

**ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ
КОМПАКТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕПЕРОВ ЧАСТОТЫ
НА ХОЛОДНЫХ АТОМАХ ИТТЕРБИЯ**

Г.С. Белотелов, Д.В. Сутырин, С.Н. Слюсарев

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
belotelov@vniiftri.ru,
sutyrin@vniiftri.ru,
slyusarev@vniiftri.ru*

Аннотация. В данной работе представлены модули мобильных и портативных оптических реперов частоты на холодных атомах иттербия, разрабатываемых во ФГУП «ВНИИФТРИ». Целью работы является улучшение таких характеристик оптического эталона частоты, как компактность, масса, энергоэффективность, при сохранении значений относительной стабильности и частотной точности лабораторных оптических решётчатых часов.

Ключевые слова: часы на оптической решётке, иттербий, частота, холодные атомы.

**CURRENT STATE OF DEVELOPMENT
OF COMPACT OPTICAL FREQUENCY
REFERENCES ON COLD YTTERBIUM ATOMS**

G.S. Belotelov, D.V. Sutyurin, S.N. Slyusarev

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
belotelov@vniiftri.ru,
sutyurin@vniiftri.ru,
slyusarev@vniiftri.ru*

Annotation. This paper presents the modules of mobile and portable optical frequency references based on cold ytterbium atoms, developed at FSUE "VNIIFTRI". The aim of this work is to improve such characteristics of an optical frequency standard as compactness, weight, energy efficiency, while maintaining the values of the relative stability and frequency accuracy of laboratory optical lattice clocks.

Key words: optical lattice clock, ytterbium, frequency, cold atoms.

Введение

Точные манипуляции с холодными атомами помогают разрабатывать сверхточные оптические реперы частоты (ОРЧ). Многообещающие результаты были получены в стационарных оптических реперах с использованием атомов Sr [1], Hg [2], Mg [3] и Yb [4]. Оптические реперы позволяют проводить новые тесты фундаментальной физики, которые требуют предельного уровня точности и, как ожидается, изменят определение секунды [5].

Уменьшение размера, массы и энергопотребления, а также увеличение автономности оптических реперов частоты позволят использовать их в гравитационных измерениях, навигации, связи, зондировании и других приложениях [6, 7]. Уже проведены первые испытания переносных оптических реперов частоты [8]. В мире реализуются такие проекты по запуску оптических реперов в космос [9].

Здесь мы представляем модули мобильных и переносных оптических реперов частоты на холодных атомах иттербия, разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ». Цель работы — разработать компактные и прочные оптические реперы частоты, которые можно было бы разместить на борту автомобиля, фургона, самолёта или спутника.

Дизайн мобильных оптических реперов частоты на холодных атомах иттербия

Для мобильного использования необходима компактная, прочная и универсальная версия ОРЧ. В этом смысле оптические реперы частоты на холодных атомах Yb кажутся одними из самых многообещающих. Прежде всего, необходимые источники лазерного излучения для работы ОРЧ (охлаждение, захват, перекачка, часовой и решёточный лазеры) могут быть получены с помощью полупроводниковых и волоконных лазеров [8].

Как показано на рис. 1, переход $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^1P_1$ (синглетный переход) имеет длину волны $\lambda_s = 399$ нм и ширину линии $\Gamma_s/(2\pi) = 28$ МГц. Переход $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1$ (триплетный переход) имеет длину волны $\lambda_t = 556$ нм и ширину линии $\Gamma_t/(2\pi) = 182$ кГц. Ещё одна важная вещь — ОРЧ на Yb — одни из самых продвинутых в области разработки и научных результатов. Одним из недавних достижений ОРЧ на Yb показали уровень кратковременной нестабильности лучше 10^{-15} при времени усреднения 1 с и абсолютной относительной погрешности частоты порядка 10^{-18} [10].

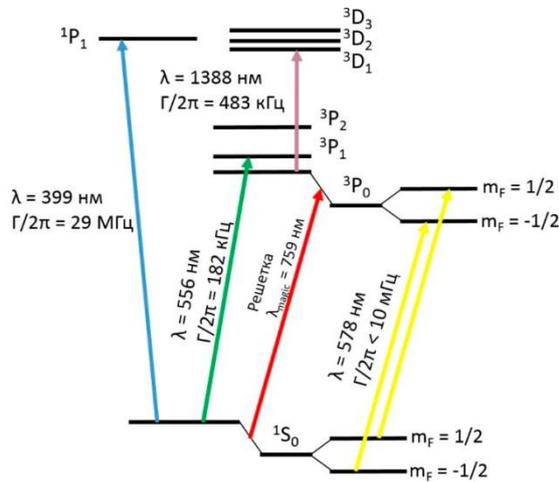


Рис. 1. Упрощённая схема уровней энергии иттербия, показывающая переходы охлаждения (399 и 556 нм), длину волны магической решётки (759 нм), часовой переход (578 нм) и переход перекачки (1388 нм)

ОРЧ — это сложная установка, которая может быть представлена несколькими модулями. Основными модулями ОРЧ являются: лазерные системы охлаждения и захвата атомов, вакуумная система (10^{-9} – 10^{-10} мбар) с атомным источником, катушки магнитного поля, оптомеханическая система распределения лазерного излучения, электроника, система управления экспериментом и «часовая» лазерная система. Для мобильной системы эти модули должны удовлетворять следующим требованиям: максимальный объём — 4 м^3 ; масса — 500 кг; потребляемая мощность — 5 кВт.

Лазерные системы

Излучение лазерных систем (Toptica) подаётся на компактную распределительную систему лазерного излучения (рис. 2), с помощью которой формируются несколько выходных лучей, мощность которых и отстройка по частоте настраиваются с помощью акустооптических модуляторов. На распределительной системе лазерного излучения есть два оптоволоконных входа: для синглетного (399 нм) и триплетного (556 нм) переходов. Для мобильной системы имеется девять выходов: три для магнитооптической ловушки (МОЛ) (399 + 556 нм), два для секции коллимации (399 нм), один для детектирования (399 нм), два для стабилизации частоты (399 и 556 нм) и один для зеemannовского замедления (399 нм). Есть дополнительный выход для разработки однолучевой конической МОЛ (399 + 556 нм). Выходное излучение заводится в одномодовые волокна с сохранением поляризации. Данная схема разработана с возможностью использования как в мобильном, так и в портативном вариантах. Для портативной версии размер текущей схемы будет дополнительно уменьшен до 30 %. Компактность распределительной схемы также достигается за счёт отсутствия фокусирующих линз, что лишь незначительно снижает общую эффективность.

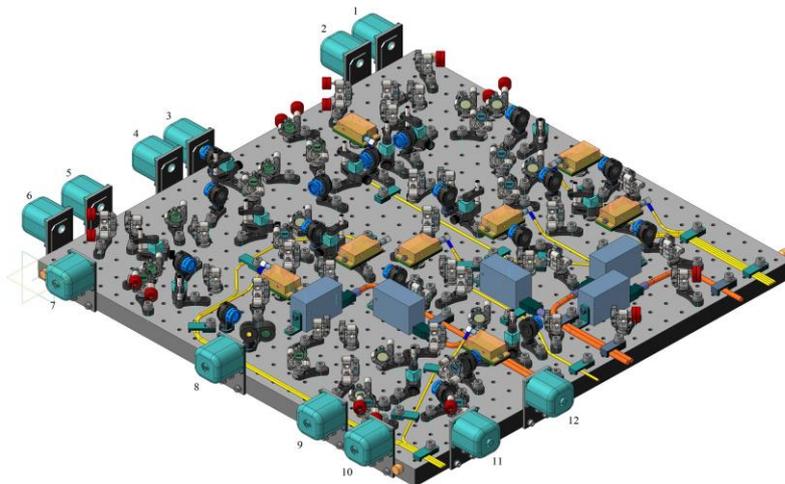


Рис. 2. Распределительная схема $60 \times 60 \times 14$ см с АОМами и затворами

Единственная проблема с использованием полупроводникового лазера может быть связана с лазерной системой с длиной волны 759 нм из-за оптического усилителя (ТА). ТА генерирует шум усиленного спонтанного излучения (ASE), который может добавить сдвиг частоты к «часовому» переходу. Однако оценки для случая Sr показывают, что одномодовое волокно является достаточным оптическим фильтром для уменьшения эффекта шума ASE [11].

Стабилизация частоты

Другим важным модулем является система стабилизации частоты FSU-1 [12], которая представляет собой сверхкомпактную систему, используемую для стабилизации частоты лазеров (рис. 3) на 798 нм (лазер с синглетным переходом до удвоения частоты), 1 112 нм (лазер с триплетным переходом до удвоения частоты) и 759 нм (оптическая решётка). FSU-1 содержит ULE-блок длиной 10 см с двумя встроенными оптическими резонаторами высокой точности, помещёнными в компактную вакуумную камеру. Лазеры стабилизируются по резонаторам по методу Паунда — Древера — Холла. Частоту стабилизированных лазеров можно точно настроить с помощью соответствующих генераторов DDS, управляющих встроенными электрооптическими модуляторами. Внутри корпуса FSU-1 размещены оптическая система, вакуумная камера и вся электроника, включая контроллер вакуумного насоса, датчики Паунда — Древера — Холла и передаваемого сигнала, трёхканальные системы стабилизации температуры, контрольные камеры CCD для передающих лучей и т.д.



Рис. 3. Блок стабилизации частоты FSU-1 (слева). Размеры — $33 \times 26,5 \times 17,5$ см³, масса — 15,5 кг, потребляемая мощность — 10 Вт. Часовая лазерная система CLS-1 (справа). Размеры — $32 \times 29 \times 25$ см³, масса — 17,2 кг, потребляемая мощность — 10 Вт

Наиболее чувствительной частью мобильных ОРЧ является «часовой» лазер. Первая версия такой системы CLS-1 [12] содержит вертикальный «нечувствительный к вибрации» высокоточный эталонный резонатор ULE длиной 10 см, помещённый внутри вакуумной камеры, и ECDL с удвоенной частотой на длине волны 1157 нм, стабилизированный по этому резонатору с помощью метода Паунда — Древера — Холла (рис. 3 справа). Для безопасной транспортировки реализована система механического фиксирования резонатора.

Все параметры систем FSU-1 и CLS-1 контролируются с помощью сенсорного дисплея высокого разрешения. Обеими системами также можно дистанционно управлять через интерфейсы Ethernet или USB, а также через Bluetooth. На рис. 3 показаны подсистемы блока стабилизации Yb-лазера, разработанные в последний год реализации проекта. Вместе они занимают объём около 40 литров с примерной потребляемой мощностью 20 Вт и массой 35 кг. Добротность резонатора CLS-1 ULE равна 120 000. Добротность FSU-1 на 759 и 798 нм равна 2 000, на 1 112 нм равна 10 000.

Текущий статус

После двух лет работы большая часть компонентов мобильных и портативных ОРЧ была завершена. На рис. 4 показано текущее состояние систем. Текущая экспериментальная установка состоит из двух оптических столов 160 × 90 см для лазерных систем охлаждения и захвата, оптических и вакуумных установок, оптического стола 90 × 60 см для часового лазера и примерно одной полки стандартной 19-дюймовой стойки неоптимизированной электроники. Вместе они занимают около 3370 литров при примерной потребляемой мощности 3 кВт и массой 450 кг.



Рис. 4. Схема мобильных ОРЧ

Текущая версия экспериментальной камеры была собрана как стандартная трёхлучевая камера МОЛ. Чтобы добиться меньших размеров вакуумного спектроскопа, мы отказались от зеемановского замедлителя. Собранная таким образом вакуумная камера оптического спектроскопа имеет размеры $120 \times 40 \times 40 \text{ см}^3$ (рис. 5).

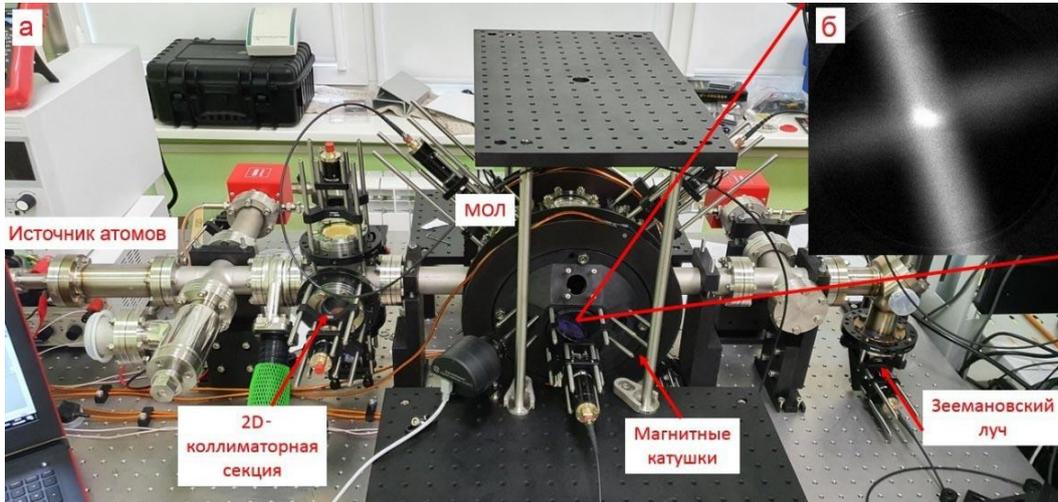


Рис. 5. Экспериментальная установка в сборе с основными секциями (а).
Захваченные атомы ^{174}Yb при градиенте магнитного поля 15 Гс/см^2 (б)

В настоящее время система находится на стадии определения характеристик. Сначала были проведены исследования атомной печи. Это улучшенная коммерческая версия устройства, представленного в [13]. Рабочая температура около $400 \text{ }^\circ\text{C}$ была достигнута при потребляемой мощности всего 20 Вт . Атомный пучок, полученный при этой температуре, был охарактеризован с помощью поперечной спектроскопии с ортогональным лазерным лучом на длине волны 399 нм . Приблизительное значение потока атомов составляет около $1 \cdot 10^{12}$ атомов/с при температуре $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для подготовки атомов мы используем не очень распространённый подход двухцветной МОЛ [14, 15]. Этот подход проходит испытания на нашем аппарате. Мы получили некоторые предварительные результаты с атомами ^{174}Yb , где МОЛ достигается при магнитном поле $15\text{--}20 \text{ Гс/см}$ (соответствующая потребляемая мощность — 415 Вт), $\Delta_s = -\Gamma$. Общая интенсивность пучков МОЛ составляла 15 мВт/см^2 , интенсивность пучка зеемановского замедлителя составляла 3 мВт/см^2 . Флуоресцентный свет, исходящий от атомов, захваченных в МОЛ на длине волны 399 нм , наблюдается камерой CCD. Количество захваченных атомов — около 10^5 .

Модули следующего поколения

При разработке портативной установки изменения направлены на дальнейшее уменьшение объёма вакуумной камеры оптического спектроскопа.

Мы разработали вакуумную камеру меньшего размера без двумерной коллимационной секции. Собранный таким образом вакуумная камера оптического спектроскопа имеет размеры $74 \times 40 \times 20$ см³. Благодаря малым размерам вакуумной камеры катушки формирования магнитного поля, могли быть приведены к следующей конфигурации: рядов — 16; витков — 14; радиус первого витка — 2,5 см; расстояние — 3,5 см. При такой конфигурации магнитных катушек можно получить градиент магнитного поля до 40 Гс/см при токе всего 5 А.

Кроме того, мы осуществили переход от классической трёхлучевой МОЛ к однолучевой МОЛ, разработав конический отражатель (рис. 6). Используя конический отражатель, мы планируем запустить однолучевую МОЛ [16] с радиусом фиолетового пучка 4–5 см. В нашем эксперименте мы попробуем два (минимум) варианта таких отражателей. Первый отражатель — из латуни с серебряным покрытием. Он имеет диаметр верхнего конуса 1 см и диаметр нижнего конуса 5 см. Второй отражатель — из ситалла с серебряным покрытием. Он имеет диаметр верхнего конуса 1 см и диаметр нижнего конуса 6 см. Серебро имеет коэффициент отражения на длинах волн первичного и вторичного охлаждения порядка 90 %. Разница в материалах основы вызвана разной теплопроводностью и различиями в методах изготовления и полировки.

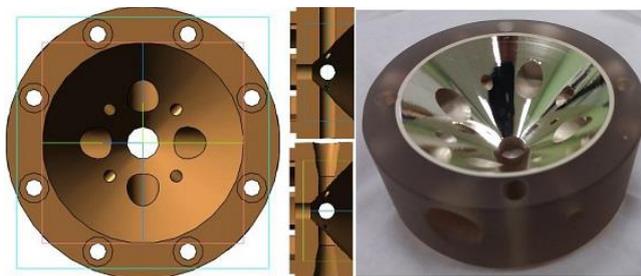


Рис. 6. Конический отражатель: слева — с конусом диаметром 5 см; справа — с конусом диаметром 6 см

Заключение

В нашей лаборатории все модули ОРЧ, включая системы лазерного охлаждения и перекачки, вакуумную камеру, распределительную систему и блок стабилизации частоты FSU-1 для всех лазеров, собраны на двух оптических столах площадью 160×90 см². Дополнительная оптическая плата 60×90 см², размещённая на опорах с активной виброизоляцией, используется для сверхкомпактной системы «часового» лазера на Yb на 578 нм CLS-1. Все лазерные системы готовы к работе. Уже смонтирована вакуумная камера для портативной системы; телескоп для расширения луча, который используется в эксперименте с коническим отражателем, находится в стадии сборки и испытаний.

Список литературы

1. Hobson R., Bowden W., Silva A., Baynham Ch.F.A., Margolis H.S., Baird P.E.G. et al. A strontium optical lattice clock with $1 \cdot 10^{-17}$ uncertainty and measurement of its absolute frequency // *Metrologica*. — 2020. — V. 57. — No. 6.
2. Ohmae N., Bregolin F., Nemitz N., Katori H. Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clocks and closure of the Hg/Yb/Sr loop // *Opt. Express*. — 2020. — 28. — 15112–15121.
3. Taichenachev A.V., Goncharov A.N., Bonert A.E., Baraulya V.I., Tropnikov M.A., Kuznetsov S.A. et al. Atom interferometry with ultracold Mg atoms: frequency standard and quantum sensors // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — V. 1508. — No. 1. — P. 012002.
4. Ludlow A.D., McGrew W.F., Zhang X., Nicolodi D., Fasano R.J., Schaffer S.A. et al. Optical Frequency Measurements at $1 \cdot 10^{-18}$ Uncertainty with Ytterbium Optical Lattice Clocks // *IEEE Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. — 2018. — P. 1–2.
5. McGrew W.F., Zhang X., Leopardi H., Fasano R.J., Nicolodi D., Beloy K. et al. Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit // *Optica*. — 2019. — 6. — P. 448–454.
6. Tino G.M., Bassi A., Bianco G., Bongs K., Bouyer P., Cacciapuoti L. et al. SAGE: A proposal for a space atomic gravity explorer // *The European Physical Journal D*. — 2019. — V. 73. — No. 11. — P. 228.
7. El-Neaj Y.A., Alpigiani C., Amairi-Pyka S., Araújo H., Balaž A., Bassi A. et al. AEDGE: Atomic experiment for dark matter and gravity exploration in space // *EPJ Quantum Technology*. — 2020. — V. 7. — No. 6. — P. 1–27.
8. Mura G., Franzen T., Abou-Jaoudeh C., Görlitz A., Luckmann H., Ernsting I. et al. A transportable optical lattice clock using 171 Yb // *Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*. — 2013. — P. 376–378.
9. Schiller S., Görlitz A., Nevsky A., Alighanbari S., Vasilyev S., Abou-Jaoudeh C. et al. The space optical clocks project // *International Conference on Space Optics — ICSO 2010 International Society for Optics and Photonics*. — 2017. — V. 10565. — P. 1056531.
10. Abdel-Hafiz M., Ablewski P., Al-Masoudi A., Martinez H.A., Balling A., Barwood G. et al. Guidelines for developing optical clocks with 10^{-18} fractional frequency uncertainty. — 2019. — URL: [arXiv:1906.11495](https://arxiv.org/abs/1906.11495).
11. Belotelov G.S., Ovsianikov V.D., Sutyurin D.V., Gribov A.Yu., Berdasov O.I., Pal'chikov V.G. et al. Lattice light shift in strontium optical clock // *Laser Physics*. — 2020. — V. 30. — No. 4.
12. TimeBase [сайт]. — URL: <http://time-base.de/>.

13. Schioppo M., Poli N., Prevedelli M., Falke St., Lisdat Ch., Sterr U. et al. A compact and efficient strontium oven for laser-cooling experiments // *Review of Scientific Instruments*. — 2012. — V. 83. — No. 10. — P. 103–101.
14. Kawasaki A., Braverman B., Yu Q., Vuletic V. Two-color magneto-optical trap with small magnetic field for ytterbium // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2015. — V. 48. — No. 15. — P. 155302.
15. Lee J., Lee J.H., Noh J., Mun J. Core-shell magneto-optical trap for alkaline-earth-metal-like atoms // *Physical Review A*. — 2015. — V. 91. — No. 5. — P. 053405.
16. Lee K.I., Kim J.A., Noh H.R., Jhe W. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror // *Optics letters*. — 1996. — V. 21. — No. 15. — P. 1177–1179.

Статья поступила в редакцию: 15.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 25.10.2021 г.

Статья принята в работу: 27.10.2021 г.