

Результаты экспериментальных исследований водородного генератора с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям

Ю. В. ТИМОФЕЕВ, В. А. ПОЛЯКОВ, А. А. БЕЛЯЕВ, Н. А. ДЕМИДОВ

ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: polyakov@vremya-ch.com

Разработан макет водородного генератора с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям. Приведены результаты измерений нестабильности частоты водородного стандарта частоты на основе этого генератора.

Ключевые слова: активный водородный стандарт частоты, система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям, метод адиабатически быстрого прохождения, нестабильность частоты.

Prototype of active hydrogen maser with state selection system is developed. Frequency stability measurement results are given. Active hydrogen maser with state selection system prototype design and the first frequency stability results are given.

Key words: active hydrogen maser, double selecting system, adiabatic rapid passage, frequency stability.

Система двойной сортировки (СДС) атомов применяется в водородном генераторе (ВГ) для получения пучка атомов водорода, находящихся в одном квантовом состоянии. Такая сортировка позволяет повысить метрологические характеристики водородного стандарта частоты. Согласно схеме, представленной в работах [1, 2], пучок атомов водорода выходит из коллиматора и последовательно пролетает через два сортирующих магнита. После прохождения коллиматора атомы водорода находятся в четырёх квантовых состояниях. В приближении сверхтонкой структуры основного состояния во внешнем магнитном поле Земли квантовое число полного углового момента F принимает значения «0» (чему соответствует синглет с $m_F=0$) и «1» (триплет с $m_F=0$, $m_F=1$, $m_F=-1$). Сфокусированные первым сортирующим магнитом атомы водорода в квантовых состояниях с $F=1$, $m_F=0$, $m_F=+1$ попадают в инверсионную область, в которой происходит переход Майорана этих атомов из состояния с $F=1$, $m_F=+1$ в состояние $F=1$, $m_F=-1$. Затем атомы водорода отсортировываются вторым магнитом и в накопительную колбу попадают лишь активные атомы в состоянии $F=1$, $m_F=0$. Для инверсии квантовых состояний авторы настоящей статьи предложили использовать метод адиабатически быстрого прохождения [3, 4].

Основные элементы макета конструкции ВГ с двойной сортировкой атомов. В работе [5] проведено математическое моделирование СДС атомов для определения оптимальных параметров элементов данной системы. Расчёт производился с учётом распределения атомов по углам и скоростям их вылета из источника атомарного водорода и строились области углов и скоростей вылета, при которых атомы попадают в накопительную колбу. При этом учитывалось ограничение в 200 мм, наложенное на общую длину конструкции [5, 6]. По результатам моделирования авторы настоящей статьи разработали макет ВГ с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям. В созданном ВГ сортирующие магниты – четырёхполюсные. Длина первого магнита составляет 50 мм, радиус его межполюсного зазора 0,9 мм. У второго магнита эти параметры соответствуют 75 и 1,2 мм. Расстояние между

магнитами 65 мм. Максимальная индукция магнитного поля в межполюсном зазоре $B_{\max}=1$ Тл. Расстояние от источника водорода до первого магнита 10 мм. Радиус входного отверстия в накопительной колбе равен 2,7 мм. Приведённая конструкция позволяет (согласно проведенным расчётам, описанным в [9]) получить пучок, содержащий 96 % рабочих атомов и имеющий интенсивность до $2,7 \cdot 10^{13}$ атомов/с.

Разработанный макет ВГ представлен на рис. 1. После прохождения сортирующей системы 11 атомы, находящиеся в единственном состоянии с $F=1$, $m_F=0$, направляются в накопительную колбу 7, которая расположена внутри сверхвысокочастотного резонатора 8, настроенного на частоту квантового перехода. Резонатор окружён двухслойным пятизонным термостатом, его температура поддерживается постоянной с погрешностью около $1 \cdot 10^{-5}$ °С. Поскольку частота квантового перехода хоть слабо, но зависит от напряжённости магнитного поля, то резонатор окружён четырёхслойным магнитным экраном 9, а внутри резонатора создаётся постоянное поле подмагничивания, равное $2,4 \cdot 10^{-2}$ А/м и параллельное оси резонатора. Данное поле необходимо для сохранения квантового состояния атомов во время их нахождения в накопительной колбе. Все элементы ВГ находятся внутри высоковакуумной системы 5. Отработанные атомы откачиваются вакуумным геттерным 12 и магниторазрядным 3 насосами.

В разработанном макете ВГ с двойной сортировкой атомов сортирующие магниты установлены и закреплены в несущем каркасе, выполненном из немагнитных материалов. Система двойной сортировки атомов расположена в трубе, соединяющей вакуумный насос и источник пучка с входом в накопительную колбу. Соосность магнитов обеспечивается за счёт высокой точности изготовления посадочных размеров. Применение новых неодимовых магнитов из сплава NdFeB позволило уменьшить внешний диаметр сортирующей системы. При этом отпала необходимость намагничивать магниты после сборки системы. Во избежание возникновения случайных переходов Майорана вся конструкция СДС окружена магнитным экраном, предотвращающим проникновение поперечных внешних

магнитных полей в область пролёта пучка. Инверсионная область по методу адиабатически быстрого прохождения состоит из соленоида, создающего медленно изменяющееся вдоль оси пучка продольное магнитное поле, и пары прямоугольных катушек Гельмгольца для создания небольшого (единицы мегатесла) поперечного переменного магнитного поля [10]. Длина соленоида составила 40 мм, а области действия переменного поля (область инверсии) – 10 мм. Индукция магнитного поля в соленоиде $B_0 = (4...6) \cdot 10^{-4}$ Тл. Изменение индукции магнитного поля в области инверсии $\Delta B = (0,1...0,2)B_0$ Тл. Амплитуда переменного поля $B_{\text{нч}} = (0,5...1,0) \cdot 10^{-4}$ Тл. Соленоид находится внутри замкнутого магнитного экрана, предназначенного для защиты от полей рассеяния сортирующих магнитов. В торцах экрана имеются отверстия для пролёта пучка атомов водорода.

Анализ результатов. Авторы настоящей статьи провели экспериментальные исследования по определению зависимости мощности генерации и добротности спектральной линии ВГ от различных параметров СДС: величины и градиента продольного магнитного поля, частоты и амплитуды переменного поперечного магнитного поля, интенсивности пучка атомов водорода. В указанном выше диапазоне изменения параметров СДС эффективность инверсии остаётся практически постоянной. При индукции магнитного поля $B_0 < 4 \cdot 10^{-4}$ Тл инверсия начинает ухудшаться и при $B_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ Тл пропадает совсем. Зависимость мощности генерации от частоты переменного поперечного магнитного поля носит резонансный характер. В резонансе происходит увеличение мощности генерации с одновременным увеличением добротности спектральной линии. На рис. 2. показана зависимость мощности генерации P_g и добротности Q_0 спектральной линии от амплитуды переменного поперечного магнитного поля $B_{\text{нч}}$ на резонансной частоте. При амплитуде поперечного магнитного поля наблюдается существенное уменьшение мощности ВГ. Это связано с уменьшением количества рабочих атомов, которое происходит из-за низкой вероятности переходов Майорана между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода. При этом добротность спектральной линии монотонно возрастает при подходе к резонансу, так как зависит от общего количества атомов в накопительной колбе.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости произведения $Q_0 \sqrt{P_g}$, определяющего нестабильность частоты σ , которую вносят тепловые шумы ВГ, от отношения интенсивности пучка активных атомов N_a к его пороговой интенсивности N_n при включённой и выключенной СДС за время усреднения τ . Результаты получены на разработанном макете ВГ с двойной сортировкой атомов по энергетическим состояниям. По полученным экспериментальным данным оценили параметры качества q генератора и его эффективности двойной сортировки атомов $\alpha = N/N_a$, где N – полный поток атомов, поступающих в колбу [7, 8], и вычислили произведение $Q_0 \sqrt{P_g}$. Параметры качества и сортировки без включения СДС приняли значения $q=0,058$, $\alpha=2$, соответственно, что характерно для серийно выпускаемых в настоящее время водородных стандартов частоты. При включении СДС указанные параметры оказались равны 0,3; 1,05, соответственно, что

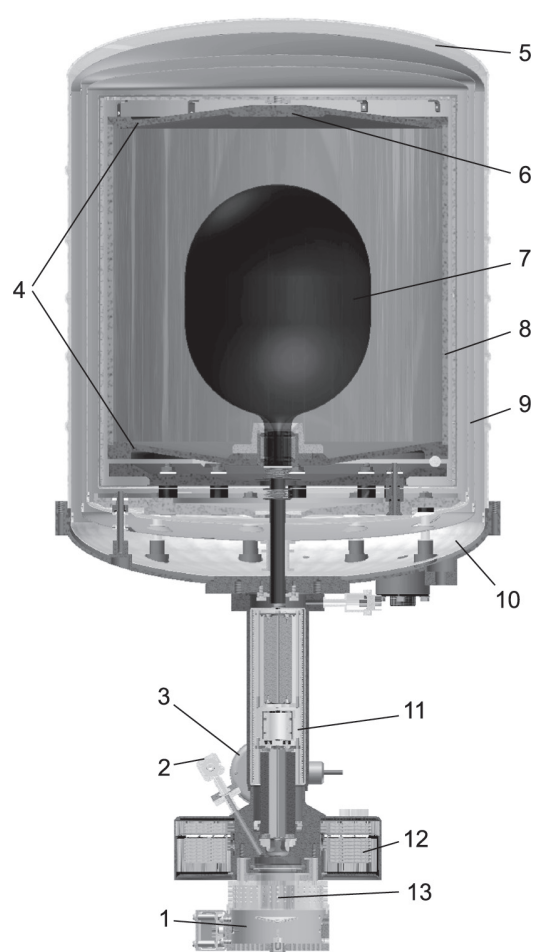


Рис. 1. Водородный генератор с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям:

1 – высокочастотный генератор; 2 – очиститель; 3, 12 – магниторазрядный и геттерный насосы, соответственно; 4 – крышки резонатора; 5 – высоковакуумная система (вакуумный колпак); 6 – подстроечный плунжер; 7 – накопительная колба; 8 – цилиндрический сверхвысокочастотный резонатор; 9 – четырёхслойный магнитный экран; 10 – основание вакуумного колпака; 11 – система двойной сортировки атомов водорода; 13 – разрядная колба источника атомарного водорода

свидетельствует об эффективности перевода атомов из состояния с $m_F=1$ в состояние $m_F=-1$ в инверсионной области, а также о высоком качестве сортировки вторым магнитом. Когда СДС включена, то значение $Q_0 \sqrt{P_g}$ возрастает в 1,46 раза, в то время как максимально возможное увеличение составляет 1,6 при $\alpha=1$ согласно проведенным расчётам. Максимальное достигнутое численное значение $Q_0 \sqrt{P_g}=2550$. Таким образом, нестабильность частоты генератора с СДС, обусловленная тепловыми шумами резонатора, должна уменьшиться до значения $\sigma(\tau)=1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$ в соответствии с формулой, представленной в [9].

Результаты определения нестабильности частоты выходного сигнала 5 МГц у ВГ с СДС представлены на рис. 4. Измерения проводили с помощью компаратора фазового многоканального Ч7-315 при использовании кросс-

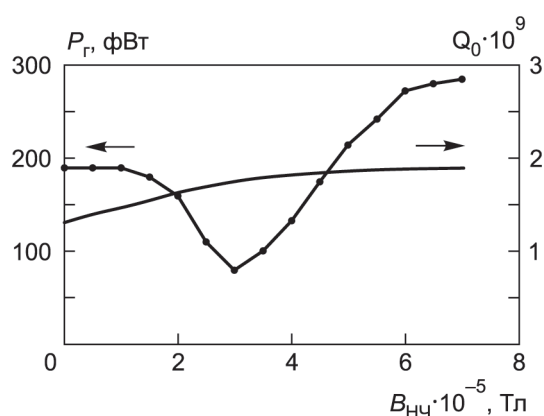


Рис. 2. Зависимость мощности генерации P_g водородного генератора и добротности Q_0 спектральной линии от амплитуды B_{HH} переменного поперечного магнитного поля

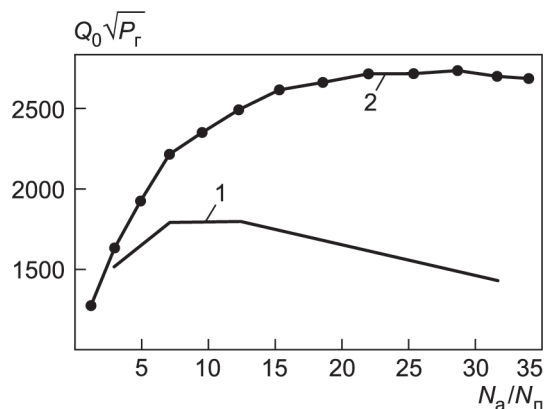


Рис. 3. Зависимость произведения $Q_0 \sqrt{P_g}$ от отношения интенсивности пучка N_a активных атомов к его пороговой интенсивности N_n с включенной (1) и выключенной (2) системой двойной сортировки атомов

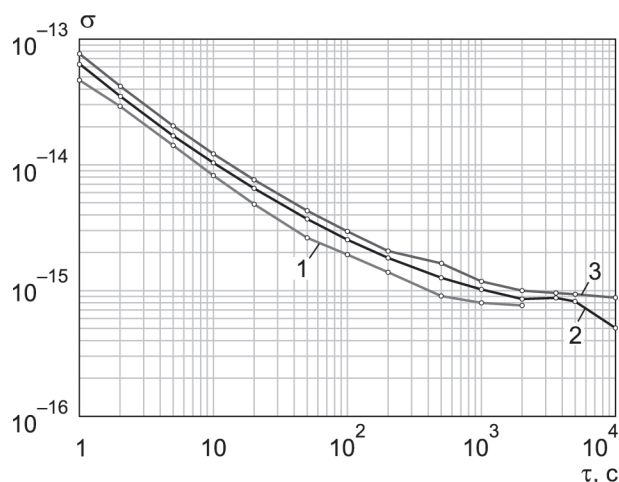


Рис. 4. Результаты измерений нестабильности частоты σ : 1 – водородным генератором с системой двойной сортировки атомов; 2, 3 – водородными стандартами частоты Ч1–1035 и Ч1–1003М, соответственно

корреляционной обработки в полосе пропускания 3 Гц. Для установления нестабильности частоты исследуемого ВГ применяли стандарты частоты и времени водородные Ч1–1003М и Ч1–1035. Макет ВГ с СДС, имеющий блок автоматической подстройки частоты, поместили в климатическую камеру VCH-A18, в которой точность поддержания температуры составляла не более $\pm 0,1$ °С. Значения нестабильности частоты в зависимости от времени усреднения приведены в таблице.

Результаты измерения нестабильности частоты с помощью водородных стандартов частоты Ч1–1035, Ч1–1003М и макета водородного генератора с системой двойной сортировки атомов

Интервал времени усреднения τ , с	Нестабильность частоты σ		
	ВГ с СДС	Ч1–1035	Ч1–1003М
1	$4,50 \cdot 10^{-14}$	$6,28 \cdot 10^{-14}$	$7,61 \cdot 10^{-14}$
10	$7,99 \cdot 10^{-15}$	$1,04 \cdot 10^{-14}$	$1,22 \cdot 10^{-14}$
100	$1,91 \cdot 10^{-15}$	$2,53 \cdot 10^{-15}$	$2,98 \cdot 10^{-15}$
1000	$7,95 \cdot 10^{-16}$	$1,03 \cdot 10^{-15}$	$1,19 \cdot 10^{-15}$
3600	–	$8,76 \cdot 10^{-16}$	$9,66 \cdot 10^{-16}$
10000	–	$5,06 \cdot 10^{-16}$	$8,83 \cdot 10^{-16}$

Закключение. Из полученных на макете ВГ с СДС результатов измерений нестабильности частоты следует, что кратковременная нестабильность частоты (при $\tau \leq 10$ с) определяется тепловыми шумами микроволнового приёмника и шумами системы фазовой автоподстройки кварцевого генератора. При $\tau = 100$ с экспериментально измеренное значение нестабильности частоты близко к теоретическому значению. При $\tau = 1000$ с наблюдается постепенное возрастание нестабильности частоты, так как начинают появляться шумы системы автоматической настройки резонатора. Эксперименты по оценке влияния нестабильности параметров СДС на частоту генерации ВГ позволили сделать следующий вывод: чтобы относительное изменение выходной частоты ВГ не превышало значение $2 \cdot 10^{-16}$, относительная нестабильность частоты переменного поля и относительное изменение величины постоянного поля в инверсионной области не должны превышать значение 10^{-4} . Таким образом, при двойной сортировке атомов по квантовым состояниям удалось экспериментально уменьшить нестабильность частоты, определяемую тепловыми шумами ВГ, до $\sigma(\tau) \leq 2 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$, что в 1,4–1,5 раза меньше, чем у применяемых в промышленности водородных стандартов частоты Ч1–1003М и Ч1–1035.

Л и т е р а т у р а

1. Claude A., Desaintfusien M., Petit P., Schermann J.-P. Design of a double focalization in a hydrogen maser. IEEE Trans. on Instr. and Mass. IM-17, 1968. No. 4. P. 351–353.

2. Boyko A., Yolkin G., Gestkova N., Kurnikov G., Paramzin V. Hydrogen Maser with Improved Short-term Frequency Stability // Proc. 15th European Frequency and Time Forum. Neuchâtel, Switzerland: Swiss Foundation for Research in Microtechnology, 2001. P. 406–408.

3. Mattison E. M., Vessot R. F. C., Shen W. Single-state selection system for hydrogen masers. // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics Frequency Control. 1987. V. 34. Iss. 6. P. 622–628.

4. Абрагам А., Блини Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. Т. 1. М.: МИР, 1972. С. 111–125.

5. Поляков В. А., Беляев А. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В. Математическое моделирование системы сортировки пучка атомов водорода с целью повышения кратковременной стабильности частоты водородного генератора // Метрология времени и пространства: Материалы 6-го Междунар. симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 354–355.

6. Поляков В. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В., Урутин А. В. Водородный стандарт частоты с двойной сортиров-

кой атомов водорода по энергетическим состояниям // Метрология времени и пространства: Материалы VII Междунар. симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2014. С. 100–102.

7. Vanier J., Audoin C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards. IOP Publishing Ltd: Bristol and Philadelphia, 1989.

8. Kleppner D., Berg H. C., Crampton J. B., Ramsey N. F., Vessot R. F. C., Peters H. E., Vanier J. Hydrogen Maser Principles and Techniques // Phys. Rev. 1965. No. 5. P. 38.

9. Беляев А. А., Демидов Н. А., Поляков В. А., Тимофеев Ю. В. Оценка возможного уменьшения предельной неустойчивости частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 28–31.

10. Поляков В. А., Беляев А. А., Демидов Н. А., Тимофеев Ю. В. Система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям для промышленного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 31–35.

Дата принятия: 02.07.2018.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.174.05+ 620.172.242+ 620.173.24+53.082.17+ 539.32

Устройство для механических испытаний элементов микро- и наносистем

А. В. ПОСТНИКОВ

Ярославский филиал физико-технологического института РАН, Ярославль, Россия, e-mail: mems@yf-ftian.ru

Для механических испытаний элементов микро- и наносистем представлено устройство на основе электродинамического актюатора, контролируемым образом развивающего усилия от 10^{-3} до 1 Н. Минимально регистрируемое изменение геометрии образца под нагрузкой составляет 0,3 мкм. Актюатор можно применять для растяжения, изгиба, сжатия образцов и их испытаний на усталость. С помощью актюатора можно определять механические характеристики тонких плёнок, проволок и микробалок длиной от единиц микрометров до нескольких миллиметров. Доступность актюатора и его нулевая жёсткость упрощают процедуру измерений.

Ключевые слова: микросистемы, наносистемы, микрорастяжение, тонкие плёнки, микробалки, механические свойства, актюатор.

The paper presents testing system based on usage of electro dynamic actuator (Lorentz). The actuator capable of controllable load over a range $10^{-3} - 1$ N. Specimen geometry change with an accuracy of 0,3 micrometers is achieved. The actuator is able to apply tension, bending, squeezing loads and periodic load for fatigue tests. The method could be applied for material characterization applications, such as microtensile testing of micrometer dimensioned films, wires, bending of millimeter-sized beams. The novel feature of our machine is that actuator is easily available and has zero stiffness.

Key words: micro mechanical systems, microtensile, thin films, micro beams, mechanical properties, actuator.

Для успешной разработки и изготовления микромеханических устройств необходимы надёжные и точные методы испытания материалов, получаемых с помощью микротехнологий – напыления и химического осаждения тонких плёнок,

анизотропного травления монокристаллов. Современное направление исследований материалов связано с конструированием и изготовлением устройств микрофлюидики, микро- и наносистемной техники (МНСТ), с характерными размерами