

Рубидиевый стандарт частоты с импульсной лазерной накачкой: состояние и перспективы

© С. А. Волков, Г. В. Герасимов, Н. О. Майкапар, Д. С. Сидоренков

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

В статье представлен созданный в АО «РИРВ» макет квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной лазерной накачкой. Авторами предложено краткое описание основных принципов работы стандарта частоты с импульсной накачкой и рассмотрены особенности конструкции квантового дискриминатора стандарта частоты.

По результатам измерений характеристики квантового дискриминатора сопоставимы с лучшими зарубежными аналогами. Получена нестабильность выходного сигнала стандарта частоты на уровне $\sigma_y(\tau) \leq 6 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ на временном интервале измерения (500... 2000 с).

Ключевые слова: стандарт частоты, импульсная оптическая накачка, рубидиевая ячейка, нестабильность частоты, лазерный диод.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.49.17-22>

Введение

Традиционные квантовые стандарты частоты (КСЧ) на рубидиевой газовой ячейке (РГЯ) практически достигли своих теоретических пределов — их суточная нестабильность частоты находится в области 10^{-13} – 10^{-14} .

Перспективным путём развития КСЧ на РГЯ является применение в квантовом дискриминаторе (КД) вместо спектральной лампы лазерного излучателя. При этом за счет повышения эффективности накачки и устранения влияния нерезонансного света можно на порядок увеличить параметр качества КД. Также при использовании лазерного излучателя значительно упрощается реализация импульсного режима работы КСЧ. Импульсный режим позволяет в несколько раз уменьшить ширину линии поглощения и частично подавить световые сдвиги. Теоретически импульсный режим работы стандарта позволяет достигнуть суточной нестабильности частоты на уровне $1 \cdot 10^{-15}$.

В АО «РИРВ» разработан и изготовлен макет квантового стандарта частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной лазерной накачкой (КСЧ-РГЯ-ИЛН). Ниже представлены результаты работы по исследованию характеристик макета КСЧ-РГЯ-ИЛН.

Принцип работы стандарта частоты

В основе работы КСЧ-РГЯ-ИЛН лежит временное разделение процессов взаимодействия света с атомами рубидия в газовой ячейке и взаимодействия атомов с СВЧ-полем, что теоретически позволяет исключить влияние эффекта Штарка (так называемого «светового сдвига частоты») на долговременную стабильность частоты. Также в КСЧ-РГЯ-ИЛН применяется схема опроса

(детектирования) атомных состояний по методу Рэмси с разделением СВЧ-взаимодействия на два импульса, с введением между ними интервала свободной эволюции атомных состояний, благодаря чему достигается существенное сужение ширины резонансной линии двойного радиооптического резонанса. Опрос атомов рубидия по частотной зависимости линейного поглощения вблизи часового перехода приводит к появлению сигнала ошибки дисперсионного вида. Детектирование при этом осуществляется в режиме слабого сигнала, когда мощность света в окне детектирования существенно ниже по сравнению с мощностью света накачки.

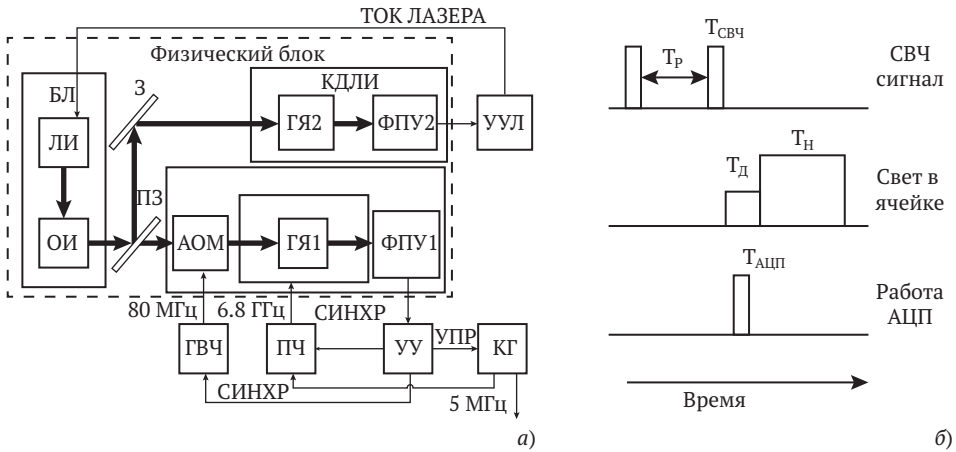


Рис. 1. а) Структурная схема КСЧ-РГЯ-ИЛН:

АОМ — акустооптический модулятор, БЛ — блок лазера, ГВЧ — генератор высокой частоты, ГЯ — газовая ячейка, З — зеркало, КГ — кварцевый генератор, КДКГ — квантовый дискриминатор кварцевого генератора, КДЛИ — квантовый дискриминатор лазерного излучателя, ЛИ — лазерный излучатель, ОИ — оптический изолятор, ПЗ — полупрозрачное зеркало, ПЧ — преобразователь частоты, СИНХР — синхронизация, ФПУ — фотоприёмное устройство, УУ — устройство управления, УУЛ — устройство управления лазером, УПР — управление;

б) Циклограмма режима работы КСЧ-РГЯ-ИЛН:

T_p — время Рэмси 3 мс, $T_{СВЧ}$ — длительность СВЧ-импульсов 0.4 мс, T_d — время оптического детектирования 0.7 мс, T_n — время оптической накачки 11 мс, $T_{АЦП}$ — время измерения сигнала ошибки с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 0.6 мс

На основе анализа сигнала ошибки контроллер устройства управления производит поправку частоты сигнала кварцевого генератора (КГ), который является выходным сигналом КСЧ. Кольцо подстройки частоты КСЧ замыкается преобразователем частоты, преобразующим выходную частоту 5 МГц от КГ в СВЧ-сигнал с частотой атомного перехода ^{87}Rb 6.834 ГГц. На рис. 1 а приведена структурная схема КСЧ-РГЯ-ИЛН. Временная диаграмма работы КСЧ, показанная на рис. 1 б, задаётся устройством управления. Длительность импульсов подбиралась экспериментально.

Физический блок

Физический блок КСЧ объединяет в единой конструкции блок лазерного излучателя и два дискриминатора — дискриминатор системы стабилизации частоты излучения лазерного излучателя и дискриминатор подстройки частоты кварцевого генератора. В разработанном дискриминаторе подстройки частоты кварцевого генератора достигнуто высокое значение однородности распределения СВЧ-поля в объеме газовой ячейки за счёт разработки нового резонатора магнетронного типа. Коэффициент ориентации магнитной составляющей СВЧ-поля составил 97 % (см. рис. 2).

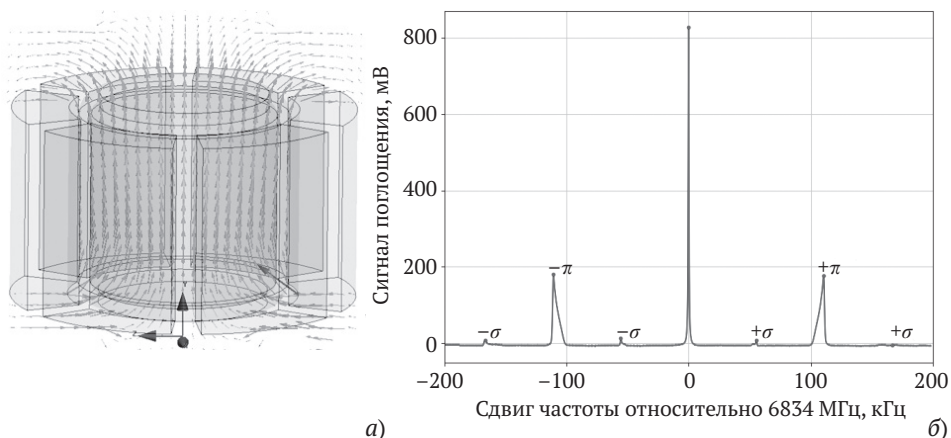


Рис. 2. а) Распределение магнитной составляющей СВЧ-поля в резонаторе, расчетный коэффициент ориентации поля 93 %;
б) спектр переходов Зеемана, при сканировании частоты СВЧ-сигнала; коэффициент ориентации поля 97 %

В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер на частоте 780 нм с объемной Брэгговской решёткой S1-0780-100 фирмы Sacher Lasertechink. Данный лазер проработал в КСЧ-РГЯ-ИЛН в течение трёх лет без изменения характеристик.

Газовая рубидиевая ячейка диаметром 20 мм и длиной 20 мм была заполнена смесью $\text{Ar}+\text{N}_2$ при общем давлении 24 торр. За счет использования в оптической схеме дискриминатора подстройки частоты кварцевого генератора пространственного фильтра получен контраст «on/off» по импульсу света накачки 47 дБ. При мощности света накачки 3.3 мВт и мощности света в окне детектирования 80 мкВт получен контраст полос Рэмси 41.6 % при ширине центральной линии 150 Гц (рис. 3а). Это сопоставимо с характеристиками лучших образцов, представленных в публикациях [1, 2].

Измерение зависимости амплитуды и контраста центральной полосы от температуры (рис. 3б) показало, что оптимальным для работы стандарта является диапазон температуры ячейки 50...52 °С. Но как показывают расчеты [3], указанный диапазон не оптимален с точки зрения минимизации температурного коэффициента частоты. В дальнейшем авторами предполагается использование рубидиевой ячейки с другим составом смеси буферных газов.

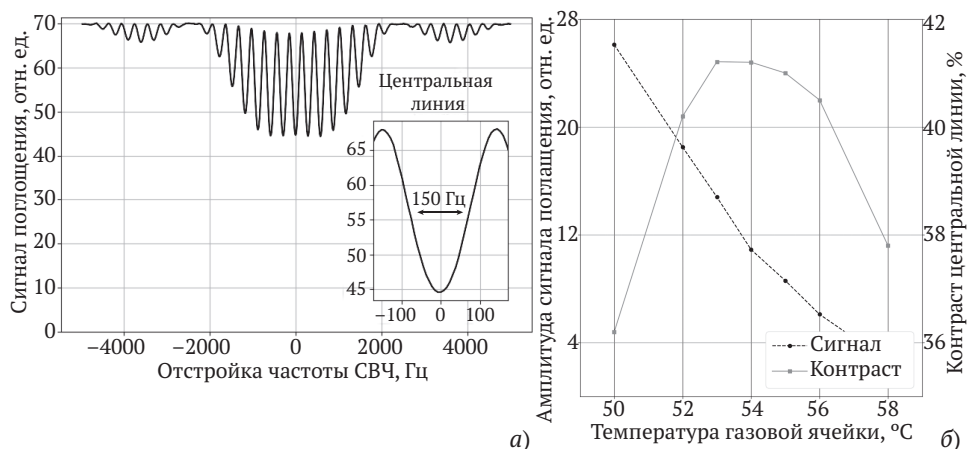


Рис. 3. а) Оптический сигнал поглощения при отстройке частоты (полосы Рэмси);
 б) Зависимость амплитуды и контраста центральной полосы Рэмси от температуры ячейки

Для стабилизации частоты излучения лазерного источника часть света в физическом блоке отводится в квантовый дискриминатор лазерного излучателя, представляющий собой модуль спектроскопии насыщенного поглощения. Излучение лазера стабилизируется по перекрестному переходу $F_g = 2 \rightarrow F_e = 1.3$. При таком выборе стабилизирующего резонанса частота излучения накачки попадает в максимум линии поглощения рабочей ячейки с ошибкой не более 2 МГц. Для получения сигнала ошибки в системе автоматической подстройки частоты лазера, излучение ЛИ модулируется на частоте 10 кГц. Сигнал ошибки, полученный с помощью фазового детектора, обрабатывается контроллером устройства управления лазером, которое вносит необходимую поправку в ток лазера.

Нестабильность частоты КСЧ

Для достижения средне- и долговременной нестабильности КСЧ-РГЯ-ИЛН авторами предпринят комплекс мер:

- разработан термостат газовой ячейки, обеспечивающий нестабильность температуры внутри не более $7 \cdot 10^{-4}$ К в условиях изменения температуры окружающей среды в пределах 2.5 °C;

- введена автоматическая подстройка мощности СВЧ-сигнала к оптимальному значению амплитуды $\pi/2$ импульса по сигналу ошибки с квантового дискриминатора;

- в качестве источника света использован лазерный излучатель с объемной Брэгговской решеткой на частоте 780 нм с шириной линии менее 700 кГц;

- для уменьшения влияния внешних воздействий на частоту лазерный излучатель помещен в отдельный термостат со стабильностью поддержания температуры лучше 1 мК;

- для точной стабилизации частоты лазерного излучения в виде составной части дискриминатора в макете изготовлен модуль спектроскопии насы-

щенного поглощения; оптимизирована работа системы подстройки частоты лазера.

Измерение стабильности частоты излучения лазера методом гетеродирования показало, что относительная нестабильность его частоты не хуже $1 \cdot 10^{-11}$ за 1 с.

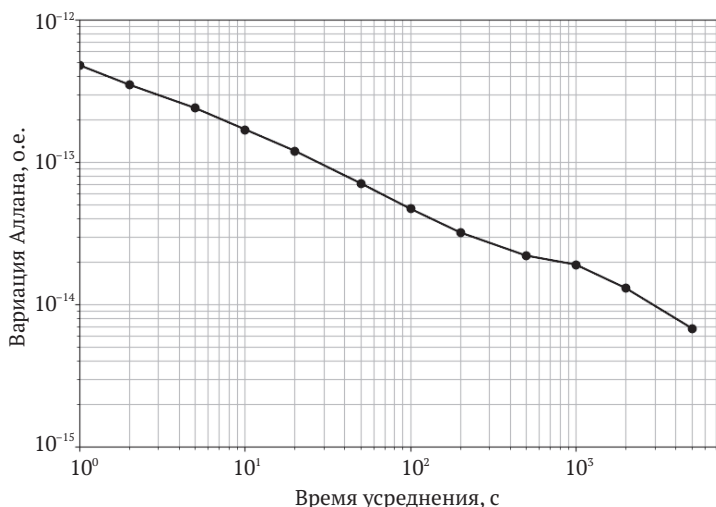


Рис. 4. Вариация Аллана выходного сигнала макета КСЧ-РГЯ-ИЛН

Полученные параметры физического блока обеспечивают кратковременную стабильность частоты макета стандарта $\sigma_y(\tau) \leq 6 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ на временах усреднения до 500...2 000 с (рис. 4). На более длительных интервалах измерений сказывается влияние внешних условий, таких как давление и температура.

Заключение

На текущий момент создан и проходит исследования полномасштабный макет рубидиевого стандарта частоты с импульсной лазерной накачкой и детектированием.

Габариты макета 300 x 300 x 150 мм, вес макета менее 12 кг, потребляемая мощность в установившемся режиме менее 30 Вт.

Измеренные характеристики физического блока макета КСЧ сопоставимы с лучшими зарубежными аналогами [1, 2]. На временных интервалах измерения до 500...2 000 с выполняется закон $\sigma_y(\tau) \leq 6 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$. Если рассматривать измерения при стабильных внешних условиях, то виден потенциал КСЧ-РГЯ-ИЛН в достижении суточной нестабильности на уровне $(1...5) \cdot 10^{-15}$.

В ближайших планах — улучшение модуля спектроскопии для автоматической подстройки частоты лазера, замена газовой ячейки на аналог с меньшим температурным коэффициентом частоты и дальнейшие исследования возможности улучшения долговременной стабильности КСЧ-РГЯ-ИЛН.

Литература

1. Micalizio S., Levi F., Godone A., Calosso C., François B., Boudot R., Affolderbach C., Kang S., Gharavipour M., Gruet F., Mileti G. Pulsed Optically Pumped Rb clock // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 723, no. 012015. — P. 1–6.

2. Kang S., Gharavipour M., Affolderbach C., Gruet F., Mileti G. Demonstration of a high-performance pulsed optically pumped Rb clock based on a compact magnetron-type microwave cavity // Journal of Applied Physics. — 2015. — Vol. 117, no. 104510–1/5. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4914493/>.

3. Жолнеров В. С. Буферные смеси для газовой ячейки стандарта частоты с оптической накачкой // Оптика и спектроскопия. — 1977. — Том 43. — Вып. 5.

Rubidium Clock with Pulsed Laser Pumping: State and Prospects

S. A. Volkov, G. V. Gerasimov, N. O. Maikapar, D. S. Sidorenkov

A model of a rubidium atomic clock with pulsed optical pumping (POP) was developed and manufactured at JSC “RIRT”. The first part of the article provides a description of the basic principles of POP clock operation. The second part of the article describes the main design features of a clock physical package. It consists of three parts: laser module, laser quantum discriminator and crystal oscillator quantum discriminator. Laser module is a thermostat with laser diode and optical isolator. Laser quantum discriminator contains optical scheme of saturated absorption spectroscopy with ^{87}Rb vapor cell. Crystal oscillator quantum discriminator contains ^{87}Rb vapor cell, located in thermostat with microwave cavity. Developed magnetron-type cavity has high homogeneity of the microwave field distribution in cell volume (field orientation factor 97 %). Optical scheme with acousto-optic modulator provides high optical pumping pulse contrast 47 dB. With this physical package, contrast of central fringe of the Ramsey signal 41.6 % and linewidth 150 Hz were observed. This is comparable to the characteristics of the best Rb POP clock samples presented in publications.

The third part of the article is about middle and long term stability of the POP clock model. We provide brief description of clock optimization to achieve high stability on middle term. Current results show stability $\sigma_y(\tau) \leq 6 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ on the measure time up to 500...2000 s. For longer periods of time clock stability is now limited by environment condition. Our current work directed to eliminate this impact. Without it we can predict stability at the level of $(1 \div 5) \cdot 10^{-15} / \text{day}$.

Keywords: frequency standart, pulsed optical pumping, rubidium clock, frequency stability, diode lasers, atomic spectroscopy, laser pumping.