

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ *

✉ В. И. Вишняков¹, Д. В. Бражников^{1,2}, М. Н. Скворцов¹

¹*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

✉ vladislav.vishnyakov@gmail.com

В работе исследуется световой (динамический штарковский) сдвиг резонансов когерентного пленения населенностей (КПН) в парах атомов цезия при их возбуждении излучением диодного лазера с вертикальным резонатором (ЛВР). Для наблюдения резонансов КПН ток накачки ЛВР модулируется на сверхвысокой частоте ($\approx 4,6$ ГГц), что приводит к частотной модуляции (ЧМ) выходного излучения и появлению боковых полос в его спектре, необходимых для возбуждения резонанса КПН. Такой подход используется в миниатюрных квантовых стандартах частоты (КСЧ) микроволнового диапазона. Стандарты частоты применяются в качестве вторичных или рабочих эталонов в метрологических измерениях, а также при производстве высокоточных средств измерений частоты и времени, в радионавигации, радиоастрономии, включая системы навигации для дальнего космоса [1], системах дистанционного зондирования [2], для навигационных систем [3], в широкополосных коммуникационных сетях, высокозащищенных линиях связи, различных измерительных приборах и умных электрических сетях (Smart Grid).

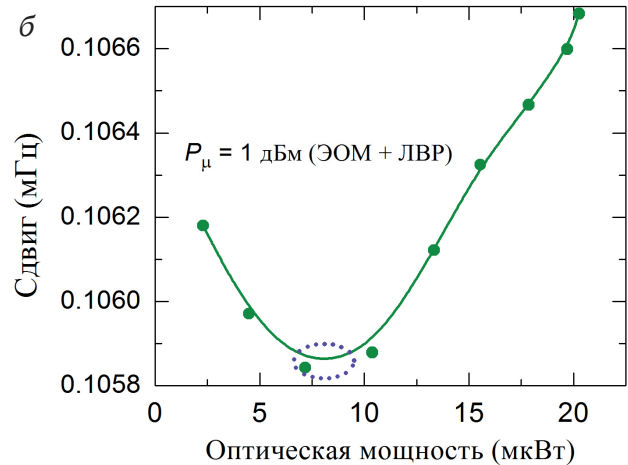
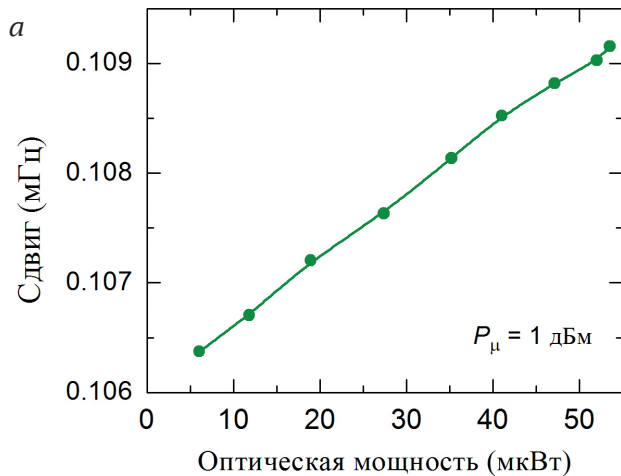
Повышение долговременной стабильности КСЧ — важнейшая задача квантовой метрологии. Один из основных факторов, приводящих к ее ухудшению, связан со световым сдвигом сигнала ошибки, формируемым электроникой КСЧ из резонанса КПН. Значительный вклад в этот сдвиг вносят вариации оптической мощности в ячейке с атомами. Стандартный подход к снижению чувствительности положения сигнала ошибки к этим вариациям основан на использовании оптимального индекса ЧМ, при котором этот сдвиг равен нулю [4]. Однако как положение, так и наличие такого индекса в целом зависят от конкретного образца ЛВР и не поддаются контролю. В настоящей работе исследуется зависимость сдвига сигнала ошибки Δf в КСЧ/КПН от изменения полной оптической мощности P , регулируемой на входе в газовую ячейку с помощью набора нейтральных фильтров.

При одной лишь ЧМ зависимость $\Delta f(P)$ линейна при умеренной мощности СВЧ-генератора (см. рисунок, а). Далее эта же зависимость исследовалась при использовании внешнего амплитудного электрооптического модулятора (ЭОМ), собранного по типу интерферометра Маха — Цендера. ЭОМ производит амплитудную модуляцию (АМ) проходящего через него излучения.

Таким образом, при пропускании ЧМ излучения ЛВР через ЭОМ формировался спектр, относительными интенсивностями боковых полос которого можно эффективно управлять с помощью СВЧ-мощности, смещающего постоянного напряжения на ЭОМ, а также фазы между АМ и ЧМ. Наличие дополнительных степеней свободы позволило обнаружить нелинейный вид функции $\Delta f(P)$, в котором присутствует экстремум (см. рисунок, б). Положение этого экстремума определяет оптимальную оптическую мощность P_{opt} , вблизи которой малые вариации

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00279).

© В. И. Вишняков, Д. В. Бражников, М. Н. Скворцов, 2024



Сдвиг частоты только при ЧМ излучения ЛВР (а) и при двойной модуляции АМ + ЧМ (б)

P не будут приводить к существенному сдвигу сигнала ошибки в КСЧ. Более того, как показали эксперименты, при $P = P_{\text{opt}}$ малые вариации СВЧ-мощности также слабо отражаются на сдвиге частоты сигнала ошибки. Оценка долговременной стабильности частоты (только при учете указанных факторов) приводит к девиации Аллана порядка 10^{-15} за 24 ч. Нелинейный характер $\Delta f(P)$ можно объяснить суммарным влиянием динамического штарковского эффекта и сдвига, вызванного асимметрией формы линии резонанса КПН [5].

Литература

1. Nydam S., Anderson J., Barnwell N. et al. A Compact Optical Time Transfer Instrument for Ground-to-Space Synchronization of Clocks // Proc. AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition. 2017.
2. Freeman S.E., Emokpaе L., Rogers J.S., Edelmann G.F. Beamforming using chip-scale atomic clocks in a controlled environment // J. Acous. Soc. Am. 2018. Vol. 143. P. EL74–EL80.
3. Bandi T.N., Desai N.M., Kaintura J. et al. Advanced space rubidium atomic frequency standard for satellite navigation // GPS Solutions. 2022. Vol. 26 (54).
4. Miletic D., Affolderbach C., Hasegawa M. et al. AC Stark-shift in CPT-based Cs miniature atomic clocks // Appl. Phys. 2012. Vol. 109 (89).
5. Yudin V.I., Basalaeв M. Yu., Taichenachev A.V. et al. Frequency shift caused by the line-shape asymmetry of the resonance of coherent population trapping // Phys. Rev. 2023. Vol. 108. P. 013103.