

УДК 621.317.329, 534.143, 53.097, 53.043

## ТРЕХМЕРНАЯ ЛОВУШКА ПАУЛЯ С ВЫСОКОЙ СЕКУЛЯРНОЙ ЧАСТОТОЙ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ

И. А. Семериков<sup>1</sup>, И. В. Заливако<sup>1</sup>, А. С. Борисенко<sup>1</sup>, М. Д. Аксенов<sup>1</sup>,  
П. А. Вишняков<sup>1</sup>, П. Л. Сидоров<sup>2</sup>, Н. Н. Колачевский<sup>1,2</sup>, К. Ю. Хабарова<sup>1,2</sup>

*Создана ионная ловушка Пауля для использования в компактном стандарте частоты на основе одиночного иона иттербия. Особенности конструкции являются использование атомных испарителей для компенсации паразитных электрических полей и хороший оптический доступ. Приведены результаты по захвату и лазерному охлаждению одиночного иона  $^{171}\text{Yb}^+$ , показано, что обеспечивается секулярная частота вплоть до 1.2 МГц.*

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

*Введение.* Сегодня оптические стандарты частоты (ОСЧ) на несколько порядков превосходят по точности и стабильности микроволновые атомные часы. Относительная погрешность ОСЧ достигла  $10^{-18}$  [1, 2], в то время как в цезиевых фонтанах достигается уровень  $10^{-16}$  [3]. ОСЧ находят применение в ряде задач, таких как исследование стабильности фундаментальных констант [4], поиск темной материи [5], тесты лоренц-симметрии [1] и пр. В последние годы идет развитие компактных и транспортируемых ОСЧ [6, 7], что позволяет использовать их в хроногеодезии [8] и вплотную подойти к вопросу переопределения секунды СИ [9].

ОСЧ на основе одиночных ионов обладают большой глубиной удерживающего потенциала, большим временем удержания иона, малой областью локализации иона и отсутствием возмущающих полей ловушки в ее центре, что обеспечивает их перспективное использование в компактных системах. Кроме того, ионы  $\text{Yb}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Sr}^+$  обладают выигрышной системой энергетических уровней, адресация которых возможна с помощью надежных полупроводниковых лазеров.

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: semerikovia@lebedev.ru.

<sup>2</sup> Российский квантовый центр, 121205 Россия, Москва, Большой бульвар, 30, стр. 1.

Целью работы являлось создание трехмерной ловушки Пауля для компактных ионных ОСЧ.

*Трехмерная ловушка Пауля.* Важным узлом в ионном ОСЧ является ионная ловушка. В случае захвата одиночного иона используется трехмерная конфигурация ловушки Пауля [10], которая обеспечивает глубокий удерживающий потенциал по всем трем координатам. В результате охлаждения ион локализуется в области, где электрическое поле обращается в ноль, что предотвращает возмущение уровней полем [11].

Необходимо одновременно добиться низкой скорости нагрева иона полями ловушки и высокой секулярной частоты колебаний частицы при минимальном напряжении на электродах. Требуется обеспечить хороший оптический доступ, высокую механическую стабильность ловушки. Нагрев иона радиочастотным (РЧ) полем приводит к возрастанию сдвига частоты часового перехода за счет эффекта Доплера второго порядка и к ухудшению характеристик оптических часов. Существует несколько основных эффектов, приводящих к увеличению температуры иона: аномальный нагрев [12], наличие разности фаз в радиочастотном сигнале на электродах ловушки, а также

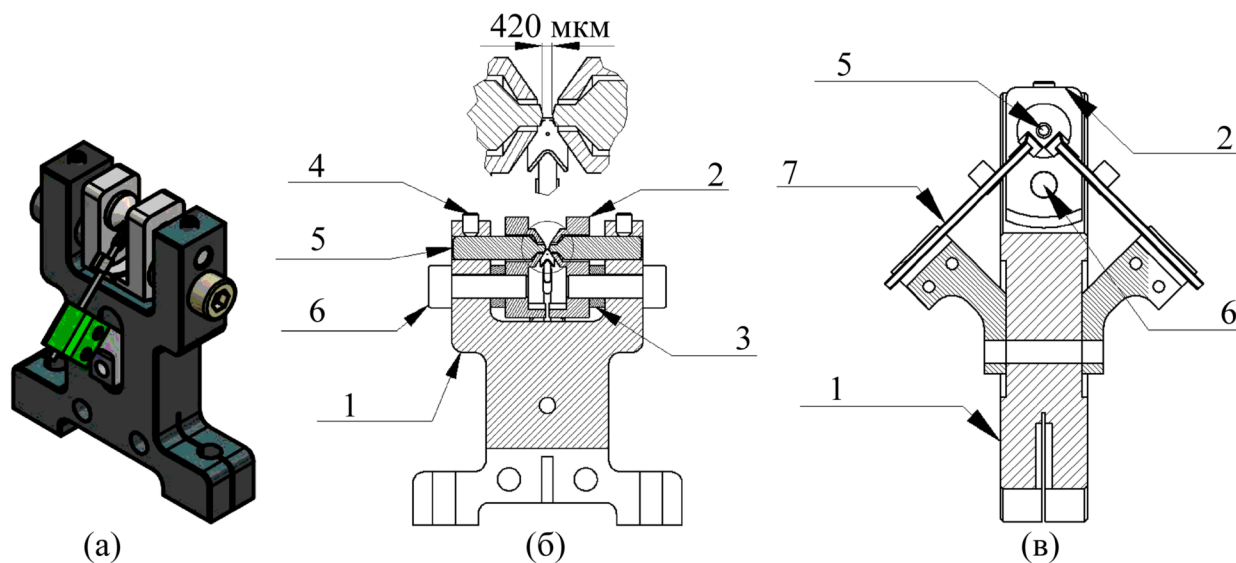


Рис. 1: Трехмерная ловушка Пауля с атомными испарителями. (а) общий вид, (б) сечение ортогонально плоскости атомных испарителей, (в) сечение в плоскости атомных испарителей. Цифрами обозначены: 1 – медный держатель для подвода радиочастоты, 2 – чашечный электрод ловушки, 3 – изолятор из плавленого кварца, 4 – винт фиксации РЧ электродов, 5 – РЧ электроды, 6 – фиксирующий винт из  $Al_2O_3$ , 7 – атомный испаритель.

появление паразитных электрических полей [13]. Наибольший вклад вносят первый и последний механизмы.

Существует два основных метода подавления аномального нагрева: использование материалов, снижающих эффекты от патчевых зарядов и охлаждение электродов ловушки до криогенных температур [14]. В случае компактной системы криогенное охлаждение нежелательно, и нами была спроектирована ловушка из материалов, обеспечивающих минимальный аномальный нагрев.

Удерживающее поле создается при помощи двух РЧ электродов, а также двух чашечных электродов, к которым прикладывается постоянный потенциал. В результате между РЧ электродами образуется поле, близкое к квадрупольному (рис. 1). Электроды изготовлены из титана, покрытого слоем золота толщиной 10 мкм, что превосходит глубину скин-слоя на частоте работы ловушки (16 МГц). Золото фактически не имеет оксидного слоя, что обеспечивает наилучшие характеристики с точки зрения возникновения патчевых зарядов и аномального нагрева.

Для уменьшения разности фаз подвод радиочастоты к электродам осуществлен при помощи единого медного держателя. Разность путей определяется неточностью изготовления и составляет менее 0.1 мм, что при частоте 16 МГц приводит к разности фаз  $3 \times 10^{-5}$ . При этом вносимая погрешность в относительный сдвиг частоты перехода составляет порядка  $10^{-19}$  [13]. Для уменьшения влияния поля держателя на ион подвод радиочастоты экранируется при помощи лепестков на чашечных электродах.

Для компенсации статической части внешних электрических полей, которые могут приводить к смещению иона из нуля удерживающего потенциала и возмущению частоты, используются четыре электрода: потенциал может независимо подаваться на каждый из чашечных электродов ловушки, а также на каждый из двух атомных испарителей.

Важным фактором является реализация режима Лэмба–Дике, при котором подавляется эффект Доплера первого порядка. Для иона, охлажденного до доплеровского предела, условие перехода в этот режим может быть записано в следующем виде:

$$p = \eta^2(2n + 1) = \frac{\hbar k^2 \Gamma}{m \Omega_{\text{сек}}^2} \ll 1, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – ширина охлаждающего перехода,  $k$  – волновое число опрашивающего излучения,  $m$  – масса иона,  $\Omega_{\text{сек}}$  – секулярная частота движения иона в ловушке. Достижение режима Лэмба–Дике зависит только от типа иона и секулярной частоты. Секулярная частота движения иона в радиальном направлении в ловушке в отсутствие постоянной

компоненты напряжения на удерживающих электродах равна [10]

$$\Omega_{\text{секр}} = \frac{q_r \omega_{\text{РЧ}}}{2\sqrt{2}} = \frac{eV_{ac} \omega_{\text{РЧ}}}{4\sqrt{2} m \omega_{\text{РЧ}}^2 z_0^2}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{РЧ}}$  – частота РЧ напряжения,  $V_{ac}$  – его амплитуда,  $z_0$  – расстояние от центра ловушки до РЧ электрода,  $e$  – модуль элементарного заряда. Из формулы (2) видно, что секулярная частота движения иона в ловушке линейно зависит от безразмерного параметра ловушки  $q$  и частоты. Для увеличения  $\Omega_{\text{секр}}$  требуется либо увеличивать  $\omega_{\text{РЧ}}$ , либо увеличивать параметр  $q$ . Однако с увеличением  $q$  возрастает уровень ангармонизма движения иона и амплитуда микродвижений, что может приводить к дополнительному нагреву иона. По этой причине параметр  $q$  обычно выбирается в диапазоне 0.1–0.2 [10]. Ограничением на частоту питающего напряжения ловушки является рост потерь в диэлектриках и нагрев электродов ловушки. Частота  $\omega_{\text{РЧ}}$  в ОСЧ обычно не превышает 20 МГц. Также можно варьировать параметры  $V_{ac}$  и  $z_0$ .  $V_{ac}$  желательнее выбирать минимально возможной, что снижает требования к системе питания. В свою очередь, при  $z_0$  порядка 100 мкм проявляются эффекты аномального нагрева иона [15]. Нами было выбрано значение  $z_0 = 210$  мкм. Для обеспечения нужного напряжения на электродах ловушки, а также согласования ее входного импеданса на 50 Ом был также создан резонансный трансформатор, аналогичный описанному в [16].

*Измерение секулярных частот ловушки для  $^{171}\text{Yb}^+$ .* Ионная ловушка была исследована при захвате одиночного иона  $^{171}\text{Yb}^+$  и измерения его секулярных частот. Питание ловушки в ходе экспериментов осуществлялось при помощи генератора Stanford Research Systems SG382, сигнал которого усиливался при помощи усилителя Minicircuits ZHL-5W-1+. Частота генератора соответствовала резонансной частоте резонансного трансформатора и составляла  $\omega_{\text{РЧ}} = 2\pi \times 16$  МГц. Амплитуда сигнала на генераторе в эксперименте варьировалась от 0.3 до 0.75 В.

В начале каждого эксперимента на электроды ловушки подавалось питание и включался нагрев одного из атомных испарителей. При этом в центре ловушки фокусировалось излучение трех лазерных источников: лазера фотоионизации (399 нм), лазера доплеровского охлаждения (369 нм), а также лазера перекачки (935 нм). Лазер фотоионизации обеспечивает возбуждение перехода  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$  в нейтральных атомах  $^{171}\text{Yb}$  для последующей изотопно-селективной ионизации излучением 369 нм и загрузки иона  $^{171}\text{Yb}^+$ . Лазерное охлаждение происходит под действием лазера 369 нм, который настроен на 10 МГц от перехода  $^2\text{S}_{1/2}(F=1) \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}(F=0)$  в красную область. Поскольку переход не является циклическим, для охлаждения требуется излучение лазера

перекачки 935 нм, которое опустошает метастабильный уровень  $^2D_{3/2}$ . Для охлаждения изотопа  $^{171}\text{Yb}^+$ , обладающего сверхтонкой структурой, лазерные пучки на 369 нм и 935 нм модулируются по фазе на частотах 14.7 ГГц и 3.1 ГГц, соответственно. Прикладывается магнитное поле, предотвращающее возникновение эффекта когерентного пленения населенностей.

Через примерно одну минуту после включения испарителя в центре ловушки начинает наблюдаться люминесценция охлажденного иона иттербия на длине волны 369 нм. Сбор сигнала люминесценции осуществляется асферической линзой, расположенной вне вакуумной камеры, и фокусируется на высокочувствительную EMCCD камеру. Оптическая система позволяет разрешить отдельные частицы, захваченные в ловушку. После появления сигнала лазер фотоионизации и испаритель выключаются.

Измерение секулярных частот осуществлялось путем приложения дополнительного внешнего электрического поля, частота которого сканировалась. При совпадении частоты с собственной частотой колебания иона в ловушке происходило резонансное возбуждение этой колебательной моды, которое наблюдалось как резкое увеличение размера изображения на EMCCD камере (рис. 2(а), (б)).

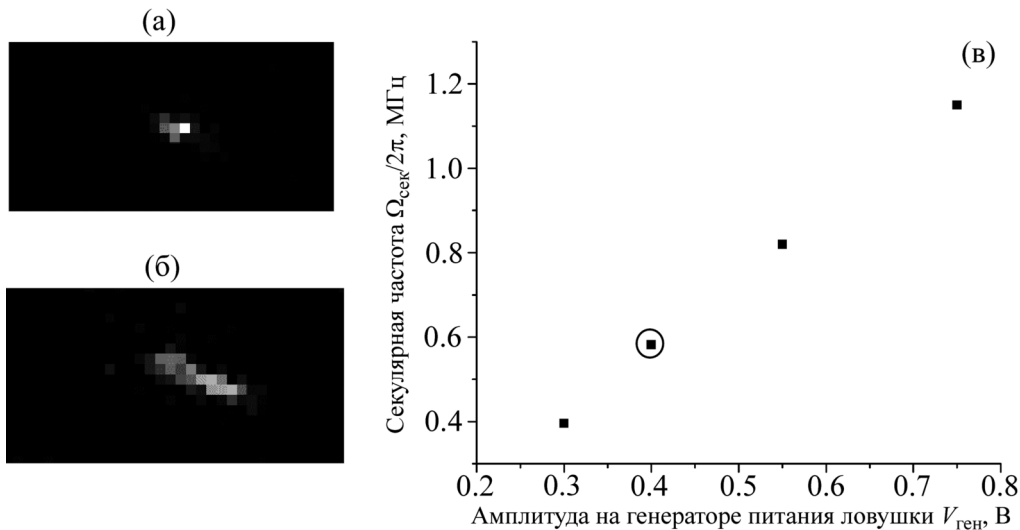


Рис. 2: Изображение иона, полученное при помощи EMCCD камеры, когда возбуждающее поле не в резонансе с секулярной частотой (а) и в резонансе с ней (б). Изображение иона размывается вдоль радиальной плоскости ловушки; (в) зависимость радиальной секулярной частоты  $\Omega_{\text{сек}}$  от амплитуды генератора. Кружком обозначена рабочая точка.

На рис. 2(в) приведены результаты эксперимента: зависимость (2) секулярной частоты  $\Omega_{\text{сек } r}$  от амплитуды РЧ напряжения на выходе генератора  $V_{\text{ген}}$ . Видно, что созданная трехмерная ловушка Пауля позволяет достичь секулярной частоты вплоть до  $2\pi \times 1.15$  МГц, что соответствует параметрам ловушки  $q_r = 0.20$ ,  $p = 0.12 \ll 1$  (1). Обеспечивается надежное достижение режима Лэмба–Дике, что необходимо для проведения прецизионных измерений оптической частоты. Формула (2) также позволяет охарактеризовать нагруженный резонансный трансформатор, вычислив амплитуду поля на электродах ловушки, исходя из секулярной частоты. Максимальная амплитуда напряжения на электродах ловушки составила  $V_{ac\text{ макс}} = 330$  В, однако для спектроскопических исследований будет использоваться амплитуда  $V_{ac\text{ опт}} = 165$  В, что соответствует параметрам  $q_r = 0.1$ ,  $q_z \approx 0.2$ ,  $V_{\text{ген}} \approx 0.4$  В.

*Заключение.* Создана и исследована оригинальная ионная ловушка Пауля для компактного стандарта частоты на одиночном ионе  $^{171}\text{Yb}^+$ . Особенности ловушки являются простота конструкции, возможность точной юстировки положения электродов, хороший оптический доступ и использование атомных испарителей непосредственно для компенсации паразитных электрических полей. Была осуществлена загрузка и лазерное охлаждение иона  $^{171}\text{Yb}^+$  и измерена секулярная частота в зависимости от амплитуды удерживающего РЧ напряжения. По этому параметру ловушка соответствует лучшим системам, созданным в мировых лабораториях. Соответственно, в ней уверенно достигается режим Лэмба–Дике, что обеспечивает подавление эффекта Доплера и позволяет выполнять метрологические исследования часового оптического перехода.

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] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 1 (2016).
- [2] T. Bothwell, D. Kedar, E. Oelker, et al., arXiv:1906.06004 (2019).
- [3] T. P. Heavner, E. A. Donley, F. Levi, et al., Metrologia **51**, 174 (2014).
- [4] R. M. Godun, P. B. R. Nisbet-Jones, J. M. Jones, et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 1 (2014).
- [5] P. Wcisło, P. Morzyński, M. Bober, et al., Nat. Astron. **1**, 0009 (2017).

- [6] J. Cao, P. Zhang, J. Shang, et al., *Appl. Phys. B* **123**, 112 (2017).
- [7] S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 1 (2017).
- [8] J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, et al., *Nat. Phys.* **14**, 437 (2018).
- [9] F. Riehle, *Nat. Photonics* **11**, 25 (2017).
- [10] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 281 (2003).
- [11] C. A. Schrama, E. Peik, W. W. Smith, and H. Walther, *Opt. Commun.* **101**, 32 (1993).
- [12] Q. A. Turchette, Kielpinski, B. E. King, et al., *Phys. Rev. A* **61**, 063418 (2000).
- [13] D. J. Berkeland, J. D. Miller, J. C. Bergquist, et al., *J. Appl. Phys.* **83**, 5025 (1998).
- [14] L. Deslauriers, S. Olmschenk, D. Stick, et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 103007 (2006).
- [15] I. A. Boldin, A. Kraft, and C. Wunderlich, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 23201 (2018).
- [16] J. D. Siverns, L. R. Simkins, S. Weidt, and W. K. Hensinger, *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **107**, 921 (2012).

Поступила в редакцию 13 сентября 2019 г.

После доработки 17 сентября 2019 г.

Принята к публикации 18 сентября 2019 г.