

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР

Введение

Разработка эффективных и прецизионных методов измерения оптических параметров тонкоплёночных структур является одной из приоритетных задач волноводной спектроскопии [1]. Информативными параметрами о физических и технических свойствах планарного волновода, являются действительная h' и мнимая части h'' комплексной постоянной распространения соответствующей волноводной моды $h = h' + ih''$. Определить h с удовлетворительной точностью можно регистрируя спектр интенсивности светового пучка волноводным методом [2, 3], в основе которого лежит возбуждение волноводных мод лазерным излучением при помощи призмного устройства связи. В таком подходе к основанию равнобедренной призмы, изготовленной из оптического стекла с высоким показателем преломления, прижимается планарный волновод таким образом, чтобы между ними был зазор (фотонный барьер) [4] толщиной меньше длины волны лазерного излучения. Показатель преломления среды в зазоре должен быть меньше показателей преломления призмы связи и волновода. Лазерное излучение при падении на входную грань призмы, преломляется на ней, испытывает полное внутренне отражение от основания призмы связи и в случае, когда угол падения светового пучка соответствует углу возбуждения волноводной моды, часть световой энергии туннелирует в волновод (явление нарушенного полного внутреннего отражения), распространяется в нём и может туннелировать обратно в призму связи. Энергия излучения, распространяющегося в волноводе, будет частично поглощаться, что проявляется в появлении в отражённом свете так называемых тёмных m -линий. При этом угловое положение наблюдаемой m -линии и её угловой профиль определяются комплексной постоянной распространения h'' соответствующей волноводной моды. Несмотря на наличие ряда неоспоримых достоинств, волноводный метод не лишён недостатков, один из которых является следствием влияния

близости призмы связи к исследуемому волноводу. Значительное уменьшение толщины зазора изменяет угловое распределение профиля m -линии, что снижает точность метода, а удаление волновода от призмы связи ухудшает контраст измеряемого распределения, что в свою очередь усложняет процедуру регистрации. Таким образом, возникает необходимость компромисса при регулировании толщины зазора. Задача усложняется при необходимости регистрации малого поглощения в тонкопленочных структурах. В этом случае либо сверхмалая угловая ширина наблюдаемой m -линии, либо отсутствие достаточной длины основания призмы связи для формирования отражённого излучения, делают задачу измерения практически невыполнимой, что приводит к необходимости поиска новых методов измерения сверхмалых потерь в тонких пленках. Для решения данной проблемы нами предложена идея применения зарекомендовавших себя методов внутрирезонаторной лазерной спектроскопии [5, 6] для измерения малого поглощения в планарных оптических волноводах.

1. Устройство связи для внутрирезонаторного возбуждения волноводных мод и методика эксперимента

В отличие от традиционных методов исследования, где волновод возбуждается излучением, выходящим из резонатора лазера, внутрирезонаторный метод предполагает возбуждение волновода излучением внутри резонатора. Применение обычной равнобедренной призмы связи не даёт возможности менять угол падения без срыва генерации излучения, так в это случае будет меняться угол отражения излучения от призмы связи. Для того чтобы направление излучения оставалось постоянным, возбуждение волновода осуществлялось ромбической призмой связи (рисунок 1), в которой излучение претерпевает двукратное полное внутреннее отражение, и таким образом сохраняет прежнее направление излучения.

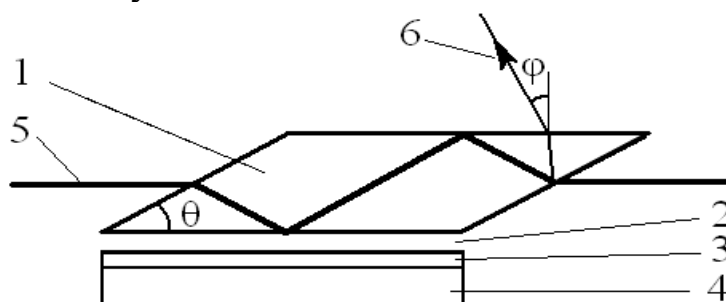


Рисунок 1 – Ромбическое призменное устройство возбуждения планарных оптических волноводов

Призменное устройство связи в этом случае представляет собой ромбиче-

скую призму 1 с углом при основании θ , к основанию которой через воздушный зазор 2 прижат планарный оптический волновод 3, нанесенный на подложку 4. Угол при основании призмы выбирался таким образом, чтобы внутрирезонаторное излучение 5, имеющее ТМ-поляризацию, проходило через грани входа-выхода излучения под углом, близким к углу Брюстера для минимизации потерь на отражениях. При углах, отличных от брюстеровских, часть излучения будет отражаться на гранях входа-выхода и выходить из призмы под углом φ . Измерив угол φ , при котором наблюдается возбуждение волновода, а также зная показатель преломления n призмы связи и угла θ при основании призмы, можно найти волноводный показатель преломления волновода для соответствующей волноводной моды по формуле

$$\frac{\text{Re}(h)}{k} = n \sin\left(2\theta - \arcsin\frac{\sin\varphi}{n}\right)$$

Следует отметить, что данная конструкция предназначена для возбуждения волновода ТМ-поляризованным излучением. Высокий коэффициент отражения ТЕ-поляризованного излучения делает невозможным применение вышеописанной конструкции во внутрирезонаторных методах в системах с низким коэффициентом усиления активной среды.

2. Внутрирезонаторное возбуждение волноводных мод тонкопленочной структуры

Для исследования зависимости интенсивности излучения, выходящего из лазерного резонатора, вблизи углов возбуждения мод тонкопленочной структуры, была собрана следующая автоматизированная экспериментальная установка на базе гелий-неонового лазера, схема которой показана на рисунке 2.

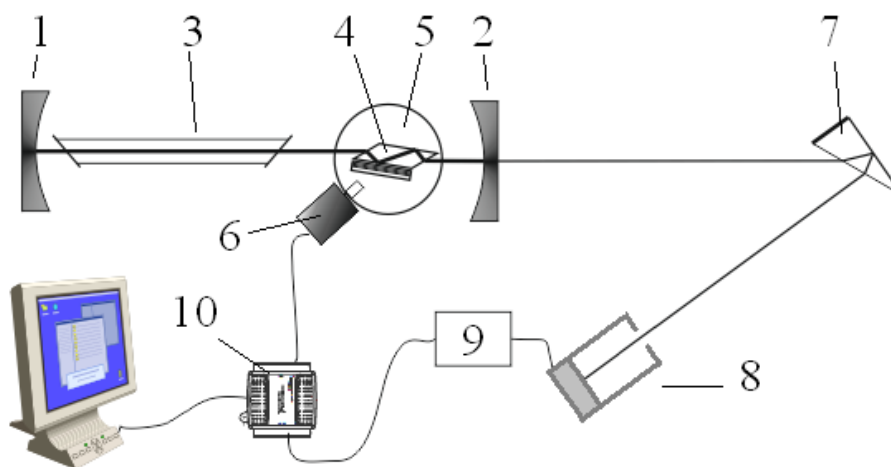


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Оптический резонатор лазера был сформирован двумя сферическими диэлектрическими зеркалами 1 и 2, между которыми находилась активная среда 3 и ромбическое призмное устройство связи 4, зафиксированное на поворотном столике гониометра 5. Установка устройства связи на гониометре обеспечивало возможность менять угол между падающим излучением и устройством связи, а также контролировать угол φ выхода излучения из призмы связи. С помощью шагового двигателя 6 изменялся угол поворота столика гониометра, дискретность углового поворота призмы связи составляла 7 угловых секунд. Излучение из зеркала 2 лазера, которое для отсечки излучения других длин волн отражалось от призмы Литтрова 7, попадало на кремниевый фотоприёмник 8. Сигнал от фотоприёмника поступал на усилитель 9 и далее регистрировался устройством 10 сбора данных DAQ NI USB-6009, которое через цифровые выходы подавало логическое напряжение на драйвер шагового двигателя. Для управления шаговым двигателем, регистрации интенсивности и обработки данных во время регистрации использовалась среда разработки и выполнения программ LabVIEW.

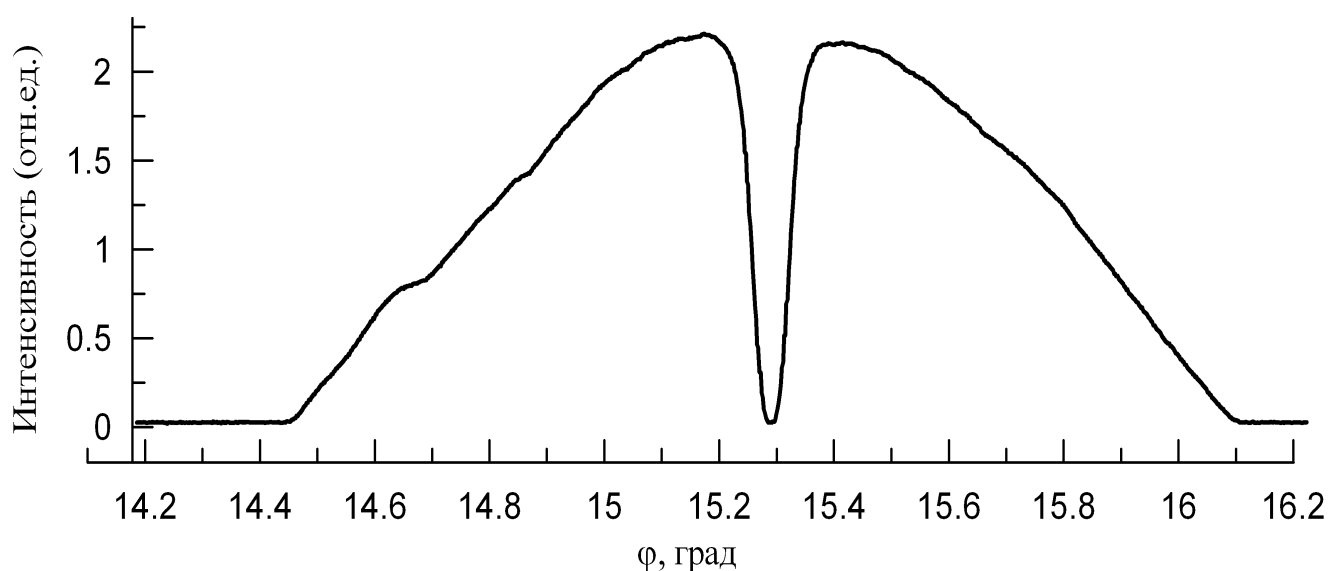


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности выходного излучения резонатора от углового положения призмы связи

Измерения проводились вблизи угла возбуждения волноводной моды. Результаты измерения представлены на рисунке 3. Как следует из анализа данных зависимостей, вблизи резонансного угла интенсивность излучения может падать до нулевого уровня, т.е. оптические потери волновода влияют на усиление излучения внутри резонатора. Для сравнения, при возбуждении волновода традиционным призмным способом при неизменной оптической связи наблюдалась лишь незначительное падение интенсивности вблизи резонансного угла (не более 10% максимальной интенсивности). Данные измерения про-

водились при разной степени прижима волновода к призме. При уменьшении толщины зазора наблюдался полный срыв генерации излучения в угловом диапазоне, ширина которого возрастала с увеличением силы прижима волновода к призме связи.

Заключение

Результаты анализа зарегистрированных зависимостей интенсивности излучения отраженного светового пучка вблизи угла возбуждения волноводных мод показывают, что метод внутрирезонаторной волноводной спектроскопии обеспечивает высокий контраст регистрации интенсивности излучения по сравнению с традиционными волноводными методами. Высокая чувствительность предлагаемого метода позволяет регистрировать сверхмалые оптические потери в случае обеспечения слабой связи волновода и призмы и минимизировать влияние материала призмы связи на результаты измерений. Учитывая, что основным недостатком предлагаемого подхода является тот факт, что призма связи с заданным углом при ее основании обеспечивает возбуждение волноводов только в сравнительно узком угловом интервале, требует дальнейших исследований вопросы разработки и оценки и конструктивных особенностей устройств для внутрирезонаторной волноводной спектроскопии тонкопленочных структур с различными параметрами.

Литература

1. Хомченко, А.В. Волноводная спектроскопия тонких плёнок / А.В. Хомченко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2002. – 223 с.
2. Kirsch, S.T. Determining the refractive index and thickness of thin films from prism coupler measurements / S.T. Kirsch // Applied Optics. – 1981. – Vol. 20. – № 12. – P. 2085–2089.
3. Измерение спектра интенсивности светового пучка волноводным методом / А.Б. Сотский [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – № 8. – С. 88–94.
4. Шварцбург, А.Б. Туннелирование электромагнитных волн – парадоксы и перспективы / А.Б. Шварцбург // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 1. – С. 43–58.
5. Войцеховская, О.К. Лазеры и спектроскопия: учебное пособие / О.К. Войцеховская. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2010. – 288 с.
6. Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки / Ю.А. Ананьев. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 264 с.