

Расчет оптимальной поляризационной анизотропии интерференционных зеркал резонатора кольцевого лазера

О.Д.Вольпян, В.Н.Курятов, А.Л.Соколов

Проведен анализ влияния амплитудно-фазовой поляризационной анизотропии интерференционных зеркал на поляризационные характеристики кольцевого лазера (эллиптичность, сдвиги частот, потери). Определена комбинация параметров зеркала, при которой наблюдается максимальная чувствительность поляризационных характеристик излучения к непланарной деформации осевого контура. Показано, что существует диапазон оптимальных значений фазовой анизотропии зеркал.

Ключевые слова: кольцевой лазер, интерференционное зеркало, непланарный резонатор, собственные состояния поляризации.

1. Введение

Кольцевые лазеры, используемые в лазерных гироскопах, обладают рядом особенностей: малым усилением активной среды, высокой степенью монохроматичности излучения, одномодовым и одночастотным режимом генерации [1–5]. Вследствие этого к резонаторам кольцевых лазеров предъявляются жесткие требования: сверхмалые потери, стабильность параметров в широком диапазоне температур и к воздействию различных внешних факторов. Необходимо также контролировать и уменьшать погрешности изготовления и сборки оптических резонаторов.

Одной из погрешностей является непланарная деформация осевого контура, которая возникает, если резонатор образован более чем тремя вершинами осевого контура (вершина осевого контура – это точка, где осевой луч изменяет направление [6]). Такая деформация иногда применяется специально, например для формирования круговых собственных состояний поляризаций [3–5].

Поляризационные характеристики кольцевых лазеров существенно зависят от поляризационной анизотропии отражателей, образующих непланарный оптический резонатор: интерференционных зеркал или призм полного внутреннего отражения [5–11]. Цель настоящей работы состоит в определении оптимальной анизотропии интерференционных зеркал, которая позволяет обеспечить минимум потерь излучения и малую чувствительность характеристик четырехзеркального кольцевого лазера к магнитному полю при непланарной деформации осевого контура.

О.Д.Вольпян, В.Н.Курятов. ФГУП «НИИ "Полос" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: o.d.volpian@rambler.ru, Navigator@itnline.ru
А.Л.Соколов. Московский энергетический институт (технический университет), Россия, 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: Sokol@netvox.ru

Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г.

2. Методика расчета

В непланарных резонаторах плоскости падения-отражения осевого луча для соседних вершин осевого контура не совпадают. Состояние поляризации волн определяется во вращающейся системе координат $\xi_i \eta_i \zeta_i$, ось ξ_i которой лежит в плоскости падения излучения на i -ю оптическую поверхность. При переходе к следующему плечу резонатора ось η_i поворачивается на угол кручения α_i вокруг продольной оси. Для встречной волны направление оси ζ_i меняется на противоположное, при этом система координат остается правой.

Методика анализа непланарных резонаторов состоит в следующем. Необходимо задать вид непланарной деформации осевого контура, рассчитать координаты вершин осевого контура и определить углы кручения между плоскостями падения осевого луча на каждую вершину. Затем следует составить циклический оператор Джонса с учетом вращателей, описывающих разворот последовательных плоскостей падения, и матриц амплитудно-фазовой анизотропии, характеризующих каждую вершину и каждое плечо осевого контура, и, наконец, определить собственные состояния поляризации, потери и сдвиги частот встречных волн [10].

Рассмотрим четырехзеркальный резонатор бегущей волны с деформированным квадратным осевым контуром KLMN (рис.1), плечи которого имеют одинаковую длину a . Зеркала резонатора будем считать одинаковыми. Пусть исходный осевой контур KLMN' деформируется по диагонали МОК, так что точка N выводится из плоскости исходного осевого контура на расстояние Δ . Угол γ излома диагонали LON равен $\arcsin(\sqrt{2}\Delta/a)$.

Выберем расчетное сечение в точке Р вблизи вершины К и станем обходить резонатор по часовой стрелке (PLMNKP). При обходе резонатора перед каждым зеркалом поворачиваем координатный базис $\xi_i \eta_i \zeta_i$ вокруг осевого луча на некоторый угол кручения α . Это означает, что в каждом плече резонатора находится неполярный (естественный) вращатель с параметром α . Если угол

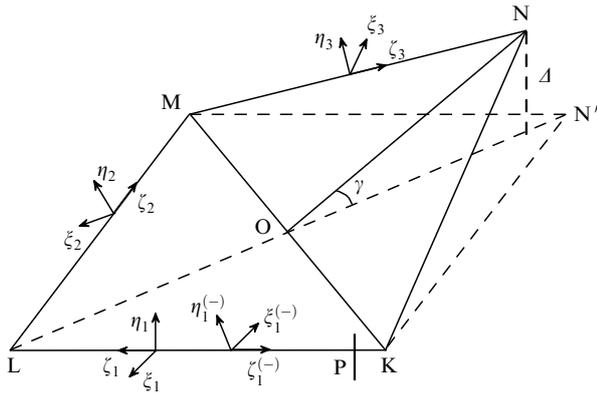


Рис.1. Схема непланарного резонатора.

γ мал, то угол кручения $\alpha \approx \pm\sqrt{2}\gamma/2$. Для встречной волны ориентация осей координатного базиса иная (см. рис.1, где верхний индекс «-» означает, что данный базис относится к волне, обходящей резонатор против часовой стрелки).

Полный оператор Джонса находим как произведение матриц Джонса вращателей и отражателей:

$$\hat{T}_0 = \hat{T}(\alpha)\hat{T}_m\hat{T}(-\alpha)\hat{T}_m\hat{T}(\alpha)\hat{T}_m\hat{T}(-\alpha)\hat{T}_m, \quad (1)$$

где

$$\hat{T}_m = \begin{pmatrix} -R & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \hat{T}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Здесь $R = R_p/R_s = (1 - t) \exp(-i\phi)$ – коэффициент амплитудно-фазовой анизотропии зеркала; $\phi = \phi_p - \phi_s$ – разность сдвигов фаз ортогональных компонент вектора напряженности электромагнитной волны E при отражении; $t \approx t_p - t_s \approx (\tau_p - \tau_s)/2$ – параметр относительной амплитудной анизотропии; t_p и t_s – амплитудные коэффициенты пропускания; τ_p и τ_s – энергетические коэффициенты пропускания. Для интерференционных зеркал параметр t и дополнительный к 180° сдвиг фазы ϕ обычно являются малыми величинами.

3. Результаты расчета

Для резонатора, образованного зеркалами, более добротной (с меньшими потерями) является s-поляризованная мода, вектор E которой перпендикулярен плоскости падения излучения на каждое из зеркал. Как следует из расчетов по изложенной выше методике, дополнительные поляризационные потери A_s , обусловленные непланарностью, и поляризационная переменная $\Gamma_s = E_x/E_y$ в этом случае описываются выражениями

$$A_s \approx 8\text{Re}\left(\frac{1 - R}{1 + R}\right)\alpha^2, \quad \Gamma_s \approx \pm \frac{\alpha}{1 + R}. \quad (2)$$

В четырехзеркальном непланарном резонаторе (рис.1) состояние поляризации излучения, как правило, становится эллиптическим и изменяется после отражения от каждого зеркала. Во всех плечах резонатора направления вращения вектора E для встречных волн противоположны (это означает, что в своих координатных базисах с противоположными направлениями продольной оси

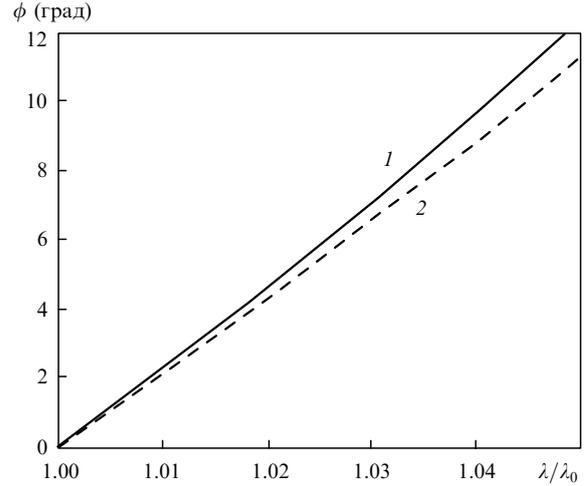


Рис.2. Зависимости сдвига фаз ϕ между ортогональными компонентами вектора напряженности от отношения λ/λ_0 при числе слоев зеркала $N = 23$ (1) и 13 (2).

встречные волны имеют одинаковые знаки углов эллиптичности). Если на активную среду такого кольцевого лазера наложить магнитное поле, то возникает не взаимный сдвиг частот встречных волн.

Рассмотрим влияние параметров зеркала на поляризационные характеристики кольцевого лазера, для которых важными являются соотношения частот и потерь встречных добротных мод [1, 2].

В случае интерференционных зеркал параметры их анизотропии зависят от числа слоев зеркала N , отношения λ/λ_0 (λ – длина волны падающего излучения, λ_0 – номинальное значение длины волны), от изменения угла падения и т. д. При отклонении λ/λ_0 от единицы линейно возрастает фазовая анизотропия ϕ , причем если $\lambda/\lambda_0 \approx 1.02$, то $\phi \approx 5^\circ$ (рис.2). Амплитудная анизотропия в основном зависит от числа слоев зеркала: чем больше N , тем меньше t , например при $N = 21$ имеем $t \approx 10^{-3}$. При $\lambda/\lambda_0 \approx 1.05$ параметр t увеличивается примерно в полтора раза (рис.3).

Проведенный анализ показывает, что существует комбинация параметров зеркала, при которой чувствительность поляризационных характеристик к непланарной деформации оказывается максимальной (при малых углах кручения):

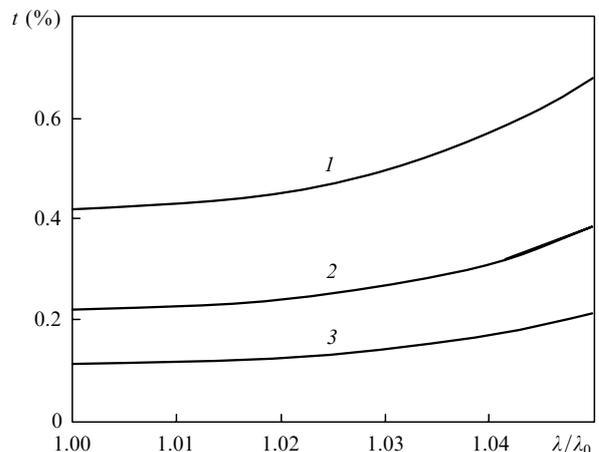


Рис.3. Зависимости параметра относительной амплитудной анизотропии t от отношения λ/λ_0 при $N = 17$ (1), 19 (2) и 21 (3).

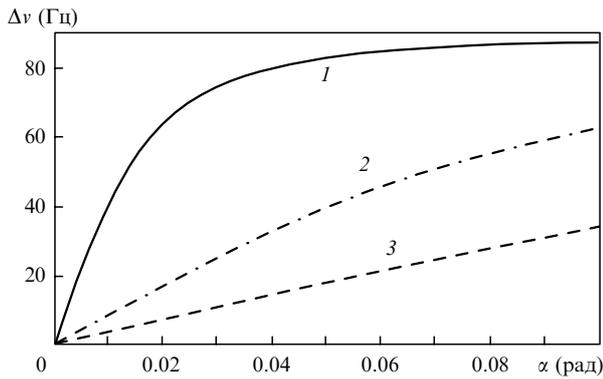


Рис.4. Зависимости сдвига частот $\Delta\nu$ встречных волн кольцевого лазера в магнитном поле от угла кручения α при $\lambda/\lambda_0 = 1.01$ (1), 1.05 (2) и 1.1 (3).

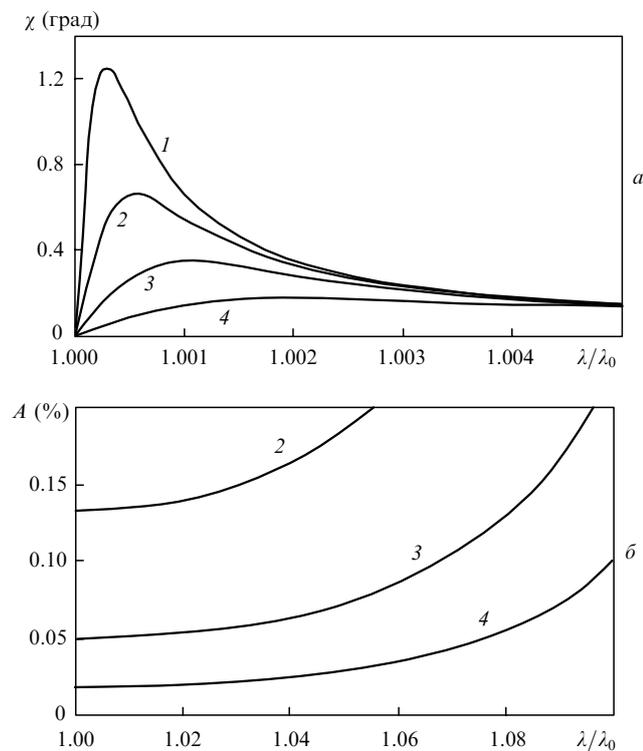


Рис.5. Зависимости угла эллиптичности χ (а) и поляризационных потерь A (б) от отношения λ/λ_0 при угле кручения $\alpha = 5 \times 10^{-5}$ и $N = 15$ (1), 17 (2), 19 (3) и 21 (4).

$$\phi_0 = t. \tag{3}$$

Такой комбинации параметров амплитудно-фазовой анизотропии зеркал следует избегать при их изготовлении. При выполнении (3) дополнительные потери $A_{\max} \approx 4\alpha^2/\phi_0$ и угол эллиптичности $\chi_{\max} \approx \alpha/(2\phi_0)$ достигают максимальных значений.

На рис.4 показана расчетная зависимость сдвига частот встречных волн в магнитном поле от угла кручения α , при этом использовались следующие величины: параметр фарадеевского вращателя 0.26×10^{-6} [10], что примерно соответствует реальному значению коэффициента усиления в активной среде кольцевого лазера, напряженность магнитного поля 1 Э и периметр осевого контура 0.28 м.

На рис.5 показаны зависимости угла эллиптичности χ и потерь A от N и λ/λ_0 , определяющих различные соотношения параметров амплитудно-фазовой анизотропии зеркал. Из анализа рис.4 и 5 следует, что для уменьшения чувствительности поляризационных характеристик к непланарной деформации осевого контура необходимо увеличивать фазовую анизотропию зеркал до 10° , при этом $\lambda/\lambda_0 \approx 1.04$.

4. Выводы

1. Амплитудно-фазовая поляризационная анизотропия интерференционных зеркал оказывает существенное влияние на потери, угол эллиптичности и сдвиги частот встречных волн кольцевого лазера с непланарным резонатором.

2. При определенном соотношении параметров амплитудной и фазовой анизотропии зеркал возрастает чувствительность поляризационных характеристик кольцевого лазера к непланарной деформации осевого контура резонатора.

3. Для уменьшения влияния непланарной деформации осевого контура на поляризационные характеристики следует обеспечивать оптимальный диапазон значений фазовой анизотропии зеркал ($5^\circ < \phi < 10^\circ$), изменяя параметры интерференционного покрытия (число, толщину и показатель преломления слоев зеркал).

1. Аронович Ф. *Применения лазеров* (М.: Мир, 1974, с. 182).
2. Курятов В.Н., Ланда П.С., Ларионов Е.Г. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **11** (12), 1839 (1968).
3. Рыбаков Б.В., Скулаченко С.С., Хромых А.М., Юдин И.И. *Оптика и спектроскопия*, **27** (1), 113 (1969).
4. Савельев И.И., Хромых А.М. *Квантовая электроника*, **3** (7), 1517 (1976).
5. Голяев Ю.Д., Евтюхов К.Н., Капцов Л.Н., Смышляев С.П. *Квантовая электроника*, **8** (11), 2321 (1981).
6. Ищенко Е.Ф., Курятов В.Н., Соколов А.Л. *Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника*, № 38, 78 (1986).
7. Ищенко Е.Ф., Курятов В.Н., Юкаров О.С. *Труды МЭИ*, № 281, 324 (1976).
8. Курятов В.Н., Соколов А.Л. *Квантовая электроника*, **30** (2), 125 (2000).
9. Рыбаков Б.В., Скулаченко С.С., Чумичев Р.Ф., Юдин И.И. *Оптика и спектроскопия*, **25** (4), 572 (1968).
10. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. *Поляризационная оптика* (М.: изд-во МЭИ, 2005).
11. Вольпян О.Д., Соколов А.Л. *Матер. VI Междунар. конф. «Лазерная физика и оптические технологии»* (Гродно, Беларусь, 2006).