

Ю. В. Бакин, С. А. Болотнов,
М. Б. Людомирский, А. А. Алексейченко

ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ С ПРИЗМАМИ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Рассмотрены конструкторские и технологические аспекты проектирования призмных лазерных гироскопов. Описан метод расчета положения деформированного осевого контура четырехпризмного резонатора. Затронуты вопросы, связанные с магнитной чувствительностью, выводом излучения из резонатора и диафрагмированием. Предложены пути совершенствования призмных лазерных гироскопов.

С первых шагов развития лазерной гироскопии было очевидно, что основой точного лазерного гироскопа (ЛГ) является высокодобротный кольцевой резонатор с малым уровнем обратного рассеяния излучения.

Для обеспечения минимальных потерь в резонаторе должны быть использованы отражательные элементы с максимальным коэффициентом отражения. Принципиально наибольший коэффициент отражения, равный единице, может быть обеспечен при использовании эффекта полного внутреннего отражения. По этой причине развитие техники кольцевых резонаторов изначально пошло в двух направлениях: разработка технологии производства высококачественных зеркальных отражателей и разработка резонаторов с призмами полного внутреннего отражения.

Первые публикации по призмным кольцевым резонаторам относятся к 1967 г. [1]. Опыт разработки ЛГ с призмными резонаторами в России демонстрирует возможность достижения высоких точностных параметров.

На базе четырехпризмного резонатора с “обращенными вторыми” призмами (по отношению к “первым”, между которыми располагается активная среда) с суммарными потерями менее $5 \cdot 10^{-5}$ в 1998 г. был разработан и изготовлен лазерный гироскоп с виброподставкой с уровнем случайного дрейфа $0,001 \dots 0,003$ град./ч^{1/2} и воспроизводимостью от включения к включению $0,002 \dots 0,01$ град./ч (1σ). Применение ряда специальных конструкторских и технологических решений позволило снизить уровень остаточных напряжений в материале призм, решив тем самым основную проблему призмных резонаторов. Это сделало призмные ЛГ конкурентоспособными с зеркальными, а в ряде случаев и более предпочтительными, так как отсутствие покрытий на отражательных элементах резонатора и внутри лазера

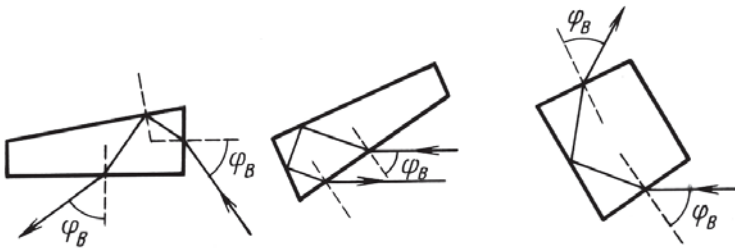


Рис. 1. Основные типы используемых призм полного внутреннего отражения

позволяет обеспечить в призмных ЛГ принципиально большие стабильность эксплуатационных параметров и ресурс.

На рис. 1 показаны основные типы используемых призм полного внутреннего отражения. Для уменьшения потерь излучения на отражение при прохождении луча через преломляющие грани призмы полного внутреннего отражения геометрия резонатора выбирается такой, чтобы угол падения луча на эти грани был равен углу Брюстера — φ_B .

При проектировании кольцевых лазеров с призмным резонатором важно знать, как изменяется положение осевого контура резонатора (переюстировка) под воздействием внешних факторов. Наибольшие переюстировки 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. Избежать такой переюстировки в призмном резонаторе принципиально невозможно.

Последствиями переюстировки могут явиться:

- изменение геометрических характеристик резонатора (периметра и площади), сопровождающееся изменением масштабного коэффициента ЛГ;
- изменение дифракционных потерь и дифракционной невзаимности вследствие перемещения пучка по диафрагмам, обеспечивающим одномодовый режим генерации;
- изменение коэффициента усиления вследствие перемещения пучка по активной среде;
- изменение магнитной чувствительности (при наличии напряжений в призмах).

Перечисленные явления, в свою очередь, приводят к дрейфу нуля ЛГ и, в конечном счете, к снижению точности.

Однако влияние переюстировок на точностные характеристики призмного ЛГ можно значительно уменьшить. Как показывают расчеты, в призмном кольцевом оптическом резонаторе путем выбора

соответствующей конфигурации можно добиться, чтобы переюстировка в одном из плеч резонатора была минимальной (“термостабильный” резонатор). В этом плече обычно располагают активную среду, диафрагмы и другие элементы, переюстировка по которым нежелательна. Кроме того, одновременно можно добиться приемлемой температурной стабильности масштабного коэффициента ($5 \cdot 10^{-5}$ в диапазоне температур от -40°C до $+70^\circ\text{C}$).

Расчет переюстировки можно выполнить методом расширенных лучевых матриц (3×3) [2, 3]. Лучевые матрицы элементов призмного резонатора в меридиональной и сагиттальной плоскостях приведены в табл. 1 и 2. Матричные элементы получены в предположении, что падение луча на все преломляющие грани происходит под углом Брюстера. Эти матрицы используются только для проверки устойчивости резонатора. В таблице введены следующие обозначения: T_b – температура моноблока; α – коэффициент температурного расширения ситалла; n – показатель преломления кварца в воздухе при температуре $+25^\circ\text{C}$; Δn_Q – изменение показателя преломления кварца; Δn_A – изменение показателя преломления воздуха; R_c – радиус кривизны катетной грани; R_h – радиус кривизны гипотенузной грани.

Таблица 1

Лучевые матрицы элементов призмного резонатора в меридиональной плоскости

Матрица воздушного промежутка	$\begin{pmatrix} 1 & L(1 + \alpha T_b) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Матрица катетной грани, соответствующая направлению луча из призмы в воздух	$\begin{pmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{nR_c} & n^2 & -\Delta n_Q + n\Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Матрица катетной грани, соответствующая направлению луча из воздуха в призму	$\begin{pmatrix} n & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{n^2 R_c} & \frac{1}{n^2} & \frac{\Delta n_Q}{n^2} - \frac{\Delta n_A}{n} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Матрица гипотенузной грани	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{R_h} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Лучевые матрицы элементов призмного резонатора в сагиттальной плоскости

Матрица катетной грани, соответствующая направлению луча из призмы в воздух	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n^2 - 1)}{R_c \sqrt{n^2 + 1}} & n \end{pmatrix}$
Матрица катетной грани, соответствующая направлению луча из воздуха в призму	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n^2 - 1)}{n R_c \sqrt{n^2 + 1}} & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$
Матрица гипотенузной грани	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{R_h} & 1 \end{pmatrix}$

Координаты осевого контура невозмущенного резонатора полагаются нулевыми. При этом осевой контур проходит через центры сферических поверхностей.

Для расчета переюстировок вычисляется лучевая матрица возмущенного кольцевого резонатора относительно какого-то расчетного сечения. В общем случае она имеет следующий вид:

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где M_{ij} — элементы матрицы M .

Затем определяется собственный вектор этой лучевой матрицы

$$V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Компоненты собственного вектора V_1 и V_2 определяются выражениями:

$$V_1 = \frac{(1 - M_{22})M_{13} + M_{12}M_{23}}{2 - M_{11} - M_{22}},$$

$$V_2 = \frac{(1 - M_{11})M_{23} + M_{21}M_{13}}{2 - M_{11} - M_{22}}$$

и представляют собой координаты возмущенного осевого контура в выбранном расчетном сечении. Для определения координат возмущенного осевого контура на поверхностях призм, в активной среде и на диафрагмах собственный вектор последовательно умножается на лучевые матрицы соответствующих элементов резонатора. Зная координаты осевого контура на отражающих и преломляющих поверхностях

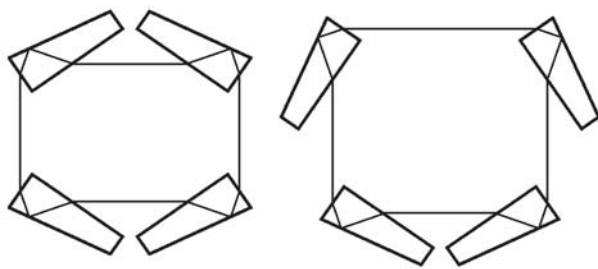


Рис. 2. Четырехпризменные резонаторы

призм, можно рассчитать изменение площади, охватываемой осевым контуром, и изменение масштабного коэффициента.

На рис. 2 показаны “классическая схема” четырехпризменного кольцевого резонатора и схема резонатора с “обращенными вторыми призмами”.

Призма полного внутреннего отражения даже в идеальном случае (изотропный материал, плоский осевой контур) имеет амплитудную и фазовую анизотропию. Амплитудная анизотропия возникает как следствие разных коэффициентов пропускания на брюстеровских гранях призм компонентов излучения с s - и p -поляризацией. Фазовая анизотропия возникает при полном внутреннем отражении из-за разного изменения фазы s и p компонентов. В идеальном случае призмный оптический резонатор имеет два собственных состояния поляризации, совпадающие с s и p . При этом из-за относительно больших потерь на отражение от брюстеровских граней призм излучение, имеющее чистую s -поляризацию, как правило, не генерируется. В реальном кольцевом лазере (КЛ) к перечисленным факторам добавляется двулучепреломление из-за механических напряжений в призме, возникающих при ее креплении на моноблоке, неплоскостность осевого контура, поворот плоскости поляризации в магнитном поле (эффект Фарадея). Эти причины приводят к тому, что в реальном резонаторе собственное состояние поляризации оказывается не линейное, а эллиптическое, причем эллиптичность поляризации пропорциональна величине напряжений в материале призм и неплоскостности осевого контура.

Эллиптичность поляризации генерируемого излучения приводит к магнитной чувствительности. В ЛГ с призмным оптическим резонатором эффект усиливается вследствие того, что материал призм имеет большую постоянную Верде, а длина траектории луча внутри призмы велика.

Одной из проблем, которую приходится решать при использовании призм полного внутреннего отражения, является проблема вывода части излучения из резонатора. Эту проблему можно решить с помощью

нарушения полного внутреннего отражения на отражающей поверхности, или выводом излучения с преломляющей поверхности, если угол падения сделать не брьюстеровским.

Поскольку каналы моноблока не имеют сужений, служащих диафрагмами, после юстировки “вторых” призм возникает многомодовый режим генерации. Изготовление сужений в активном канале кольцевого лазера представляется нецелесообразным из-за возможного внесения возмущений в разрядный промежуток. Использование в качестве диафрагм сужений других каналов в КЛ с призмным резонатором невозможно вследствие значительных температурных переюстировок в этих каналах.

Для получения генерации на основной поперечной моде используются внешние диафрагмы, устанавливаемые на посадочные поверхности моноблока. Диафрагма представляет собой ситалловую деталь прямоугольной формы с цилиндрической полированной рабочей поверхностью. Диафрагма прижимается к посадочной поверхности и ориентируется так, чтобы рабочая поверхность касалась луча генерации. Перемещая диафрагму в сторону луча, добиваются одномодового режима излучения в плоскости, перпендикулярной рабочей поверхности. Необходимым требованием диафрагмирования является получение одномодового режима генерации при внесении минимальных потерь. Крепится диафрагма с помощью оптического контакта. Одна пара диафрагм обеспечивает модовую селекцию по оси, параллельной плоскости резонатора, другая – по ортогональной оси. Пары диафрагм устанавливаются симметрично относительно поперечной оси активной среды (оси симметрии КЛ).

Независимая юстировка диафрагм, осуществляемая после юстировки отражателей [4], позволяет добиваться минимальной дифракционной невзаимности. Кроме того, рабочая поверхность диафрагмы – скругленный полированный край – обеспечивает минимальное обратное рассеяние излучения и, следовательно, использование такой диафрагмы не приводит к увеличению области нечувствительности лазерного гироскопа.

На рис. 3 изображен оптический резонатор кольцевого лазера прибора ГЛ-2, образованный четырьмя призмами полного внутреннего отражения. Призмы полного внутреннего отражения закреплены с помощью оптического контакта на ситалловом моноблоке 1. Один канал моноблока, герметично закрытый “первыми” призмами, заполнен активной гелий-неоновой смесью.

Для обеспечения устойчивости две призмы – “первые” (2) – имеют сферическую малую катетную грань и плоские гипотенузную и большую катетную грани. Все грани двух других призм, “вторых” (3),

— плоские. Смесительная призма 4 служит для вывода из оптического резонатора и смешивания части энергии встречных волн.

С помощью поворотной призмы смешанный луч направляется на двухплощадочный фотоприемник, в плоскости чувствительных площадок которого наблюдается интерференционная картина.

Для обеспечения чистоты поверхностей призм полного внутреннего отражения все они герметично закрыты ситалловыми колпачками 5 и 6.

Канал моноблока, расположенный напротив активного, заполнен осушенным воздухом и в нем осуществляется подстройка частоты генерации кольцевого лазера. Два боковых канала откачаны.

Создание высокодобротных призмных резонаторов с низкой поляризационной невзаимностью и малым обратным рассеянием дает возможность повысить точность ЛГ и открывает новые возможности для их применения.

Отсутствие покрытий на призмах полного внутреннего отражения обеспечивает постоянство параметров ЛГ в течение длительного времени хранения и эксплуатации, что дает возможность применять их в системах управления длительного действия. Устойчивость материала призм к электромагнитным и радиационным воздействиям дает возможность применения призмных ЛГ в системах управления, предназначенных для работы в условиях повышенного радиационного фона.

Направления доработки ЛГ:

1. Совершенствование оптической технологии для обеспечения плоскостности поверхностей ситаллового блока и призм полного внутреннего отражения порядка $\lambda/100$ в серийном производстве в целях снижения уровня напряжений в материале призм при оптическом контакте;

2. Исследование четырехволновой генерации в призмном ЛГ в целях создания ЛГ с внутррезонаторной частотной подставкой. В силу отсутствия магнито-оптических невзаимных элементов резонатор такого ЛГ имеет потери порядка $5 \cdot 10^{-5}$. Такой уровень потерь (в сочетании с уменьшением случайной составляющей дрейфа вследствие

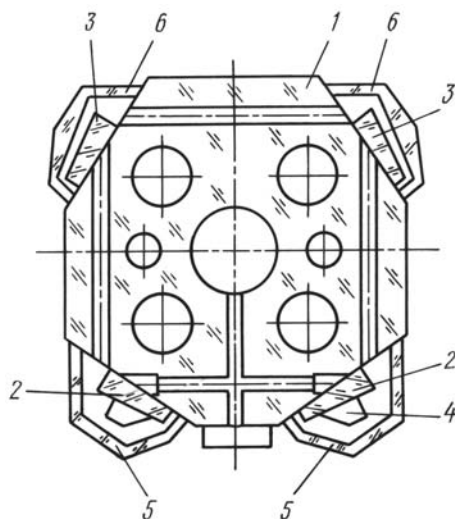


Рис. 3. Кольцевой лазер прибора ГЛ-2 с призмным резонатором

отсутствия виброподставки) в принципе позволит достичь в малогабаритном ЛГ уровня точности порядка 0,001 град./ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А б л е к о в В. К., С о к о л о в С. А. Кольцевой четырехугольный оптический квантовый генератор. А.с. СССР № 204456, кл. H01 S 3/08, 1967.
2. G e r r a r d A., B u r c h J. M. Introduction to matrix methods in optics. – John Wiley & Sons, London, 1975. – 341 p.
3. И щ е н к о Е. Ф. Открытые оптические резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета. – М.: Сов. радио, 1980. – 208 с.
4. Б а к и н Ю. В., З ю з е в Г. Н., Л ю д о м и р с к и й М. Б. и др. Способ селекции основной поперечной моды кольцевого лазера. – А.с. СССР № SU 1829837, H01 S 3/083, 12.1990.

Статья поступила в редакцию 27.06.2006



Юрий Владимирович Бакин родился в 1955 г., окончил МЭИ в 1978 г. Ведущий специалист Научно-производственного комплекса “Электрооптика”. Автор более 10 научных работ в области лазерной техники.

U.V.Bakin (b.1955) graduated from Moscow Power Engineering Institute in 1978. Chief fellow at Scientific and technologic Complex "Electrooptics". Author of 12 publications in laser physics and technology.

Сергей Альбертович Болотнов родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 работ в области лазерной физики и техники.

S.A. Bolotnov (b.1961) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. PhD(Eng), associate professor at “Laser, Optical and Electronic Systems” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in laser physics and technology.



Максим Борисович Людомирский родился в 1966 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Главный инженер Научно-производственного комплекса “Электрооптика”. Автор 12 научных работ в области лазерной техники.

M.B. Ludomirsky (b.1966) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1987. Chief engineer at Scientific and technologic Complex “Electrooptics”. Author of 12 publications in laser technology.

Андрей Александрович Алексейченко родился в 1978 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2002 г. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области лазерной техники.

A.A.Alekseitchenko (b.1978) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate student at “Laser, Optical and Electronic Systems” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in laser technology.