

Комплексный метод измерения потерь и усиления в активных и пассивных кольцевых лазерных резонаторах

В.В.Азарова, Н.А.Ефремова

Рассмотрен комплексный метод измерения параметров лазерных резонаторов. Объединение двух фундаментальных методов измерения добротности резонаторов, а именно метода, основанного на анализе спектров пропускания многолучевых интерферометров, и метода измерения времени затухания излучения в высокодобротных резонаторах в одном измерительном устройстве, позволило не только практически неограниченно расширить диапазон измеряемых параметров, но и получить новый метод измерения коэффициентов усиления активной среды в резонаторе.

Ключевые слова: лазерные резонаторы, зеркала, измерение потерь, измерение коэффициента усиления активной среды.

1. Введение

Одним из основных элементов лазерных гироскопов являются лазерные зеркала. Хорошие зеркала для лазерных резонаторов должны обеспечивать высокие коэффициенты отражения, малое рассеяние, долговременную устойчивость к УФ излучению разряда, температурным изменениям и взаимодействию с He–Ne-плазмой. Рассеяние на зеркалах, составляющее часть суммарных потерь, и особенно рассеяние «назад», приводящее к связи встречных волн в резонаторе, должны быть сведены к минимальной величине. Рассеяние на зеркалах зависит в основном от качества подложек зеркал, и определение шероховатости поверхности подложек порядка нескольких ангстрем является метрологической проблемой. Общие потери на зеркалах влияют на предельную точность лазерных гироскопов [1, 2] и определяют их надежность. При малых потерях требуются низкие коэффициенты усиления и соответственно малые токи разрядов, при которых уменьшается распыление катодов и воздействие плазмы на поверхности зеркал резонаторов. Коэффициенты отражения зеркал на сегодняшний день составляют примерно 99.995 %, соответственно суммарные потери на рассеяние, пропускание и поглощение в диэлектрических слоях не превышают 0.005 %. Измерение таких величин является сложной задачей.

В лазерных гироскопических датчиках используются кольцевые резонаторы моноблочного типа. Требования к качеству таких резонаторов очень высоки. Методы контроля и юстировки резонаторов приобретают особое значение при изготовлении кольцевых лазеров с моноблочными резонаторами. Такие лазеры компактны, малочувствительны к вибрациям и ударам. Они, как правило, не разборные и не юстируемые, поэтому на различных этапах их изготовления очень важно осуществлять контроль параметров резонаторов. Основными параметрами являются: качество юстировки зеркал,

сферичность резонатора, коэффициент селекции мод, суммарные внутрирезонаторные потери, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент усиления активной среды. Проблемы измерения параметров подложек зеркал, многослойных диэлектрических покрытий, активной смеси и резонаторов рассмотрены в целом ряде работ [3–12]. В настоящей работе мы опишем новый комплексный метод измерения параметров кольцевых лазерных резонаторов, зеркал и усиливающей среды.

Идея комплексного метода измерения заключается в расширении диапазона измерения внутрирезонаторных потерь путем объединения двух фундаментальных методов: анализа спектра пропускания резонатора и измерения времени затухания излучения в резонаторе в одном компактном устройстве. Для юстировки резонатора и контроля дифракционных потерь поперечных мод резонатора необходимо иметь возможность измерять сравнительно большие внутрирезонаторные потери в диапазоне 0.1–5 %. Для этой цели используют анализ спектра пропускания. Контроль резонаторных зеркал для гироскопических датчиков требует методов и аппаратуры повышенной чувствительности, чтобы измерять коэффициенты отражения $R > 0.99995$ (т.е. потери менее 0.005 %). Измерение времени затухания позволяет решить эту задачу. Кроме того, чувствительность метода анализа спектра пропускания можно повысить, используя так называемую лупу времени, которая растягивает импульс пропускания во времени. Комплексный метод позволяет также измерять коэффициенты усиления активной среды.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрение проведем на примере кольцевого лазерного резонатора с четырьмя зеркалами и двумя активными промежутками. На рис.1 приведена схема резонатора для измерения коэффициентов отражения зеркал, коэффициентов усиления активной смеси, суммарных внутрирезонаторных потерь на различных поперечных модах и т. д.

Излучение с частотой ω и амплитудой электрического поля E_{00} вводится через одно зеркало в резонатор и

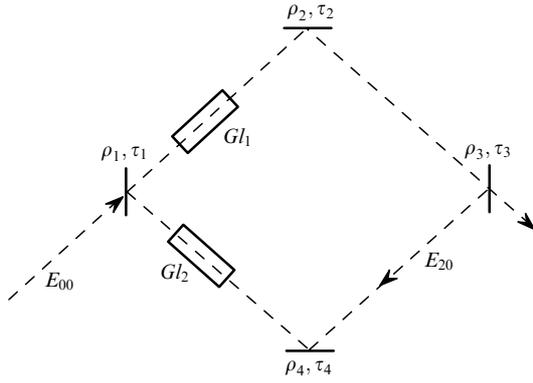


Рис.1. Схема активного резонатора .

выходит через другое с амплитудой E_{20} . С учетом фазовых изменений при многократном проходе излучения по резонатору электрическое поле на выходе описывается выражением

$$E_{20} \exp(-i\omega t) = E_{00} K_{mnq} \exp(-i\omega t) [1 - \rho \exp(Gl + i\delta)]^{-1}, \quad (1)$$

где

$$K_{mnq} = C_{mnq} \tau_1 \rho_2 \tau_3 \exp(Gl_1); \quad (2)$$

C_{mnq} – коэффициент согласования мод, показывающий эффективность прохождения излучения моды TEM_{mnq} в резонаторе; τ_1 и τ_3 – коэффициенты пропускания по амплитуде входного и выходного зеркал; $\rho = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4$ – суммарный коэффициент отражения зеркал по амплитуде; G – коэффициент усиления для данной моды; $\delta = \omega l/c + \varphi$ – оптический сдвиг фаз при круговом обходе резонатора с учетом поперечной структуры поля (φ); $l = l_1 + l_2$ – суммарная длина активного промежутка.

Фотоприемник регистрирует интенсивность прошедшего света I_t . Отношение интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего света I_i имеет вид

$$\frac{I_t}{I_i} = A \left\{ 1 + \frac{4\sqrt{R}}{[1 - \sqrt{R} \exp(Gl)]^2} \sin^2 \frac{\delta}{2} \exp(Gl) \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где

$$A = C_{mnq}^2 \frac{T_1 T_3 R_2 \exp(2Gl_1)}{[1 - \sqrt{R} \exp(Gl)]^2}, \quad (4)$$

$$T_1 = \tau_1^2; \quad T_3 = \tau_3^2; \quad R_2 = \rho_2^2; \quad R = \rho^2.$$

Если сканировать частоту зондирующего лазера или периметр исследуемого резонатора, подавая пилообразное напряжение на пьезодвигатель одного из зеркал, можно наблюдать периодические пики пропускания резонатора. Для резонаторов с высокоотражающими зеркалами, учитывая, что $R_i \simeq 1$, после несложных преобразований вычислим ширину пика пропускания на полувысоте, исходя из следующих условий:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{A}{2}, \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{2} = m\pi \pm \frac{\varepsilon}{2}, \quad (6)$$

$$\frac{4\sqrt{R} \exp(Gl)}{[1 - \sqrt{R} \exp(Gl)]^2} \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 = 1, \quad (7)$$

где ε – малое изменение фазы. Предположив, что $R^{1/4} \simeq 1$ и $G \ll 0.1$, получаем

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{2} - Gl, \quad (8)$$

где $\sigma = 1 - R$ – общие потери резонатора, включающие в себя потери на рассеяние, поглощение и пропускание, а также дифракционные потери резонатора.

Резкость многолучевого интерферометра F определяется через свободный спектральный интервал интерферометра $\Delta\nu_0$ и ширину линии резонатора $\Delta\nu$:

$$F = \frac{\Delta\nu_0}{\Delta\nu} = \frac{\pi}{\varepsilon} = \frac{2\pi}{\sigma - 2Gl}. \quad (9)$$

Если движение зеркала на пьезодвигателе линейно во времени, то

$$F = \frac{T}{\Delta t}, \quad (10)$$

где T и Δt – временной интервал между пиками пропускания на одной моде и ширина пика. Из (9), (10) находим

$$\sigma - 2Gl = 2\pi \frac{\Delta t}{T}. \quad (11)$$

В «холодном» резонаторе, когда $G = 0$ или $l = 0$,

$$\sigma_c = 2\pi \frac{\Delta t_c}{T}. \quad (12)$$

Зная потери в резонаторе, можно измерить коэффициент усиления K активной среды для каждого активного промежутка отдельно. Исходя из того, что условием пороговой накачки является равенство усиления потерям за проход ($\sigma = K$), получаем

$$K = \sigma_c - 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{eff}} = \sigma_c - K. \quad (13)$$

При остановке движения зеркала в максимуме пропускания для измеряемой моды и мгновенном обрывании излучения задающего лазера. Излучение на выходе из резонатора затухает по экспоненциальному закону:

$$\frac{I_t}{I_i} = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (14)$$

где

$$\tau = \frac{L}{c} (\sigma - 2Gl)^{-1} \quad (15)$$

для резонатора с активной средой и

$$\tau = \frac{L}{c\sigma_c} \quad (16)$$

для холодных или пассивных резонаторов. Из (13) получаем

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_c - K = \frac{L}{c\tau}.$$

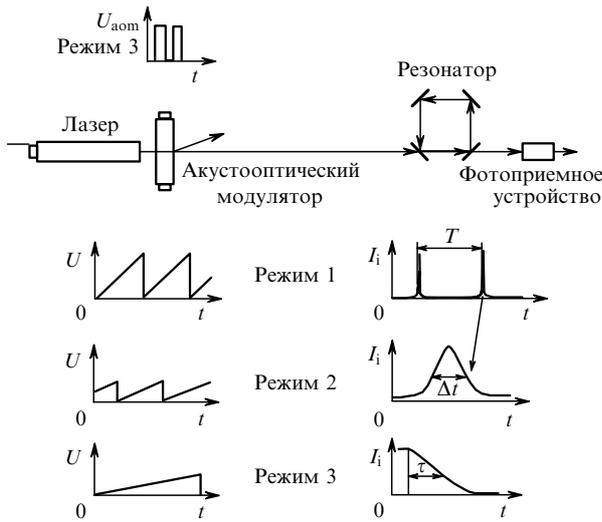


Рис.2. Принципиальная схема и возможные режимы работы универсальной измерительной установки: 1 – режим анализа спектров пропускания; 2 – режим лупы времени (измерение резонансного пика); 3 – режим измерения времени затухания излучения в резонаторе.

3. Принцип действия измерительного устройства

Схема реализации комплексного метода показана на рис.2. Возможны три режима работы установки. В режиме 1 анализируются спектры пропускания контролируемых резонаторов. Режим 2 – режим лупы времени – дополняет режим 1 и позволяет в определенное число раз увеличить длительность импульса путем уменьшения диапазона сканирования частоты, тем самым увеличивая чувствительность метода. Режим 3 – это режим измерения времени затухания излучения в резонаторе при резком периодическом обрывании входного излучения.

Режим 3 (измерение времени затухания) предпочтителен при контроле высокодобротных резонаторов и измерении предельно высоких коэффициентов отражения зеркал, т. к., согласно формуле (16), чем меньше внутрирезонаторные потери σ_c , тем больше время затухания τ , которое нужно измерить.

В режимах измерения резонансного пика и времени затухания (последний режим в этом случае является оптимальным) можно также определить коэффициент усиления активной среды K для каждой моды активного резонатора при заданном токе накачки (13), если внутрирезонаторные потери для данной моды σ_c предварительно измерить описанными выше способами.

4. Результаты измерений и их обсуждения

Измерения проводились с помощью встроенного в персональный компьютер скоростного АЦП и аналоговой измерительной аппаратуры. Результаты измерений внутрирезонаторных потерь и коэффициентов усиления активной среды при разных токах накачки представлены на рис.3. Тут же приведены относительные систематические погрешности методов в зависимости от измеряемых эффективных потерь в резонаторе.

Из рис.3 видно, что при измерении внутрирезонаторных потерь не более 0.02 % оптимальным является метод измерения времени затухания, т. к. систематическая погрешность измерения обратно пропорциональна длительности измеряемого фронта затухания и уменьшается с увеличением добротности резонатора. В эксперименте добротность активного резонатора изменяли путем увеличения коэффициента усиления активной среды при изменении тока накачки в одном газоразрядном промежутке.

Принцип действия лупы времени пояснен на рис.4 и заключается в изменении временного масштаба при измерении ширины пика пропускания, что позволяет повысить чувствительность метода анализа спектров пропускания. На рис.5 и 6 приведены осциллограммы, полученные при обработке результатов измерений двумя методами.

Результаты измерения длительности фронтов затухания (по уровню $1/e$) излучения в холодном резонаторе и в резонаторе с активной средой, находящемся в состоянии ниже порога генерации, показаны на рис.6. При измерении длительности фронта затухания в холодном резонаторе время затухания по уровню $1/e$ составило 228 нс, что соответствует полосе пропускания фотоприемника и является нижним пределом измерений временных интер-

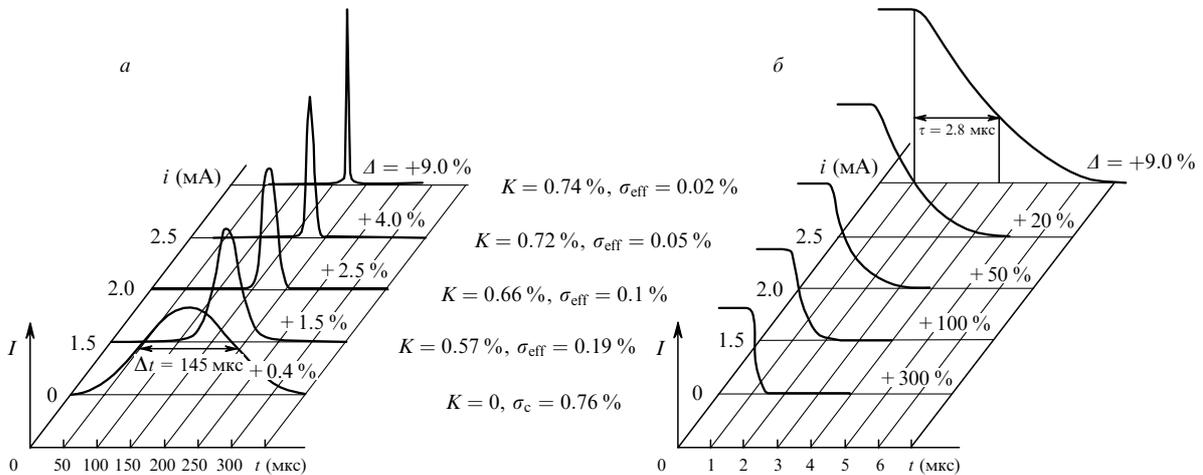


Рис.3. Результаты сравнительных измерений суммарных потерь на зеркалах в резонаторе σ и коэффициентов усиления активной среды K при разных токах накачки i методом анализа спектров пропускания (а) и методом измерения времени затухания излучения в резонаторе (б); Δ – систематическая погрешность метода.

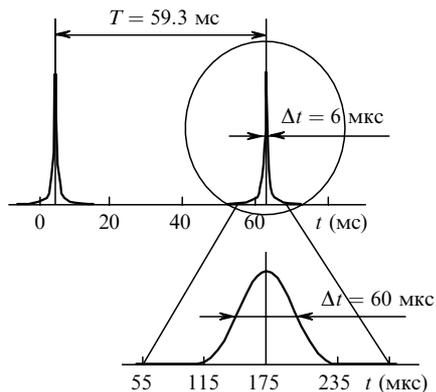


Рис.4. Принцип действия лупы времени.

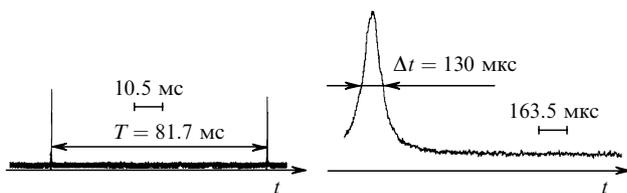


Рис.5. Спектры пропускания резонатора при различных скоростях развертки. Потери в резонаторе $\sigma = 0.5\%$, частота выборки 1.25 МГц.

валов с помощью установки. Использование в установке персонального компьютера и скоростного АЦП позволяет значительно упростить процесс измерений.

5. Заключение

Установка на основе комплексного метода измерения, сочетающего в себе анализ спектра пропускания и измерение времени затухания, может быть очень полезна при контроле различных параметров кольцевых резонаторов для гироскопических датчиков и высокоотражающих лазерных зеркал. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о возможности расширения диапазонов измерений параметров контролируемых резона-

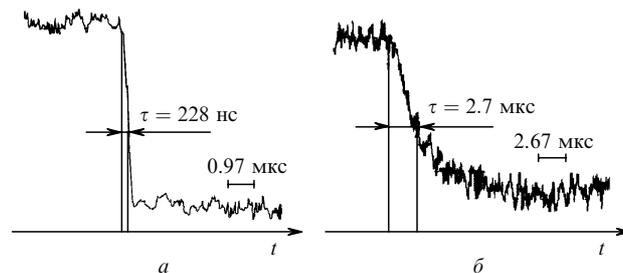


Рис.6. Осциллограммы фронта затухания излучения в холодном резонаторе, (а) и в резонаторе с активной средой, коэффициент усиления которой близок к пороговому значению (б), при потерях, не компенсированных усилением в активном резонаторе, $\sigma_{\text{eff}} = 0.02\%$.

торов и лазерных зеркал, а также внутррезонаторных потерь, практически не ограниченных ни со стороны малых, ни со стороны больших потерь в реальных лазерных резонаторах. Установка универсальна и может быть использована для решения различных научно-технических задач, стоящих перед производителями лазеров, лазерных гироскопических датчиков и лазерных зеркал.

1. *Волновые и флуктуационные процессы в лазерах*. Под ред. Ю.Л.Климонтовича (М.: Наука, 1974).
2. Хошев И.М. *Квантовая электроника*, 7, 953 (1980).
3. Sanders V. *Appl. Opt.*, 16, 19 (1977).
4. Anderson Z., Frish J., Masser S. *Appl. Opt.*, 23, 1238 (1984).
5. Herbelin J.M., McKay J.A. et al. *Appl. Opt.*, 19, 144 (1980).
6. Azarova V.V., Nazarenko M.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 1711, 225 (1992).
7. Azarova V.V., Giruts E.L., Kopylov S.M., Nazarenko M.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2097, 163 (1993).
8. Azarova V.V., Dronov I.V. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3704, 377 (1999).
9. Bennett J.M., Mattsson L. *Introduction to surface roughness and scattering* (Washington, DC, Optical Society of America, 1989).
10. Gliach S., Duparre A., Recknagel R., Notni G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3739, 355 (1999).
11. Azarova V.V., Solov'eva N.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 1711, 191 (1992).
12. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н. *Квантовая электроника*, 31, 740 (2001).