц и добротностью  $10^5$ . Емкость между центральным стержнем СПР и его крышкой (малые колебания которой регистрировал датчик) являлась рабочей емкостью. Емкостной зазор был равен 6,5 мкм.

Калибровка смещения крышки резонатора - механической мембраны производилась при помощи электростатических сил. Для этого к крышке резонатора крепилась толстая ниобиевая подложка с приклеенной пластиной фольгированного стеклотекстолита. Зазор между пластиной и мембраной составлял 40 мкм. На пластину подавалось постоянное напряжение от источника, собранного на батареях, и переменное напряжение с частотой 1820 Гц от стандартного звукового генератора. Возникающая при этом сила кулоновского притяжения вызывала калиброванные механические колебания крышки резонатора.

Для уменьшения влияния акустических и сейсмических помех СПР емкостного датчика помещался в откачиваемый латунный стакан и подвешивался там на антисейсмическом фильтре.

Основным элементом генератора накачки является высокочастотный блок стандартного генератора ЧI - II с отключенной цепью автоподстройки. Стабилизация генератора производилась затягиванием по трехконтурной схеме со сверхпроводящим резонатором. Коэффициент стабилизации был равен  $= 1,5 \cdot 10^3$ .

Мощность с генератора накачки подавалась в резонатор датчика через регулируемую индуктивную связь, причем частота генератора совпадала с наиболее крутым участком его резонансной кривой. Модулированный сигнал с СПР через другую индуктивную связь поступал на полосковый балансный смеситель, собранный

на обращенных туннельных диодах.

Для регистрации сигнала на выходе смесителя был разработан низкошумящий транзисторный усилитель с полосой 1 гц. Чувствительность усилителя по уровню собственных шумов была  $\approx 2 \cdot 10^{-9}$  в. После усиления сигнал детектировался и поступал на RC цепь с постоянной времени 3 сек. На выходе сигнал фиксировался на ленте самописца.

Статистическая обработка результатов измерений показала, что минимально регистрируемая амплитуда механических колебаний мембраны на уровне  $\sigma$  была равна  $1,5 \cdot 10^{-15}$  см. ( $\sigma$  - стандартное отклонение). Этот результат в 10 раз меньше абсолютного и в 30 раз меньше относительного механического смещения, измеренного до настоящего времени. Метрологическая точность измерений, обусловленная относительной ошибкой калибровки, составляла  $\approx 30\%$ .

Достигнутая чувствительность определялась флуктуациями генератора накачки, вызванными акустическими и сейсмическими помехами. Дальнейшее увеличение чувствительности установки может быть получено при использовании более стабильного генератора.

Разработке такого генератора посвящена четвертая глава диссертационной работы. В ней рассмотрена возможность применения трехконтурного метода стабилизации частоты, предложенного в работах / 7,8 /, для стабилизации генератора на туннельном диоде с помощью сверхпроводящего резонатора. Туннельный диод обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими активными элементами, используемыми в высокостабильных генераторах. Это, прежде всего, возможность работы при температуре  $4 + 2^\circ\text{K}$ ,

низкий уровень собственных шумов, малое потребление энергии, устойчивость к воздействию излучений.

В четвертой главе приведены расчетные графики зависимости коэффициента стабилизации  $S_1$  трехконтурного генератора на туннельном диоде от добротности СПР при различных связях между контурами. Рассмотрены вопросы устойчивости такого генератора и влияние расстройки между контурами. Проведенные исследования указывают пути повышения величины  $S_1$  и позволяют оценить ее предельное значение при заданной добротности сверхпроводящего резонатора.

В этой же главе приведено описание первой опытной конструкции генератора на туннельном диоде, стабилизированного по трехконтурной схеме с СПР. Экспериментальное исследование ее параметров подтвердило теоретические расчеты.

Полученные результаты дали возможность сформулировать ряд рекомендаций по улучшению конструкции исследуемого генератора и по оптимизации режима его работы. При добротности СПР  $Q_e \geq 10^9$  выполнение этих рекомендаций позволит в принципе создать генератор со стабильностью частоты  $10^{-15}$ .

Приложение к диссертации посвящено коаксиальным инобиевым сверхпроводящим резонаторам с большой сосредоточенной емкостью. Приведенные экспериментальные исследования показывают, что добротность  $Q_e$  таких резонаторов определяется диэлектрическими потерями в емкостном зазоре. Полученные соотношения позволяют оценить предельно возможную величину  $Q_e$ , которая обусловлена поверхностным сопротивлением сверхпроводника и резко возрастает с уменьшением температуры.

Обнаружено также, что существует определенное критическое значение электрического поля  $E_{\text{макс}}$  в зазоре резонатора, при котором СПР нагружается автоэмиссионным током. Это приводит к резкому снижению их добротности. Величина  $E_{\text{макс}}$  зависит от технологии обработки внутренней поверхности резонатора и имеет максимальное значение  $\approx 29$  МВ/м у СПР, покрытых защитной оксидной пленкой. (Собственная частота  $\omega_e$  исследуемых резонаторов была около 1 ГГц).

В приложении рассмотрена также возможность применения высокочастотного СПР в качестве резонатора - фильтра для уменьшения влияния флуктуаций генератора накачки в емкостном датчике малых колебаний. Показано, что коэффициент фильтрации равен  $K_{\text{ф}} = \omega_e / 2Q_e \omega_{\text{мех}}$ , где  $\omega_{\text{мех}}$  - частота механических колебаний.

#### Основные результаты диссертационной работы:

1. Создана установка на основе емкостного датчика со сверхпроводящим резонатором, позволяющая регистрировать смещение металлической мембраны  $1,5 \cdot 10^{-15}$  см с частотой 1820 Гц. Этот результат в 10 раз меньше абсолютного и в 30 раз меньше относительного механического смещения, измеренного до настоящего времени. В тракте выделения сигнала использован камертонный фильтр с полосой 1 Гц и интегрирующая цепочка с постоянной времени 3 сек. Даны рекомендации по дальнейшему увеличению чувствительности созданного радиофизического индикатора малых колебаний.

2. Проведен анализ обратного влияния и получены соотношения оптимальной стратегии измерений для емкостных датчиков с

регистрацией фазы и частоты. Установлено, что такие датчики обладают малым обратным динамическим влиянием.

3. Подробно рассмотрены методика измерения, обратное влияние и оптимальная стратегия для радиофизического индикатора малых колебаний со сверхпроводящим резонатором /СПР/. Показано, что применение высокочастотных СПР дает возможность существенно уменьшить минимальную силу, регистрируемую с помощью радиофизического индикатора.

4. Теоретически исследован генератор накачки на туннельном диоде с СПР, стабилизированный по трехконтурной схеме. Приведены оценки предельного значения коэффициента стабилизации при заданной добротности третьего контура и указаны пути повышения этого коэффициента. Экспериментальное исследование первой опытной конструкции такого генератора подтвердило теоретические расчеты.

5. Показано, что стабильность частоты трехконтурного генератора на туннельном диоде в принципе может достигать величины  $10^{-15}$ . Даны практические рекомендации по реализации такой стабильности.

6. Проведено экспериментальное исследование характеристик коаксиальных сверхпроводящих резонаторов с большой сосредоточенной емкостью. Установлено, что добротность таких резонаторов определяется диэлектрическими потерями в емкостном зазоре. Проанализирована возможность применения высокочастотного СПР в качестве резонатора - фильтра для уменьшения влияния флуктуаций генератора накачки в емкостном датчике малых колебаний.

Основные материалы диссертации были доложены и опубликованы

в следующих работах:

1. В.Г. Петников. Вестник МГУ, физ., астр., № 1, 71, 1975.
2. В.И. Панов, В.Г. Петников. Вестник МГУ, физ., астр., № 2, 212, 1975.
3. В.Б. Брагинский, И.И. Минакова, В.И. Панов, В.Г. Петников, В.Д. Попельник. Тезисы докладов на У Всесоюзной конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. Ташкент, 1975.
4. В.В. Колесов, В.И. Панов, В.Г. Петников. Приборы и техника эксперимента, № 4, 169, 1976.
5. В.Б. Брагинский, В.А. Малугин, В.И. Панов, В.Г. Петников. Доклад на Московской научно-технической конференции, посвященной Дню радио, Москва, 1976.
6. И.И. Минакова, Г.П. Минина, В.И. Панов, В.Г. Петников. Известия вузов "Радиоэлектроника", XIX, № 10, 16, 1976.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Брагинский, А.Б. Манукин. Измерение малых сил в физических экспериментах. "Наука", 1974.
2. V. Lange, AIAA J., 2,9, 1590, 1964.
3. J. Weber, Phys. Rev. Lett., 25, 180, 1970.
4. R. Drever et al., Nature, 246, 240, 1973.
5. В.Б. Брагинский, В.И. Панов, ИЭЭЭ, 61, 873, 1971.
6. В.Б. Брагинский. Физические эксперименты с пробными телами. "Наука", 1970.

7. О.А. Курдюмов, И.И. Минакова. Вестник МГУ, физ., астр., № 4, 58, 1966.
8. О.В. Махаринский, И.И. Минакова. Изв. Вузов, "Радиоэлектроника", 13, 805, 1970.

Подл. к печати 21/1-77г. Л - 79352 Ф.  
 Физ. п. л. 0,75 Уч.-изд. л. Заказ 1171  
 Тираж 200

Изд-во Московского университета, Москва, К-9,  
 ул. Герцена, 5/7.  
 Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленгоры