

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора

Биленко Игоря Антоновича на диссертацию

Купалова Дмитрия Сергеевича, выполненную на тему:

«Разработка и исследование спектроскопа для атомных

стандартов частоты фонтанного типа»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Актуальность работы

Диссертация Купалова Д.С. посвящена актуальной теме повышения точностных характеристик стандартов времени частоты фонтанного типа (или так называемых «фонтанов») на холодных атомах рубидия. На сегодняшний день такие стандарты являются одними из наиболее точных средств воспроизведения частоты и используются для определения единицы времени - секунды в Международной системе единиц СИ. В ведущих метрологических центрах мира в качестве первичных стандартов частоты функционируют «фонтаны» на охлажденных атомах цезия или рубидия. Как и у любого другого квантового стандарта частоты нестабильность атомного «фонтана» определяется добротностью атомного перехода, временем рабочего цикла и отношением сигнал-шум. При этом шум можно разделить на две основные составляющие: шум зондирующего сигнала и шум детектируемых атомов. Первая часть определяется характеристиками аппаратуры формирующей зондирующего сигнал, вторая вызвана флуктуациями при измерении числа рабочих атомов в искомом квантовом состоянии. Величина этих флуктуаций обратно пропорциональна квадратному корню из числа атомов и определяется главным образом конструкцией спектроскопа. Поэтому разработка атомного спектроскопа, обеспечивающего достаточное количество атомов для достижения заданной нестабильности, является важной и актуальной задачей.

Содержание работы

Объектом исследования диссертационной работы является хранитель единиц времени и частоты фонтанного типа на основе охлажденных атомов рубидия.

Цель работы: уменьшение нестабильности хранения единиц времени и частоты на основе «фонтанов» атомов рубидия.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, сформулированы выносимые на защиту основные положения, обозначена практическая значимость и личный вклад автора.

В первой главе рассмотрены физические принципы, лежащие в основе спектроскопии по методу Рэмси, так как именно она реализуется в стандарте частоты фонтанного типа, которому посвящено диссертационное исследование.

Описан полный цикл работы атомного «фонтана», по окончании которого производится расчет частоты опорного водородного стандарта относительно атомного перехода. Приведена структурная схема стандарта частоты фонтанного типа с описанием функций отдельных составных частей.

Вторая глава посвящена конструкции атомного спектроскопа. Подробно рассмотрены его отдельные узлы и блоки участвующие в измерительном цикле «фонтана». Описаны фундаментальные принципы лазерного охлаждения нейтральных атомов, лежащего в основе стандартов частоты фонтанного типа. Особое внимание уделяется конструкционно-техническим решениям, с помощью которых обеспечиваются рабочие параметры прибора.

В **третьей главе** описан эксперимент по измерению скоростного распределения атомов ^{87}Rb в пучке вспомогательной ловушки. Приведена оценка потока, формируемого источником холодных атомов. Исходя из геометрических размеров источника, произведен расчет расходимости его пучка. Описан впервые предложенный автором импульсный режим работы источника, заключающийся в периодическом изменении положения атомного облака во вспомогательной ловушке за счет модуляции тока одной из катушек подмагничивания. На основании анализа сигналов приемников спектроскопа сделан вывод о том, что применение импульсного режима в цикле работы рубидиевого «фонтана» позволяет увеличить число рабочих атомов более чем на 20 %.

Особое внимание в этой главе уделяется компьютерному моделированию, позволяющему выбрать геометрические размеры селектирующего и основного СВЧ резонаторов. Описана уникальная конструкция СВЧ резонатора, позволяющая производить его настройку без нарушения вакуума в объеме спектроскопа и адаптировать атомный «фонтан» к заданной фиксированной температуре в помещении.

Четвертая глава посвящена нестабильности стандартов частоты фонтанного типа и ее численной характеристики (СКДО). Изложены результаты экспериментальных исследований атомного «фонтана» направленных на оценку его кратковременной нестабильности.

Для подтверждения оценки кратковременной нестабильности, производится расчет СКДО частоты разработанного атомного «фонтана» относительно опорного водородного генератора, при этом СКДО на интервалах времени измерения до трех суток составляет $2.3 \cdot 10^{-13} \cdot \tau^{-1/2}$.

СКДО «фонтана» относительно второго «фонтана» аналогичной конструкции на интервале времени измерения 16 суток составляет $(1-2) \cdot 10^{-16}$.

Научная новизна диссертационного исследования:

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

Атомные спектрометры со вспомогательными магнитооптическими ловушками и перестраиваемыми СВЧ резонаторами входят 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 спектрометра, его сборке и отладке, в частности, вспомогательной ловушки, используемой как источник медленных атомов и перестраиваемого СВЧ резонатора.

Достоверность 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

Результаты диссертационного исследования содержатся в 9 публикациях, среди них 3 публикации входят в список реферируемых журналов, рекомендованных ВАК.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В диссертационной работе не рассмотрен вопрос влияния фазового шума и нестабильности частоты аппаратуры зондирующего сигнала на нестабильность атомного «фонтана».
2. Не предоставлены зависимости характеристик атомного потока источника от параметров лазерного излучения, формирующего магнитооптическую ловушку.
3. Присутствуют грамматические ошибки и опечатки, в некоторых случаях искажающие смысл (например, подпись к рис.46).
4. На стр. 94 сказано, что время наблюдения относительного дрейфа стандартов Rb1 и Rb2 составило 5 месяцев, но результаты приводятся только для времени измерения 16 дней.

Заключение

Указанные недостатки ни как не влияют на достоверность и значимость полученных соискателем научных результатов. Диссертация Д.С. Купалова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу.

Основные результаты диссертации опубликованы в реферируемых изданиях, докладывались на научно-технических семинарах и конференциях.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Диссертационная работа полностью соответствует специальности 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение и требованиям Положения ВАК «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Купалов Дмитрий Сергеевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Я Биленко Игорь Антонович, даю согласие на включение своих персональных данных в материалы диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Профессор кафедры физики колебаний
Физического факультета имени
М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н.,



Биленко И.А.

адрес: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991
Телефон: +7 (495) 939-40-34
Электронная почта: igorbilenko@phys.msu.ru

Декан физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
профессор



Сысоев Н.Н.