

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, ГСП-1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: +7 (499) 135 14 29
 +7 (499) 132 65 54
Телефакс: +7 (499) 135 78 80
E-mail: office@sci.lebedev.ru
www.lebedev.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

ФГБУ науки ФИАН РАН



С.Ю. Савинов

«20» октября 2021 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу ПОЛЯКОВА Виктора Александровича

«Исследование и разработка водородного генератора с двойной сортировкой атомов для уменьшения нестабильности частоты», представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности

05.11.15. – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Водородные стандарты частоты и времени (ВСЧВ) входят в состав первичного эталона государственной службы времени и частоты и широко используются во многих применениях, где требуется предельно высокая точность измерений: в фундаментальных физических экспериментах, геодезии, радио-интерферометрии со сверхдлинной базой, системах синхронизации, в оборонных задачах. Многолетняя теоретическая и инженерная работа, направленная на уменьшение нестабильности ВСЧВ и улучшение его эксплуатационных характеристик, позволила довести главную из них (нестабильность) практически до теоретического предела на интервалах времени от 1 с до суток. Тем не менее, неуклонно возрастающие требования науки и промышленности поставили задачу модернизировать конструкцию ВСЧВ так, чтобы теоретический предел нестабильности еще уменьшился и провести детальную научную и инженерную разработку и испытания нового варианта ВСЧВ. Это обусловлено подпрограммой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы РФ «Космическая

деятельность России», в которой для совершенствования комплекса воспроизведения, хранения единиц времени и частоты и передачи национальной шкалы времени UTC (SU) предусмотрена разработка водородных стандартов частоты и времени с СКДО частоты не более $1,5 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки. Таким образом, улучшение метрологической базы науки и промышленности безусловно является актуальной задачей.

Основная идея работы заключается в использовании второй системы сортировки атомов водорода по их состояниям. В традиционном варианте в накопительную колбу в резонаторе поступает пучок атомов в двух верхних состояниях: рабочем $|F = 1, m = 0\rangle$, дающим вклад в генерацию мазера и нерабочем, $|F = 1, m = 1\rangle$. Атомы в нерабочем состоянии из-за спин-обменных столкновений с атомами в состоянии $|F = 1, m = 0\rangle$ уширяют линию усиления и уменьшают его. Цель диссертационной работы В.А Полякова состояла в создании рабочего макета ВСЧВ, в котором дополнительная селекция атомов в пучке позволит существенно уменьшить поступление в резонатор атомов в состоянии $|F = 1, m = 1\rangle$. При этом, дополнительным неизбежным усложнением конструкции являются необходимости перевода (инвертирования) состояния $|F = 1, m = 1\rangle$ в $|F = 1, m = -1\rangle$. Без этого вторая сортировка неосуществима.

Автором были получены следующие новые результаты:

1. Автор впервые выполнил теоретическую оценку уменьшения вклада в нестабильности частоты ВГ, обусловленного тепловыми шумами резонатора, за счет использования двойной сортировки атомов по квантовым состояниям.

2. Автор исследовал и разработал конструкцию системы двойной сортировки, адаптированную для использования в промышленных приборах. С помощью математического моделирования был проведен расчет количества атомов в различных квантовых состояниях, попадающих в накопительную колбу. В диссертации исследованы и разработаны конструкции инвертирующих областей, реализующих методы быстрого изменения направления магнитного поля и адиабатического быстрого прохождения.

4. Автором впервые проведено экспериментальное исследование ВГ с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения. Определены зависимости мощности генерации и добротности спектральной линии от различных параметров СДС, исследовано влияние нестабильности параметров инвертирующей области на выходную частоту ВГ.

6. Впервые проведено исследование метрологических характеристик ВГ с СДС по методу адиабатического быстрого прохождения. Впервые определено СКДО выходного сигнала 5 МГц исследуемого образца на уровне $1,3 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 1 сутки.

Выбор одного из методов реализации инвертирующей области для применения в промышленно выпускаемых ВСЧВ автором был обоснован большей эффективностью и воспроизводимостью результатов, а также стабильной работой СДС в обычных условиях эксплуатации. Достоверность результатов теоретических исследований подтверждается корректным использованием теории водородных мазеров, методов математического моделирования, экспериментальными результатами реальных измерений взаимной нестабильности частоты экспериментальных образцов ВСЧВ с помощью калиброванного и поверенного оборудования ЗАО «Время-Ч». Полученные результаты опубликованы в специализированных журналах и сборниках трудов: «Измерительная техника», «Метрология времени и пространства», «Труды института прикладной астрономии РАН», «Вестник метролога». Материалы диссертации докладывались лично автором на Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2012 г., 2014 г., 2016 г., 2018 г.), Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (2019 г.), Европейском время-частотном форуме и Международном симпозиуме по контролю частоты (EFTF-IFCS 2021). Результаты диссертационного исследования отражены в 13 публикациях, в том числе 4 – в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, и рекомендованных ВАК, получен 1 патент на изобретение, получен акт внедрения результатов диссертации.

В первой главе диссертации даны обзоры теории водородного лазера и литературы по двойной сортировке атомов водорода. Пионерские эксперименты по двойной сортировке атомов водорода были выполнены 55 лет назад, однако практической реализации лазера с двойной сортировкой, допускающего серийное производство до работы, представленной в диссертации, не было. Первая глава содержит также оценки возможного уменьшения нестабильности водородного генератора за счет дополнительной сортировки. Эти оценки послужили основанием проведения работы.

Во второй главе дан расчет потока атомов водорода в накопительную колбу и его зависимости от характеристик сортирующих магнитов и их геометрии. Показано, что выбор четырехполюсных магнитов обеспечивает большую эффективность использования пучка атомов водорода.

Методом инвертирования состояния $|F = 1, m = 1\rangle$ и их сравнительному анализу посвящена третья глава. Представлена теория двух методов: метода быстрого адиабатического прохождения и метода быстрой смены направления магнитного поля.

В четвертой главе описаны три метода оценки эффективности работы системы двойной сортировки атомов. Все они дают оценку разности населенностей состояний $|F = 1, m = +1\rangle$ и $|F = 1, m = -1\rangle$. Эти методы использованы в пятой главе в экспериментальном

исследовании системы двойной сортировки, созданной для промышленного водородного генератора. Для экспериментальной оценки характеристик водородных генераторов с системой двойной сортировки была изготовлена опытная серия из трех мазеров с инвертированием быстрым адиабатическим прохождением и еще одного, в котором инвертирование происходит быстрым изменением направления магнитного поля. Установлено, что метод быстрого прохождения более надежен и обеспечивает лучшую воспроизводимость результатов. Главным результатом работы является снижение нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами резонатора, в 1.5 раза по сравнению с нестабильностью промышленно выпускаемых ВСЧВ. При суточном времени измерения среднеквадратичное двухвыборочное отклонение составило $(1,3 - 1,5) \cdot 10^{-16}$.

О недостатках работы. В выводах к главе 3 следовало бы сказать, какому из рассмотренных методов отдается предпочтение. Остальные недостатки относятся к погрешностям оформления, в основном к ошибкам согласования.

Стр. 49 «скоростей углов вылета»; стр. 59 «значение стремиться к нулю», «связаны с вероятностью перехода»; стр. 67 «выражение имеют вид»; в квантовой радиофизике инверсия населенностей традиционно имеет другой смысл, следовало бы использовать инвертирование; стр. 74 «со направленных»; стр. 89 «разряд начинает тухнуть»; стр. 94 «пере обозначая».

Отмеченные недостатки не снижают безусловно положительной оценки работы. Физически обоснованное изменение конструкции водородного генератора с применением более избирательной сортировки атомов, поступающих в накопительную колбу, позволило уменьшить теоретический предел нестабильности и практически достичь этой нестабильности в созданных водородных генераторах. Это выдающийся результат мирового уровня. ВСЧС с улучшенными характеристиками найдут многочисленные применения в науке и промышленности. Основные результаты диссертационной работы А.В. Полякова оригинальны. Основные положения обоснованы. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, в которой содержится решение практически важной научной задачи уменьшения нестабильности частоты водородных стандартов частоты, достигаемого за счет использования пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии.

По важности достигнутых научно-технических результатов и практической значимости диссертационная работа В.А. Полякова удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор, несомненно, достоин

присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Диссертационная работа А.В. Полякова обсуждена и одобрена на семинаре отделения радиофизики ФИАН 21 мая 2021 г.

Ученый секретарь Отделения квантовой радиофизики ФИАН,

к.ф.-м.н.  /А.Е. Дракин/

В.н.с. Лаборатории стандартов частоты ФИАН

к.ф.-м.н.  /В.Л. Величанский/