

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ РАССЕЯНИЯ НА ПОЛОСУ ЗАХВАТА КОЛЬЦЕВОГО He-Ne ЛАЗЕРА

В.В.Азарова^{1,2}, В.А.Горшков^{2,3}, Е.А.Петрухин²
1. НИУ ВШЭ (МИЭМ); 2. ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»;
3. МФТИ, 141700 Московз. Долгопрудный, Институтский пер., 9.
azarovav@hotmail.ru

1. Введение.

Основной причиной захвата частот встречных волн кольцевого лазера является обратное рассеяние на зеркалах кольцевого резонатора (КР)¹. Однако это не единственный источник обратного рассеяния. Зеркала КР обладают не нулевым коэффициентом пропускания, поэтому часть излучения, выходящего из лазера, возвращается назад в резонатор, рассеиваясь на фотоприемных устройствах и стенках корпуса прибора. И если, для лазерных зеркал вводятся жесткие требования на величину коэффициента интегрального рассеивания (КИР), то на элементы конструкции, помещенные снаружи резонатора, таких требований не вводится.

Проведем оценку вклада в полосу захвата таких источников. В качестве исходной модели, рассмотрим следующую простейшую модель

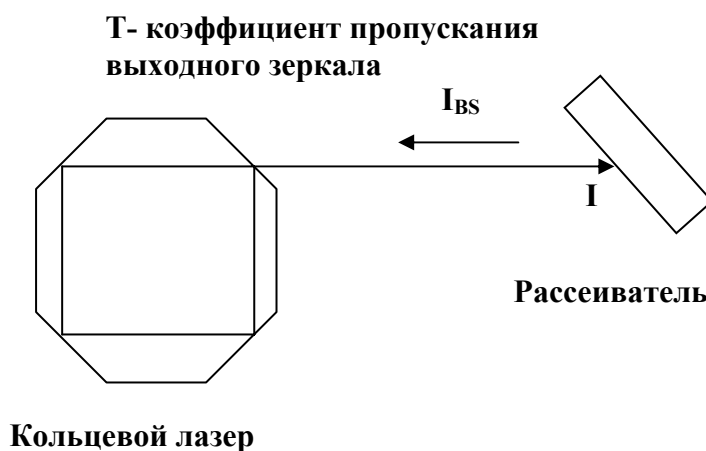


Рис.1. Оптическая схема, описывающая влияние внешнего рассеивателя на полосу захвата кольцевого лазера.

Излучение кольцевого лазера, выходящего из зеркала с коэффициентом пропускания T , попадает на рассеиватель, часть этого излучения (I_{BS}) возвращается назад в резонатор кольцевого лазера. Предположим, что мы имеем идеальный источник рассеяния, равномерно рассеивающий 100% излучения в телесный угол 4π радиан. Тогда величина интенсивности обратного рассеяния описывается следующим соотношением (подробно вывод дан в работе¹):

$$I_{BS} = \frac{\lambda^2}{16d^2} I, \quad (1)$$

где λ – длина волны, d – диаметр лазерного луча. Т.е. в резонатор кольцевого лазера возвращается часть излучения, попадающая в телесный угол, определяемый дифракционным пределом расходимости луча.

В уравнениях, описывающих амплитудно-фазовые характеристики кольцевого лазера², фигурируют величины модулей коэффициентов связи (КС) встречных волн. Воспользовавшись результатами работы³, получаем соотношение для модуля КС идеального рассеивателя:

$$r_{BS} = \frac{\lambda}{4d} T, \quad (2)$$

где T – коэффициент пропускания выходного зеркала кольцевого лазера.

В первом порядке теории возмущений [2] полоса захвата КЛ описывается следующим соотношением:

$$\Omega_L = \sqrt{(r_{cw}^2 + r_{ccw}^2 + 2r_{cw}r_{ccw} \cos \varphi)} \frac{c}{2\pi L}, \quad (3)$$

где r_{cw} и r_{ccw} – модули КС в направлении по и против часовой стрелки, $\varphi = (\varphi_{cw} + \varphi_{ccw})$ – суммарный фазовый сдвиг, возникающий при обратном рассеянии, L – периметр КР, c – скорость света. Полоса захвата дана в единицах Герц.

В случае внешнего рассеивателя соотношение (3) можно записать в виде:

$$\Omega_L = \frac{c}{2\pi L} r_{BS}. \quad (4)$$

Выполним численные оценки для случая, когда $L = 16$ см, $\lambda = 0,63$ мкм, $d = 400$ мкм, $T = 1000$ ppm. Тогда величина модуля КС составит 0,4 ppm, а полоса захвата – 120 Гц.

При оценке вклада внешнего рассеивателя в полосу захвата КЛ необходимо учесть, что это излучение интерферирует с внутренними источниками ОР кольцевого резонатора. Расстояние между КР и рассеивателем является величиной изменяющейся во времени более чем на длину волны излучения, поэтому вклад в полосу захвата, оцененный из соотношения (4) необходимо умножить на 2, Т.е. изменение полосы захвата в данном случае может достигнуть 240 Гц. Понятно, что такого рода эффектами не следует пренебрегать при конструировании лазерных гироскопов на основе КЛ.

2. Описание методики измерения модуля коэффициента связи внешнего рассеивателя.

Схема установки представлена на рисунке 2. Измерения проводились с использованием кольцевого He-Ne лазера с неплоским контуром⁴. Периметр четырех зеркального резонатора составлял 16 см, пропускание выходного зеркала 1000 ppm (для р-поляризации), наполнение газовой He-Ne смесью – 4 торр.

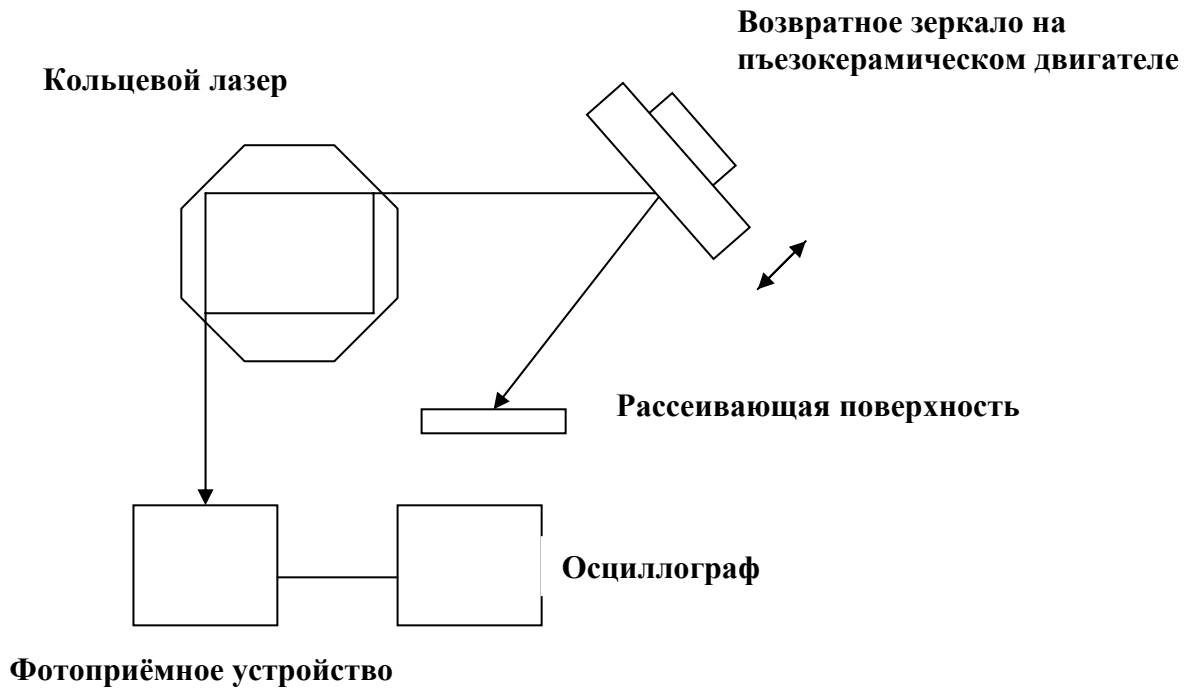


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной установки.

Частотная «подставка» создавалась при помощи аксиального магнитного поля, накладываемого на разрядные промежутки КЛ (эффект Зеемана) и в наших экспериментах составляла величину около 50 кГц. Расстояние между исследуемым рассеивателем и КЛ составляло примерно 20 см, и изменялось в масштабе длины волны при помощи поворотного зеркала, установленного на пьезокорректоре.

Величина модуля КС, связанная с обратным рассеянием от внешнего рассеивателя, определялась из измерений переменной составляющей интенсивности генерации КЛ.

Известно^{2,5}, что в режиме «биений», в интенсивностях встречных волн присутствуют переменные составляющие с частотой «подставки». Если величина прочности предельного цикла КЛ значительно превышает частоту биений и полосу захвата, глубины модуляции интенсивностей встречных КЛ описывается следующим соотношением^{5,6}:

$$m_{cw} = \frac{\sqrt{r_{cw}^2 \alpha^2 + r_{ccw}^2 \beta^2 - 2\alpha\beta r_{cw} r_{ccw} \cos \varphi} \frac{c}{L}}{\eta(\alpha - \beta)}, \quad (5)$$

$$m_{ccw} = \frac{\sqrt{r_{ccw}^2 \alpha^2 + r_{cw}^2 \beta^2 - 2\alpha\beta r_{cw} r_{ccw} \cos \varphi} \frac{c}{L}}{\eta(\alpha - \beta)}, \quad (6)$$

где α – коэффициент самонасыщения, β – коэффициент взаимонасыщения, η – прочность предельного цикла КЛ $\eta = \Delta\nu(n-1)$, $\Delta\nu$ – ширина полосы резонатора.

В случае, когда в КР возвращается излучение только в одном направлении (см. рис. 1), соотношение для глубины модуляции может быть представлено в виде:

$$m_{csw} = \frac{\alpha r_{BS}}{(\alpha - \beta)\eta L} \cdot c \quad (7)$$

Остается только откалибровать величину модуля КС. Для этого использовалось возвратное зеркало, установленное по нормали к выходящему из КЛ лучу (смотри рисунок 3).

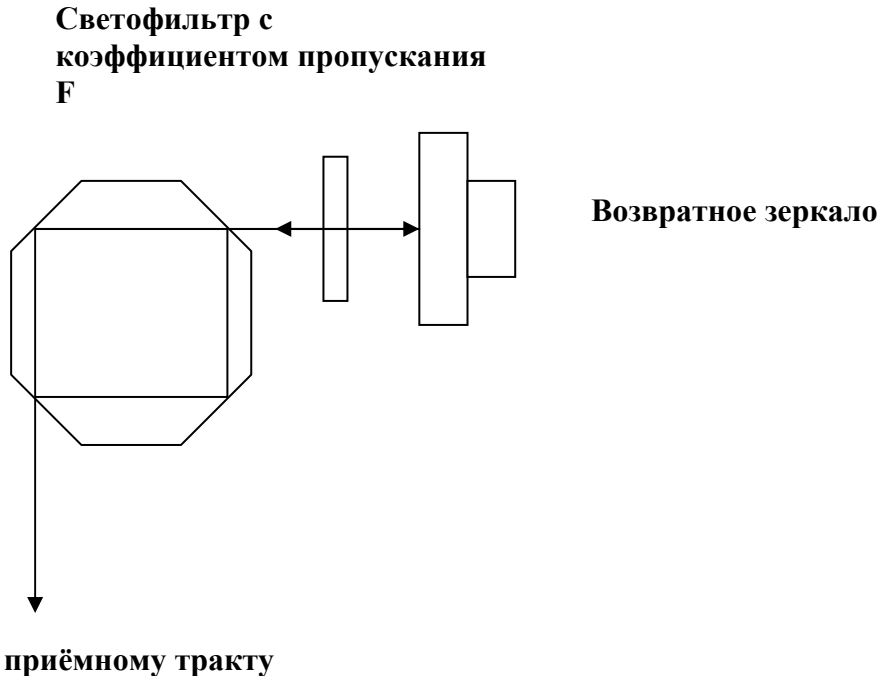


Рис. 3. Схема калибровки установки с возвратным зеркалом.

Подбирая величину коэффициента пропускания фильтра F и сравнивая величину переменной составляющей интенсивности, с той, что получается без возвратного зеркала, несложно определить абсолютную величину модуля КС внешнего рассеивателя. Модуль КС, создаваемый ВЗ (r_{BR}), рассчитывается по следующему соотношению:

$$r_{BR} = \frac{F T}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

где F – коэффициент пропускания фильтра по интенсивности. Знаменатель $\sqrt{2}$ в соотношении (8) появился из-за того, что нужно учесть специфику прохождения света через КР с неплоским контуром: внутри резонатора волна имеет круговую поляризацию, а, выходя наружу, приобретает линейную р-поляризацию. В случае резонатора с плоским резонатором, этот знаменатель равен единице.

Главной особенностью проведения таких измерений является интерференционный характер поведения переменной составляющей интенсивности кольцевого лазера. В случае проведения калибровочного измерения с возвратным зеркалом происходит интерференция волны, отраженной от ВЗ с волной обратного рассеяния кольцевого резонатора. В случае измерения влияния внешнего источника рассеяния, интерферируют волна рассеянная от него с волной обратного рассеяния резонатора. При перемещении поворотного или возвратного зеркала (смотри рисунки 2 и 3)

изменяется фаза между двумя интерферирующими источниками, и, в интенсивности переменной составляющей КЛ наблюдается последовательное чередование с периодом $\lambda/2$ максимальных и минимальных значений.

Глубина модуляции интенсивности кольцевого лазера с частотой биений в наших экспериментах составляла порядка 1%. При использовании возвратного зеркала глубина модуляции достигала 10%. Измеряя максимальное (I_{\max}) и минимальное (I_{\min}) значения переменной составляющей интенсивности КЛ с частотой биений, определяем величину модуля внутреннего КС резонатора (r_{int}) из соотношения:

$$r_{\text{int}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} r_{BR}. \quad (9)$$

Аналогичным образом определялся и модуль КС внешнего источника обратного рассеяния. В этом случае, относительное изменение переменной составляющей интенсивности генерации КЛ достигало 30-40% (в случае использования в качестве рассеивателя белой писчей бумаги). Величина модуля КС внешнего источника (r_{BS}) определялась из следующего соотношения:

$$r_{BS} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} r_{\text{int}}. \quad (10)$$

Типичный вид зависимости переменной составляющей интенсивности выходящего из резонатора излучения (при перемещении поворотного зеркала) представлен на рисунке 4.

В наших экспериментах модуль внутреннего КС кольцевого резонатора составлял 1,2 ppm (+/- 0,15 ppm), модуль КС внешнего рассеивателя достигал 0,4 ppm. Величина предельной чувствительности данного метода составляла около 0,006 ppm и определялась, главным образом, медленным дрейфом интенсивности мощности излучения исследуемого КЛ.

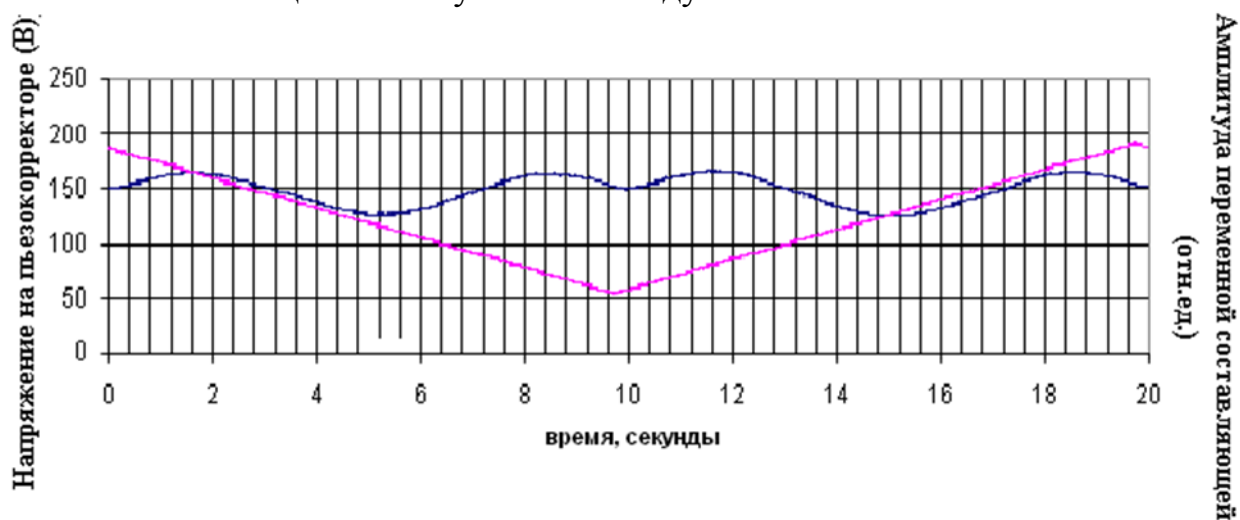


Рис.4. Временные зависимости амплитуды переменной составляющей интенсивности генерации кольцевого лазера и напряжения на пьезокорректоре, изменяющем расстояние между внешним рассеивателем и лазером.

3. Результаты экспериментов

В качестве объектов исследования использовались: белая писчая бумага (вариант идеального рассеивателя) и два экспериментально используемых

фотоприемника. Для того чтобы исключить попадание паразитных отражений от окошка фотоприемника, все исследуемые рассеиватели устанавливались под углом 45 градусов относительно падающего луча лазера. Затем измерялась зависимость модуля КС от угла поворота рассеивателя, Шаг поворота составлял около 10^{-4} радиан. В связи с тем, что кольцевой резонатор «собирает» обратное рассеяние в небольшой телесный угол (линейный размер порядка 10^{-3} радиан), при измерении модулей КС внешних объектов проявляется типичное для спекл-структур [7] поведение.

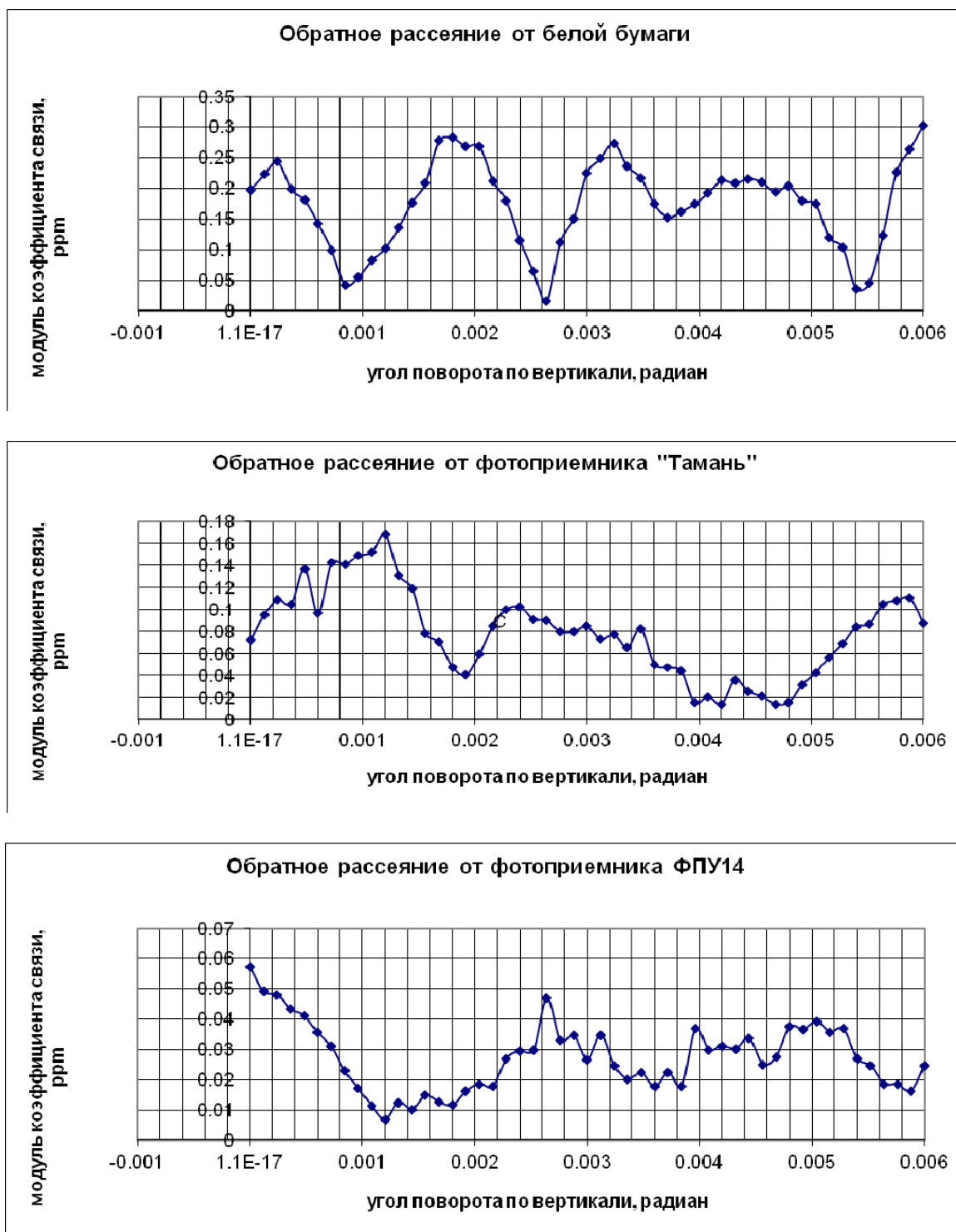


Рис.5. Угловые зависимости обратного рассеяния от белой бумаги и фотоприемников

Это подтверждают, приведенные на рисунке 5 угловые зависимости обратного рассеяния от угла поворота по вертикали рассеивателя. Мы не приводим здесь угловых зависимостей ОР при повороте рассеивателя по горизонтали, отметим только, что качественно они не отличаются.

Как и следовало ожидать, характерный угловой размер «спеклов» составляет порядка одного миллирадиана. При перемещении рассеивателя в поперечном к лазерному лучу направлении, существенное изменение величины модуля КС при его смещении на величину порядка диаметра лазерного луча (см. рис. 6).

Для зависимостей, приведенных на рисунках 5 и 6 характерно то, что величина модуля КС рассеивателя изменяется более чем в 10 раз.



Рис.6. Зависимость модуля КС белой бумаги при смещении рассеивателя в поперечном направлении.

В таблице приведены значения для средних и максимальных значений величин КС, полученных в наших экспериментах. Здесь же представлены величины вклада в полосу захвата КЛ, вычисленные с использованием соотношения (4).

Сводная таблица результатов обратного рассеяния внешних рассеивателей

Рассеиватель	Средние значения		Максимальные значения	
	Модуль Коэфф. связи	$2\Omega_L$	Модуль Коэфф.связи	$2\Omega_L$
Белая бумага	0,17 ppm	100 Hz	0,42 ppm	235 Hz
ФП"Тамань"	0,08 ppm	48 Hz	0,17 ppm	100 Hz
ФП"ФПУ14"	0,029	17 Hz	0,07 ppm	41 Hz

Как следует из результатов, представленных в таблице, величины модулей КС ФП «Тамань» в 2 раза, а ФПУ14 в 6 раз меньше, чем для белой бумаги. Причем, основной вклад в обратное рассеяние фотоприемников дают не сами фоточувствительные площадки (их две, узкие темные полосы длиной около 1 мм), а подложка, на которой они расположены. В случае ФП «Тамань» размер сильнорассеивающей подложки составляет около 1 мм². В ФПУ14 размер подложки значительно меньше (на фотографии виден сильно рассеивающий ободок, окаймляющий фоточувствительные площадки). Как следствие, величина модуля КС ФПУ14 заметно ниже, чем у ФП «Тамань».

Не представляет особой сложности оценить вклад в полосу захвата КЛ любого другого объекта рассеяния. Для этого надо измерить интенсивность обратного рассеяния от исследуемого объекта (например, фотоприемника) и сравнить эту величину с калибровочным значением, определяемым величиной обратного рассеяния от белой бумаги. Телесный угол, в котором измеряется интенсивность обратного рассеяния, может быть достаточно большим, чтобы не затруднять регистрацию рассеянного излучения. После этого можно воспользоваться соотношениями (1) и (2), и определить среднюю величину (вернее, среднеквадратическую) модуля КС интересующего нас объекта. При этом надо учитывать, что в реальности, вследствие спекл-структуры поля обратного рассеяния, дисперсия величины модуля КС (полагаем, что положение объекта относительно лазерного луча выбрано случайным образом) примерно равна величине среднего значения.

Для оценки порядка величины модуля КС можно использовать также величину коэффициента интегрального рассеяния (σ) объекта, полагая, что:

$$r_{BS} = \frac{\lambda}{4d} T \sqrt{\sigma}. \quad (10)$$

Заметим, что это соотношение не учитывает особенностей индикатрисы рассеяния объекта. В случае белой бумаги величина $\sigma=1$.

Соотношение (10), в частности, показывает, что обратное рассеяние от объектов с сравнительно малым рассеянием могут давать заметный вклад в величину полосы захвата. Так, для объекта с $\sigma=100$ ppm, вклад в полосу захвата может составлять единицы Герц. Поэтому при конструировании гироскопов на основе кольцевого лазера, необходимо обращать внимание на положение лучей, выходящих из кольцевого резонатора наружу.

В частности, в наших экспериментах регистрировалось заметное обратное рассеяние от отпечатка пальца руки, оставленного на поверхности поворотного зеркала.

Источником обратного рассеяния является также материал подложки выходного зеркала КЛ. Для ситалловых подложек заметным является внутреннее объемное рассеяние. В этом случае мы регистрировали модули КС на уровне нескольких единиц 0,01 ppm.

Другим важным фактором, влияющим на величину эффекта обратного рассеяния, является коэффициент пропускания выходного зеркала кольцевого лазера. В связи с тем, что величина вклада в полосу захвата пропорциональна

коэффициенту пропускания выходного зеркала, необходимо учитывать это при конструировании ЛГ, отдавая предпочтение лазерам с меньшим коэффициентом пропускания выходного зеркала.

1. Арановиц Ф., в сборнике «Применение лазеров» под редакцией В.П.Тычинского, «Мир», Москва, 1974.
2. Aronowitz F. Fundamental of the ring laser gyro. Optical Gyros and there Applications. RTO-AG-339, 1999.
3. Krentz G., S.Vux, S.Slama, C.Zimmermann, P.W.Courteille. Appl.Phys.B87, 643, 2007.
4. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г.. Квантовая электроника, 30, №2, 96, 2000.
5. Волновые и флуктуационные процессы в лазерах. Под ред. Ю.Л.Климонтовича. М, Наука, 1974.
6. Бирман А.Я., Петрухин Е.А., Савушкин А.Ф.. Квантовая электроника, 6, №12, 2626, 1979.
7. Франсон М.. Оптика спеклов. Мир, М., 1980.