



DOI: 10.5862/JPM.213.6

УДК 539.194

*С.В. Ермак*¹, *В.В. Семёнов*¹, *Е.Н. Пятышев*¹, *А.Н. Казакин*¹,
*И.М. Комаревцев*¹, *Е.Н. Величко*¹, *В.В. Давыдов*¹, *М.В. Петренко*²

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ЭФФЕКТЕ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТИ

Рассмотрена универсальная методика изготовления миниатюрных рабочих ячеек образцовых мер частоты и квантовых магнитометров, содержащих атомы ^{87}Rb в атмосфере инертного газа неона, с применением интегральных технологий. Представлены результаты экспериментального исследования сигнала когерентного пленения населенности (КПН), наблюдаемого на серии изготовленных ячеек, в которых предусматривалось восстановление паров щелочного металла из соли с помощью лазерного излучения. Сигналы КПН наблюдались с типичной шириной линии 2 – 3 кГц при отношении сигнал/шум, равном 1500, в полосе регистрации шириной 1 Гц, что позволяет реализовать относительно высокую стабильность частоты атомных часов на уровне 10^{-11} за 100 с.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, КОГЕРЕНТНОЕ ПЛЕНЕНИЕ НАСЕЛЕННОСТИ, МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА, ЩЕЛОЧНОЙ АТОМ, КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ.

Введение

Растущий интерес к малогабаритным телекоммуникационным системам различного применения стимулировал значительный прогресс в создании миниатюрных квантовых устройств, к числу которых относятся квантовые стандарты частоты (КСЧ) и квантовые магнитометры с оптической накачкой (КМОН). Миниатюрные КСЧ применяются для синхронизации работы электронных устройств и обеспечения точного времени в портативных приложениях, где требуются уменьшенные габариты, энергопотребление, лучшая долговременная стабильность и устойчивость к значительным механическим воздействиям [1]. Малогабаритные КМОН в виде компактных датчиков матричного типа находят свое применение в различных биомагнитных исследованиях [2]. Основным элементом миниатюрных КСЧ и КМОН, помимо лазерного источника, является рабочая ячейка, содержащая атомы щелочного металла, (обычно ^{87}Rb , ^{85}Rb , ^{133}Cs) в атмосфере буферного газа. Качество изготовленных ячеек существенным

образом зависит от количества в них щелочного металла, давления буферного газа и его состава, наличия в ячейках примесей и непосредственно влияет на стабильность и воспроизводимость характеристик КСЧ и КМОН. Для обеспечения высокого качества ячеек подобных устройств наиболее целесообразной является технология изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС), сочетающая в себе достоинства интегральной технологии изготовления микроэлектронных элементов и технологии изготовления и сборки миниатюрных механических систем [3]. Важное значение при разработке миниатюрных КСЧ и КМОН имеет способ индуцирования резонансного сигнала в измерительном блоке устройства, где происходит сравнение частоты атомного перехода с частотой опорного генератора. В классических аналогах прецизионных квантовых устройств используется метод двойного радиооптического резонанса (ДРОР) [4, 5], где тенденция миниатюризации конструкции затруднена использованием техники СВЧ (объемных резонаторов). В этой связи эффект КПН весьма привле-

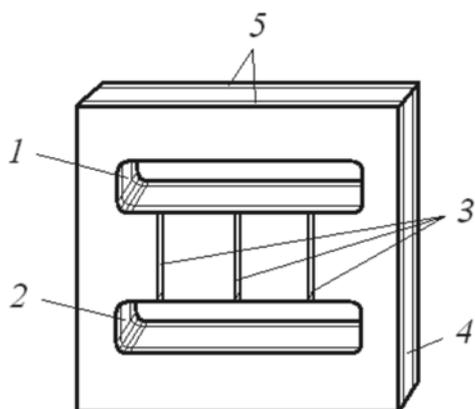


Рис. 1. Конструкция рабочей ячейки:
1, 2 – рабочая и дополнительная камеры соответственно, 3 – соединительные каналы, 4, 5 – кремниевая и стеклянные пластины соответственно

кателен, так как не требует применения СВЧ-резонаторов и обеспечивает формирование достаточно надежного резонансного сигнала в условиях взаимодействия атомов рабочего вещества с оптическим полем лазера накачки [6, 7].

Методика изготовления интегральных ячеек

Для разработки и дальнейших исследований была выбрана универсальная конструкция ячейки (рис. 1), позволяющая включать ячейку в оптический тракт как на просвет стандартным способом (рис. 2, а), так и с двойным отражением луча накачки от внутренних граней рабочей камеры, вытравленной в материале корпуса (рис. 2, б). Первый вариант является развитием традиционных технологий изготовления ячеек, работающих на просвет [8, 9] при толщине

ячейки до 1 мм. Второй вариант увеличивает длину пути луча накачки в рабочем веществе при субмиллиметровой толщине ячейки [1]. Наличие дополнительной камеры (см. рис. 1) связано с методом восстановления щелочного металла из соли при взаимодействии материала с активирующим лазерным излучением [10]. Каналы, показанные на рис. 1, обеспечивают, благодаря малому поперечному сечению, перенос атомов рубидия в рабочую камеру без побочных продуктов реакции восстановления щелочных паров.

На рис. 3 представлена последовательность одновременного изготовления 97 ячеек. На первом этапе (I) технологического процесса в кремниевой пластине КЭФ-20 с ориентацией (100) создавался сквозной рельеф будущих ячеек глубоким щелочным травлением кремния на всю толщину пластины. Сквозное травление осуществлялось в 30 %-м водном растворе гидроксида калия при 80 °С в течение восьми часов. На втором этапе (II) к нижней стороне кремниевой пластины приваривалась плоская стеклянная пластина (стекло марки ЛК5). Соединение осуществлялось методом анодной сварки на воздухе при 450 °С, под напряжением 800 В в течение 30 мин. На третьем этапе (III) в каждую из 97 ячеек при помощи специального трафарета укладывалась титановая микротаблетка диаметром примерно 200 мкм, содержащая несколько процентов бихромата рубидия. На четвертом этапе (IV) к верхней стороне кремниевой пластины методом анодной сварки приваривалась вторая стеклянная пластина. Сварка осущест-

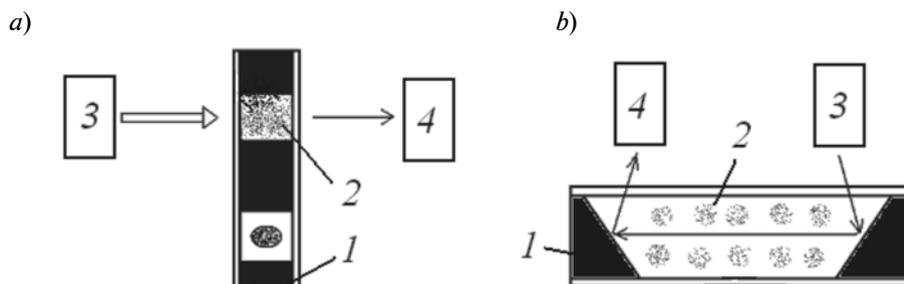


Рис. 2. Два способа включения рабочей ячейки (1) в оптический тракт: луч накачки проходит через камеру на просвет (а) либо вдоль рабочего канала ячейки с отражениями (б); 2 – рабочая камера, 3 – лазер, 4 – фотоприемник

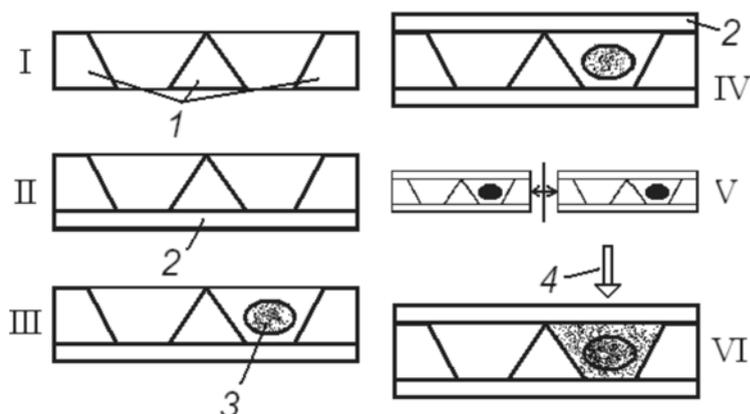


Рис. 3. Этапы изготовления ячеек: I – щелочное травление кремния; II, IV – приваривание первой и второй стеклянных пластин; III – укладывание титановой микротаблетки с бихроматом рубидия; V – разделение на чипы; VI – лазерная активация; 1 – кремний, 2 – стекло, 3 – бихромат рубидия, 4 – лазерный луч

влялась в атмосфере неона (при давлении 200 Торр) в течение двух часов при 400 °С, под напряжением 350 В. Перед соединением оснастка и пластины обезгаживались в вакууме (при давлении 10^{-4} Торр) при 450 °С в течение часа. На пятом эта-

пе (V) трехслойная пластина стекло–кремний–стекло разделялась на отдельные чипы методом алмазной дисковой резки. На шестом этапе (VI) проводилась активация каждой микротаблетки излучением лазера инфракрасного диапазона.

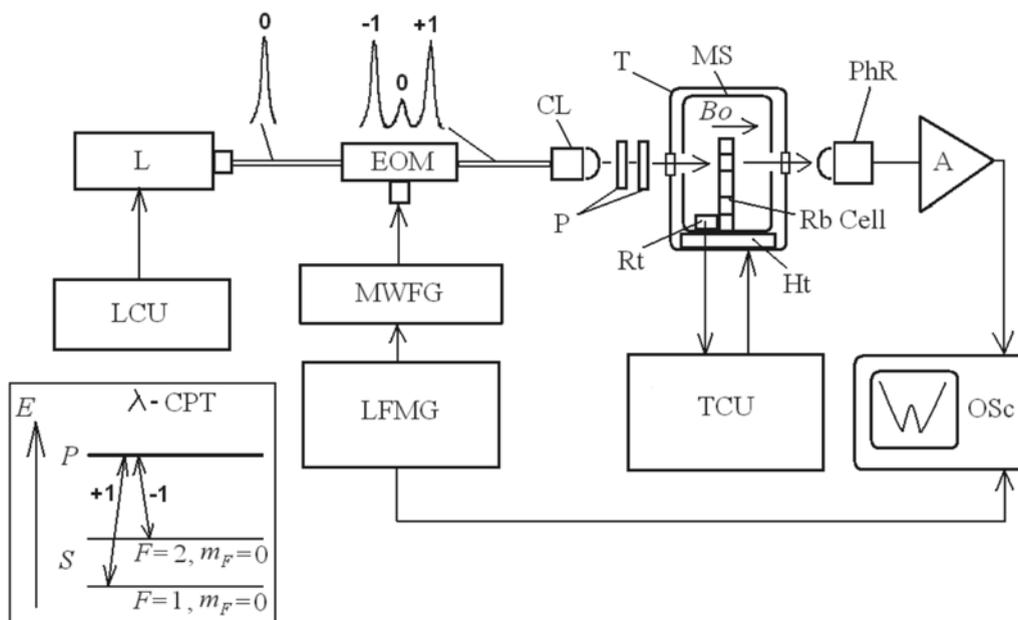


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки:

L – лазер, EOM – электрооптический модулятор, MWFG – СВЧ-генератор, CL – коллиматор, P – поляриды, RbCell – рабочая ячейка с рубидием, PhR – фотоприемник, A – усилитель, OSc – осциллограф, T – термостат, TCU – блок управления термостатом, Ht – нагреватель, Rt – терморезистор, MS – магнитный экран, LCU – блок управления лазером, LFMG – генератор низкочастотной модуляции, λ -CPT – упрощенная структура энергетических уровней в рубидии при индуцировании сигнала КПП по λ -схеме

Исследование характеристик ячеек

Экспериментальные исследования малогабаритных ячеек, изготовленных по вышеизложенной методике, проводились на установке, схема которой приведена на рис. 4.

Луч лазера (L) поступал на электрооптический модулятор (ЕОМ) фазы, модулируемый синусоидальным сигналом генератора СВЧ (MWFG). На выходе ЕОМ появлялись боковые спектральные компоненты -1 и $+1$, отстоящие на удвоенную частоту модулирующего СВЧ-сигнала. При этом несущая компонента «0» подавлялась на 70 %, по сравнению с ее интенсивностью на входе в ЕОМ. Далее посредством коллиматора (СЛ) и поляризаторов Р ($\lambda/2$ и $\lambda/4$) циркулярно-поляризованное излучение частично поглощалось в ячейке (Rb Cell) и поступало на фотоприемник (PhR). И далее усиленный в усилителе (А) сигнал поступал на вход осциллографа (ОSc). Температура ячейки стабилизировалась термостатом (Т), включающим в себя нагревательный элемент (Нt) и терморезистор (Rt), обеспечивающий измерение температуры ячейки. Термостат контролировался блоком управления (TCU). Магнитный экран (MS) экранировал ячейку от внешних магнитных полей, внутреннее магнитное поле B_0 создавалось встроенной катушкой. Генератор низкочастотной модуляции (LFMG) обеспечивал наблюдение резонансных сигналов КПН (СРТ). Блок управления лазером (LCU) выполнял функции стабилизации тока и температуры лазера, слабую модуляцию тока лазера для наблюдения спектров поглощения атомов ^{87}Rb .

В эксперименте регистрировался сигнал поглощения излучения от лазерного источника при сканировании его частоты в области D_2 -линии поглощения атомов ^{87}Rb , причем камера поглощения помещалась в оптический тракт по схеме, приведенной на рис. 2, а (СВЧ-модуляция ЕОМ была выключена). В качестве источника накачки применялся полупроводниковый лазер с внешним резонатором, работающий в непрерывном одночастотном режиме и имеющий ширину спектральной линии

500 кГц. Мощность накачки составила 50 мкВт при апертуре пучка 2 мм². В качестве приемника излучения применялся фотодиод с уменьшенным уровнем темнового тока [11, 12]. Предварительно для увеличения плотности паров рабочего вещества рабочая ячейка прогревалась до температуры 100 °С. На рис. 5 приведены спектры поглощения лазерного излучения в двух ячейках: в опорной (на рис. 4 не показана), содержащей смесь изотопов ^{87}Rb и ^{85}Rb (сверху), и рабочей (снизу). Значительное уширение линий поглощения атомов ^{87}Rb в рабочей ячейке (более 1 ГГц) (см. рис. 5, линии 5 и 6) обусловлено высокой температурой и наличием в ячейке буферного газа неона при относительно высоком давлении (100 Торр). Уровень резонансного поглощения ячейкой в 20 – 50 % от падающего на нее излучения свидетельствует о достаточном для индуцирования сигнала КПН количества атомов ^{87}Rb в рабочей камере.

Для формирования сигнала КПН на электрооптический модулятор (ЕОМ, см. рис. 4) подавался синусоидальный сигнал модуляции от СВЧ-генератора мощностью 10 дБм с частотой, равной половине частоты резонансного магнитонезависимого СВЧ-перехода (0–0) (6,834682 ГГц). При этом спектр модулированного по фазе излучения накачки содержал две когерентные компоненты со спектральным интервалом, равным частоте магнитонезависимого перехода (0–0) атомов рабочего вещества. Наблюдаемые сигналы КПН (рис. 6) имели

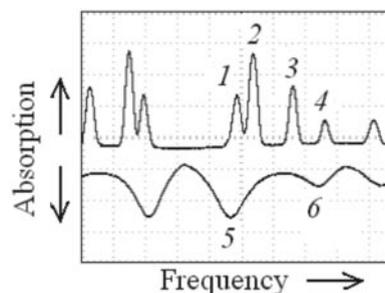


Рис. 5. Осциллограмма спектров поглощения в двух ячейках: в опорной (сверху) и рабочей (снизу). Идентификация пиков: 1, 5 – НЧ-компоненты ^{87}Rb , 4, 6 – ВЧ-компоненты ^{87}Rb ; 2, 3 – НЧ- и ВЧ-компоненты ^{85}Rb

типичную ширину линии 2 – 3 кГц при отношении сигнал/шум, равном 1500, в полосе регистрации шириной 1 Гц. Полученные экспериментальные данные позволили определить относительную кратковременную нестабильность КПН атомных часов за время измерения t (в секундах) в соответствии с формулой [13]:

$$\sigma = [(S/N)_{\text{1Hz}} \cdot Q]^{-1} t^{-1/2}, \quad (1)$$

где $(S/N)_{\text{1Hz}}$ – отношение сигнал/шум в полосе регистрации 1 Гц; Q – добротность резонанса, равная отношению частоты перехода к его ширине.

Подставляя полученные нами параметры резонансной линии в выражение (1), получим оценку относительной нестабильности частоты $\sigma = 1,4 \cdot 10^{-10} t^{-1/2}$ за время измерения t , позволяющую прогнозировать достижение нестабильности частоты за 100 с на уровне 10^{-11} , что является удовлетворительным показателем для миниатюрных КСЧ [1, 14].

Заключение

Результаты проведенных исследований параметров резонансных сигналов КПН в миниатюрной ячейке с объемом рабочей камеры 1,2 мм³, изготовленной с применением МЭМС-технологии, позволяют рекомендовать подобную методику в разработках малогабаритных КСЧ и КМОН с лазерной накачкой и относительной стабильностью частоты (КСЧ) на уровне $1,4 \cdot 10^{-10} t^{-1/2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lutwak R. Principles of atomic clocks. Tutorial of EFTF-IFCS. 2011. 141 p.
- [2] Bison G., Wynands R., Weis A. A laser-pumped magnetometer for the mapping of human cardio-magnetic fields // Applied Physics B. 2003. Vol. 76. Pp. 325–328.
- [3] Пятыхев Е.Н., Лурье М.С., Попова И.В., Казакин А.Н. Специфика технологии микромеханических устройств // Нано- и микросистемная техника. 2001. № 6. С. 32–34.
- [4] Happer W. Optical pumping // Reviews of Modern Physics. 1972. Vol. 44. Pp. 169–249.
- [5] Bloch M., Pascaru I., Stone C., McClelland T. Subminiature rubidium frequency standard for commercial applications // IEEE IFCS. 1993. Pp. 164–177.
- [6] Arimondo E., Orriols G. Non-absorbing atomic coherences by coherent 2-photon transitions in a 3-level optical pumping // Letters Nuovo Cimento. 1976. Vol. 17. Pp. 333–338.
- [7] Vanier J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review // Applied Physics B. Lasers Optics. 2005. Vol. 81. Pp. 421–442.
- [8] Knappe S. MEMS atomic clocks // Comprehensive Microsystems. 2007. Vol. 3. Pp. 571–612.
- [9] Pétremand Y., Affolderbach C., Straessle R., et al. Microfabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2012. Vol. 22. P. 025013.
- [10] Miletic D., Affolderbach C., Breschi E.,

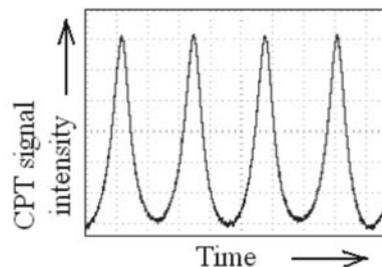


Рис. 6. Оциллограмма сигнала КПН: представлена форма резонансной линии

Расширение ассортимента используемых лазеров (например, широкополосных и относительно нестабильных, с вертикальным резонатором) требует определенной доработки рассмотренного метода изготовления ячеек. Это относится к оптимизации ее наполнения, температурного режима и режимов накачки, а также необходимости дополнительного магнитного экранирования (КСЧ) для уменьшения ориентационных и световых сдвигов и достижения максимальной долговременной стабильности частоты малогабаритных КСЧ и КМОН [15–18]. Так например, дозированное заполнение ячеек щелочным металлом позволит избежать этапа восстановления металла и улучшит качество ячеек; при этом будет исключено наличие примесей, что, в свою очередь, даст возможность уменьшить габариты ячеек при сохранении приемлемой долговременной стабильности резонансных сигналов.

et al. Fabrication and spectroscopy of Cs vapour cells with buffer gas for miniature atomic clock// Proceedings of EFTF. 2010. Pp. 1–6.

[11] **Zabrodsky V.V., Belik V.P., Aruev P.N., et al.** A study of vacuum-ultraviolet stability of silicon photodiodes // Tech. Phys. Lett. 2012. Vol. 38. No. 9. Pp. 812–815.

[12] **Артёмов А.П., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф. и др.** Временные характеристики кремниевых детекторов вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения // ПТЭ. 2015. Т. 1. С. 104–108.

[13] **Post A.B., Jau Y-Y., Kuzma N.N., et al.** End resonances for atomic clock// Proceedings of 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. 2003. Long Beach, California, USA. Pp. 445–455.

[14] **Kitching J., Knappe S., Hollberg L.** Miniature vapor-cell atomic-frequency references // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. No. 3. Pp. 553–555.

[15] **Baranov A.A., Ermak S.V., Semenov V.V.** Orientational frequency shifts of microwave 0-0 superfine resonance in 87Rb vapor with selective optical pumping // Optics and Spectroscopy. 2013. Vol. 114. No. 3. Pp. 337–339.

[16] **Semenov V.V., Zimnitskii P.V., Smolin R.V., Ermak S.V.** The effect of flicker processed on the resolution of self-oscillating magnetometers optically pumped in the saturation regime // Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40. No. 3. Pp. 271–273.

[17] **Baranov A., Ermak S., Semenov V.** Orientation light shift suppression in alkali atom microwave standards with laser pumping // Proceedings of the EFTF. 2012. Art. No. 6502336. Pp. 72–73.

[18] **Baranov A., Ermak S., Semenov V.** The orientation dependence of the SHF radio-optical resonance frequency light shift in rubidium vapors// Proceedings of the IEEE IFCS. 2011. Art. No. 5977289.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАК Сергей Викторович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
serge_ermak@mail.ru

СЕМЁНОВ Владимир Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vladimir_semenov@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич — научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
keha@newmail.ru

КОМАРЕВЦЕВ Иван Михайлович — младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vanec@aport.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
pen@mems.ru

ДАВЫДОВ Вадим Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
davydov_vadim66@mail.ru

ВЕЛИЧКО Елена Николаевна — кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
velichko-spbstu@yandex.ru

ПЕТРЕНКО Михаил Валерьевич - научный сотрудник лаборатории физической газодинамики Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
m.petrenko@mail.ioffe.ru

Ermak S.V., Semenov V.V., Piatyshev E.N., Kazakin A.N., Komarevtsev I.M., Velichko E.N., Davydov V.V., Petrenko M.V. MICROFABRICATED CELLS FOR CHIP-SCALE ATOMIC CLOCK BASED ON COHERENT POPULATION TRAPPING: FABRICATION AND INVESTIGATION.

The article is devoted to investigation of the coherent population trapping (CPT) signals in the microfabricated alkali metal vapor cell. At the first step the experimental technological setup for MEMS manufacture was assembled. The microfabricated cell was designed to realize two optical pumping schemes: the conventional one where the cell is just placed under the laser beam, and another one with double reflection of the laser beam to increase the beam path in narrow cell space). The inflation of the cell with alkali metal (^{87}Rb), buffer gas type and gas pressure were calculated preliminary. The miniature cells with alkali metal were manufactured using laser activation. To measure the CPT signals the experimental setup was used, and characteristics of CPT resonance signals were obtained. The resonance line width of 2 – 3 kHz and signal-to-noise ratio of 1500 in 1 Hz band width were found.

These parameters of the CPT resonance line can provide the frequency non-stability of the small-scale atomic clock at the level of 10^{-11} for 100 s of measuring time. The results obtained suggested several leads for future research.

LASER SPECTROSCOPY, COHERENT POPULATION TRAPPING, MEMS TECHNOLOGY, MICROFABRICATED CELL, ALKALI METAL ATOMS, ATOMIC CLOCK.

REFERENCES

- [1] **R. Lutwak**, Principles of atomic clocks. Tutorial of EFTF-IFCS. 2011.
- [2] **G. Bison, R. Wynands, A. Weis**, A laser-pumped magnetometer for the mapping of human cardio-magnetic fields, Applied Physics B. 76 (2003) 325.
- [3] **E.N. Pyatyshev, M.S. Lurie, I.V. Popova, A.N. Kazakin**, Spetsifika tekhnologii mikromekhanicheskikh ustrojstv [The peculiarities of the technology of micromechanical devices], Journal of Nano and Microsystem Technique. 6 (2001) 32–34.
- [4] **W. Happer**, Optical Pumping, Reviews of Modern Physics. 44 (1972) 169–249.
- [5] **M. Bloch, I. Pascaru, C. Stone, T. McClelland**, Subminiature rubidium frequency standard for commercial applications, IEEE IFCS. (1993) 164–177.
- [6] **E. Arimondo, G. Orriols**, Non-absorbing atomic coherences by coherent 2-photon transitions in a 3-level opticalpumping, Letters Nuovo Cimento. 17 (1976) 333–338.
- [7] **J. Vanier**, Atomic clocks based on coherent population trapping: a review, Applied Physics B. Lasers Optics. 81 (2005) 421–442.
- [8] **S. Knappe**, MEMS Atomic Clocks, Comprehensive Microsystems. 3 (2007) 571–612.
- [9] **Y. Pétremand, C. Affolderbach, R. Straessle, et al.**, Microfabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications, Journal of Micromechanics and Microengineering. 22 (2012) 025013.
- [10] **D. Miletic, C. Affolderbach, E. Breschi, et al.**, Fabrication and spectroscopy of Cs vapour cells with buffer gas for miniature atomic clock, Proceedings of EFTF, 2010.
- [11] **V.V. Zabrodsky, V.P. Belik, P.N. Aruev, et al.**, A study of vacuum-ultraviolet stability of silicon photodiodes, Tech. Phys. Lett. 38 (9) (2012) 812–815.
- [12] **A.P. Artyomov, S.A. E.Kh. Baksht, V.F. Tarasenko, et al.**, Vremennyye kharakteristiki kremnievykh detektorov vakuumnogo ul'trafiolietovogo i myagkogo rentgenovskogo izlucheniya [Temporal characteristics of silicon detectors of vacuum ultraviolet and soft X-rays], ПТЭ. 1 (2015) 104–108.
- [13] **A.B. Post, Y-Y. Jau, N.N. Kuzma, et al.**, End resonances for atomic clock, Proceedings of 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. 2003. Long

Beach, California, USA, pp. 445–455.

[14] **J. Kitching, S. Knappe, L. Hollberg**, Miniature vapor-cell atomic-frequency references, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 553–555.

[15] **A.A. Baranov, S.V. Ermak, V.V. Semenov**, Orientational frequency shifts of microwave 0-0 superfine resonance in 87Rb vapor with selective optical pumping, *Optics and Spectroscopy.* 114 (3) (2013) 337–339.

[16] **V.V. Semenov, P.V. Zimnitskii, R.V. Smolin, S.V. Ermak**, The effect of flicker processed on the resolution of self-oscillating magnetometers optically

pumped in the saturation regime, *Technical Physics Letters.* 40 (3) (2014) 271–273.

[17] **A.A. Baranov, S.V. Ermak, V.V. Semenov**, Orientation light shift suppression in alkali atom microwave standards with laser pumping, *Proceedings of the EFTF.* Art. no. 6502336 (2012) 72–73.

[18] **A.A. Baranov, S.V. Ermak, V.V. Semenov**, The orientation dependence of the SHF radio-optical resonance frequency light shift in rubidium vapors, *Proceedings of the IEEE IFCS.* Art. no. 5977289 (2011).

THE AUTHORS

ERMAK Sergey V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
serge_ermak@mail.ru

SEMENOV Vladimir V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
vladimir_semenov@mail.ru

PIATYSHEV Evgenii N.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
pen@mems.ru

KAZAKIN Aleksey N.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
keha@newmail.ru

KOMAREVTSEV Ivan M.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
vanec@aport.ru

VELICHKO Elena N.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
velichko-spbstu@yandex.ru

DAVYDOV Vadim V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 195251, Russian Federation
davydov_vadim66@mail.ru

PETRENKO Mikhail V.

Ioffe Physical-Technical Institute

26 Politekhnikeskaya St., Petersburg, 194021, Russian Federation
m.petrenko@mail.ioffe.ru