

Поляризационные потери в кольцевом призмном резонаторе

В.Н.Курятов*, А.Л.Соколов**

Проведен анализ поляризационных потерь в кольцевом резонаторе, образованном призмами полного внутреннего отражения. Указаны все источники поляризационных потерь и приведены выражения для их расчета. Определен предел уменьшения потерь для резонаторов данного типа, обусловленный несопадением радиусов кривизны волнового фронта излучения и преломляющих граней призм.

Ключевые слова: кольцевой резонатор, призма полного внутреннего отражения, поляризационные потери.

1. Постановка задачи

Одно из основных требований, которому необходимо следовать при разработке оптического резонатора лазерного гироскопа, – достижение его максимальной добротности. Малое усиление активной среды в высокодобротном резонаторе обеспечивает низкие погрешности, связанные с невязанностью, обусловленной нелинейными и тепловыми эффектами, а также способствует увеличению срока службы и уменьшению времени готовности лазерного гироскопа. Таким условиям отвечает резонатор, образованный призмами полного внутреннего отражения (ПВО), вследствие практического отсутствия потерь при ПВО [1]. Призмный резонатор применяется в лазерном гироскопе типа КМ-11, разработанном для гражданской авиации. В резонаторе используются четыре призмы ПВО, преломляющие грани которых составляют угол Брюстера с осевым лучом (см. рисунок). Существенным моментом для проведенного ниже анализа является то, что радиусы кривизны преломляющих граней призм и волнового фронта излучения не совпадают.

Одно из достоинств рассматриваемого резонатора – малые потери, которые при соблюдении технологии удастся уменьшить до 0.008 %. В первую очередь потери такого резонатора определяются рассеянием и поглощением излучения в поверхностном слое и внутри материала призм. К ним добавляются также дифракционные и полезные потери, связанные с выводом излучения из резонатора, а также поляризационные потери, которые обусловлены отклонением угла падения от угла Брюстера по всему сечению пучка. Одна часть поляризационных потерь вызвана ошибками изготовления и сборки резонатора. Другая связана с кривизной волнового фронта излучения и не зависит от точности изготовления резонатора, а задается его оптической схемой (радиусом кривизны оптических поверхностей призм и периметром резонатора). Поляризационные потери этого типа вы-

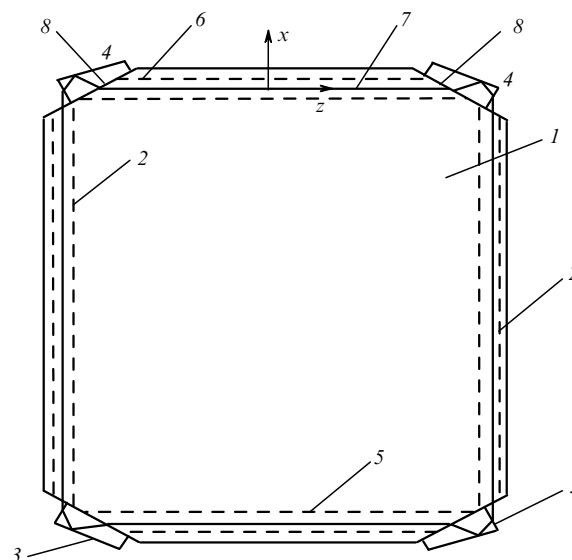


Схема кольцевого резонатора:

1 – моноблок резонатора; 2 – «воздушные» каналы; 3 – призмы ПВО с большим фокусным расстоянием; 4 – призмы ПВО с малым фокусным расстоянием; 5 – канал с активной средой; 6 – «вакуумный» канал; 7 – осевой луч; 8 – преломляющие грани призм с максимальными поляризационными потерями.

званы тем, что падение излучения на грани призмы под углом Брюстера имеет место не для всего пучка излучения, а только для его осевого луча.

Заметим, что потери в резонаторах, образованных интерференционными зеркалами, также определяются многими факторами (рассеяние, пропускание, поглощение и т. д.), которые имеют иную природу, чем в призмном резонаторе, и рассмотрены, например, в [2]. Цель настоящей работы – анализ поляризационных потерь излучения в призмном резонаторе.

2. Потери, обусловленные кривизной волнового фронта

Рассмотрим вначале поляризационные потери, обусловленные кривизной волнового фронта, которая определяет их нижний предел. Каждая точка оптической по-

*Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ "Полос"», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

**Московский государственный энергетический институт, Россия, 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

верхности в этом случае является частичным поляризатором с изменяющейся ориентацией осей. Таким образом, преломляющие грани призм ПВО представляют собой поляризационно-неоднородные элементы [3, 4]. В качестве них могут выступать также оптические элементы с переменной анизотропией, которая обусловлена, например, механическими напряжениями.

Эти факторы приводят к тому, что в кольцевом призмном резонаторе излучение представляет собой поляризационно-неоднородную волну. Особо отметим, что состояние поляризации такой волны непрерывно изменяется не только в поперечном, но и в продольном направлении в силу поляризационного астигматизма ортогональных компонент вектора \mathbf{E} . Это приводит, в частности, к несовпадению радиусов кривизны их волновых фронтов и положений их перетяжек по оси z . Эллипсометрические и волновые параметры такой волны преобразуются совместно, поэтому недопустимо рассчитывать их раздельно. Собственные характеристики поляризационно-неоднородной волны в резонаторе могут быть определены с помощью метода поляризационно-волновых матриц [3, 4].

В реальной оптической схеме КМ-11, обеспечивающей отсутствие разъюстировки резонатора в заданном диапазоне температур, существуют два сечения, где радиус кривизны волнового фронта пучка R_x достигает экстремального значения ~ 53 мм в меридиональной плоскости xz осевого контура; при этом в сагиттальной плоскости yz радиус $R_y \approx 2139$ мм. Вблизи этих сечений на призмах 4 (грани 8 на рисунке) угол падения в каждой точке поперечного сечения лазерного пучка в наибольшей степени отличается от угла Брюстера.

Пусть линейно поляризованный гауссов пучок, волновой фронт которого характеризуется радиусами кривизны R_x, R_y , падает на плоскую оптическую грань призмы под углом Брюстера. Интенсивность ортогональных компонент отраженного света определяется выражением

$$I_x = \left(\frac{1 - n^4}{2n^3} \right)^2 \frac{x^2}{R_x^2} \exp\left(\frac{-2x^2}{w_x^2} \right) \exp\left(\frac{-2y^2}{w_y^2} \right), \quad (1)$$

$$I_y = \left(\frac{1 - n^2}{1 + n^2} \right)^2 \frac{y^2}{R_y^2 n^2} \exp\left(\frac{-2x^2}{w_x^2} \right) \exp\left(\frac{-2y^2}{w_y^2} \right),$$

где w_x, w_y – поперечные радиусы пучка в данном сечении в плоскостях xz и yz соответственно; n – показатель преломления материала призмы (в расчетах принимается $n = 1.45703$). Отсюда, интегрируя по сечению пучка, получим поляризационные потери на одной грани призмы

$$A = \frac{(n^4 - 1)^2 w_x^2}{16n^2 R_x^2} + \frac{(n^2 - 1)^2 w_y^2}{4n^2(n^2 + 1)^2 R_y^2}. \quad (2)$$

Учитывая реальные R_x, R_y и соответствующие им $w_x = 0.301$ мм, $w_y = 0.264$ мм, находим $A = 2.3 \cdot 10^{-4} \%$. Потери на других гранях призм оказываются на два порядка меньше. Таким образом, в резонаторе суммарные поляризационные потери, обусловленные кривизной волнового фронта, определяются практически только двумя гранями и составляют $5 \cdot 10^{-4} \%$. Это значение можно считать минимальными потерями для кольцевого резонатора данного типа.

Расчеты показывают, что на плоской преломляющей грани призмы поляризационные потери моды TEM_{10} в три раза превышают потери основной моды, а потери моды TEM_{20} – в пять раз. Следовательно, эта грань служит «мягкой» диафрагмой для проходящего излучения и является дополнительным селектором поперечных мод.

О поляризационных потерях призмного резонатора можно судить по интенсивности лучей, отраженных от преломляющих граней призм. Эти лучи в случае их рассеяния внутрь резонатора могут увеличить область захвата в кольцевом лазере. Отметим, что они же используются при юстировке резонатора. Практика подтверждает зависимость интенсивности «брюстеровских» лучей от кривизны волнового фронта: интенсивность лучей, отраженных от граней 8 (см. рисунок) существенно больше.

3. Потери, обусловленные возникновением s-компоненты

В идеальном случае излучение призмного резонатора должно быть линейно поляризовано, при этом вектор \mathbf{E} лежит в плоскости осевого контура резонатора (р-компонента). На оси пучка s-компонента вектора \mathbf{E} возникает вследствие двух основных причин: непланарности осевого контура и напряжений в призмах. «Классический» метод расчета поляризационных потерь игнорирует взаимосвязь поляризационных и волновых параметров и состоит в раздельном их определении, например методами лучевых матриц и матриц Джонса. Потери на каждой преломляющей грани призм находятся из соотношения $A_i = (1 - T_s^2/T_p^2)|\Gamma_i|^2$, где Γ_i – поляризационная переменная собственной волны, падающей на i -ю поверхность, а T_s, T_p – коэффициенты пропускания s- и р-компонент; в нашем случае $T_s/T_p = 0.9331$.

Для расчета потерь, связанных с разъюстировками в сагиттальной плоскости резонатора (децентрировка, разворот призмы), приводящими к непланарности осевого контура, необходимо рассчитать координаты осевого луча и углы между плоскостями падения на каждую грань призм [5, 6]. В первом приближении эти углы вращения плоскости поляризации можно рассматривать как независимые возмущения и линейно складывать Γ_i , обусловленные каждым из двенадцати углов вращения на вершинах осевого контура. Расчеты позволили получить соотношения между параметрами произвольной разъюстировки и поляризационными потерями в резонаторе, например для угла поворота призмы σ имеем $A \approx 2 \cdot 10^{-6} \times \sigma^2$, где A взято в процентах, а σ – в угловых минутах. Если $\sigma = 5'$, то потери в резонаторе равны $5 \cdot 10^{-5} \%$.

Другой источник s-компоненты – напряжения в призмах, возникающие при их закреплении на моноблоке резонатора. Вклад в потери от одной призмы (в процентах) $A = 4.4a^2(\Delta y)^2$, где Δy (в миллиметрах) – смещение оси лазерного пучка относительно изотропной точки призмы (точка, в которой отсутствует двулучепреломление [7]), a (в рад/мм) – коэффициент, который учитывает изменение наведенной линейной фазовой анизотропии от нуля в изотропной точке до максимального значения на краю призмы. Этот коэффициент рассчитывается путем измерения разности хода Δ ортогональных компонент вектора \mathbf{E} на поляриметре, оси которого совпадают с осями x и y призмы (см. рисунок). Например, $\Delta = 6$ нм на расстоянии 4 мм от изотропной точки призмы соответствует $a = 8.7 \cdot 10^{-3}$ рад/мм. Если при этом $\Delta y = 0.5$ мм,

то $A = 8.3 \cdot 10^{-5} \%$. Можно считать, что напряжения во всех призмах приводят к дополнительным поляризационным потерям в резонаторе не более $5 \cdot 10^{-4} \%$.

4. Потери р-компоненты

Потери рабочей р-компоненты, обусловленные разъюстировками в меридиональной плоскости резонатора, на практике оказываются меньше потерь s-компоненты, что следует, в частности, из анализа состояния поляризации «брюстеровских» лучей. Расчеты показывают, что при ошибке в изготовлении моноблока (повороте посадочной плоскости на $1'$) потери равны $\sim 10^{-6} \%$.

Выводы

Итак, проведенный анализ показал, что при соблюдении существующей технологии изготовления и сборки кольцевого призмного резонатора поляризационные потери не превышают $10^{-3} \%$. Принципиальным фактом является наличие нижнего предела поляризационных потерь, который обусловлен кривизной волнового фронта лазерного излучения и составляет $\sim 5 \cdot 10^{-4} \%$.

1. Журавлева Е.Н., Курятов В.Н., Семенов Б.Н. *Труды 2-й С.-Петербургской Междунар. конф. по гироскопической технике и навигации* (С.-Пб., 1995, ч.2, с.57).
2. Kolodnyi G.Ya., Azarova V.V., Golyaev Y.D., Melnikov A.V., Rasyov M.M., Tikhmenev N.V. *The EOS/SPIE Symposium on Optical Systems Design and Production* (Technical University of Berlin, Germany, 1999).
3. Соколов А.Л. *Лазерная техника и оптоэлектроника*, № 3–4, 98 (1993).
4. Соколов А.Л. *Оптика и спектроскопия*, **83**, 1005 (1997).
5. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. *Поляризационный анализ. Ч. 1* (М., Знак, 1998).
6. Ищенко Е.Ф., Курятов В.Н., Соколов А.Л. *Электронная техника. Сер. 11*, № 2, 78 (1986).
7. Александров А.Ф., Ахметзянов М.Х. *Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела* (М., Наука, 1973).

V.N.Kuryatov, A.L.Sokolov. Polarisation losses in a ring prism cavity.

The polarisation losses in a ring cavity, formed by total-internal-reflection prisms, were analysed. All the sources of the polarisation losses are indicated and expressions for their calculation are presented. The limit to loss reduction in cavities of this kind, set by the difference between the radii of curvature of the radiation wavefront and of the refracting prism faces, was determined.