

УДК 535.34; 621.372

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

*А. В. ШУЛЬГА, И. В. ШИЛОВА, А. В. ХОМЧЕНКО, *А. В. ТОМОВ*

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

*УО «Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова»
Могилев, Беларусь

UDC 535.34; 621.372

INTRACAVITY LASER SPECTROSCOPY OF GUIDED STRUCTURES

A. V. SHULGA, I. V. SHILOVA, A. V. KHOMCHENKO, A. V. TOMOV

Аннотация

Предложен метод внутрирезонаторной волноводной спектроскопии тонкоплёночных структур, основанный на регистрации и обработке углового спектра светового пучка, отражённого от призмённого устройства связи в случае возбуждения волноводных мод в тонкоплёночной структуре внутрирезонаторным излучением лазера с низким коэффициентом усиления посредством призмы связи в форме параллелепипеда, в которой внутрирезонаторное излучение падает на входную (выходную) грань призмы под углом Брюстера и претерпевает двукратное внутреннее отражение в призме. Продемонстрировано, что возбуждение волноводных мод может осуществляться при слабой связи и высоком контрасте, что позволяет использовать предложенный метод для измерения оптических параметров планарных волноводов с низкими потерями.

Ключевые слова:

внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, волноводная спектроскопия, устройство связи с брюстеровской призмой, тонкие плёнки, планарный волновод.

Abstract

A new technique of intracavity waveguide spectroscopy for investigating planar waveguide was proposed. It's based on recording and processing angular spectrum of a light beam reflected from a prism coupler in the case of exciting a guided mode in thin-film structure by the intracavity radiation of low-gain laser using a parallelepiped coupling prism in which the intracavity radiation enters the input faces of the prism at the Brewster angles and undergoes double internal reflection in the prism. It was demonstrated that the excitation of guided modes can be performed at the weak coupling. It was shown that the proposed technique can be used for measuring the optical parameters of low-loss planar waveguides.

Key words:

Intracavity laser spectroscopy, waveguide spectroscopy, Brewster prism coupler, thin films, m-line, weak coupling, planar waveguide.

Измерение малых потерь в тонких плёнках

Разработка прецизионных методов измерения оптических параметров является одной из задач волноводной спектроскопии тонких плёнок [1]. Одним из параметров, представляющих интерес для исследователя, являются действительная и мнимая части постоянной распространения волноводной моды h [2]. Среди волноводных методов исследования тонких плёнок в настоящее время наиболее востребованными являются методы с применением призмных устройств связи [3], в которых исследуется интенсивность световых пучков, отражённых от призмных устройств связи при возбуждении волноводной моды в тонкоплёночной структуре, прижатой через буферный слой (воздушный зазор) к основанию призмы.

Следует отметить, что возбуждение волноводных мод может происходить только при следующих условиях: во-первых, показатель преломления материала призмы должен быть больше волноводного показателя преломления моды; во-вторых, фазовая скорость волны в поверхностном слое должна быть равна скорости распространения волноводной моды в исследуемой структуре; в-третьих, ширина буферного слоя должна быть достаточно малой для эффективного туннелирования световой энергии в волновод. При выполнении указанных условий в отражённом свете будут наблюдаться, так называемые, черные m -линии, угловое положение которых соответствует углу возбуждения волноводной моды. Измерение углового положения m -линии позволяет рассчитать эффективный волноводный показатель преломления волноводной моды соответствующего порядка. При этом угловое распределение интенсивности отражённого света, в случае возбуждения волноводной моды определяется оптическими свойствами волновода, в частности, мнимой частью постоянной распространения волноводной моды $\text{Im}(h/k_0)$ (где k_0 – волновое число). Точность определения $\text{Im}(h/k_0)$ существенно зависит от толщины буферного слоя, что затрудняет исследование волноводов с малыми потерями, для которых $\text{Im}(h/k_0) < 10^{-5}$. Для уменьшения влияния призмы связи зазор между призмой и волноводом должен быть достаточно большим, что в свою очередь уменьшает возможность регистрации отражённого от призмы связи излучения с необходимым контрастом. Для решения данной проблемы был предложен метод внутрирезонаторного возбуждения волноводных мод [4].

Интенсивность излучения лазеров с низким коэффициентом усиления очень чувствительна к внутрирезонаторным потерям. Если коэффициент усиления резонатора не превышает потери, то в этом случае генерации излучения не будет вообще [5]. Небольшие изменения коэффициентов поглощения внутрирезонаторных элементов приводят к значительным изменениям мощности выходного лазерного излучения. По этой причине внутрирезонаторная лазерная спектроскопия может применяться в качестве высокочувствительного метода для измерения сверхмалых оптических потерь. Прямое помещение призмы связи в резонатор без срыва генерации лазера невозможно по двум основным причинам: во-первых, вращение

призмы связи вызовет разъюстировку резонатора; во-вторых, френелевские потери на гранях призмы могут превышать коэффициент усиления лазера, что также исключает возможность генерации излучения. В нашем случае, для решения данных проблем призма связи была сделана в форме параллелепипеда с параллельными противоположными гранями. При помещении призмы в резонатор гелий-неонового лазера внутрирезонаторное излучение претерпевало двукратное полное внутреннее отражение, сохраняя при этом углы падения и пропускания неизменными. Для уменьшения френелевских потерь призма связи была сделана таким образом, чтобы свет после отражения от основания призмы попадал на выходную грань призмы под углом близким к углу Брюстера. Таким образом, данная конструкция обеспечивала возможность регистрации спектров отражения в большом угловом диапазоне без срыва генерации излучения.

Внутрирезонаторная волноводная спектроскопия

Для регистрации спектров отражения внутрирезонаторного излучения в зависимости от угла падения на грань призмы связи была собрана установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1.

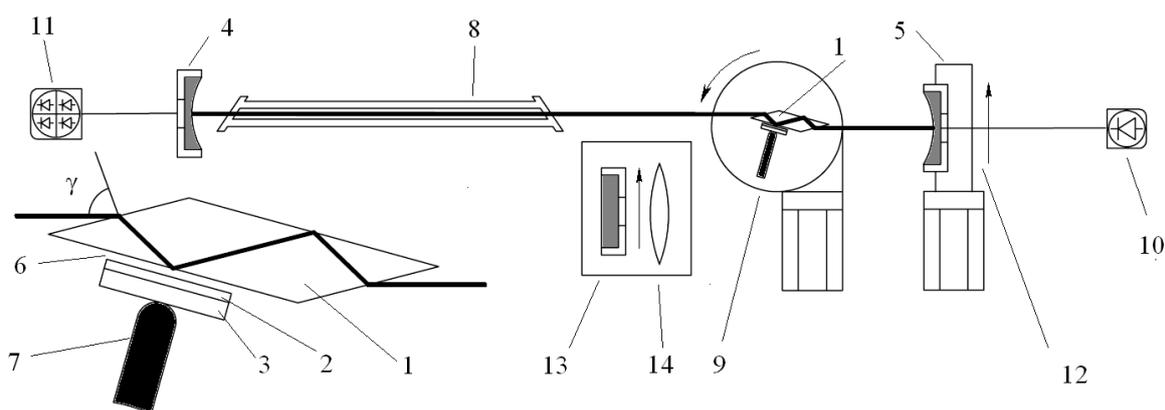


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

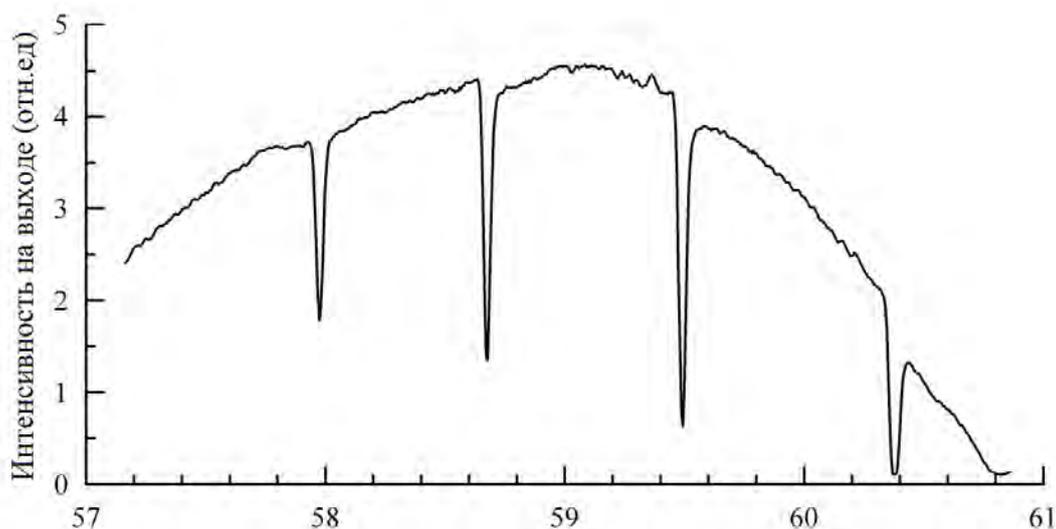
Брюстеровская призма связи 1 ($n = 1,65708$) со слабопоглощающим волноводом 2 на стеклянной подложке 3 помещалась в резонатор лазера, состоящего из двух сферических зеркал: «квазиглухого» 4 и выходного 5. Толщина воздушного зазора 6 контролировалась прижимным винтом 7. Брюстеровская призма связи устанавливалась между выходным зеркалом и газоразрядной трубкой 8 гелий-неонового лазера. Угловое положение призмы с заданной точностью изменялось поворотной платформой 9, приводимой в движение шаговым двигателем. Интенсивность выходного излучения лазера регистрировалась фотодиодом 10. Излучение, выходящее из «квазиглухого» зеркала регистрировалось координатным (сегментным) фотодиодом 11. Установка была настроена на максимум выходного излучения. Неподвижная установка зеркал резонатора приводит к угловому сдвигу лазерного луча и разъюстировке системы при изменении углового положения призмы связи. Поэтому для обеспечения неизменности углово-



го положения лазерного луча держатель выходного зеркала помещался на платформе продольного перемещения 11. Система была автоматизирована следующим образом. Перед процессом измерения координатный фотодиод устанавливается таким образом, чтобы излучение лазера попадало в его центр. Поворот призмы связи приводит к угловому сдвигу лазерного луча, что регистрируется координатным фотодиодом в виде разности интенсивности сигналов от правых и левых его сегментов. Платформа продольного перемещения двигала выходное зеркало в направлении, перпендикулярном оптической оси лазера, до восстановления первоначальной интенсивности сигналов, что свидетельствовало об установке первоначального углового направления распространения внутрирезонаторного излучения. Только после этого производилась регистрация выходного излучения лазера фотодетектором 10. В установке шаг углового перемещения платформы составлял $\Delta\gamma = 1,1 \cdot 10^{-4}$ градуса. Угол отражения внутрирезонаторного излучения от «входной-выходной» грани призмы измерялся гониометром с погрешностью измерения угла равной 3".

Для обеспечения возможности сравнения экспериментальных данных, полученных внутрирезонаторным методом, с данными, полученными «вне резонаторным» методом, в экспериментальной установке было предусмотрено дополнительное плоское выходное зеркало 13 с фокусирующей линзой 14, которые могли помещаться между газоразрядной трубкой гелий-неонового лазера и призмой связи.

В качестве тестового образца использовался пятимодовый ионнообменный волновод с низкими потерями [6]. Призма связи была сделана таким образом, чтобы угол при её основании позволял лазерному лучу, с одной стороны, отражаться под углом Брюстера и, с другой стороны, падать на основание призмы связи под углами возбуждения волноводных мод. Оптические параметры данного волновода были измерены независимым методом [7] и для мод, зарегистрированных внутрирезонаторным методом, мнимая часть постоянной распространения $\text{Im}(h/k_0) \sim 10^{-5}$ (табл. 1). Зазор между волноводом и призмой связи регулировался прижимным винтом для обеспечения наибольшего контраста интенсивности. Зарегистрированные спектры внутрирезонаторного отражения представлены на рис. 2.



Угол падения излучения на «входную-выходную» грань призмы, град

Рис. 2. Зависимость интенсивности на выходе внутрирезонаторного излучения в зависимости от углового положения призмы связи

Табл. 1. Оптические параметры тестового волновода

Порядок волноводной моды	$Re(h/k_0)$	$Im(h/k_0) \times 10^{-5}$
1	1,53359	3,7
2	1,52863	3,1
3	1,52384	1,5
4	1,51928	2,6

Полученные данные показывают, что предложенный метод позволяет регистрировать спектры отражения в случае слабой связи. Следует отметить, что спектры «внерезонаторного» отражения не имели резонансных провалов для слабой связи и наблюдались только при сильном прижатии тестового волновода к призме связи. Данный факт подтверждает преимущество внутрирезонаторного метода при регистрации волноводов с низкими потерями при слабой связи. Несмотря на трудности реализации данного подхода, это позволило авторам улучшить метод волноводной спектроскопии.

Заключение

Анализ зарегистрированных угловых зависимостей интенсивности света, отражённого вблизи углов возбуждения волноводных мод, показывает, что метод внутрирезонаторной спектроскопии обеспечивает намного больший контраст регистрации интенсивности излучения в сравнении с обычными волноводными методами. Высокая чувствительность предложенного метода позволяет измерять малые оптические потери в случае слабой связи призмы и волновода и минимизировать влияние материала призмы связи на данные измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tien, P. K.** Light waves in thin films and integrated optics, *Applied Optics*, 10 (1971), P. 2395-2413.
2. **Khomchenko, A. V.** Waveguide spectroscopy of thin films, Volume 33, (2005).
3. **Ulrich, R.** Measurement of thin film parameters with a prism coupler / R. Ulrich, R. Torge // 12 (1973), *Applied Optics*, P. 1325–1337.
4. **Baev, V. M.,** T. Latz, P. E. Toschek, Laser intracavity absorption spectroscopy, *Applied Physics B*, 69 (1999), P. 171-202.
5. **Csele, M. S.** Laser modeling. A numerical Approach with Algebra and Calculus, (2014).
6. Mode interference pattern in ion-exchanged channel waveguides / I. G. Voitenko [et. al.] // *Guided Wave Optics. SPIE Vol. 1932* (1993). – P. 2-13.
7. **Khomchenko, A. V.** Spatial Fourier spectroscopy of guided modes in low dimensional structures / A. V. Khomchenko // *Applied Optics* 41 (2002), P. 4548-4551.

E-mail: ashulga@tut.by