

## РЕЗОНАТОРЫ

## Двухканальный способ измерения потерь в кольцевом оптическом резонаторе на длине волны 632.8 нм

В.В.Азарова, А.С.Бессонов, А.Л.Бондарев, А.П.Макеев, Е.А.Петрухин

*Предложен двухканальный способ измерения потерь в оптическом кольцевом резонаторе (КР), в котором при помощи зеемановского кольцевого He–Ne-лазера с длиной волны излучения 632.8 нм возбуждались собственные колебания (встречные волны). Измеренное расщепление частот встречных волн лазера использовалось для определения абсолютного значения потерь в образцовом КР. Величина потерь в измеряемом КР определялась путем сравнения ширины резонанса интенсивности выходящего из него излучения с шириной резонанса интенсивности образцового резонатора. Алгоритм обработки резонансов интенсивности учитывал искажения, вносимые динамическим эффектом, что позволяло значительно увеличить точность (до 1%–2%) и чувствительность предлагаемого способа. Измеряемые потери в КР с периметром 28 см составили 80–5000 ppm.*

**Ключевые слова:** кольцевой оптический резонатор, кольцевой He–Ne-лазер с длиной волны излучения 632.8 нм, лазерный гироскоп, резонансы интенсивности излучения на выходе из КР, потери собственного колебания в КР.

### 1. Введение

Лазерные гироскопы (ЛГ) на основе кольцевых He–Ne-лазеров с длиной волны излучения  $\lambda = 632.8$  нм широко используются при решении многих задач навигации, для измерения угловых перемещений, в геодезии и геофизике [1–4]. Зеркала кольцевого резонатора (КР) ЛГ обладают малыми потерями, связанными с поглощением и рассеянием излучения на неоднородностях многослойного интерференционного покрытия. В современных ЛГ используются КР, суммарные потери в которых варьируются (в зависимости от типа ЛГ) в диапазоне 100–3000 ppm. Для их измерения используются два основных способа. Первый из них, так называемый способ «ring-down spectroscopy» [5], основан на измерении времени затухания интенсивности излучения, выходящего из резонатора. Второй способ основан на измерении ширины резонанса интенсивности такого излучения [6].

При измерении потерь по времени затухания в КР с помощью внешнего зондирующего лазера возбуждается собственное колебание, затем оптический затвор переключает внешнее излучение. При этом наблюдается экспоненциальное уменьшение интенсивности излучения  $I(t)$ , выходящего из резонатора:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

**В.В.Азарова, А.П.Макеев, Е.А.Петрухин.** АО «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Степана», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: azarovav@hotmail.ru

**А.С.Бессонов.** Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: alexsb64@newmail.ru

**А.Л.Бондарев.** ООО «Сантек 2», Россия, 125362 Москва, ул. Свободы, 31; e-mail: bond-alexey@mail.ru

Поступила в редакцию 23 декабря 2015 г., после доработки – 17 мая 2016 г.

где  $\tau = L/(c\delta)$ ;  $L$  – периметр резонатора;  $\delta$  – потери в КР;  $c$  – скорость света. Измерив величину  $\tau$  по временной зависимости интенсивности  $I(t)$ , можно определить величину потерь в КР. Поскольку в правой части соотношения (1) присутствуют абсолютные значения времени и длины, при определении абсолютной величины потерь в КР дополнительной калибровки не требуется.

Второй способ измерения потерь в КР основан на анализе спектра его пропускания. При квазистатическом изменении частоты  $\nu$  генерации зондирующего лазера спектр излучения, выходящего из КР, представляет собой линию Лоренца:

$$I(\nu) = I_0 \left[ 1 + \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_{1/2}^2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $\nu_0$  – частота собственного колебания КР;  $\Delta\nu_{1/2} = \delta c/(2\pi L)$  – ширина линии на полувысоте. Таким образом, потери могут вычисляться по формуле

$$\delta = \Delta\nu_{1/2} \frac{2\pi L}{c}. \quad (3)$$

Второй способ требует калибровки, связанной с определением расстояния между соседними продольными модами КР. Для этого к пьезоэлектрическому корректору (ПЭК) КР прикладывается напряжение пилообразной формы и измеряется не только ширина резонанса, но и расстояние между соседними резонансами. При линейном сканировании частоты зондирующего лазера межмодовое расстояние  $c/L$  и ширина резонанса  $\Delta\nu_{1/2}$  превращаются в соответствующие временные интервалы  $T$  и  $\Delta t$ , и соотношение (3) можно представить в следующем виде:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta t}{T}. \quad (4)$$

Оба способа измерения потерь в КР имеют ограничения, связанные с их величиной. Так, при увеличении потерь в КР время затухания излучения уменьшается и воз-

никают технические сложности регистрации оптических импульсов длительностью менее 100 нс. В случае использования второго способа проблемы появляются при измерении малых потерь, когда вследствие действия динамического эффекта [7] форма резонансной кривой заметно отличается от лоренцевой.

Не случайно среди разработчиков ЛГ считается, что «малые» потери в КР предпочтительно измерять по времени затухания излучения, а «большие» потери – по ширине резонансной кривой пропускания КР [8, 9]. Для КР с периметром  $L = 28$  см границу «малости» можно оценить в 500 ppm.

Если с выводом об ограничениях при измерении потерь по времени затухания можно согласиться, то утверждение об ограничениях в случае измерений по ширине резонанса интенсивности представляется нам сомнительным. Прежде всего следует отметить, что эти ограничения возникают вследствие использования калибровки параметра  $T$  по расстоянию между соседними продольными модами КР. При технической реализации такого способа калибровки время сканирования частоты генерации зондирующего лазера, как правило, не превышает 100 мс. Столь малое время приводит к искажениям формы резонансов интенсивности и вносит существенные погрешности при определении величины потерь в КР.

Для того чтобы уменьшить эти погрешности и искажения, необходимо существенно замедлить скорость сканирования частоты зондирующего лазера, использовать другой способ абсолютной калибровки, а также учесть влияние динамического эффекта при определении величины потерь в КР. В настоящей работе описан и реализован способ, позволяющий измерять потери резонаторов ЛГ в диапазоне от десятков до нескольких тысяч ppm.

## 2. Способ измерения и схема установки

Измерения потерь в КР проводятся в два этапа. На первом этапе измеряются потери в образцовом КР. Затем, путем сравнения ширины резонансов пропускания образцового и измеряемого КР, определяются потери в измеряемом резонаторе. В связи с тем, что для калибровки абсолютного значения потерь используется дополнительный измерительный канал, мы назвали этот способ измерения двухканальным. Опишем процедуру измерений более подробно.

### 2.1. Измерение потерь в образцовом КР

Принципиальная схема измерения потерь в образцовом КР представлена на рис.1. В качестве зондирующего лазера использовался зеемановский кольцевой He-Ne-лазер ( $\lambda = 632.8$  нм) [10], работающий в режиме биений встречных волн. Частота биений встречных волн составляла 150 кГц, мощность одномодовой генерации достигала 50 мкВт. Одно из зеркал образцового КР было смонтировано на пьезоэлектрическом корректоре (ПЭК), что позволяло сканировать частоту собственных колебаний резонатора вблизи частоты генерации лазера. Собственные колебания в образцовом КР возбуждались во встречных направлениях, поэтому при сканировании частоты наблюдались два сдвинутых по времени резонанса интенсивности встречных волн, выходящих из образцового КР (см. рис.2). В связи с тем, что этот временной сдвиг пропорционален частоте биений встречных волн, ширину ре-

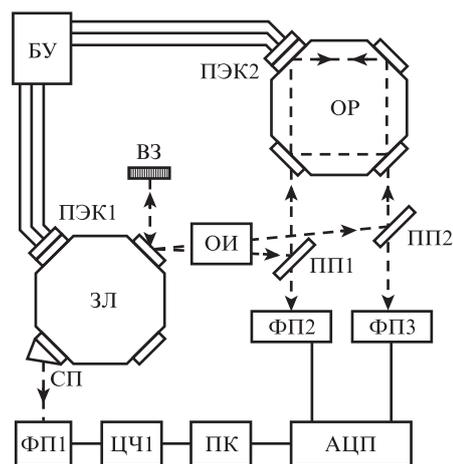


Рис.1. Схема измерения потерь образцового кольцевого резонатора:

ЗЛ – зондирующий лазер; СП – смесительная призма; ОР – образцовый резонатор; БУ – блок управления; ВЗ – возвратное зеркало; ОИ – оптический изолятор; ПП1,2 – полупрозрачные пластины; ФП1,2,3 – фотоприемники; ПЭК1,2 – пьезоэлектрические корректоры; ЦЧ – цифровой частотомер; ПК – персональный компьютер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

зонанса можно измерить в герцах и, используя соотношения (2) и (3), определить величину потерь.

При регистрации резонансов интенсивности к ПЭК периметра образцового КР прикладывалось напряжение пилообразной формы с частотой 5–30 Гц. Амплитуда напряжения варьировалась в диапазоне 1–10 В. Коэффициент передачи ПЭК составлял около 80 В/λ (при перестройке периметра резонатора на λ).

Важной особенностью используемой нами оптической схемы является то, что части излучений встречных волн, выходящих из образцового КР, возвращаются в зондирующий лазер. Эта нежелательная обратная связь приводит к существенным искажениям формы резонансов интенсивности. Во избежание этого мы использовали оптический изолятор (ОИ) с коэффициентом изоляции по интенсивности 40 дБ. Чтобы ограничиться одним ОИ, мы установили его так, что через него проходило излучение обеих встречных волн лазера, направленных друг к другу под небольшим углом (около 3°).

Для регистрации резонансов интенсивности использовались кремниевые фотодиоды ФД28КП с диаметром фоточувствительной площадки около 1 мм. Усилителем

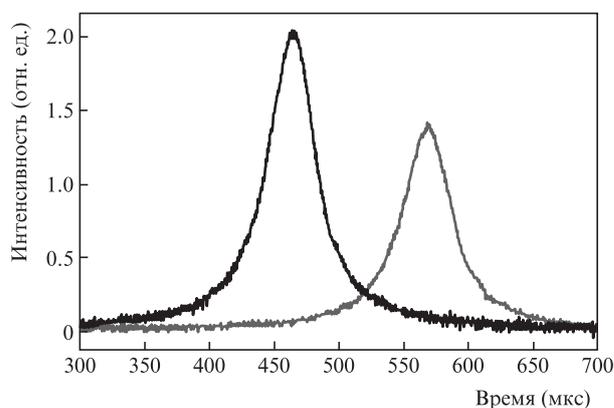


Рис.2. Временные зависимости резонансов интенсивности встречных волн образцового КР. Частота биений встречных волн 150 кГц, потери образцового резонатора  $360 \pm 3$  ppm.

служил преобразователь фототок – напряжение на одном операционном усилителе LF411-CN. Сопротивление нагрузки составляло 1.6 МОм.

В качестве корпусов образцовых КР использовались ситалловые корпуса датчиков ЛГ без селективирующей диафрагмы. После установки зеркал на оптический контакт корпуса герметически закрывались, что позволяло сохранять неизменной величину потерь в образцовых КР в течение длительного времени. Изменение потерь за год наблюдений не превысило нескольких ppm. Потери в образцовых КР, используемых в наших экспериментах, варьировались в диапазоне 250–360 ppm. Длина четырехзеркального КР составляла 28 см.

## 2.2. Измерение потерь в КР путем сравнения ширины его резонанса интенсивности с шириной резонанса образцового КР

Использование высокостабильных образцовых КР позволяет заметно упростить измерения и определить абсолютное значение потерь путем сравнения ширины резонансов интенсивностей двух КР. Схема установки представлена на рис.3.

В данном случае собственные колебания в образцовом и в измеряемом КР возбуждались только в одном направлении. Поэтому в качестве зондирующего лазера можно использовать лазер как с кольцевым, так и с линейным резонатором. При этом напряжение пилообразной формы необходимо прикладывать к ПЭК1 зондирующего лазера. В этом случае регистрируются и сравниваются два резонанса интенсивности, причем величина потерь в образцовом КР используется в качестве калибровочного значения.

Поскольку измеряемый КР не был снабжен пьезокерамическим корректором, для получения устойчивых резонансов интенсивности к ПЭК1 зондирующего лазера прикладывалось напряжение пилообразной формы, среднее значение которого соответствовало собственной частоте измеряемого КР. При этом напряжение на ПЭК2 образцового КР выбиралось таким, чтобы обеспечить примерное совпадение частоты его собственного колебания с собственной частотой измеряемого КР. В остальной процедуре измерения потерь была такой же, как и в случае измерения образцового КР.

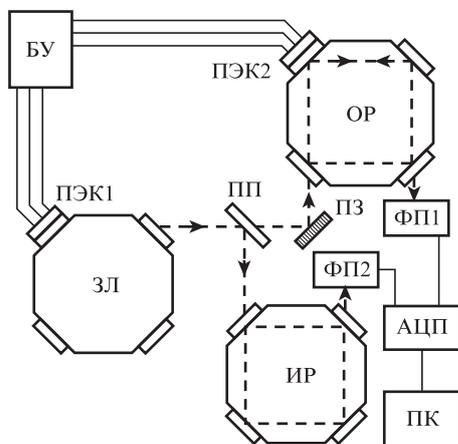


Рис.3. Схема измерения потерь кольцевого резонатора путем сравнения ширины резонансов интенсивности двух КР: ПЗ – поворотное зеркало; ИР – измеряемый резонатор; остальные обозначения те же, что и на рис.1.

## 3. Компьютерная обработка данных эксперимента

Компьютерная обработка данных эксперимента являлась важной составляющей описанного способа измерения потерь, позволяющего реализовать высокую точность и чувствительность измерений. Не имея возможности в рамках данной статьи остановиться на описании всех деталей разработанного нами алгоритма обработки данных, остановимся на основных, принципиальных моментах. Более подробное описание алгоритма можно найти в работах [11, 12].

Прежде всего отметим, что алгоритм базировался на априорном предположении о лоренцевой форме резонанса интенсивности при бесконечно малой скорости сканирования частоты генерации зондирующего лазера (или частоты собственного колебания КР). Резонансные кривые, неизбежно имеющие случайные искажения вследствие действия шумов и помех, выделялись из измерительного сигнала и путем математической регрессии аппроксимировались лоренцевым контуром, что позволяло сгладить эти кривые и по одному из параметров найденной функции Лоренца найти их ширину  $\Delta f$ , требуемую для вычисления потерь (см. (2)–(4)). Поиск аппроксимирующей функции проводился с использованием библиотечной функции среды LabVIEW, реализующей алгоритм оптимизации Левенберга – Марквардта [12].

Для уменьшения случайных погрешностей измерения многократно повторялись. Полученный сигнал содержал 30–40 резонансных кривых и обрабатывался стандартным образом [13] с нахождением среднего значения  $\Delta f$ , оценки ее среднеквадратичного отклонения и доверительного интервала с доверительной вероятностью 0.95.

Разработанный алгоритм при дальнейшей обработке данных позволял также учитывать влияние эффектов, приводящих к систематическому искажению формы резонансов интенсивности. К таким эффектам относятся искажения, вносимые фотоприемниками и электронными усилителями, а также искажения, связанные с влиянием динамического эффекта [7]. Следствием этих эффектов является зависимость величины потерь, вычисленной с использованием функции Лоренца, от скорости сканирования частоты (или от времени сканирования  $T$  между двумя продольными модами КР). Для уменьшения систематических погрешностей с использованием нашего алгоритма скорость сканирования частоты контролировалась, и при определении величины потерь вносилась необходимая коррекция. Данная коррекция проводилась на основе функций двух видов (см. ниже), построенных заранее путем моделирования процессов в КР и ФП и приводящих к искажениям формы резонансов. При этом предполагалось, что динамический эффект в КР описывается с использованием специальной итерационной процедуры [11], а фотоприемное устройство соответствует инерционному звену первого порядка [12].

## 4. Результаты экспериментов

Тестирование предлагаемого нами способа определения потерь проводилось в широком диапазоне значений потерь в четырехзеркальных КР с периметром  $L = 28$  см. Минимальное значение измеряемых потерь составляло 80 ppm, максимальное – 5000 ppm. В экспериментах использовались два типа многослойных диэлектрических

зеркал на основе пар слоев  $TiO_2-SiO_2$  и  $Ta_2O_5-SiO_2$ , изготовленных методом ионного напыления на подложки из ситалла CO115M.

Следует отметить, что основной особенностью способа измерения потерь по ширине резонансной кривой является тенденция к их завышению. Это связано с тем, что оба источника искажения формы резонансов интенсивности, о которых упоминалось выше, увеличивают длительность резонанса. По мере увеличения времени сканирования искажения уменьшаются и измеренное значение потерь приближается к своему действительному значению  $\delta_0$ . На рис.4 представлена типичная зависимость измеренного значения  $\delta_{meas}$  потерь в КР от времени сканирования  $T$ . Действительное значение потерь определялось аппроксимацией измеренных потерь в области бесконечного значения  $T$  (или нулевой скорости сканирования частоты). Такие измерения проводились нами при определении величины потерь в образцовом КР, которая использовалась для калибровки при измерениях методом сравнения. По нашим оценкам систематическая погрешность двухканального способа измерения потерь не превышает 1%–2% (относительное значение). Разумеется, эту процедуру можно использовать и при измерении потерь методом сравнения с образцовым резонатором. Однако следует учитывать, что время измерения этой зависимости составляет более 30 мин. Это существенно ограничивает применимость такого подхода при решении целого ряда задач (например, при юстировке резонатора), где на измерения отводится всего несколько секунд.

Значительно уменьшить время измерений (с сохранением высокой точности) позволяет использование в алгоритме вычисления поправок, связанных с учетом искажений формы резонанса интенсивности. Сравнение измеренных ( $\delta_{meas}$ ) и скорректированных ( $\delta_{cor}$ ) потерь с действительным значением  $\delta_0$  (рис.5) показывает, что введение процедуры коррекции в алгоритм позволяет избежать значительных погрешностей при малой (1–2 с) длительности измерений.

Для реализации максимальных возможностей описываемого способа необходимо выполнение целого ряда условий. К ним относятся: стабильность температуры в лабораторном помещении, отсутствие заметных акустических возмущений (хлопанье дверью и т.п.), герметичность корпусов КР. При этих условиях среднеквадратичное отклонение единичных значений потерь не превышало 2%–3% в диапазоне измеряемых потерь 80–5000 ppm.

Особое внимание уделялось фильтрации напряжений, прикладываемых к ПЭК зондирующего лазера и образ-

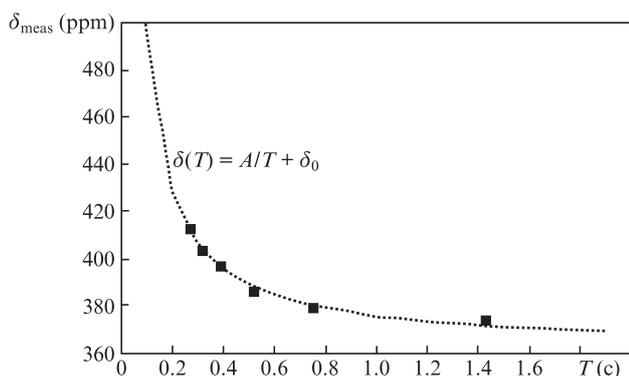


Рис.4. Зависимость измеренного значения потерь в КР от времени сканирования  $T$ .

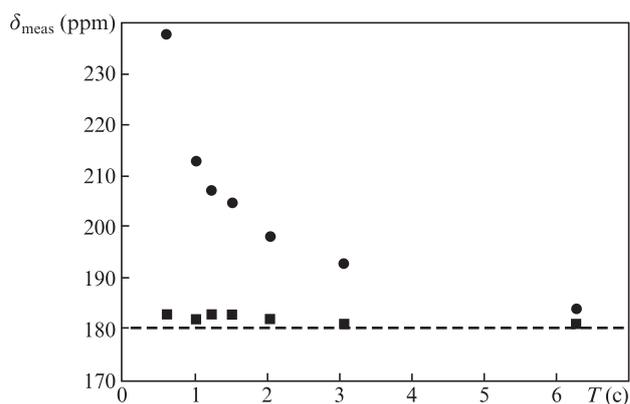


Рис.5. Зависимости измеренных (●) и скорректированных (■) потерь от времени сканирования  $T$ . Действительные потери в измеряемом КР составляют  $180 \pm 2$  ppm (штриховая линия), потери в образцовом КР равны  $265 \pm 3$  ppm.

цового КР. В наших экспериментах типичная ширина резонансов интенсивности, в пересчете на величину сканирующего напряжения, достигала 10 мВ. Использование РС-фильтра высших частот (с частотой среза около 1 Гц), подключаемого к ПЭК, позволяло снизить амплитуду пульсации до 1 мВ.

Заметим, что алгоритм корректировки имеет принципиальные ограничения. Связано это с тем, что аппроксимация функцией Лоренца эффективна при сравнительно небольших искажениях формы резонансов интенсивности. На рис.6 приведены измеренная и вычисленная на основе математической модели динамического эффекта формы резонанса интенсивности. Совпадение между ними настолько хорошее, что для их графического представления пришлось немного сместить один из резонансов по вертикали. В приведенном примере введение корректировки позволяет избежать заметных погрешностей при определении величины потерь.

По мере уменьшения времени сканирования искажения формы резонанса начинают нарастать. Резонансы приобретают несимметричную (относительно вершины) форму, на правом крыле резонанса появляются характерные для динамического эффекта высокочастотные осцилляции. В приведенном выше примере алгоритм коррекции величины потерь перестает работать при времени сканирования  $T < 0.5$  с. В этом случае погрешность в определении величины потерь превышает 10%. Эта особенность аппроксимации резонансов интенсивности функ-

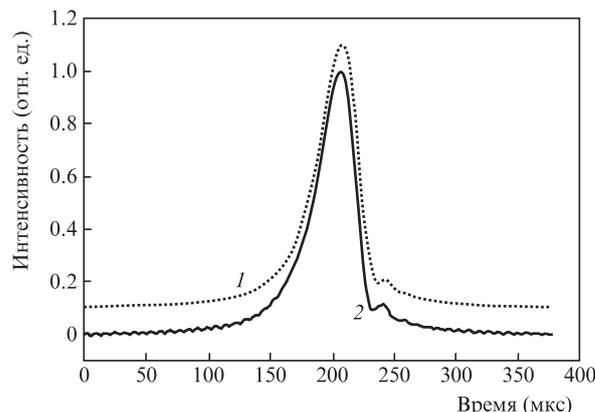


Рис.6. Формы вычисленного (1) и измеренного (2) резонансов интенсивности;  $\delta_{meas} = 180$  ppm,  $T = 1.025$  с.

цией Лоренца учитывалась при работе измерительной установки. Если время сканирования было меньше минимального допустимого значения, на экране компьютера появлялось предупреждение с рекомендацией увеличить его.

Интерес для разработчиков ЛГ может представлять высокая чувствительность двухканального метода, которая составляет, по нашим оценкам, около 0.1%. В качестве иллюстрации приведем результаты измерения потерь в КР с неплоским контуром. Характерной особенностью спектра мод такого резонатора является небольшое различие в потерях для соседних мод с разной поляризацией. При типичных суммарных потерях в КР 2000–3000 ppm различие в них может достигать нескольких десятков ppm. На рис.7 представлены результаты измерений потерь для «гребенки» мод с разной поляризацией четырехзеркального КР с периметром 16 см. Полуцелое значение индекса моды указывает на то, что сдвиг частот собственных колебаний равен  $c/2L$ . «Скачок» в величине потерь в данном случае составлял  $\sim 20$  ppm. Наличие наклона приведенных зависимостей указывает на связь дифракционных потерь резонатора с напряжением, приложенным к ПЭК. Объясняется это тем, что перемещение ПЭК сопровождается смещением оптической оси резонатора относительно селективирующей диафрагмы, установленной внутри моноблочного корпуса КР. Основная причина этого смещения – наклон пьезоэлектрического зеркала относительно контактной поверхности моноблочного корпуса КР («кошени» ПЭК) при прикладывании к нему напряжения, который может достигать долей угловых секунд. В случае идеальной юстировки, когда оптическая ось резонатора проходит через центр диафрагмы, зависимость дифракционных потерь от напряжения ПЭК является параболической. При наличии начального несовпадения в этой зависимости появляется линейная составляющая.

Следует отметить, что высокая чувствительность нашей установки была продемонстрирована при сравнительно больших потерях в КР. В этом случае отклонения формы резонанса от лоренцевой были практически незаметными, и измерения проводились при малых временах сканирования (менее 0.1 с). При уменьшении измеряемых потерь реализовать высокую чувствительность становится затруднительно. Приходится увеличивать время сканирования (обратно пропорционально величине потерь). В связи с этим медленные дрейфы температуры и атмосферного давления в комнате становятся основными фак-

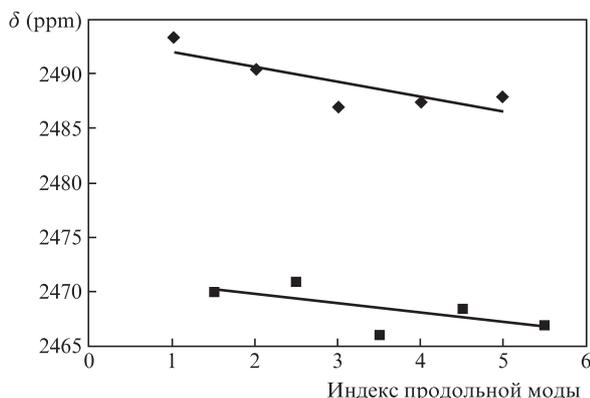


Рис.7. Зависимости потерь в КР с неплоским контуром от индекса продольных мод с разной поляризацией.

торами, ограничивающими минимальную величину измеряемых потерь и чувствительность данного способа.

В нашем случае особых мер по снижению перечисленных возмущающих факторов не предпринималось, за исключением того, что измеряемые моноблочные КР были герметизированы и перед измерениями «выдерживались» в комнате в течение одного-двух часов. Температура в комнате не стабилизировалась, и ее дрейф, как правило, не превышал 1–2°C за 5 ч работы.

## 5. Заключение

Проведенные эксперименты показали, что двухканальный способ позволяет существенно расширить область использования резонансов интенсивности для измерения потерь в кольцевых резонаторах. С его помощью можно измерять потери в КР в диапазоне от десятков до нескольких тысяч ppm. При этом удается избежать заметных систематических погрешностей, присущих способу измерения по ширине резонанса интенсивности. Для КР с периметром  $L = 28$  см в диапазоне измеряемых потерь 80–5000 ppm неисключенная систематическая погрешность не превышала 1%–2%. При этом СКО единичных отсчетов (отн. ед.) было не более 2%, а чувствительность достигала 0.1%.

Измерительная установка с такими точностными характеристиками может быть использована не только в качестве метрологического средства контроля параметров лазерного гироскопа, но и для решения целого ряда инженерно-технологических задач, возникающих при разработке ЛГ. К ним относится контроль над качеством юстировки КР и совершенствование конструкции ПЭК, а также решение задач, связанных с уменьшением поглощения света в зеркалах КР и снижением влияния УФ излучения газового разряда на характеристики зеркал.

Авторы выражают свою искреннюю признательность П.И.Ищенко за действенную помощь и участие в проведении многочисленных измерений.

1. Barbour N., Schmidt G. *IEEE Sens. J.*, **1**, 332 (2001).
2. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Probst R. *Metrologia*, **34**, 343 (1997).
3. Schreiber K.U., Velikoseltsev A., Rothacher M., Klugel T., Stedman G.E., Wiltshire D.L. *J. Geophys. Res.*, **109**, B06405 (2004).
4. Schreiber K.U., Klugel T., Wells J-P.R., Hurst R.B., Gebauer A. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 173904 (2011).
5. Rempe G., Thompson R.J., Kimble H.J. *Opt. Lett.*, **17**, 363 (1992).
6. Siegman A.E. *Lasers* (Mill Valley: University Science Book, 1986).
7. Lawrence M.J., Willke B., Husman M.E., Gustafson E.K., Byer R.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **16**, 523 (1999).
8. Федоров А.Е., Зборовский В.А., Рекунов Д.А., Усупов Н.В., Плешаков Н.С., Мотов П.Д. *Труды XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам* (С.-Пб.: Изд-е Политехнического университета, 2015, с. 308).
9. Азарова В.В., Ефремова И.А. *Квантовая электроника*, **32** (3), 239 (2002).
10. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. *Квантовая электроника*, **30** (2), 96 (2000).
11. Азарова В.В., Бессонов А.С., Бондарев А.Л., Макеев А.П., Петрухин Е.А. *Матер. XVI международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация-2015»* (Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2015, с. 68–71).
12. Азарова В.В., Бессонов А.С., Горшков В.А., Макеев А.П., Петрухин Е.А. *Сб. трудов XI международной конференции «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2012»* (М.: ДМК Пресс, 2012, с. 61–64).
13. Сергеев А.Г., Терегеря В.В. *Метрология, стандартизация, сертификация* (М.: изд-во Юрайт, 2014, с. 84–85).