

С.О. Парашков, канд. ф.-м. наук, А.Б. Сотский*, д. ф.-м. наук, проф., Е.А. Чудаков*, асп.,
 С.А. Багуцкий, студ., Е.В. Ермакова, студ., А.В. Януков, студ.
 (МОУВО «Белорусско-Российский университет»,
 *УО «Могилёвский государственный университет имени А. А. Кулешова», Могилев, Бе-
 ларусь)

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОЧКИ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД В ПРИЗМЕННОМ УСТРОЙСТВЕ СВЯЗИ

Одним из наиболее эффективных методов оптического контроля параметров тонких пленок и слоистых сред является волноводная спектроскопия [1]. Наиболее распространен вариант этого метода, в котором осуществляется обработка угловой зависимости полной отражательной способности призмы связи (ПС) приведенной в контакт с исследуемым образцом [2]. Суть метода заключается в проникновении зондирующего оптического излучения в исследуемую структуру в виде волноводных мод, что обеспечивает взаимодействие излучения со структурой на наибольшем по сравнению с альтернативными измерительными схемами расстоянии. Однако метод волноводной спектроскопии является контактным, что вызывает ряд ограничений при его применении. В настоящем сообщении обсуждается возможность преодоления одного из таких ограничений, состоящего в размытости зондируемой области, вызванной перемещениями лазерного пучка по основанию ПС в ходе измерений [3]. Предложен и апробирован экспериментально критерий оптимального выбора положения оси вращения ПС, обеспечивающий минимальное смещение точки ввода излучения в исследуемую структуру.

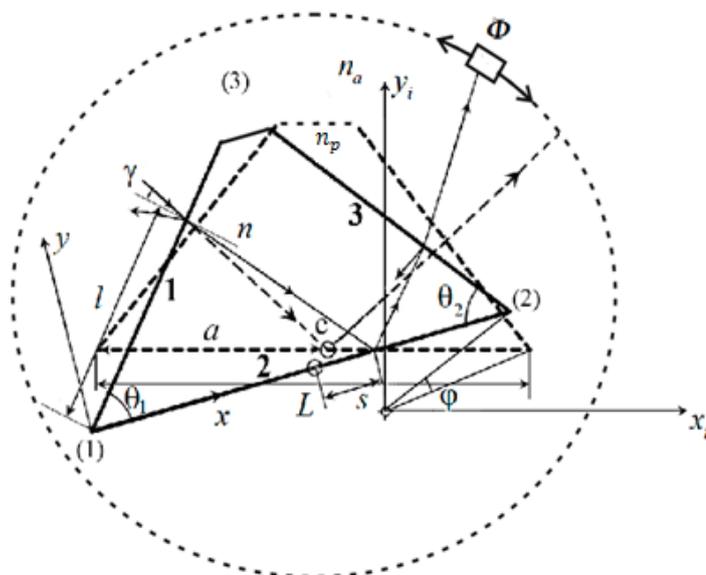


Рисунок 1 – Оптическая схема призмного устройства связи и сопутствующие системы координат

На рисунке 1 приведена оптическая схема призмного устройства связи. ПС с показателем преломления и поглощения n_p , k_p имеет грани 1, 2, 3. Грань 2

является основанием призмы, контактирующим с исследуемой слоистой структурой. Углы при основании равны θ_1 и θ_2 . Пучок света проходит сквозь грань 1, отражается от основания и сквозь грань 3 попадает на фотоприемник Φ . Штриховыми линиями изображены контур призмы и ось пучка при исходном положении измерительной установки. В этом положении ось пучка ортогональна входной грани призмы и пересекает основание призмы в точке c . Она находится на расстоянии a от ребра призмы (1). В дальнейшем точку пересечения оси пучка и основания призмы мы будем называть точкой ввода излучения в исследуемую структуру.

Вращение ПС вместе с прижатой к ее основанию исследуемой слоистой средой осуществляется вокруг оси Oz_i . В ходе этого вращения фиксированы ось пучка, падающего на входную грань ПС, и система координат $Ox_i y_i z_i$, в которой ось Ox_i параллельна основанию призмы в ее исходном положении, а ось вращения имеет координаты $x_i = 0, y_i = 0$. Подвижная система координат $Oxyz$, начало которой совпадает с ребром призмы (1) жестко связана с ПС. В данной системе ось вращения при исходном положении ПС имеет координаты $x_r = \Delta x, y_r = \Delta y$. Поворот ПС на угол φ , в соответствии с законом Снеллиуса, сопровождается изменением положения оси светового пучка в призме и на ее выходе. Ось пучка и грани ПС в ее повернутом на угол φ положении изображены на рисунке 1 сплошными линиями. При повороте происходит смещение пятна оптического контакта по основанию призмы связи на расстояние S , длина оптического пути луча в призме при этом изменяется.

Сдвиг точки ввода при вращении ПС $s(\varphi)$ (рисунок 1) может быть рассчитан по формуле

$$s(\varphi) = \frac{l(\varphi) \sqrt{n_p^2 n_a^{-2} - \sin^2 \varphi}}{\sin \theta_1 \sin \varphi + \cos \theta_1 \sqrt{n_p^2 n_a^{-2} - \sin^2 \varphi}} - a, \quad (1)$$

где

$$l(\varphi) = \left\{ a \cos \theta_1 - 2 \sin 0,5\varphi \left[\Delta y \cos(0,5\varphi - \theta_1) + \Delta x \sin(0,5\varphi - \theta_1) \right] \right\} (\cos \varphi)^{-1} \quad (2)$$

- расстояние от ребра (1) ПС до точки пересечения падающего на ПС луча с ее входной гранью (рисунок 1). Оптимальные значения $\Delta x, \Delta y$, стабилизирующие точку ввода, находятся в результате минимизации зависимости $s^2(\varphi)$ методом наименьших квадратов и допускают аналитический расчет.

Для экспериментальной проверки теоретических результатов создана установка волноводной спектроскопии, позволяющая контролируемым образом изменять координаты оси вращения ПС. Ее схема приведена на рисунке 2. Установка представляет собой пространственную раму из алюминиевого профиля, на которую сверху и снизу (3) установлены поворотные платформы вращающие фотоприемник (8) и ПС (5) соответственно. Нижняя поворотная платформа снабжена двухкоординатным устройством линейной трансляции (4),

позволяющим при помощи шаговых двигателей перемещать размещенную на ней ПС относительно оси вращения нижней поворотной платформы. Контроль положения оси вращения осуществляется при помощи цифровой камеры размещенной над ПС. Шаговые двигатели (6-7), вращающие платформы с фотоприемником и ПС, а так же шаговые двигатели линейной трансляции ПС, управляются с помощью драйверов соединенных с контроллером Arduino Mega 2560 (9). В качестве источника излучения использован полупроводниковый лазер (1) с длиной волны $\lambda = 650$ нм. При создании установки применялась технология 3D-печати [5].

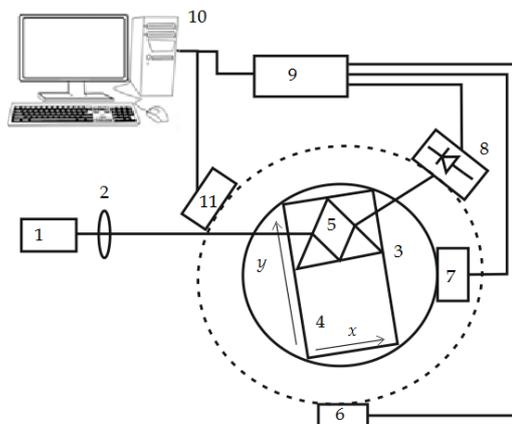


Рисунок 2 – Схема установки

Алгоритм стабилизации точки ввода реализован для призмы из стекла СТФ-2 с показателем преломления $n = 1,94$, углами при основании $\theta_1 = 59,56^\circ$, $\theta_2 = 59,89^\circ$ и длиной основания $L = 13,8$ мм. Положение пятна оптического контакта на основании ПС фиксировалось при помощи цифровой камеры ((11) рисунок 2).

Эффективность алгоритма иллюстрирует рисунок 3а), на котором сопоставлены угловые зависимости смещения пятна оптического контакта $s(\varphi)$, рассчитанные при трех различных положениях оси вращения ПС. Кривая 0 соответствует часто используемой в экспериментах конфигурации, в которой ось вращения ПС совмещена с точкой ввода излучения в исследуемую структуру при нормальном падении света на входную грань ПС. Согласно рисунку 3а), такая конфигурация с позиций стабилизации точки ввода далеко не оптимальна. При использовании оптимизационного решения из широко цитируемой работы [4]

$$\Delta y = \operatorname{tg} \theta_1 (\Delta x - a n_p^{-1}), \quad \Delta x = a [\sin^2 \theta_1 + \cos \theta_1 (n_p \cos \theta_1 + \sin(\varphi) \sin \theta_1)] n_p^{-1}$$

(кривая 1) ситуация улучшается, однако на краях диапазона изменения φ $|s(\varphi)|$ достигает заметных значений. В частности, $s(\varphi_{\min}) = 86,7$ мкм. Наиболее стабильна точка ввода при предлагаемом решении оптимизационной задачи (кривая 2). В данном случае $|s(\varphi)| \leq |s(\varphi_{\min})| = 15,8$ мкм.

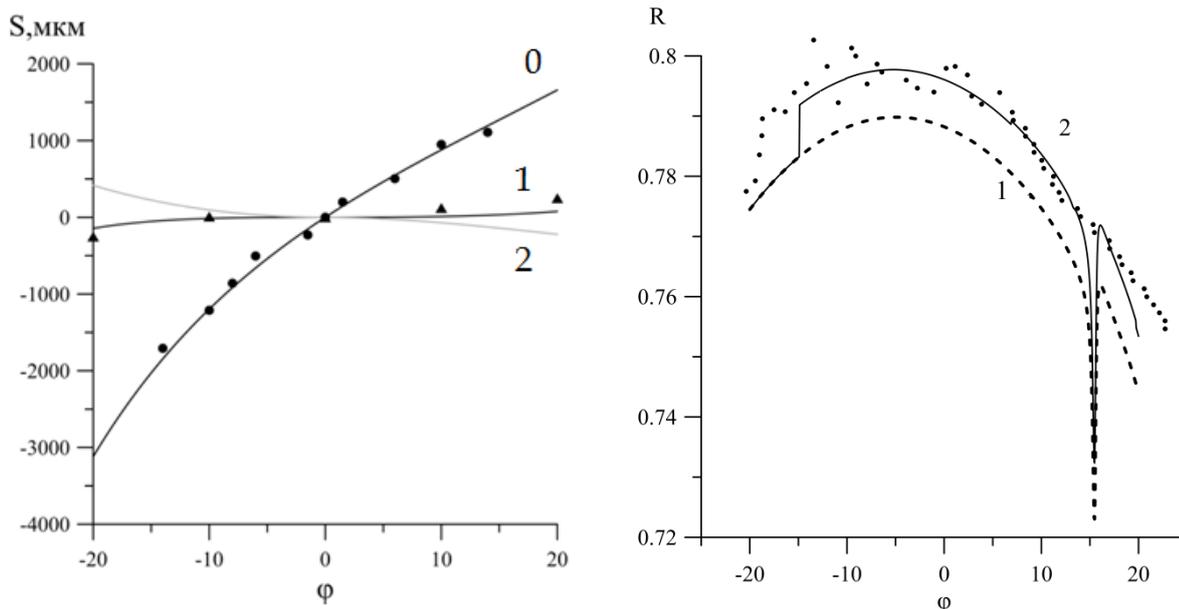


Рисунок 3 –а) Смещение пятна оптического контакта в зависимости от угла поворота ПС, б) отражательная способность ПС при стандартном (1) и оптимальном (2) выборе координат оси ее вращения. Кривые – теория, дискретные точки – эксперимент

На рисунке 3б) сопоставлены экспериментальный и теоретический спектры отражательной способности ПС контактирующей с воздухом при однократном прохождении света через ПС (кривая 1) и с учетом многократных отражений лазерного пучка от боковых граней и основания ПС (кривая 2), точки - эксперимент. Как видно из рисунка 3б), разработанная теоретическая схема хорошо согласуется с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.3.03».

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко А.В., Сотский А.Б., Романенко А.А., Глазунов Е.В., Шульга А.В. Волноводный метод измерения параметров тонких пленок // ЖТФ. – 2005. Т.75, №6, С. 98–106.
2. Сотский А.Б., Штейнгарт Л. М., Парашков С. О., Сотская Л. И. О выборе диапазонов измерения отражательной способности призмы связи при волноводной спектроскопии тонких пленок // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 4. – С. 465–469.
3. Сотский А.Б., Парашков С.О. Многократные отражения света в призме связи // ПФМТ. 2015. № 2 (23) С. 18 - 28.
4. Ulrich R., Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler // Appl. Opt. – 1973. Vol. 12, N. 12.P. 2901–2908.
5. Salazar-Serrano L. J., Torres J. P., Valencia A. A 3D printed toolbox for opto-mechanical components // PloS one. – 2017. – Т. 12. – №. 1. – С. e0169832.