

## РАМЗИ-ЭФФЕКТ В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СРЕДЕ

*С.А. Мусеев<sup>1</sup>, К.И. Герасимов<sup>1</sup>, М.М. Миннегалиев<sup>1</sup>, И.В. Брекоткин<sup>1</sup>,  
Е.С. Мусеев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Казанский квантовый центр  
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

<sup>2</sup> Университет Макгилла, Физический факультет  
Монреаль, Канада

**Аннотация.** Экспериментально обнаружено сужение линий резонансов Рамзи в оптически плотной двухуровневой атомной среде. Показано, что сужение линий обусловлено эффектами сигналов многократного фотонного эха, возникающих в глубине оптически плотной атомной среды, что также подтверждается наблюдением этих сигналов на выходе из среды. Аналитические решения, полученные с использованием теоремы о площадях импульса и ее обобщения на фотонное эхо совместно с методом обратной задачи рассеяния, хорошо описывают основные закономерности рассматриваемых процессов и спектроскопические параметры резонансов Рамзи.

**Ключевые слова:** резонанс Рамзи, двухуровневая среда, фотонное эхо.

### Введение

При воздействии на двухуровневую среду, обладающую неоднородным характером уширения резонансного перехода, двумя последовательными оптическими импульсами можно наблюдать осциллирующую зависимость вероятности возбуждения атома от соответствующей частотной отстройки  $\Delta$  относительно центральной частоты – резонансы Рамзи. Данный эффект широко используется в спектроскопии высокого разрешения, в создании высокоточных атомных часов и разработки стандартов частоты, где важную роль играет возбуждение узких линий Рамзи резонансов [1]. В данной работе было проведено экспериментальное наблюдение и теоретический анализ сужения резонансов Рамзи в оптически плотной двухуровневой среде.

### Теоретическая модель и экспериментальное наблюдение сужения линий Рамзи резонансов

С использованием метода обратной задачи рассеяния [2] было получено выражение для вероятности возбуждения атомов  $P_{bb}(\Delta, z, t)$  в зависимости от их частотной расстройки  $\Delta$  и местоположения  $z$  после воздействия лазерных импульсов и окончания возбуждения в среде последовательности сигналов фотонного эха:

$$P_{bb}(\Delta, z, t) = \frac{e^{-t/T_1} P_{bb}(\Delta, 0, 0) e^{-\alpha(\Delta)z}}{1 - P_{bb}(\Delta, 0, 0)(1 - e^{-\alpha(\Delta)z})}, \quad (1)$$

где

$$P_{bb}(\Delta, 0, 0) = \frac{1}{2} \sin^2[\theta(\Delta)] \{1 + \cos \varphi(\Delta)\}, \quad (2)$$

$\theta$  – площадь импульса,  $\alpha L$  – оптическая плотность среды,  $\tau$  – время между действием импульсов  $\varphi(\Delta) = \varphi_{2,1} + \Delta\tau$  и в уравнении (2) мы рассматриваем только случай равных площадей лазерных импульсов  $\theta_1(\Delta) = \theta_2(\Delta) = \theta(\Delta)$  и полагаем  $\theta(\Delta, z = 0, x, y) \cong \theta(\Delta, z = 0, x = 0, y = 0) \equiv \theta(\Delta)$ ,  $\varphi_{2,1} = \varphi_2 - \varphi_1$  — разность фаз лазерных импульсов  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$ , влияние конечного времени жизни возбужденного уровня  $T_1$ , которое принимается много большим времени релаксации фазы  $T_2$ , представлено в (1). Решение (1) описывает экспоненциальное сужение линий  $\delta\omega_R$  с ростом оптической толщины оптического перехода ( $\delta\omega_R = \frac{4}{\tau} e^{-\alpha L/2}$ ) при  $\theta(\Delta) = \pi/2$ . Анализ условий формирования узких линий показал, что основой этого эффекта является генерация многократных сигналов фотонного эха в оптически плотной среде [3], вызывающих появление спектрально селективного эффекта в самоиндуцированной прозрачности распространения интенсивных световых импульсов в резонансной среде.

Для демонстрации эффекта сужения линии Рамзи резонансов на рис. 1 представлены экспериментальные зависимости  $P_{bb}(\Delta, z, t)$  на кристалле  $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  ( $c=0.005\%$ ), для различной оптической глубины резонансного перехода. Резонансы Рамзи возбуждались двумя, разделенными временным интервалом  $\tau = 4$  мкс, лазерными импульсами, имеющими временную длительностью  $\delta t_s = 0.9$  мкс, ( $\delta t_s \ll T_2$ ). На рисунке 1 показаны экспериментально измеренные значения вероятности возбуждения атомов  $P_{bb}(\Delta, \alpha L, 0)$  для оптических глубин от  $\alpha L = 0.8$  до  $\alpha L = 3.8$  кривой черного цвета, где наблюдается значительное сужение пиков с ростом оптической толщины  $\alpha L$ . Фиолетовая и зеленая пунктирные кривые являются расчетами по формуле 1 для площадей возбуждающих импульсов  $\theta = 0.5\pi$  пи и  $\theta = 0.48\pi$ , соответственно. Согласие теории с экспериментом существенно улучшилось при учете гауссова распределения интенсивности в поперечном сечении лазерных лучей и размера перетяжек в их пересечениях. Результаты таких численных расчетов показаны кривой синего цвета.

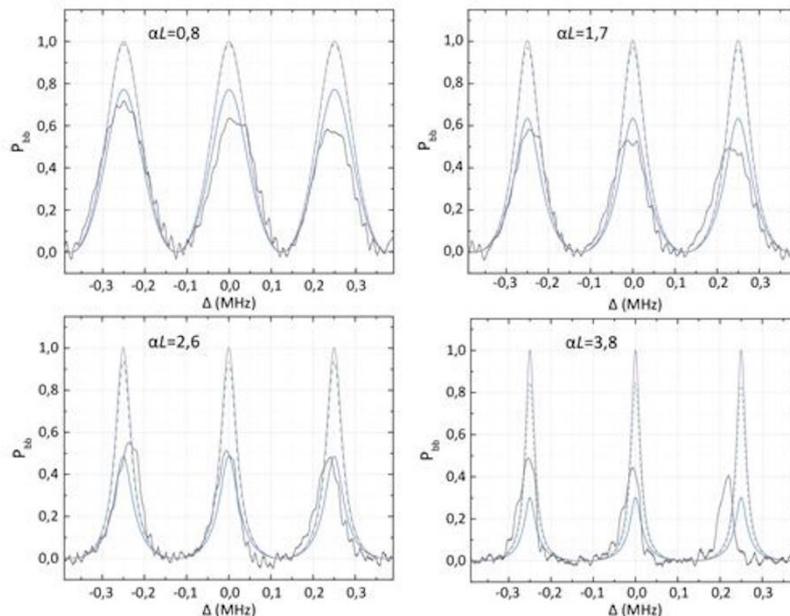


Рис. 1. Спектры резонансов Рамзи измеренные для разной оптической глубины  $\alpha L$  (черная кривая), теоретические спектры, полученные по формуле (1) для  $\theta = 0.5\pi$  пи и  $\theta = 0.48\pi$  (фиолетовая и зеленая пунктирные линии соответственно), и теоретические спектры, полученные с учетом гауссова распределения лазерных лучей и размеры перетяжек в их пересечениях (синяя кривая) для  $\theta = 0.48\pi$ .

Полученные экспериментальные результаты показали сужение линий Рамзи резонанса более чем в 2.5 раза ростом оптической толщины атомного перехода. Существующие кристаллы с редкоземельными ионами и охлажденные атомные газы могут обладать оптической толщиной  $10^2$  и  $10^3$ , при которой сужение линий Рамзи резонанса может достигать рекордных значений и ограничиваться лишь естественной шириной атомных переходов.

### Заключение

Обнаруженное в оптически плотных средах сильное сужение линий резонанса Рамзи и разработанный подход к их наблюдению открывают перспективы использования этого эффекта при изучении нелинейного когерентного взаимодействия световых импульсов с атомными ансамблями, формирования суженных резонансов большой амплитуды и реализации атомной спектроскопии высокого разрешения в таких средах. Предсказываемое экспоненциальное сужение линий Рамзи резонанса открывает новые перспективы в создании высокоточных оптических стандартов частоты.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Рег. номер НИОКТР 125012300688-6).*

### Список литературы

1. Ludlow A.D. Optical atomic clocks / A.D. Ludlow, M.M. Boyd, J. Ye et al. // *Reviews of Modern Physics*. – 2015. – Vol. 87. – № 2. – P. 637-701.
2. Ablowitz M.J. Coherent pulse propagation, a dispersive, irreversible phenomenon / M.J. Ablowitz, D.J. Kaup, A.C. Newell // *Journal of Mathematical Physics*. – 1974. – Vol. 15. – № 11. – P. 1852-1858.
3. Moiseev S.A. Photon echoes in optically dense media / S.A. Moiseev, M. Sabooni, and R.V. Urmancheev // *Phys.Rev.Research*. – 2020. – Vol. 2. – P.012026(R).

## RAMSEY EFFECT IN OPTICALLY THICK RESONANCE MEDIUM

*S.A. Moiseev<sup>1</sup>, K.I. Gerasimov<sup>1</sup>, M.M. Minnegaliev<sup>1</sup>, I.V. Brekotkin<sup>1</sup>, E.S. Moiseev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,  
Kazan quantum center  
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

<sup>2</sup>McGill University, Department of Physics  
Montreal, Canada

**Abstract.** A Ramsey resonance with narrowed lines is experimentally discovered in an optically thick two level atomic medium. We show that the formation of the narrowed lines is caused by the effects of multiple photon echo signals originating in the depths of the optically thick atomic medium, which is also confirmed by the observation of these signals at the medium output. The analytical solutions obtained using the pulse area theorem and its generalization to photon echo together with the inverse scattering method well describe the main patterns of the processes under consideration and spectroscopic parameters of Ramsey resonances.

**Keywords:** Ramsey resonance, two-level medium, photon echo.

Статья представлена в редакцию 01.03.2025