УДК 535.417.2; 004.94

*П. Я. ЧУДАКОВСКИЙ*¹, канд. физ.-мат. наук. ¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В СХЕМЕ ПРИЗМЕННОГО УСТРОЙСТВА СВЯЗИ

Аннотация

В рамках задачи внутрирезонаторной волноводной спектроскопии на основе модели резонатора Фабри-Перо теоретически исследовано влияние буферного слоя, заключенного между призмой и некоторой средой, на энергетический коэффициент отражения света. Используется модель сложенного резонатора с перекрытием пучка для описания выходной мощности оптического излучения в случае ромбической призмы связи.

Ключевые слова: внутрирезонаторная спектроскопия, резонатор, призма связи, коэффициент отражения, мощность оптического излучения.

Внутрирезонаторная волноводная спектроскопия (BBC) находит применение при исследовании тонкопленочных структур [1], являющихся неотъемлемым элементом интегрально - оптических устройств. В отличие от классической волноводной спектроскопии [2], в схеме ВВС световой пучок, испытавший туннельный эффект на границе раздела сред призма - буферный слой, отражают обратно в призму, так что призма выполняет роль оптического резонатора [1]. Свойства структуры, представляющей собой призму, буферный слой и среду (подложка) существенным образом влияют на коэффициент отражения светового пучка в призменном резонаторе. Теоретическое исследование резонансных эффектов в подобной структуре непростая задача и в редких случаях может быть описана аналитически. В данной работе исследуется влияние толщины буферного слоя на коэффициент отражения светового пучка в условиях внутрирезонаторного отражения, а также влияние оптических характеристик призмы связи на мощность выходного оптического излучения.

В работе [3] теоретически исследовался резонансный отклик на коэффициент отражения волн ТЕ - поляризации на изменение толщины буферного слоя, заключенного между призмой с показателем преломления n_0 и средой с показателем преломления n_2 . При этом показатель преломления n_1 буферного слоя принимал значения меньше чем показатели преломления n_0 и n_2 так есть, $n_0 > n_1$, n_2 и $n_2 > n_1$. Призменный элемент, буферный слой, и среда рассматривались в виде слоистой структуры, свойства которой схожи с резонатором Фабри-Перо. На рис. 1 представлена подобная структура. Роль зеркал в такой структуре выполняют основание призмы 1 и поверхность среды с показателем преломления n_2 , при этом эта среда играет роль подложки 3. Часть излучения из такого резонатора выходит обратно в призму и в угловой

зависимости энергетического коэффициента отражения наблюдаются резонансные минимумы [3].



Рис. 1. Слоистая структура как резонатор Фабри-Перо: 1-призма с показателем преломления n_0 ; 2-буферный слой с показателем преломления n_1 , и толщиной h; 3-подложка с показателем преломления n_2

В данной работе выполнены расчеты (рис. 2-4), показывающие влияние толщины буферного слоя на коэффициент отражения волн ТМ - поляризации. Расчет энергетического коэффициента отражения R выполнен на основе формул Френеля, рассматривая призму и подложку полубесконечными средами по отношению к буферному слою [4]. В соответствии с формулами Френеля энергетический коэффициент R имеет вид

$$R = \left| r_{012} \right|^2 = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\beta h)}{1 + r_{01}^2 r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\beta h)},$$
(1)

где $r_{012} = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(-i2\beta)}$ - амплитудный коэффициент отражения от слоистой

структуры, а коэффициенты отражения r_{01} и r_{12} определяются выражениями

$$r_{01} = \frac{n_1 \cos(\Theta_0) - n_0 \cos(\Theta_1)}{n_1 \cos(\Theta_0) + n_0 \cos(\Theta_1)},$$
(2)

$$r_{12} = \frac{n_2 \cos(\Theta_1) - n_1 \cos(\Theta_2)}{n_1 \cos(\Theta_1) + n_2 \cos(\Theta_2)}.$$
(3)

В формулах (1) – (3) $\beta = \frac{2\pi h n_1 \cos(\Theta_1)}{\lambda}$ – фазовый угол (фазовая толщина буферного слоя), *h* – толщина буферного слоя, Θ_0 – угол падения излучения на

основание призмы, Θ_1, Θ_2 – углы преломления в буферном слое и подложке, λ – длина волны (во всех расчетах принималась равной 0,6328 мкм).

Из рис. 2 видно, что угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМ - поляризации характеризуется различным числом минимумов при различных значениях толщины.



Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМполяризации при наличии воздушного буферного слоя: толщины буферного слоя: 1 - 1 мкм, 2 -1,5 мкм; показатели преломления: для призмы $n_0 = 1,75$, подложки (среды) $n_2 = 1.51$

На рис. 3 сравниваются коэффициенты отражения для волн ТЕ и ТМ поляризаций для случая фиксированной толщины буферного слоя. Как видно ТЕ и ТМ волны обладают разной чувствительностью к буферному слою, что и существенному коэффициентах приводит к отличию В отражения. ТЕ - поляризации более ярко Для волн выражен минимум угловой В зависимости коэффициента отражения.



Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТЕ, ТМполяризаций при наличии воздушного буферного слоя: толщины буферного слоя 1 мкм: 1 - для волн ТЕ – поляризации, 2 - для волн ТМ - поляризации; показатели преломления: для призмы $n_0 = 1,75$, подложки (среды) $n_2 = 1,51$

На рис. 4 сравниваются коэффициенты отражения для волн ТЕ и ТМ поляризаций в зависимости от толщины h буферного слоя при фиксированном угле падения Θ_0 (близким к критическому углу) светового излучения на основание призмы.



Рис. 4. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн TE, TMполяризаций от толщины при фиксированном угле падения Θ_0 : 1 - для волн TE - поляризации; 2 - для волн TM – поляризации

Из рисунка также заметна большая чувствительность по интенсивности волн ТЕ - поляризации к толщине буферного слоя. Для некоторых толщин минимумы коэффициентов отражения для волн ТЕ, ТМ - поляризаций совпадают, а максимумы, как видно, принимают различные значения.

Для минимизации дифракционных эффектов призменное устройство выполняют в виде наклонного параллелепипеда (призма ромбической формы). Расчет оптической мощности в таком резонаторе, можно выполнить в рамках модели сложенного резонатора с перекрытием пучка (резонатор с зигзагообразной траекторией луча) [5]. Эта модель интересна тем, что для неè существует аналитическое выражение для выходной мощности излучения, которое может быть использовано при решении обратной оптической задачи.

Аналитическое выражение для выходной мощности излучения для резонаторов с зигзагообразной траекторией, с учетом того, что грани резонатора являются скошенными под углом Брюстера, в общем случае имеет вид

$$P_{out} = \gamma_1 \gamma_2 A_b I_s \frac{1 - R}{1 - R + \sqrt{R} (1/V_s - V_s)} \left[\gamma_2 g_0 l - \left| \ln \sqrt{R V_s^2} \right| \right], \tag{4}$$

где $V_s = \exp[-\alpha_0 l \gamma_3]$ есть фактор потерь, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — факторы коррекции, A_b — площадь поперечного сечения пучка, I_s — интенсивность насыщения, α_0 — коэффициент потерь, g_0 — коэффициент усиления слабого сигнала, R — отражательная способность зеркал, l – длина боковой стороны активной среды.

Вводя показатель преломления активной среды n (в нашем случае это показатель преломления призмы), угол Брюстера $\alpha = \operatorname{arctg}(n)$, ширину

входящего пучка a_0 , ширину *а* входной грани призмы, то факторы коррекции можно представить в виде $\gamma_1 = 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{(8a/a_0)\cos^2 \alpha - 1}$, $\gamma_2 = tg\alpha$, $\gamma_3 = \frac{1}{\sin(2\alpha)}$.

На рис. 5 представлены результаты численного расчета зависимости мощности излучения, прошедшего через активную среду, от коэффициента отражения *R*.



Рис. 5. Зависимость мощности выходного излучения от коэффициента отражения R (параметр $g_0 l = 2, l = 5$ мм)



Рис. 6. Зависимость мощности выходного излучения от коэффициента отражения R (параметр $g_0 l=2, l=15$ мм)

Расчеты произведены на основании выражения (4). В качестве исходных расчетных параметров выступали геометрические характеристики светового пучка и призмы, выполняющей роль активной среды. Так геометрические

параметры пучка принимали значения: ширина входящего пучка $a_0 = 2$ мм, площадь поперечного сечения пучка $A_b = 3,14$ мм². Показатель преломления призмы составлял n = 1,65708, ширина входной грани призмы a=5 мм, длина боковой стороны активной среды l=5 мм. Линии на графике соответствуют значениям коэффициента потерь: 0,03 мм⁻¹ (линия 1), 0,04 мм⁻¹ (линия 2), 0,05 мм⁻¹ (линия 3), 0,06 мм⁻¹ (линия 4). Обычно реальное призменное устройство имеет длину, не превышающую 15 мм. Для сравнения на рис. 6 показаны графики, аналогичные рис. 5, для более протяженной призмы.

Как видно, зависимости на рис. 5 и 6 существенно отличаются. И по мере увеличения базы резонатора (протяженности призмы) в мощности выходного излучения наблюдаются более выраженные максимумы.

Таким образом, модель сложенного резонатора с перекрытием пучка позволяет судить о резонаторных свойствах призмы ромбической формы с учетом еè отражательной способности. Кроме того, можно предположить, что если призма будет контактировать со средой, обладающей поглощением, то коэффициент поглощения этой среды, можно восстановить в рамках рассмотренной модели, отождествив коэффициент потерь призмы с потерями среды. Полученные результаты могут быть использованы при решении обратной оптической задачи, связанной с восстановлением оптических характеристик материальных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульга, А. В. Внутрирезонаторная волноводная спектроскопия тонких пленок / А. В. Шульга, А. В. Хомченко, И. В. Шилова // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, № 21. – С.3-9.

2. Хомченко, А. В. Волноводный метод измерения параметров тонких плѐнок / А. В. Хомченко [и др.] // Журнал технической физики. – 2005. – Т.75, № 6. – С.98-106.

3. Чудаковский, П. Я. Влияние буферного слоя на внутрирезонаторное отражение света в схеме призменного устройства связи / П. Я. Чудаковский // Материалы международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» / Могилев, 20 – 21 апреля 2023 г. – Могилев: Белорус.–Рос. ун-т. – С.360-361.

4. Taya, S. A. Optical sensors based on Fabry–Perot resonator and fringes of equal thickness structure/ S. A. Taya, M. Taher El-Agez // Optik. – 2012. Vol. 123. – P.417-421.

5. **Ходгсон, Н.** Лазерные резонаторы и распространение пучков. Основы, современные понятия и прикладные аспекты / Норман Ходгсон, Хорст Вебер: пер. с англ. С. А. Бордзиловского; под науч. ред. С. Г. Струц. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 744 с.

Контакты:

pawel206265@mail.ru (Чудаковский Павел Яковлевич)