PACS 42.60.Da; 42.79.Bh

Призменный кольцевой резонатор с малыми поляризационными потерями

Е.А.Воронина*, В.Н.Курятов*, А.Л.Соколов**

Проведен сравнительный анализ поляризационных потерь трехпризменного и четырехпризменного резонаторов и определены их основные причины. Рассмотрены способы снижения анизотропии резонатора и поляризационных потерь.

***Ключевые слова**: призменный резонатор, призмы полного внутреннего отражения, поляризационные потери.*

Для снижения погрешностей лазерного гироскопа, в значительной степени обусловленных нелинейными и тепловыми эффектами, необходимо обеспечить режим его работы при малом усилении активной среды. Такой режим возможен при малых потерях резонатора. В этой связи особый интерес представляют резонаторы, образованные призмами полного внутреннего отражения (ПВО) [1]. В лазерных гироскопах типа КМ применяется четырехпризменный резонатор (рис.1,*а*), каждая из призм которого имеет одну грань ПВО и две преломляющие грани, расположенные под углом Брюстера к падающему на них излучению.

Призмы крепятся на моноблоке мягким припоем и попарно герметизируют его вакуумные каналы, в одном из которых инициируется высокочастотный разряд. Потери в таком резонаторе складываются из потерь, связанных с рассеянием и поглощением излучения в поверхностных слоях и в материале, из дифракционных и поляризационных потерь, а также из полезных потерь, обусловленных выводом излучения из резонатора.

В идеальном случае генерируемое излучение в призменном резонаторе должно быть линейно поляризовано, а вектор напряженности электрического поля $\boldsymbol{E}$ должен лежать в плоскости осевого контура (p-поляризация). Однако нарушение плоскостности осевого контура и наличие напряжений в материале призм приводят к возникновению s-компоненты, ортогональной плоскости контура. В данной статье рассматриваются только поляризационные потери и способы их снижения.

Можно выделить три основные причины возникновения поляризационных потерь. Первая причина – ошибки в изготовлении и сборке резонатора. В настоящее время уровень технологии позволяет свести эти ошибки к минимуму.

Вторая причина связана с тем, что волновой фронт гауссова пучка является не плоским, а сферическим, определяемым оптической схемой резонатора. Поэтому падение излучения на грани призм под углом Брюстера имеет место только для осевой части пучка. Это приводит к тому, что преломляющие грани призм представляют собой поляризационно-неоднородные элементы.

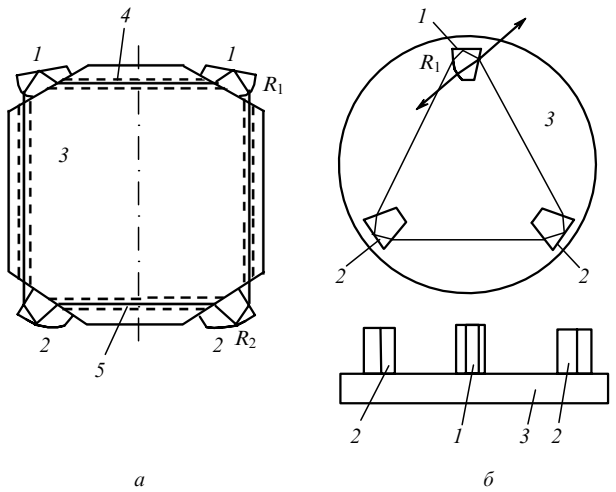

Рис.1. Моноблочная конструкция с четырехпризменным резонатором (*1* – призма резонатора со сферической преломляющей гранью, $R_1 = 1$ м; *2* – призма резонатора со сферической гранью ПВО, $R_2 = 0.43$ м; *3* – моноблок; *4* – активный канал; *5* – пассивный вакуумный канал) (*а*) и планарная конструкция с трехпризменным резонатором (*1* – призма резонатора со сферической преломляющей гранью, $R_1 = 1$ м, и плоской преломляющей гранью для вывода излучения; *2* – призмы резонатора с плоскими гранями; *3* – базовая пластина (основание)) (*б*).

Третья причина возникновения поляризационных потерь обусловлена наличием напряжений в материале призм, возникающих при их креплении к моноблоку.

В работе [2] приведены результаты расчета поляризационных потерь, вызванных указанными причинами. Согласно этим расчетам при соблюдении технологии изготовления и сборки кольцевого призменного резонатора поляризационные потери не превышают 10^{-3} %. Суммарные же потери в таком резонаторе, как показывают измерения, составляют около 10^{-2} %. Оценка реальных поляризационных потерь в призменном резонаторе может быть получена при измерении интенсивности (мощ-

*ФГУП «НИИ "Полюс" им М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3
**Московский государственный энергетический институт (технический университет), Россия, 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

Поступила в редакцию 20 февраля 2002 г.

ности) лучей, отраженных от преломляющих граней призм ПВО.

С целью совершенствования конструкции лазерного гироскопа с точки зрения возможного нарушения плоскостности осевого контура и наведенной пространственно-неоднородной анизотропии материала призм, вызванной механическими напряжениями, была разработана так называемая планарная конструкции гироскопа с трехпризменным резонатором (рис.1,*б*). Каждая из призм в таком резонаторе, как и в четырехпризменном, имеет одну грань ПВО и две плоские преломляющие грани, расположенные под углом Брюстера к падающему излучению. Исключение составляет призма в вершине треугольного контура, одна преломляющая грань которой отклонена от угла Брюстера на 1° для увеличения доли отраженной p-компоненты и вывода излучения из резонатора, а другая выполнена в виде сферы с радиусом кривизны 1 м.

В таком резонаторе волновой фронт оказывается более плоским, чем в штатном четырехпризменном варианте, содержащем четыре сферических грани – две радиусом 1 м и две радиусом 0.43 м.

Другая отличительная особенность планарной конструкции – способ закрепления призм. Они закрепляются на базовой пластине (основании) методом оптического контакта. В отличие от моноблочной конструкции, где призмы устанавливаются на преломляющую грань, посадочные грани здесь не являются рабочими. Такой способ закрепления обеспечивает удаленность каустики световых волн от области механических напряжений в материале призм, локализованных вблизи мест закрепления, что также уменьшает пространственно-неоднородную анизотропию резонатора и снижает поляризационные потери. Исследования [3] показали, что на расстоянии 10 мм от места оптического контакта напряжения в материале такие же, как и в незакрепленной призме.

Для определения поляризационных потерь в сравниваемых типах резонаторов были проведены измерения интенсивности лучей, отраженных от преломляющих граней призм. Чтобы сделать возможным сравнительный анализ планарной и моноблочной конструкций (в данном случае рассматривается прежде всего влияние напряжений в материале призм на поляризационные потери), измерения проводились для резонатора, аналогичного штатному резонатору моноблочной конструкции, однако образованному четырьмя одинаковыми призмами ПВО, каждая из которых имеет одну сферическую преломляющую грань радиусом 1 м. Трехпризменный резонатор, используемый в планарной конструкции, содержит одну сферическую преломляющую грань такого же радиуса. Следовательно, в обоих резонаторах волновые фронты достаточно плоские, что сводит к минимуму влияние их кривизны на поляризационные потери при отражении как от поверхностей призм, так и от окошек газоразрядной трубки и делает возможным сравнительный анализ. На рис.2 представлены принципиальные схемы оптических измерений.

В моноблочной конструкции измерялась интенсивность лучей, отраженных от сферических (лучи *1, 4*) и плоских (лучи *2, 3*) граней резонаторных призм, расположенных под углом Брюстера к падающему излучению. Лучи *1* и *2* отражаются от незакрепленной призмы, а *3* и *4* – от призмы, припаянной к посадочной поверхности моноблока мягким припоем.

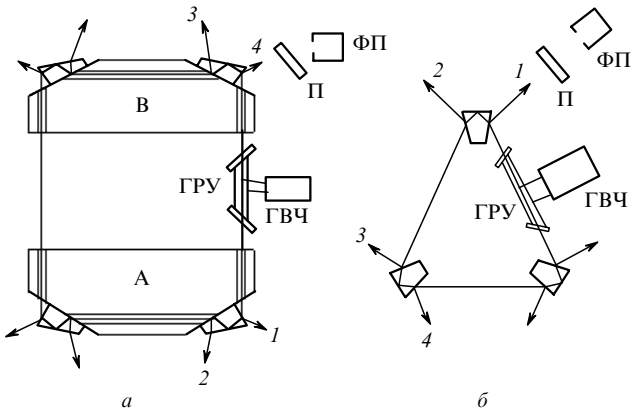

Рис.2. Принципиальные схемы измерения поляризационных потерь в кольцевых лазерах моноблочной конструкции с четырехпризменным резонатором (*а*) и планарной конструкции с трехпризменным резонатором (*б*):
ГРУ – газоразрядный узел (разрядная трубка с окнами, расположенными под углом Брюстера); ГВЧ – генератор высокой частоты; ФП – фотоприемник для измерения интенсивности лучей; А – блок с незакрепленными призмами; В – блок с призмами, закрепленными пайкой; П – поляроид; *1–4* – лучи, отраженные от преломляющих граней резонаторных призм.

В планарной конструкции все призмы закреплены на базовом основании методом оптического контакта. В этом случае измерялась интенсивность лучей, отраженных от расположенных под углом Брюстера граней (лучи *2, 3, 4*), и от грани, отклоненной от угла Брюстера на 1° для вывода излучения (луч *1*).

Перед фотоприемником помещался поляроид П, поворотом которого можно выделить измеряемую компоненту излучения (p- или s-). Активным элементом в обоих случаях служила одна и та же газоразрядная трубка с расположенными под углом Брюстера окнами, разряд в которой поддерживался с помощью генератора высокой частоты (ГВЧ). В эксперименте измерялась зависимость интенсивности p- и s- компонент излучения от превышения мощности накачки над пороговой. Для калибровки потерь использовалось то обстоятельство, что в трехпризменном резонаторе угол падения излучения на одну из граней призм φ_B составляет 1°, что, согласно расчетам, обеспечивает отражение 0.0093 % падающего излучения. Зная интенсивность I_{p1} луча, отраженного от этой грани, можно найти поляризационные потери на другой грани:

$$\varkappa_{pol} = (0.0093/I_{p1})I_m,$$

где I_m – измеряемая мощность пучка, отраженного от преломляющей грани.

Для корректности следовало бы проводить измерения в рабочем режиме лазерного гироскопа – одночастотном одномодовом режиме. Однако чрезвычайно малые мощности лучей, отраженных от преломляющих граней под углом Брюстера, снижают достоверность измерений. Поскольку нестабильность внешних факторов меньше сказывается в многомодовом режиме при больших мощностях накачки, измерения проводились в многомодовом режиме при мощности накачки, превышающей пороговую в 5 раз. Но в этом случае, как показывает анализ, из-за большего сечения лазерного пучка результаты измерения мощности отраженных лучей по ряду причин оказываются завышенными.

Табл.1.

Конструкция резонатора	Потери p-компоненты				Потери s-компоненты			
	$\varkappa_{p1}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{p2}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{p3}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{p4}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{s1}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{s2}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{s3}$ (10^{-4} %)	$\varkappa_{s4}$ (10^{-4} %)
Моноблочная	3.4	1.84	2.2	5.6	1.78	17	16.8	11.2
Планарная	93*	1.34	1.84	2.6	1.46	0.62	5.8	2.8

* Полезные потери, связанные с выводом излучения из резонатора.

Сравним моноблочную и планарную конструкции по поляризационным потерям в резонаторе. В табл.1 приведены результаты измерения потерь на отражение p- и s-компонент.

Поскольку не все отраженные лучи доступны для измерения, то, учитывая симметрию резонатора, потери для моноблочной конструкции определяются как

$$\varkappa_{\rm pol}^{\rm mon} = 2(\varkappa_{\rm p1} + \varkappa_{\rm p2} + \varkappa_{\rm p3} + \varkappa_{\rm p4} + \varkappa_{\rm s1} + \varkappa_{\rm s2} + \varkappa_{\rm s3} + \varkappa_{\rm s4}).$$

Из табл.1 следует, что

$$\varkappa_{\rm pol}^{\rm mon} = 11.96 \times 10^{-3}\ \%.$$

Для планарной конструкции выражение для потерь (без учета полезных потерь) таково:

$$\varkappa_{\rm pol}^{\rm pl} = 2(\varkappa_{\rm p2} + \varkappa_{\rm p3} + \varkappa_{\rm p4} + \varkappa_{\rm s3} + \varkappa_{\rm s4}) + \varkappa_{\rm s1} + \varkappa_{\rm s2}.$$

Из табл.1 получаем

$$\varkappa_{\rm pol}^{\rm pl} = 2.96 \times 10^{-3}\ \%.$$

Здесь $\varkappa_{\rm pi}$ и $\varkappa_{\rm si}$ – потери для p- и s-компонент; $i = 1 - 4$ (см. рис.2). Таким образом, технологическая реализация планарной конструкции, а именно закрепление призм методом оптического контакта и удаленность каустики от мест крепления уменьшает в четыре раза потери на отражение по сравнению с моноблочной конструкцией. По абсолютной величине эта разница составляет 9×10^{-3} %.

Средние поляризационные потери на одной преломляющей поверхности составляют 1.5×10^{-3} % для призмы моноблочной конструкции и 0.5×10^{-3} % для призмы, установленной на оптический контакт в планарной конструкции.

Важно отметить, что потери, связанные с отражением s-компоненты в четырехпризменном резонаторе, составляют 93.4×10^{-4} % (78 % суммарных поляризационных потерь в этом резонаторе), в то время как в трехпризменном – только 18×10^{-4} % (58 % соответственно). Такое значительное различие (более чем в 4 раза) объясняется большей длиной пути света в материале призм, большей кривизной волнового фронта волны на плоских преломляющих поверхностях призм и большей анизотропией резонатора моноблочного прибора за счет бóльших напряжений в призмах.

Для p-компонент различие не так существенно: в расчете на одну преломляющую поверхность потери составляют 3.26×10^{-4} и 1.93×10^{-4} % соответственно для четырех- и трехпризменного резонаторов. При отражении от преломляющей грани p-компонента возникает по двум причинам: вследствие кривизны волнового фронта и из-за наличия переходного слоя на границе раздела двух сред – кварца и воздуха (так называемая пленка Друдэ [4]).

В работе [4] приведены результаты экспериментальной проверки формул Френеля. В частности, в этой работе показано, что при угле падения, равном углу Брюстера, вектор $E_{\rm p}$ для отраженной p-компоненты излучения не обращается в нуль, а отраженный свет оказывается эллиптически-поляризованным, причем эллиптичность $\rho = |E_{\rm p}|/|E_{\rm s}|$ может достигать $10^{-2} - 10^{-3}$ и более. Для частного случая отражения от поверхности чистых жидкостей, где исключены погрешности, возникающие за счет механической обработки поверхности, эллиптичность не опускается ниже 10^{-3}.

Для сравнения оценим эллиптичность излучения отраженного от преломляющей грани призмы трехпризменного резонатора. Средние потери на отражение p-компоненты по данным табл.1 составляют 1.93×10^{-4} % для одной поверхности. Соответствующую эллиптичность можно найти из соотношения интенсивностей отраженных компонент:

$$\rho = (|E_{\rm p}|^2/|E_{\rm s}|^2)^{1/2} = 3.9 \times 10^{-3},$$

что по порядку величины соответствует отражению от пленок Друдэ [4].

Большее отражение излучение p- поляризации в моноблочной конструкции связано, очевидно, с большей кривизной волнового фронта в этом резонаторе.

Таким образом, предлагаемая планарная конструкция, во-первых, позволяет уменьшить поляризационную неоднородность оптических элементов, вызванную механическими напряжениями в материале, что создает предпосылки для снижения чувствительности прибора к внешнему магнитному полю. Во-вторых, уменьшается рассеяние отраженных лучей на элементах конструкции, расположенных вблизи резонаторной оптики.

Таким образом, в трехпризменном резонаторе потери на отражение p-компоненты (даже с учетом кривизны фронта) от одной преломляющей поверхности призмы (1.9×10^{-4} %) близки к минимальным потерям, обусловленным отражением от пленок Друдэ. В четырехпризменном резонаторе потери на отражение p-компоненты от одной грани (3.26×10^{-4} %) больше по сравнению с трехпризменным на 70 %, что, по-видимому, объясняется большей кривизной волнового фронта (четыре сферические грани, а не одна, как в трехпризменном резонаторе).

Суммарные потери на отражение s-компоненты в трехпризменном резонаторе составляют 18×10^{-4} % и обусловлены как натяжениями в материале призм, так и кривизной волнового фронта. В четырехпризменном резонаторе суммарные потери на отражение s-компоненты значительно больше (93.4×10^{-4} %). Такие большие потери, как мы полагаем, обусовлены тем, что, во-первых, суммарная анизотропия, вызванная натяжениями, увеличивается с расстоянием, пройденным лучом в материале призм. В четырехпризменном резонаторе длина пути в кварцевом стекле почти в два раза больше. Во-вторых, закрепление призм по периметру приводит к зависимости натяжений от поперечных координат. Это об-

стоятельство должно существенно увеличивать отражение с возрастанием диаметра пучка, что мы и имеем в многомодовом режиме. Кроме того, кривизна волнового фронта создает, в основном, потери в виде s-компоненты, отраженной от преломляющих граней. По этой причине из-за поляризационной неоднородности преломляющих граней поляризационные потери возрастают с увеличением порядка поперечных мод.

Приведенные оценки поляризационных потерь в многомодовом режиме пригодны для сравнительного анализа четырехпризменного и трехпризменного резонаторов. По абсолютной величине потери, связанные с s-компонентой, завышены, т. к. в реальных условиях при генерации основной моды они должны быть меньше.

1. Журавлева Е.Н.. Курятов В.Н., Семенов Б.Н. *Труды II С.-Петербургской междунар. конф. по гироскопической технике и навигации* (С.-Пб., 1995, ч.2, с.57).
2. Курятов В. Н., Соколов А.Л. *Квантовая электроника*, **30**, 125 (2000).
3. Индисов В.О., Курятов В.Н., Семенов Б.Н., Соколов И.Л., Фофанов Я.А. *Оптика и спектроскопия*, **75**, 451 (1993).
4. Кизель В.А. *Отражение света* (М.:Наука, 1973).