ШК 621.372.8; 535.1

I Восстановление постоянных распространения мод волноводных пленок с учетом дифракционных эффектов

А. Б. Сотский[1], П. Я. ЧУДАКОВСКИЙ[1], И. У. ПРИМАК[2], Л. И. СОТСКАЯ[2]

Рассматривается модель призменного устройства возбуждения мод оптических волноводов, имеющих ограниченную протяженность. Проанализированы решения прямой и обратной задач волноводной спектроскопии с учетом дифракционных эффектов. Проведены расчеты как для гладких поверхностей волноводной пленки и основания призмы, так и для общего случая при наличии шероховатостей.

Ключевые слова: волноводная спектроскопия, волноводная мода, постоянная распространения, обратная задача.

The article considers the model of the prism coupler of excitation of optical waveguide modes that have restricted length. The solutions to direct and inverse problems of waveguide spectroscopy taking into account the diffraction effects are analyzed. The calculations both for waveguide film smooth surfaces and the prism basis and for a general case in the presence of roughness are carried out.

Keywords: waveguide spectroscopy, waveguide mode, spreading constant, inverse problem.

Введение

Волноводная спектроскопия является одним из наиболее эффективных методов измерения постоянных распространения и коэффициентов затухания мод оптических волноводов

В этом методе в результате обработки углового распределения интенсивности отражен • зго светового пучка при возбуждении моды планарного волновода посредством призмы рмзи одновременно определяются действительная и мнимая части комплексной постоянной распространения моды ***h***. Это открывает возможности неразрушающего контроля парамет рсв тонких пленок, который сводится к решению известных дисперсионных уравнений для ианарных волноводов.

Аналитическое решение обратной оптической задачи о восстановлении ***h*** методом клноводной спектроскопии было сформулировано в [2]. Практика показала, что это реше ***ш<e*** достаточно эффективно при восстановлении Re ***h***. Однако при восстановлении Im ***h*** изникли проблемы. Оказалось, что в некоторых случаях решение [2] может давать завышенное (иногда более чем на порядок) значение коэффициента затухания волноводной моды. Такая ситуация возникает при исследовании пленок, обладающих малым (менее 10 дБ/см) шглощением [1]. Отмеченный дефект можно связать с неполной адекватностью математиче агай модели проблемы реальной физической ситуации. Действительно, в [2] рассмотрена неограниченная призма связи, отделенная от планарного оптического волновода однородным ^ферным слоем с фиксированной толщиной ***g***. Такая модель не позволяет учесть выход «сти энергии возбуждаемой моды за пределы призмы связи. В то же время возникающая в згом случае дифракция излучения на краю призмы может существенно ограничить точность установления Im ***h*** [3]. Кроме того, значение ***g*** в реальных экспериментах может быть со вгставимо с амплитудой шероховатостей поверхности волновода и основания призмы. Таим образом, применимость модели неограниченной призмы связи и однородного буферного я является проблематичной.

В настоящей работе анализируется более корректная модель призменного устройства шаои. Мы предполагаем, что основание призмы имеет ограниченную протяженность, что кеспечивается надлежащим выбором функции ***g(z)***, где г координата, отсчитанная • юль основания призмы. При этом поверхность волноводной пленки и основание призмы • опт быть в общем случае шероховатыми.

1 Прямая и обратная задачи волноводной спектроскопии

Ниже представлены результаты решения прямой и обратной задач волноводной ***сяащ*** троскопии для волноводной пленки из стекла К8 с диэлектрической проницаемое^» ***sw*** = 2.295192 / • $10^{m,5}$ и толщиной ***d 3jum,*** нанесенной на кварцевую подложк? ***e*** ~ 2.12314 МО$"^{6}$. Пленка отделена от равнобедренной призмы связи из тяжелого флвшш ***{e*** = 3.06145) с углом при основании ***в*** = 60°, воздушным буферным слоем с минимальяи толщиной ***g0 OAjum.*** Рассмотрено возбуждение наиболее информативных с позиций . ностики поверхности ***TM*** мод пленки. Призма освещалась гауссовым световым пучкоу диуса ***w0 = 70/дп .*** Длина волны света составляла ***Я0*** = 0.6328//т.

При вычислениях учитывался изгиб основания призмы связи в окрестности ее вых:_з ного ребра, а также шероховатости основания призмы и поверхности волноводной плева. Указанные поверхности описывались функциями ***y4*** **(z)** и ***y3*** **(z)** вида ***y4*** **(z)** = ***y\0)*** **(z)** + ***A;.*** и ***y3*** **(z)** = ***g0 + Ay3*** **(z)** . Зависимости ***Ay4*** **(z)** и ***Ay3*** **(z)** моделируют случайные отклонена функций ***y4*** **(z)** и ***yъ*** **(z)** от их средних значений ***y{40)*** **(z)** и ***g0 (gQ*** средняя толщина буфе», ного слоя вдали от ребер призмы). Зависимость ***y\0)(z),*** описывающая изгиб основав» призмы связи в окрестности ее выходного ребра, моделировалась функцией Фе~ч_т ***yf\z) = Ay0\[+ exp[m(г z^b)§~^1.*** Здесь г отвечает за крутизну изгиба основания призэш связи в окрестности ее выходного ребра, ***z^b*** расстояние от данного ребра до точки пересечения оси возбуждающего пучка с основанием призмы связи. При расчетах использовалось практически достижимое значение г = 50/#и и значение ***Ay0(z) = О.Ъ/лт,*** при котором с в а призмы с волноводом в области ***z » z^b*** является пренебрежимо слабой.

Расчет дифракционных полей в описанной структуре был выполнен строгим **МеТozo»** интегральных уравнений, сформулированных относительно амплитуд локальных мод эквивалентной слоистой структуры, ограниченной идеально проводящими поверхностями с нанесенными на них полностью согласованными слоями (PML). Этот метод обобщает результаты [3] на случай волн ***TM*** поляризации. Обработка углового распределения интенсивносп отраженного пучка с целью решения обратной задачи волноводной спектроскопии в условиях ограниченной призмы связи осуществлялась методом, представляющим собой модификацию результатов работы [4].

На рисунке 1, а) представлены распределения интенсивности ***I(z)*** отраженного светового пучка на высоте ***y0 = ljum*** от основания призмы связи при возбуждении основной моды пленки, относящиеся к различным протяженностям этого основания. Расчет выполнен при А}'4**(z)** = ***Ay3(z)*** = 0. Из рисунка 1, а) видно, что при ***g(z)*** > 0.25***/um*** эффект переизлучения энергии возбужденной моды в призму связи становится пренебрежимо слабым. Отметим также видимые колебания функции **/(z)** в области **z** > ***z^b.*** Они объясняются интерференцией основной и высшей мод. Последние возбуждаются в результате дифракции света на выходном ребре призмы.

Рисунок 1, б) иллюстрирует регистрируемое в экспериментах угловое распределение интенсивности отраженного пучка ***S(y) (y*** угол, отсчитанный от нормали к боковой грани призмы). Представленные графики рассчитаны в результате фурье преобразования поля отраженного пучка в окрестности основания призмы. Из рисунка 1, б) видно, что ограничение призмы связи приводит к дифракционным колебаниям функции ***S(y)***. Наблюдаемое распределение ***S(y)*** (кривая 1) существенно отличается от аналогичного распределения, соответствующего неограниченной призме связи (кривая 2). Это расхождение объясняет отмеченные

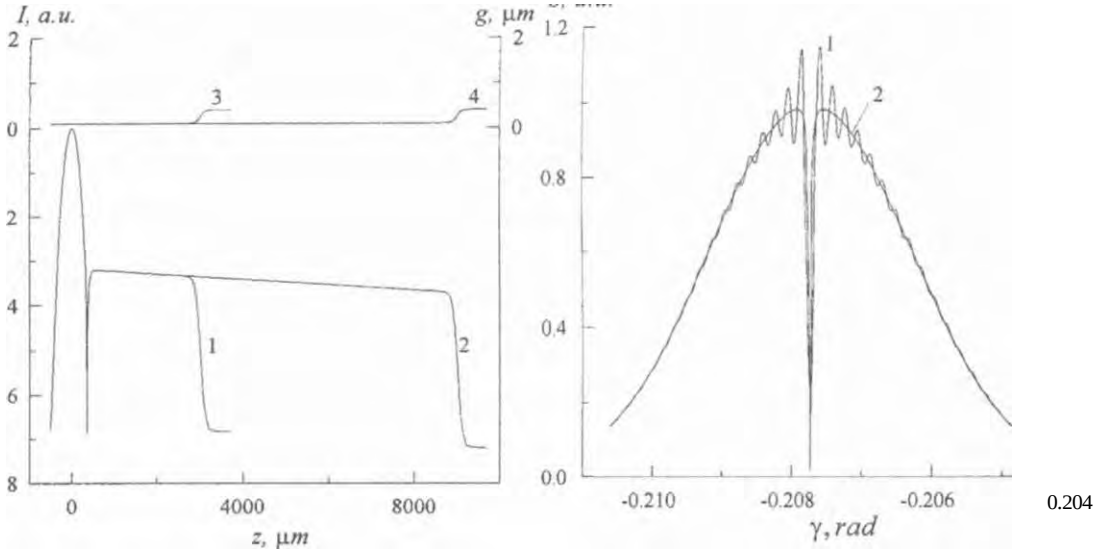
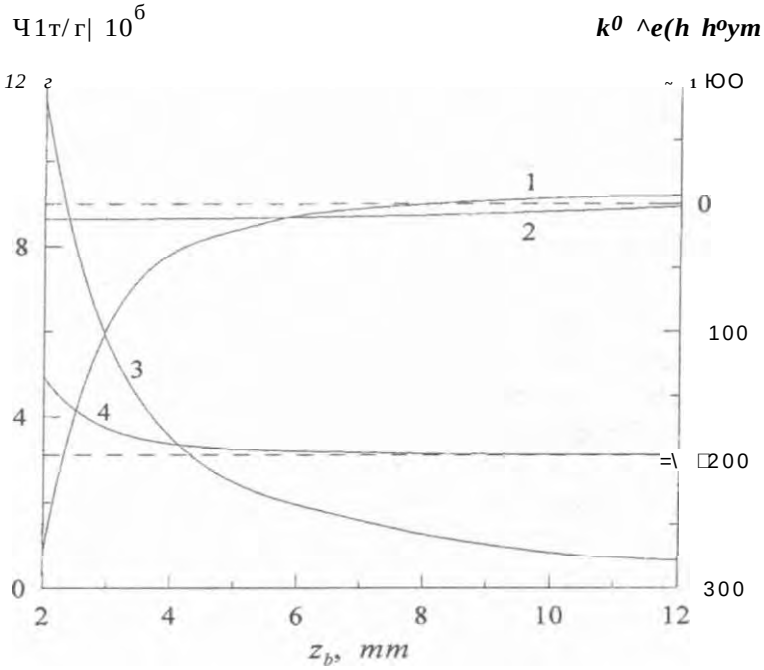


Рисунок 1 а) интенсивность отраженного пучка вблизи основания призмы при возбуждении основной ***TM*** моды пленки при z^b = ***3mm*** (1) HZ 4 = ***9mm*** (2); 3 и 4 соответствуйте ***g(z);*** б) угловое распределение интенсивности отраженного пучка при z^h ***9mm*** (1), z^b = оо (2)

На рисунках 2 и 3 представлены результаты решения обратных задач по восстановлению комплексных постоянных распространения волноводных мод путем обработки зависимости ***S(y),*** представленной на рисунке 1, б) и аналогичных ей. Графики на рисунке 2 относятся к возбуждению моды структуры с гладкими границами раздела ($Ay^4(z) = Dy^3(z) = 0$). Рисунок 3 соответствует шероховатым границам раздела. Здесь расчет выполнен при $\max|Ay^4(z)| = \max|Ay^3(z)| = 0.0$ ***3jm*** и интервале корреляции функций $Ay^4(z)$ и $Ay^3(r)$, равеом ***3/мп.***



Ргсунок 2 Восстановление постоянной распространения основной ***TM*** моды в зависимости эт протяженности основания призмы: 1, 2 Re/г; 3, 4 Im/г; 1, 3 — стандартная теория [2] I ***m*** = 10^6); 2, 4 уточненный алгоритм (***m*** = 10'). Штриховые линии точное значение ***h,***

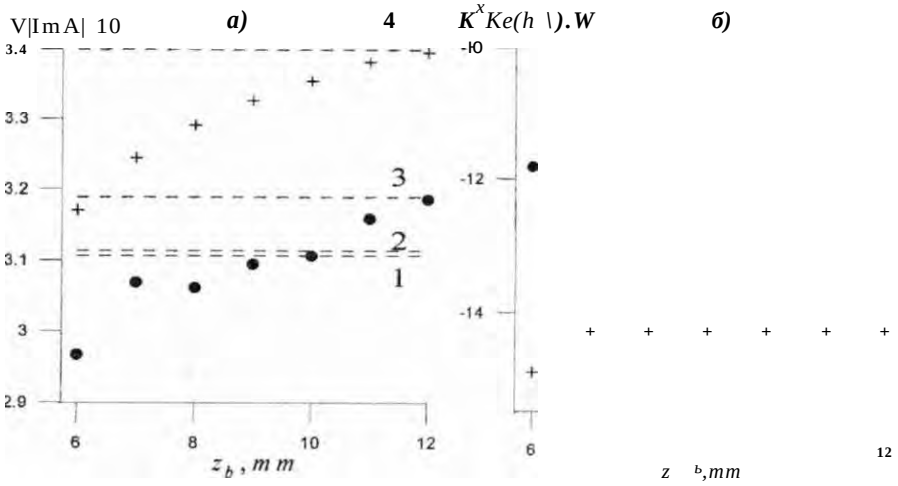


Рисунок 3 Восстановление постоянных распространения основной (точки ил:: 3) и первой (крестики и линии 2, 4) мод волновода с шероховатой поверхностью. Штрихсяи линии значения Im/z^0 для волновода с гладкой (1, 2) и шероховатой (3, 4) поверхностыс

Как следует из анализа данных, представленных на рисунке 2, решение обратно? дачи, учитывающее ограниченность призмы связи, обладает существенно более вы точностью, нежели его стандартный аналог [2]. В соответствии с рисунком 3, а), **ic** части постоянных распространения мод при достаточно больших z^b восстанавливают:* учетом дополнительного затухания, вызванного поверхностным рассеянием света. Кроме го, поверхностное рассеяние приводит к систематическому занижению восстанавлив вещественных частей постоянных распространения мод (рис. 3, б)).

Заключение

Таким образом, проведенное рассмотрение позволяет сделать вывод, что модиф" рованный алгоритм решения обратной задачи волноводной спектроскопии, учитываю ограниченность призмы связи, обеспечивает приемлемую точность восстановления как щественных, так и мнимых частей постоянных распространения мод планарных волноводе

Литература

1 Хомченко, А.В. Волноводная спектроскопия тонких пленок / А.В. Хомченко. Минск: БГУ. 2002. 232 с.

2 Сотский, А.Б. Анализ распределения интенсивности отраженного пучка в схем призменного возбуждения диэлектрических волноводов / А.Б. Сотский, А.А. Романенко, АВ Хомченко, И.У. Примак // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 26. С. 687 695.

3 Сотский, А.Б. Теория оптических волноводных элементов / А.Б. Сотский. МОГЕ лев: МГУ им. А.А. Кулешова. 2011. 456 с.

4 Сотский, А.Б. Обратная задача волноводной спектроскопии при ограниченно] призме связи / А.Б. Сотский, П.Я. Чудаковский, Е.В. Глазунов, И.У. Примак // Известия НАЬ Беларуси: сер. физ. мат. наук. 2010. № 3. С. 66 74.

^огилевский государственный университет им. А.А. Кулешова

[2]ГУВПО «Белорусско Российский

Поступило 08.11.