

ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ

О корреляционной связи диссипативных и консервативных составляющих обратного рассеяния в кольцевом резонаторе лазерного гироскопа

Е.А.Петрухин, И.Н.Хохлов, Н.И.Хохлов

Приведены результаты измерений комплексных коэффициентов связи в кольцевых He–Ne-лазерах с длиной волны излучения 632.8 нм. Обнаружено, что при сборке кольцевых резонаторов из зеркал одинакового качества корреляционная связь между диссипативными и консервативными составляющими обратного рассеяния отсутствует. Анализ результатов измерений показал, что такое поведение связано со спекл-структурой поля обратного рассеяния в кольцевом резонаторе. Наличие на поверхности зеркал источников обратного рассеяния (ОР) со случайной фазой приводит к разбросу значений параметров ОР, который описывается функцией распределения Рэлея. Обсуждаются пути снижения разброса значений диссипативных и консервативных составляющих обратного рассеяния при сборке кольцевых резонаторов.

Ключевые слова: кольцевой лазер, кольцевой резонатор, лазерный гироскоп, обратное рассеяние, порог захвата, комплексные коэффициенты связи встречных волн, диссипативные и консервативные составляющие обратного рассеяния.

1. Введение

Обратное рассеяние (ОР) на зеркалах кольцевого резонатора (КР) является одним из основных источников погрешности лазерного гироскопа (ЛГ) на основе кольцевого He–Ne-лазера с длиной волны излучения 632.8 нм. Это рассеяние приводит к взаимной связи встречных волн лазера и является причиной существования зоны нечувствительности при измерении малых угловых скоростей вращения (так называемая зона захвата), а также вызывает нелинейные искажения масштабного коэффициента ЛГ [1–4]. Неслучайно разработчики ЛГ тратят значительные ресурсы на совершенствование методов полировки подложек зеркал и технологий нанесения многослойных диэлектрических покрытий.

В теории кольцевого газового лазера [1–4] влияние ОР на амплитуды и разность фаз встречных волн описывается при помощи двух линейных комплексных коэффициентов связи (ККС), представляющих собой часть поля, попадающего во встречную волну в результате процесса рассеяния света на неоднородностях зеркал:

$$r_{cw,ccw} = r_{cw,ccw} \exp(i\varphi_{cw,ccw}), \quad (1)$$

где $r_{cw,ccw}$ – модули ККС для волн, распространяющихся в направлениях по и против часовой стрелки; $\varphi_{cw,ccw}$ – соответствующие фазовые сдвиги, возникающие в результате ОР.

Е.А.Петрухин. АО «Серпуховский завод "Металлист"», Россия, Московская обл., 142200 Серпухов., ул. Луначарского, 32; e-mail: petruhin53@mail.ru

И.Н.Хохлов, Н.И.Хохлов. АО «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: ivan.xoxlov9769@gmail.com

Поступила в редакцию 8 октября 2020 г., после доработки – 16 февраля 2021 г.

Из структуры уравнений, описывающих амплитуды и разности фаз встречных волн, следует, что фазовые сдвиги из-за ОР присутствуют в них в виде суммы фазовых сдвигов: $\varphi = \varphi_{cw} + \varphi_{ccw}$. В связи с этим ККС характеризуются не четырьмя параметрами (два модуля и два фазовых сдвига), а тремя (два модуля и суммарный фазовый сдвиг вследствие ОР).

При анализе системы уравнений для амплитуд и фаз встречных волн КЛ особо выделяются два типа источников ОР – диссипативный и консервативный [3], различающиеся величиной фазового сдвига. Диссипативные источники ОР имеют фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi$, эквивалентный в данном случае $\varphi = 0$. Фазовый сдвиг консервативных источников ОР составляет π . Физический смысл такого различия фазовых сдвигов связан с тем, что консервативное ОР вызвано неоднородностями показателя преломления материала зеркал, а диссипативное – неоднородностями его показателя поглощения [1].

Диссипативные и консервативные источники ОР по-разному влияют на нелинейные искажения амплитудно-частотной характеристики ЛГ. Например, в интенсивностях встречных волн КЛ наблюдаются модуляционные компоненты с частотой биений встречных волн. В случае, когда частотная подставка КЛ Ω значительно превышает порог захвата, интенсивности выходящих из лазера излучений можно представить следующими соотношениями:

$$I_{cw} = I_{cw}^{(0)} [1 + m_{cw} \sin(\Omega t)], \quad (2)$$

$$I_{ccw} = I_{ccw}^{(0)} [1 + m_{ccw} \sin(\Omega t + \chi)], \quad (3)$$

где $m_{cw,ccw}$ – глубины модуляции интенсивностей, составляющие, как правило, доли процента; $I_{cw,ccw}^{(0)}$ – постоянные составляющие интенсивностей встречных волн; χ – разность фаз модуляционных компонент. В случае консервативного ОР наблюдаются противофазные модуляционные компоненты, и $\chi = \pi$. Диссипативное ОР приводит к синфазным модуляциям интенсивностей ($\chi = 0$).

Следует также отметить, что глубины модуляции, вызванные диссипативным и консервативным ОР, для волн встречных направлений не различаются.

В реальности поля волн ОР формируются обоими типами источников, которые влияют на искажения амплитудно-частотной характеристики ЛГ достаточно сложным образом. В частности модули ККС могут значительно различаться для встречных волн, а суммарный фазовый сдвиг из-за ОР варьируется в широком диапазоне значений [5].

В случае ЛГ с постоянной подставкой удается получить хорошо согласующуюся с результатами измерений аналитическую зависимость нелинейной поправки масштабного коэффициента ЛГ ΔK от скорости вращения ЛГ Ω , учитывающую влияние источников ОР обоих типов [1, 2, 4]:

$$\Delta K = K - 1 = -\frac{S_+^2}{2\Omega^2} + \frac{S_-^2}{2(\Omega_g^2 + \Omega^2)}, \quad (4)$$

где Ω_g – прочность предельного цикла КЛ; S_+ и S_- описывают диссипативные и консервативные составляющие ОР соответственно:

$$S_{+,-} = \frac{c}{L} \sqrt{r_{cw}^2 + r_{ccw}^2 \pm 2r_{cw}r_{ccw} \cos \varphi}. \quad (5)$$

Знак «+» в правой части (5) соответствует диссипативной составляющей ОР. Соотношение (4) справедливо для режима слабой связи встречных волн, когда постоянная подставка Ω значительно превышает параметр S_+ , представляющий собой порог захвата (ПЗ) ЛГ Ω_L . Модули диссипативной (r) и консервативной (R) составляющих ККС связаны с параметрами $S_{+,-}$ следующим образом:

$$S_+ = \Omega_L = 2\frac{c}{L}r, \quad (6)$$

$$S_- = 2\frac{c}{L}R, \quad (7)$$

где c – скорость света; L – периметр КР. В данном случае параметры $S_{+,-}$ имеют размерность рад/с. В зависимости от условий задачи (например, при прямых измерениях ККС в КР [5]) под консервативными и диссипативными составляющими можно понимать как параметры $S_{+,-}$, так и модули r и R . Соответственно их размерностями могут быть Гц, рад/с, град/с или ppm.

Соотношение (4) используется для определения величин этих параметров при измерении нелинейных поправок масштабного коэффициента ЛГ. В случае применения многослойных диэлектрических зеркал со слоями из $Ta_2O_5-SiO_2$ и TiO_2-SiO_2 консервативная составляющая в три-семь раз превышает диссипативную. Как следствие, поправка к МК при большой величине подставки Ω , как правило, имеет положительный знак, а разность фаз модуляционных компонент интенсивностей близка к π .

Заметим, что при представлении результатов измерений ККС в ЛГ словосочетание «как правило» приходится использовать довольно часто. Связано это с тем, что поле рассеянного зеркалом лазерного излучения представляет собой сложную структуру из ярких и темных полос и пятен (так называемую спекл-структуру [6]). Суммарный модуль диссипативной составляющей представляется в

виде скалярной суммы отдельных диссипативных источников ОР:

$$r = \left| \sum r_n \exp(2ikl_n) \right|, \quad (8)$$

где r_n – парциальный модуль коэффициента связи источника ОР; l_n – продольная координата источника вдоль оптической оси КР; k – волновое число. Выражение для суммарной величины консервативной составляющей ОР записывается аналогичным образом, в виде скалярной суммы коэффициентов связи отдельных консервативных источников.

Результатом интерференции источников ОР со случайной фазой является большой разброс значений суммарного модуля ККС. В качестве примера приведем гистограмму порогов захвата примерно 250 ЛГ, собранных с использованием зеркал со слоями $Ta_2O_5-SiO_2$ (коэффициент интегрального рассеяния 10–15 ppm) [7]. Периметр четырехзеркального резонатора составлял 16 см.

Для описания гистограммы ПЗ (рис.1) можно применить распределение Рэля, используемое для описания статистики результирующего поля когерентных осцилляторов со случайным значением фазы [8]. Плотность вероятности этого распределения описывается соотношением

$$f(\Omega_L) = \frac{\Omega_L}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\Omega_L^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

где σ – параметр масштаба, приблизительно равный среднему значению ПЗ ЛГ. Это распределение показано на рис.1 сплошной линией. Отрицательный квадратичный показатель экспоненты в (9) не позволяет объяснить появление в гистограмме на рис.1 ЛГ с ПЗ, более чем в три раза превышающим среднее значение. Это связано с наличием в рабочей зоне зеркал крупных пылевидных частиц, ответственных за большие значения ПЗ. В данном случае ПЗ примерно 15% собранных гироскопов отклонились от распределения Рэля.

Похожее поведение можно ожидать и от гистограмм распределения консервативной составляющей ОР. При этом возникает естественный вопрос о корреляционной связи составляющих ОР. Разработчики современных ЛГ априори считают, что такая связь существует, т. е. снижение интенсивности ОР гарантирует снижение порога захвата. Неслучайно, что на выполнение этого требования опираются и современные методы контроля качества зеркал ЛГ. К ним относятся визуальный контроль поверхностей подложек зеркал на наличие точечных дефектов и ласин, измерение шероховатости поверхности при помо-

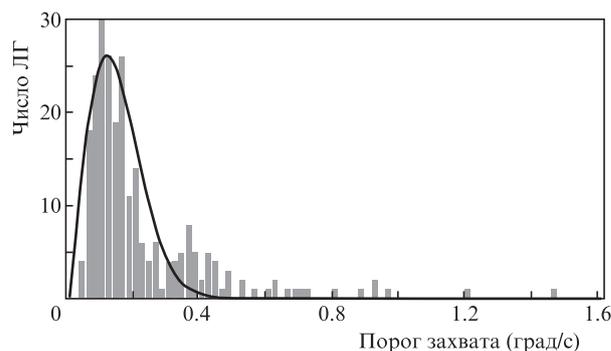


Рис.1. Гистограмма распределения 250 ЛГ по величине ПЗ в диапазоне 0.05–1.5 град/с, состоящем из 70 интервалов величины ПЗ.

щи фазового интерферометра или атомно-силового микроскопа, а также измерения коэффициента интегрального рассеяния (КИР) зеркал.

На это априорное утверждение опирались и авторы патента [9], предложившие значительно снизить ПЗ при неизменной величине КИР зеркал. С этой целью в юстируемом КР при помощи излучения внешнего лазера возбуждается собственное колебание. Во встречном направлении измеряется интенсивность встречной волны, вызванной ОР юстируемого зеркала. Перемещая зеркало по контактной поверхности моноблочного корпуса (главным образом поворачивая его), можно добиться заметного уменьшения интенсивности ОР, приближая темное пятно спекла к направлению распространения встречной моды. Характерный угловой масштаб изменения поля спеклов составляет $\lambda/2w$ (w – радиус перетяжки моды КР), т.е. несколько угловых минут.

Выявить наличие или отсутствие корреляционной связи между диссипативной и консервативной составляющими ОР и является целью настоящей работы. Для этого мы провели одновременные измерения обоих составляющих ОР при сборке ЛГ из зеркал, примерно одинаковых по качеству. Метод основан на измерении нелинейных искажений масштабного коэффициента ЛГ с прямоугольной подставкой и подробно изложен в нашей предыдущей работе [10].

2. Методика измерений и их результаты

Измерения диссипативных и консервативных составляющих ОР проводились с использованием штатной измерительной аппаратуры, разработанной в НИИ «Полус». Метод измерения основан на анализе зависимости нелинейных искажений масштабного коэффициента ΔK от угловой скорости вращения Ω зеemanовского ЛГ с прямоугольной подставкой. Подробно методика описана в работе [10]. При определении S_+ и S_- использовалось следующее соотношение:

$$\Delta K = \frac{S_+^2}{2(\Omega_0^2 - \Omega^2)} + \frac{S_-^2(\Omega_g^2 + \Omega^2 - \Omega_0^2)}{2[(\Omega - \Omega_0)^2 + \Omega_g^2][(\Omega + \Omega_0)^2 + \Omega_g^2]}, \quad (10)$$

где Ω_0 – амплитуда прямоугольной подставки. Это соотношение справедливо для описания крыльев зависимости $\Delta K(\Omega)$, когда $|\Omega - \Omega_0| > (1-2)$ град/с.

Измерения проводились с одноосными датчиками ЗЛК-20 [11]. Датчики устанавливались на поворотном столе, относительное отклонение скорости вращения которого не превышало 0.001%. Погрешность при измерениях нелинейной поправки ΔK была не более 2–3 ppm. Диапазон изменений скорости вращения стола составлял 10–400 град/с.

Кольцевые резонаторы датчиков были собраны из двух типов зеркал, со слоями из $Ta_2O_5-SiO_2$ и TiO_2-SiO_2 . КИР зеркал, выбранных для сборки, варьировался в диапазоне 10–15 ppm. Было протестировано 205 датчиков. Значения параметров S_+ и S_- измерялись для четырех соседних мод, разность собственных частот которых в КР с неплоским контуром составляла $c/2L$. Таким образом

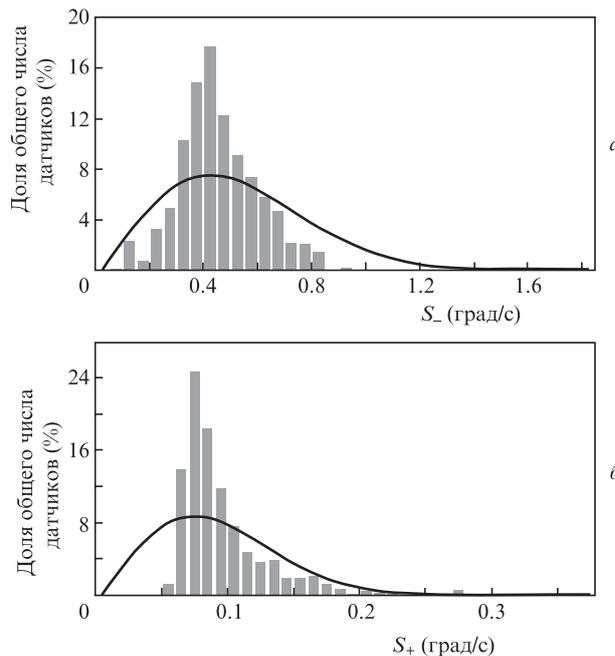


Рис.2. Гистограммы 820 значений параметров S_- (а) и S_+ (б) с интервалом выборки 0.015 град/с. По оси ординат дана доля общего числа датчиков, попадающих в данный интервал значений. Сплошной линией представлен результат аппроксимации с использованием распределения Рэлея.

был сформирован массив данных из 820 пар значений параметров $S_{+,-}$, их гистограммы представлены на рис.2.

Зафиксирован значительный разброс измеренных значений составляющих ОР. Для консервативных составляющих отношение максимального и минимального значений параметра S_- составило ~ 20 (0.88 и 0.046 град/с), для S_+ оно было равно ~ 7 (0.36 и 0.053 град/с).

Мы попытались аппроксимировать полученные гистограммы распределением Рэлея, используя соотношение (9), где в качестве параметра масштаба фигурировали средние значения S_+ и S_- . В случае консервативной составляющей удается добиться хорошего качественного совпадения (рис.2,а).

Для диссипативной составляющей отличия от распределения Рэлея бросаются в глаза. Прежде всего это касается области малых (меньших среднего) значений S_+ . Согласно соотношению (9), плотность вероятности при малых значениях параметра (в данном случае S_+) прямо пропорциональна его величине. Численные оценки доли датчиков с величиной S_+ , в три раза меньшей среднего значения, показывают, что датчиков должно быть не менее 6%–7% от их общего числа. В реальности же мы не зафиксировали ни одного такого датчика. Причина такого различия нам не ясна. Возможно, это связано с влиянием ОР от фотоприемника, установленного у выходного зеркала с коэффициентом пропускания более 1000 ppm.

Для ответа на вопрос о коррелированности измеренных значений S_+ и S_- мы воспользовались критерием Пирсона [12], в котором коэффициент корреляции двух случайных величин оценивается следующим соотношением:

$$r_{x,y} = \frac{\sum (x_n - \langle x \rangle)(y_n - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum (x_n - \langle x \rangle)^2 \sum (y_n - \langle y \rangle)^2}}, \quad (11)$$

где x_n и y_n – случайные величины (в данном случае S_- и S_+); $\langle x \rangle$ и $\langle y \rangle$ – их средние значения.

Коэффициент корреляции параметров S_- и S_+ составил в нашем случае 0.07, что говорит об отсутствии взаимосвязи консервативной и диссипативной составляющих ОР. Это заметно осложняет процесс сборки и юстировки КР. В частности снижение интенсивности ОР от зеркала во встречном направлении не всегда сопровождается уменьшением порога захвата.

Другой важный вывод, следующий из результатов этого эксперимента, говорит о том, что разбиение ККС на две составляющие является вполне корректным. Отсутствие корреляционной связи между ними позволяет рассматривать их как два независимых друг от друга параметра ОР.

Важными при анализе статистики S_- и S_+ являются их средние значения. В наших экспериментах $\langle S_- \rangle = 0.4$ град/с и $\langle S_+ \rangle = 0.069$ град/с. Величину консервативной составляющей можно оценить, опираясь на модель изотропного ОР, в которой интенсивность волны ОР определяется КИР и телесным углом моды КР. Такая задача была решена в работе [13]. При оценке модуля ККС и телесного угла КР используются следующие соотношения:

$$r = \sqrt{\frac{S\Phi}{4\pi}}, \quad (12)$$

$$\Phi = \left(\frac{w}{4L}\right)^2, \quad (13)$$

где w – радиус перетяжки основной моды КР; S – КИР зеркала; Φ – телесный угол КР. При этом сделано два важных упрощения. Во-первых, при расчете консервативной составляющей пренебрежем вкладом диссипативной составляющей в интенсивность волны ОР, не превышающим 10%. Во-вторых, будем считать, что все источники ОР находятся на одном зеркале КР, т.е. величину КИР, фигурирующую в соотношении (12), нужно умножить на четыре (по числу зеркал КР). Для параметров КР, используемых в наших экспериментах ($L = 200$ мм, $w = 0.36$ мм, $S = 12$ ppm), получаем (с учетом масштабного коэффициента датчика) $\langle S \rangle = 0.34$ град/с. Для оценки средней величины диссипативной составляющей делим это значение на найденное выше отношение $\langle S_- \rangle / \langle S_+ \rangle$ и получаем $\langle S_+ \rangle = 0.058$ град/с, что хорошо согласуется с результатами наших измерений.

В заключение этого раздела приведем гистограмму (рис.3) распределения нелинейной поправки ΔK . Соотношение (10), описывающее зависимость $\Delta K(\Omega)$, состоит из двух слагаемых, одно из которых определяется консервативной составляющей ОР, а другое – диссипативной. В ЛГ с прямоугольной подставкой эти слагаемые примерно одинаковы в широком диапазоне скоростей вращения. Таким образом, зависимость $\Delta K(\Omega)$ определяется двумя случайными параметрами – S_+ и S_- . Вероятно, эта особенность и стала причиной хорошего совпадения гистограммы рис.3 с ее аппроксимацией распределением Рэля.

3. Обсуждение результатов и выводы

Результаты наших экспериментов выявили отсутствие корреляционной связи между диссипативной и консервативной составляющими ОР в кольцевом резонаторе ЛГ. На языке статистики это указывает на наличие двух неза-

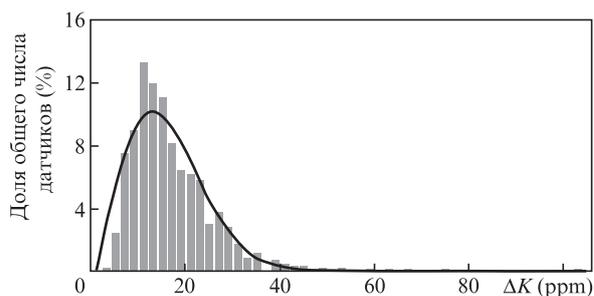


Рис.3. Гистограмма нелинейной поправки масштабного коэффициента ЛГ с интервалом выборки 2 ppm при $\Omega = 18$ град/с.

висимых массивов источников ОР в рабочей зоне зеркал. Если же перейти на язык, чаще используемый разработчиками ЛГ, то можно сказать, что большая интенсивность ОР в КР не обязательно приводит к большому порогу захвата в ЛГ. И наоборот, при малой интенсивности ОР порог захвата не обязательно должен быть малым.

Опираясь на оценку качества зеркал, основанную только на измерениях интенсивности рассеянного зеркалом света, прийти к такому парадоксальному выводу достаточно сложно. Связано это с тем, что интенсивность рассеянного света определяется одновременно обоими источниками ОР. При этом вклад диссипативных источников в баланс интегрального рассеяния света зеркалом составляет всего лишь несколько процентов. Следовательно, если и существует корреляционная связь диссипативной и консервативной составляющих ОР с его интенсивностью, то ее можно ожидать только для консервативной составляющей.

Прямые измерения ККС в КР [5] позволяют разобраться в физической сущности явления ОР в КР. В качестве иллюстрации приведем результаты наших экспериментов. На рис.4 представлены результаты измерения значений 24 пар модулей ККС (измеренных в одном направлении по методике работы [5]) и порогов захвата ЛГ. Эксперименты проводились с четырехзеркальными КЛ с плоским контуром и $L = 28$ см. При сборке КР использовались зеркала со слоями $Ta_2O_5-SiO_2$ с КИР примерно 20 ppm. Была воспроизведена измерительная схема патента [9], но с одним отличием: измерялась не интенсивность ОР, а модуль ККС (он пропорционален квадрату порогу из интенсивности).

Видно, что корреляция между этими параметрами не прослеживается, поэтому способ юстировки в [9], кото-

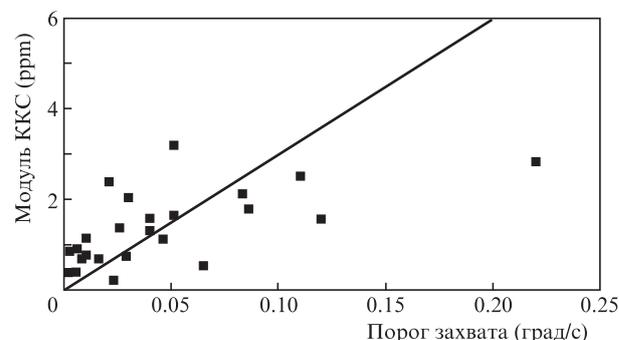


Рис.4. Результаты измерений модулей ККС в КР методом из работы [5] и порога захвата в КЛ с периметром четырехзеркального КР 28 см. Сплошная линия соответствует линейной зависимости между этими параметрами в случае их полной корреляции.

рый, по мнению его авторов, позволяет минимизировать порог захвата ЛГ, представляется нам ошибочным. Однако основная идея авторов об использовании особенностей спекл-структуры полей ОР при юстировке КР кажется нам перспективной. Необходимо только перейти от измерений интенсивностей ОР к измерениям ККС в юстируемом КР.

Теперь несколько слов о спекл-структуре полей ОР. На наш взгляд, ее присутствие является очевидным следствием неоднородностей структуры многослойных диэлектрических покрытий. На рис.5,*a* представлен фрагмент фотографии зеркала с КИР около 10 ppm, полученной при помощи темнопольного микроскопа с 500-кратным увеличением. Размер фрагмента изображения составил $\sim 25 \times 25$ мкм. После съемки проведена дополнительная цифровая обработка изображения. Перед нами довольно сложная картина неоднородностей, хаотично расположенных на поверхности зеркала и в глубине слоев его многослойного покрытия. Случайными величинами здесь являются не только координаты расположения неоднородностей, но и интенсивности рассеянного света. С точки зрения формирования модулей ККС (см. (8)) такая структура приводит к гистограммам, описываемым распределением Рэля.

Появление на поверхности зеркала крупных (микронного размера) точечных дефектов (рис.5,*б*) может существенно исказить результат сложения парциальных ККС. На языке распределения Рэля отдельная крупная неоднородность представляет собой массив неоднородностей

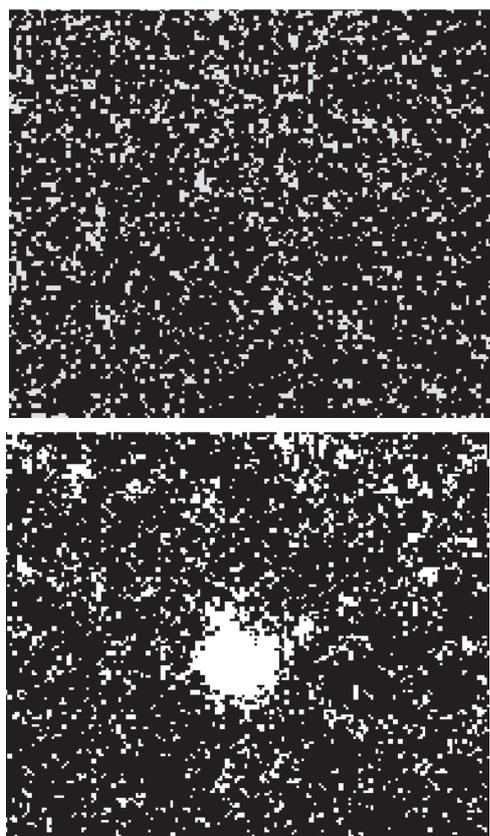


Рис.5. Фрагменты фотографий зеркал, полученных с помощью темнопольного микроскопа с 500-кратным увеличением. Размер изображений $\sim 25 \times 25$ мкм; рис.*a* и *б* различаются наличием на рис.*б* крупных точечных дефектов.

с одинаковой фазой (см. (8)), что заметно увеличивает величину суммарного модуля ККС массива источников ОР.

Проиллюстрируем это утверждение на примере простой модели массива точечных источников ОР. Расположим на рабочей поверхности зеркала 1000 точечных источников ОР с одним и тем же парциальным ККС. Для определенности будем считать, что это диссипативные источники ОР. Парциальный вклад в порог захвата каждого из источников составляет 1 Гц. При помощи генератора случайных чисел присвоим каждому из 1000 источников ОР свое значение фазового сдвига $2kl_n$, лежащее в диапазоне от нуля до 2π .

На рис.6 представлена гистограмма распределения величин порога захвата массива точечных источников. Число реализаций комбинаций случайных чисел в данном случае составило 10^6 . Огибающая этой гистограммы имеет форму распределения Рэля. Обращает на себя внимание то, что средняя величина ПЗ массива источников составила ~ 20 Гц, тогда как при одинаковом фазовом сдвиге порог захвата равнялся бы сумме парциальных значений (1000 Гц).

Другими словами, если представить себе, что отдельные неоднородности зеркала сольются в один крупный дефект, то результатом этого слияния станет увеличение модуля ККС почти на два порядка. Поэтому появление на поверхности зеркал ЛГ крупных неоднородностей существенно влияет на форму гистограмм консервативных и диссипативных составляющих ОР. В частности отсутствие в гистограммах датчиков с малыми (по сравнению со средней величиной) значениями этих параметров (см. рис.2, 3) можно связать с наличием на поверхности зеркал крупных неоднородностей (например, пылевидных частиц).

Кстати, в качестве возможных кандидатов в диссипативные источники ОР можно назвать точечные неоднородности в покрытиях зеркал. О крупных пылевидных частицах, попадающих в рабочую зону зеркал ЛГ, которые приводят к большим порогам захвата ЛГ, мы уже упоминали во Введении. В зеркалах с ионно-плазменным напылением плотность субмикронного размера дефектов может составлять несколько десятков штук на мм^2 . Вклад этих дефектов не является пренебрежимо малым и, как правило, превышает 10% величины КИР. В связи с этим точечные дефекты необходимо учитывать при оценках баланса значений ККС. Что же касается их диссипативной природы, то это всего лишь наше предположение, выходящее за рамки обсуждаемых здесь вопросов.

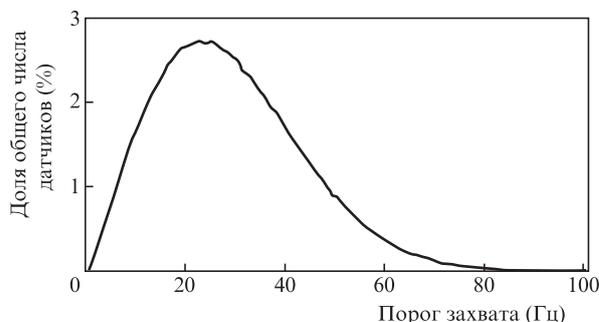


Рис.6. Огибающая гистограммы распределения (модель) порога захвата 1000 диссипативных точечных источников ОР со случайной фазой. Парциальное значение порога захвата 1 Гц, число реализаций 10^6 .

Много вопросов возникает и при оптимизации технологических процессов производства зеркал для ЛГ, поскольку параметры ОР являются технологическими производными. Например, известно, что величина КИР зеркала связана с шероховатостью поверхности его подложки. А насколько отношение средних значений диссипативной и консервативной составляющих ОР (1/5) является универсальной функцией технологического процесса? Не менее интересен ответ на вопрос о влиянии УФ излучения газового разряда на источники ОР. Возможен ли процесс «преобразования» консервативных источников в диссипативные под его влиянием? Остаются ли неизменными ККС КР после проведения электровакуумной обработки датчиков ЛГ?

Разумеется, в рамках этой работы мы можем только задать эти вопросы. Получить на них ответы можно из результатов прямых измерений ККС в КР ЛГ [5]. Это даст возможность контролировать величины этих параметров на всех этапах изготовления ЛГ, начиная от сборки и юстировки КР и заканчивая электровакуумной обработкой и проведением испытаний гироскопических датчиков.

1. Aronowitz F., in *Optical Gyros and their Applications* (Neuilly-sur-Seine, France, RTO AGARDograph 339, 1999, p. 3.1).
2. *Волновые и флуктуационные процессы в лазерах*. Под ред. Ю.Л.Климонтовича (М.: Наука, 1974).
3. Etrich C., Mandel P., CentenoNeelen R., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. *Phys. Rev. A*, **46**, 525 (1992).
4. Wilkinson J.R. *Progr. Quantum Electron.*, **11**, 1 (1987).
5. Бессонов А.С., Макеев А.П., Петрухин Е.А. *Квантовая электроника*, **47**, 675 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 675 (2017)].
6. Dainty J.C. *Laser Speckle and Related Phenomena* (Berlin: Springer-Verlag, 1984).
7. Петрухин Е.А., Бессонов А.С. *Труды XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам* (С.-Петербург, 2017, с. 212 – 215).
8. Lord Rayleigh. *Philos. Mag.*, **10**, 73 (1880).
9. Rahn J., Hutchings T.J. US Patent 4,884,283 (1989).
10. Бекетов С.Е., Бессонов А.С., Петрухин Е.А., Хохлов И.Н., Хохлов Н.И. *Квантовая электроника*, **49**, 1059 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1059 (2019)].
11. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. *Квантовая электроника*, **45** (2), 171 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (2), 171 (2015)].
12. Pearson K. *Philos. Mag.*, **50**, 157 (1900).
13. Krentz G., Bux S., Slama S., et al. *Appl. Phys. B*, **87**, 643 (2007).