

ПРИМЕНЕНИЕ УЗКИХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ И ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

С.Н.Багаев, А.С.Дычков, В.П.Чеботаев

Сообщаются первые результаты по использованию узких оптических резонансов для прецизионных измерений малых перемещений. Эксперименты были проведены с помощью He – Ne-лазера на $\lambda = 3,39$ мкм с метановой ячейкой. Использовались нелинейные резонансы в метане шириной 50 кГц и интенсивностью порядка 1 мВт. Периодическое возмущение подавалось на одно из зеркал резонатора лазера. Достигнутая абсолютная чувствительность измерений составила $6 \cdot 10^{-6}$ Å на базе $5 \cdot 10^2$ см.

1. Для решения ряда прикладных задач и проведения прецизионных физических экспериментов используются оптические методы, позволяющие регистрировать малые изменения фазы оптических сигналов, возникающие при изменении длины оптического пути под действием различных факторов. Недавно в связи с проблемой обнаружения гравитационных волн были изучены возможности двух и многолучевой интерферометрии. Методы двухлучевой лазерной интерферометрии позволили измерить малые изменения оптической фазы $\sim 10^{-7}$ рад и длины $\sim 10^{-12}$ см [1]. Применение интерферометров Майкельсона с большим числом проходов луча в каждом плече [2, 3], многолучевых интерференционных систем [4], а также лазеров с резонатором Фокса – Смита [5], позволяет значительно повысить чувствительность измерений.

Измерения оптической фазы или частоты генерации, которые возникают при малых перемещениях зеркала, могут быть измерены с помощью узких оптических резонансов и высокостабильных по частоте лазеров [4, 6]. В настоящей работе сообщается об использовании узких оп-

тических резонансов для измерения малых периодических смещений с относительной чувствительностью 10^{-16} .

2. Метод измерения основан на регистрации малых изменений частоты генерации лазера, которые возникают при изменении длины резонатора или показателя преломления среды под действием возмущений. Принципиальная схема метода представлена на рис.1. Периодическое возмущение, действуя на одно из зеркал резонатора лазера, вызывает изменение длины резонатора l на Δl а, следовательно, и частоты генерации ν на $\Delta \nu = \frac{\Delta l}{l} \nu$. С помощью узких резонансов насыщенного поглощения изменение частоты генерации преобразуется в изменение мощности излучения лазера ΔP , которое затем регистрируется фотодетектором (см. рис.1). Для получения максимальной чувствительности необходимо настраивать частоту лазера в область наибольшей крутизны резонанса. Чувствительность преобразования растет при увеличении интенсивности резонанса и уменьшении его ширины.

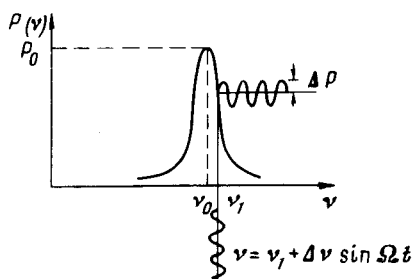
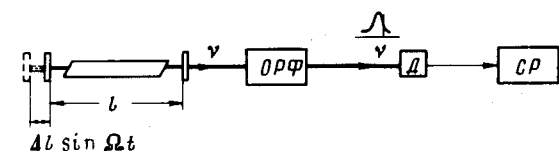


Рис.1. Принципиальная схема измерения малых смещений с помощью оптических резонансов: ОРФ – оптический резонансный фильтр, СР – система регистрации, Д – фотодетектор

Минимально регистрируемое изменение длины резонатора определяется шумами лазерного излучения и измерительного тракта. Принципиально ограничивающим фактором является фотонный шум, обусловленный квантовым характером излучения лазера. Простые вычисления показывают, что для резонанса лоренцовой формы минимально обнаружимое смещение Δl , ограниченное только флуктуационным шумом фотонов, определяется выражением:

$$\Delta l_{min} \approx \frac{4}{3\sqrt{3}} \lambda \frac{\Gamma}{\nu_M} \frac{1}{k} \sqrt{\frac{h\nu}{P_0} \Delta f}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, Γ – полуширина резонанса, $\nu_M = c/2l$ – межмодовое расстояние, k – контраст резонанса, P_0 – мощность излучения лазера, Δf – полоса измерительного тракта.

Из (1) видно, что по сравнению с методом интерферометра Майкельсона [1] применение оптического резонанса позволяет увеличить чувствительность измерений в ν_M/Γ раз. Оценка Δl_{min} по формуле (1) для известных параметров He – Ne-лазера на $\lambda = 3,39$ мкм и нелинейного

резонанса в метане (см. [7]) дает $\Delta l_{min} \approx 10^{-16}$ см/Гц^{1/2} ($\frac{\Delta l}{l} \approx 10^{-18}$). В реальных условиях эксперимента чувствительность измерений падает из-за присутствия дополнительных шумов, которые обусловлены флуктуациями мощности излучения из-за нестабильности частоты генерации и плазмы разряда, шумами фотодетектора и т.п. Величина этих шумов зависит от конкретных условий эксперимента и может значительно превышать фотонный шум.

3. Эксперименты были проведены с He – Ne-лазером на $\lambda = 3,39$ мкм с метановой ячейкой поглощения. Использовался нелинейный резонанс в метане шириной $5 \cdot 10^4$ Гц, контрастом $\approx 70\%$ и интенсивностью ≈ 1 мВт. Длина резонатора составляла $5 \cdot 10^2$ см. Схема экспериментальной установки приведена на рис.2. Она включала стабильный по частоте He – Ne/CH₄ лазер 1 с узкой линией излучения, описанный в [7] и исследуемый лазер 2. С помощью электронной системы частотной автоподстройки (ЧАП) частота лазера 2 привязывалась к частоте лазера 1, что позволяло обеспечить необходимую стабильность частоты излучения лазера 2. При этом частота лазера 2 точно устанавливалась в область максимальной крутизны резонанса. Периодическое возмущение длины резонатора обеспечивалось путем подачи синусоидального сигнала на предварительно прокалиброванный пьезокерамический элемент, на котором было закреплено одно из зеркал резонатора. Частота возмущающего сигнала Ω не должна была попадать в полосу обработки ЧАП, чтобы исключить влияние последнего на результаты измерений. В нашем случае Ω была равна 15 кГц. Промодулированное по интенсивности излучение лазера 2 поступало на фотодетектор, сигнал с выхода которого после синхронного детектирования регистрировался на самописце.

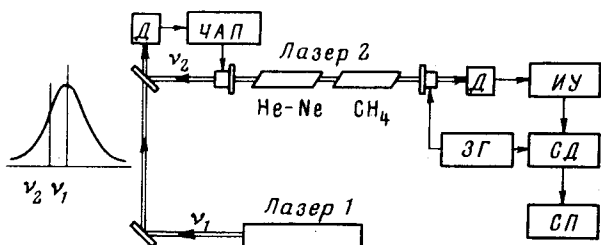


Рис.2. Схема экспериментальной установки: ИУ – избирательный усилитель, СД – синхронный детектор, ЗГ – звуковой генератор, СП – самописец, ЧАП – частотная автоподстройка, Д – фотодетектор

На рис.3 представлена характерная запись сигнала при различных величинах периодического возмущения. Время усреднения составляло 10 сек. Минимально обнаружимая величина смещения зеркала, определяемая уровнем шума, составляла $6 \cdot 10^{-6}$ А. Относительная чувствительность была при этом $\approx 10^{-16}$. Измерения показали, что наблюдаемый шум полностью определялся шумом фотодетектора, который составляет $3 \cdot 10^{-7}$ В/Гц^{1/2} и примерно на три порядка больше фотонного шума.

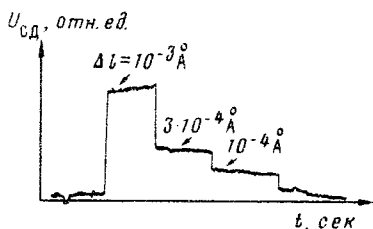


Рис.3. Запись сигнала на выходе СД при различных величинах перемещения зеркала Δl

4. Использование более узких резонансов насыщенного поглощения для увеличения чувствительности ограничено из-за уменьшения их интенсивности. Перспективным может оказаться применение двухфотонных резонансов без доплеровского сдвига [8] в коротковолновой области спектра, в которых насыщение интенсивности при мощности ~ 1 Вт еще не происходит. Применение двухфотонных резонансов требует разработки высокостабильных по частоте перестраиваемых лазеров. Оценка по формуле (1) для следующих параметров системы: $\lambda = 0,5$ мкм, $P_0 \sim 1$ Вт, $l \sim 1$ см, $k \approx 1$, $\Gamma \approx 1$ кГц, $\Delta f = 1$ Гц дает $\Delta l \sim 10^{-21}$ см ($\Delta l/l \sim 10^{-21}$).

Приведенные результаты эксперимента и оценки указывают на возможность создания детекторов для обнаружения гравитационных волн с использованием узких оптических резонансов.

Авторы благодарят И.М.Белоусову и А.А.Мака за стимулирующие дискуссии и В.Г.Гольдорта за обсуждения и помощь в работе.

Институт теплофизики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
5 августа 1980 г.
18 ноября 1980 г.

Литература

- [1] G.E. Moss, L.R.Miller, R.L.Forward. Appl. Optics, **10**, 2495, 1971.
- [2] R.L.Forward. Phys. Rev. D, **17**, 379, 1978.
- [3] H.Billing, K.Maisehberger, A.Rüdiger, R.Shilling, L.Schnapp, W.Winkler. J. Phys. E: Sci. Instrum., **12**, 1043, 1979.
- [4] И.М.Белоусова, Л.Ф.Витушкин, И.П.Иванов, Н.И.Колосницын, А.А.Поманский, В.И.Синцов, В.П.Чеботаев. Доклад на совместной научной сессии Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики, Москва, март 1980.
- [5] M.Weksler, Z.Vager, G.Neumann. IEEE J. of Quantum Electron., QE-16, 785, 1980.
- [6] С.Н.Багаев, А.С.Лычков, В.П.Чеботаев. Доклад на 5-й Вавиловской конференции по нелинейной оптике, Новосибирск, июнь, 1979.
- [7] С.Н.Багаев, А.С.Дычков, В.П.Чеботаев. Письма в ЖТФ, **5**, 590, 1979.
- [8] Л.С.Василенко, В.П.Чеботаев, А.В.Шишаев. Письма в ЖЭТФ, **12**, 161, 1970.