

УДК 531.715

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ  
ЧАСТОТЫ НА РУБИДИЕВОЙ ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКЕ С  
ИМПУЛЬСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ И  
МИКРОВОЛНОВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПО  
СХЕМЕ РЭМСИ****В.Н. Барышев, Д.С. Купалов, А.В. Новосёлов, М.С. Алейников,  
А.И. Бойко, В.Г. Пальчиков, И.Ю. Блинов***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
e-mail: baryshev@vniiftri.ru*

*Представлены первые результаты экспериментального исследования метода импульсной оптической накачки с целью создания малогабаритного квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке, сравнимого по уровню стабильности с пассивными водородными генераторами.*

*First results of an experimental study of the method of the impulsive optically pumped gas cell with the aim to create a small-dimensioned quantum frequency standard on a rubidium gas cell, comparable in stability with passive hydrogen generators are described in the article.*

*Ключевые слова: стандарт частоты, рубидиевая газовая ячейка, схема Рэмси*

Современное поколение квантовых стандартов частоты (за исключением водородных генераторов) невозможно представить без применения лазеров. В ряду лазеров особое положение занимают полупроводниковые, диодные лазеры - компактные источники когерентного излучения в широком спектральном диапазоне. Диодные лазеры удобны при создании малогабаритных и перевозимых стандартов частоты, в частности, атомных часов на газовых ячейках с оптической накачкой. Сегодня преимущество накачки атомных состояний когерентным узкополосным (с шириной спектра, меньшей естественной ширины атомного оптического перехода) лазерным излучением по сравнению с широкополосной ламповой накачкой, выражающееся в заметном улучшении метрологических характеристик стандартов частоты на газовых ячейках, стало очевидным [1, 2]. Хотя существующие рубидиевые стандарты частоты, разработанные по технологии двойного радио-оптического резонанса в ячейке с ламповой накачкой, демонстрируют удовлетворительные характеристики и высокую надежность в бортовом и наземном вариантах их эксплуатации, в последнее время было предложено несколько схем построения атомных часов на газовых ячейках с диодной лазерной накачкой (атомные часы с импульсной оптической накачкой, ИОН), позволяющих значительно повысить стабильность часов на газовых ячейках до уровня стабильности пассивного водородного стандарта частоты или даже выше этого уровня: несколько единиц  $10^{-13}$  и  $10^{-15}$  знака на интервалах усреднения 1 с и  $10^4$  с соответственно [3, 4, 5, 6, 7]. При этом габариты,

вес и энергопотребление таких часов могут быть заметно уменьшены по сравнению с этими характеристиками существующих рубидиевых стандартов частоты и пассивных водородных стандартов частоты, что делает привлекательным их применение в радионавигационных системах, а также в целях синхронизации телекоммуникационных сетей, локальных шкал времени, включая бортовые.

Известно, что основным источником нестабильности атомных часов с оптической накачкой и непрерывным опросом микроволнового часового перехода, будь то традиционные часы на двойном радио-оптическом резонансе или новое поколение часов на КПН (когерентное пленение населенностей) эффекте, является световой сдвиг частоты часового перехода вследствие динамического эффекта Штарка. Главное преимущество стандартов частоты на газовой ячейке с импульсной оптической накачкой определяется тем, что атомы совершают часовой микроволновый переход при отсутствии оптического излучения в ячейке, что приводит к существенному подавлению светового сдвига. Кроме того, техника микроволнового возбуждения по схеме Рэмси позволяет получать часовой сигнал с очень узкой шириной линии (порядка 100-200 Гц), которая нечувствительна к вариациям таких параметров, как мощность опросного СВЧ сигнала и интенсивность лазерного излучения, что также способствует повышению стабильности часов. При оптическом детектировании часового сигнала отношение сигнал/шум в таких стандартах частоты может достигать значений, превышающих 20000. При таких значениях ширины линий и отношениях сигнал/шум дробовые шумы фотодетектирования часового сигнала устанавливают предельный теоретический уровень нестабильности частоты, выраженный в терминах девиации Аллана, в несколько единиц  $10^{-14} \tau^{-1/2}$  [5, 6].

Идея разработки малогабаритного квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой является новой и никем до настоящего времени не предложенной в нашей стране.

В этом кратком сообщении представлены первые результаты экспериментального исследования метода импульсной оптической накачки и возбуждения по схеме Рэмси с целью создания малогабаритного квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке, сравнимого по уровню стабильности с пассивными водородными стандартами частоты.

В работе атомных часов на газовых ячейках с оптической накачкой можно выделить три фазы, происходящие одновременно:

- оптическая накачка, при которой происходит инверсия населенности атомных состояний на какой-либо сверхтонкий уровень основного состояния атома. При этом газовая среда становится прозрачной для оптического излучения.

- микроволновое возбуждение СВЧ сигналом, полученным от кварцевого

генератора, в результате которого атомы совершают переход на опустошенный сверхтонкий уровень, и среда теряет свою прозрачность;

- детектирование сигнала поглощения света атомами, совершившими микроволновый переход, который используется как сигнал частотной подстройки кварцевого генератора.

Основным недостатком таких часов с непрерывной лазерной оптической накачкой является сильная зависимость кратковременной стабильности частоты часового перехода от стабильности интенсивности и частоты лазерного излучения вследствие эффекта светового сдвига. Чтобы решить эту проблему, недавно в работе группы исследователей из Итальянского национального института метрологических исследований (INRIM) [4] была предложена альтернативная схема возбуждения, основанная на технике импульсной оптической накачки (ИОН). Эта техника заключается в разделении во времени трех фаз работы: накачки, СВЧ опроса и детектирования. Взаимное влияние различных сигналов минимизировано, и часовой переход происходит тогда, когда лазерное излучение в ячейке отсутствует, что приводит к существенному подавлению светового сдвига. В работе [5] показано, что частотная нестабильность лабораторного варианта малогабаритного стандарта частоты на Rb ячейке со смесью буферного газа с ИОН и импульсным микроволновым возбуждением по схеме Рэмси составила величины  $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  и  $\sim 2 \cdot 10^{-15}$  на интервалах усреднения 1 с и  $10^4$  с с суточным дрейфом частоты ниже уровня  $1 \cdot 10^{-14}$ .

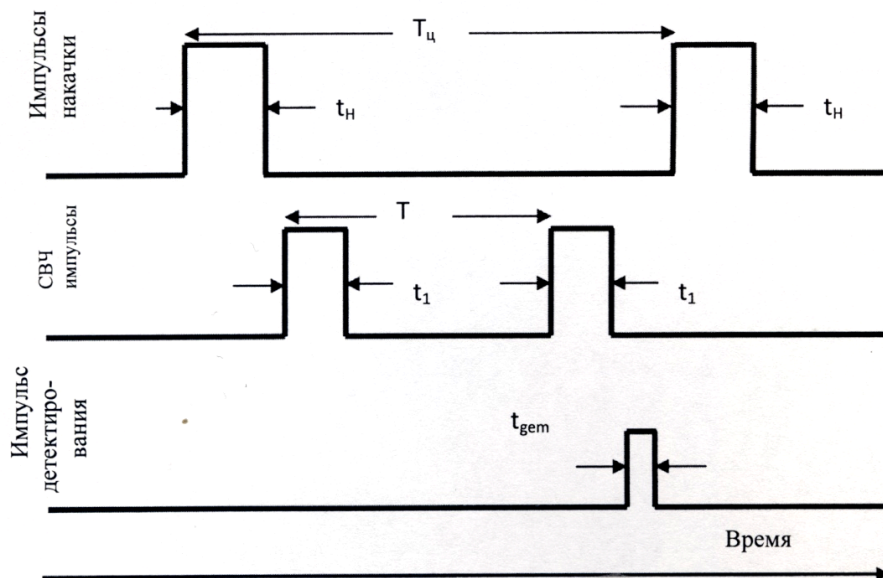


Рис. 1. Временная последовательность импульсов накачки, микроволновых импульсов и импульсов детектирования

Сама идея построения квантовых часов на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой проста и понятна в технологическом смысле разработчикам квантовых стандартов частоты фонтанного типа в ФГУП «ВНИИФТРИ», поскольку физика и техника детектирования часовых переходов в газовой ячейке по схеме Рэмси и в стандарте частоты фонтанного типа, являющемся, по сути стандартом частоты с оптической накачкой и оптическим детектированием, схожи [8]. В технике ИОН (рис. 1) интенсивный импульс лазерного излучения длительностью  $t_n$  осуществляет оптическую накачку. Почти сразу по окончании импульса накачки атомы опрашиваются двумя СВЧ импульсами одной и той же частоты (6,834 ГГц), мощности и продолжительности  $t_1$ , разделенными по времени на  $T \gg t_1$  (схема Рэмси). Детектирование линии Рэмси производится очень коротким  $t_{det}$  и низко интенсивным световым импульсом сразу после окончания второго СВЧ импульса. Ширина центрального пика зависит только от величины  $1/T$  и не зависит от лазерной или микроволновой мощности.

На созданном недавно во ВНИИФТРИ лабораторном стенде были проведены первые экспериментальные исследования метода импульсной оптической накачки и возбуждения по схеме Рэмси в экспериментальной конфигурации, близкой к использовавшейся в работах [5, 6]. Исследования проводились на  $^{87}\text{Rb}$  рубидиевой ячейке со смесью Ar-Ne буферного газа и СВЧ-резонаторе, которые ранее устанавливались в промышленных рубидиевых стандартах частоты с ламповой накачкой Ч1-69, производимых ФГУП ННИПИ «Кварц», Нижний Новгород. Линия Рэмси шириной 200 Гц, полученная при свипировании частоты генератора сигналов E8257D, Keysight Technologies около частоты часового перехода, показана на рис. 2. Спектральная плотность мощности случайных отклонений фазы 6.834 ГГц сигнала генератора составляет – 80 дБ/Гц и – 99 дБ/Гц при отстройке от несущей на 100 Гц и 1кГц соответственно. Время свипирования составляло 1 секунду. Усреднение по циклам не производилось. Длительность одного цикла измерений  $T_{\text{ц}} \sim 5$  мс. Мощность СВЧ сигнала, запитывавшего СВЧ резонатор, составляла 5 дБм. Ширина спектра излучения диодного лазера с внешним резонатором на дифракционной решетке была менее 1 МГц.

Контраст центрального пика составлял в зависимости от параметров накачки и детектирования 20 – 30%, что близко к значениям контраста, приведенным в [5], и работе группы исследователей из Университета г. Невшатель [6]. Экспериментально исследовалась зависимость величины контраста центрального пика линии Рэмси от длительности и интенсивности импульсов накачки и детектирования. Зависимости контраста центрального пика линии Рэмси от мощности управляющего 80 МГц сигнала, подаваемого на акустооптический модулятор (АОМ), формирующий импульсы накачки и детектирования, показаны на рис. 3 и 4. Увеличение мощности управляюще-

---

*Альманах современной метрологии, 2016, №8*

го сигнала приводит к увеличению интенсивности импульсов накачки и детектирования, образуемых дифрагированным АОМ излучением.

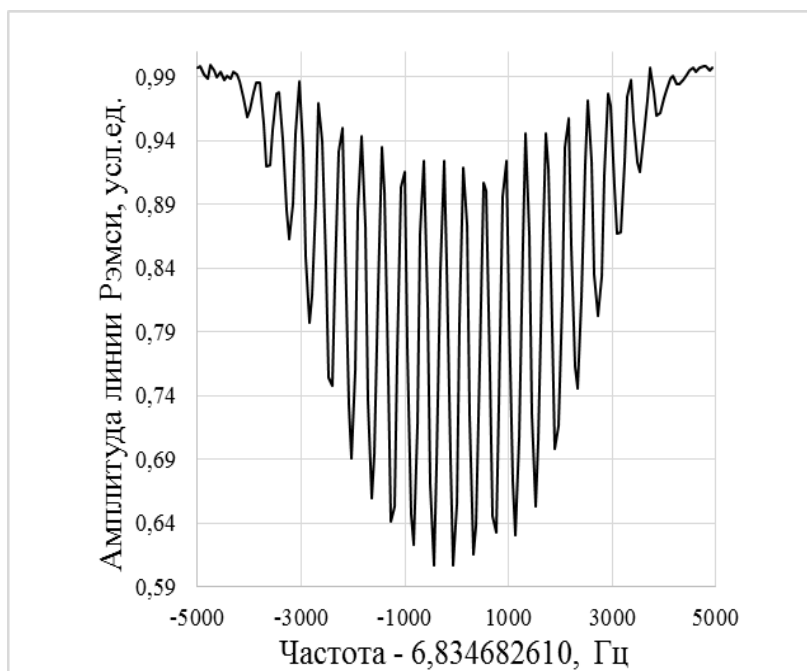


Рис. 2. Линия Рэмси. Ширина центрального пика 200 Гц

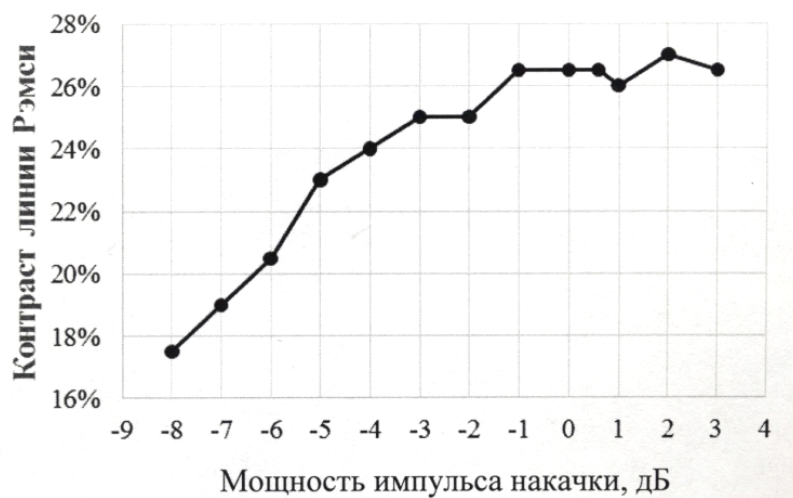


Рис. 3. Зависимость контраста центрального пика линии Рэмси от мощности импульса управляющего АОМ сигнала («импульса накачки»)

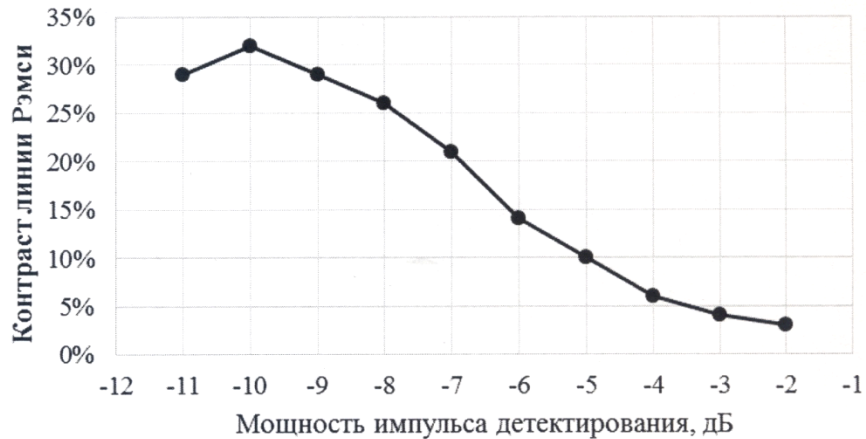


Рис. 4. Зависимость контраста центрального пика линии Рэмси от мощности импульса управляющего АОМ сигнала («импульса детектирования»)

Таким образом, после проведения первых экспериментов на лабораторном стенде мы можем описать существующие принципы и технологии, которые могут быть применены при реализации проекта по созданию малогабаритного квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой.

Оптическая накачка атомов и детектирование часового перехода производятся излучением полупроводниковых диодных лазеров. Принимая в расчет минимизацию габаритов стандарта частоты, оптимальным решением являлось бы использование диодных лазеров с распределенной обратной связью или распределенным Брэгговским отражением (лазеры типа DFB или DBR) с шириной спектра излучения порядка 1 МГц. Однако лазеры такого типа в стране промышленно не производятся.

Процедура накачки и детектирования имеет импульсный характер. Импульсы и их параметры формируются и контролируются акустооптическим модулятором в конфигурации двойного прохода. Создаваемый во ВНИИФТРИ специально для этих целей компактный акустооптический модулятор в конфигурации единственного прохода позволит заметно уменьшить габариты узла формирования импульсов накачки и детектирования.

Ячейка с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$ , помещенная в цилиндрический резонатор с модой  $\text{TE}_{011}$  и с умеренной добротностью  $\sim 1000$ , содержит двухкомпонентную смесь буферного газа для целей компенсации столкновительного сдвига частоты часового перехода и увеличения времени локализации атомов в лазерном луче. Резонатор с ячейкой помещается внутрь соленоида, создающего продольное по оси резонатора  $S$  - магнитное поле для снятия выро-

ждения по магнитным квантовым состояниям. Физическая часть экранирована от внешних магнитных полей и термостатирована.

Микроволновый опрос часового перехода производится двумя, разнесенными во времени СВЧ-импульсами по схеме возбуждения Рэмси. Фазовые шумы синтезатора 6,834 ГГц частоты не должны привносить вклад в нестабильность стандарта частоты выше уровня  $1 \cdot 10^{-13}/(\tau)^{1/2}$ .

Нужно заметить, что над решением проблемы повышения стабильности компактных атомных часов с целью применения их в качестве синхронизирующих устройств, в том числе бортового применения, в настоящее время работает большое число исследовательских групп по всему миру. В качестве альтернативного варианта квантовых часов с ИОН можно рассматривать часы на медленных атомах, предлагаемые в [3] и построенные, фактически, по тому же принципу импульсной оптической накачки по схеме Рэмси. Однако такие часы будут иметь большие габариты. И бортовое применение их вызывает вопросы, поскольку поведение облака охлажденных атомов в условиях пониженной гравитации не изучено. Другой альтернативный вариант – это квантовые часы с КРН-импульсным возбуждением [7]. Однако здесь исследователю неизбежно придется решать проблему светового сдвига, вариации которого приводят к деградации стабильности часов.

Выбор решения задачи создания малогабаритного стандарта частоты на газовой ячейке с импульсной оптической накачкой в нашем случае, помимо преимуществ, связанных с принципом работы таких часов (существенное подавление светового сдвига), вызван также уже продемонстрированной высокой воспроизводимостью результатов, как это показано в работах независимых групп из Итальянского национального института метрологических исследований (INRIM) [5] и Университета г. Невшатель, Швейцария [6], а также в предварительных исследованиях, выполненных во ВНИИФТРИ.

Суммируя, можно сказать, что компактный квантовый стандарт частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой и микроволновым возбуждением по схеме Рэмси имеет ряд значительных преимуществ перед существующими рубидиевыми квантовыми стандартами частоты с непрерывной ламповой оптической накачкой и потенциально позволяет достичь стабильности, сравнимой по уровню со стабильностью современных пассивных водородных стандартов частоты.

### Литература

1. Camparo J. C. and Coffey J. G. Conversion of laser phase noise to amplitude noise in a resonant atomic vapor: The role of laser linewidth // *Phys. Rev., A*, 1999, v. 59, p. 728-735.

2. Beverini N., Ortolano M., Costanzo G.A., De Marchi A., Maccioni E., Marsili P., Ruffini A., Periale F., and Barychev V. Cs cell atomic clock optically pumped by a diode laser // *Laser Physics*, 2001, v.11. № 10, p. 1110-1116.
3. Esnault F-X., Holleville D., Rossetto N., Guerandel S. and Dimarcq N. High-stability compact atomic clock based on isotropic laser cooling // *Phys. Rev., A*, 2010, v. 82, p. 033436-(1-5).
4. Micalizio S., Godone A., Levi F. and Calosso C. Pulsed optically pumped <sup>87</sup>Rb vapor cell frequency standard: A multilevel approach // *Phys. Rev., A*, 2009, v. 79, p. 013403-(1-19).
5. Micalizio S., Calosso C., Godone A. and Levi F. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection // *Metrologia*, 2012, v. 49, p. 425-436.
6. Kang S., Gharavipour M., Afolderbach C., Gruet F. and Miletì G. Demonstration of a high-performance pulsed optically pumped Rb clock based on a compact magnetron-type microwave cavity // *J. Appl. Phys*, 2015, v. 117, p. 104510.
7. Zanon T. et al. High Contrast Ramsey Fringes with Coherent-Population-Trapping Pulses in a Double Lambda Atomic System // *Phys. Rev. Lett*, 2005, v. 94, p. 193002-(1-4).
8. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Елкин Г.А., Новоселов А.В., Копылов Л.Н., Купалов Д.С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // *Измерительная техника*, 2012, №10, с. 26-30.