

Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция

**А. Ю. Грибов, О. И. Бердасов, Г. С. Белотелов, Е. Ф. Стельмашенко,
Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев**

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: gribov.art@mail.ru, berd_7@mail.ru,
belotelov@vniiftri.ru, stelmashenko@vniiftri.ru, sutyurin@vniiftri.ru, serslyu@mail.ru*

Представлены результаты, полученные в ходе создания оптического репера частоты на холодных атомах фермионного изотопа стронция ^{87}Sr . Описаны параметры экспериментальных оптических схем, разработанных для последовательного лазерного охлаждения и пленения атомов ^{87}Sr в оптическую решётку. Успешно проведена спектроскопия часового перехода, в ходе которой достигнута спектральная ширина линии перехода 12 Гц. Разработан измерительный комплекс позволяет сравнивать оптический репер частоты с водородным мазером. Созданный оптический репер частоты на холодных атомах ^{87}Sr включён в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

Ключевые слова: оптический стандарт частоты, холодные атомы, прецизионные измерения, лазерное охлаждение, спектроскопия.

Введение. Появление методов лазерного охлаждения атомов привело к прорыву в области метрологии времени и частоты. Современные методы лазерного охлаждения и локализации атомов обеспечивают фактически полное подавление эффекта Доплера и длительное время взаимодействия с атомным ансамблем при высокой изоляции исследуемых атомов от внешних возмущающих полей. В микроволновом диапазоне лидирующие позиции по точности и стабильности завоевали атомные фонтаны на ультрахолодных атомах цезия и рубидия, точность определения секунды достигла $2 \cdot 10^{-16}$ [1]. В оптическом диапазоне выполняются прорывные исследования на лазерно-охлаждённых атомах, захваченных в оптические ловушки. Большое значение несущей частоты (10^{15} Гц) и долгое время жизни возбуждённых состояний обеспечивает непревзойдённую добротность переходов, используемых в качестве реперных. Высокая стабильность достигается за счёт значительного количества (10^3 – 10^4) лазерно-охлаждённых атомов в ансамбле, что обеспечивает высокое отношение сигнал-шум и позволяет получить относительную нестабильность частоты на уровне 10^{-18} [2]. Проблема столкновительных сдвигов, ограничивавшая точность таких стандартов, решена в 2003 г. реализацией концепции стандарта с захватом холодных атомов в оптическую решётку, образованную пучностями и узлами стоячей световой волны [3]. При этом взаимодействие между атомами устраняется, а динамический штарковский сдвиг часового перехода обнуляется при подборе определённой «магической» длины волны λ_m удерживающего излучения решётки [3–5].

Созданные в ведущих мировых научных центрах оптические стандарты на нейтральных атомах иттербия и стронция (Yb, Sr), захваченных в оптическую решётку, уже превзошли по точности и стабильности как микроволновые стандарты, так и оптические часы на одиночных ионах. В 2013 г. продемонстрирована рекордная относительная нестабильность при сравнении двух иттербиевых часов на уровне $6 \cdot 10^{-18}$ при времени усреднения 10 000 с [6]. Поскольку ранее установлена высокая согласованность экспериментальных результатов нескольких лабораторий по точности воспроизведения частоты часового перехода стандартов на атомах ^{87}Sr (не более 10^{-15}), Международным бюро мер и весов (BIMP) приняты рекомендации о возможности использования невозмущённого перехода $^1\text{S}_0$ – $^3\text{P}_0$ на длине волны 698 нм в атомах ^{87}Sr для создания вторичного эталона секунды [7].

В данной статье приведены результаты работ по созданию оптического репера частоты на холодных атомах ^{87}Sr в рамках федеральной целевой программы «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы». В частности, рассмотрены следующие системы и методы:

- экспериментальная установка оптического репера частоты;
- системы лазерного охлаждения, манипулирования и детектирования холодных атомов;
- система передачи стабильности из оптического диапазона в радиочастотный, основанная на использовании технологий фемтосекундных лазеров;
- методы стабилизации лазерной системы;

использование лазера, стабилизированного по внешнему высокочастотному ULE (ultra-low expansion glass) резонатору и настроенного на частоту перехода $^1S_0-^3P_0$;

прецизионные измерения метрологических характеристик опытного образца оптического репера частоты на холодных атомах стронция.

Экспериментальная установка оптического репера частоты. Атомы захватываются в вакуумной камере (габаритные размеры 86×117×38 см), закреплённой на вертикальной оптической плите. Камера состоит из источника атомов, позволяющего получать коллимированный пучок атомов стронция, зеemanовского замедлителя и области пленения атомов, где они захватываются в первичную и вторичную магнитооптические ловушки (МОЛ), а далее загружаются в оптическую решётку для спектроскопии часового перехода. Секция вакуумной камеры, расположенная непосредственно после источника атомов, откачивается ионным насосом со скоростью 10 л/с (давление в рабочем режиме $1,8 \cdot 10^{-7}$ Па), а область пленения атомов – 75 л/с (давление – $6,3 \cdot 10^{-7}$ Па).

Первичное охлаждение. Первый этап охлаждения осуществляется на переходе $^1S_0-^1P_1$ на длине волны 461 нм с естественной шириной линии $\gamma = \Gamma/(2\pi) = 32$ МГц (где Γ – скорость спонтанного распада). Атомный пучок формируется с помощью испарительной печи, в которой металлический стронций нагревается до 500 °С для обеспечения достаточного потока атомов. Атомный поток ϕ из источника, определяемый испускаемым в единицу времени количеством N атомов, был охарактеризован методом ортогональной спектроскопии. Зависимость потока атомов от температуры источника представлена на рис. 1.

Далее поток горячих атомов тормозится в зеemanовском замедлителе встречным лазерным излучением, отстроенным на 800 МГц от резонансного перехода $^1S_0-^1P_1$. Первичная МОЛ создаётся с помощью трёх ортогональных лазерных лучей с циркулярной поляризацией, их обратных отражений, пересекающихся в центре ловушки, и двух катушек в антигильмгольцевской конфигурации, формирующих необходимый градиент магнитного поля.

Для уменьшения расхождения потока атомов и последующего увеличения эффективности их загрузки в МОЛ используются дополнительные коллимирующие пучки, расположенные непосредственно после источника атомов на расстоянии в 20 см. Также увеличение количества атомов, удерживаемых в первичной МОЛ, достигается с помощью ввода излучения перекачки на длинах волн 707 и 679 нм, которое обеспечивает возврат попавших в метастабильные состояния атомов обратно в цикл охлаждения. При этом для излучения на длине волны 707 нм вводится дополнительная частотная модуляция для более эффективной перекачки атомов со сверхтонких подуровней состояния 3P_2 . В результате принятия вышеперечисленных мер количество атомов

в первичной МОЛ увеличилось в 12 раз. Число атомов ^{87}Sr в первичной МОЛ при этом составляет не менее 10^6 при температуре 1–3 мК в зависимости от параметров эксперимента (доплеровский предел $T_D = 770$ мК), что соответствует тепловым скоростям около 2 м/с.

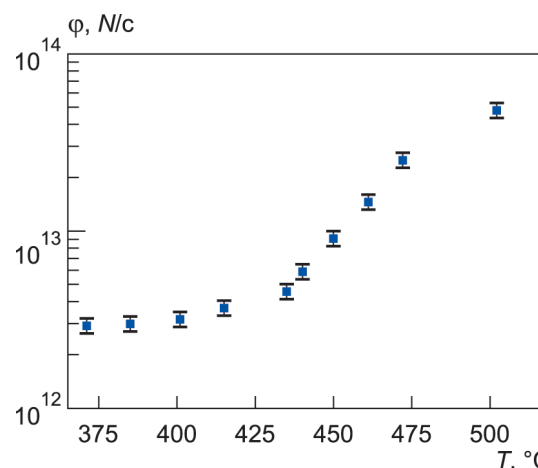


Рис. 1. Зависимость потока ϕ атомов от температуры T источника атомов

Fig. 1. Dependence of atomic flux ϕ on the temperature T of atomic source

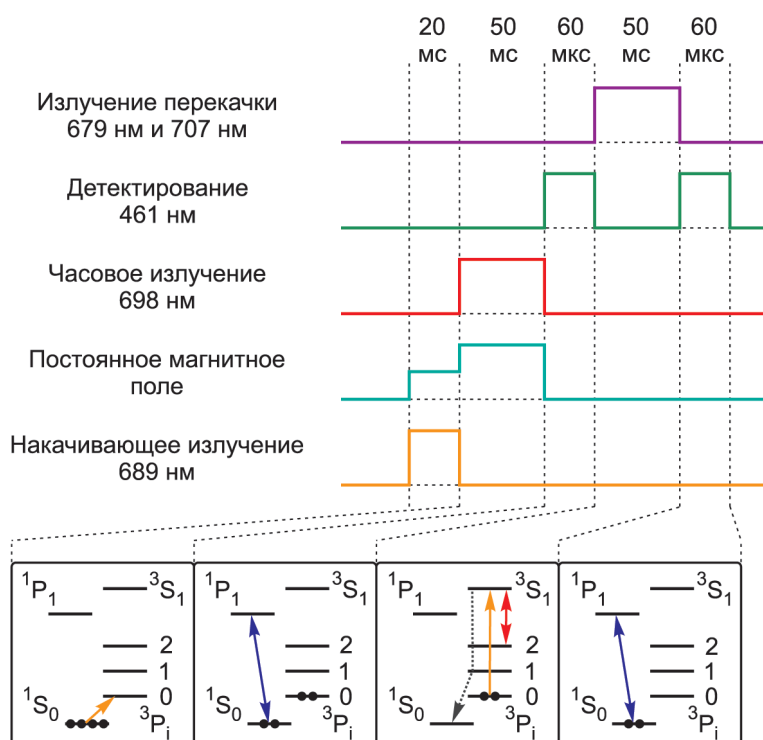


Рис. 2. Схема спектроскопии часового перехода

Fig. 2. Scheme of the clock transition spectroscopy

Вторичное охлаждение. Дальнейшее охлаждение атомов осуществляется через узкий переход $^1S_0-^3P_1$ на длине волны 689 нм, естественная ширина которого $\gamma = 7,6$ кГц.

На первом этапе вторичного охлаждения длительно-стью 120 мс вводится дополнительная частотная модуляция

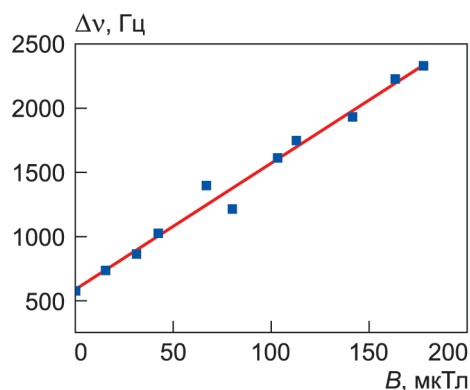


Рис. 3. Зависимость разности частот $\Delta\nu$ магнитных компонентов ($m_f = +9/2 - m_{f'} = +9/2$) и ($m_f = -9/2 - m_{f'} = -9/2$) перехода $^1S_0-^3P_0$ от создаваемого катушками постоянного магнитного поля B

Fig 3. Dependence of the frequency difference $\Delta\nu$ between the magnetic components ($m_f = +9/2 - m_{f'} = +9/2$) and ($m_f = -9/2 - m_{f'} = -9/2$) of the $^1S_0-^3P_0$ transition on the magnitude of the constant magnetic field B created by the coils

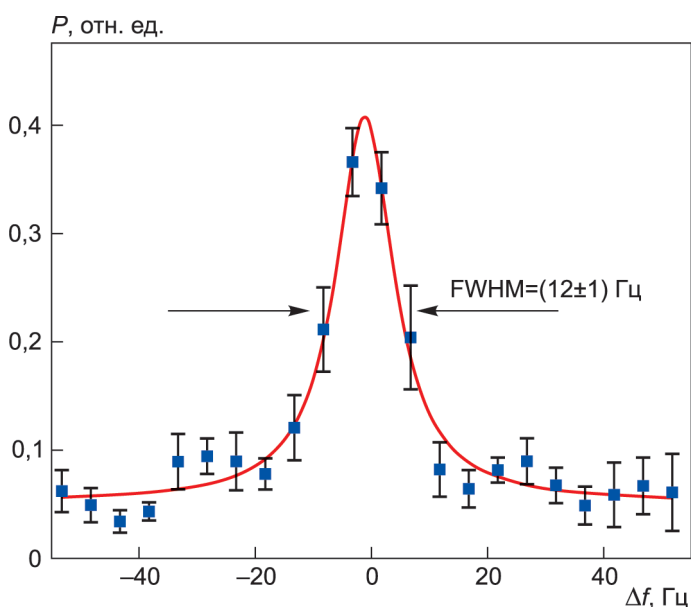


Рис. 4. Спектральная линия часового перехода $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = -9/2 - m_{f'} = -9/2$); P – вероятность перехода, выраженная в относительных единицах; Δf – отстройка от центральной частоты перехода

Fig. 4. Spectral line of the clock transition $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = -9/2 - m_{f'} = -9/2$); P – transition probability in arbitrary units; Δf – detuning from the transition central frequency

лазерного излучения для обеспечения его взаимодействия с различными скоростными группами атомов и увеличения эффективности перезахвата из первичной МОЛ.

На втором этапе в течение 90 мс происходит дальнейшее узкополосное охлаждение с отстройкой в 420 кГц от резонанса перехода $^1S_0-^3P_1$. Ненулевой ядерный спин ($I = 9/2$) ^{87}Sr обуславливает сложную структуру энергетических уровней. Чтобы обеспечить распределение населённости атомов по подуровням основного состояния 1S_0 , необходимое для эффективного вторичного охлаждения, используется дополнительное «перемешивающее» излучение 689 нм на частоте перехода $^1S_0(F=9/2)-^3P_1(F'=9/2)$.

Эксперимент по измерению времени t жизни атомов во вторичной МОЛ показал, что при наличии «перемешивающего» излучения время жизни ловушки, оценённое по уровню e^{-1} , увеличивается примерно в 8 раз и составляет около 311 мс, а количество атомов в конце этапа вторичного охлаждения возрастает примерно в 5 раз. В результате после вторичного охлаждения количество атомов составило порядка 10^5 , при этом их температура не превышает 2,5 мК, что является достаточным для пленения атомов в оптическую решётку.

Пленение атомов в оптическую решётку. Для проведения спектроскопии часового перехода без доплеровского уширения необходимо локализовать атомы в режиме Лэмба-Дике. Это достигается путём пленения атомов стронция в оптическую решётку на длине волны 813 нм. В рассматриваемом случае глубина потенциала оптической решётки, рассчитанная из значений частот боковых полос часового перехода $^1S_0-^3P_0$, составляет $56E_{\text{от}}$ (где $E_{\text{от}}$ – энергия отдачи фотона), что позволяет захватить в неё около 10^4 атомов. Время жизни для такой системы обусловлено вакуумом внутри камеры и составляет примерно 500 мс по уровню e^{-1} .

Спектроскопия часового перехода. Спектроскопия сверхузких часовых атомных переходов, лежащих в оптической области, является нетривиальной задачей. Используемый в оптических часах на холодных атомах стронция переход $^1S_0-^3P_0$ является запрещённым и имеет естественную ширину линии порядка 1 мГц. Для спектроскопии данного перехода созданы две идентичные системы, основанные на полупроводниковых лазерах с внешним резонатором Toptica DL Pro (длина волны 698 нм, выходная мощность 25 мВт), стабилизированных методом Паунда-Древера-Холла [8] по внешним высокочастотным резонаторам (с резкостью 277 500) из стекла ULE. Спектральная ширина сигнала биений двух лазерных систем на полувысоте не превышает 1,5 Гц, а их относительный частотный дрейф составил примерно 200 мГц/с [9].

Процесс спектроскопии часового перехода атомов ^{87}Sr состоит из нескольких этапов (рис 2). Вначале используется дополнительная накачка атомов в состояния с $m_f = \pm 9/2$. Это позволяет увеличить соотношение сигнал-шум при спектроскопии переходов $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = +9/2 - m_{f'} = +9/2$) и $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = -9/2 - m_{f'} = -9/2$) в зависимости от выбранной поляризации накачивающего излучения, что также является важным для частотной стабилизации.

На следующем этапе атомы, находящиеся в решётке, взаимодействуют с лазерным излучением, настроенным на частоту вблизи резонанса часового перехода $^1S_0-^3P_0$. Затем идёт импульс детектирующего излучения, настроенного на переход $^1S_0-^1P_1$, позволяющий определить количество атомов, которые не взаимодействовали с часовым излучением и остались в основном состоянии 1S_0 . Далее следует импульс излучения лазера перекачки, позволяющий вернуть атомы на уровень 1S_0 с метастабильного уровня 3P_0 . После чего снова подаётся импульс детектирующего излучения, с помощью которого определяется количество атомов, вернувшихся в основное состояние, т. е. фактически сигнал от атомов, провазимодействовавших с часовым лазером.

Чтобы прописать узкий часовой переход, его компоненты должны быть расщеплены постоянным магнитным полем. В рассматриваемом случае фоновое магнитное поле в лаборатории является достаточным, чтобы расщепить компоненты примерно на частоте 600 Гц, и дополнительное постоянное поле создавать не требуется (рис. 3). Для определения центральной частоты, соответствующей переходу ($m_f = +0 - m_f = 0$), рассчитывается среднее значение двух расщеплённых компонент. Определение частоты перехода $^1S_0-^3P_0$ методом спектроскопии магнитных компонент ($m_f = +9/2 - m_f = +9/2$) и ($m_f = -9/2 - m_f = -9/2$) позволяет подавить линейный зеемановский сдвиг.

Интенсивность часового излучения составила $I = 0,7 \text{ Вт/см}^2$, что привело к частоте осцилляции Раби $\Omega_R = 23,8 \text{ Гц}$. Для оценки спектральной ширины линии часового перехода использовали результаты измерений 10 спектров для случая накачки излучением с σ^- -поляризацией и опроса π -импульсом часового излучения длительностью $\tau_\pi = 1/2\Omega_R$ (переход $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = -9/2 - m_f = -9/2$)). Анализ результатов показал, что при аппроксимации функцией Лоренца спектральная ширина линии перехода на полувысоте составляет 12 Гц (рис. 4).

Введение оптического стандарта в систему национальной шкалы времени в качестве репера. Для использования оптического стандарта

в качестве репера частоты необходимо, чтобы он отвечал требованиям точности, стабильности и продолжительности работы.

Оптическая схема вторичного охлаждения без фазовой привязки и надёжный алгоритм стабилизации часового лазера к атомному переходу позволили достигнуть рекордной длительности автономной работы оптического стандарта частоты – 250000 с (при одном кратковременном

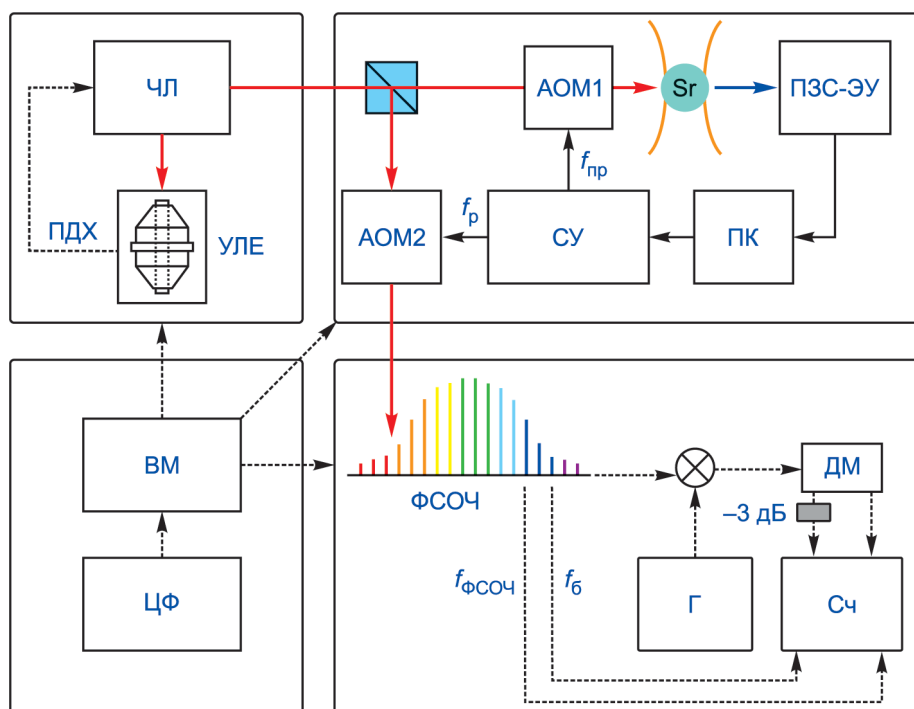


Рис. 5. Упрощённая схема сличения/измерения частоты оптического стандарта: ЧЛ – часовой лазер; ПДХ – обратная связь петли стабилизации частоты лазера по методу Паунда-Древера-Холла; УЛЕ – внешний высокодобротный резонатор; AOM1, AOM2 – акустооптические модуляторы; СУ – система управления; ПК – персональный компьютер для обработки данных спектроскопии и управления экспериментом; ПЗС-ЭУ – ПЗС-камера с электронным усилением; ВМ – водородный лазер; ЦФ – цезиевый фонтан; ФСОЧ – фемтосекундный синтезатор оптических частот; ДМ – делитель мощности; Сч – счётчик без мёртвого времени фирмы K+K; Г – генератор для понижения частоты повторения ФСОЧ; f_b – частота биений между часовым лазером и соответствующей модой ФСОЧ; $f_{\text{ФСОЧ}}$ – частота оффсета ФСОЧ; $f_{\text{пр}}$ – перестраиваемая частота для спектроскопии часового перехода; f_p – расчётная частота, соответствующая переходу $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = +0 - m_f = 0$)

Fig. 5. Simplified scheme of comparison / measurement of optical standard frequency: CL – clock laser; PDH – feedback of the laser frequency stabilization loop according to the Pound-Drever-Hall method; ULE – external high finesse cavity; AOM1, AOM2 – acousto-optic modulators; CS – control system; PC – personal computer for processing spectroscopic data and experiment control; EM-CCD – electron multiplying CCD camera; HM – hydrogen maser; CF – cesium fountain; OFC – femtosecond optical frequency comb; DM – power divider; C – dead time-free frequency counter; G – generator for lowering the repetition rate of OFC; f_b – the beat frequency between the clock laser and the corresponding OFC mode; f_{OFC} – offset frequency OFC; f_{scan} – tunable frequency for clock transition spectroscopy; f_c – the calculated frequency corresponding to the transition $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = +0 - m_f = 0$)

отсутствии стабилизации фемтосекундного синтезатора оптических частот после суток измерений).

Для оценки долговременной стабильности оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция были проведены сличения с водородным мазером. Схема измерений (рис. 5) основана на волоконном фемтосекундном синтезаторе оптических частот (ФСОЧ), спектр излучения которого представляет собой набор эквидистантных частот в оптической области. Использование ФСОЧ позволяет перенести характеристики частоты из оптической области в радиочастотную, избегая сложных многоступенчатых схем деления частоты, используемых в первых оптических часах [10]. Для того, чтобы перенос частоты не сопровождался увеличением фазовых шумов, ФСОЧ стабилизируется в оптической области к часовому лазеру через фазовую привязку. По результатам измерений частоты повторения ФСОЧ, привязанного к атомному реперу, получаем оптическую частоту часового лазера, уменьшенную примерно в 10^6 раз. В этом случае измеряемая частота лазера выражается как

$$\nu = n f_n \pm f_6 \pm f_{\text{ФСОЧ}},$$

где f_n – частота повторения; f_6 – частота биений между часовым лазером и соответствующей модой ФСОЧ; $f_{\text{ФСОЧ}}$ – частота оффсета ФСОЧ; n – соответствующий номер моды ФСОЧ, определяемый по волномеру.

Авторами проведены первые сличения с водородным мазером, имеющим характеристики относительной нестабильности $8 \cdot 10^{-16} \tau^{-1/2}$, где τ – время усреднения в секундах. По результатам первых измерений кратковременная относительная нестабильность частоты оптического стандарта на секундном интервале составила $1,9 \cdot 10^{-13}$ и достигала значения $2,6 \cdot 10^{-15}$ после усреднения на протяжении 2000 с, которое ограничено линией связи с водородным мазером, так как водородный мазер расположен на расстоянии порядка 1 км от лаборатории с оптическим стандартом.

Для улучшения кратковременной нестабильности в случаях передачи сигнала на удалённые объекты предложены алгоритмы формирования шкалы времени на основе оптического репера частоты с применением хранителей частоты не только радиодиапазона, но и оптического диапазона частот [11].

Закключение. Разработанный оптический стандарт частоты является первым реализованным оптическим стандартом на холодных атомах в России. Введение в состав ГЭТ 1-2018 оптического репера частоты позволит усовершенствовать эталонную базу системы обеспечения единства измерений в России и подготовить национальную шкалу времени и частоты к переопределению секунды на основе оптического перехода атома стронция.

Список литературы

1. Abgrall M., Chupin B., De Sarlo L., Guéna J., Laurent P., Le Coq Y., Le Targat R., Lodewyck J., Lours M., Rosenbusch P.,

Rovera G. D., S. Bize, *Comptes Rendus Physique*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.03.010>

2. Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppo M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D., *Science*, 2013, vol. 341, no. 6151, pp. 1215–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1240420>

3. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V. G., Ovsiannikov V. D., *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 17, 173005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005>

4. Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Katori H., *Nature*, 2005, vol. 435, no. 7040, pp. 321–324. <https://doi.org/10.1038/nature03541>

5. Campbell G. K., Ludlow A. D., Blatt S., Thomsen J. W., Martin M. J., de Miranda M. H. G., Zelevinsky T., Boyd M. M., Ye J., Diddams S. A., Heavner T. P., Parker T. E., Jefferts S. R., *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 5, p. 539. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/008>

6. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J., *Nature*, 2014, vol. 506, no. 7486, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1038/nature12941>

7. Recommendation 1 (CI-2006): concerning secondary representation of the second. Bureau International des Poids et Mesures, Comité International des Poids et Mesures, 95th meeting (October 2006), p. 249. URL: <http://www.bipm.org/units/en/pdf/CIPM2006-EN.pdf> (дата обращения: 25.10.2020).

8. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1007/BF00702605>

9. Бердасов О. И., Грибов А. Ю., Белотелов Г. С. Ультра-стабильная лазерная система для спектроскопии часового перехода $1S_0-3P_0$ в атомах Sr // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 5. С. 400–405. <https://doi.org/10.1070/QEL16346>

10. Chebotayev V. P., Goldort V. G., Klementyev V. M., *Applied Physics B*, 1982, vol. 29, no. 1, pp. 63–65. <https://doi.org/10.1007/BF00694370>

11. Gribov A. et al., *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, Keystone, CO, USA, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234906>

References

1. Abgrall M., Chupin B., De Sarlo L., Guéna J., Laurent P., Le Coq Y., Le Targat R., Lodewyck J., Lours M., Rosenbusch P., Rovera G. D., S. Bize, *Comptes Rendus Physique*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.03.010>

2. Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppo M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D., *Science*, 2013, vol. 341, no. 6151, pp. 1215–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1240420>

3. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V. G., Ovsiannikov V. D., *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 17, 173005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005>

4. Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Katori H., *Nature*, 2005, vol. 435, no. 7040, pp. 321–324. <https://doi.org/10.1038/nature03541>

5. Campbell G. K., Ludlow A. D., Blatt S., Thomsen J. W., Martin M. J., de Miranda M. H. G., Zelevinsky T., Boyd M. M., Ye J., Diddams S. A., Heavner T. P., Parker T. E., Jefferts S. R., *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 5, p. 539. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/008>
6. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J., *Nature*, 2014, vol. 506, no. 7486, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1038/nature12941>
7. Recommendation 1 (CI-2006): concerning secondary representation of the second. Bureau International des Poids et Mesures, Comité International des Poids et Mesures, 95th meeting (October 2006), p. 249, available at: <http://www.bipm.org/units/en/pdf/CIPM2006-EN.pdf> (accessed: 25.10.2020).
8. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1007/BF00702605>
9. Berdasov O. I., Gribov A. Yu., Belotelov G. S., *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 5, pp. 400–405. <https://doi.org/10.1070/QEL16346>
10. Chebotayev V. P., Goldort V. G., Klementyev V. M., *Applied Physics B*, 1982, vol. 29, no. 1, pp. 63–65. <https://doi.org/10.1007/BF00694370>
11. Gribov A. et al., 2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF), Keystone, CO, USA, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234906>

Дата поступления: 21.09.2020.

Дата принятия: 21.10.2020.

The optical frequency standard based on strontium cold atoms

Artem Y. Gribov, Oleg I. Berdasov, Gleb S. Belotelov, Evgeniya F. Stelmashenko,
Denis V. Sutyurin, Sergey N. Slyusarev

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI),
Moscow region, Mendeleevo, Russian Federation, e-mail: gribov.art@mail.ru, berd_7@mail.ru,
belotelov@vniiftri.ru, stelmashenko@vniiftri.ru, sutyurin@vniiftri.ru, serslyu@mail.ru

The results obtained during the development of an optical frequency standard, based on cold ^{87}Sr atoms are presented. The parameters of experimental optical schemes developed for the realization of all stages of sequential laser cooling and trapping of ^{87}Sr atoms into an optical lattice are described. Clock transition spectroscopy was successfully performed with a spectral transition linewidth of 12 Hz. A measuring scheme based on a femtosecond optical frequency synthesizer has been developed, which makes it possible to compare the optical standard with a hydrogen maser. The created optical frequency standard was included in the primary standard GET 1-2018.

Key words: optical frequency standard, cold atoms, precision measurements, laser cooling, spectroscopy.