

ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЕ СУБДОПЛЕРОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ В ПАРАХ АТОМОВ ЦЕЗИЯ В ПОЛЕ ВСТРЕЧНЫХ БИХРОМАТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

✉ А. М. Михайлов, Д. В. Бражников

*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

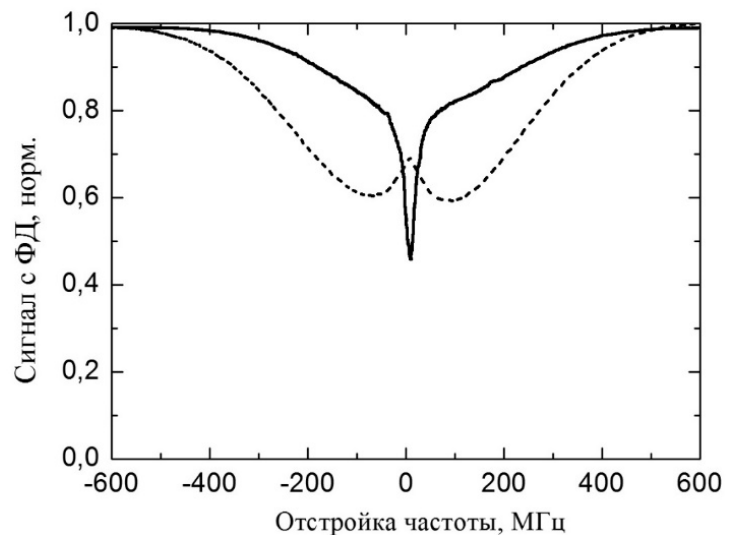
✉ a.mikhailov5@g.nsu.ru

Создание высокостабильных стандартов частоты и времени — важное направление современной метрологии. В настоящее время наиболее стабильные и точные стандарты частоты и времени основаны на принципах квантовой физики — квантовые стандарты частоты (КСЧ). При этом в связи с трудностями переноса стабильности частоты из оптического диапазона в радиодиапазон, а также низким качеством резонансов в оптической области при использовании миниатюрных газовых ячеек направление, связанное с миниатюрными оптическими КСЧ, долгое время не развивалось. Эта ниша была занята КСЧ микроволнового диапазона на основе явления когерентного пленения населенностей (КПН), или двойного радиооптического резонанса (ДРОР). Существенный прогресс в миниатюризации КСЧ оптического диапазона наступил около пяти лет назад после публикации серии работ [1–3] исследователями из NIST (г. Болдер, США), в которых была использована двухфотонная оптическая спектроскопия атомов рубидия в микроячейке и был предложен способ переноса стабильности в радиодиапазон с помощью твердотельных микрорезонаторов.

В 2016 году группой французских исследователей было продемонстрировано [4], что при использовании встречных двухчастотных пучков с ортогональными линейными поляризациями в парах атомов цезия наблюдаются субдоплеровские резонансы с необычно высоким контрастом и отношением амплитуда / ширина, которое особенно важно для достижения высокой стабильности частоты оптического КСЧ. В работе [5] при участии российских ученых было предложено использовать эти субдоплеровские резонансы для создания оптического КСЧ с использованием микроячейки с парами цезия.

Несмотря на успешную экспериментальную реализацию субдоплеровской спектроскопии в бихроматических пучках, теория самих резонансов ограничивалась либо численными расчетами [5], либо аналитическими расчетами, но для упрощенной трехуровневой модели атома (Λ -схема) [6]. В настоящей работе нами рассматривается реальная структура уровней энергии в атоме цезия (в D1-линии) как с учетом различных процессов релаксации в атоме, так и с учетом произвольных эллиптических поляризаций встречных пучков. С помощью формализма поляризационных моментов (неприводимых тензорных операторов) и теории возмущений было получено аналитическое выражение для показателя поглощения одного из встречных пучков (пробного). Это выражение позволяет выделить различные нелинейные оптические эффекты, формирующие результирующий контур поглощения света, и сравнить их относительный вклад. В частности, было показано, что за образование высококонтрастного нелинейного пика в поглощении ответственны два типа КПН-состояний в атоме: первый тип зависит как от координаты вдоль светового луча, так и от параметров поляризации, тогда как второй тип — только от параметров поля-

ризации пучков. Также было продемонстрировано, что при некоторых условиях резонанс может приобретать асимметрию и сдвиг, что важно для метрологических приложений. Полученные результаты дополняют построенную нами ранее [6] аналитическую модель на основе Λ -схемы, позволяя учитывать различные значения эллиптичностей встречных пучков, углы между осями эллипсов поляризации и задавать различные значения Рамановской отстройки и напряженности полей для каждой из частот в каждом из пучков. В целом полученные результаты позволили расширить знания о наблюдаемом эффекте высокого контраста субдоплеровских резонансов в бихроматических пучках и позволяют определить наилучшие условия для их применения в квантовой метрологии.



Субдоплеровский резонанс в поле встречных световых пучков в стандартной одночастотной конфигурации (штрих.), в которой возбуждался оптический переход $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$ в D_1 линии и в новой двухчастотной конфигурации (сплош.) при возбуждении сразу двух переходов $F_g = 3,4 \rightarrow F_e = 4$. Температура паров цезия $\approx 60^\circ\text{C}$. Полная интенсивность лазерного поля в ячейке $\approx 30 \text{ мВт/см}^2$

Список литературы

1. Hummon M. T. et al. Photonic chip for laser stabilization to an atomic vapor with 10^{-11} instability // *Optica*. 2018. Vol. 5. P. 443.
2. Newman Z. L. et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock // *Optica*. 2019. Vol. 6, № 5. P. 680.
3. Maurice V. et al. Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28. P. 24708.
4. Abdel Hafiz M. et al. Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser // *Opt. Lett.* 2016. Vol. 41. P. 2982.
5. Brazhnikov D. V. et al. Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: Extended theoretical model and microcell-based experiments // *Phys. Rev. A*. 2019. Vol. 99. P. 062508.
6. Михайлов А. М., Будо Р., Бражников Д. В. Форма линии субдоплеровских резонансов в газе атомов щелочных металлов в поле встречных бихроматических лазерных пучков // *ЖЭТФ*. 2021. Т. 60, № 1. С. 818.