

П.Я. Чудаковский, И.А. Корнеева
ГУВПО «Белорусско-Российский университет»,
Могилёв, Беларусь

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СХЕМЕ МЕТОДА ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Введение

Во многих прикладных задачах интегральной оптики, оптоэлектроники, приборостроения для конструирования надежно работающих устройств необходимо заранее знать оптические параметры материалов (показатели преломления, поглощения сред и их толщины). В других задачах, например, в области технологии разработки материалов с новыми свойствами, возникает проблема контроля оптических параметров. Ключевую роль в исследовании материалов играют классические оптические методы контроля, такие как, эллипсометрия, интерферометрия, дифрактометрия, спектрофотометрия, волноводная спектроскопия, внутрирезонаторная спектроскопия [1-4]. Перечисленные методы обладают преимуществом перед другими физическими методами, поскольку являются неразрушающими и могут быть применены в режиме реального времени. На сегодняшний день мно-

гие из этих методов получили дальнейшее развитие. Так, например, техника волноводной спектроскопии [3] дополнена техникой внутрирезонаторной спектроскопии, и уже применена для исследования оптических сред [5]. Однако теоретическое описание поведения оптических полей при использовании техники метода внутрирезонаторной волноводной спектроскопии отсутствует. В настоящей работе приводятся результаты компьютерного моделирования оптических полей применительно к задачам внутрирезонаторной волноводной спектроскопии, что вносит вклад в развитие данного метода.

1. Расчет оптического поля в призме в схеме открытого резонатора

Для описания оптических полей в призмном устройстве связи, включенном в схему открытого резонатора, рассмотрим рисунок 1. Согласно этой схеме осуществляется возбуждение волноводных мод в пленке 2 призмой 1, которые приведены в контакт с дуг другом. На рисунке 1 указано пятно оптического контакта 5 – область, в пределах которой световое излучение проникает в волноводную пленку 2 через воздушный буферный слой между призмой и пленкой (буферный слой на рисунке не указан). Открытый резонатор представлен на рисунке плоскими зеркалами 3, 4. Таким образом, оптическое излучение в призме связи 1 после возбуждения волноводной моды испытывает многократное отражения между зеркалами. Очевидно, что данная схема представляет собой резонатор с потерями. Если пренебречь дифракцией света на гранях призмы, то естественно считать, что эти потери происходят из-за «выхода» светового излучения в виде волноводной моды пленки.

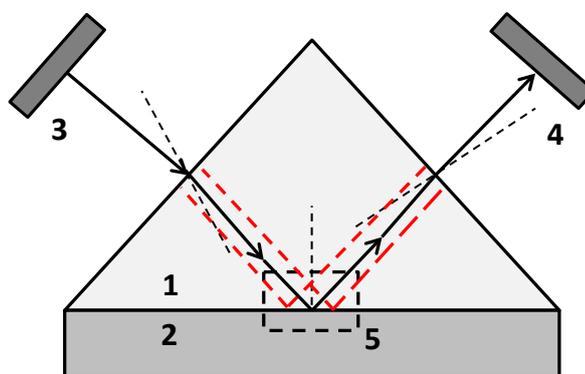


Рисунок 1 – Резонатор с призмным устройством связи:
1 – призма; 2 – пленка (волновод); 3,4 – зеркала;
5 – область оптического контакта призмы и пленки

Этот «выход» светового излучения происходит в малой области оптического пятна (область оптического контакта призмы и пленки), которая до сих пор в волноводной спектроскопии не исследована. Как правило, при возбуждении волноводных мод используется световой пучок, поперечное сечение которого имеет круговую симметрию. Поперечные размеры пучка крайне малы. Поэтому можно положить, что свет распространяется в призме в очень узком цилиндрическом канале. Кроме того, зеркала 3 и 4 можно перемещать и располагать в любой точке на оси светового пучка, например, на гранях призмы. Тогда многократные отражения в призме можно свести к распространению света в цилиндрическом волноводе с зеркальными торцами. Далее, рассматривая область оптического контакта, обратим внимание на тот факт, что световое излучение здесь взаимодействует с некоторой не большой областью пленки и оптические характеристики пленки должны существенно видоизменять оптическое поле открытого резонатора. Для того чтобы выяснить это влияние, внесем в призмное устройство связи (теперь, рассматриваемое как цилиндрический резонатор) саму среду пленки. Размеры области такой среды, определяются границами оптического пятна. Эта внесенная среда пленки нами рассматривается как микрорезонатор с активной средой, обладающей комплексным показателем преломления. Другими словами, реализовалась модельная схема резонатор в резонаторе. Таким образом, описание оптического поля в призмном устройстве связи, включенном в схему открытого резонатора, свелась к расчету поля на одном из зеркал активного оптического микрорезонатора, окруженного средой с показателем преломления призмы связи.

В модельном активном микрорезонаторе будем считать, что зеркала плоские, но имеют круговую симметрию. Расчет оптического поля в таком резонаторе основывается на волновом уравнении Гельмгольца, записанным в цилиндрической системе координат (r, φ, z) . Решение волнового уравнения находится волновым подходом Вайнштейна и в случае активного резонатора с комплексным показателем преломления имеет вид [6]:

$$U(r, \varphi, z) = W(r, \varphi, z)e^{ikz} - (-1)^q W(r, \varphi, -z)e^{-ikz}. \quad (1)$$

В уравнении (1) полагают, что $W(r, \varphi, z) = f(r)\chi(z)\cos m\varphi$, $k = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны излучения в вакууме. После введения безразмерных параметров $\rho = r\sqrt{k/L}$, $\xi = z/L$, где L – база (длина) резонатора, функции χ примет вид $\chi(\xi) = e^{-i2\pi P(\xi+1/2)}$, в которой параметр P – определяется из граничных условий, так что $P = (2\pi)^{-1}[Lk - \pi q]$

(q – некоторое положительное большое число). Радиальная функции $f(r)$ определяется из дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \gamma^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial f}{\partial \gamma} + \left(1 - \frac{m^2}{\gamma^2}\right) f = 0. \quad (2)$$

Решение (2) имеет вид $f_m(\gamma) = J_m(\gamma)$, где $\gamma = \rho \alpha(\rho)$, $\alpha(\rho) = \sqrt{S_0^2 + kL(n_f^2(\rho) - 1)}$, $J_m(\gamma)$ – функция Бесселя порядка m , а выражение для S_0 задаётся формулой

$$S_0 = \frac{2v_{mn}}{M^2 - (\beta + i\beta)^2} \left[M - \frac{kL(n_0^2 - 1)}{4v_{mn}^2} \left[M^2 - (\beta + i\beta)^2 \right]^{1/2} - (\beta + i\beta) \right], \quad (3)$$

где n_0 – значение комплексного показателя преломления n_f на краю зеркала, $M = 2a\sqrt{k/L}$, a – радиус зеркала, $\beta = 0,824$, m, n – индексы мод резонатора, v_{mn} есть n -й корень уравнения $J_m(\gamma) = 0$.

2. Обсуждение результатов

Ниже представлен результат численного моделирования, проведенного в рамках рассматриваемого выше подхода. Так границы интересующего нас оптического пятна определяются размерами проекции ширины светового пучка на основании призмы. Значение проекция пучка разнится от реальной ширины пучка во втором знаке после запятой. Граница оптического пятна как раз таки и определяет базу (длину) модельного резонатора, а радиус плоских круговых зеркал соответствует радиусу пучка. Уменьшая базу резонатора, что равносильно сужению границ оптического пятна, была установлена область, дающая вклад в потери резонатора. На рисунке 2 представлен результат такого сужения при ширине светового пучка в 3 мм, с комплексным показателем преломления среды резонатора $n_f = 1,607 - i 7,174 \times 10^{-6}$ и показателем преломления окружающей среды (призмы) $n_0 = 1,75$. Длина волны светового излучения – $\lambda = 0,6328$ мкм.

Условием выбора подходящей области на оптическом пятне служила близость потерь самого резонатора с мнимой частью комплексного показателя преломления $\text{Im} n_f$. При достижении такого условия на плоскости одного из зеркал наблюдается распределение интенсивности светового излучения в виде m -линий, которые и регистрируют-

ся в волноводной спектроскопии. Вид расчетных m -линий представлен на рисунках 2 и 3 при различных значениях ширины светового пучка W и базы резонатора L (интересуемая область оптического пятна).

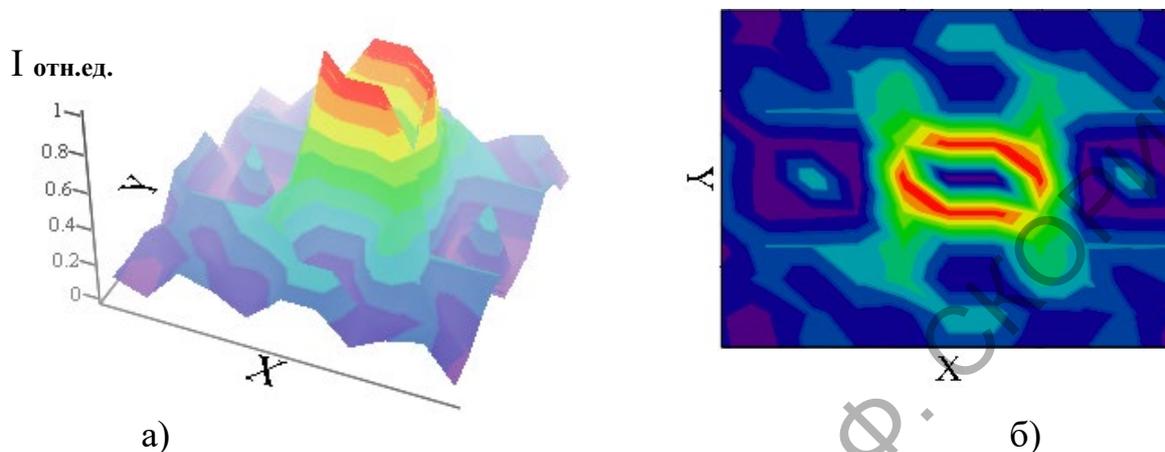


Рисунок 2 – Распределение интенсивности основной моды резонатора ($m = n = 0$) за один проход на плоскости (X, Y) одного из зеркал: а) пространственное распределение; б) контурное представление

Из рисунка 3 видно, что распределение интенсивности в резонаторе изменяется с увеличением радиуса светового пучка (или, что тоже радиусов зеркал).

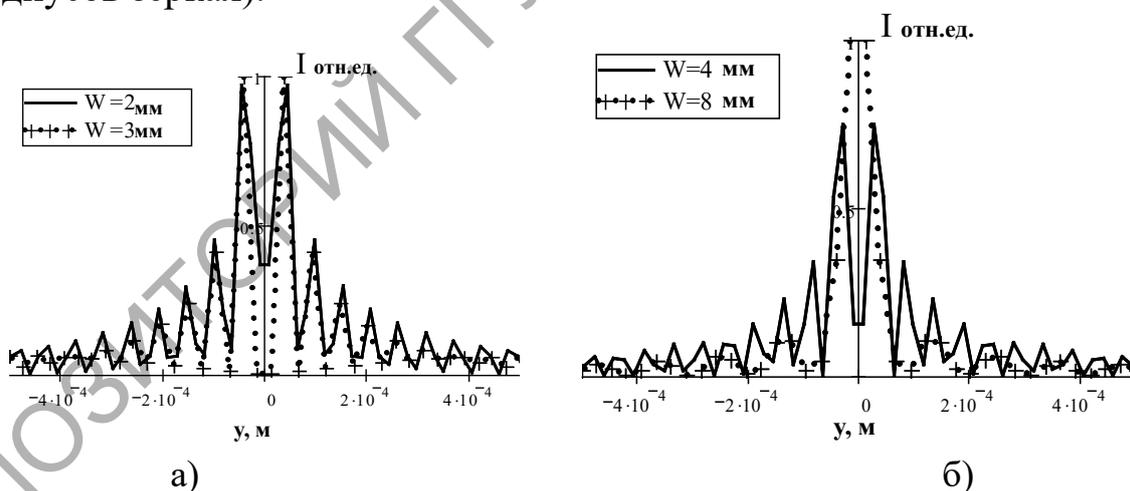


Рисунок 3 – Одномерное распределение интенсивности основной моды ($m = n = 0$) резонатора за один проход на плоскости одного из зеркал: а) $W = 2$ мм, $L = 192,65$ мкм; $W = 3$ мм, $L = 303,99$ мкм; б) $W = 4$ мм, $L = 419$ мкм; при $W = 8$ мм, $L = 898$ мкм m -линия не наблюдается

При этом расширяется и база модельного микрорезонатора, а значит и границы области, несущей вклад в изменение оптического поля. Следует отметить, что наблюдаемые расчетные m -линии симметричны и отличаются друг от друга ярко выраженными минимумами интенсивности. Потери резонатора для указанных случаев на рисунке 3 составили $7,176 \times 10^{-6}$ (для $W = 2$ мм), $7,1748 \times 10^{-6}$ (для $W = 3$ мм), $7,179 \times 10^{-6}$ (для $W = 4$ мм). Для сравнения, мнимая часть комплексного показателя пленки составляла $7,174 \times 10^{-6}$.

Заключение

Таким образом, рассматривая задачу о призмном устройстве связи в открытом резонаторе, предложена модель, которая в дальнейшем позволит теоретически исследовать оптические поля, возникающие при использовании техники метода внутрирезонаторной волноводной спектроскопии. На данном этапе производится проверка корректности предложенной модели в реальных экспериментах.

Литература

1. Комраков, Б.М. Измерение параметров оптических покрытий / Б.М. Комраков, А.Б. Шапочкин. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
2. . Дронь, О.С. Развитие эллипсометрии / О.С. Дронь // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12. – № 4. – С. 57–62.
3. Хомченко, А.В. Волноводная спектроскопия тонких пленок / А.В. Хомченко. – Мн.: БГУ, 2002. – 222 с.
4. Куликов, К. Г. Исследование электрофизических характеристик форменных элементов крови методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии. I. Моделирование светорассеяния на ансамбле биологических клеток со сложной структурой / К.Г. Куликов // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – № 4. – С. 109–119.
5. Шульга, А. В. Внутрирезонаторная волноводная спектроскопия тонкопленочных структур / А.В. Шульга, А.В. Хомченко // Проблемы взаимодействия излучения с веществом. сб. материалов IV Международной науч. конф / (Гомель, 9 – 11 ноября 2016 г.). – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – С. 197–201.
6. Балашин, Ю. А. Применение ЭВМ при разработке лазеров / Ю.А. Балашин, К.И. Крылов, С.Ф. Шарлай. – Ленинград: Машиностроение, 1989. – 236 с.