

10. Lopez O., Amy-Klein A., Daussy Ch., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M., Santarelli G. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer // Eur. Phys. J. D. 2008. V. 48. P. 35–41.

11. Kodet J., Pánek P., Procházka I. Two-way time

transfer via optical fiber providing subpicosecond precision and high temperature stability. // Metrologia. 2016. V. 53. P. 18–26.

Дата принятия: 02.07.2018.

621.317.76

Оценка возможного уменьшения предельной нестабильности частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии

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

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

Выполнена оценка возможного уменьшения предельной нестабильности частоты водородного генератора при использовании системы двойной сортировки атомов водорода по энергетическим состояниям. Показано, что при получении пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии возможно уменьшение нестабильности частоты примерно в 1,6 раза до значения $1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$.

Ключевые слова: активный водородный стандарт частоты, нестабильность частоты, система двойной сортировки атомов.

The frequency stability improvement estimation of active hydrogen maser with single state selected beam has performed. The frequency stability caused by microwave cavity noises is $1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$. The frequency stability possible improvement in comparing with present hydrogen masers is 1,6 times.

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

Многолетняя (полувековая) работа по развитию теории работы водородных мазеров, исследованию зависимости их частоты от различных факторов и конструктивных особенностей, систематическое конструктивное совершенствование позволили уменьшить нестабильность частоты водородного генератора (ВГ) практически до теоретического предела. Предельная нестабильность частоты водородного генератора определяется его собственным тепловым шумом, мощностью генерации и добротностью спектральной линии. Ещё большего уменьшения предельной нестабильности можно достичь, если использовать в ВГ пучок атомов водорода в одном квантовом состоянии [1].

Конструкция системы двойной сортировки атомов по квантовым состояниям. В классической конструкции водородного стандарта частоты в накопительную колбу попадают атомы водорода в двух квантовых состояниях: $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=1$. Атомы водорода во втором состоянии не участвуют в образовании генерации, но участвуют в спин-обменных взаимодействиях с рабочими атомами. Последнее приводит к дополнительному уширению спектральной линии и ограничению роста мощности генерации с увеличением интенсивности пучка, что препятствует повышению стабильности частоты ВГ. Для устранения этого нежелательного явления в [2–4] предложен способ получения пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии методом двойной сортировки атомов водо-

рода по энергетическим состояниям. Схема устройства приведена на рис. 1.

Согласно этой схеме пучок атомов водорода выходит из коллиматора и последовательно проходит два сортирующих магнита. Атомы водорода в состояниях с $F=1, m_F=0$ и $F=1, m_F=1$, сфокусированные первым сортирующим магнитом, проходят область перехода Майорана. В этой области совершается переход атомов из состояния с $F=1, m_F=1$ в состояние $F=1, m_F=-1$ и их сортировка вторым сортирующим магнитом. Таким образом, в колбу попадают только активные атомы в состоянии $F=1, m_F=0$. Оценим вероятное улучшение метрологических характеристик ВГ в этом случае, предположив, что будут отсортированы 100 % атомов в состояниях $F=1, m_F=1$.

Нестабильность частоты ВГ с двойной сортировкой атомов по квантовым состояниям. Предельно возможная нестабильность частоты ВГ, обусловленная тепловыми шумами сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора, определяется следующим образом [5]:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{Q_0 \sqrt{P_r}} \sqrt{\frac{kT}{2}}, \quad (1)$$

где $\sigma(\tau)$ – среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (вариация Аллана); τ – время усреднения; Q_0 – добротность спектральной линии; P_r – мощность генерации в резонаторе; k – постоянная Больцмана; T – температура резонатора.

С учётом выражения (1) в качестве критерия эффективности метода выберем увеличение возможного значения произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ при отсутствии атомов в состоянии $F=1, m_F=1$. Зависимость мощности генерации и ширины линии Δf ВГ от интенсивности пучка атомов водорода достаточно точно описываются выражениями, полученными еще в 1960-х гг. [6]:

$$P_r = [-2q^2(N_a/N_n)^2 + (1-3q)(N_a/N_n) - 1]P_n; \quad (2)$$

$$\Delta f = (1 + q(N_a/N_n)) / (\pi T), \quad (3)$$

где q – параметр качества ВГ; N_a – поток активных атомов, поступающих в колбу; N_n – пороговый поток атомов; P_n – пороговая мощность генерации.

Пороговые величины определяются как

$$N_n = \hbar V_p / (4\pi\mu^2 Q_p \eta \tau_{\text{рел}}^2);$$

$$P_n = \omega \hbar^2 V_p / (8\pi\mu^2 Q_p \eta \tau_{\text{рел}}^2), \quad (4)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; V_p , Q_p – объём и добротность СВЧ-резонатора; μ – магнетон Бора; $\tau_{\text{рел}}$ – время релаксации без учета релаксации из-за спин-обменных взаимодействий; ω – частота колебаний; η – параметр заполнения; $\tau_{\text{рел}}^2$ – квадрат среднего значения проекции магнитной компоненты СВЧ-поля на продольную ось резонатора, усреднённого по объёму накопительной колбы; $\tau_{\text{рел}}^2$ – среднее по объёму резонатора значение квадрата полного вектора магнитной компоненты СВЧ-поля.

Параметр качества ВГ это отношение пороговой интенсивности N_n пучка активных атомов к его интенсивности N_1 , при которой уширение спектральной линии из-за спин-обменных столкновений становится равным ширине линии, определяемой временем τ_n нахождения атомов в колбе. Зависимость величины q от параметров ВГ можно оценить по формуле

$$q = \frac{\sigma_{\text{ex}} \bar{V}_k \hbar \tau_n}{8\pi\mu_0^2 \tau_{\text{ж}} \eta V_k Q_p} \alpha, \quad (5)$$

где σ_{ex} – сечение спин-обменных взаимодействий атомов водорода; $\bar{V}_k$ – средняя скорость атомов водорода в накопительной колбе; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; τ_n – среднее время накопления; $\tau_{\text{ж}}$ – среднее время жизни атомов в колбе; $\alpha = N/N_a$ – отношение полного числа атомов водорода, попадающих в колбу, к числу активных атомов в состоянии $F=1, m_F=0$.

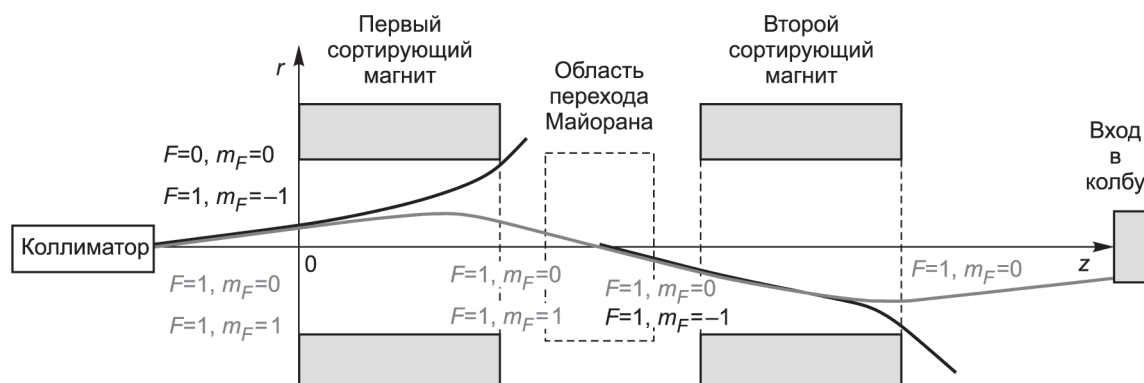


Рис. 1. Схема получения пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии

Важность уменьшения параметра качества q для повышения мощности генерации ВГ можно оценить по рис. 2, где представлена рассчитанная по формуле (2) зависимость мощности генерации (в относительных единицах) от интенсивности пучка при различных значениях q . При $q \geq 0,172$ генерация не возникает. Влияние конструктивных параметров ВГ на параметр q и мощность генерации подробно изучено в работе [3], в которой рассмотрены условия получения максимальной мощности генерации. Были найдены оптимальные соотношения для размеров накопительной колбы и СВЧ-резонатора, описаны влияние геометрии резонатора и колбы на параметр заполнения η , влияние коэффициента связи с приёмником и условия получения максимальной мощности генерации при реализации двойной сортировки. Рассматривалась также возможность увеличения эффективной добротности резонатора с применением устройства регенерации. Но поскольку условия получения максимальной мощности и минимальной нестабильности не

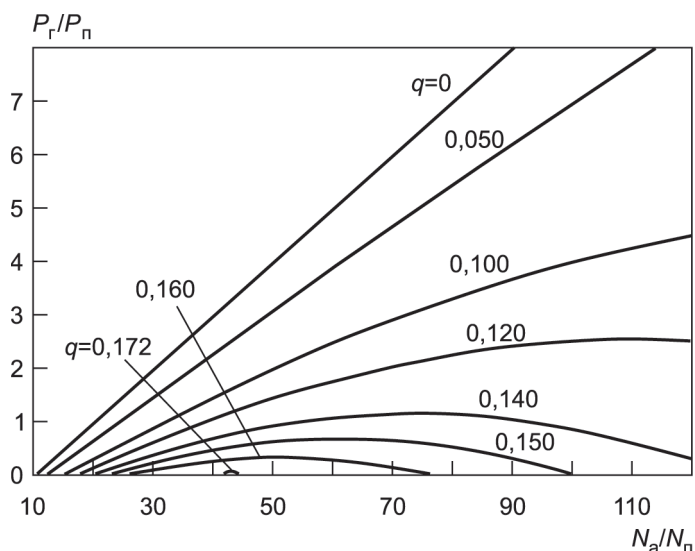


Рис. 2. Зависимость мощности генерации водородного генератора от интенсивности пучка активных атомов водорода при различных значениях параметра качества q

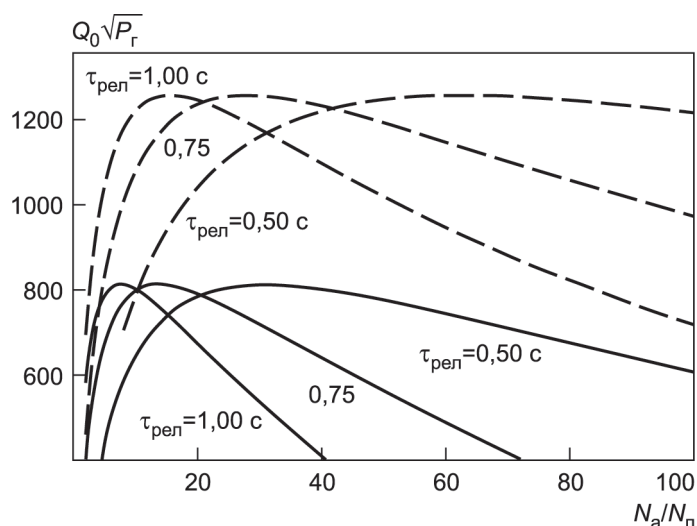


Рис. 3. Зависимость произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ от времени релаксации $\tau_{\text{рел}}$ и параметра качества водородного генератора $q=0,070$; $0,035$ – сплошные и пунктирные линии, соответственно

совпадают, остаётся вопрос, насколько можно уменьшить нестабильность частоты ВГ при использовании двойной сортировки.

После того, как все конструктивные параметры ВГ определены, единственная возможность уменьшить параметр q – уменьшить параметр α . В случае классической схемы магнитной сортировки атомов по квантовым состояниям $\alpha \geq 2$, при использовании системы двойной сортировки можно достичь значения $\alpha = 1$ и таким образом уменьшить параметр q в два раза.

Оценим увеличение значения произведения $Q_0\sqrt{P_r}$, которое можно достичь для серийно выпускаемых ВГ при условии $\alpha = 1$.

Характеристики промышленных ВГ

Максимальное значение мощности P_r генерации, снимаемое с петли съёма, при мощности на входе приёмника $P_{\text{пр}}=400\ldots 500$ фВт	$4,5P_{\text{пр}}$
Максимальное значение $Q_0\sqrt{P_r}$	1300–1500
Время релаксации $\tau_{\text{рел}}$ без учёта спин-обменных взаимодействий	0,7 с
Нагруженная добротность Q_p СВЧ-резонатора	40000
Объём резонатора V_p	15,5 л
накопительной колбы V_k	3 л

По выражениям (4) вычислим пороговые значения потока атомов и мощности генерации ВГ и получим $N_n = 1,3 \cdot 10^{11} \tau_n^{-2}$, $P_n = 5,8 \cdot 10^{-14} \tau_n^{-2}$. Положим $\alpha = 2$, тогда при расчёте по выражению (5) получим параметр качества $q = 0,07$. Подставим найденные значения в выражение (2) и вычислим мощность генерации, добротность спектральной линии, произведение $Q_0\sqrt{P_r}$ в зависимости от интенсивности пучка активных атомов (отношения N_a/N_n) при $q = 0,07$; $0,035$. Результаты расчётов представлены в таблице.

Расчётные значения основных параметров ВГ в зависимости от интенсивности пучка при $q=0,07$; $0,035$

N_a/N_n	$q = 0,07$			$q = 0,035$		
	P_r фВт	$Q_0 \cdot 10^9$	$Q_0\sqrt{P_r}$	P_r фВт	$Q_0 \cdot 10^9$	$Q_0\sqrt{P_r}$
5	128	2,68	960	145	2,90	1 100
10	314	2,32	1 300	400	2,68	1 700
20	690	1,84	1 530	900	2,32	2 200
40	1 270	1,33	1 500	1 850	1,84	2 500
60	1 560	1,00	1 250	2 780	1,53	2 550
80	1 680	0,82	1 060	3 600	1,30	2 470
100	1 560	0,69	860	4 400	1,13	2 370
120	–	–	–	5 220	1,00	2 280

Используя результаты, представленные в таблице, по формуле (1) оценим максимальную достижимую (предельную) нестабильность частоты ВГ, обусловленную шумами микроволнового резонатора при температуре $T=323$ К. Для случая $q=0,07$ значение этой величины составит $\sigma(\tau) = 3 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$ при $N_a/N_n = 20 \ldots 40$, для $q=0,035$ – $\sigma(\tau) = 1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$ при $N_a/N_n = 40 \ldots 60$. Таким образом, при получении пучка атомов в одном квантовом состоянии на промышленно выпускаемых ВГ максимальное возможное уменьшение нестабильности частоты составит 1,6 раза.

Представленные расчёты произведены при начальном времени релаксации $\tau_{\text{рел}}=0,7$ с, характерном для промышленных образцов ВГ. Время релаксации определяется главным образом геометрическим временем накопления атомов в накопительной колбе и входит в выражение (2) как составляющая пороговых мощности генерации и интенсивности пучка. Связь между пороговыми значениями и временем релаксации описывается выражениями

$$P_n = k_0 \tau_{\text{рел}}^{-2}; N_n = k_1 \tau_{\text{рел}}^{-2},$$

где коэффициенты $k_0 = 5,8 \cdot 10^{-14}$, $k_1 = 1,3 \cdot 10^{11}$ определяют только физическими постоянными и параметрами СВЧ-резонатора.

Для оценки влияния времени релаксации на метрологические характеристики ВГ вычислены мощность генерации, добротность спектральной линии и значение произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ при $q=0,07$; $0,035$ и $\tau_{\text{рел}}=1$; $0,75$; $0,5$ с. Результаты расчётов представлены на рис. 3. Максимальное значение произведения $Q_0\sqrt{P_r}$ определяется параметром качества q , а от времени релаксации $\tau_{\text{рел}}$ зависит только интенсивность пучка атомов водорода. Кроме уменьшения нестабильности частоты, связанной с тепловым шумом резонатора, при устранении бокового энергетического уровня атомов с состоянием $m_F=1$ уменьшается зависимость частоты ВГ от неоднородности поля подмагничивания в резонаторе, что позволяет работать при меньшем значении поля подмагничивания и, соответственно, уменьшается зависимость частоты ВГ от изменений

внешнего магнитного поля. Увеличение добротности спектральной линии уменьшает зависимость частоты генерации от расстройки резонатора, а повышенная рабочая мощность генерации увеличивает отношение сигнал–шум на выходе приёмника и способствует более чёткой работе электронных систем водородного стандарта частоты.

Заключение. Проведенная в работе оценка минимально возможной нестабильности частоты ВГ с двойной сортировкой атомов водорода по энергетическим состояниям показала возможность уменьшения нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами микроволнового резонатора, в 1,6 раза по сравнению с промышленно выпускаемыми активными стандартами частоты. При этом значение нестабильности частоты $\sigma(\tau)=1,85 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$ определяется главным образом параметром качества ВГ и интенсивностью пучка атомов водорода.

Л и т е р а т у р а

1. 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 Международ. симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 354–355.

2. Claude A., Desaintfuscien M., Petit P., Schermann J.-P. Design of a double focalization in a hydrogen maser // IEEE Trans. Instrum. Mass. 1968. IM-17.

3. 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.

4. Aleynikov M. S., Boyko A. I. On the single-state selection for H-maser and its signal application for fountain atomic standard // Proc. 28th European Frequency and Time Forum. Neuchâtel, Switzerland: Swiss Foundation for Research in Microtechnology, 2014. P.169–172.

5. Kleppner D., Goldenberg H. M. Theory of the atomic hydrogen maser // Phys. Rev. 1962. V. 126. P. 603–615. DOI:10.1103/physrev.126.603.

6. 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. V. 138. P. A972.

Дата принятия: 02.07.2018.

621.317.76

Система двойной сортировки атомов по квантовым состояниям для промышленного водородного стандарта частоты

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

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

Рассмотрены основные конструктивные особенности системы двойной сортировки атомов по квантовым состояниям в пределах заданных ограничений. Система входит в состав водородного генератора промышленного водородного стандарта частоты. Приведены результаты расчётов траекторий атомов в системе двойной сортировки и обоснован выбор метода создания инверсионной области.

Ключевые слова: активный водородный стандарт частоты, система двойной сортировки, траектории атомов, метод адиабатически быстрого прохождения.

State selection system main design features are given with required limits. This system is a part of hydrogen maser physics package. Atomic trajectories modeling and inversion area design are reviewed.

Key words: active hydrogen maser, double selecting system, atomic trajectories, adiabatic rapid passage.

Для получения в водородном генераторе (ВГ) пучка атомов водорода в одном квантовом состоянии была предложена схема двойной сортировки атомов по квантовым состояниям [1–3]. Большинство имеющихся по данной тематике работ носят описательный или демонстрационный характер, в них не приведены примеры применения системы двойной сортировки в реальных приборах. При конструировании системы двойной сортировки для промышленного ВГ в составе водородного стандарта частоты возникают специфические требования, связанные с ограничени-

ем её длины, технологичностью, устойчивостью к механическим и магнитным воздействиям, надёжностью и стабильностью во времени, эффективностью использования пучка атомов водорода.

Выбор параметров сортирующих магнитов. Для оценки эффективности двойной сортировки вычислялось соотношение попадающих в накопительную колбу атомов в состояниях $F=1$, $m_F=0$, $F=1$, $m_F=+1$ и $F=1$, $m_F=-1$, а также потери атомов при различных параметрах сортирующих магнитов и их взаиморасположение. Для этого рассчитывались траектории пролёта