

Квадрупольная ионная ловушка Пауля в комплексе оптической спектроскопии многозарядных ионов тория для разработки ядерного стандарта частоты

В. И. ТРОЯН*, П. В. БОРИСЮК*, О. С. ВАСИЛЬЕВ*, А. В. КРАСАВИН*,
С. С. ПОТЕШИН*, А. А. СЫСОЕВ*, Д. М. ЧЕРНЫШЕВ*, С. И. ДОНЧЕНКО**,
В. Г. ПАЛЬЧИКОВ**

* Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

** Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Москва, Россия, e-mail: troyan@mephi.ru

Представлены результаты опытно-конструкторской работы по созданию лабораторного макета комплекса оптической спектроскопии многозарядных ионов тория с квадрупольной ионной ловушкой Пауля линейной конфигурации для разработки ядерного стандарта частоты, а также предварительных экспериментальных исследований по получению одно-, двух- и трехкратно заряженных ионов тория из твердотельного соединения нитрата тория (IV) методом электронно-лучевого испарения. Показано, что при использовании данного метода доля трехкратно и двухкратно заряженных ионов тория по отношению к однократно заряженным ионам превосходит аналогичные значения для метода лазерной абляции, применяемого для их получения в лабораториях США и Германии. Метод электронно-лучевого испарения положен в основу разработанного комплекса оптической спектроскопии сверхвысокого разрешения.

Ключевые слова: ионная ловушка Пауля, одномерные структуры, масс-спектрометрия, источник ионов, ядерный стандарт частоты, многозарядные ионы тория.

A laboratory prototype of a complex of optical spectroscopy of multiple-charged thorium ions with quadrupole linear ion Paul trap for development of nuclear frequency standard is presented, as well as a preliminary experimental study of generation of single-, double-, and triple-charged ions from solid compounds of thorium nitrate (IV) by electron beam evaporation is carried out. It is shown that the ratio of triple- and double-charged ions to single-charged ions produced by this technique exceeds the values obtained by the laser ablation method in laboratories of the U.S. and Germany. Electron beam evaporation technique is the basis of the developed complex of optical high-resolution spectroscopy.

Key words: ion Paul trap; one-dimensional structures; mass-spectrometry; ion source; nuclear frequency standard; multiple-charged thorium ions.

В настоящее время прогресс в области развития атомных и ионных стандартов частоты обусловлен развитием фундаментальной науки, в том числе методов высокоточных измерений времени и частоты [1, 2].

Среди перспективных приложений стандартов следует отметить применение в глобальной спутниковой навигационной системе, в геодезии и удаленной диагностике атмосферы. Чувствительность высокостабильных и точных оптических часов позволяет применять их для прямого измерения земных геоидов (гравитационных эквипотенциальных поверхностей) с высоким пространственным разрешением на уровне нескольких сантиметров. Длительные измерения изменяемого локального гравитационного потенциала Земли создают перспективу мониторинга сезонных и долгосрочных тенденций движения ледниковых масс, океанических течений, а также изменения массы Мирового океана. Использование оптических часов на Земле и в космосе в рамках ГЛОНАСС откроет возможность повышения точности передачи единицы времени на 2—3 порядка. Новый уровень точности измерений частоты послужит основой для

разработки нового поколения высокочувствительных тестов фундаментальных физических теорий.

Идеальный репер для стандарта частоты — покоящаяся — поглощающая среда, свободная от внешних воздействий полей и частиц, обладающая высокой добротностью линии поглощения и сильным откликом при взаимодействии с полем внешнего генератора. Для удержания микроскопических частиц в покое в некоторой точке пространства требуется силовое поле, стремящееся вернуть частицу в эту точку. Так как нейтральные атомы и молекулы относительно слабо взаимодействуют с электрическими и магнитными полями, для их удержания требуются сильные поля с большими градиентами, которые могут вызвать значительные сдвиги атомных уровней, однако для ионов достаточно иметь существенно более слабые поля. Как правило, речь идет о положительно заряженных атомных частицах, лишенных одного или нескольких электронов.

С точки зрения использования в стандартах частоты ионные ловушки имеют несколько преимуществ:

удержание ионов в ловушке в течение продолжительного времени (вплоть до нескольких суток) в условиях контролируемого поведения позволяет исследовать чрезвычайно

узкие спектральные линии без ограничений, накладываемых конечным временем взаимодействия частицы с зондирующим полем;

поскольку ионы находятся в области сверхвысокого вакуума, можно практически полностью исключить их взаимодействие с другими частицами и существенно снизить взаимодействие с окружением;

можно исключить взаимодействие с другими ионами, если в качестве репера частоты использовать осциллятор на одиночном ионе;

удержание поглотителей в небольшом объеме позволяет эффективно использовать методы лазерного охлаждения и регистрировать сигналы, исходящие из области микрометрового масштаба.

В настоящее время наилучшие результаты по развитию оптических часов на холодных атомах и ионах получены на лабораторных установках в США (NIST), Германии (PTB), Великобритании (NPL), Франции и Японии. При этом максимально достигнутый порядок относительной точности оптических часов составляет 10^{-18} [4]. Однако существует ряд фундаментальных физических ограничений, обусловленных, в частности, излучением абсолютно черного тела, что приво-

дит к существованию предела воспроизводимости и стабильности частоты перехода на уровне 10^{-18} .

Использование ядерных переходов (вместо атомных), экранированных от окружающего мира электронной оболочкой и поэтому гораздо менее чувствительных к внешним возмущениям, позволило бы повысить точность измерений на несколько порядков. К сожалению, типичные значения энергии ядерных переходов находятся в диапазоне от килоэлектронвольт до мегаэлектронвольт, в котором отсутствуют источники когерентного излучения. Уникальным исключением является изомерный уровень в изотопе тория-229, энергия которого составляет $(7,8 \pm 0,5)$ эВ [5] и находится в области вакуумного ультрафиолета. Однако прямого измерения энергии данного перехода до сих пор еще не проведено. В настоящее время над решением этой проблемы активно работают передовые исследовательские группы в США (Los Alamos National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, Georgia Institute of Technology, University of Maryland, Yale University) и Германии (PTB). В США созданы лазерные системы для спектроскопии электронных переходов тория и ионная ловушка для получения ионных кулоновских кристаллов Th^{+++} ; получены и детектированы первые кулоновские кристаллы, содержащие до 10^4 ионов тория Th^{+++} [6]. В Германии созданы лазерные системы для спектроскопии электронных переходов тория и ионная ловушка для получения ионных кулоновских кристаллов Th^+ ; получены и детектированы первые кулоновские кристаллы, содержащие до 10^3 ионов тория Th^+ [7]. Проведена оценка бюджета неопределенностей стандарта на основе ядерного перехода в тории. С учетом квадратичного и линейного эффектов Зеемана, эффекта Штарка, линейного эффекта Доплера, излучения черного тела, влияния гравитационного поля и микродвижения иона в электромагнитной ловушке, суммарная неопределенность часов составляет 10^{-19} и может достичь уровня 10^{-20} [8]. Теоретические исследования изомерного состояния изотопа тория-229 в России осуществляются, в основном, группой С. Г. Порсева (ИЯФ, Санкт-Петербург) [9] и Е. В. Ткаля (НИИЯФ МГУ, Москва) [10]. Экспериментальные работы по исследованию ядерного оптического изомерного перехода в ионах тория проводят совместно ВНИИФТРИ и НИЯУ МИФИ [11].

Цель настоящей работы — создание лабораторного макета комплекса оптической спектроскопии многозарядных ионов тория (комплекс ОСМИТ) для разработки ядерного стандарта частоты и проведение предварительных экспериментальных исследований по получению одно-, двух- и трехкратно заряженных ионов тория из твердотельного соединения $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ методом электронно-лучевого испарения.

Комплекс ОСМИТ состоит из четырех основных частей: сверхвысоковакуумной (СВВ) системы; источника ионов на основе электронно-лучевого испарителя (источник ионов); пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации (ионной ловушки); цилиндрического энергоанализатора Юза-Рожанского (энергофилтра).

СВВ-система (рис. 1) обеспечивает откачку воздуха из камеры ионной ловушки до предельного вакуума на уровне

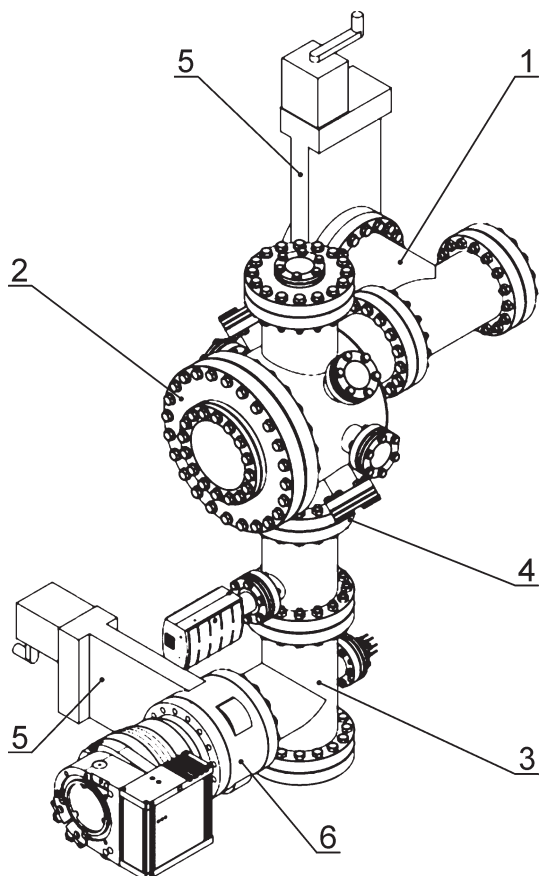


Рис. 1. Сверхвысоковакуумная система комплекса оптической спектроскопии сверхвысокого давления в сборе:

1 — СВВ камера откачки; 2 — камера ионной ловушки; 3 — камера источника ионов; 4 — камера масс-селективного источника ионов; 5 — сверхвысоковакуумный затвор; 6 — турбомолекулярный насос HiPace 300M

10^{-8} — 10^{-9} Па. Вакуумная откачка системы осуществляется ионным (скорость откачки 230 л/с) и титановым сублимационным насосами, уровень вакуума измеряется ионизационным манометром. При больших нагрузках или при откачке воздуха из СВВ-камеры, начиная с атмосферного давления используется комбинация турбомолекулярного (номинальная производительность 210 л/с) и роторного ($5 \text{ м}^3/\text{ч}$) насосов, установленных на линии откачки, которая отсечена от СВВ-камеры с ионной ловушкой вакуумной заслонкой.

Ионы тория формируются с помощью метода электронно-лучевого распыления при ускоряющих напряжениях в диапазоне 300—1000 В и токе эмиссии от 10—150 мА. Отличительной особенностью данного метода является то, что электронный пучок в ходе распыления мишеней выполняет две функции: осуществляет разогрев распыляемого образца и стимулирует его переход в газовую фазу; способствует ионизации распыляемого вещества. Следует отметить, что в качестве испарителя ториевых мишеней используется графитовый тигель. При этом тигель имеет цилиндрическую форму длиной 1 см и диаметром 0,5 см. Следовательно, при максимальной вкачиваемой мощности испарителя (150 Вт) с учетом потерь на излучение абсолютно черного тела температура графитового образца может достигать 2500 °С.

На рис. 2 представлена схема пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации с энергофильтром и источником ионов. Представленная ионная ловушка является единственной в России, превосходит по своим характеристикам мировые аналоги и находится на стадии оформления патентоохранной документации. Ловушка состоит из пяти независимых последовательных квадрупольных сегментов, что дает возможность варьировать потенциал на оси каждого квадруполя и, таким образом, формировать сложный потенциальный профиль для захвата и удержания ионов различных элементов в широком диапазоне энергий 1—500 эВ. Для успешного захвата ионов тория с помощью данной ловушки обеспечена синхронная подача (время синхронизации 1 мкс) потенциалов до 100 В на запирающие электроды квадрупольной ловушки (входной и выходной граничный квадруполь). Такое значение потенциала обусловлено необходимостью тормозить ионы с начальной энергией до 100 эВ, которые формируются при электронно-лучевом испарении торий-содержащих мишеней. При этом масс-спектры записываются последовательно в различных энергетических диапазонах 100—110 эВ. Ширина энергетического диапазона в 10 эВ обусловлена тем, что гарантированная фильтрация с разрешением 1 а.е.м. осуществляется при энергии ионов в квадруполе не более 10 эВ. Ионы, имеющие более низкую энергию (до 100 эВ), оказываются не в состоянии преодолеть потенциал смещения квадруполей и теряются в области между ними и ионной линзой. Ионы с энергией выше 110 эВ попадают в квадруполь, и вероятность прохождения через него тем выше, чем выше их энергия при

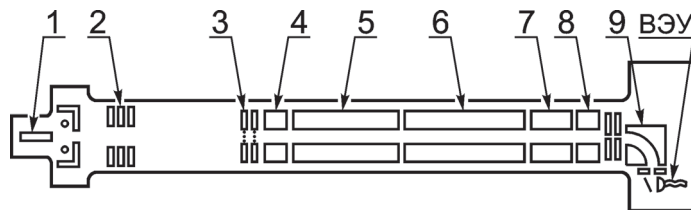


Рис. 2. Схема пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации с энергофильтром и источником ионов:

1 — источник ионов; 2 — линза; 3 — замедлитель; 4 — входной граничный квадруполь; 5 — квадрупольный фильтр-масс; 6 — квадрупольный ионопровод; 7 — квадрупольная ионная ловушка линейной конфигурации; 8 — выходной граничный квадруполь; 9 — энергетический фильтр; ВЭУ — вторичный электронный умножитель

движении в квадруполе. Для исключения влияния ионов на результаты анализа на выходе квадруполей установлен энергетический фильтр. Конструкция энергетического фильтра показана на рис. 3. Энергетический фильтр обеспечивает пропускание ионов в узком энергетическом диапазоне 100—110 эВ. Все ионы с энергией выше 110 эВ попадают на внешнюю обкладку энергоанализатора и не доходят до детектора. Таким образом, на детектор попадают только те ионы, которые гарантированно являются отфильтрованными по массе.

На рис. 4, а представлены спектры одно-, двух- и трехкратно заряженных ионов тория-232, полученных с использованием описанной выше системы. Калибровка шкалы по отношению массы к заряду осуществлялась с использова-

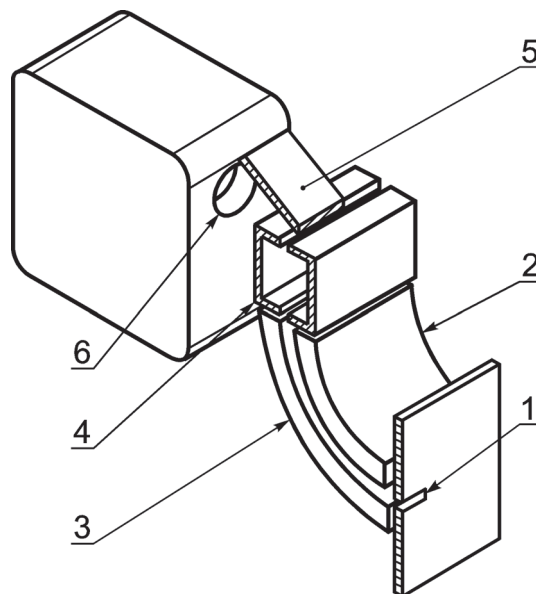


Рис. 3. Конструкция энергетического фильтра:

1 — входное отверстие; 2 — внутренняя обкладка энергетического фильтра; 3 — внешняя обкладка энергетического фильтра; 4 — выходное плечо (последняя ступень энергофильтрации); 5 — отклоняющая пластина (ионное зеркало); 6 — вторичный электронный умножитель с непрерывным динодом марки ВЭУ-6М

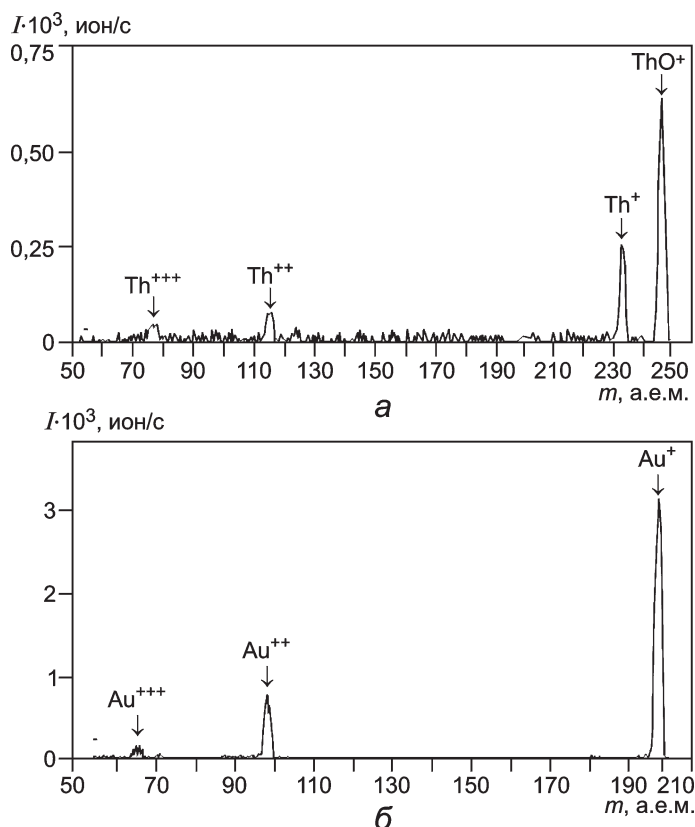


Рис. 4. Масс-спектры одно-, двух- и трехкратно заряженных ионов тория-232 (а), полученных с использованием пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации с энергофильром и источником ионов на основе электронно-лучевого испарителя. Калибровка шкалы по отношению массы к заряду осуществлялась с использованием моноизотопного и химически инертного элемента Au (б)

нием моноизотопного и химически инертного элемента Au (см. рис. 4, б).

Согласно результатам предварительных исследований можно сделать вывод о том, что при использовании метода электронно-лучевого испарения доля трех- и двухкратно заряженных ионов тория по отношению к однократно заряженным ионам составляет 17% ($\text{Th}^{+++}/\text{Th}^{+}$) и 29% ($\text{Th}^{++}/\text{Th}^{+}$). Эти значения превосходят аналогичные значения на 3% ($\text{Th}^{+++}/\text{Th}^{+}$) и 25% ($\text{Th}^{++}/\text{Th}^{+}$) для метода лазерной абляции, приведенного в [12, 13]. Метод электронно-лучевого испарения положен в основу комплекса оптической спектроскопии сверхвысокого разрешения. Использование квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации в представленном комплексе позволяет приступить к сверхпре-

цизионным исследованиям оптических и ядерных изомерных спектров испускания и поглощения изотопов тория-229.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-08-00487).

Литература

1. **Phillips W. D.** Laser cooling and trapping of neutral atoms. // *Rev. Mod. Phys.* 1998. V. 70. N. 3. P. 721—741.
2. **Риле Ф.** Стандарты частоты. Принципы и приложения. М: Физматлит, 2009.
3. **Chou C.W. e.a.** Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al^{+} Optical Clocks // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. 070802.
4. **Bloom B. J. e.a.** An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level // *Nature*. 2014. V. 506. P. 71—75.
5. **Beck B. R. e.a.** Energy Splitting of the Ground-State Doublet in the Nucleus ^{229}Th // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. 142501-1—142501-4.
6. **Campbell C. J. e.a.** Multiply Charged Thorium Crystals for Nuclear Laser Spectroscopy // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102. 233004-1—233004-4.
7. **Peik E. e.a.** Prospects for a Nuclear Optical Frequency Standard based on Thorium-229 [Электрон. ресурс.] <http://arxiv.org/abs/0812.3548> (дата обращения 06.06.2014).
8. **Campbell C. J. e.a.** A Single-Ion Nuclear Clock for Metrology at the 19th Decimal Place // [Электрон. ресурс.] <http://arxiv.org/abs/1110.2490> (дата обращения 06.06.2014).
9. **Porsev S. G. e.a.** Excitation of the Isomeric $^{229\text{m}}\text{Th}$ Nuclear State via an Electronic Bridge Process in $^{229}\text{Th}^{+}$ // *Phys. Rev. Lett.* 2010, V. 105. 182501-1—182501-4.
10. **Tkalya E. V., Yatsenko L. P.** Creation of inverse population in the ^{229}Th ground-state doublet by means of a narrowband laser // *Laser Phys. Lett.* 2013, V. 10, 105808-1—105808-6.
11. **Troyan V.I. e. a.** Generation of thorium ions by laser ablation and inductively coupled plasma techniques for optical nuclear spectroscopy // *Laser Phys. Lett.* 2013, V. 10, P. 105301-1—105301-6.
12. **Adam V. Steele.** Barium ion cavity QED and triply ionized thorium ion trapping. [Электрон. ресурс.] https://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/26530/1/steele_adam_v_200812_phd.pdf. (дата обращения 06.06.2014).
13. **Zimmermann K.** Experiments towards optical nuclear spectroscopy with Thorium-229 [Электрон. ресурс.] https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2010_Zimmermann_Kai_Dissertation.pdf (дата обращения 06.06.2014).

Дата принятия 21.05.2014 г.