

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНКУРЕНТНЫХ РЕЗОНАНСОВ КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

М.В.Данилейко, А.М.Фаль, В.П.Федин, Л.П.Яценко

Для регистрации сверхмалых изменений оптической длины предложено использовать нелинейные конкурентные резонансы в излучении кольцевых лазеров, обладающие благодаря эффекту конкуренции встречных волн значительно большей крутизной по сравнению с резонансами в линейных лазерах. Экспериментально достигнута абсолютная чувствительность регистрации периодических возмущений положения одного из зеркал резонатора $5 \cdot 10^{-7} \text{ \AA}$ на базе 0,85 м в кольцевом He – Ne/CH₄-лазере.

В работе ¹ предложено использовать узкие резонансы в излучении газовых лазеров с нелинейным поглощением для создания детекторов гравитационных волн. Метод основан на регистрации переменной составляющей в выходной мощности лазера, возникающей при периодических перемещениях одного из зеркал резонатора; частота излучения при этом удерживается в области максимальной крутизны резонанса. Предельная чувствительность метода, ограниченная фотонным шумом, превышает чувствительность лазерных интерферометрических методов ^{2, 3} в $k(\Omega_m/\Gamma)$ раз (k и Γ – контрастность и ширина нелинейного резонанса, Ω_m – межмодовое расстояние). В линейном He – Ne/CH₄-лазере в ¹ достигнута абсолютная чувствительность $6 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}$ на базе 5 м.

Дальнейшее повышение чувствительности с помощью уменьшения ширины резонансов в линейных лазерах с внутрирезонаторным поглощением ограничивается одновременным уменьшением контрастности. В настоящей работе для регистрации малых изменений оптической длины резонатора предлагается использовать нелинейные конкурентные резонансы в излучении кольцевых лазеров, обладающие благодаря эффекту конкуренции встречных

волн значительно большей интенсивностью, меньшей шириной и, как следствие, значительно большей крутизной по сравнению с резонансами в линейном лазере ⁴.

Как известно ⁴, в кольцевом одномодовом газовом лазере вблизи центра линии усиления энергетически более выгодным может быть режим генерации одной бегущей волны. При введении в резонатор нелинейно-поглощающей среды область одноволновой генерации расширяется, однако в узкой области отстроек $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ частоты ω излучения лазера от центра линии поглощения ω_0 устойчивым остается режим генерации двух встречных волн. Интенсивности встречных волн в области конкурентного резонанса в приближении слабого насыщения усиления и поглощения даются выражением ⁵

$$P_{1,2} = \frac{P_0}{2} \left[1 \pm \frac{\delta}{\chi - \mu\zeta \Delta\omega^2 / (\gamma^2 + \Delta\omega^2)} \right], \quad (1)$$

где $\delta = \frac{2(\eta_1 - \eta_2)}{\eta_1 + \eta_2} \ll 1$ — относительная разность превышений $\eta_{1,2}$ накачки над пороговым значением для встречных волн; χ — малый параметр, характеризующий степень конкуренции встречных волн; μ — отношение линейных коэффициентов поглощения и усиления; ζ — отношение параметров насыщения поглощающей и усиливающей сред; γ — однородная ширина линии поглощения; P_0 — суммарная интенсивность. Ширина конкурентного резонанса (1) определяется выражением

$$\delta\omega = 2 \sqrt{\frac{\chi - \delta}{\mu\zeta - \chi + \delta}} \gamma. \quad (2)$$

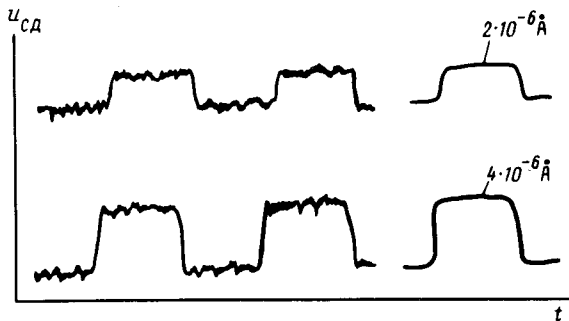
Для целей регистрации малых перемещений наиболее интересны "столбикообразные" резонансы, для которых характерны практически плоская вершина и большая скорость изменения интенсивности при $\Delta\omega \approx \pm \delta\omega/2$. Такие резонансы возникают при выполнении условий $\delta^2 \ll \chi \ll \mu\zeta$, которые достаточно просто реализуются на эксперименте.

Минимально обнаружимая амплитуда периодического изменения периметра лазера $L = L_0 + \Delta L \cos \Omega t$ определяется флуктуационным шумом фотонов, который является принципиально ограничивающим фактором для всех лазерных методов измерения малых перемещений. Считая лазер настроенным на область максимальной крутизны конкурентного резонанса $\Delta\omega \approx \delta\omega/2$, для ΔL_{min} при $\delta \ll \chi \ll \mu\zeta$ можно легко получить

$$\Delta L_{min} = \frac{\lambda}{2} \frac{\delta\omega}{\Omega_m} \frac{\delta}{\chi} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{P_0} \Delta f}, \quad (3)$$

где λ — длина волны излучения; Δf — полоса пропускания системы регистрации. Формула (3) аналогична формуле (1) в ¹, однако при использовании конкурентных резонансов роль контрастности $k \ll 1$ играет величина $\chi/\delta \gg 1$, а ширина конкурентного резонанса $\delta\omega$ значительно меньше ширины резонанса $\Gamma \approx \gamma$ в линейном лазере.

В эксперименте использовался кольцевой He — Ne/CH₄-лазер на длине волны 3,39 мкм. Периметр резонатора 0,85 м, длина поглощающей ячейки 0,3 м, давление метана 3 мторр, выходная мощность 0,5 мВт. Ширина конкурентного резонанса составляла 50 кГц, значение параметра $\delta/\chi \approx 10^{-1}$. Стабилизация частоты излучения осуществлялась на нуль второй производной зависимости выходной мощности от частоты, что обеспечивало постоянную настройку на область резонанса с максимальной крутизной. Ширина спектра излучения лазера составляла ≈ 1 кГц, ширина полосы пропускания системы регистрации Δf равна 1 Гц, ширина полосы обработки системы АПЧ 800 Гц. Положение одного из зеркал резонатора модулировалось путем подачи на пьезокерамику синусоидального напряжения с частотой 200 кГц. Система регистрации состояла из малозумящего охлаждаемого фотоприемника, избирательного усилителя, синхронного детектора и автоматизированной системы накопления и первичной обработки данных. Пьезокерамика была предварительно прокалибрована



Сигнал на выходе синхронного детектора (слева) и сигнал с выхода системы накопления и обработки данных (справа)

в рабочем диапазоне частот. На рисунке представлены результаты измерений. Резкое изменение выходного напряжения синхронного детектора соответствует включению модуляции положения зеркала, а величина ступеньки в выходном сигнале пропорциональна амплитуде перемещения. Минимально регистрируемая амплитуда составила $5 \cdot 10^{-17}$ м. Чувствительность измерений ограничивалась шумами, возникающими в результате преобразования частотных флуктуаций лазера в амплитудные при настройке на область резкого изменения интенсивности. Применение оптической схемы с опорным стабилизированным лазером, лазером-гетеродином и системами фазовой автоподстройки частоты ¹ позволит значительно уменьшить эту составляющую шумов и достигнуть чувствительности $\sim 10^{-19}$ м, определяющейся для используемых конкурентных резонансов фотонным шумом.

Приведенные результаты указывают на перспективность применения конкурентных резонансов кольцевых лазеров для регистрации сверхмалых периодических перемещений и для создания детекторов гравитационных волн.

Литература

1. Багаев С.Н., Дычков А.С., Чеботаев В.П. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 85.
2. Moss G.E., Miller L.R., Forward R.L. Appl. Opt., 1971, 10, 2495.
3. Forward R.L. Phys. Rev., 1978, D17, 379.
4. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилейко М.В., Никитин В.В. ЖЭТФ, 1971, 60, 117.
5. Данилейко М.В., Фаль А.М., Федин В.П., Шпак М.Т., Яценко Л.П. Квантовая электроника, 1982, 9, 2013.