

УДК 537.761

КОМПАКТНЫЙ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ НА ОДИНОЧНОМ ИОНЕ $^{171}\text{Yb}^+$ (ПРОЕКТ “YBIS”)

И. А. Семериков, К. Ю. Хабарова, И. В. Заливако,
А. С. Борисенко, Н. Н. Колачевский

Представлена схема компактного транспортируемого оптического стандарта частоты на квадрупольном переходе в одиночном ионе $^{171}\text{Yb}^+$ с относительной нестабильностью на уровне 5×10^{-16} , объёмом менее 1 м^3 и массой менее 300 кг. Описывается ионная ловушка и лазерные системы. Экспериментально продемонстрированы захват и лазерное охлаждение иона $^{174}\text{Yb}^+$.

Ключевые слова: оптические часы, ион иттербия, транспортируемый стандарт частоты.

Современные оптические стандарты частоты достигли беспрецедентного уровня точности и стабильности. Относительная нестабильность частоты оптических часов достигла единиц 18-го знака, что превосходит характеристики лучших радиочастотных стандартов фонтанного типа на два порядка [1–3]. Столь выдающиеся характеристики точности и стабильности открывают широкие возможности применения оптических стандартов частоты как в прикладных, так и в фундаментальных вопросах современной физики. Следует отметить, что на сегодняшний день оптические стандарты частоты в основном представляют собой громоздкие, чувствительные к условиям окружающей среды установки, требующие регулярной настройки. Разработка и создание нового поколения транспортируемых оптических стандартов частоты открывают возможности точного сличения стандартов, а также решения нового класса задач астрофизики, геопозиционирования и навигации, а также релятивистской геодезии [4].

Сегодня работы по созданию компактных транспортируемых оптических часов ведутся в ряде ведущих научных групп мира. Так, транспортируемый стандарт на нейтральных атомах стронция, созданный в институте РТВ (г. Брауншвайг, Германия)

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ilia179@mail.ru.

и размещаемый в фургоне автомобиля, продемонстрировал относительную нестабильность частоты на уровне 7×10^{-17} при временах усреднения 10000 с [5]. С его помощью были проведены релятивистские геодезические эксперименты по измерению разности гравитационных потенциалов в центре горы и на расстоянии 90 км [4]. Также консорциум из ведущих научно-технологических компаний и физических институтов Германии объявил о начале работ по созданию транспортируемого ионного оптического стандарта частоты в рамках проекта Opticlock [6]. Аналогичные работы ведутся в Китае [7] и Франции [8].

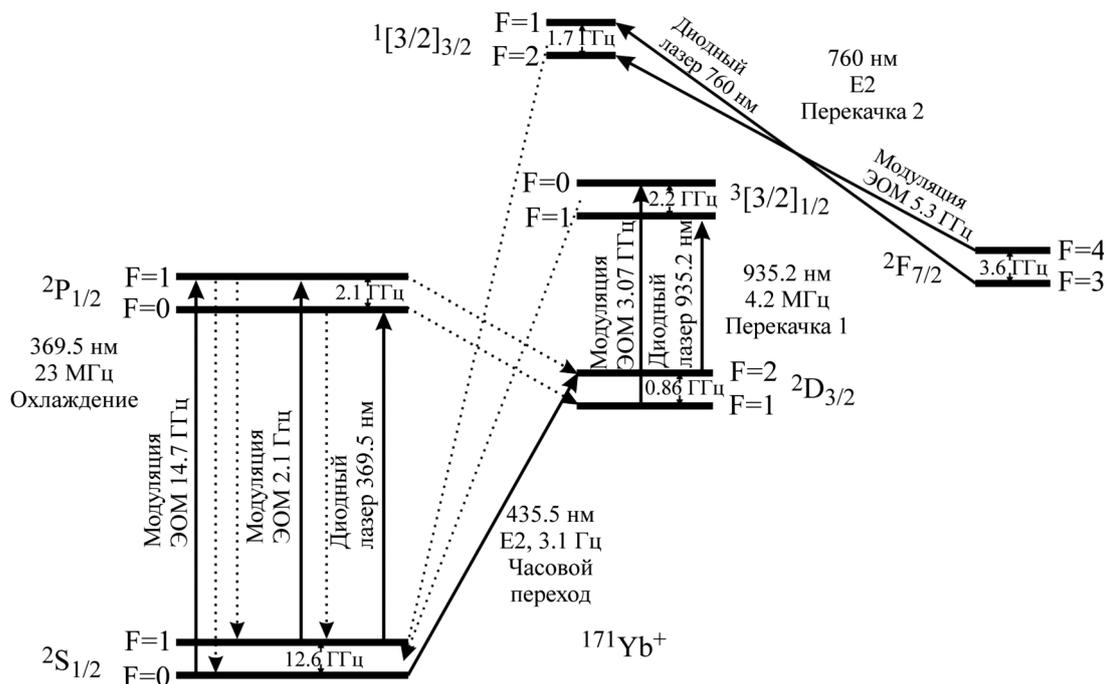


Рис. 1: Схема уровней $^{171}\text{Yb}^+$, задействованных в эксперименте (не в масштабе).

В рамках Федеральной целевой программы наша лаборатория в ФИАНе занимается разработкой и созданием компактного транспортируемого стандарта частоты на одиночном ионе иттербия $^{171}\text{Yb}^+$. Несомненным преимуществом выбора иона в качестве рабочей системы является возможность надежного захвата и хранения ионов в радиочастотных ловушках за счет наличия у них электрического заряда: время жизни иона в ловушке может достигать нескольких месяцев. Для осуществления доплеровского охлаждения в этом случае достаточно однонаправленного лазерного пучка, что облегчает юстировку оптической системы и упрощает дизайн установки. К минусам можно отнести то, что в большинстве случаев используемые для охлаждения и опро-

са ионов электронные переходы лежат в ультрафиолетовой области спектра, зачастую труднодоступной для лазерных источников, что ограничивает выбор ионов, которые можно использовать в стандартах частоты.

Ион $^{171}\text{Yb}^+$ обладает двумя оптическими “часовыми” переходами, при этом его структура уровней достаточно проста (рис. 1). В качестве часового планируется использовать квадрупольный переход $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0) \rightarrow ^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=2)$ с естественной шириной линии $\Gamma = 3.1$ Гц и длиной волны $\lambda = 435.5$ нм. Доплеровское охлаждение иона осуществляется на переходе $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}$ с естественной шириной линии $\Gamma = 23$ МГц на длине волны $\lambda_D = 369.5$ нм. При помощи этого же перехода планируется осуществлять регистрацию состояния иона методом квантовых скачков [9]. Для охлаждения и регистрации разработан и изготовлен компактный диодный лазер с внешним резонатором по схеме Литрова, устойчивый к вибрациям, на основе полупроводникового диода с длиной волны излучения 369.5 нм.

Из состояния $^2\text{P}_{1/2}$ ион с вероятностью 0.5% переходит в долгоживущее состояние $^2\text{D}_{3/2}$, что приводит к исключению его из цикла охлаждения. Для предотвращения этого эффекта необходимо использовать дополнительный перекачивающий лазер с длиной волны излучения 935 нм, связывающий состояние $^2\text{D}_{3/2}$ с короткоживущим состоянием $^3[3/2]_{1/2}$, распадающимся в основное состояние $^2\text{S}_{1/2}$. В качестве перекачивающего нами используется диодный лазер с распределенной обратной связью, отличающийся компактными размерами и высокой надежностью.

Так как ядро ^{171}Yb обладает спином $I = 1/2$, необходимо учитывать наличие сверхтонкого расщепления электронных состояний. Наличие сверхтонкого дублета позволяет производить глубокое, вплоть до основного колебательного состояния, охлаждение методом охлаждения на боковых частотах при помощи модифицированной электромагнитной прозрачности [10]. Это снижает вклад эффекта Доплера в нестабильность частоты стандарта. Для возбуждения перехода $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0) \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}(\text{F}=1)$ в процессе доплеровского охлаждения нами используется электрооптический модулятор (ЭОМ) с частотой 14.7 ГГц, модулирующий частоту излучения лазера доплеровского охлаждения, возбуждающего переход $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=1) \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}(\text{F}=0)$. Для подготовки иона в чистом состоянии $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0)$, необходимом для спектроскопии часового перехода, проводится депопуляция состояния $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=1)$. Для этого излучение, возбуждающее переход $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=1) \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}(\text{F}=0)$, модулируется на частоте 2.1 ГГц при помощи ЭОМа, а модуляция на частоте 14.7 ГГц отключается. Для эффективной перекачки из состояния $^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=1)$ используется ЭОМ с частотой 3.07 ГГц, модулирующий излучение на длине

волны 935 нм. В редких случаях за счет столкновения иона с фоновым газом ион может перейти в долгоживущее состояние $^2F_{7/2}$. Для депопуляции этого уровня используется излучение на длине волны 760 нм, которое модулируется на частоте 5.25 ГГц и возбуждает переходы $^2F_{7/2}(F=3) \rightarrow ^1[3/2]_{3/2}(F=1)$ и $^2F_{7/2}(F=4) \rightarrow ^1[3/2]_{3/2}(F=2)$.

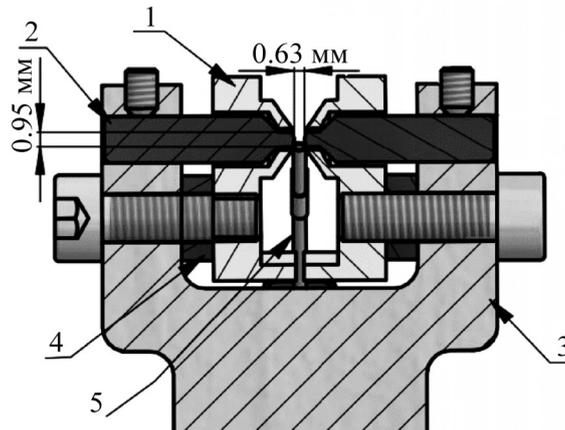


Рис. 2: Трехмерная ионная ловушка Пауля. 1 – электроды с постоянным потенциалом (центральные), 2 – электроды с радиочастотным потенциалом (стержневые). Элементы 1 и 2 выполнены из титана с покрытием золотом. 3 – держатель радиочастотных электродов из меди, 4 – проставки из плавленого кварца, 5 – атомная пушка.

Локализация иона в пространстве осуществляется в трехмерной ловушке Пауля с улучшенным оптическим доступом (рис. 2). В классической трехмерной ловушке Пауля центральный электрод перекрывает большую часть доступной апертуры [9]. В дизайне открытой ловушки центральный электрод разделяется на две части и выносится за стержневые электроды, что значительно улучшает оптический доступ, практически не влияя на глубину и гармоничность потенциала. В сравнении с планарными ловушками, которые также предлагаются для использования в компактных стандартах на одиночных ионах [8], трехмерная ловушка обладает гораздо большей глубиной и гармоничностью потенциала, что приводит к большим временам жизни иона в ловушке. Для создания удерживающего ион псевдопотенциала необходимо радиочастотное напряжение с амплитудой около 1 кВ и частотой порядка 10 МГц.

Существенной сложностью при работе с такими ловушками является радиочастотное излучение, испускаемое резонатором ловушки в окружающее пространство и влияющее на работу других электронных компонентов системы. Нами был спроектирован

и изготовлен спиральный резонатор с рабочей частотой $f = 18$ МГц и добротностью $Q = 900$ специальной конструкции с пониженным уровнем излучения, практически не влияющим на работу системы в целом.

Для загрузки ловушки были разработаны тепловые источники атомов, которые одновременно служат электродами для компенсации паразитных внешних электрических полей. Атомные источники и ионная ловушка смонтированы в вакуумной камере размером $8 \times 8 \times 8$ см³, в которой поддерживается уровень вакуума лучше 10^{-10} мбар.

Для загрузки ионов $^{171}\text{Yb}^+$ используется двухступенчатый процесс: на первом этапе при помощи лазера фотоионизации с длиной волны излучения $\lambda_{\text{ф}} = 399$ нм возбуждается переход $^2\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ в нейтральной иттербии, затем при поглощении фотона от охлаждающего лазера 369.5 нм электрон с уровня $^1\text{P}_1$ переходит в континуум. Спектральная ширина этого перехода составляет несколько десятков МГц, что при величине изотопического сдвига порядка 1 ГГц позволяет селективно возбуждать переход $^2\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ только в выбранном изотопе.

Частоты всех вышеописанных лазеров стабилизируются по интерферометру Физо (WSU, Ангстром), обеспечивающему точность стабилизации частоты излучения не хуже 2 МГц, что достаточно при работе с переходами с естественной шириной линии более 4 МГц.

Основным экспериментальным результатом работы является демонстрация селективной загрузки и лазерного охлаждения облака ионов четного изотопа $^{174}\text{Yb}^+$ до температуры порядка 100 мК, что указывает на надежное функционирование лазерных систем фотоионизации и охлаждения, а также радиочастотной ловушки в целом. Выбор четного изотопа в данных экспериментах обусловлен более простой системой уровней (отсутствие сверхтонкой структуры, рис. 1). После настройки систем высокочастотной модуляции на основе ЭОМов будет продемонстрирован захват и охлаждение требуемого изотопа $^{171}\text{Yb}^+$.

В работе описана схема оптического транспортируемого стандарта частоты на одиночном ионе иттербия. Обоснован ряд технических решений, позволяющих повысить надежность и компактность разрабатываемого стандарта. С помощью созданных лазерных систем продемонстрирован захват и лазерное охлаждение облака четного изотопа $^{174}\text{Yb}^+$ в радиочастотной ловушке Пауля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.610.21.0010, Уникальный идентификатор проекта RFMEFI61017X0010).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] T. P. Heavner, E. A. Donley, F. Levi, et al., *Metrologia* **51**, 174 (2014).
- [2] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 1 (2016).
- [3] B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, et al., *Nature* **506**, 71 (2014).
- [4] J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, et al., *Nat. Phys.* **14**, 437 (2018).
- [5] S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 1 (2017).
- [6] <http://www.opticlock.de>
- [7] Y. Huang, H. Guan, P. Liu, et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 1 (2016).
- [8] M. Delehaye and C. Lacroûte, *J. Mod. Opt.* **65**, 622 (2018).
- [9] F. Riehle, *Frequency Standards Basics and Applications* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KCA, Weinheim, 2004).
- [10] J. Evers and C. H. Keitel, *Europhys. Lett.* **68**, 370 (2004).
- [11] A. V. Akimov, A. N. Matveev, A. V. Sokolov, et al., *J. Raman Spectrosc.* **36**, 123 (2005).

Поступила в редакцию 15 октября 2018 г.