

03:09

## Эффект когерентного пленения населенностей на атомах $^{87}\text{Rb}$ в малогабаритных камерах поглощения с буферным газом

© С.В. Ермак<sup>1</sup>, М.В. Петренко<sup>2</sup>, В.В. Семенов<sup>1</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

E-mail: serge\_ermak@mail.ru, m.petrenko@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2015 г.

Исследованы характеристики сигнала когерентного пленения населенностей в малогабаритных стеклянных ячейках с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$  в атмосфере неона при накачке узкополосным лазерным источником  $D_2$ -линии головного дублета. Измерены параметры сигналов поглощения в камерах диаметром 3 мм с давлениями буферного газа Ne в диапазоне 200–400 Torr при температурах ячейки в пределах 65–120°C и мощностях излучения накачки от 30 до 400  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Экспериментально установлены оптимальные значения давления буферного газа, температуры ячейки и мощности источника накачки, при которых достигается минимальное значение кратковременной нестабильности резонансной линии. Проведено сравнение ориентационного светового сдвига частоты резонанса когерентного пленения населенностей на ячейках с буферным газом и малогабаритных камерах поглощения с антирелаксационным покрытием.

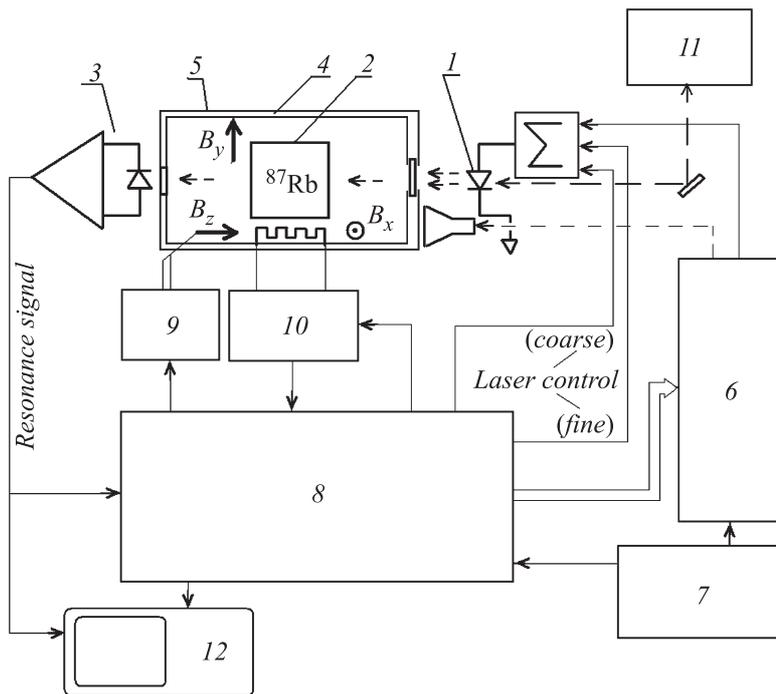
Развитие современных методов индуцирования резонансных сигналов в оптически ориентированных щелочных атомах, таких как эффект когерентного пленения населенностей (КПН) [1], и прогресс в создании высокостабильных источников когерентного излучения сделали возможным создание нового поколения миниатюрных квантовых устройств с оптической накачкой. К числу таких устройств относятся миниатюрные  $M_x$  магнитометры с вариационной чувствительностью 5 pT/Hz<sup>1/2</sup> [2], а также малогабаритные квантовые стандарты частоты на парах щелочных металлов ( $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ) с объемом физического блока менее 20 см<sup>3</sup> и относительной нестабильностью частоты на уровне

$10^{-11} \text{ s}^{-1/2}$  [3–5]. Метрологические характеристики подобных устройств в значительной степени определяются выбором рабочего вещества, технологией и качеством изготовления рабочей камеры поглощения, а также параметрами источника накачки.

Необходимым условием при разработке миниатюрных конструкций квантовых устройств с оптической накачкой является использование сравнительно высоких (вплоть до нескольких атмосфер) давлений инертного газа, вводимого в камеру поглощения с целью уменьшения действия релаксационных эффектов в рабочей среде [6]. При этом неизбежно возникает проблема сдвига и уширения резонансной линии поглощения, что требует тщательного подбора и настройки всех элементов измерительного модуля квантового устройства, позволяющих реализовать минимальные измерительные погрешности.

В данной работе исследовались характеристики сигнала КПН в парах щелочного изотопа  $^{87}\text{Rb}$ , обладающего в сравнении с атомами  $^{133}\text{Cs}$  более простой структурой энергетических уровней. В качестве буферного газа использовался неон Ne, что по предварительным подсчетам позволяло обеспечить относительную стабильность миниатюрных атомных часов на уровне  $10^{-11} - 10^{-12} \text{ s}^{-1/2}$ . Исследования проводились на универсальной экспериментальной установке с лазерным источником накачки (рис. 1), которая позволяла регистрировать как сигналы КПН, так и сигналы двойного радиооптического резонанса, практикуемые в технике квантовой стабилизации частоты. В установке предусматривались прогрев рабочих камер поглощения в диапазоне температур  $20 - 120^\circ\text{C}$  и СВЧ-модуляция частоты (до  $10 \text{ GHz}$ ) источника накачки. Функциональные возможности экспериментальной установки позволяли осуществлять широкий комплекс исследований, связанных с выявлением роли так называемых световых сдвигов резонансной линии квантового устройства, являющихся одним из решающих дестабилизирующих факторов образцовых мер частоты [7–9].

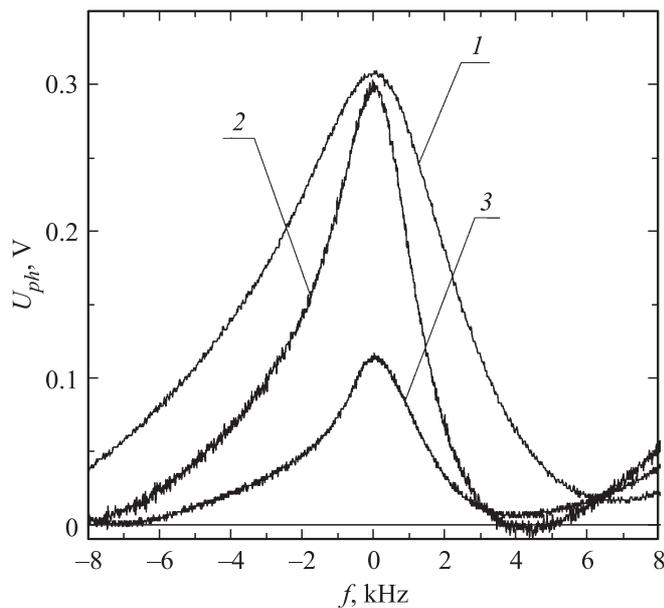
В качестве источника накачки использовался лазер с внешним резонатором, что позволяло обеспечить высокую стабильность характеристик излучения (со спектральной шириной менее  $1 \text{ MHz}$ ), а также в широком диапазоне перестройки относительно высокую интенсивность излучения ( $30 - 150 \text{ mW}$ ). Фотоприемным устройством служил кремниевый фотодиод [10,11] с рабочей апертурой  $1 \times 1 \text{ mm}$ , коэффициентом преобразования  $0.1 \text{ A/W}$ , применяемый в режиме короткого замыкания, исключаяющий влияние на выходной сигнал



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — лазер с внешним резонатором, 2 — ячейка, содержащая  $^{87}\text{Rb}$ , 3 — фотоприемное устройство, 4 — термостат, 5 — многослойный магнитный экран, 6 — СВЧ-генератор, 7 — генератор НЧ-модуляции, 8 — аппаратура управления, 9 — блок управления магнитным полем, 10 — блок управления температурой ячейки, 11 — блок контроля спектрального состава лазерного излучения, 12 — осциллограф.

темнового тока при ширине полосы регистрации приемного тракта (0–20 kHz). Лазер настраивался на  $D_2$ -линии головного дублета атомов рубидия (с длиной волны  $\lambda = 780 \text{ nm}$ ), с возможностью регулирования поляризации излучения накачки.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение лазера 1 через поляризующие элементы подается в ячейку 2, содержащую атомы  $^{87}\text{Rb}$ , поглощение в которой регистрируется



**Рис. 2.** Сигналы КПН при различных значениях давления Ne ( $P_{\text{Ne}}$ ) в ячейке: 1 — 200, 2 — 300, 3 — 400 Торр.

фотоприемником 3. Ячейка при этом помещена в термостат 4 с точностью удержания температуры  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  и в магнитный экран 5 с фактором экранирования 1000, предохраняющий ячейку от влияния внешних магнитных полей. СВЧ-синтезатор 6 обеспечивает частотную модуляцию тока лазера, таким образом, в спектре излучения лазера возникают боковые частоты, при этом частота модуляции изменяется в соответствии с сигналом генератора низкочастотной (НЧ) модуляции (23 Hz) 7. При совпадении разности боковых частот лазерного излучения (удвоенной частоты модуляции) с частотой сверхтонкого перехода основного состояния атомов  $^{87}\text{Rb}$  (6.834 GHz) возникает эффект КПН и растет пропускание среды, которое регистрируется фотоприемником. Для выделения 0–0 перехода из всей совокупности магнитных подуровней ячейка помещается в однородное магнитное поле  $B_z$  порядка 100 mG, параллельное лазерному излучению. Одновре-

Параметры сигналов КПН при различных давлениях Ne в ячейке

$P_{\text{Ne}}$ , Torr	$F$ , GHz	$\Delta f$ , kHz	$(S/N)_{1\text{Hz}}$	$Q$	$\sigma$ , $s^{-1/2}$
200	6.834733	5.90	3900	$1.16 \cdot 10^6$	$2.21 \cdot 10^{-10}$
300	6.834764	3.00	3800	$2.28 \cdot 10^6$	$1.16 \cdot 10^{-10}$
400	6.834780	2.89	2900	$2.36 \cdot 10^6$	$1.46 \cdot 10^{-10}$

Используемые обозначения:  $P_{\text{Ne}}$  — давление неона,  $F$  — частота рабочего перехода,  $\Delta f$  — ширина сигнала КПН по уровню 1/2 амплитуды,  $(S/N)_{1\text{Hz}}$  — отношение сигнал/шум в полосе 1 Hz,  $Q$  — добротность линии резонанса (отношение частоты рабочего перехода к ширине резонансной линии),  $\sigma$  — оценка нестабильности частоты резонансной линии при времени измерения 1 s.

менно обеспечивается стабилизация частоты лазерного источника  $II$  с использованием опорной ячейки и техники насыщенной спектроскопии, температуры ячейки  $IO$  и магнитного поля  $9$  путем стабилизации тока в катушках.

В экспериментах определялись оптимальные значения давления буферного газа в ячейке, температура рабочей ячейки и интенсивность излучения накачки, соответствующие максимальному фактору качества сигнала КПН. Исследовалась форма линии резонансных сигналов в стеклянных малогабаритных цилиндрических ячейках размером  $\varnothing 3 \times 3$  mm, изготовленных по стандартной технологии, содержащих  $^{87}\text{Rb}$  при различных давлениях буферного газа неона (200, 300 и 400 Torr). На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости сигнала КПН от  $f$  — расстройки удвоенной частоты модуляции относительно частоты эталонного СТС-перехода, для ячейки при температуре  $T \sim 80^\circ\text{C}$ , мощности циркулярно поляризованного излучения накачки  $400 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  и полосе регистрации сигнала 10 kHz. Как следует из рисунка, увеличение давления буферного газа более 300 Torr ведет к снижению амплитуды резонансного сигнала, что, по-видимому, связано с увеличением частоты столкновений атомов щелочного металла с атомами буферного газа, приводящих к эффекту деполаризации [12].

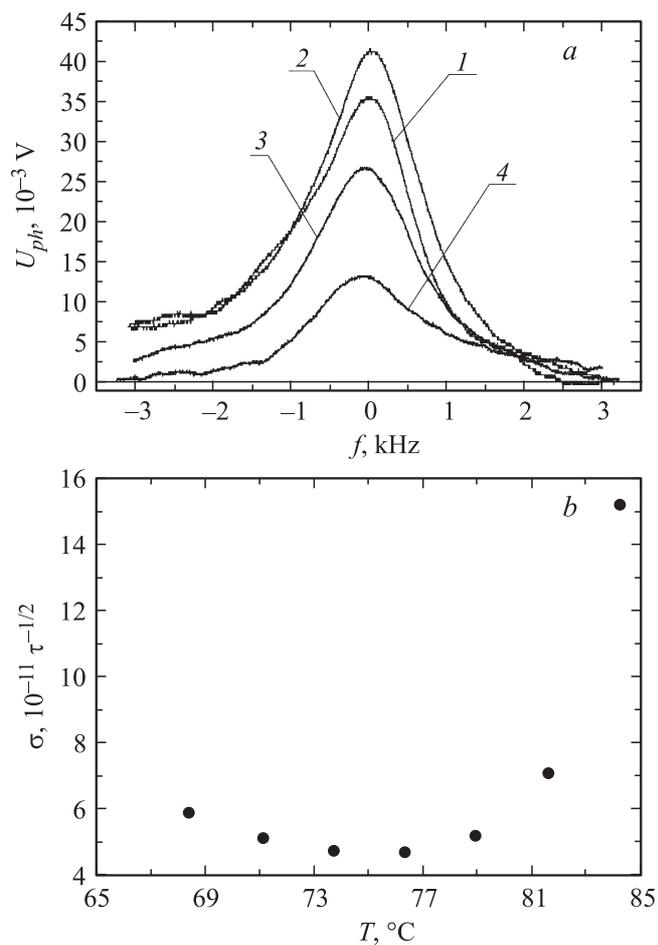
В таблице представлены параметры сигналов КПН для ячеек с буферным газом Ne при давлениях 200, 300 и 400 Torr. Минимальное значение кратковременной нестабильности сигнала КПН составляло  $\sigma = 1.16 \cdot 10^{-10} s^{-1/2}$  и наблюдалось при использовании ячеек с давле-

нием неона 300 Torr и отношении сигнал/шум, равном 40 в полосе регистрации 10 kHz при ширине резонансной линии 3 kHz. Оценка секундной нестабильности резонансной линии проводилась по формуле [12]

$$\sigma = ((S/N)_{1\text{Hz}} \times Q)^{-1}.$$

Увеличение кратковременной нестабильности при давлении неона  $P_{\text{Ne}} = 400$  Torr вызвано уменьшением амплитуды исследуемого сигнала, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум. В то же время большая величина нестабильности при  $P_{\text{Ne}} = 200$  Torr обусловлена шириной линии резонанса КПН (см. таблицу).

Особенностью исследуемых малогабаритных ячеек с повышенным давлением буферного газа является уширение линии поглощения, перекрывающее расщепление сверхтонкой структуры основного состояния. При этом спектральный отклик атомов рабочего вещества на воздействии лазерного излучения (так называемый световой сдвиг энергетических подуровней) оказывается на несколько порядков меньше, чем это наблюдается на малогабаритных ячейках с антирелаксационным покрытием. Использование циркулярно поляризованного излучения лазерного источника эквивалентно приложению магнитного поля, направление которого зависит от знака поляризации источника накачки [13]. Следуя указанной работе, можно оценить сдвиг частоты сверхтонкого 0–0 перехода в рубидиевой ячейке с давлением неона 300 Torr при смене знака поляризации света накачки мощностью  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  на уровне 0.1 Hz. Таким образом, вариация угла  $\theta$  между направлением магнитного поля и пучком накачки в один градус соответствует относительному сдвигу частоты 0–0 перехода на уровне  $5 \cdot 10^{-12}$ , что по порядку величины совпадает с оценкой ориентационного сдвига, выполненного в работе [9]. Подобное соответствие послужило поводом для экспериментальной оценки ориентационного сдвига частоты КПН на малогабаритных (объемом  $1 \text{ cm}^3$ ) рубидиевых ячейках с покрытием. Мощность лазерного излучения на  $D_2$ -линии была заметно увеличена (до  $2000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), при этом ориентационный сдвиг частоты существенным образом зависел от настройки частоты лазерного излучения на линию атомного перехода и варьировался в пределах  $10^{-11} - 10^{-13}$  на градус вариации угла  $\theta$  при пересчете мощности лазерного источника до величины  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . В этом же диапазоне наблюдался ориентационный сдвиг частоты ординарного радиооптического резонанса на 0–0 переходе в условиях



**Рис. 3.** *a* — сигналы КПН при различных значениях температуры ( $T$ ) ячейки с давлением неона  $P_{\text{Ne}} = 400$  Торг: 1 — 68.4, 2 — 76.3, 3 — 81.6, 4 — 84.2 $^{\circ}\text{C}$ . *b* — зависимость оценки кратковременной (за 1 s) нестабильности от температуры ячейки.

действия резонансного СВЧ-поля, мощность которого соответствовала максимальному фактору качества резонансного сигнала.

В соответствии с рис. 2 оптимальной по фактору ширины линии рабочей ячейкой с буферным газом является ячейка с давлением  $P_{\text{Ne}} = 400 \text{ Torr}$ . Представленные на рис. 3, *a* формы сигналов КПН при интенсивности накачки  $180 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  и значениях температуры ячейки  $T = 65\text{--}85^\circ\text{C}$  демонстрируют незначительный рост ширины линии с ростом температуры. При этом реализуется кратковременная нестабильность частоты сигнала КПН (рис. 3, *b*), соответствующая так называемому фликкерному потолку квантового стандарта частоты,  $\sigma = 4.69 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1/2}$  при температуре рабочей ячейки  $T \sim 75^\circ\text{C}$ .

Из экспериментальных данных следует, что интенсивность сигнала КПН прямо пропорциональна интенсивностям накачки, что свидетельствует об отсутствии эффектов насыщения, при этом ширина линии уменьшается пропорционально интенсивности накачки, достигая величины порядка  $1 \text{ kHz}$  при мощности накачки около  $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . При мощности накачки  $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  достигается оптимальное значение параметра  $\sigma = 4.49 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{1/2}$ .

Полученные результаты позволяют установить оптимальные параметры темпа накачки, давления и состава буферного газа, температуры малогабаритных ячеек с линейными размерами порядка  $1 \text{ mm}$ . Результаты работы могут быть использованы в приложениях малогабаритных и миниатюрных атомных стандартов частоты и квантовых магнитометров.

## Список литературы

- [1] *Alzetta G. et al.* // Nuovo Cimento B. 1976. V. 36B. Ser. 2. N 1. P. 5–20.
- [2] *Schwindt P.D. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 081 102(1–3).
- [3] *Kitching J., Knappe S., Hollberg L.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 3. P. 553–555.
- [4] *Knappe S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. N 14. P. 1460.
- [5] *Ермак С.В. и др.* // НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. N 1 (213). С. 61–68.
- [6] *Riehle F.* Frequency Standards: Basics and Applications. Wiley-VCH, 2005.
- [7] *Semenov V.V., Baranov A.A., Ermak S.V.* // Proc. IEEE IFCS/EFTF Joint Conference. 2011. San Francisco, USA. P. 580–581.
- [8] *Баранов А.А., Ермак С.В., Семенов В.В.* // НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. N 1 (141). С. 152–155.

- [9] Баранов А.А., Ермак С.В., Семенов В.В. // Опт. и спектр. 2013. Т. 114. N 3. С. 18–21.
- [10] Забродский В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 69–77.
- [11] Артемов А.П. и др. // ПТЭ. 2015. Т. 1. С. 104–108.
- [12] Knappe S. MEMS Atomic Clocks // Comprehensive Microsystems. 2007. V. 3. P. 571–612.
- [13] *Happer W., Mathur B.S.* // Phys. Rev. 1967. V. 163. N 1. P. 12–25.