На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Владимир Ильич

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ, СТАБИЛЬНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КВАНТОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА ПАССИВНОГО ВОДОРОДНОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

Специальность-05.11.08 - Радиоизмерительные приборы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»

Научный руководитель: доктор технических наук
старший научный сотрудник
Демидов Николай Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Ульянов Адольф Алексеевич

кандидат технических наук
Селиванов Сергей Иванович

Ведущая организация: ОАО «Российский институт радионавигации и времени» г. Санкт-Петербург

Защита состоится 18 октября 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д409.002.01 Нижегородского научно – исследовательского приборостроительного института «Кварц» по адресу: 603600, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 176, ННИПИ «Кварц».

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ННИПИ «Кварц».

Автореферат разослан « 22 » августа 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук С.Ю. Белозеров.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время промышленные пассивные водородные стандарты частоты и времени (ПВСЧ) являются доступным источником высокостабильных, высокоточных, спектрально-чистых электрических сигналов. Среди всех промышленно выпускаемых стандартов частоты на временах измерения от 1 секунды до суток стабильность частоты его выходного сигнала уступает только водородному стандарту частоты активного типа (ВСЧ). Но от ВСЧ его выгодно отличает малая масса, уменьшенные габаритные размеры, а также возможность работы в жестких условиях, например в качестве транспортируемых часов и в космическом пространстве [1].

Работы над созданием стандарта частоты данного типа начались в 1976 г. и велись в нескольких научных центрах: в США под руководством Ф. Уоллса [2], в Швейцарии при участии Г. Буски [3]. Теория ПВСЧ развивалась в работах французского исследователя К. Одуана [4]. Большой вклад в развитие новой технологии внесли работы сотрудников ФГУП ННИПИ «Кварц» (Нижний Новгород), завершившиеся созданием в 1989 г. первого в мире[1] промышленного ПВСЧ Ч1-76. Позже собственные модели промышленных ПВСЧ появились также у компаний ЗАО «Время-Ч» (Нижний Новгород), «Oscilloquartz» (Швейцария) и у совместного проекта обсерватории г. Невшатель (Швейцария) с фирмами «Galileo Avionica» (Италия) и «Temex Neuchatel Time» (Швейцария).

ПВСЧ применяются для решения целого круга научных и высокотехнологичных задач, таких как создание глобальных навигационных спутниковых систем («ГЛОНАСС», «GALILEO», «COMPASS»), определение параметров вращения Земли, синхронизации цифровых систем связи, геодезии. В качестве транспортируемых часов они входят в состав государственного эталона времени и частоты, а также служат в качестве образцовых средств измерения, применяемых для поверки других источников электрических сигналов.

У ПВСЧ узкую спектральную линию зондируют с помощью СВЧ-сигнала, используя ее в качестве квантового водородного дискриминатора (КВД) – усилителя с ярко выраженными селективными свойствами по частоте. Совершенствование ПВСЧ идёт по пути повышения метрологических и эксплутационных характеристик, а именно улучшения нестабильности и

[1] – В это же время фирмой «Efratom Division» совместно с NIST (оба США) также был разработан промышленный ПВСЧ – модель CPHM-100, но серийно он не выпускался.

уменьшения погрешности по частоте выходного сигнала при одновременном уменьшении габаритных размеров стандарта. Высокая стабильность частоты сигнала определяется стабильностью частоты излучения атома водорода при переходе его из одного квантовое состояния в другое, что обеспечивается стабильностью и необходимой величиной характеристик квантового дискриминатора. Погрешность стандарта по частоте связана с изменением свойств фторсодержащего полимера, которым покрыта внутренняя поверхность накопительной колбы КВД. Вклад КВД в температурную чувствительность стандарта и в погрешность воспроизведения частоты от включения к включению также значительна. Размеры стандарта определяются в первую очередь размерами СВЧ-резонатора, входящего в состав КВД. При уменьшении размера резонатора ухудшается его добротность и, как следствие, возрастает нестабильность частоты стандарта. Повышение метрологических характеристик при одновременной миниатюризации конструкции требует поиска дополнительных резервов сохранения добротности резонатора и оптимизации работы всех систем КВД.

Существующая теория квантового дискриминатора, базирующаяся на решении системы уравнений в приближении «стационарного режима» [4], не позволяет оптимизировать величину сигнала возбуждения КВД по критерию минимальной нестабильности частоты выходного сигнала. Это является следствием того, что принятое приближение предполагает использование «слабого» электромагнитного поля, не изменяющего характеристики квантовых состояний атома. Принятое приближение предполагает также стационарную разность населенностей между квантовыми уровнями, не зависящую от времени накопления атомов, что приводит к теоретическим результатам, лишь частично совпадающим с данными экспериментов. Для оптимизации величины сигнала возбуждения КВД требуются теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении.

В ряде отраслей применения ПВСЧ особенно остро стоят вопросы надежности – требование большого времени безотказной работы и возможности функционирования в жестких условиях эксплуатации. Создание устойчивого к внешним воздействиям квантового дискриминатора является главным сдерживающим фактором при разработке малогабаритного и надежного ПВСЧ. Наиболее уязвимым узлом КВД является источник атомарного водорода, в котором в течение всего времени работы поддерживается ВЧ-разряд в водородной плазме низкого давления. Без всесторонних исследований

источника атомарного водорода и всей пучковой системы невозможно создать КВД, способный проработать 12 лет – требуемого срока безотказной работы ПВСЧ в условиях космического базирования.

Пристальное внимание, проявляемое к разработке новых ПВСЧ, подтверждается растущим числом публикаций по данной тематике в отечественной и мировой научной литературе.

Целью диссертационной работы является повышение основных метрологических и эксплуатационных характеристик ПВСЧ с помощью оптимизации конструкции и режимов работы квантового водородного дискриминатора, достигаемых на основе применения уточненных физико-математических моделей и тщательных экспериментов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые произведено исследование формы спектральной линии водорода 1420,405 МГц в широком диапазоне мощности сигнала возбуждения; обнаружено, что при большой мощности наблюдается расщепление спектральной линии, обусловленное динамическим эффектом Штарка-Зеемана.

2. Предложен метод, дополняющий приближение «стационарного режима» для решения системы уравнений квантового дискриминатора, позволяющий описать амплитудные характеристики КВД во всем диапазоне значений параметра насыщения линии.

3. Обнаружен аномальный режим затягивания частоты выходного сигнала ПВСЧ резонатором, при котором изменение частоты резонатора и изменение частоты ПВСЧ имеют разный знак; частным случаем аномального режима является отсутствие затягивания. Предложена модель появления аномального режима.

4. Впервые предложена модель температурной чувствительности ПВСЧ, обусловленной квантовым дискриминатором; экспериментально подтверждена ее достоверность. Выработанные рекомендации позволили в 2 раза уменьшить температурную чувствительность стандарта.

5. Обнаружен автоколебательный режим работы очистителя молекулярного водорода способный ухудшать нестабильность частоты выходного сигнала стандарта на интервалах времени $10^2 \ldots 10^3$ с, проведено аналитическое и экспериментальное исследование эффекта с целью устранения условий для автоколебаний.

6. Обнаружен и впервые смоделирован электретный механизм деградации разрядной колбы источника атомарного водорода, значительно уменьшающий время безотказной работы КВД. Выработаны рекомендации по уменьшению скорости деградации и увеличению срока службы разрядной колбы.

7. Впервые найдены аналитические зависимости для коэффициентов отражения и поглощения при передаче мощности через резонатор, выраженные через коэффициенты связи с резонатором (рассмотрен общий случай не равных коэффициентов связи). Данный подход также позволяет определять величину СВЧ-поля в резонаторе.

8. Впервые с помощью коэффициентов отражения и поглощения мощности на основе анализа нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами квантового дискриминатора и приемника, проведена оптимизация коэффициентов связи с СВЧ-резонатором, результаты которой позволили на 20% улучшить кратковременную нестабильность частоты сигнала стандарта.

9. Впервые предложена антенная модель электронной перестройки частоты СВЧ-резонатора с помощью петли с варикапом, позволяющая объяснить изменение добротности резонатора при перестройке его частоты. Результаты исследования позволили увеличить точность АПЧ резонатора и уменьшить нестабильность частоты ВСЧ и ПВСЧ на длительных интервалах времени $10^3 \ldots 10^5$ с.

10. Предложен вариант конструкции КВД для космического применения.

Основу исследования составляют методы математического и физического моделирования, с использованием аппаратов интегрального и дифференциального исчисления, спектрального анализа сигналов, электродинамики и теории систем автоматического регулирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

1. Использованием проверенных численных методов, реализованных в пакетах компьютерных программ *MathCad, Inprise Delphi, Microwave Studio, Stable.*

2. Исследованием внутренней сходимости численных алгоритмов.

3. Применением достоверных экспериментальных методик и парка современных прецизионных приборов.

4. Сравнением результатов, полученных различными методами, экспериментальной проверкой теоретически полученных результатов.

Научно-практическая значимость работы заключается в выработке рекомендаций для создания и оптимизации конструкции малогабаритных КВД, позволивших разработать новые поколения ПВСЧ с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками: нестабильность частоты выходного сигнала уменьшилась в 4 раза, воспроизводимость частоты улучшилась в 2 раза, средняя наработка на отказ увеличилась в 10 раз, масса и объем стандарта уменьшились в 1,5 раза. Результаты диссертации использованы при создании пассивных водородных стандартов частоты и времени Ч1-86 в 1995 году, Ч1-76А в 2002 году и Ч1-91 в 2007 году, а также водородного стандарта частоты и времени активного типа Ч1-75А в 2004 году. Результаты исследований, в которых автор диссертационной работы принимал непосредственное участие, изложены также в отчетах научно-исследовательских работ и пояснительных записках опытно-конструкторских работ, проводимых во ФГУП ННИПИ «Кварц» по темам «Квант», «Чистик-95», «Челнок», «Челнок-2», «Гармония-Ч» и «БСУ – ВСЧ-К ».

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXIX научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации» (Мытищи, 2004); IX и XIII Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, ННГУ, 2005 и 2009); Всероссийской научно-технической конференции «РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики» (Санкт-Петербург, 2006), Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, НГТУ, 2005, 2006, 2007 и 2009).

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 3 статьи в реферируемых журналах, включенных в перечень, рекомендованный ВАК.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Метод расчета амплитудных характеристик малогабаритного КВД, сочетающий приближения «стационарного режима» и «заданного поля».
2. Результаты экспериментального исследования, показавшего, что при большой мощности сигнала возбуждения наблюдается расщепление спектральной линии.
3. Обнаруженный аномальный режим затягивания частоты выходного сигнала ПВСЧ резонатором.
4. Результаты исследования вклада КВД в температурную чувствительность ПВСЧ, рекомендации по уменьшению чувствительности.

5. Результаты аналитического решения и экспериментального исследования задачи водородопроницаемости для очистителя молекулярного водорода, рекомендации по усовершенствованию технологии изготовления очистителей.
6. Модель электретного механизма деградации разрядной колбы источника атомарного водорода, рекомендации по уменьшению скорости деградации.
7. Антенную модель электронной перестройки частоты и изменения добротности СВЧ-резонатора для расположенной в резонаторе петли с варикапом.
8. Метод расчета малых коэффициентов связи с резонатором, соединенным петлями связи с линиями передачи; аналитические формулы для коэффициентов отражения и поглощения мощности в резонаторе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 202 страницы, включая список использованной литературы и приложения. Диссертация содержит 122 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает 184 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, показана новизна и практическая ценность работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В начале **первой главы** рассматриваются физические принципы работы ПВСЧ, сообщается о конструктивном решении КВД и используемой фазо-модуляционной АПЧ кварцевого генератора и СВЧ-резонатора на вершину спектральной линии водорода. Проводится известный из литературных источников анализ факторов, дающих вклад в ширину спектральной линии, рассматривается решение системы уравнений водородного мазера в общепринятом [1, 4, 5] приближении «стационарного режима», приводящем к лоренцевской форме спектральной линии. Резонансный коэффициент усиления КВД описывается следующим выражением:

$$K_y = \frac{1+S_0}{1+S_0-\alpha} \quad ,$$

где $S_0 = 4\pi^2 T_1 T_2 H^2 / h^2$ – резонансный параметр насыщения, $\alpha = KQ_p T_1 T_2 J_{10}^k$ параметр возбуждения, T_1 и T_2 – продольное и поперечное время релаксации, H – средняя напряженность магнитного поля в накопительной колбе, J_{10}^K – интенсивность потока атомов, Q_p нагруженная добротность резонатора, h – постоянная Планка, K – постоянная.

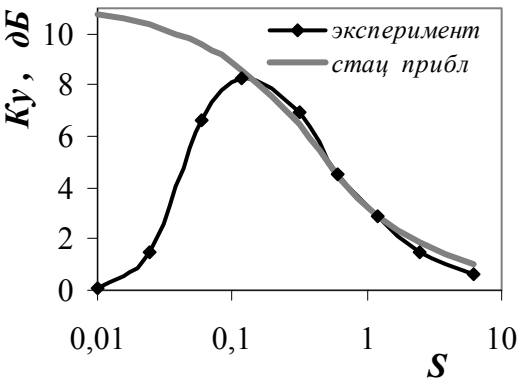

Рис.1. Коэффициент усиления КВД в зависимости от параметра насыщения

В разделе **1.2.1** проводится сравнение амплитудных характеристик, следующих из приближения «стационарного режима» и экспериментальных результатов, полученных в широком диапазоне мощности сигнала возбуждения. На рис.1 представлены вычисления резонансного $K_у$ при $\alpha = 0{,}73$, а также экспериментальные данные, полученные при измерении $K_у$ квантового дискриминатора стандарта Ч1-76А.

Верификация, представленная на рис.1, позволяет утверждать, что теоретическая модель удовлетворительно описывает изменение резонансного коэффициента усиления лишь в некотором диапазоне параметра насыщения линии $0{,}2 < S_0 < 2$.

Экспериментальное изучение спектральной линии водорода, предпринятое в разделе **1.2.2** показало, что форма линии близка к лоренцевской лишь при малом (≈–100 дБм) индуцирующем сигнале. С ростом величины сигнала кроме уширения линии наблюдается сильное искажение, переходящее при сигнале более –70 дБм в расщепление на три составляющие. Результаты тщательных экспериментов представлены на рис.2.

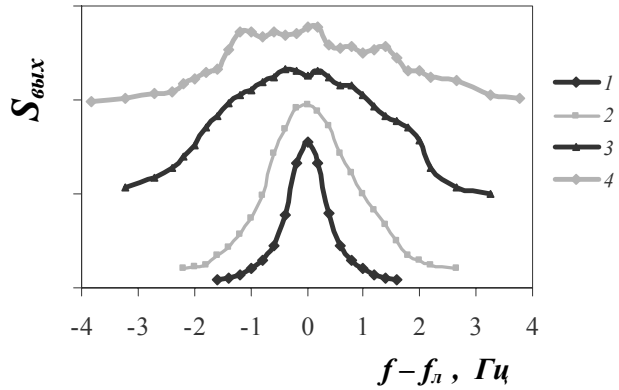

Рис.2. Форма спектральной линии КВД в зависимости от отстройки:
1 – $P_{вх} = -100$ дБм; 2 – $P_{вх} = -80$ дБм;
3 – $P_{вх} = -70$ дБм; 4 – $P_{вх} = -65$ дБм.

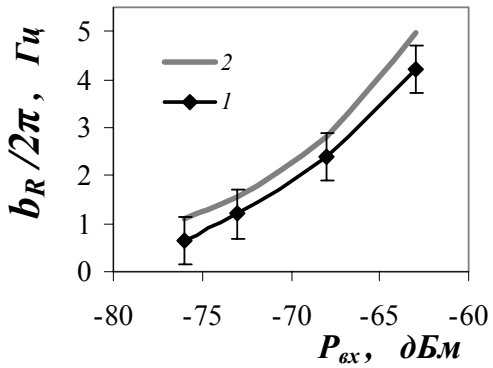

Рис.3. Зависимость частоты Раби от мощности сигнала возбуждения:
1 – экспериментальные данные;
2 – теоретическая оценка.

Данный эффект не описан в работах, посвященных ПВСЧ. В разделе **1.2.3** высказано предположение, что это проявление динамического эффекта Штарка -

Зеемана, возникающего в сильных переменных полях. Как известно [6], в квантовой механике решение задачи о возмущении атомного спектра двухуровневой системы под действием переменного электромагнитного поля («*dressed atom*») в резонансном приближении приводит к тому, что линия приобретает два боковых сателлита, отстоящих от центрального пика на частоту Раби:

$$b_R = 2\pi\mu_{12}\mu_0 H/h \quad [\text{рад/с}] ,$$

где μ_{12} – магнитный дипольный момент перехода, μ_0 – магнитная постоянная вакуума.

При слабом сигнале возбуждения расстояние от вершины сателлитов до центрального пика мало по сравнению с шириной центральной линии, поэтому сателлиты не наблюдаются. Регистрируемое (см. рис.3) расщепление линий происходит, когда частота Раби превысит половину ширины линии. В условиях существенности столкновительного механизма дефазировки взаимодействия атома с полем левый сателлит становится больше правого [7].

Чтобы уточнить существующую теорию ПВСЧ, нужно учесть, что в КВД большую роль играет конечное время накопления атомов в колбе, сравнимое с временами релаксации системы, а также величина сигнала возбуждения, определяющая вероятность перехода атома между уровнями. Предлагается ввести параметр возбуждения КВД следующим образом:

$$\alpha = \frac{N_a}{N_{пор}}, \quad N_a \approx J_{10}^{к} T_k - V_к \Delta N(T_к) ,$$

где N_a – количество атомов водорода, отдавших свою энергию, $N_{пор}$ – пороговое число атомов в накопительной колбе, $T_к$ – время накопления атомов в колбе, $V_к$ – объем колбы, ΔN – разность населенностей верхнего и нижнего уровней в единичном объеме газа. Разность населенностей для малогабаритного мазера, работающего далеко от порога самовозбуждения, может быть найдена на основе приближения «заданного поля» [8]. Решение системы уравнений водородного мазера для этого случая приводит к следующему выражению для разности населённостей:

$$N(t) = \frac{\Delta N_0}{1+S_0}\left[1 + S_0\frac{c_{12}+R}{2R}e^{-(c_{12}-R)t} - S_0\frac{c_{12}-R}{2R}e^{-(c_{12}+R)t}\right], \; R = \sqrt{\left(\frac{T_1-T_2}{2T_1T_2}\right)^2 - \frac{S_0}{T_1T_2}}, \; c_{12} = \frac{T_1+T_2}{2T_1T_2}$$

где ΔN_0 – начальная разность населенностей. Считая, что t равно времени накопления $T_к$, и используя выражение для коэффициента усиления, полученное в приближении стационарного режима, находим резонансную амплитудную характеристику КВД. В данном случае для коэффициента усиления в широком

диапазоне мощности сигнала возбуждения достигнуто приемлемое соответствие с экспериментом.

В разделе **1.2.4** рассмотрены сдвиги частоты выходного сигнала стандарта, специфичные для случая, когда водородный мазер выступает в роли квантового дискриминатора. Показано, что на основе предложенного подхода легко объясняется существование сдвига частоты ПВСЧ от мощности используемого сигнала возбуждения. Зависимость обусловлена существованием сдвига из-за спин-обменного взаимодействия атомов водорода в накопительной колбе и может быть описана следующей формулой:

$$\Delta\omega = -\frac{\lambda \overline{V}_r}{4V_к} \frac{J_{10}^{к} T_к (1 + T_2^2 (\omega - \omega_л)^2)}{1 + T_2^2 (\omega - \omega_л)^2 + 4\pi^2 \mu_{12}^2 H^2 T_1 T_2 / \mu_0^2 h^2} \quad ,$$

где λ – параметр сдвига, $\overline{V}_r = 4(kT/\pi m)^{1/2}$ – средняя относительная скорость атомов, $\omega_л$ – круговая частота квантового перехода в атоме водорода, ω – круговая частота сигнала возбуждения.

Затягивание частоты стандарта от отстройки частоты резонатора традиционно [1, 2, 4] описывается следующей формулой:

$$f_{ст} = f_л + \frac{Q_р}{Q_л}(f_р - f_л) \quad ,$$

где $Q_л$ – добротность спектральной линии водорода, $f_{ст}, f_р, f_л$ – частота выходного сигнала стандарта, частота резонатора и частота спектральной линии. В результате исследования обнаружен аномальный режим затягивания частоты выходного сигнала ПВСЧ резонатором, при котором изменение частоты резонатора и изменение частоты стандарта имеют разный знак. Частным случаем аномального режима является отсутствие затягивания. Показано, что аномальный режим затягивания частоты обусловлен расщеплением линии при проявлении динамического эффекта Штарка-Зеемана. Обсуждается возможность использования данного режима для независимости частоты стандарта от частоты резонатора [9].

Вторая глава посвящена оптимизации системы формирования пучка атомарного водорода, которая применяется как в пассивных, так и в активных водородных стандартах частоты.

В разделе **2.1** исследуется очиститель молекулярного водорода, который представляет собой спираль из никелевой трубки, нагреваемую электрическим током, и помещенную в титановый корпус. Рассматриваемый случай близок к классической задаче проницаемости водорода через никелевую мембрану. Модель, учитывающая процессы теплопередачи, позволила получить оценки

эффективности использования различных типов источников питания очистителя. Доказано, что в условиях изменения внешней температуры режим питания постоянным напряжением является оптимальным.

Экспериментально доказано, что при водородопроницаемости через очиститель существуют эффекты, не описываемые уравнениями Фика, и более близкие к модели Херста-Гаусса [10], которая предполагает наличие обращаемых ловушек неограниченной емкости на поверхности трубки. Этому способствуют примеси, содержащиеся в никеле, и загрязнённость поверхности неметаллическими веществами *S*, *P*, *C*, *Si*, *Co*, *O*, *TiN*. Для теоретического исследования данного явления для температуры очистителя было составлено, а затем аналитически решено нелинейное дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом.

$$\frac{dT_{оч}}{dt} = A_1 + A_2 T_{оч} - A_3 T_{оч}^4 - A_4 T_{оч}^2 \exp\left\{-\frac{A_5}{T_{оч}(t-\tau_{зап})}\right\} \quad ,$$

где $T_{оч}$ – температура никелевой трубки, t – время, $\tau_{зап}$ – время запаздывания, $A_1 \ldots A_5$ – коэффициенты, определяемые геометрией и режимами работы очистителя.

Выводы, полученные в ходе решения задачи водородопроницаемости, использованы для усовершенствования технологии изготовления очистителей.

Раздел **2.2** посвящен вопросу повышения надежности источника атомарного водорода. Атомарный водород получается диссоциацией молекул H_2 в кварцевой колбе в плазме безэлектродного высокочастотного разряда низкого давления. Постепенно под воздействием сложных физико-химических процессов поверхность колбы претерпевает заметные изменения, и разряд перестает гореть. Проведённые рентгенодифрактометрические исследования и эмиссионный анализ на спектрографе СТЭ-1 в области близкого ультрафиолета образцов состаренной поверхности показали, что основным элементом плёнки на поверхности является кремний. В плёнке также представлены следы примесей, содержащихся в кварцевом стекле (*Na*, *K*, *Mn*) и продукты вакуумной системы прибора (*Ti*, *In*, *Ni*).

Было выявлено четыре самых важных механизма деградации поверхности: плазмохимическое травление и распыление кварцевого стекла дна колбы химически активным атомарным водородом ($SiO_2 + H \rightarrow Si + H_2O + O + H$); фазовое превращение кварцевого стекла дна колбы в α-кристобалит, сопровождающееся растрескиванием; осаждение кремния вместе с примесями на боковой поверхности; образование зарядовых состояний на поверхности колбы. Спектр

оптического излучения ВЧ-разряда в колбе подтвердил наличие воды (линии 616,5; 632,1 нм). На рис.4 представлены трехмерные изображения внутренней поверхности кварцевой колбы, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа TMX-2100 "Accurex".

а б

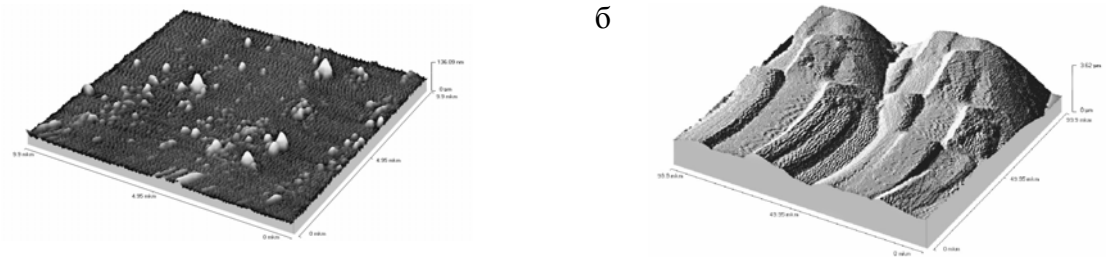

Рис.4. Трехмерные изображения внутренней поверхности кварцевой колбы после 8 лет работы: а — боковая поверхность; б – дно.

Для предотвращения растрескивания дна колбы, сопровождающееся развакуумированием КВД, предложено увеличить толщину дна колбы с 1 до 2 мм.

Показано, что модификация поверхности происходит вместе с накапливанием статического заряда в стекле, которое становится электретом.

Для численного моделирования процессов в плазме ВЧ-разряда была использована одночастичная диффузионно-дрейфовая модель, в рамках которой предполагается, что усреднённые электроны и положительные ионы образуются в результате электронного удара и гибнут в результате совместной диффузии на стенках колбы. Рассмотрен газовый разряд в цилиндрической камере высотой L и радиуса R. Электрическое поле E на частоте f направлено вдоль оси. В камере создано также слабое постоянное электрическое поле E_{dc}, направленное вдоль оси. Был использован следующий критерий зажигания разряда [11]:

$$\frac{\nu_i}{D_a} = \left(\frac{2{,}4}{R}\right)^2 + \frac{D_{La}}{D_a}\frac{\pi^2}{L^2} + \left(\frac{V_{dc}}{4D_aD_{La}}\right)^2 + \frac{\nu_0}{D_a}, \qquad \nu_i \approx \frac{e^2E^2\nu_e}{m\left((2\pi f)^2 + \nu_e^2\right)V_i},$$

где ν_i – частота ионизации молекул водорода электронным ударом, ν_o – частота прилипания свободных электронов к молекулам кислорода, D_a – коэффициент диффузии электронов поперёк поля, D_{La} – коэффициент диффузии электронов вдоль поля, $V_{dc} = eE_{dc}/m\nu_e$ – дрейфовая скорость электронов, e – заряд электрона, m – масса электрона, ν_e – частота столкновений молекул и электронов в газе. В результате моделирования получены зависимости между сроком службы и параметрами источника атомарного водорода. Показано, что у кривой срока службы существует максимум, величина и расположение которого определяется давлением водорода и создаваемой напряжённостью высокочастотной компоненты электрического поля. Анализ зависимостей позволяет сделать вывод о том, что использование увеличенных разрядных колб увеличивает срок их службы.

В разделе **2.3** рассматриваются вопросы оптимизации магнитной сортирующей системы. Движение атома в пространстве с градиентом магнитного поля заменяется движением в пространстве с дискретно изменяющимся полем. Проводится усреднение по наиболее вероятным углам и координатам вылета из коллиматора, учитывается распределение атомов по скоростям. Метод позволяет оптимизировать любую конфигурацию магнита. Проведена оптимизация «короткофокусной» сортирующей системы.

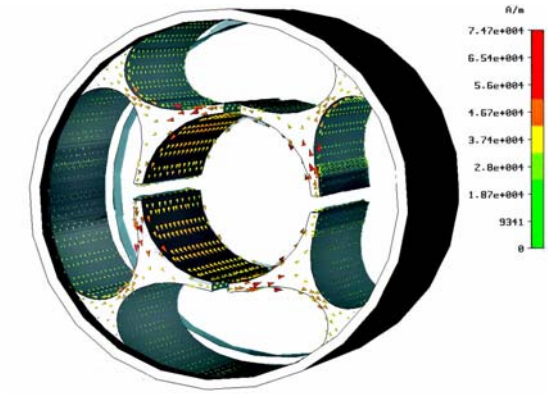

Рис.5. Плотность поверхностного тока в магнетронном резонаторе на квази H_{011} моде колебаний

Третья глава посвящена исследованию СВЧ-резонатора с помощью пакета трехмерного электродинамического моделирования *Microwave Studio*. В общей сложности на моделирование потрачено около 14 000 часов машинного времени.

В разделах **3.1** и **3.2** изучаются возможности современного электродинамического моделирования и исследуются особенности миниатюризации СВЧ-резонатора. В настоящее время в ПВСЧ используют малогабаритный цилиндрический резонатор магнетронного типа, в котором аксиально-симметричные металлические пластины прикреплены к корпусу с помощью металлических перегородок (рис.5). Проведена оптимизация конструкции магнетронного резонатора по критериям максимальной добротности и максимального фактора заполнения η. Исследовался, в том числе, вопрос, как связана добротность резонатора с количеством используемых пластин (рис.6).

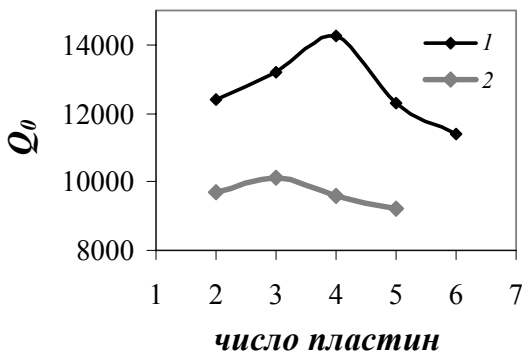

Рис.6. Зависимость собственной добротности резонатора от количества пластин, параметр объем резонатора: 1 – $V_р = 2{,}5$ л; 2 – $V_р = 1{,}5$ л.

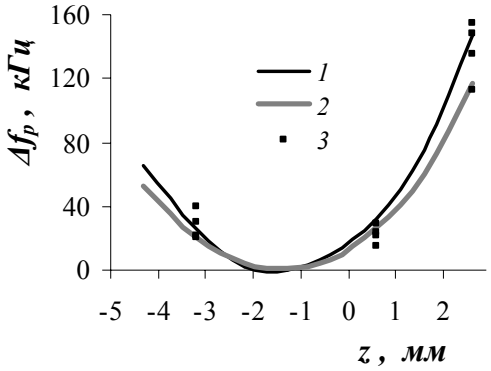

Рис.7. Зависимость сдвига частоты резонатора при продольном перемещении колбы:
1 – расчет MWS; 2 – расчет методом возмущений; 3 – экспериментальные данные

В разделе **3.3** исследуется влияние смещения диэлектрической накопительной колбы на собственную частоту СВЧ-резонатора (см. рис.7), что

важно для улучшения показателя воспроизводимости частоты стандарта от включения к включению.

В разделе **3.4** рассматривается задача передачи мощности через резонатор с потерями, соединенный петлями связи с линиями передачи [12]. С использованием выражения для полного сопротивления петли, найденного в работе [13], предложен способ вычисления малых коэффициентов связи с резонатором с помощью трансцендентного выражения:

$$\beta \approx \frac{\omega_p}{Z_0}\sqrt{L_n{}^2 + \left(\frac{\mu_0 \langle B\rangle_n^2 S_n^2}{\langle B^2\rangle_{рез} V_p}\frac{Q_0\omega_p}{1+\beta}\right)^2},$$

где L_n – индуктивность петли с учетом влияния стенок резонатора, S_n – площадь петли, V_p – объем резонатора, $\langle B\rangle_n^2$ и $\langle B^2\rangle_{рез}$ – квадрат усреднённой по площади петли и усреднённый квадрат по объёму резонатора амплитуды магнитной индукции, Z_0 – волновое сопротивление кабеля связи.

С помощью пакета *Microwave Studio* вычислены соответствующие резонансные коэффициенты отражения и передачи мощности. Полученная в результате моделирования зависимость резонансного коэффициента отражения от величины коэффициентов связи была аппроксимирована. Применяя принцип причинности и закон сохранения энергии, найдено аналитическое выражение для резонансного коэффициента поглощения:

$$W_L = \frac{4\beta_1}{(1+\beta_1+\beta_2)^2}, \text{ при этом } W_R = \frac{(1-\beta_1+\beta_2)^2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2},\ W_T = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2},$$

где W_L, W_R, W_T – коэффициенты поглощения, отражения и передачи мощности, β_1 и β_2 – коэффициенты связи по входу и выходу.

Теперь по известной мощности входного сигнала $P_{вх}$ можно найти величину магнитной компоненты СВЧ-поля в области накопительной колбы:

$$\langle H\rangle_к = \sqrt{\frac{8\eta Q_p \beta_1 P_{вх}}{\mu_0 V_p \omega_p (1+\beta_1+\beta_2)^2}}.$$

Четвертая глава посвящена исследованию системы автоматической настройки частоты СВЧ-резонатора. Как показывает оценка, для достижения суточной нестабильности на уровне 2×10^{-15} при типичных значениях $Q_л \approx 7\times10^8$ и $Q_p \approx 1\times10^4$ частота резонатора должна поддерживаться с точностью 0,2 Гц. В таком случае линейные размеры резонатора должны быть стабильны в пределах 1×10^{-10} м, что является запредельным требованием. Поэтому, для получения высокой долговременной стабильности частоты выходного сигнала стандарта необходимо использование прецизионной системы автоматической подстройки частоты резонатора.

В разделе **4.1** изучаются точность настройки резонатора в условиях искажения спектра сигнала возбуждения и формы резонансной кривой резонатора. Проводится анализ системы автоматической подстройки частоты резонатора. Используются понятия коэффициента асимметрии спектра K^c_{ac}, как отношение суммы СПМ низкочастотных спектральных составляющих к сумме СПМ высокочастотных составляющих спектра: $K^c_{ac} = \sum_{k=-n}^{-1} S_k \Big/ \sum_{k=1}^{n} S_k$, и коэффициента асимметрии резонатора K_{ac} как отношение полуширин высокочастотной $\Delta\omega_в$ и низкочастотной части резонансной кривой $\Delta\omega_н$: $K_{ac} = \Delta\omega_в / \Delta\omega_н$. Экспериментальные исследования показывают, что на симметрию характеристики резонатора действует многие факторы, из которых можно выделить следующие: наличие петель связи; присутствие цепи электронной перестройки резонатора; применение элементов, нарушающих аксиальную и продольную симметрию используемого типа колебаний (накопительная колба, подстроечные элементы).

Численный расчет сигнала ошибки позволяет прийти к выводу, что остаточная отстройка резонатора определяется коэффициентами K^c_{ac} и K_{ac}, а также другими параметрами: добротностью резонатора, индексом и частотой модуляции сигнала возбуждения. Определено, что для минимизации остаточной отстройки резонатора на уровне 100 Гц (на частоте 1420 МГц) необходимо, чтобы коэффициенты асимметрии лежали в диапазоне от 0,997 до 1,003. Правильность расчетов была проверена экспериментально.

В разделе **4.2** исследуется изменение добротности СВЧ-резонатора при электронной перестройке частоты резонатора петлей с варикапом. Наиболее простым способом описания воздействия узла варикапа на СВЧ-резонатор является приближение связанных контуров с помощью введения эквивалентных параметров резонатора. Но экспериментальное исследование, показало, что теория связанных контуров, в целом неплохо описывая перестройку частоты резонатора, некорректно описывает поведение добротности.

Учитывая распределённый характер рассматриваемых процессов, предложена модель рассеяния электромагнитной волны от антенны. В роли антенны выступает петля, в роли её нагрузки – варикап. В рамках модели считается, что вся мощность в цилиндрическом резонаторе переносится через поперечное сечение, отражается от торцевых поверхностей, но часть ее рассеивается от петли, расположенной на одной из торцевых поверхностей, в соответствии с величиной интегрального эффективного поперечника рассеяния (ЭПР). Используя результаты работы [14] считается, что поле рассеяния

нагруженной антенны можно считать результатом суперпозиции двух полей: поля рассеяния короткозамкнутой антенны и поля излучения антенны с нагрузкой. Чтобы найти ЭПР короткозамкнутой петли, используется решение задачи о распределении тока вдоль петли в случае падения плоской электромагнитной волны, а затем об излучении петли с заданным распределением тока, полученное в работе [15].

Предложено выражение, связывающее нагруженную добротность резонатора с петлей и интегральный ЭПР короткозамкнутой петли:

$$Q_p^{рас} = \frac{Q_p}{1 + \sigma_\Sigma F / \pi b^2} \ ,$$

где σ_Σ – интегральный эффективный поперечник рассеяния петли, F – отношение мощности невозмущенного поля в месте расположения петли к средней мощности поля, b – радиус петли, λ – длина волны на частоте колебаний.

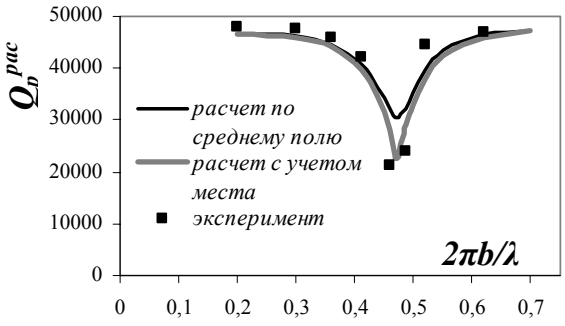

Рис.8. Зависимость добротности резонатора от относительного периметра короткозамкнутой петли.

Доказано, что ЭПР петли носит резонансный характер, возрастает по мере увеличения отношения $2\pi b/\lambda$, достигая максимума в районе $\approx \lambda/2$. На рис.8 представлена зависимость добротности резонатора от периметра петли.

Показано, что петля с варикапом представляет собой киральную структуру. Это проявляется в том, что при изменении оси петли на 180º фаза вторичного поля также изменяется на 180º. Для учета управления рассеянием петли с помощью комплексной нагрузки применено следующее соотношение [16]:

$$\sigma_д = \sigma_0 |1-\alpha|^2 \left(Z_{пр} + \frac{Z_a}{1-\alpha} \right)^2 \left(Z_{пр} + Z_a \right)^{-2},$$

где $\sigma_д$ – дифференциальный ЭПР петли с варикапом, σ_0 – дифференциальный ЭПР короткозамкнутой петли, $Z_{пр}$ – импеданс нагрузки, Z_a – импеданс петли, α – функция направлений передачи и приема, формы петли, места расположения петли в резонаторе и места расположения нагрузки на петле.

Предложенная теория предполагает, что минимального изменения Q_p при перестройке резонатора можно добиться подбором места расположения и угла поворота петли. Другим важным фактором остается использование информации о структуре собственных колебаний резонатора. Изучение локализации вторичного поля показывает, что рассеянная часть энергии идет на поддержание

моды E_{111}, а также близких к ней по структуре квазилокализованных дополнительных мод.

В разделе **4.2.2** обсуждаются особенности электронной перестройки частоты в резонаторе магнетронного типа. Показано, что в таком резонаторе присутствующие градиенты полей значительно больше, нежели в традиционном цилиндрическом резонаторе и, соответственно, влияние места расположения варикапа на добротность резонатора существенно больше.

В **пятой главе** проводится теоретический анализ и экспериментальное исследование нестабильности частоты выходного сигнала ПВСЧ.

Раздел **5.1** посвящен изучению кратковременной (при временах измерения $1 \le \tau \le 1000$ с) нестабильности частоты. В качестве системы автоматического регулирования ПВСЧ имеет два кольца: кольцо управления частотой кварцевого генератора и кольцо управления частотой СВЧ-резонатора. В разделе **5.1.1** приводится известный из литературных источников [4, 17] анализ нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами квантового дискриминатора и приемника по обоим каналам АПЧ стандарта.

В разделе 5**.1.2**, используя материалы работы [17], проведена оптимизация коэффициентов связи СВЧ-резонатора по критерию минимума нестабильности частоты. Ранее [4, 5] серьезным препятствием для более детального исследования данного вопроса была теоретическая неопределенность соотношения между мощностью сигнала возбуждения на входе в резонатор и величиной поля в резонаторе. С помощью результатов раздела 3.4 в диссертации предложен способ для вычисления величины поля в резонаторе при передаче мощности через резонатор с потерями. Далее с учетом волновой трактовки закона Кирхгофа теории теплового излучения определено, что оптимум по критерию минимума нестабильности частоты для входного коэффициента связи пологий и находится в районе $\beta_{1опт} \approx 0{,}1$. Определен также оптимум по выходному коэффициенту связи $\beta_{2опт} \approx 0{,}45$.

В разделе **5.2** дана оценка нестабильности частоты по отношению сигнал/шум на выходе селективного усилителя в приемнике ПВСЧ, которая может быть применена в качестве критерия оценки качества конструкции квантового дискриминатора.

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{S_ш(\Omega)}{2 f_л^{\,2} S_д^2 \tau}} = \frac{U_ш \Delta f_л}{2\pi \; f_л U_{сел}} \frac{1}{\sqrt{\Delta B_{сел} \tau}} \quad ,$$

где $S_ш$ (Ω) – СПМ шума на выходе селективного усилителя кольца АПЧ кварцевого генератора; S_d – крутизна дискриминационной кривой кольца АПЧ

кварцевого генератора при настройке сигнала возбуждения на вершину спектральной линии, Ω – круговая частота модуляции, $\Delta f_л$ – отстройка частоты сигнала возбуждения относительно частоты спектрально линии, $U_{сел}$ – эффективное напряжение сигнала первой гармоники на выходе селективного усилителя, $U_ш$ – эффективное шумовое напряжение на выходе селективного усилителя, $\Delta B_{сел}$ – полоса пропускания селективного микровольтметра.

В разделе **5.2.1** анализируются данные экспериментального исследования влияния времени нахождения атомов водорода в накопительной колбе на отношение сигнал/шум на выходе селективного усилителя. Исследование проведено для трех марок фторопластового покрытия колбы: *Ф-10*, *Ф-4мд*, производимые в России, и *FEP 120 Teflon*, производимая фирмой *Dupont de Nemours*. Эксперимент показывает, что оптимальное время накопления лежит в области 0,5 с, но различается на 0,05 с для различных марок фторопласта.

В разделе **5.2.2** изучается кратковременная нестабильность частоты в зависимости от величины сигнала возбуждения. Приближение «стационарного режима» приводит к выводу о том, что при малом насыщении крутизна дискриминационной характеристики пропорциональна мощности сигнала возбуждения, а при $S_0 >> 1$ стремится к конечному пределу. Показано, что неоднородное уширение, возникающее вследствие расщепления линии, приводит к уменьшению крутизны дискриминационной характеристики при использовании мощности сигнала возбуждения более –70 дБм, и, как следствие, к ухудшению нестабильности частоты.

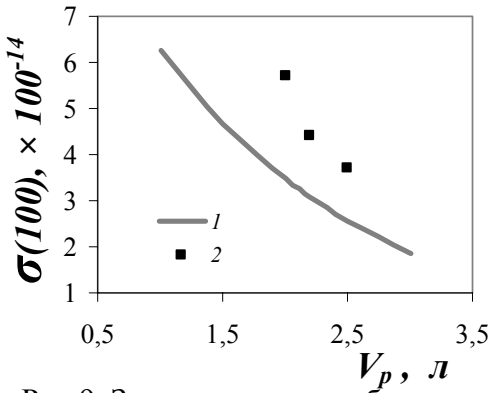

Рис.9. Зависимость нестабильности частоты ПВСЧ при $\tau = 100$ с от объема резонатора при сохранении объема накопительной колбы:
1 – предельная нестабильность;
2 – экспериментальные данные.

В разделе **5.3** проводится исследование связи предельной нестабильности частоты с миниатюризацией конструкции квантового дискриминатора. На рис.9 представлены результаты расчетов нестабильности частоты (при времени измерения 100 с), обусловленной тепловыми шумами КВД и приемника, и оптимальных параметрах ПВСЧ в условиях уменьшения размеров резонатора при сохранении объема накопительной колбы. Расчеты показывают, что уменьшение объема резонатора с 2,5 до 1,5 л приводит к ухудшению нестабильности в 1,8 раза.

Раздел **5.4** посвящен изучению долговременной ($\tau > 1000$ с) нестабильности частоты. В разделе **5.4.1** исследуется температурная чувствительность ПВСЧ, обусловленная влиянием квантового дискриминатора. На основании комплексного исследования предложена модель температурной чувствительности:

$$\Delta f_{ст} = f_л + \frac{\Delta Q_p}{\Delta Q_л}(f_p - f_л) - \frac{\beta T_1 \Delta J_{10}^k}{1+\Delta S} + \Delta f_{СТ} + \Delta f_Д \quad .$$

где $\Delta f_{ст}$ – сдвиг частоты выходного сигнала стандарта, $\Delta Q_л$, ΔQ_p изменение добротности спектральной линии и резонатора, $\Delta J_{10}^к$, ΔS – изменение интенсивности потока атомов и параметра насыщения, $\Delta f_{СТ}$, $\Delta f_Д$ изменение стеночного и Доплеровского сдвига частоты спектральной линии, β – коэффициент. Экспериментально подтверждена состоятельность модели. Выработанные рекомендации позволили в 2 раза уменьшить температурную чувствительность стандарта

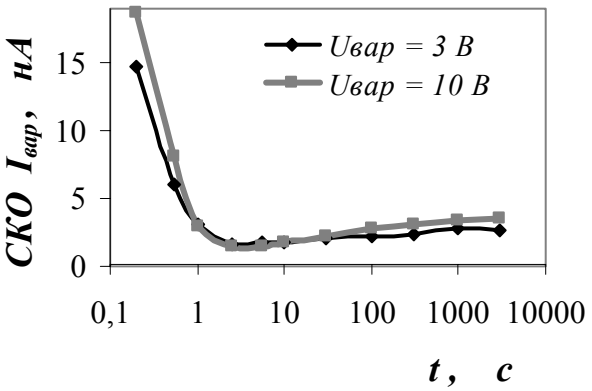

Рис.10. Экспериментальная зависимость СКО обратного тока через варикап в зависимости от времени измерения.

В разделе **5.4.2** анализируется обнаруженный фликкер-шум электронной перестройки частоты СВЧ-резонатора. В рамках квадратичной флуктуационно-диссипационной теоремы [18] рассмотрен диод (варикап 3А618А-6), подвергающейся одновременному воздействию постоянного электрического поля, создающего разность потенциалов между контактными площадками полупроводника, и поля падающей электромагнитной волны в резонаторе. Показано, что спектр флуктуаций обратного тока (а значит и емкости) варикапа определяется положением рабочей точки на вольт-амперной характеристике варикапа и амплитудой поля падающей электромагнитной волны. На рис.10 представлена экспериментальная зависимость флуктуации обратного тока через варикап. Параметром служит напряжение смещения. При времени усреднения более 1 с флуктуации не уменьшаются и носят фликкерный характер.

Характерно, что из-за наличия электромагнитной волны минимуму флуктуаций соответствует не нулевое напряжение смещения: $U = \sqrt{\left(\theta E^2 + \left(\mu_0 S_n \omega_p H\right)^2\right)/2}$, где E, H величина электрической и магнитной компоненты СВЧ-поля в области петли варикапа, θ – коэффициент, зависящий

от особенностей и размеров полупроводника. Рассмотренный механизм ухудшения долговременной нестабильности частоты накладывает ограничения на величину используемой мощности сигнала возбуждения, на локализацию места расположения варикапа и на используемый диапазон напряжений смещения.

В разделе **5.4.3** обсуждаются особенности систематического дрейфа частоты выходного сигнала ПВСЧ применительно к разным маркам фторопластового покрытия накопительной колбы. Выработаны рекомендации по минимизации дрейфа частоты. Показано, что у большинства (≈80%) исследованных стандартов дрейф уменьшается по экспоненциальному закону и с помощью экспоненциальной регрессии может быть спрогнозирован.

Шестая глава посвящена описанию КВД, в которых реализованы результаты диссертационной работы. Приводятся отличительные особенности КВД стандартов, в разработке которых автор принимал участие. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики промышленных стандартов, представленных различными производителями[2]. Из приведенных данных следует, что КВД, разработанный для стандарта Ч1-91, позволяет стандарту обладать наилучшими метрологическими характеристиками.

Таблица 1 Характеристики промышленных ПВСЧ разных производителей.

Характеристики	Ч1-91 ФГУП ННИПИ «Кварц»	Ч1-1006, «Время-Ч»	OSA 3700 «Oscilloquartz»	ПВСЧ Шанхайской обсерватории
Нестабильность частоты				
1 с	7×10^{-13}	7×10^{-13}	7×10^{-13}	1×10^{-12}
10 с	$1{,}5\times10^{-13}$	2×10^{-13}	3×10^{-13}	$3{,}1\times10^{-13}$
100 с	5×10^{-14}	7×10^{-14}	7×10^{-14}	1×10^{-13}
3600 с	1×10^{-14}	2×10^{-14}	2×10^{-14}	2×10^{-14}
1 сутки	$2{,}5\times10^{-15}$	7×10^{-15}		1×10^{-14}
ТКЧ, (1/°C)	5×10^{-15}	1×10^{-14}	5×10^{-14}	5×10^{-14}
Погрешность по частоте	$1{,}5\times10^{-13}$	3×10^{-13}	5×10^{-13}	$1{,}5\times10^{-12}$
Габаритные размеры (выс × ш × дл), м	0,2×0,44×0.59	0,2×0,47×0,51	0,4×0,52×0,7	0,4×0.52×0.7
Масса, кг	34	31	31	40

В заключении главы представлена концепция построения квантового дискриминатора для космического применения, отличающаяся уменьшенной массой, увеличенным временем безотказной работы и способностью

[2] в пределах технических условий и спецификаций кроме ПВСЧ Шанхайской обсерватории [19].

выдерживать большие комбинированные механические перегрузки во время выведения космического аппарата на орбиту Земли.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведена экспериментальная верификация аналитических амплитудно-частотных характеристик, полученных в приближении «стационарного режима» при решении уравнений водородного мазера. Доказано, что данное решение удовлетворительно описывает экспериментальные данные лишь в диапазоне $0{,}2 \le S_0 \le 2{,}0$ значений параметра насыщения линии водорода. Предложен вариант обобщенного решения, в котором коэффициент усиления определен в приближении «стационарного режима», а параметр возбуждения найден на основе приближения «заданного поля».

2. Проведено экспериментальное исследование формы и ширины спектральной линии водорода, показавшее неизвестный ранее результат – при $S_0 > 2$ наблюдается расщепление линии на три составляющие. Выявлен определяемый расщеплением механизм неоднородного уширения линии. Обнаруженное явление идентифицировано с динамическим эффектом Штарка-Зеемана. Высказано предположение, что данный физический процесс должен быть характерен для всех пассивных стандартов частоты.

3. Обнаружен аномальный режим затягивания частоты выходного сигнала ПВСЧ резонатором, при котором изменение частоты резонатора и изменение частоты ПВСЧ имеют разный знак, частным случаем аномального режима является отсутствие затягивания. Показано, что данный режим обусловлен расщеплением линии при проявлении динамического эффекта Штарка-Зеемана.

4. На основе численного решения уравнения теплопроводности в среде программирования *Inprise Delphi* создана квазиравновесная модель работы очистителя, позволившая оценить эффективность использования различных источников питания. Для теоретического исследования автоколебательного режима водородопроницаемости для очистителя было составлено, а затем аналитически решено нелинейное дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом. Выработаны рекомендации по усовершенствованию технологии изготовления очистителей.

5. Проведено изучение надежности источника атомарного водорода и определены основные механизмы деградации разрядной колбы. С помощью модели ВЧ-плазмы разряда, напряжение зажигания которой определяется также

зарядом, накопленным в стекле колбы, получены зависимости между сроком службы и параметрами источника атомарного водорода. Выработаны рекомендации по уменьшению скорости деградации и увеличению срока службы разрядной колбы.

6. С помощью трехмерного электродинамического моделирования проведено изучение добротности и коэффициента заполнения СВЧ-резонатора в зависимости от уменьшения его размеров, а также определены сдвиги частоты резонатора, вызываемые продольными и поперечными перемещениями накопительной колбы из кварцевого стекла в резонаторе.

7. Найдены аналитические зависимости для коэффициентов отражения и поглощения при передаче мощности через резонатор, выраженные через коэффициенты связи с резонатором (рассмотрен общий случай не равных коэффициентов связи). Данный подход позволяет определять величину СВЧ-поля в резонаторе.

8. Проведен анализ погрешностей настройки системы АПЧ резонатора на вершину спектральной линии атома водорода, возникающих при искажении спектра сигнала возбуждения и формы резонансной кривой СВЧ-резонатора.

9. Разработана антенная модель влияния электронной перестройки частоты СВЧ-резонатора на его добротность. Полученные в ходе теоретического и экспериментального исследования результаты позволили разработать автономную АНР резонатора методом переключения его частоты для ВСЧ Ч1-75А и Ч1-90, а также усовершенствовать АПЧ резонатора для ПВСЧ Ч1-76А и Ч1-91.

10. Проведен теоретический анализ предельной нестабильности частоты выходного сигнала ПВСЧ и ее связи с уменьшением размеров СВЧ-резонатора.

11. Проведена оптимизация коэффициентов связи с резонатором, результаты которой позволили на 20% улучшить кратковременную нестабильность частоты выходного сигнала стандарта.

12. Предложена модель температурной чувствительности ПВСЧ, обусловленной квантовым дискриминатором, в которой главными факторами являются остаточная отстройка СВЧ-резонатора и зависимость сдвига частоты от мощности сигнала возбуждения. Выработанные рекомендации позволили в 2 раза уменьшить температурную чувствительность стандарта.

13. Предложена конструкция КВД для использования на борту космического аппарата в составе глобальной спутниковой радионавигационной системы «ГЛОНАСС».

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при разработке ПВСЧ Ч1-86, Ч1-76А и Ч1-91. Стандарт частоты Ч1-76А выпускается серийно и экспортирован во многие страны. Он награжден дипломом «Гарантия качества и безопасности» III Московской Международной Промышленной Ярмарки “MIIF-2004”, в 2008 стал лауреатом программы «100 лучших товаров России» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Характеристики разработанных промышленных КВД и стандартов частоты на их основе находятся на уровне образцов ведущих производителей, а стандарт частоты Ч1-91 имеет среди промышленных ПВСЧ наилучшие в мире метрологические характеристики. У нового поколения ПВСЧ по сравнению с базовой моделью Ч1-76 нестабильность частоты выходного сигнала уменьшилась в 4 раза, воспроизводимость частоты улучшилась в 2 раза, средняя наработка на отказ увеличилась в 10 раз, масса и объем стандарта уменьшились в 1,5 раза.

Список цитированной литературы

1 Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера. – 2002, с. 211.

2 Уоллс Ф.Л. Стандарты частоты на атомарном водороде // ТИИЭР, т. 74. – 1986, № 1, с. 160-164.

3 Busca G., Brandenberger H. Passive H-maser // Proc. of the 33 Annual Symp. on Frequency Control. – USA, Washington.–1979, pp. 563-568.

4 Audoin C., Vanier J. The quantum physics of atomic frequency standards. – IOP Publishing, Bristol and Philadelphia. – 1989, v. 2.

5 Wang Q., Mosset P., Droz F., Rochat P., Busca G. Verification and optimization of the physics parameters of the onboard Galileo passive hydrogen maser // Proc. of the 38 Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. – USA, Reston. – 2006.

6 Делоне Н.Б., Крайнов Н.П. Атом в сильном световом поле. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

7 Гришанин Б.А. Спектр флуоресценции двухуровневого атома в условиях частичного подавления фазовой релаксации сильным резонансным полем // ЖЭТФ. – 1983, т. 85, вып. 2(8), с. 447-455.

8 Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука. – 1981, с.393.

9 Busca G., Wang Q., Belloni M., Mattioni L. Cavity pulling in Galileo passive hydrogen maser // IEEE International Frequency Control Symposium jointly with 17 European Frequency Time Forum. – USA, Tampa. – 2003, pp. 86-89.

10 Бекман И.Н., Шестаков В.П., Тажибаева И.Л., Габис И.Е. и др. Проникновение водорода сквозь никель с различным элементным составом поверхности // Физико-химическая механика материалов. – 1991, т. 27, с. 43-47.

11 Лисовский В.А. Критерий пробоя газа в СВЧ-поле // Журнал технической физики. – 1999, т. 69, вып. 11, с. 25-29.

12 Минакова Л.Б., Рудь Л.А. Резонансное поглощение в волноводах, содержащих диэлектрические включения с потерями // Радиотехника и электроника. – 2004, т.49, №2, с.141.
13 Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. – М.: Высшая школа.– 1990, с.209.
14 Бененсон Л.С., Фельд Я.Н. Рассеяние электромагнитных волн антеннами // Радиотехника и электроника. – 1988, т.33, №2, с.225-246.
15 Багдасарян А., Анжелакос Д.Ж. Рассеяние электромагнитных волн проводящими витками. Численный метод решения задачи для круглых рамочных антенн // ТИИЭР. – 1965, т.53, №8, с.944-948.
16 Скиндлер Дж., Блексмит П. Управление рассеянием электромагнитной энергии путем подключения комплексной нагрузки // ТИИЭР. – 1965, т.53, №8, с.1137-1148.
17 Kozlov S.A., Logachev V.A. Influence of the various factors on the passive hydrogen maser frequency instability // Proc. of the 51 Annual Frequency Control Symposium. – USA, Orlando. – 1997, p. 286.
18 Бочков Г.Н. Флуктуации в неравновесных радиофизических системах. – Горький: ГГУ. – 1981, с. 74.
19 Yonghui X., Jiayua D., Wenxing C. et al. Development of passive hydrogen maser in Shanghai Astronomical Observatory // 24 European Frequency and Time Forum. – Netherlands, Noordwijk. – 2010, p.151.

Работы, опубликованные по теме диссертации

Л.1 Васильев В.И. О влиянии амплитуды сигнала возбуждения на выходную частоту пассивного водородного стандарта частоты // Труды XXIX научно-технической конференции молодых специалистов и специалистов военных метрологов «Метрологическое обеспечение обороны». – Мытищи, 32 ГНИИ МО РФ. – 2004, с. 169-175.
Л.2 Васильев В.И. Возможность компенсации зависимости частоты выходного сигнала от амплитуды сигнала возбуждения в пассивных водородных стандартах частоты // Вестник МВВО АТН РФ, сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. – 2004, № 1(10), с. 16-21.
Л.3 Васильев В.И., Полулях А.В. Система стабилизации интенсивности атомного пучка в водородных стандартах частоты и времени // Труды XXIX научно-технической конференции молодых специалистов и специалистов военных метрологов «Метрологическое обеспечение обороны». – Мытищи: 32 ГНИИ МО РФ. – 2004, с. 162-168.
Л.4 Васильев В.И. Моделирование надежности источника атомарного водорода в составе водородного стандарта частоты // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2009». – Нижний Новгород: НГТУ. – 2009, с. 67-68.
Л.5 Васильев В.И., Тимофеев Ю.В. Моделирование электретного механизма деградации стенок диссоциатора в плазме безэлектродного водородного ВЧ-разряда низкого давления // Труды 13-й Научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ. – 2009, с. 20-21.

Л.6 Васильев В.И. Влияние перемещения колбы на изменение частоты резонатора магнетронного типа в пассивном водородном стандарте частоты // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2006». – Нижний Новгород: НГТУ. – 2006, стр.34.

Л.7 Васильев В.И. Об оптимальной точке настройки резонатора в пассивном водородном стандарте частоты. // Труды 9-й Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2005, с82.

Л.8 Васильев В.И., Демидов Н.А., Козлов С.А., Тимофеев. Ю. В. Точность настройки резонатора в системе автоматической подстройки частоты пассивного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. – 2009, №10, с 36-40.

Л.9 Демидов Н.А., Логачев В.А., Васильев В.И., Воронцов В.Г., Козлов С.А., Гаврилов В.В. Новое поколение водородных стандартов частоты и времени // Труды ИПА РАН. – 2007, вып.16, с.29-40.

Л.10 Васильев В.И. Резервы сохранения добротности СВЧ-резонатора магнетронного типа при его миниатюризации в пассивном водородном стандарте частоты // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2007». – Нижний Новгород: НГТУ– 2007, с. 72.

Л.11 Васильев В. И. Проверка трехмерным СВЧ-моделированием качественной теории отражения, поглощения и передачи энергии в резонаторе, соединенном на проход // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2009». – Нижний Новгород: НГТУ.– 2009, с.67-68.

Л.12 Васильев В.И., Горохов К.В. К вопросу о воздействии гауссового шума на смещение показаний счетных измерителей частоты // Вестник МВВО АТН РФ, сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. – 2003, вып.9, с. 57-63.

Л.13 Васильев В.И.. Изменение добротности СВЧ-резонатора при электронной перестройке его частоты в водородном стандарте частоты и времени.// Радиоизмерения и электроника. – 2004, вып. 11, с. 33.

Л.14 Васильев В.И., Демидов Н.А., Козлов С.А. Влияние искажения спектра ФМ-сигнала на работу системы автоматической подстройки частоты резонатора в пассивном водородном стандарте частоты и времени // Радиоизмерения и электроника. – 2009, вып.15, с. 56-59.

Л.15 Васильев В.И., Демидов Н.А. Водородные стандарты частоты и времени. Современное состояние и тенденции развития//Электроника:НТБ. – 2008, № 4, с.92-96.

Л.16 Васильев В.И. Температурная чувствительность пассивного водородного стандарта частоты и времени, обусловленная влиянием водородного дискриминатора // Радиоизмерения и электроника. – 2009, вып. 15, с. 51-55.

Л.17 Демидов Н.И., Логачев В.А., Васильев В.И., Воронцов В.Г., Козлов С.А. Новое поколение квантовых водородных стандартов частоты и времени Нижегородского НИПИ «Кварц» // Измерительная техника. – 2009, №10, с. 21-25.

Л.18 Разработка и экспериментальная отработка водородного стандарта частоты для космического применения: пояснительная записка эскизного проекта ОКР/ Демидов Н.И., Логачев В.А., Васильев В.И; – Н.Новгород: ФГУП ННИПИ «Кварц». –2007.