*ЛАЗЕРНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ*

# Сравнение полевых сдвигов в атомных часах на основе эффекта когерентного пленения населенностей в атомах $^{87}$Rb при модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц

**С.М.Игнатович, М.Н.Скворцов, И.С.Месензова, Н.Л.Квашнин, В.И.Вишняков, Д.В.Бражников, С.Н.Багаев**

*Представлены результаты экспериментального сравнения параметров резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) для линии D1 в $^{87}$Rb и световых сдвигов при модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц. Рассмотрена воспроизводимость параметров лазера с вертикальным резогатором, необходимых для получения долговременной стабильности атомных часов. Полученные нестабильности атомных КПН-часов за 1 с составили 1.2 × $10^{-11}$ для частоты 3.4 ГГц и 3 × $10^{-12}$ для 6.8 ГГц.*

***Ключевые слова:*** *когерентное пленение населенностей, атомные часы, $^{87}$Rb, модуляция тока накачки лазера.*

## 1. Введение

Резонанс когерентного пленения населенностей (КПН) в щелочных атомах широко используется для создания миниатюрных атомных часов [1–3]. Технология КПН позволяет существенно уменьшить размер, необходимую мощность и стоимость атомных часов [4–8]. Во многих КПН-часах применяется лазер с вертикальным резонатором (ЛВР, VCSEL) [9], ток накачки которого модулируется генератором с частотой, равной половине частоты сверхтонкого расщепления основного атомного состояния. Вследствие этой модуляции в одночастотном режиме генерации возникают дополнительные спектральные компоненты – боковые полосы. Две боковые полосы первого порядка используются для возбуждения КПН-резонанса по двухфотонной Λ-схеме. Поскольку частота модуляции равна половине частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома, составляющей 6.8 ГГц для линии D1 в $^{87}$Rb, то модуляция нужна на частоте 3.4 ГГц. Указанную частоту модуляции использует большинство исследовательских групп. Другой вид модуляции – это модуляция, при которой ток накачки лазера модулируется с частотой, равной частоте сверхтонкого расщепления основного состояния атома (6.8 ГГц) [10, 11]. При такой модуляции для возбуждения КПН-резонанса по двухфотонной Λ-схеме используются несущая и одна из первых боковых полос излучения. Возможно получение КПН-резонанса и при других частотах модуляции тока накачки лазера, кратных частоте сверхтонкого расщепления основного атомного состояния. Однако при увеличении кратности возрастает число боковых полос, амплитуды спектральных компонент, участвующих в двухфотонной Λ-схеме, снижаются, а остальные компоненты формируют «подложку», уменьшая контраст резонанса и увеличивая шумы оптического излучения.

Краткосрочная стабильность любых атомных часов обратно пропорциональна ширине резонанса и пропорциональна отношению сигнал/шум, определяемому контрастностью резонанса и шумами оптического излучения. Долговременная стабильность определяется различными частотными сдвигами. Зависимость сдвигов частоты исследуется от таких рабочих параметров, как интенсивность света, мощность СВЧ сигнала, модулирующего ток накачки лазера, оптическая отстройка от частоты оптического перехода, температура поглощающей ячейки, давление буферного газа в ячейке и внешнее магнитное поле.

В настоящей работе приведены результаты исследования параметров резонанса КПН и световых сдвигов для случаев модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц при наблюдении КПН-резонанса в $^{87}$Rb для линии D1.

## 2. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки (рис.1) включает в себя ЛВР, работающий на длине волны 795 нм, соответствующей D1-линии $^{87}$Rb. Лазер снабжен прецизионным источником тока и системой стабилизации температуры. Выходное излучение лазера линейно поляризовано и проходит через четвертьволновую пластинку для получения круговой поляризации. Градиентный нейтральный оптический фильтр используется для управления мощностью излучения. Он расположен под небольшим углом к выходному окну лазера для предотвращения обратных отражений в лазер. После пластинки излучение пропускается через поглощающую ячейку с парами рубидия и буферным газом. Для наблюдения поглощения в атомах щелочного металла осуществляется равномерный нагрев ячейки до температуры свыше 50 °C. Из-за конструктивных особенностей окна ячейка находятся при более низкой температуре. При этом на окнах происходит конденсация металла. Для решения данной проблемы температура ячейки $T_c$ поддерживается на 5 °C большей темпера-

**С.М.Игнатович, М.Н.Скворцов, И.С.Месензова, Н.Л.Квашнин, В.И.Вишняков, Д.В.Бражников, С.Н.Багаев.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; e-mail: mesenzova.i@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 января 2022 г.

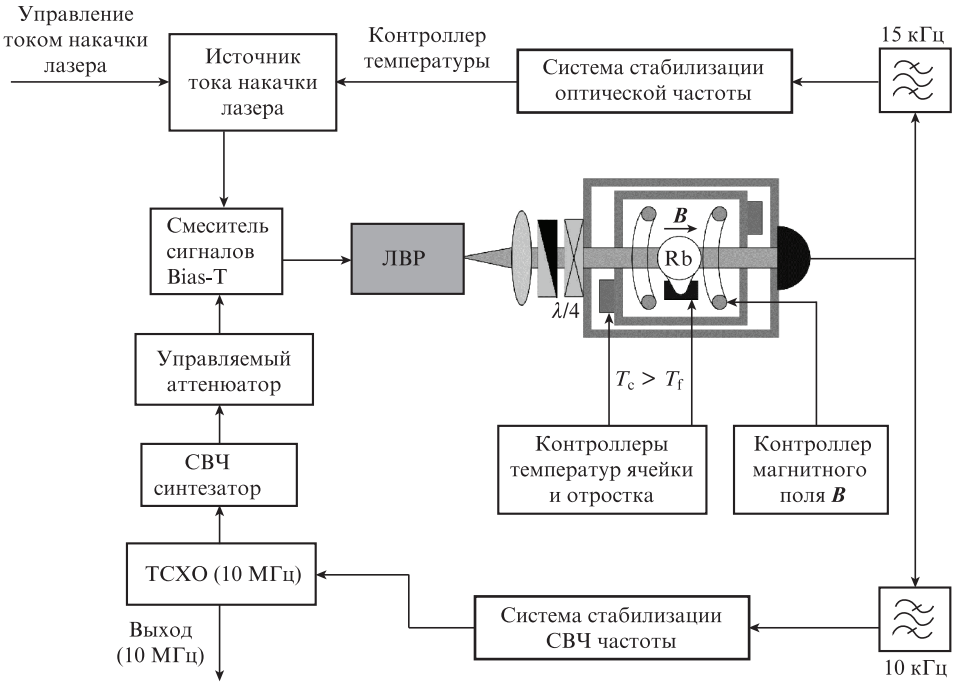


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования КПН-резонансов D1-линии $^{87}$Rb.

туры отростка $T_f$, в котором содержится металлический рубидий.

На корпусе ячейки расположены катушки Гельмгольца для создания однородного магнитного поля, направленного вдоль волновых векторов волн. Это поле расщепляет уровни энергии основного состояния и позволяет наблюдать КПН-резонанс, связанный только с магнитными подуровнями с квантовыми числами $m_F = 0$, для которых отсутствует линейный эффект Зеемана. Вместе с тем эти уровни претерпевают квадратичный по магнитному полю сдвиг, что приводит к соответствующему сдвигу резонанса КПН (частоты часового 0–0-перехода)

$$\Delta\nu = K_0 B^2, \tag{1}$$

где $B$ – индукция магнитного поля (в Гс). На основе формулы Брейта–Раби [12–14] можно показать, что для $^{87}$Rb коэффициент пропорциональности $K_0$ = 575.14 Гц/Гс$^2$. Величина магнитного поля в нашем случае составляла 100–150 мГс.

Для получения резонансных оптических частот для Λ-схемы двухфотонного ($\nu_1$ и $\nu_2$) взаимодействия в спектре излучения лазера его ток накачки модулировался с частотами 3.417 и 6.834 ГГц. Для модуляции на частоте 3.4 ГГц нами использовался СВЧ генератор собственной разработки, входящий в состав миниатюрных атомных часов, а для модуляции на частоте 6.8 ГГц – генератор высокочастотных и СВЧ сигналов Roghde & Schwarz SMA-100B. Частоты $\nu_1$ и $\nu_2$ являются боковыми частотами ±1-го порядков формируемого частотно-модулированного излучения лазера. При этом частота генератора синтезируется из частоты 10 МГц термокомпенсированного кварцевого осциллятора (ТСХО).

Система автоматического регулирования, работающая на частоте модуляции тока накачки лазера 15 кГц, стабилизирует оптическую частоту лазерной генерации по D1-линии поглощения $^{87}$Rb. Для получения сигнала ошибки синхронно детектируется первая гармоника частоты модуляции оптической мощности пучка, прошедшего через рубидиевую ячейку. Рабочая частота пробной модуляции (15 кГц) выбрана из тех соображений, что на этой частоте как у лазера, так и у элементов электроники обычно отсутствует избыточный фликкер-шум. Управлять частотой генерации лазера можно, изменяя его ток накачки или температуру. При изменении тока быстродействие во много раз выше, чем при изменениим температуры, но с изменением тока в гораздо большей степени меняется выходная мощность лазера, импеданс и модуляционные характеристики. С учетом этой особенности отработка сигнала ошибки системы автоматического регулирования осуществляется регулировкой температуры лазера, а пробная модуляция – через модуляцию тока лазера. Также такой подход компенсирует погрешность измерения температуры диода термодатчиком, связанную с их различным расположением в пространстве.

Для стабилизации частоты СВЧ генератора применяется метод стабилизации, аналогичный методу Паунда–Древера–Холла, применяемому для стабилизации частоты лазеров в оптическом диапазоне [15]. В этом методе частота модуляции существенно превышает ширину резонанса. В нашем случае используется система автоматического регулирования с модуляционной частотой ~9 кГц при полной ширине на полувысоте (FWHM) наблюдаемого резонанса КПН, равной 680 Гц. Данный метод имеет ряд достоинств, а именно позволяет реализовать максимально возможное быстродействие обратной связи и выбрать высокую рабочую частоту для улучшения отношения сигнал/шум.

Поглощающая ячейка изготовлена из кварцевого стекла, устойчивого к воздействию щелочных металлов и имеющего малую газопроницаемость (например, из стекла марки С51-1). Стеклянная ячейка содержит чистый изотоп $^{87}$Rb и буферный инертный газ – смесь аргона и неона (давление ~100 Тор). В отсутствие буферного газа время когерентного взаимодействия атомов рубидия с

лазерным полем существенно меньше и равно среднему времени пролета атомов через пучок, что приводит к существенному уширению резонансов КПН.

## 3. Экспериментальное исследование КПН-резонансов в $^{87}$Rb для линии D1 при модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц

Основными источниками долговременной нестабильности в миниатюрных КПН-часах являются флуктуации следующих параметров:

– интенсивности оптического излучения;

– мощности СВЧ модуляции;

– столкновительного сдвига от буферных газов при изменении температуры ячейки;

– сдвига, зависящего от изменения концентрации атомов рубидия при изменении температуры ячейки;

– сдвига, определяемого магнитным полем в ячейке.

Смена частоты модуляции с 3.4 ГГц на 6.8 ГГц сказывается только на первых двух параметрах, чувствительность к остальным флуктуациям не зависит от способа модуляции [16].

Созданная экспериментальная установка позволяла наблюдать КПН-резонансы, измерять их параметры и, непосредственно по сигналу в системе стабилизации СВЧ частоты, определять крутизну частотного дискриминатора при модуляции тока накачки лазера как на частоте 3.4 ГГц, так и на частоте 6.8 ГГц. Характерный вид КПН-резонанса для случая модуляции на частоте 6.8 ГГц показан на рис.2, а сигнал ошибки в системе стабилизации СВЧ частоты – на рис.3.

Для исследования полевых сдвигов частоты в зависимости от СВЧ мощности, модулирующей ток накачки лазера, проводилась стабилизация СВЧ частоты по частоте КПН-резонанса и измерялась частота атомного стандарта относительно частоты водородного стандарта. При этом выходные частоты (10 МГц) атомного стандарта на базе $^{87}$Rb и водородного стандарта частоты и времени Ч1-1007 подавались на фазовый компаратор-анализатор VCH-323. Ступенчато изменялась СВЧ мощность, на каждой ступеньке измерялась частота атомного стандарта на базе КПН-резонанса в $^{87}$Rb для линии D1. На рис.4 представлены результаты измерений при модуляции тока накачки лазера на частоте 3.4 ГГц для двух ЛВР.

Для одного из ЛВР (рис.4, кривая *1*) зависимость имеет минимум, который был использован нами ранее [16]

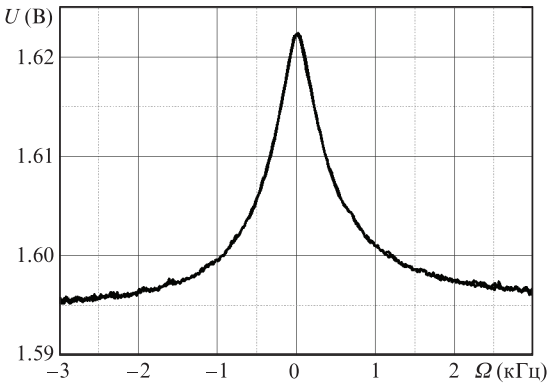


Рис.2. КПН-резонанс.

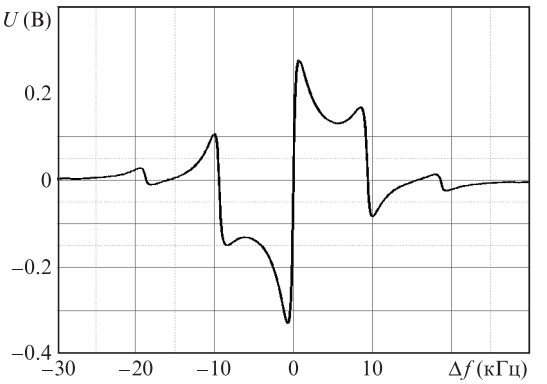


Рис.3. Сигнал ошибки в системе стабилизации СВЧ частоты.

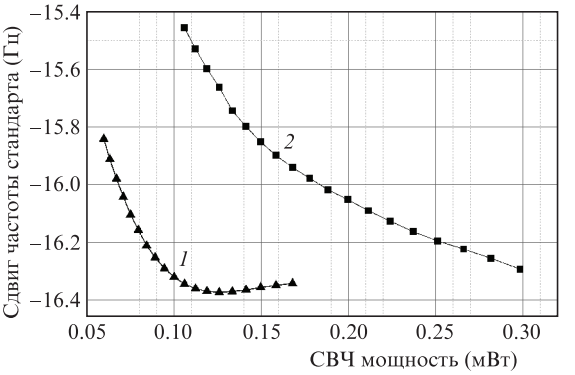


Рис.4. Сдвиг частоты стандарта на базе КПН-резонанса в $^{87}$Rb для линии D1 в зависимости от СВЧ мощности для двух ЛВР (*1*, *2*).

для повышения долговременной стабильности частоты атомного стандарта. В этой точке первая производная зависимости сдвига частоты от СВЧ мощности равна нулю. Для ЛВР из другой серии такой точки не наблюдалось (рис.4, кривая *2*). Чтобы понять, в чем различие лазеров, были исследованы спектры лазерного излучения с помощью сканирующего интерферометра с областью свободной дисперсии ~40 ГГц.

Как показано на рис.5, спектры имеют боковые полосы, расположенные через интервал, равный частоте модуляции. В лазере, для которого наблюдался минимум в зависимости сдвига частоты стандарта от СВЧ мощности (рис.4, кривая *1*), спектр выглядит существенно более симметричным (рис.5,*б*).

Для поиска оптимальных параметров стабилизации были исследованы два основных параметра КПН-резонанса: крутизна частотного дискриминатора и сдвиг частоты атомного стандарта, пересчитанный на 1% изменения СВЧ мощности. Зависимости этих параметров от СВЧ мощности приведены на рис.6 для случая модуляции тока накачки лазера на частоте 3.4 ГГц. Сдвиг частоты атомного стандарта при изменении СВЧ мощности на 1% от ее рабочего значения вычисляется через первую производную в любой выбранной рабочей точке, умноженную на 0.01 от значения мощности в данной точке. Оптимальной точкой для долговременной стабильности по СВЧ мощности является точка, в которой мощность $P_{\mathrm{UHF}}$ = 0.16 мВт, т.к. при небольшом проигрыше в крутизне дискриминатора наблюдается нулевой сдвиг при изменении СВЧ мощности, что делает стандарт малочувствительным к такому слабо контролируемому параметру, как амплитуда выходного сигнала СВЧ осциллятора.

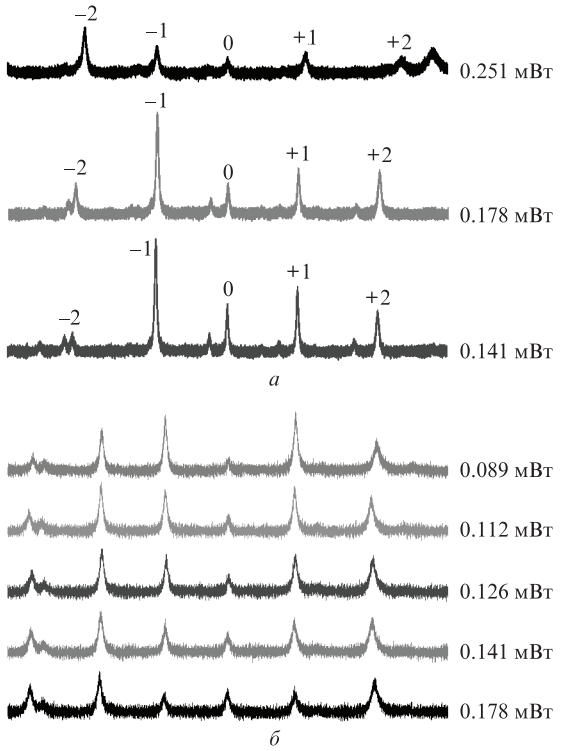


Рис.5. Спектры лазерного излучения без точки нулевого сдвига (*а*) и с точкой нулевого сдвига (*б*) при различном уровне СВЧ модуляции.

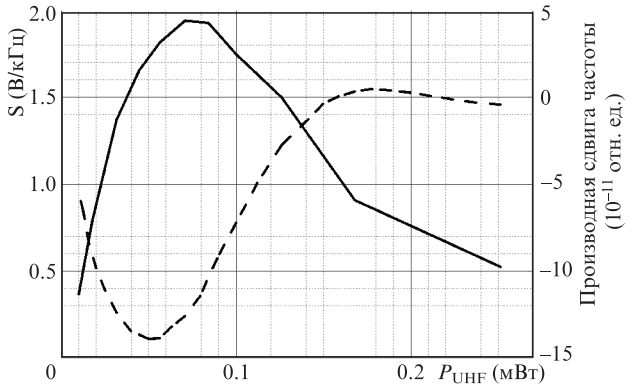


Рис.6. Зависимости от СВЧ мощности крутизны *S* частотного дискриминатора (сплошная кривая) и сдвига частоты атомного стандарта при изменении СВЧ мощности на 1% (штриховая кривая) при модуляции тока накачки лазера на частоте 3.4 ГГц.

Аналогичным образом проведены исследования при модуляции тока накачки ЛВР на частоте 6.8 ГГц. Для начала с помощью сканирующего интерферометра регистрировались спектры излучения лазеров при модуляции тока на частоте 6.8 ГГц. Распределения интенсивности спектральных компонент показаны на рис.7. Боковые полосы получились почти симметричными.

Далее исследовались сдвиги частоты стандарта при различных интенсивностях оптического поля с модуляцией на частоте 6.8 ГГц. Измерения выполнены для трех значений тока накачки лазера: $J = 1.7$, 1.5 и 1.3 мА. Кроме того, Λ-схема наблюдения КПН-резонанса для случая модуляции тока накачки ЛВР на частоте 6.8 ГГц может быть построена в двух вариантах: с использованием низкочастотной боковой полосы и центральной полосы генерации лазера или с использованием высокочастотной боковой полосы и центральной полосы генерации лазера. Результаты измерений для всех шести случаев представлены на рис.8.

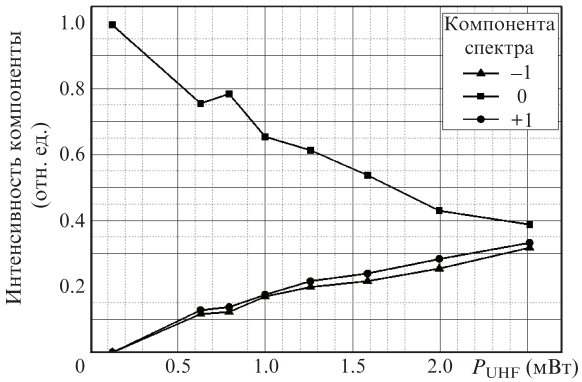


Рис.7. Интенсивности боковых полос излучения лазера с модуляцией тока накачки на частоте 6.8 ГГц.

Из рис.8 видно, что сдвиги существенно меньше при стабилизации по линии поглощения комбинацией несущая + низкочастотная боковая полоса (НЧ режим), а при использовании ВЧ режима наблюдается точка малой чувствительности к изменению тока накачки лазера. В то же время стабильность источника тока – это достаточно хорошо контролируемый параметр, поэтому оптимальным является НЧ режим наблюдения резонанса.

Для выбора оптимального режима стабилизации с точки зрения получения максимального соотношения сигнал/шум при сохранении минимальной чувствительности к флуктуациям интенсивности оптического поля проводились исследования параметров КПН-резонансов и крутизны частотных дискриминаторов для случая модуляции тока накачки лазера на частоте 6.8 ГГц. Результаты всех измерений крутизны частотного дискриминатора, полученного на базе КПН-резонанса, и сдвига частоты атомного стандарта, пересчитанного на 1% изменения СВЧ мощности, в зависимости от СВЧ мощности приведены на рис.9.

Нулевого сдвига в зависимости от СВЧ мощности при данном типе модуляции не наблюдалось, поэтому оптимальный режим работы лазера выбирался по максимальной крутизне дискриминатора при СВЧ мощности 2.5 мВт, что совпадало с СВЧ мощностью, при которой производная сдвига была минимальной.

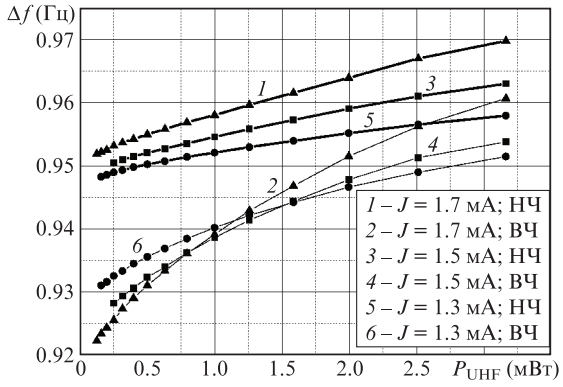


Рис.8. Полевые сдвиги частоты стандарта при модуляции на частоте 6.8 ГГц в зависимости от СВЧ мощности для различных токов накачки лазера. КПН-резонанс получался из различных компонент спектра излучения: НЧ – несущая + низкочастотная боковая полоса, ВЧ – несущая + низкочастотная боковая полоса.

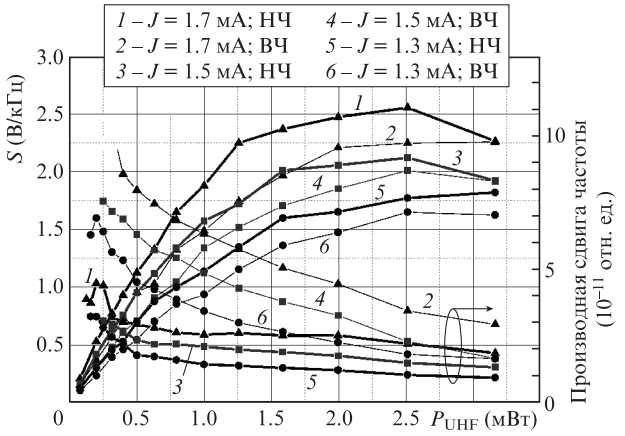


Рис.9. Зависимости от СВЧ мощности крутизны $S$ частотного дискриминатора и сдвига частоты атомного стандарта при изменении СВЧ мощности на 1% в случае модуляции тока накачки лазера на частоте 6.8 ГГц.

После выбора оптимальных параметров стабилизации был поставлен эксперимент по измерению функции Аллана для обоих случаев модуляции (рис.10). Из рис.10 видно, что для частоты 6.8 ГГц было получено существенное уменьшение нестабильности на коротких интервалах (до $\sim 3 \times 10^{-12}$ за 1 с). Нестабильность на длинных интервалах объяснялась относительно высокой температурной чувствительностью СВЧ генератора Roghde & Schwarz SMA-100B.

Согласно формуле [17]

$$\delta\omega = \frac{1}{4}\frac{|\Omega_R|^2}{\Delta^2 + \gamma^2} \qquad (2)$$

световой сдвиг $\delta\omega$ резонанса, получаемый в результате взаимодействия с нерезонансными компонентами спектра на частоте модуляции 6.8 ГГц, при аналогичных амплитудах компонент должен уменьшаться по сравнению со сдвигом при модуляции тока накачки лазера на частоте 3.4 ГГц, что приводит к уменьшению чувствительности стандарта к изменению СВЧ мощности на 1% (рис.6 и 9). В выражении (2) $\Omega_R$ – частота Раби; $\Delta = \omega_L - \omega_0$ – отстройка частоты лазера ($\omega_L$) от резонансной частоты ($\omega_0$); $\gamma$ – ширина оптического перехода.

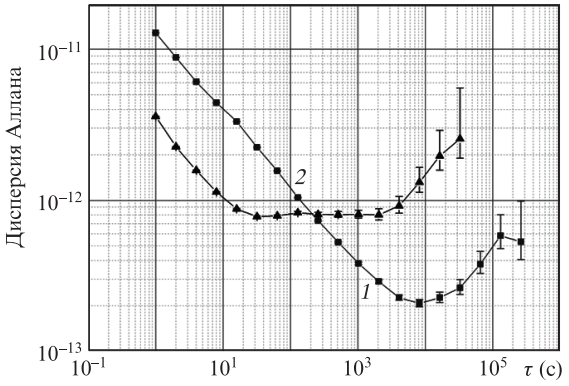


Рис.10. Дисперсия Аллана для случая модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 (*1*) и 6.8 ГГц (*2*).

Итоговая величина светового сдвига может незначительно отличаться от расчетного из-за того, что на величину светового сдвига оказывают влияние и другие факторы, не учтенные в формуле (2), например асимметрия резонанса.

В работе [11], дающей подробное теоретическое обоснование уменьшения сдвиговых характеристик, показано, что при модуляции тока накачки лазера на частоте, равной половине частоты сверхтонкого расщепления, схема становится более чувствительной к малому изменению параметров модуляции.

## 4. Заключение

Проведенные сравнительные исследования параметров КПН-резонанса в $^{87}$Rb для линии D1 при модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц показали, что крутизна частотного дискриминатора, полученного на базе КПН-резонанса, при оптимальной СВЧ мощности в обоих случаях одинакова. Исследования полевых сдвигов стандарта частоты на базе КПН-резонансов продемонстрировали, что в случае модуляции тока накачки лазера на частоте 6.8 ГГц полевые сдвиги в 2–4 раза меньше. Достигнутый результат по кратковременной стабильности ($3 \times 10^{-12}$ за 1 с) показывает перспективность применения данного подхода для миниатюрных атомных часов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-90029), а также Министерства науки и высшего образования РФ (Президентская стипендия № СП-269. 2021.3).

1. Knappe S. et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **18** (11), 1545 (2001).
2. Letokhov V.S., Chebotayev V.P. *Optical Science, Nonlinear Laser Spectroscopy* (Berlin: Springer-Verlag, 1977, Vol. 4).
3. Vanier J. *Appl. Phys.*, **81** (4), 421 (2005).
4. Kitching J. *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 031302 (2018).
5. Knappe S., Schwindt P.D.D., Shah V., et al. *Opt. Express*, **13** (4), 1249 (2005).
6. Knappe S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (9), 1460 (2004).
7. Зибров С.А., Величанский В.Л., Зибров А.С. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **82**, 534 (2005) [*JETP Lett.*, **82**, 477 (2005)].
8. Zibrov S.A., Novikova I., Phillips D.F., et al. *Phys. Rev. A*, **81**, 013833 (2010).
9. Michalzik R. *VCSELs* (Berlin–Heidelberg: Springer, 2013).
10. Goka S., Okura T., Moroyama M., Watanabe Y. *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp.* (Honolulu, Hawaii, USA, 2008).
11. Deng K., Guo T., Su J., Guo D., Liu X., Liu L., Chen X., Wang Z. *Phys. Lett. A*, **373**, 1130 (2009).
12. Breit G., Rabi I.I. *Phys. Rev.*, **38** (11), 2082 (1931).
13. Vanier J., Audoin C. *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards* (Bristol: Adam Hilger, 1989).
14. Miletic D. *PhD thesis* (Université de Neuchâtel, 2013); http://doc.rero.ch/record/205536.
15. Drever R.W.P. et al. *Appl. Phys. B*, **31** (2), 97 (1983).
16. Скворцов М.Н. и др. *Квантовая электроника*, **50** (6), 576 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (6), 576 (2020)].
17. Deng J. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **48** (6), 1657 (2001).