

На правах рукописи



Купалов Дмитрий Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПА ДЛЯ АТОМНЫХ
СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ ФОНТАННОГО ТИПА

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Менделеево – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Научный руководитель – доктор технических наук, заместитель генерального директора - начальник Главного Метрологического Центра Государственной Службы Времени и Частоты (ГМЦ ГСВЧ) ФГУП «ВНИИФТРИ», Блинов Игорь Юрьевич.

Официальные оппоненты:

Биленко Игорь Антонович - доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Мишагин Константин Геннадьевич - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России), г. Мытищи.

Защита состоится «__» ноябрь 2018 г. на заседании диссертационного совета Д 308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу:
141570 п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл.,
тел. 8(495) 744-81-12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ».

Автореферат разослан «__» сентябрь 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук


М.В. Балаханов

Актуальность темы диссертации

Современный мир немислим без глобальных навигационных спутниковых систем. В основе спутниковой навигации лежит принцип определения псевдодальности: времени распространения сигнала от спутника на орбите до наземного приемника, умноженное на скорость света в вакууме. Очевидно, что точность навигационных измерений напрямую зависит от метрологических характеристик стандартов времени и частоты как космического, так и наземного сегментов. В настоящее время особое внимание в нашей стране уделяется развитию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и ее функциональным дополнениям. В интересах достижения тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы в рамках реализации Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» поставлена задача обеспечить согласование государственной шкалы времени UTC(SU) с международной шкалой времени UTC и системной шкалой с погрешностью 3 нс и 4 нс соответственно. Для выполнения поставленной задачи необходимо, в частности, использовать высокостабильный хранитель единиц времени и частоты наземного базирования со средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО) на уровне $(1-2) \cdot 10^{-16}$.

На сегодняшний день в Государственном первичном эталоне единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 для хранения единиц времени и частоты используются водородные генераторы. Главным недостатком таких стандартов является медленное изменение (дрейф) выходной частоты, которое ограничивает метрологические характеристики как водородных генераторов, так и эталона в целом. На 2017 год СКДО ГЭТ 1-2012 при интервалах времени измерения 10 - 30 сут составляло $1,0 \cdot 10^{-15}$. Данный факт приводит к *противоречию* между актуальными требованиями навигационной системы и техническими возможностями ГЭТ 1 - 2012. Таким образом, возникает ошутимая потребность в разработке новых стандартов с более высокими метрологическими характеристиками.

На сегодняшний день в качестве стандартов времени и частоты используются водородные генераторы, атомные фонтаны и оптические стандарты на нейтральных атомах и ионах. Для решения поставленной задачи целесообразно использовать стандарты частоты фонтанного типа (таблица 1). По сравнению с водородным генератором у атомного фонтана минимальный дрейф частоты. А применение в их составе волоконных лазеров делает их конструкцию надежной, способной месяцами работать без перезапуска, в отличие от сложных лазерных систем оптических стандартов, которые в свою очередь обладают уникальными характеристиками в области воспроизведения единицы частоты. Таким образом, фонтаны на холодных атомах наилучшим образом подходят для реализации хранения единиц времени и частоты в наземном сегменте.

Таблица 1 – основные современные квантовые стандарты времени и частоты

Стандарт	Частота «часового» перехода	Кратковременная нестабильность, СКДО ($\tau = 1$ с)	Долговременная нестабильность, СКДО ($\tau \geq 1$ сут)	Относительное среднее (систематическое) изменение частоты за 1 сут (дрейф)
Водородный генератор	1,42 ГГц	$(0,8 - 2) \times 10^{-13}$	5×10^{-16}	$\pm 2 \times 10^{-16}$
Стандарт частоты фонтанного типа (Cs, Rb)	^{133}Cs : 9,193 ГГц ^{87}Rb : 6,835 ГГц	$(0,2 - 3) \times 10^{-13}$	$\leq 1 \times 10^{-16}$	---
Оптические стандарты частоты (^{87}Sr , Al^+ , Hg^+ ...)	^{87}Sr : 429 ТГц Al^+ : 1121 ТГц Hg^+ : 1065 ТГц	$(0,2 - 4) \times 10^{-15}$	---	---

Как и у любого другого квантового стандарта частоты, нестабильность атомного фонтана, определяемая добротностью атомного перехода ($Q_{\text{ат}}$), временем рабочего цикла ($T_{\text{ц}}$) и отношением сигнал-шум (С/Ш), выражается как:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{\text{ат}}} \cdot \frac{1}{C/\text{Ш}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ц}}}{\tau}} \quad (1)$$

При этом шум можно разделить на две основные составляющие: шум детектируемых атомов и шум зондирующего сигнала. Первая часть вызвана флуктуациями при измерении числа рабочих атомов в искомом квантовом состоянии. Величина этих флуктуаций обратно пропорциональна квадратному корню из числа атомов. Вторую

часть, которую определяют характеристики аппаратуры, формирующей зондирующий сигнал, будем считать известной, и ее рассмотрение выходит за рамки данного диссертационного исследования.

Таким образом, для уменьшения нестабильности квантовых стандартов необходимо увеличивать число рабочих атомов. Однако в стандартах частоты фонтанного типа, в частности цезиевого, увеличение числа атомов приводит к увеличению спин-обменного взаимодействия холодных атомов, что приводит к сдвигу измеряемой частоты. Этот сдвиг непостоянен во времени и требует выбора оптимального количества рабочих атомов, а также его непрерывного контроля и учета. Это накладывает ограничение на использование цезиевых фонтанов в качестве хранителей единиц времени и частоты.

Сложившееся противоречие разрешается использованием рубидия в качестве рабочего атома. Это связано с тем, что при одинаковом количестве рабочих атомов столкновительный сдвиг у рубидиевых фонтанов на два порядка меньше, чем у цезиевых. Данный факт делает рубидиевые стандарты теоретически более стабильными, чем цезиевые. То есть для них возможно увеличение числа рабочих атомов с незначительным увеличением спин-обменного сдвига частоты. Отметим, что количество рабочих атомов определяется главным образом конструкцией спектроскопа, в частности источником холодных атомов на основе магнитооптической ловушки.

Также следует отметить, что Международным Консультативным Комитетом по времени и частоте значение частоты атомного перехода рубидия рекомендовано для вторичного определения единицы времени – секунды в системе единиц СИ. Кроме того, частотные измерения рубидиевого фонтана уже вносят вклад в формирование Международного атомного времени.

Помимо ловушки, одной из главных частей спектроскопа является основной СВЧ резонатор. В нем происходит взаимодействие атомов с микроволновым полем. Из-за сдвига частоты, вызванного его отстройкой от атомного перехода, необходимо предельно точно настроить его частоту на атомный резонанс. При этом финальная настройка, как правило, происходит за счет изменения окружающей температуры.

Это условие накладывает ограничение на использование нескольких фонтанов в одном помещении. Для решения этой задачи требуется использование перестраиваемого СВЧ резонатора.

В настоящей работе исследуются метрологические характеристики хранителя единиц времени и частоты на основе холодных атомов рубидия, в состав которого входит спектроскоп со вспомогательной магнитооптической ловушкой и перестраиваемым СВЧ резонатором. В диссертации проведен анализ зависимости отношения сигнал-шум от режима работы источника атомов, а также представлена уникальная конструкция перестраиваемого СВЧ резонатора.

Цель работы

Уменьшение нестабильности хранения единиц времени и частоты на основе фонтанов атомов рубидия.

Объект исследований

Хранитель единиц времени и частоты фонтанного типа на основе охлажденных атомов рубидия.

Предмет исследований

Методы определения метрологических характеристик рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа.

Разработке и исследованию стандартов частоты фонтанного типа посвящены труды Ю.С. Домнина, Г.А. Елкина, А.В. Новоселова, В.Н. Барышева, А. И. Бойко, В.Г. Пальчикова и др. За рубежом данным вопросом занимались А. Clairon, S. Chu, A. Bauch, K. Gibble, S. Bize, S. Weyer и др. Проблеме источников холодных атомов посвящены труды К. Dieckmann, Z. T. Lu, K. L. Corwin, Y. Ovchinnikov и др. Идея разработки перестраиваемого СВЧ резонатора для атомного «фонтана» впервые предложена Г.А. Елкиным и А.И. Бойко. Однако в проведенных до настоящего момента исследованиях не изучены вопросы увеличения числа рабочих атомов за счет

импульсной магнитооптической ловушки и применения перестраиваемого СВЧ резонатора в рубидиевом «фонтане».

Основная научная задача

Разработка и исследование спектроскопа стандартов частоты фонтанного типа, обеспечивающего достижение нестабильности $(1-2) \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 16 суток.

Частные научные задачи

1. Оценка необходимого числа рабочих атомов и значения отношения сигнал-шум для достижения рубидиевым фонтаном заданной нестабильности.
2. Разработка магнитооптической ловушки, используемой как источник холодных атомов рубидия-87, и исследование импульсного режима ее работы.
3. Разработка перестраиваемого СВЧ резонатора.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Применение разработанного атомного спектроскопа обеспечивает нестабильность рубидиевого хранителя единиц времени и частоты фонтанного типа не более $2 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток.
2. Импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки увеличивает на 20 % число детектируемых атомов по сравнению с непрерывным режимом работы.
3. Применение перестраиваемого СВЧ резонатора в конструкции спектроскопа позволяет адаптировать атомный «фонтан» к эксплуатации в помещениях с температурой воздуха от 21 до 28 °С.

Научная новизна

1. *Впервые* предложен и реализован импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки, увеличивающий на 20 % число детектируемых атомов по сравнению с непрерывным режимом работы.

2. *Впервые* разработан и применен перестраиваемый СВЧ резонатор, позволивший адаптировать атомный «фонтан» к эксплуатации в помещениях с температурой воздуха от 21 до 28 °С.

Практическая значимость и внедрение

Созданы два атомных спектроскопа со вспомогательными магнитооптическими ловушками и перестраиваемыми СВЧ резонаторами, входящие в состав хранителя единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия (Rb1 и Rb2) из состава ГЭТ1-2018.

Личный вклад автора

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично. Автор принимал активное участие в разработке и исследовании атомного спектроскопа, его сборке и отладке, в частности, вспомогательной ловушки, используемой как источник медленных атомов и перестраиваемого СВЧ резонатора.

Степень достоверности результатов работы

Результаты исследований подтверждаются достоверными экспериментальными методиками, выполненными на основе калиброванного и сертифицированного измерительного оборудования, а также современных прецизионных приборов. Кроме того, большинство полученных экспериментальных результатов находятся в согласии с предварительно проведенными теоретическими исследованиями.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Европейском время-частотном форуме (2014 г. Невшатель, 2017 г. Безансон), на Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2014 г. Суздаль, 2016 г. Санкт-Петербург), на научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов

«Метрология в XXI веке» (2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., Менделеево), на научно-технической конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии» (2014 г., Мытищи).

Основные положения работы отражены в журнале «Измерительная техника», «Альманах современной метрологии», «Мир измерений». Материалы диссертации были представлены на соискание премии им. С.А. Христиановича по направлению «Исследование параметров времени и частоты», проводимое среди молодых ученых ФГУП «ВНИИФТРИ», в 2017 и 2018 гг. Результаты диссертационного исследования содержатся в 9 публикациях, среди них 3 публикации входят в список реферируемых журналов, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 71 наименования, двух приложений. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, включая список цитированной литературы и приложение. Диссертация содержит 65 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначена практическая значимость и личный вклад автора, приведен краткий анализ применения квантовых стандартов в области хранения единиц времени и частоты.

Глава 1 посвящена физическим принципам, лежащим в основе спектроскопии по методу Рэмси, так как именно она реализуется в стандартах частоты фонтанного типа. Особое внимание уделяется описанию цикла работы атомного «фонтана». Перечислены основные составные части установки с указанием их функционального назначения.

Метрологические характеристики квантовых стандартов определяются, в первую очередь, ансамблем рабочих атомов, лежащих в основе построения самих стандартов. Параметр сигнал-шум, равный квадратному корню из числа атомов, а также спектральная плотность мощности фазовых шумов зондирующего сигнала

определяют предельно достижимую нестабильность атомного «фонтана».

В разделе 2.1 отмечено, что для достижения заданной нестабильности в составе спектроскопа необходимо использовать источник охлажденных атомов. На основе проведенного анализа работ, посвященных данной тематике, сделан вывод о том, что наиболее интенсивный поток атомов обеспечивает источник на основе магнитооптической ловушки. Для того чтобы магнитооптическая ловушка могла выступать в роли источника атомов, в зеркале, расположенном между ловушками спектроскопа, сделано отверстие диаметром порядка 1 мм (рисунок 1). Это отверстие образует вдоль оси лазерного пучка бегущую световую волну, или так называемый «теневого канал», по которому атомы ^{87}Rb покидают область охлаждения. Во время рабочего цикла «фонтана» непрерывный поток атомов направляется к центру основной ловушки, где происходит формирование атомного облака, его доохлаждение и подброс. Таким образом, принципы лазерного охлаждения атомов позволяют выделить из природного рубидия рабочий изотоп ^{87}Rb и эффективнее произвести загрузку основной ловушки.



Рисунок 1 – Фотография облака холодных атомов Rb^{87} во вспомогательной ловушке. В правой части располагается зеркало с отверстием.

Раздел 3.1 посвящен экспериментальным исследованиям источника, которые позволяют определить его основные характеристики: среднюю продольную скорость, поток, угол расходимости, а также рабочие параметры, обеспечивающие максимальное количество детектируемых атомов.

Средняя скорость атомов в пучке и скоростное распределение определяются по

времени их пролета от области охлаждения во вспомогательной ловушке до детектирующего луча. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.

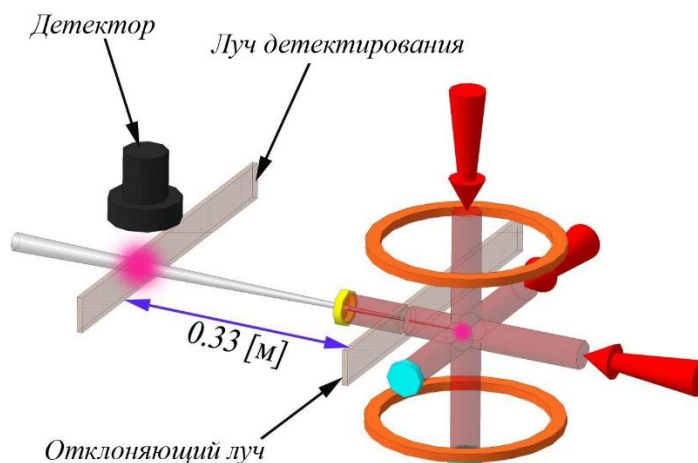


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для определения основных характеристик источника атомов на основе магнитооптической ловушки

Во время исследований, согласно схеме рисунка 2, в магнитооптическую ловушку направляется дополнительный отклоняющий луч, частота которого соответствует атомному переходу $5S_{1/2} (F = 2) \rightarrow 5P_{3/2} (F' = 3)$. Этот луч отклоняет поток от прямолинейной траектории и препятствует попаданию атомов в область детектирования. Его включение и выключение осуществляется с помощью электромеханического прерывателя. Регистрация атомного пучка производится с помощью резонансного лазерного излучения и детектора на основе быстрого мал шумящего фотодиода. Для определения скоростного распределения атомов вдоль пучка записывается процесс нарастания напряжения детектора после выключения отклоняющего луча (рисунок 3).

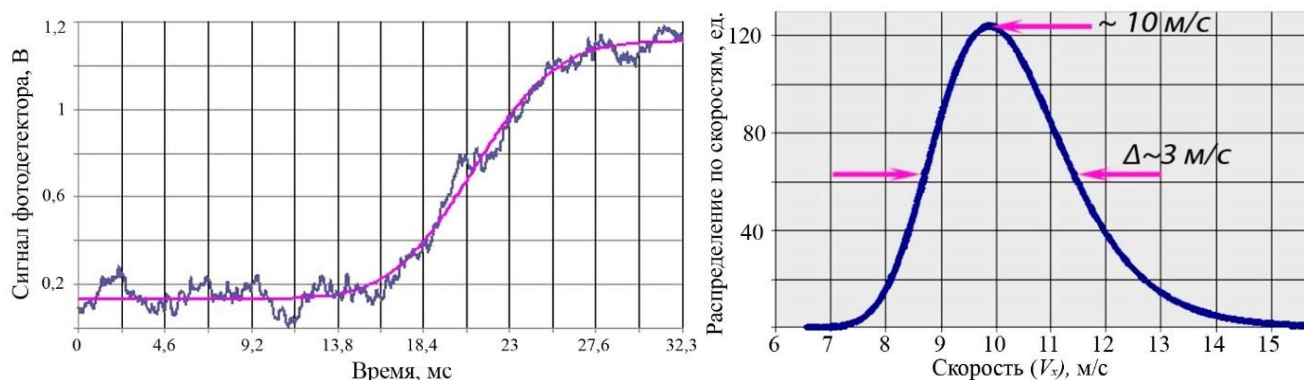


Рисунок 3 – Сигнал детектора от флюоресценции атомов Rb^{87} и распределение атомов по скоростям в пучке

Сигнал от долетевших до детектирующего луча атомов хорошо аппроксимируется интегральным нормальным распределением, которое преобразуется в распределение атомов по скоростям. Средняя продольная скорость атомов в нашем случае составляет 10 м/с, а полная ширина на полувисоте равна 3 м/с.

Для оценки количества атомов, пересекающих луч детектирования, используется следующее выражение:

$$\Phi = \frac{U_0}{G \cdot R \cdot \eta(\lambda) \cdot e} \cdot \frac{4\pi}{d\Omega} \cdot \frac{1}{k^4} \cdot \frac{v_z}{\Delta z} \cdot \left(\frac{2}{\Gamma} \cdot \frac{1+S_{op}}{S_{op}} \right), \quad (2)$$

где первый множитель характеризует детектор, второй - телесный угол, в котором фотоны флюоресценции попадают на детектор. Третий - коэффициент пропускания линз детектора, четвертый - время пребывания атомов в детектирующем луче и последний - количество фотонов, которое может переизлучить один атом. Оценочное значение потока атомов составляет: $1,6 \cdot 10^9$ атомов/с.

Результаты экспериментальных исследований позволяют включить разработанный источник в состав спектроскопа «фонтана» атомов рубидия. В разделе 3.1.4. показано, что использование вспомогательной магнитооптической ловушки, работающей в непрерывном режиме, в составе атомного спектроскопа увеличивает число детектируемых атомов в 40 раз.

Для увеличения количества рабочих атомов автором предложен импульсный режим работы вспомогательной ловушки. Он заключается в модуляции тока одной из катушек, расположенных вдоль вертикальной оси. Это позволяет смещать нулевой потенциал магнитного поля относительно геометрического центра ловушки и накапливать атомы вне «теневого канала». За 300 мс до начала процесса охлаждения в основной ловушке происходит включение тока смещения, и накопленное облако, попадая в «теновой канал», покидает вспомогательную ловушку. При этом интервал времени между включением смещения и началом формирования облака пропорционален средней скорости атомов. Применение импульсного режима в цикле работы рубидиевого «фонтана» позволяет увеличить число рабочих атомов более чем на 20 процентов (рисунок 4).

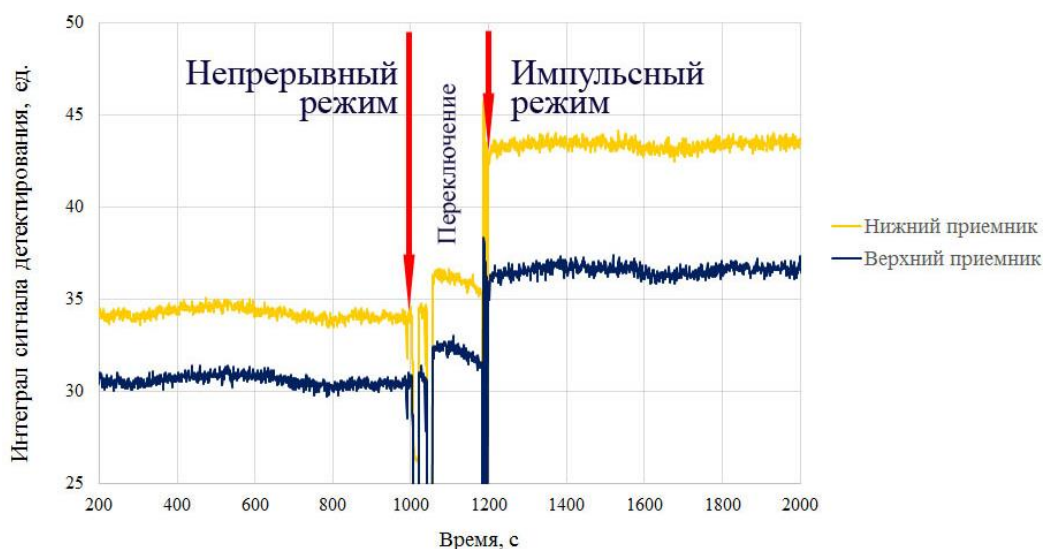


Рисунок 4 – Сигналы приемников спектроסקопа при переключении режима работы вспомогательной ловушки

Этот эффект объясняется тем, что при формировании атомного облака вне «теневого канала» атомы больше времени проводят в зоне охлаждения, а значит плотность облака увеличивается, при этом потери атомов из-за наличия «теневого» канала отсутствуют. При включении тока смещения практически все накопленные атомы направляются к центру основной ловушки.

Таким образом, результаты проведенных в настоящей главе исследований являются весовым подтверждением необходимости использования источника атомов на основе магнитооптической ловушки в составе спектроסקопа, а также показывают, что предложенный режим работы источника приводит к увеличению рабочих атомов.

В основе работы стандарта частоты фонтанного типа лежит двукратное взаимодействие атомов с электромагнитным полем при баллистическом полете облака. Раздел 2.4 посвящен разработке и исследованию перестраиваемого СВЧ резонатора и его влиянию на метрологические характеристики квантового стандарта в целом.

Для функционирования атомного «фонтана» в СВЧ резонаторе спектроסקопа необходимо возбуждать моду типа H_{011} на частоте 6,834... ГГц, соответствующей частоте атомного перехода $5S_{1/2}(F=1, m=0) \rightarrow 5S_{1/2}(F=2, m=0)$. Отстройка частоты резонатора от указанного значения вызывает сдвиг измеряемой частоты, который может быть выражен как:

$$\delta\omega_{\text{затяг}}^{\text{амп}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{Q_{\text{рез}}^2}{Q_{\text{ат}}^2} \Delta_{\text{рез}} b\tau \operatorname{ctg}(b\tau) \quad (3)$$

где $Q_{\text{рез}}$ и $Q_{\text{ат}}$ – добротность резонатора и атомного резонанса, $b\tau$ – коэффициент, определяющий мощность импульса Раби при взаимодействии атома с СВЧ полем, и $\Delta_{\text{рез}}$ – отстройка собственной частоты резонатора относительно частоты атомного перехода. Из данного выражения следует, что при $Q_{\text{рез}} \approx 29500$, $Q_{\text{ат}} = 7 \cdot 10^9$ и неопределенности коэффициента $b\tau$ 10 % и отстройки 80 кГц затягивание частоты составит $\sim 3 \cdot 10^{-17}$. Таким образом, в стандартах частоты фонтанного типа важна точная настройка частоты резонатора на частоту атомного перехода. С другой стороны, выбор значения нагруженной добротности ($Q_{\text{нагр}} \approx Q_{\text{ненагр}}$) обусловлен высокими требованиями к распределению фазы колебания в полости резонатора, так как неоднородность распределения фазы вызывает сдвиг измеряемой частоты. Таким образом, СВЧ резонатор атомного фонтана, во-первых, должен обладать высокой добротностью и, во-вторых, должен быть настроен как можно ближе к частоте атомного перехода.

Для определения необходимых размеров и формы СВЧ резонатора разработана модель, позволяющая рассчитывать его собственные частоты. При этом цилиндрический резонатор дополняется двумя проточками, позволяющими разнести ближайшие моды резонатора (рисунок 5). Результаты расчета изложены в разделе 3.2 диссертации.

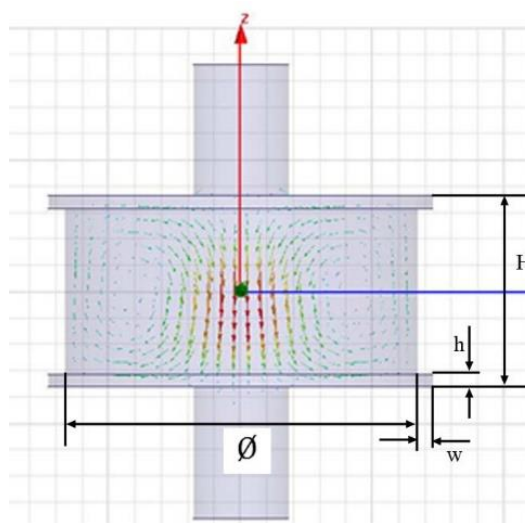


Рисунок 5 – Компьютерная модель распределения магнитного поля в СВЧ резонаторе

Предварительная настройка резонатора с неопределенностью ± 50 МГц производится путем механической доработки его внутренних размеров. Финальная настройка, как правило, происходит за счет изменения окружающей температуры. Это условие накладывает ограничение на использование нескольких фонтанов в одном помещении. Особенность разработанного резонатора заключается в том, что его конструкция позволяет производить финальную настройку после полной сборки атомного «фонтана», не нарушая вакуумный объем спектроскопа. Изменение собственной частоты резонатора осуществляется путем незначительной деформации верхней крышки резонатора.

На рисунке 6 изображен чертеж перестраиваемого СВЧ резонатора, у которого вместо толстой верхней стенки, ограничивающей внутренний объем, применяется тонкая, порядка 0,8 мм, стенка (далее мембрана перестройки).

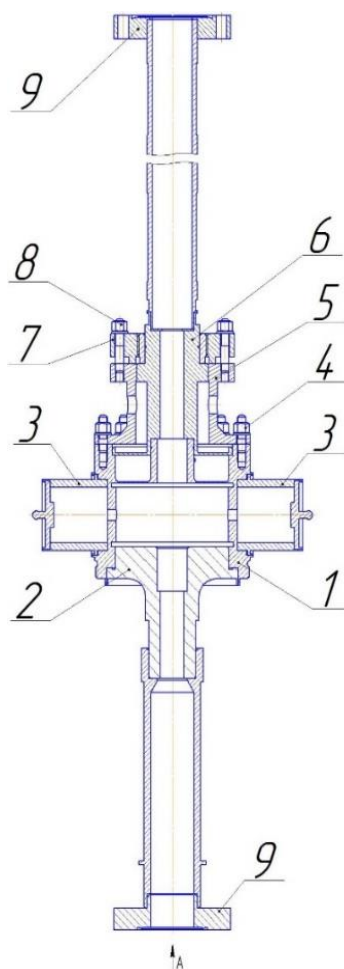


Рисунок 6 – Чертеж перестраиваемого СВЧ резонатора: 1 – корпус с мембраной перестройки, 2 – опорный фланец, 3 – прямоугольные волноводы возбуждения, 4 – соединительные шпильки, 5 – направляющая втулка, 6 – поршень, 7 – гайка перестройки, 8 – фиксирующие шпильки, 9 – присоединительные вакуумные фланцы

Изменение положения поршня осуществляется за счет настроечной гайки. Поршень деформирует мембрану перестройки, изменяя высоту внутренней полости СВЧ резонатора, что приводит к изменению его собственной частоты. В результате, СВЧ резонатор можно настроить на заданную комнатную температуру без нарушения вакуума в объеме спектроскопа.

В ходе лабораторных испытаний измерены основные характеристики изготовленных перестраиваемых СВЧ резонаторов. Из экспериментально полученных значений определен температурный коэффициент частоты резонатора, который составляет -113 КГц/градус. При этом собственная частота такого резонатора может быть подстроена в диапазоне 5 МГц с неопределенностью 10 КГц.

Таким образом, разработанная конструкция позволяет настроить частоту резонатора без изменения температуры в помещении и нарушения вакуума в спектроскопе.

Глава 4 посвящена нестабильности стандартов времени и частоты, а также методам ее измерения. В разделе 4.2 изложены результаты экспериментальных исследований атомного «фонтана», направленных на оценку его нестабильности (см. выражение 1). Отметим, что количественной характеристикой нестабильности меры частоты является среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО).

Для определения добротности атомного перехода ($Q_{\text{ат}} = f_{\text{ат}}/\Delta f$) исследуется зависимость вероятности атомного перехода от отстройки частоты сигнала опроса (резонанс Рэмси). Вероятность атомного перехода, определяемая как отношение количества атомов, совершивших атомный переход (N_2), к общему числу атомов (N_1+N_2), рассчитывается по сигналам приемников. При этом считается, что интеграл сигнала ($S_{1,2}$) пропорционален числу атомов в искомом квантовом состоянии:

$$P = \frac{N_2}{N_1+N_2} \sim \frac{S_2}{S_1+S_2}. \quad (4)$$

Ширина на уровне полувысоты центрального пика резонанса Рэмси (Δf) составляет $0,98$ Гц (рисунок 7), что соответствует добротности атомного перехода $Q_{\text{ат}} = 7,1 \cdot 10^9$.

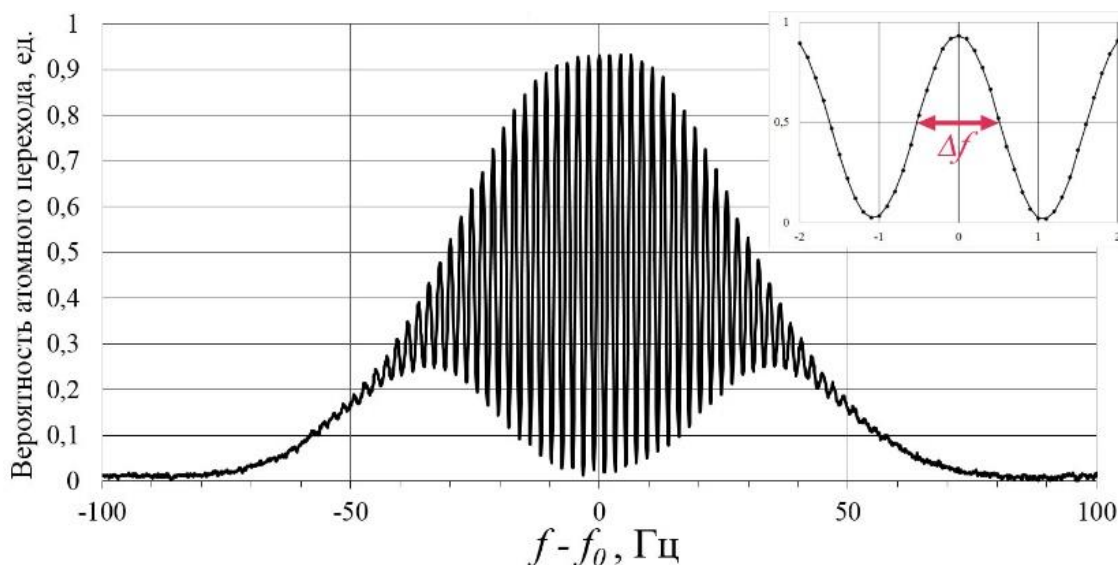


Рисунок 7 – Зависимость вероятности атомного перехода от отстройки частоты опросного сигнала (резонанс Рэмси). В правом верхнем углу - центральный пик в увеличенном масштабе

Для определения отношения сигнал-шум частота опросного сигнала устанавливается в соответствии вероятности перехода $1/2$, и в течение 100 «выстрелов» фонтана записываются сигналы с приемников. Отношение сигнал-шум рассчитывается по формуле:

$$C/\text{Ш} = \frac{\sigma(S_1 - S_2)}{2\langle S_1 + S_2 \rangle}, \quad (5)$$

где в числителе - это выражение среднеквадратического отклонения разности интегралов сигналов при каждом «выстреле», а в знаменателе - среднее значение суммы интегралов двух сигналов детекторов. Для случая, когда «фонтан» функционирует со вспомогательной ловушкой, работающей в импульсном режиме, отношение сигнал-шум составляет 750. При этом предельно достижимая нестабильность (1), соответствующая данному отношению, составляет $5,8 \cdot 10^{-14}$ для интервала времени измерения 1 с. Если учесть известную нестабильность сигнала опроса ($\sim 1 \cdot 10^{-13}$ ($\tau = 1$ с)), то оценочная нестабильность атомного «фонтана» в приближении «белого шума» составляет $1 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток. Данная оценка позволяет сделать вывод, что разработанный спектроскоп обеспечивает необходимое количество атомов для достижения заданной нестабильности.

Раздел 4.3 посвящен экспериментальным исследованиям, подтверждающим полученные оценочные значения нестабильности.

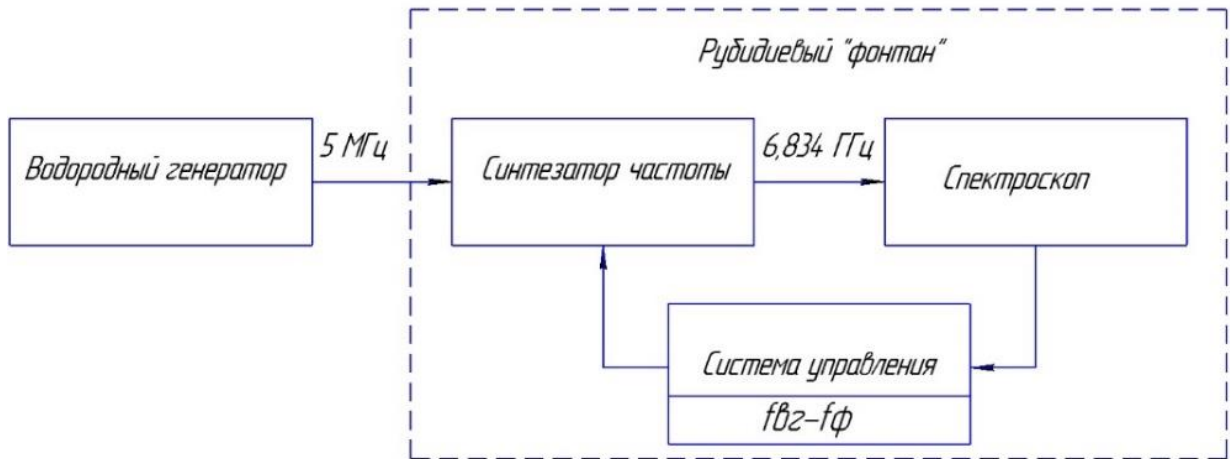


Рисунок 8 – Схема измерения СКДО рубидиевого «фонтана» относительно водородного генератора

На рисунке 8 представлена схема эксперимента для измерения СКДО рубидиевого «фонтана». Согласно схеме, на вход синтезатора рубидиевого «фонтана» подается сигнал водородного генератора (5 МГц), который умножается до частоты атомного перехода и подается на СВЧ резонатор спектроскопа. После взаимодействия холодных атомов с СВЧ полем и детектирования атомных переходов вычисляется разница частот водородного генератора и стандарта частоты фонтанного типа.

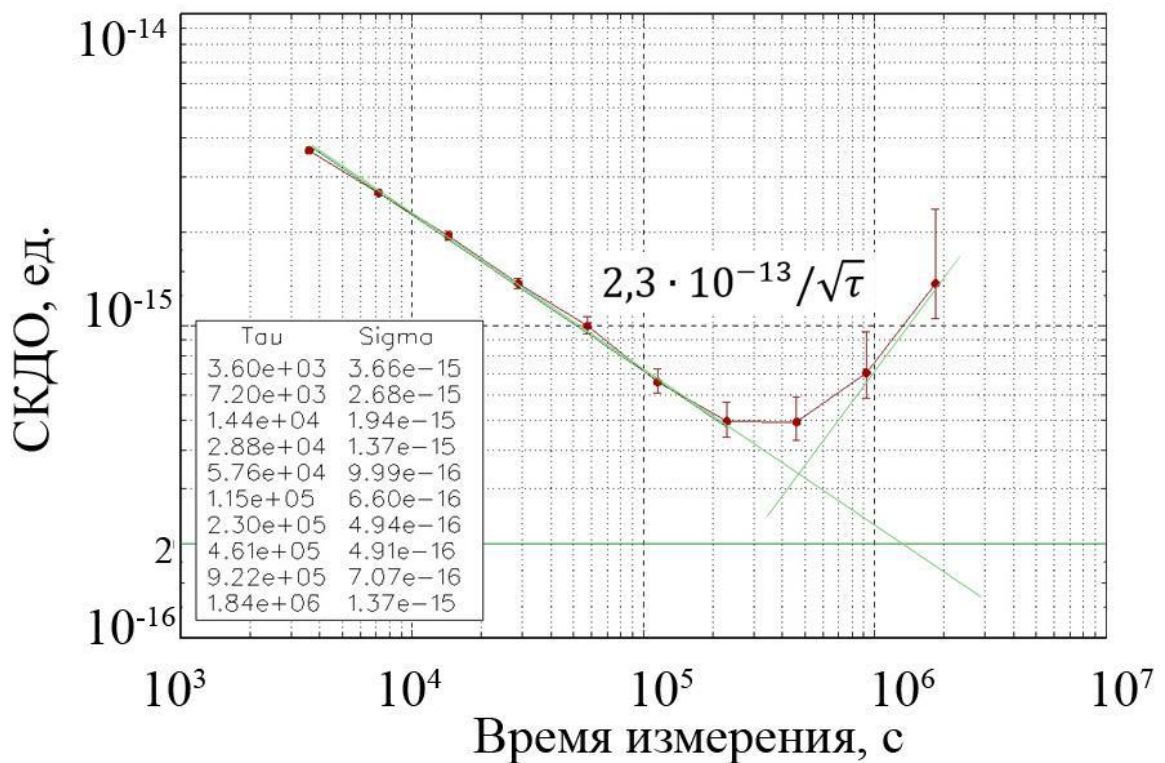


Рисунок 9 – СКДО рубидиевого «фонтана» относительно водородного генератора

На рисунке 9 представлено СКДО полученной разности частот. Отметим, что экспериментальные точки согласуются с наклоном прямой, характеризующим «белый» шум. Однако на временах измерения более 3 суток нестабильность ухудшается в связи с дрейфом водородного генератора. Для учета дрейфа водородного генератора было измерено СКДО разности частот двух рубидиевых «фонтанов» идентичных конструкций и с близкими друг относительно друга метрологическими характеристиками. Схема эксперимента изображена на рисунке 10. Данная схема измерений позволяет исключить из измерительного процесса нестабильность водородного генератора и оценить СКДО рубидиевого «фонтана».

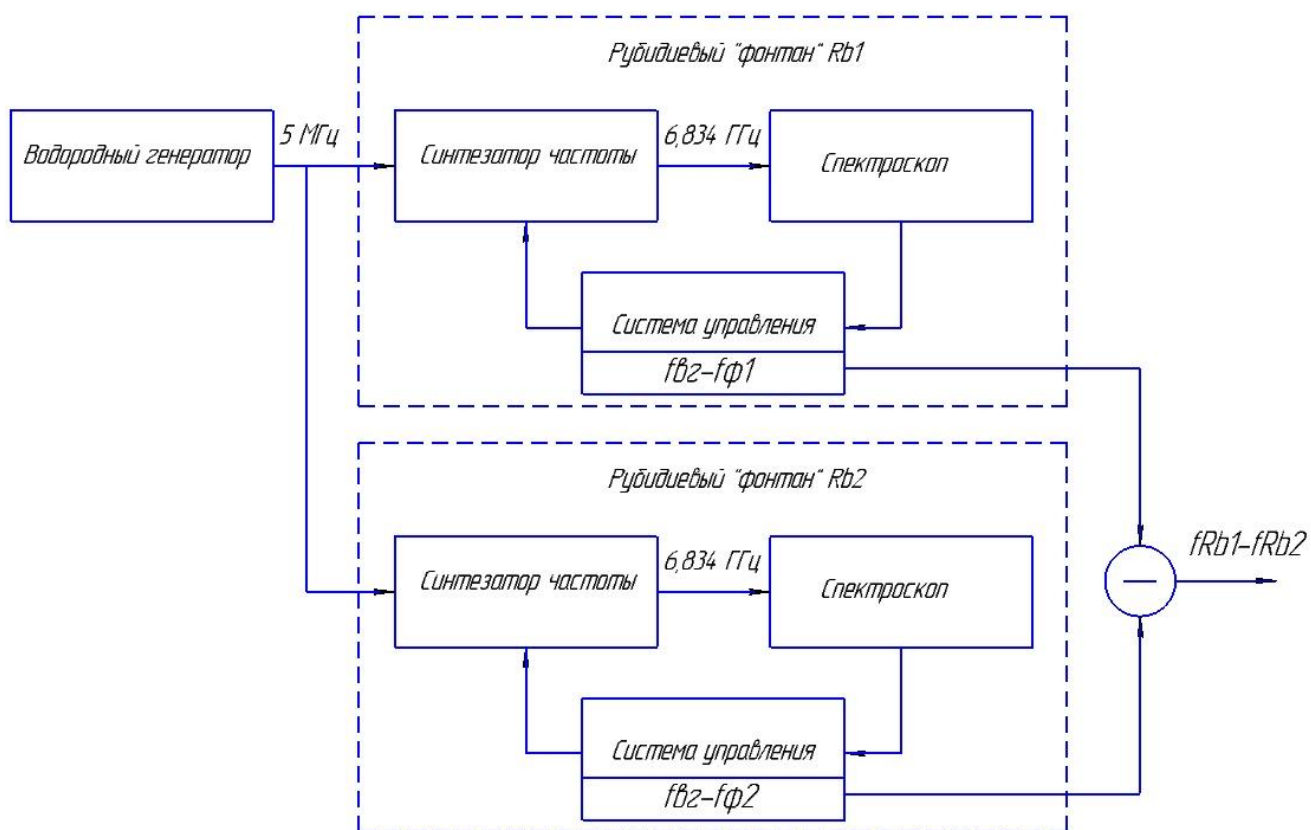


Рисунок 10 – Схема измерения СКДО рубидиевого «фонтана» Rb1 относительно рубидиевого «фонтана» Rb2

Таким образом в главе 4 показано, что применение разработанного атомного спектроскопа обеспечивает нестабильность рубидиевого хранителя единиц времени и частоты фонтанного типа не более $2 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток (рисунок 11).

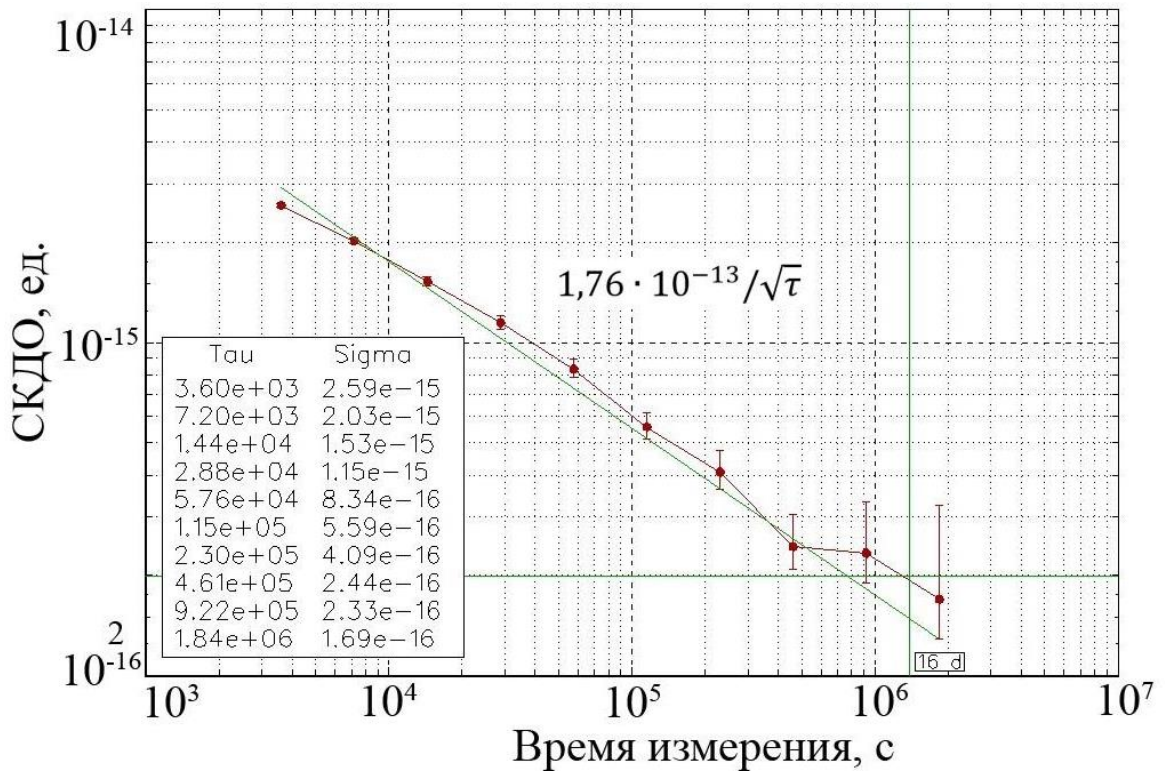


Рисунок 11 – СКДО рубидиевого «фонтана» Rb1 относительно рубидиевого «фонтана» Rb2

В заключении приводятся основные научные результаты диссертации и выводы о проделанной работе.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая задача: разработка атомного спектро스코па хранителя единиц времени и частоты на холодных атомах рубидия, обеспечивающего нестабильность на уровне $(1-2) \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 16 суток.

В процессе диссертационного исследования получены следующие научные результаты:

1. Разработанная вспомогательная магнитооптическая ловушка, работающая в импульсном режиме, обеспечивает необходимое отношение сигнал-шум для достижения заданной нестабильности.
2. Уникальная конструкция перестраиваемого высокочастотного СВЧ резонатора позволяет размещать два атомных фонтана в помещении с одной системой кондиционирования.

3. Разработанный спектроскоп со вспомогательной магнитооптической ловушкой и перестраиваемым СВЧ резонатором входят в состав хранителя единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия (Rb1 и Rb2) .

Список публикаций по теме диссертации

1. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Елкин Г.А., Новоселов А.В., Копылов Л.Н., Купалов Д.С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // Измерительная техника, 2012, № 10, с. 26-30.
2. Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В., Алейников М.С., Бойко А.И., Блинов И.Ю. Малогабаритный квантовый стандарт частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой и микроволновым возбуждением по схеме Рэмси // Измерительная техника, 2016, № 12, с. 33-35.
3. Блинов И.Ю., Бойко А.И., Домнин Ю.С., Костромин В.П., Купалова О.В., Купалов Д.С. Бюджет неопределенностей цезиевого репера частоты фонтанного типа // Измерительная техника, 2017, № 1, с. 23-27.
4. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Елкин Г.А., Новоселов А.В., Копылов Л.Н., Купалов Д.С. Цезиевые реперы частоты фонтанного типа МЦР-Ф1 и МЦР-Ф2 // Мир Измерений, 2012, № 4, с. 30-34.
5. Купалов Д.С., Алейникова Е.С. Исследование источника медленных атомов на основе магнитооптической ловушки для рубидиевого стандарта частоты фонтанного типа. 7-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 17 - 19 сентября 2014 г., г. Суздаль, с. 145-149.
6. Барышев В.Н., Бойко А.И., Домнин Ю.С., Копылов Л.Н., Купалов Д.С., Купалова О.В., Новоселов А.В. Цезиевый репер частоты фонтанного типа CSFO2 ВНИИФТРИ. 7-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 17-19 сентября 2014 г., г. Суздаль, с. 309-318.
7. Купалов Д.С., Бойко А.И. СВЧ-резонатор для стандартов частоты фонтанного типа. 8-ой Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 14-16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург, с. 246-247.
8. Kupalov D.S., Baryshev V.N., Blinov I.Y., Boiko A.I., Domnin Y.S., Kopilov L.N.,

Novoselov A.V., Khromov M.N., Kupalova O. V. First Results on Rb Fountain Rb304 Frequency Standard Developed at VNIIFTRI. Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), July 9th – July 13th, 2017, France, Besançon, p. 633-635.

9. Купалов Д.С., Барышев В.Н., Блинов И.Ю., Бойко А.И., Домнин Ю.С., Копылов Л.Н., Купалова О.В., Новоселов А.В., Хромов М.Н. Репер частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия. Первые результаты // Альманах современной метрологии, 2017, вып. 11, с. 95-103.