МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 681.7.013.1

Разъюстировки четырехпризменного кольцевого резонатора лазерного гирометра

09, сентябрь 2012

Черняева А.А.

Студентка, кафедра «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы»

Научный руководитель: Вереникина Н.М., кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы»

МГТУ им. Н.Э. Баумана annet.chernyaeva@yandex.ru

Введение

Лазерный гирометр является высокоточным измерительным прибором, который выполняет функции датчика первичной информации об угловом движении объектов в различного вида системах автоматического регулирования и управления. Очевидно, что основным качеством любого датчика первичной информации является точность, с которой он воспроизводит в заданном виде поступающую на его вход информацию. Погрешностями датчика первичной информации, как правило, определяются погрешности измерительной системы в целом.

В настоящее время используют многочисленные конструкции лазерных гирометров, которые обладают рядом общих характерных черт. В первую очередь, это использование в качестве чувствительно элемента активного кольцевого резонатора, обеспечивающего устойчивую генерацию, по крайней мере, двух встречных волн. Поэтому основной задачей при проектировании является исследование устойчивости кольцевого резонатора и расчет параметров формируемого излучения.

При проектировании кольцевых лазеров с призменным резонатором важно знать изменение положения осевого контура резонатора под воздействием внешних факторов. Наибольшие разъюстировки происходят при изменении температуры, поскольку от температуры зависит показатель преломления материала призм. Кроме того, происходит изменение плотности и показателя преломления воздуха, который заполняет канал моноблока, соединенный с системой регулирования периметра.

При анализе влияния температурных возмущений на разъюстировки резонатора необходимо рассматривать два случая:

 самопрогрев прибора в процессе работы (увеличение температуры активной среды в процессе работы, которое приводит к изменению температуры первых призм относительно вторых); — внешнее изменение температуры (равномерное изменение температуры всех призм за счет работы прибора в определенном температурном диапазоне).

Избежать такой разъюстировки в призменном резонаторе принципиально невозможно. Разъюстировка приводит к изменению дифракционных потерь и лифракционной невзаимности, поляризационных эффектов (при наличии напряжений в призмах и магнитного поля), что приводит к дрейфу нуля лазерного гирометра. Также разъюстировки могут привести к уменьшению мощности излучения на несколько процентов, следовательно, фотоприемник, реагирующий на зарегистрирует интенсивную интенсивность светового поля, менее интерференционную картину, но это не помешает зарегистрировать смещения интерференционной картины.

Наиболее важное влияние разъюстировки могут оказать на изменение геометрических параметров резонатора (периметра и площади), которое может сопровождаться изменением масштабного коэффициента кольцевого лазера, который является одним из самых важных параметров для лазерного гирометра. Именно поэтому в первую очередь будет рассматриваться влияние разъюстировок именно на эти параметры.

Помимо влияния температуры смещение осевого контура могут вызвать технологические неточности расположения оптических компонентов излучателя и неточности изготовления этих компонентов.

Относительное расположение преломляющих и отражающих элементов, задаваемое оптической схемой, определяет расчетный ход луча в резонаторе. Изменение положения элемента, которое называется *«ошибкой положения»* приводит к смещению осевого контура.

К основным «ошибкам положения» можно отнести следующие понятия:

наклон (изменение угола между расчетным и реальным положением оптической поверхности);

продольное смещение (изменение расстояния между расчетным и реальным положением поверхности);

– поперечное смещение (децентрировка) (актуально только в случае сферической поверхности, определяется как смещение центра кривизны поверхности относительно нормали в точке входа луча в поперечном направлении).

К появлению ошибок положения элементов приводит конечная точность изготовления деталей и сборки, которая регламентируется требованиями, указанными в конструкторской документации. Основными элементами повышенного контроля являются призмы ПВО и моноблок.

Именно поэтому важно подробно рассмотреть влияние *«ошибок положения»* на смещение осевого контура и на основные параметры кольцевого резонатора лазерного гирометра.

Метод осевого контура с учетом вектора ошибок

Разъюстировки приводят к деформации осевой линии резонатора, чем больше смещение осевой линии в каком-нибудь важном сечении или на важном участке, тем значительнее последствия разъюстировки. Для учета влияния разъюстировок применяют метод осевого контура. Важным для метода осевого контура является понятие вектора ошибок $B(b_x, b_a, b_y, b_\beta)$. Его составляющие- ненулевые значения координат лучевого вектора осевого луча, прошедшего часть оптической системы, подвергшейся разъюстировке (рис. 1).



Понятие вектора ошибок B(b_x, b_α, b_y, b_β) Для того чтобы найти вектор ошибок необходимо связать изменения координат лучевого вектора с вызывающими эти изменения причинами.

Если считать причиной разъюстировки изменение показателя преломления материала призм или воздуха, то достаточно вязать дифференциал угловой координаты преломленного луча с дифференциалом показателя преломления, так как изменения линейной координаты луча при этом не происходит (рис. 2)



Изменение координат лучевого вектора при изменении показателя преломления материала призм и воздуха

В таблице 1 представлен вид вектора ошибок для границы раздела сред «воздух-стекло» (что соответствует переходу луча из бокового канала кольцевого лазера в тело призмы) и «стекло-воздух» (что соответствует переходу луча из тела призмы в боковой канал кольцевого лазера).

Таблица 1

Граница раздела сред	Вид вектора ошибок					
«воздух- стекло»	$B = \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-tg(\varepsilon_2)}{n_{cme\kappa\pi 0}} \delta n_{cme\kappa\pi 0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{sin(\varepsilon_2)}{n_{cme\kappa\pi 0}} \cdot cos(\varepsilon_2) \delta n_{so3dyx} \end{pmatrix}$					
«стекло- воздух»	$B = \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sin(\varepsilon_2)}{n_{\text{воздух}} \cdot \cos(\varepsilon_1)} \delta n_{\text{стекло}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-tg(\varepsilon_1)}{n_{\text{воздух}}} \delta n_{\text{воздух}} \end{pmatrix}$					

Вид вектора ошибок

Если оптическая система содержит несколько ошибок, то суммарный вектор ошибок рассчитывается по формуле:

$$B_0 = \sum_{j=1}^{N-1} \prod_{i=1}^{N-j} M_{N+1-i} \cdot B_j + B_N,$$

где *N*- количество элементов в резонаторе.

Положение деформированного осевого контура в расчетном сечении через один проход резонатора отражается на изменении лучевого контура:

$$X = M \times X_0 + B_0$$

Из требования самосопряжения нулевого луча вытекает уравнение:

$$X_0 = M \times X_0 + B_0 ,$$

откуда следует основное соотношение метода:

$$X_0 = (I - M_0)^{-1} \times B_0$$
,

где *I*- единичная матрица.

Для определения координат возмущенного осевого контура в других сечениях полученный собственный вектор последовательно умножается на лучевые матрицы соответствующих элементов резонатора с учетом векторов ошибок элементов резонатора:

$$X_k = M_k \times X_{k-1} + B_k$$

Окончательное выражение для координат возмущенного осевого контура в любом сечении принимает вид:

$$X_{k} = \prod_{i=1}^{k} M_{k+1-i} \cdot X_{0} + \sum_{j=1}^{k-1} \prod_{i=1}^{k-j} M_{k+1-i} \cdot B_{j} + B_{k}$$

Разъюстировки кольцевого резонатора с учетом влияния температуры

Расчет разъюстировок будем вести на основе лазерного гирометра, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» (рис. 3).



Рис. 3

Схема кольцевого резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами»

Для компактности записи последующих соотношений и матриц вводятся вспомогательные характеристики преломления:

 $N = \frac{n_{cmeклo}}{n_{go3dyx}} = \frac{sin(\varepsilon_1)}{sin(\varepsilon_2)}$ относительный показатель преломления.

 $\Pi = \frac{cos(\varepsilon_2)}{cos(\varepsilon_1)}$ - коэффициент анаморфизма, который показывает масштаб

изменения поперечной координаты луча.

Удобно также использовать вспомогательный параметр μ :

$$\begin{split} \mu_{1} &= 1 - \frac{n_{\text{воздух}} \cos(\varepsilon_{1})}{n_{\text{стекло}} \cos(\varepsilon_{2})} = 1 - \frac{tg(\varepsilon_{2})}{tg(\varepsilon_{1})} = 1 - \frac{n_{\text{воздух}} \cos(\varepsilon_{1})}{\sqrt{\left(n_{\text{воздух}}\right)^{2} - \left(n_{\text{стекло}} \sin(\varepsilon_{1})\right)^{2}}},\\ \mu_{2} &= 1 - \frac{n_{\text{стекло}}}{n_{\text{воздух}}} \frac{\cos(\varepsilon_{2})}{\cos(\varepsilon_{1})} \end{split}$$

В технической оптике принято характеризовать оптические поверхности величинами оптической силы, которые для ортогональных плоскостей p и sзадаются соотношением: $\Phi_p = -\mu \cdot K_p \cdot sec(\varepsilon_2)$, $\Phi_s = -\mu \cdot K_s \cdot sec(\varepsilon_2)$,

где K_p и K_s - величины кривизны поверхности в плоскостях p и s соответственно.

Так как рассматриваются температурные изменения, то стоит учесть коэффициент температурного расширения ситалла: $\alpha = 10^{-7}$ (1/K).

Также следует указать диапазон изменения температуры элементов резонатора в процессе самопрогрева, в результате которого происходит увеличение температуры активной среды, которая располагается между первыми призмами, следовательно, происходит изменение температуры первой и четвертой призм относительно второй и третьей, которое принимаем равным ΔT=10 К.

Так же стоит учесть, что для каждого элемента оптической системы резонатора расстояние L будет иметь свое значение, зависящее от конкретных меж призменных расстояний внутри каналов резонатора и от промежутков, проходимых лучом внутри призмы. Данные промежутки были подробно рассчитаны в [6].

Если принять во внимание все выше изложенные допущения, то можно составить матрицы для каждого элемента оптической системы резонатора в общем виде. Матрицы основных элементов представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Элементы оптической	Матрицы элементов			
системы резонатора		Меридиональное сечение, М _р	Сагиттальное сечение, М _s	Вектор ошибок, В	
(ме	Каналы ежпризменные расстояния)	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\ 0\end{bmatrix}$	
	Преломление на границе «воздух- стекло»	$\begin{bmatrix} \Pi & 0 \\ -\Pi \cdot \Phi_p & \Pi^{-1} \cdot N^{-1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & N^{-1} \end{bmatrix}$	$\left[\frac{0}{-tg(\pm\varepsilon_2)}{n_{\text{стекло}}}\cdot\beta\cdot\Delta T\right]$	
П Р И З М Ы	Отражение от грани гипотенузы	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \Phi_p & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\ 0\end{bmatrix}$	
	Преломление на границе «стекло- воздух»	$\begin{bmatrix} \Pi^{-1} & 0\\ -\Pi^{-1} \cdot \Phi_p & \Pi \cdot N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\ sin(\pm\varepsilon_2)\\ \overline{n_{\text{воздух}} \cdot cos(\pm\varepsilon_1)} \cdot \beta \cdot \Delta T \end{bmatrix}$	
	Прохождение внутри призмы	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\ 0\end{bmatrix}$	

Матрицы основных элементов оптической системы резонатора

В результате составления матриц для каждого элемента оптической системы резонатора можно получить следующие данные:

1. Суммарные матрицы резонатора в меридиональных и сагиттальных сечениях:

$$M_{p.\text{сум}} = \prod_{i=1}^{k} M_{k+1-i} = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix},$$
$$M_{s.\text{сум}} = \prod_{i=1}^{k} M_{k+1-i} = \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix},$$

где k- количество всех элементов, для которых были составлены матрицы

2. Суммарный вектор ошибок резонатора:

$$B_{p.сум} = \sum_{j=1}^{k-1} \left(\prod_{i=1}^{k} M_{p.k+1-i} \cdot B_j \right)$$
3. Координаты возмущенного осевого контура в произвольном сечении:

$$X_k = M_k \times X_{k-1} + B_k, X_k = \begin{bmatrix} (X_k)_0 \\ (X_k)_1 \end{bmatrix}$$

Следовательно, разъюстировки на поверхностях основных элементов и в сечениях будут определяться следующим образом:

а) Активный канал: $\Delta X_A = (X_A)_0$, $\Delta \phi_A = (X_A)_1$, б) Гипотенуза первой призмы: $\Delta X_{\Gamma 1} = \frac{(X_{\Gamma})_0}{cos(\varepsilon_2)}$, $\Delta \phi_{\Gamma} = (X_{\Gamma})_1$, второй призмы: $\Delta X_{\Gamma 2} = \frac{(X_{\Gamma})_0}{cos(-\varepsilon_2)}$, $\Delta \phi_{\Gamma} = (X_{\Gamma})_1$, в) Малый катет призм: $\Delta X_M = \frac{(X_M)_0}{cos(\varepsilon_1)}$, $\Delta \phi_{\Gamma} = (X_M)_1$, в) Канал СРП: $\Delta X_{cpn} = (X_{cpn})_0$, $\Delta \phi_{cpn} = (X_{cpn})_1$, Для нашего кольцевого резонатора, имеющего следующие характеристики: $\lambda = 0.6328$ мкм, $L_a = 63$ мм, H = 6,6 мм.- рассчитанные температурные разъюстировки, а также основные геометрические параметры принимают следующие численные значения (таблица 3):

Таблица 3

Невозмущенный резонатор					
Свойства резона	атора и параметры гауссова	Сечение			
	пучка	Мери	ідиональное	Сагитальное	
Радиу	с перетяжки, мм	(0,22459	0,29894	
Конфо	кальный параметр	2:	50,41274	250,41274	
Оптиче	ский периметр, мм		280,	289	
Площад	ь резонатора, кв.мм		4,006	10^{3}	
Масштабный	коэффициент, Гц/град/ч		0.4	38	
	Возмущеннь	ій резон	атор		
Conormo		Разъюстировки			
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад		
X _A	0,1		0		
$X_{\Gamma 1}$	-0,147	-0,147		4,71.10 ⁻⁵	
X _{M1}	-0,101		0		
$X_{\Gamma 2}$	-0,101		0		
X _{M2}	0,147		0		
Х _{СРП}	0,101		0		
	Измененные	е параме	етры		
Изменение оптического периметра, мм			2,388·10 ⁻³		
Изменение пл	Изменение площади резонатора, кв.мм			326	
Изменение мас	2,328 • 10 ⁻³				

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» в процессе самопрогрева

Полученные значения температурных разъюстировок (рис. 4) и изменения основных параметров кольцевого резонатора (оптического периметра, площади и масштабного коэффициента) принято считать значениями «идеальной системы». Это объясняется тем, что рассматриваемый процесс самопрогрева – это процесс, которого принципиально невозможно избежать невозможно, так как нагрев активной среды всегда происходит в процессе работы прибора. Следовательно, данные температурные разъюстировки и изменения основных параметров присутствуют постоянно.



Рис. 4

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» в процессе самопрогрева

В результате дальнейший анализ и сравнение характеристик кольцевого резонатора следует вести относительно данных значений, принимая их за эталонные значения. Особое внимание следует уделять значениям разъюстировок в активном канале. Это в первую очередь связано с тем, что в данном канале располагается активная среда, обладающая своими свойствами, которые вносят свое влияние в работу прибора, поэтому дополнительное влияние на активную среду может только усилить негативные факторы активной среды и, в результате, привести к изменениям в точности прибора. Также учитывая, что лазерный гирометр – это в первую очередь прибор, который может использоваться как самостоятельная единиц, так и входить в состав систем, стоит учесть, что он работает в различных температурных диапазонах, каждый из которых может поразному влиять на смещение осевого контура резонатора и, как следствие, на основные параметры. Именно поэтому следует провести аналогичный расчет температурных разъюстировок для основных рабочих диапазонов: $\Delta 25^{\circ} C$, $\Delta 45^{\circ} C$ и полный рабочий диапазон $\Delta 100^{\circ}$ C. Также следует учесть, что дальнейший расчет будет учитывать совместное влияние как процесса самопрогрева $\Delta T = 10^{\circ}$ С и конкретного рабочего диапазона. Так как принципиально расчет проводится по рассмотренной выше методике и изменения вносятся лишь в значения ΔT в формулах вектора ошибок. Следовательно, подробно описывать расчет не имеет смысла, поэтому приведем лишь выходные значения для каждого рабочего диапазона.

а) Температурные разъюстировки кольцевого резонатора при изменении температуры $\Delta T = 25^{\circ} C$

Основные значения и параметры представлены в таблице 4.

Таблица 4

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» при ДT= 25° С

Невозмущенный резонатор						
Свойства резонатора и	Сечение					
параметры гауссовапучка	Меридиональное	Сагитальное				

Радиус перетяжки, мм		0	0,22459 0,2989		
Конфокальный параметр		25	0,41307	250,41307	
Оптичес	кий периметр, мм		280,2	289	
Площадь	резонатора, кв.мм		$4,006 \cdot 10^3$		
Масштабный і	коэффициент, Гц/град/ч		0.4.	38	
	Возмуще	нный резо	онатор		
Сополно		Разък	остировки		
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад		
X _A	0,099	0,099		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,146	-0,146		1,649·10 ⁻⁴	
X _{M1}	-0,101	-0,101		-5·10 ⁻⁴	
$X_{\Gamma 2}$	-0,127		-5.10-4		
X _{M2}	0,186		1,178.10-4		
Х _{СРП}	0,128		0		
	Изменен	ные парам	метры		
Изменение опт	ического периметра, мм	0.014		14	
Изменение площади резонатора, кв.мм		21,306		06	
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,307.10-3			

b) Температурные разъюстировки кольцевого резонатора при изменении температуры $\Delta T = 45^{\circ}$ С

Основные значения и параметры для данного температурного диапазона представлены в таблице 5.

Таблица 5

Температурные разъюстировки резонатора , выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» при $\Delta T = 45^{\circ} C$

Невозмущенный резонатор						
Свойства резонатора и параметры		Сечение				
	гауссова пучка	Мери	диональное	Сагитальное		
Радиус	перетяжки, мм	0	,22459	0,29894		
Конфока	альный параметр	25	0,41307	250,41307		
Оптичесн	кий периметр, мм		280,2	289		
Площадь	резонатора, кв.мм		4,006	$\cdot 10^{3}$		
Масштабный к	соэффициент, Гц/град/ч		0.4.	38		
Возмущенный резонатор						
Сополно		Разъюстировки				
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад			
X _A	0,099			0		
$X_{\Gamma 1}$	-0,146		-	2,591·10 ⁻⁴		
X _{M1}	-0,101		-9·10 ⁻⁴			
$X_{\Gamma 2}$	-0,148		-9·10 ⁻⁴			
X _{M2}	0,218		2,12.10-4			
Х _{СРП}	0,15		0			
Измененные параметры						
Изменение опти	ического периметра, мм	0.023				
Изменение пло	щади резонатора, кв.мм	21,29				
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,291.10-3				

с) Температурные разъюстировки кольцевого резонатора при изменении температуры ΔT= 100° С

Основные значения и параметры для данного температурного диапазона представлены в таблице 6.

Таблица б

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» при ДT= 100° С

	Невозмущ	енный р	езонатор		
Свойства резонатора и параметры		Сечение			
	гауссова пучка		диональное	Сагитальное	
Радиус	перетяжки, мм	0	,22459	0,29894	
Конфока	альный параметр	25	0,41307	250,41307	
Оптичес	кий периметр, мм		280	,289	
Площадь	резонатора, кв.мм		4,00	$6 \cdot 10^{3}$	
Масштабный к	соэффициент, Гц/град/ч		0.4	138	
	Возмуще	нный ре	зонатор		
0		Разъюстировки			
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад		
X _A	0,097	0,097		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,144		$-5,182 \cdot 10^{-4}$		
X _{M1}	-0,101		-2·10 ⁻³		
$X_{\Gamma 2}$	-0,207		-2·10 ⁻³		
X _{M2}	0,305		4,71.10-4		
Х _{СРП}	0,211		0		
	Изменен	ные пара	аметры		
Изменение опт	ического периметра, мм	0.049			
Изменение пло	щади резонатора, кв.мм	21,242		242	
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,246.10-3			

Полученные значения температурных разъюстировок для трех рабочих диапазонов, показывают насколько сместился осевой контур кольцевого резонатора по сравнению со значениями, принятыми за «идеальный» контуром. Как говорилось ранее, особое внимание следует уделять разъюстировкам в активном канале и изменениям основных параметров. И как видно из проведенных расчетов, данные значения не превышают «эталонного», а изменения масштабного коэффициента происходит в третьем знаке, что само по себе является существенным для столь высокоточного прибора, но все же свидетельствуют о том, что прибор сможет обеспечить необходимую точность измерений.

Разъюстировки кольцевого резонатора с учетом влияния допусков на изготовление призм ПВО

Помимо влияния температуры к смещению осевого контура может привести изменение положения элемента, которое можно назвать как *«ошибка положения»* (рис. 5),т.к. относительное расположение преломляющих и отражающих элементов, задаваемое оптической схемой, определяет расчетный ход луча в резонаторе.



Ошибки положения элемента: наклон (а); продольное смещение (б); поперечное смещение (в)

Введем некоторые понятия, с помощью которых можно описать ошибки положения. Под *наклоном* будем понимать угол между расчетным и реальным положением оптической поверхности.

Продольным смещением будем называть расстояние между расчетным и реальным положением поверхности, отложенное вдоль ее нормали в точке входа луча. Поперечное смещение (децентрировка), которое актуально только в случае сферической поверхности, определим как смещение центра кривизны поверхности относительно нормали в точке входа луча в поперечном направлении.

К появлению ошибок положения элементов приводит конечная точность изготовления деталей и сборки, которая регламентируется требованиями, указанными в конструкторской документации.

Одним из *продольных смещений*, которое может привести к смещению осевого контура является допуск на высоту малого катета призмы h (рис. 6).



Рис. 6

Призма ПВО с допуском $\pm \Delta$ на высоту h

Данный допуск Δ приводит к появлению вектора ошибок для гипотенузной грани призмы ПВО, следовательно, к изменению суммарного вектора ошибок и к изменению основных параметров кольцевого резонатора. Именно поэтому анализ влияния данного допуска весьма важен в процессе рассмотрения разъюстировок кольцевого резонатора.

Прежде чем провести расчет разъюстировок необходимо определить вид вектора ошибок и его зависимость от допуска ±Д, таким же образом как прежде определили вид вектора ошибок и его зависимость от изменения показателя преломления материала призм.

Для этого сначала необходимо указать, что угол ε_4 , являющийся углом при вершине гипотенузы, определяемы из геометрических параметров призмы равен \approx 80°. Из геометрического расчета мы получаем значение $\delta X_{cM} = \pm \Delta sin(\varepsilon_4)\sqrt{2}$.

Таким образом, мы можем определить вектор ошибок в зависимости от ±⊿ (таблица 7).

Граница раздела Вид вектора ошибок сред 0 «воздух-стекло» + $sin(\varepsilon_2)$ $\delta n_{
m bogdyx}$ бп_{стекло} $\cdot cos(\varepsilon_2)$ 0 «стекло-воздух» $\delta n_{cmeклo}$ оп_{воздух} $B = \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \Delta \sin(\varepsilon_4)\sqrt{2} \\ \ddots \end{pmatrix}$ отражающая грань гипотенузы

Вид вектора ошибок с учетом продольного смещения

Таблица 7

Допуск на высоту Δ может быть как положительным, так и отрицательным, что объясняется скорее технологическим изготовлением оптического элемента. Именно поэтому следует указать, что в настоящее время, при составлении комплектов призм ПВО, стараются подбирать призмы с одинаковым допуском, т.е. либо чтобы все призмы были с допуском – Δ , либо все призмы с допуском + Δ . Поэтому проведем расчет разъюстировок сначала для первого случая, а затем для второго. Расчет будем производить по методике уже неоднократно описанной в данной работе, т.е. матричным методом с учетом всех векторов ошибок. В настоящее время в приборе ГЛ2, на основе которого ведется данный расчет значение данного допуска $\Delta = 0.1$ мм, поэтому расчет будем вести с применением этого значения.

Для этого проведем подробное описание матриц для всех элементов резонатора и векторов ошибок, с учетом внесенных изменений (таблица 8)

Таблица 8

	Элементы оптической	Матрицы элементов			
системы резонатора		Меридиональное сечение Ма	Сагиттальное сечение. М.	Вектор ощибок, В	
(ме	Каналы ежпризменные расстояния)	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\0\end{bmatrix}$	
	Преломление на границе «воздух- стекло»	$\begin{bmatrix} \Pi & 0 \\ -\Pi \cdot \Phi_p & \Pi^{-1} \cdot N^{-1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & N^{-1} \end{bmatrix}$	$\left[\frac{0}{-tg(\pm \varepsilon_2)} \cdot \beta \cdot \Delta T \right]$	
П Р И З М Ы	Отражение от грани гипотенузы	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \Phi_p & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \pm \Delta \sin(\varepsilon_4) \sqrt{2} \\ 0 \end{bmatrix}$	
	Преломление на границе «стекло- воздух»	$\begin{bmatrix} \Pi^{-1} & 0\\ -\Pi^{-1} \cdot \Phi_p & \Pi \cdot N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_s & N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\ sin(\pm\varepsilon_2)\\ \overline{n_{\text{воздух}} \cdot cos(\pm\varepsilon_1)} \cdot \beta \cdot \Delta T \end{bmatrix}$	
	Прохождение внутри призмы	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0\\0\end{bmatrix}$	

Матрицы основных элементов оптической системы резонатора

В результате составления матриц для каждого элемента оптической системы резонатора мы можем определить значение температурных разъюстировок и значения измений основных параметров при влиянии отрицательного и положительного допуска Δ (таблица 9, 10).

Таблица 9

Невозмущенный резонатор					
Свойства резонатора и параметры			Сечение		
	гауссова пучка	Мери,	циональное	Сагитальное	
Радиус	перетяжки, мм	0	,22459	0,29894	
Конфок	альный параметр	25	0,41274	250,41274	
Оптичес	кий периметр, мм		280,2	289	
Площадь	резонатора, кв.мм		4,006	$\cdot 10^{3}$	
Масштабный н	соэффициент, Гц/град/ч		0.4.	38	
Возмущенный резонатор					
Carranna		Разъюстировки			
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад		
X _A	4,818· 10 ⁻³			0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,147			-4,71.10-5	
X _{M1}	-0,101		0		
$X_{\Gamma 2}$	-0,101		0		
X _{M2}	7,573· 10 ⁻³		0		
Х _{СРП}	5,198· 10 ⁻³		0		
	Изменен	ные парам	иетры		
Изменение опт	ического периметра, мм	2.388· 10 ⁻³		10-3	
Изменение площади резонатора, кв.мм		21,326			
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,328.10-3			

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» с учетом -Д

Таблица 10

Температурные разъюстировки резонатора, выполненного по схеме «с обращенными вторыми призмами» с учетом +Д

Невозмущенный резонатор					
Свойства резонатора и параметры	Сечение				

гауссова пучка		Меридиональное	Сагитальное	
Радиус перетяжки, мм		0,22459	0,29894	
Конфок	альный параметр	250,41274	250,41274	
Оптичес	кий периметр, мм		280,289	
Площадь	резонатора, кв.мм		$4,006 \cdot 10^3$	
Масштабный і	коэффициент, Гц/град/ч		0.438	
	Возмуще	енный резонатор		
		Разъюстировки		
Сечение	Линейные, мк	М	Угловые, рад	
X _A	0,196		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,147		-4,71.10-5	
X _{M1}	-0,101		0	
$X_{\Gamma 2}$	-0,101		0	
X _{M2}	0,286		0	
Х _{СРП}	0,196		0	
	Изменен	ные параметры		
Изменение оптического периметра, мм		-0,809		
Изменение площади резонатора, кв.мм		34,709		
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		5,06.10-3		

Как видно из полученных значений, температурные разъюстировки при отрицательном и положительном допуске Δ очень сильно разняться между собой и относительно «эталонной системы», особенно значения линейных разъюстировок в канале активной среды. Но если в случае отрицательного допуска (рис. 7*a*) данное значение получилось даже много меньшим, чем то, что мы приняли за «идеальный», то значение данного смещения в канале активной среды при положительном допуске (рис. 7*б*) намного превышает значение «идеальной» системы, что является неприемлемым и может привести к серьезным погрешностям в измерениях прибора, об этом свидетельствует и сильное изменение масштабного коэффициента, если до этого изменение масштабного коэффициента составляло ≈0,002 Гц/град/ч, что являлось существенным изменением для такого рода приборов, при положительно допуске изменение масштабного коэффициента в измерениях привести к серьезным погрешностям в измерениях привести к серьезным изменением для такого рода приборов, при положительно допуске изменение масштабного коэффициента в измерениях привести к серьезным погрешностям в измерениях привести к серьезным изменением для такого рода приборов, при положительно допуске изменение масштабного коэффициента в измерениях привести к серьезным погрешностям в измерением изменением для такого рода приборов, при положительно допуске изменение масштабного коэффициента составляет ≈0,005 Гц/град/ч, что теоретически может привести к серьезным погрешностям в измерениях прибора.



Температурные разъюстировки: при положительном допуске(а), при отрицательном допуске (б)

Как было сказано выше, значение данного допуска взято с существующего прибора и, как показывает практика, полученные значения разъюстировок и основных параметров, в том числе и масштабного коэффициента, удовлетворяют условиям точности данного прибора. Именно поэтому можно сделать вывод, что проанализировав полученные результаты, следует рассмотреть вариант уменьшения допуска Δ , либо возможность компенсировать сильное смещение при влиянии положительного допуска.

Метод взаимной компенсации допусков на изготовление призм ПВО

В качестве метода компенсации было предложено составить систему, а, следовательно, подобрать призмы ПВО для кольцевого резонатора таким образом, что для первых призм будет установлен отрицательный допуск, а для вторых положительный. И второй вариант, при котором для первых призм будет установлен положительный допуск, а для вторых отрицательный. Это возможно еще и потому, что призмы подбираются главным образом так, чтобы одинаковыми между собой в первую очередь оказывались пары призм:«первые» и «вторые».

Это условие позволяет провести расчет разъюстировок для двух предложенных вариантов. Рассчитанные значения разъюстировок и точностных параметров системы представлены в таблицах 11 и 12

Таблица 11

Температурные разъюстировки кольцевого резонатора, с учетом – Δ для первых призм и + Δ для вторых призм

Невозмущенный резонатор						
Свойства резонатора и параметры Сечение						
	гауссова пучка	Мери	диональное	Сагитальное		
Радиу	с перетяжки, мм	C),22459	0,29894		
Конфок	альный параметр	25	50,41274	250,41274		
Оптичес	ский периметр, мм		280,	289		
Площадь резонатора, кв.мм			4,006·10 ³			
Масштабный коэффициент, Гц/град/ч		0.438				
	Возмуще	нный резо	онатор			
Сананна		Разъюстировки				
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад			
X _A	4,818·10 ⁻³		0			
$X_{\Gamma 1}$	-0,147		-4,71.10-5			
X _{M1}	-0,101		0			
$X_{\Gamma 2}$	-0,101		0			
X _{M2}	0,286		0			
Х _{СРП}	0,196		0			

Продолжение таблицы 11

Измененные параметры			
Изменение оптического периметра, мм	2,397.10-3		
Изменение площади резонатора, кв.мм	21,964		
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч	2,398.10-3		

Таблица 12

Температурные разъюстировки кольцевого резонатора, с учетом + Δ для первых призм и - Δ для вторых призм

Невозмущенный резонатор				
Свойства резонатора и параметры гауссова пучка		Сечение		
		Мери	диональное	Сагитальное
Радиус перетяжки, мм		0),22459	0,29894
Конфокальный параметр		250,41274		250,41274
Оптический периметр, мм		280,289		
Площадь резонатора, кв.мм			$4,006 \cdot 10^3$	
Масштабный н	Масштабный коэффициент, Гц/град/ч		0.438	
Возмущенный резонатор				
		Разъюстировки		
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад	
X _A	0,196		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,147		-4,71.10-5	
X _{M1}	-0,101		0	
$X_{\Gamma 2}$	-0,101		0	
X _{M2}	7,573·10 ⁻³		0	
Х _{СРП}	5,198·10 ⁻³		0	
Измененные параметры				
Изменение оптического периметра, мм 2,379·10 ⁻³		·10 ⁻³		
Изменение площади резонатора, кв.мм		20,68		
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		$2,257 \cdot 10^{-3}$		

Из полученных результатов можно сделать вывод, что в зависимости от того, какой допуск имеют первые призмы, именно от этого допуска будет определяться смещение осевого контура в канале активной среды (рис. 8). А следовательно, если изменение значения самого допуска является нецелесообразным, то возможен вариант

комбинирования призм с различными допусками таким образом, что это не повлияет на технологический процесс изготовления оптических элементов, но при этом повысит точность прибора.



Температурные разъюстировки: -Δ для первых призм и +Δ для вторых призм(а), +Δ для первых призм и -Δ для вторых призм (б)

Проверка выбранного метода взаимной компенсации допусков на изготовление призм ПВО в различных температурных диапазонах

Для проверки проведенного анализа допуска $\pm \Delta$ и выбранной комбинации призм (- Δ для первых призм и + Δ для вторых призм) следует провести расчет температурных разъюстировок с учетом выбранных условий при влиянии рабочих температурных диапазонов.

Так как подобный расчет проводился неоднократно, то полученные результаты представим в виде сводки таблиц. Также стоит упомянуть, что в данном случае будет рассматриваться совместное влияние процесса самопрогрева $\Delta T=10^{\circ}$ С и конкретного рабочего диапазона. Основные значения и параметры для различных температурных диапазонов представлены в таблицах 13.,14 и 15.

Таблица 13

Температурные разъюстировки резонатора с учетом – Δ для первых призм и + Δ для вторых призм при $\Delta T = 25^{\circ}$ С

Невозмущенный резонатор			
Свойства резонатора и параметры	Сечение		
гауссова пучка	Меридиональное	Сагитальное	
Радиус перетяжки, мм	0,22459	0,29894	
Конфокальный параметр	250,41307	250,41307	
Оптический периметр, мм	280,289		

Площадь резонатора, кв.мм		$4,006 \cdot 10^3$		
Масштабный коэффициент, Гц/град/ч		0.438		
Возмущенный резонатор				
Carranna		Разъюстировки		
Сечение –	Линейные, мкм		Угловые, рад	
X _A	3,869·10 ⁻³		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,146		-1,649.10-4	
X _{M1}	-0,101		-5·10 ⁻⁴	
$X_{\Gamma 2}$	-0,127		-5·10 ⁻⁴	
X _{M2}	0,326		1,178.10-4	
Х _{СРП}	0,224		0	
Измененные параметры				
Изменение оптического периметра, мм		0.014		
Изменение площади резонатора, кв.мм		21,955		
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		a, 2,379·10 ⁻³		

Таблица 14

Температурные разъюстировки резонатора с учетом – Δ для первых призм и + Δ для вторых призм при $\Delta T = 45^{\circ}$ С

Невозмущенный резонатор					
Свойства резонатора и параметры			Сечение		
гауссова пучка		Меридиональное		Сагитальное	
Радиус перетяжки, мм (,22459	0,29894		
Конфокальный параметр		250,41307		250,41307	
Оптический периметр, мм		280,289			
Площадь резонатора, кв.мм			$4,006 \cdot 10^3$		
Масштабный в	Масштабный коэффициент, Гц/град/ч		0.438		
Возмущенный резонатор					
Conorma		Разък	остировки		
Сечение Линейные, мкм			Угловые, рад		
X _A	3,11.10-3		0		
$X_{\Gamma 1}$	-0,146		-2,591 · 10 ⁻⁴		
X _{M1}	-0,101		-9.10-4		
$X_{\Gamma 2}$	-0,148		-9.10-4		
X _{M2}	0,357		2,12.10-4		
Х _{СРП}	0,246		0		
Измененные параметры					
Изменение оптического периметра, мм 0.023		23			
Изменение площади резонатора, кв.мм		21,948			
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,363 · 10 ⁻³			

Таблица 15

Температурные разъюстировки резонатора с учетом –Д для первых призм и +Д для вторых призм при ДT= 100° С

Невозмущенный резонатор				
Свойства резонатора и параметры		Сечение		
гауссова пучка		Меридиональное		Сагитальное
Радиус	Радиус перетяжки, мм (,22459	0,29894
Конфокальный параметр		250,41307		250,41307
Оптический периметр, мм		280,289		
Площадь резонатора, кв.мм			$4,006 \cdot 10^3$	
Масштабный н	Масштабный коэффициент, Гц/град/ч		0.438	
Возмущенный резонатор				
Carranna	Разък		остировки	
Сечение	Линейные, мкм		Угловые, рад	
X _A	1,023.10-3		0	
$X_{\Gamma 1}$	-0,144		-5,182.10-4	
X _{M1}	-0,101		-2.10-3	
$X_{\Gamma 2}$	-0,207		-2.10-3	
X _{M2}	0,444		4,71.10-4	
Х _{СРП}	0,306		0	
Измененные параметры				
Изменение оптического периметра, мм 0.049			49	
Изменение площади резонатора, кв.мм			21,924	
Изменение масштабного коэффициента, Гц/град/ч		2,321.10-3		

В результате проведенного расчета были получены значения температурных разъюстировок, которые свидетельствуют о том, что выбранная комбинация призм обеспечивает наименьшие значения смещения осевого контура:

- Во-первых, значения линейных разъюстировок, особенно в канале активной среды, составляют лишь 0.001 мм воздействии полного рабочего диапазона ΔT=100° С, что в 100 раз меньше, чем линейная разъстировка «идеальной» системы при самопрогреве.
- Во-вторых, изменение масштабного коэффициента также составляет меньшее значение в сравнении с «идеальной» системой, что в свою очередь обеспечит более точную работы прибора.

Литература

1. Fundamentals of the Ring Laser Gyro/ Aronowitz F. // Optical Gyros and their Application / RTO AGARDograph 339 (Québec), May 1999. P.3.1–3.45.

2. Болотнов С.А., Вереникина Н.М. Лазерные информационноизмерительные системы// Учеб. пособие. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 70с.

3. Болотнов С.А., Вереникина Н.М. Лазерные информационноизмерительные системы// Учеб. пособие. Ч. 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 76 с.

4. Джерард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику / Пер. с англ. под ред. В.В. Коробкина. М.: Мир, 1978. 341 с.

5. Ищенко Е.Ф., Рамазанов Г.С. Анализ разъюстированных открытых оптических резонаторов// Учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 70 с.

6. Ломакин А.В. Матричные методы в расчете лазерных резонаторов// Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 31 с.