
ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.179

В. В. АЗАРОВА, А. П. МАКЕЕВ, В. П. СИМОНОВ

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ И ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Приведена математическая модель расчета поляризационных и спектральных характеристик собственных типов колебаний кольцевых оптических резонаторов с неплоским контуром, учитывающая фазовую анизотропию зеркал косоугольного падения. Проведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных измерений характеристик лазерных зеркал и спектров мод четырехзеркальных резонаторов с неплоским симметричным осевым контуром. Показано, что математическая модель может быть применена для оптимального подбора зеркал лазерных резонаторов с учетом их реальных параметров.

Ключевые слова: оптический резонатор, поляризационная характеристика, лазерное зеркало.

Введение. Объемные кольцевые оптические резонаторы, осевой контур которых находится в нескольких плоскостях, в последние годы находят все большее применение в лазерных гироскопических датчиках [1—3]. Это делает актуальной задачу рассмотрения влияния неидеальности зеркал, в частности фазовой анизотропии многослойных интерференционных диэлектрических покрытий и отклонений от заданного радиуса сферы, на поляризационные и спектральные характеристики собственных типов колебаний кольцевых оптических резонаторов с неплоским контуром.

В настоящей работе проведено численное моделирование многослойных отражающих покрытий с учетом ошибок, возникающих при напылении слоев, и проанализировано влияние этих ошибок на поляризацию собственных типов колебаний и спектр мод резонаторов. Исследуются возможности исправления характеристик зеркал путем дополнительного напыления слоев, анализируется влияние ошибок на характеристики кольцевых лазерных резонаторов с неплоским контуром.

Многослойные интерференционные покрытия с учетом ошибок напыления слоев. При построении математической модели расчета многослойных диэлектрических зеркал использован метод характеристических матриц Абелеса [4, 5]. В описании пленочных систем этим методом используется понятие матрицы слоя, имеющей вид для ТЕ-поляризации (электрический вектор световой волны \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения):

$$\mathbf{m}_j = \begin{bmatrix} \cos \beta_j & -\frac{i}{p_j} \sin \beta_j \\ -ip_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\beta_j = 2\pi n_j h_j \cos \theta_j / \lambda$, $p_j = n_j \cos \theta_j$, $\theta_j = \arccos\left(1 - \sin^2 \theta_A / n_j^2\right)^{1/2}$ — угол преломления в j -м слое, θ_A — угол падения излучения на многослойное покрытие, λ — длина волны падающего света.

Для ТМ-поляризации (вектор \mathbf{E} параллелен плоскости падения) в матрице \mathbf{m}_j значения p_j заменяются на $q_j = \cos \theta_j / n_j$.

Важной особенностью матрицы \mathbf{m}_j является то, что ее элементы полностью определяются показателем преломления n_j и толщиной h_j j -го слоя и не зависят от параметров окружающей среды.

Многослойное зеркальное покрытие конструируется согласно формуле: $A(HL)^N HG$, где H и L — четвертьволновые слои с высоким и низким показателями преломления, а A и G — среда (обычно воздух) и подложка с показателями преломления n_A и n_G соответственно. Че-

рез элементы матриц многослойного покрытия $\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ определяются коэффициенты отражения по амплитуде:

$$r_{TE} = [m_{11}p_A - m_{22}p_G + m_{12}p_A p_G - m_{21}] / [m_{11}p_A + m_{22}p_G + m_{12}p_A p_G + m_{21}], \quad (2)$$

r_{TM} рассчитывается с помощью формулы, аналогичной (2), через матрицу \mathbf{m} для ТМ-поляризации путем замены p_A и p_G на q_A и q_G соответственно.

Коэффициенты отражения по интенсивности для ТЕ- и ТМ-поляризаций определяются по формулам:

$$R_{TE} = r_{TE} r_{TE}^*; \quad R_{TM} = r_{TM} r_{TM}^*,$$

здесь „*“ означает комплексное сопряжение.

Скачки фазы при отражении описываются выражениями:

$$\delta r_{TE} = \arctg\left(\frac{\text{Im } r_{TE}}{\text{Re } r_{TE}}\right), \quad \delta r_{TM} = \arctg\left(\frac{\text{Im } r_{TM}}{\text{Re } r_{TM}}\right),$$

фазовая анизотропия зеркала Δ определяется как $\Delta = \delta r_{TM} - \delta r_{TE}$.

В линейном представлении матрица зеркала при падении имеет вид:

$$Z = \begin{pmatrix} |r_{TM}| \exp i \frac{\Delta}{2} & 0 \\ 0 & -|r_{TE}| \exp\left(-i \frac{\Delta}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициентов отражения по интенсивности для ТЕ- и ТМ-поляризации 17-слойного зеркала $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ с заданной погрешностью толщины четвертьволновых слоев на $\lambda/10$ ($\lambda = 632$ нм), последовательно на каждом слое, начиная с верхнего. Из представленных графиков видно, что расчетные значения коэффициента отражения R_{TE} близки к 0,9999 и практически не зависят от заложенных в расчеты ошибок напыления. Величина R_{TM} изменяется от 0,9965 до 0,997, в зависимости от положения напыленного с ошибкой слоя в многослойной структуре покрытия.

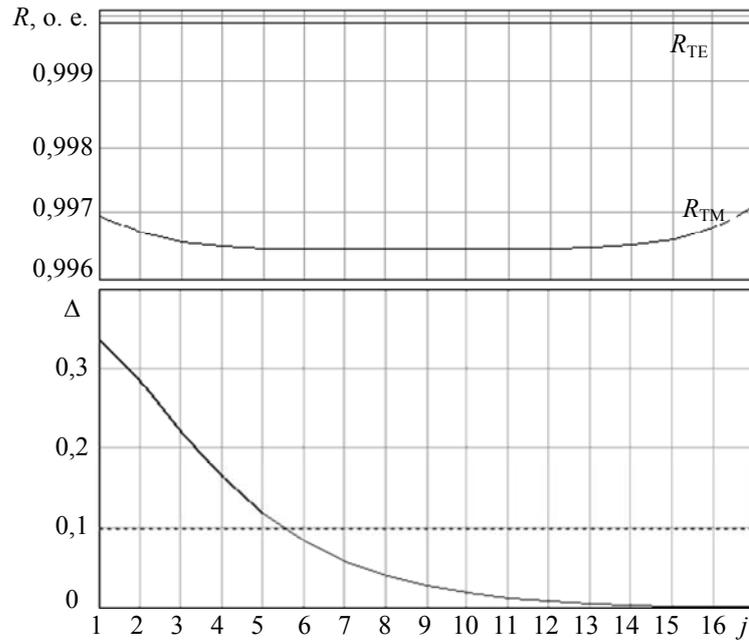


Рис. 1

Численное моделирование на основе этого математического аппарата позволяет определять оптимальное число слоев напыления для получения заданных коэффициентов отражения и пропускания на рабочей длине волны и установить спектральную зависимость при идеальных четвертьволновых слоях и с учетом ошибок напыления. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, они показывают, что для улучшения фазовых характеристик зеркал, напыленных с ошибками, необходимо на верхний слой нанести слой, устраняющий ошибку, и еще один — такой, чтобы его толщина была равна четвертьволновому слою. После „допыления“ характеристики зеркал значительно улучшаются и приближаются к значениям для зеркал без ошибки напыления слоев.

На рис. 2 приведена схема кольцевого резонатора с неплоским контуром (α и ρ — углы излома контура и поворота изображения при отражении от зеркал).

Расчет спектров собственных частот кольцевых резонаторов с неплоским контуром проводился с использованием матриц Джонса на основе поляризационного уравнения [1, 2, 5]:

$$\mathbf{M}\mathbf{E} = \gamma\mathbf{E}, \tag{4}$$

где $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ — матрица, описывающая воздейст-

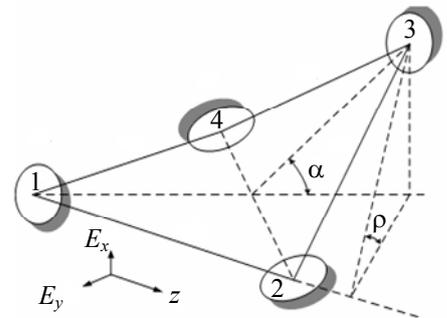


Рис. 2

вие всех элементов резонатора на световую волну, совершающую круговой обход резонатора; γ — собственные значения матрицы \mathbf{M} :

$$\gamma_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\text{Sp}\mathbf{M} \pm \sqrt{(\text{Sp}\mathbf{M})^2 - 4\text{Det}\mathbf{M}} \right], \quad \left| E_x/E_y \right|_{1,2} = M_{12}/(\gamma_{1,2} - M_{11}).$$

Для резонаторов с неплоским контуром $[(\text{Sp}\mathbf{M})^2 - 4\text{Det}\mathbf{M}] < 0$, что означает наличие разности сдвига фаз и соответственно разности частот между модами с разными состояниями поляризации (из-за знаков „плюс“ и „минус“ перед корнем).

В отсутствие невзаимных эффектов матрицы полного обхода „холодных“ резонаторов с неплоским контуром с идеальными зеркалами для направлений обхода по часовой стрелке \mathbf{M}^{cw} и против часовой стрелки \mathbf{M}^{ccw} одинаковы:

$$\mathbf{M}^{\text{ccw}} = \mathbf{M}^{\text{cw}} = \begin{bmatrix} \cos \rho_{\Sigma} & -\sin \rho_{\Sigma} \\ \sin \rho_{\Sigma} & \cos \rho_{\Sigma} \end{bmatrix} = S(\rho_{\Sigma}),$$

где ρ_{Σ} — полный угол поворота изображения световой волны при круговом обходе резонатора. Из уравнений получим $\gamma_{1,2} = \exp(\pm i\rho_{\Sigma})$ и $|E_x/E_y|_{1,2} = \exp(\pm i\pi/2) = \pm i$. Таким образом, для резонаторов с неплоским контуром собственные типы колебаний имеют правую и левую круговые поляризации независимо от угла излома резонатора, а сдвиг по фазе между волнами с правой и левой круговыми поляризациями равен удвоенному углу поворота системы координат при полном обходе резонатора $2\rho_{\Sigma}$.

В зависимости от угла излома контура резонатора и соответственно от величины ρ_{Σ} сдвиг резонансных частот с левой и правой круговыми поляризациями меняется, т.е. видоизменяется спектр резонатора. Изменяя угол неплоскостности α , можно получить резонатор с требуемым спектром частот.

Таким образом, неплоский контур резонатора в общем случае выполняет две функции. Во-первых, он обеспечивает формирование волн с круговой поляризацией; во-вторых, снимает вырождение по частотам, обеспечивая взаимное расщепление частот волн с разными (левой и правой) круговыми поляризациями. В плоском контуре такое расщепление исчезает, даже если каким-либо образом сформированы волны с круговыми поляризациями. В результате обобщенной собственной модой резонатора с неплоским контуром будут четыре волны, причем две из них распространяются вдоль контура резонатора по часовой стрелке (CW), а две других — против часовой стрелки (CCW). Волны каждой из этих пар имеют разные круговые поляризации — левую и правую — и соответственно разные частоты (это так называемое „взаимное“ расщепление). Для резонаторов с идеальными зеркалами частоты встречных волн попарно (с одинаковыми направлениями вращения поляризации) совпадают, в результате каждая пара встречных волн покоящегося резонатора (CW и CCW) имеет совпадающие частоты и совпадающие направления круговой поляризации (одна пара — обе левые, другая — обе правые круговые поляризации).

На рис. 3 приведены результаты расчета частотных характеристик продольных мод при снятии вырождения по поляризации. В случае плоского контура (рис. 3, а, $\rho=0$) и идеальных зеркал поляризация излучения линейная, а частотное расстояние между соседними модами равно c/L , где L — периметр резонатора (в расчетах 16 см). В резонаторах с неплоским контуром (рис. 3, б; $\rho=22,5^\circ$) снимается частотное вырождение в модах с разной круговой поляризацией. В этом случае частотное расстояние между модами зависит от угла излома резонатора и соответственно от угла поворота изображения световой волны зеркалом ρ .

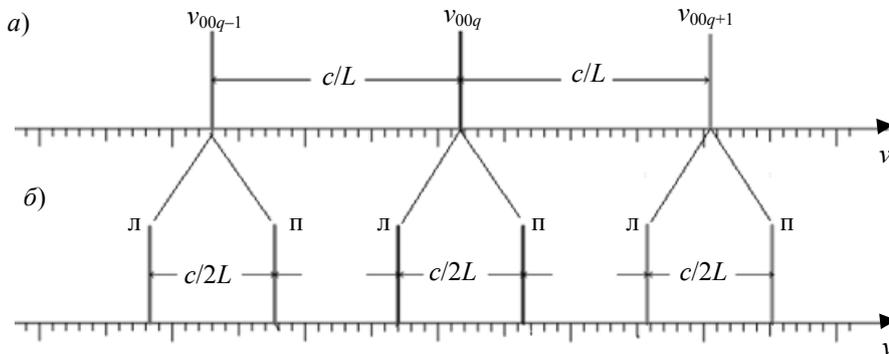


Рис. 3

Для вычисления спектра мод и поляризационных характеристик резонаторов с учетом неидеальности зеркал матрица в (4), описывающая воздействие всех элементов резонатора на световую волну, рассчитывается с учетом выражения (3). Спектр собственных частот про-

дольных и поперечных мод симметричных резонаторов определяется выражением, полученным на основании работы [6]:

$$\nu_{mqpr} = \frac{c}{L} \left(q + (m+n+1) \frac{\alpha_s}{2\pi} + \frac{1}{4} (m-n) + \frac{\arg \gamma_p}{2\pi} \right), \quad (5)$$

где m, n, q — индексы поперечных и продольных мод с учетом индекса поляризации p , $\arg \gamma_p$ — набег фазы при полном обходе резонатора с учетом фазовой анизотропии зеркал резонатора, α_s — набег фазы при полном обходе резонатора с учетом его сферичности при эффективном радиусе R_s и углом падения излучения на зеркала θ :

$$\alpha_s = \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_s} \sec \theta\right) \left(1 - \frac{L}{R_s} \cos \theta\right)}.$$

Эксперимент. Сравнение данных эксперимента и математического моделирования.

Путем сравнения расчетов по описанным математическим моделям с результатами экспериментальных измерений спектров собственных типов колебаний были сделаны следующие выводы:

— в резонаторах с неплоским контуром снимается вырождение по поляризации. Частотное расстояние между модами с правой и левой эллиптическими поляризациями зависит от угла излома контура и характеристик зеркал;

— ошибка напыления одного из зеркал в резонаторе не влияет на собственные значения матрицы резонатора и соответственно на спектр мод резонатора;

— наличие фазовой анизотропии на двух и более зеркалах в резонаторе приводит к изменению поляризационных и спектральных характеристик мод, причем величина расщепления спектра зависит не только от величины ошибки напыления, но и от порядкового номера зеркала с ошибкой в резонаторе.

Экспериментальные результаты получены по методике, описанной в работе [7]. На рис. 4 приведены экспериментально измеренные спектры мод симметричного кольцевого резонатора с неплоским контуром ($\rho=22,5^\circ$), угол излома $\alpha=32^\circ$, периметр $L=16$ см. Между частотами двух основных мод с правой и левой круговыми поляризациями находятся поперечные моды TEM_{10qp} и $TEM_{01(q+1)p}$, вырожденные по частоте в случае идеальных зеркал. При наличии фазовой анизотропии зеркал вырождение снимается. Величина частотного расщепления зависит от величины фазовой анизотропии и номера зеркала, напыленного с ошибкой.

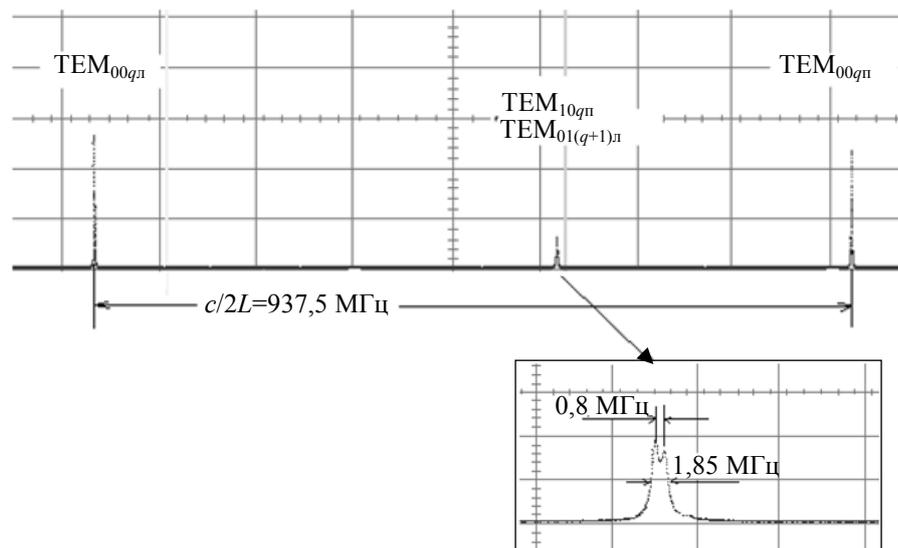


Рис. 4

Для поперечных мод $TEM_{10qп}$ и $TEM_{01(q+1)л}$ вырождение по поляризации снижается на 0,8 МГц при фазовых ошибках зеркал $\Delta=0,08$ рад на 1-м зеркале, $-0,08$ рад — на 2-м и ≈ 0 — на 3-м и 4-м зеркалах (радиус сферического зеркала 2 м). Результаты расчета подтверждают экспериментальные данные с точностью до ошибки измерения (суммарная ошибка измерений — не более 10 %).

Таким образом, наличие фазовой анизотропии зеркал приводит к уширению и даже раздвоению резонансного пика пропускания поперечных мод. Это, в свою очередь, может привести к ошибочному определению уровня селективности лазерных резонаторов и ошибкам при юстировке и сборке резонаторов.

Выводы. Предложенная математическая модель может быть использована для подбора зеркал при сборке лазерных резонаторов, а также в технологическом процессе контроля селективности резонаторов с целью обеспечения генерации на основной поперечной моде с минимальными потерями в лазерных гироскопических датчиках.

Авторы выражают благодарность И. И. Савельеву за полезные обсуждения и В. В. Фокину за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Дмитриев В. Г., Мельников А. В., Назаренко М. М., Тихменев Н. В. // Гироскопия и навигация. 1997. Т. 19, № 4. С. 7—16.
2. Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Дмитриев В. Г. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, № 2. С. 96—104.
3. Азарова В. В., Голяев Ю. Д. и др. Разработка модернизированного типоряда лазерных гироскопических датчиков 2-го поколения и трехосных лазерных гироскопов на их основе на базе модернизации существующих и разработки новых технологий и метрологий. Отчет по НИЭР Феникс-1. М., 2006.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
5. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 2008.
6. Савельев И. И., Хромых А. М. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 7. С. 1517—1526.
7. Азарова В. В., Ефремова Н. А. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 3. С. 239—242.

Сведения об авторах

- Валентина Васильевна Азарова** — канд. физ-мат. наук, доцент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций; ОАО НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха, Москва; начальник лаборатории; E-mail: azarovav@hotmail.ru
- Алексей Петрович Макеев** — аспирант; ОАО НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха, Москва
- Валентин Павлович Симонов** — д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, кафедра электроники и наноэлектроники, Москва; E-mail: vsimonov@hse.ru

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.