

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Судаса Дмитрия Петровича

«Нелинейно-оптические свойства теллурида висмута на поверхности кварцевого волоконного световода», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

### **Общая характеристика диссертационной работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объём исследования составляет 110 страниц, и содержит 41 рисунок, 2 таблицы. Список литературы содержит 140 наименований.

Первая глава представляет из себя обзор литературы по современному состоянию дел в физике конденсированного состояния по задачам, рассматриваемым в диссертационной работе. В обзоре рассматриваются низкоразмерные наноматериалы. Среди всех описанных классов выделены материалы, обладающие феноменом насыщения поглощения. Описан класс материалов с проводящей поверхностью и изолирующим объёмом, к которому принадлежит теллурид висмута, а именно – топологические изоляторы. Рассмотрены методы оценки величины нелинейности материалов насыщающихся поглотителей.

Вторая глава содержит информацию о способе формирования цилиндрических травлёных участков оптических волокон методом безопасного химического травления. Упомянуты существующие методы утонения секций оптических волокон. Создана методика формирования сегментов утонённых оптических волокон. Разработанная методика обладает очевидной простотой реализации, по сравнению с аналогами и низкой токсичностью применяемых реагентов. Показано рефлектометрическое исследование потерь, возникающих при травлении в зависимости от диаметра утонённой секции в реальном времени. На рефлектометре определено пространственное положение источников потерь в спектральном диапазоне 1530-1570 нм.

Третья глава описывает синтез тонкоплёночных покрытий на боковой поверхности кварцевого оптического волокна. Описана технология парофазного химического осаждения из металлоорганических соединений. Показан разработанный метод модернизации системы для работы с кварцевыми волокнами с контролем параметров осаждения в реальном времени. Объяснена специфика ростовых процессов на кварцевой поверхности оптических волокон. Для увеличения склонности теллурида висмута расти вдоль поверхности автор использовал подслой теллурида цинка. Продемонстрирована экспериментальная схема кольцевого волоконного лазера. Также экспериментально определен максимальный диаметр для тейпера на волокне, при котором, в разработанной схеме волоконного лазера наблюдается режим генерации с модуляцией добротности.

В четвёртой главе автором демонстрируется эффект резонанса затухающей моды при синтезе покрытий теллурида цинка. Подслой теллурида цинка перед процессом осаждения теллурида висмута создаёт в спектре пропускания провал положение которого зависит от параметров окружающей среды в том числе температуры. На основе плёнок ZnTe изготовлены полностью волоконные рефрактометры, работа которых основана на феномене резонанса затухающей моды. Исследовано влияние условий осаждения, таких как: температура, скорость потока несущих газов, в зоне реакции, на форму резонанса.

В пятой главе проектируются и исследуются пассивные модуляторы добротности для волоконных лазеров. Показано, что показатель преломления окружающей среды, в частности показатель преломления защитного полимерного покрытия, нанесенного на пленку, имеет большое значение при работе этих модуляторов. Обнаружено, что даже небольшие изменения температуры окружающей среды или мощности лазерного излучения, распространяющегося в сердцевине волокна, существенно влияют на потери в резонаторе лазера. Исследованы выходные импульсы кольцевого

волоконного лазера, при различных температурах утонённого волокна, покрытого насыщающимся поглотителем в качестве модулятора добротности. Обнаружено, что снижение температуры насыщаемых поглотителей в виде нанопорошково-полимерной композиции  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и в виде покрытой полимером тонкой пленки  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  позволяет увеличить частоту следования импульсов на 20% – 40% при той же мощности накачки. Показано, что в процессе охлаждения пиковая длина волны лазерных колебаний изменяется от 1560 до 1530 нм. Пониженная температура пассивного модулятора добротности в виде нанопорошка  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в полимере приводит к тому, что импульсы в начале лазерных колебаний короче, а частота повторения выше, чем при комнатной температуре.

В заключении автор приводит и формулирует полученные в рамках диссертации результаты.

#### **Актуальность:**

Целью диссертации Судаса Д.П. является оценка и использование нелинейно оптических свойств тонкоплёночного теллурида висмута для его применения в полностью волоконных системах, которая является несомненно актуальной в связи с необходимостью создания новых простых методов оценки нелинейно-оптических свойств двумерных материалов.

Теллурид висмута показал себя эффективным насыщающимся поглотителем для изготовления пассивных модуляторов добротности для волоконных лазеров. Этот материал относится к классу топологических изоляторов, имеющих поверхностные состояния, устойчивые к условиям окружающей среды, особенно к температуре. Теллурид висмута демонстрирует нелинейно-оптические свойства от видимого до терагерцового спектральных диапазонов, при этом он обладает низким порогом насыщения и ультракоротким временем релаксации носителей заряда. Такой материал является перспективным для использования во множестве волоконных лазерных систем, при создании антенн для

терагерцового спектрального диапазона и многих других применений, поэтому его исследование несомненно является актуальным.

### **Новизна и достоверность:**

В данной работе присутствует ряд принципиально новых результатов. Показан механизм возникновения и локализация серых потерь при изотропном химическом травлении. Впервые обнаружен эффект резонанса затухающей моды, реализованный на покрытии теллурида цинка. Обнаружено, что изменение температуры покрывающего полимера позволяет управлять внутрирезонаторными потерями за счёт изменения уровня ненасыщаемого поглощения. Более того, понижение температуры приводит к перестроению длины волны лазерной генерации и уменьшению величины глубины модуляции насыщаемого поглотителя. Адаптированная в ходе выполнения работы технология парофазного осаждения позволяет синтезировать широчайший спектр материалов на поверхности кварцевого волокна, что также имеет большой задел для применения и производства конечных устройств таких как рефрактометры, фильтры и поглотители. Методика охлаждения модуляторов добротности показала, что изменение свойств осаждённой структуры приводит к возможности как оценки величины нелинейности использованных материалов, так и для создания перестраиваемых лазеров. Кроме того, управляя через температуру величиной выхода исчезающего поля моды получилось существенно уменьшить количество модуляторов добротности, характеристики которых не позволяют достигнуть импульсного режима генерации лазерной схемы.

Решение поставленных в диссертационном исследовании Судаса Д.П. задач по расчёту модового взаимодействия в связанных волноводах и анализ оптических параметров лазерного резонатора с модулятором добротности выполнено на современном математическом уровне. Основные положения и выводы диссертации не противоречат современным теоретическим

представлениям, достоверность полученных результатов подтверждается их сопоставимостью с результатами других авторов, а также высоким уровнем соответствия между экспериментальными данными и расчётными.

### **Научная и практическая значимость:**

Полученные результаты существенно уточняют и углубляют знания о свойствах тонкоплёночных покрытий теллурида висмута. Особый интерес вызывает методика изучения тонкоплёночных материалов при помощи излучения, выводимого из боковой поверхности волоконного световода. Более того, продемонстрированный в работе метод измерений позволяет оценивать нелинейно-оптические свойства материалов, имеющих насыщаемое поглощение в режиме реального времени в процессе осаждения. Полученные в ходе диссертационной работы данные о характеристиках покрытий теллуридов висмута и цинка позволят в будущем создавать полностью волоконные лазерные системы, способные работать в импульсном режиме с перестраиваемой длиной волны генерации. Продemonстрированный метод изменения параметров лазерной генерации при помощи температурного влияния на насыщающийся поглотитель открывает новые возможности для создания лазерных систем для научных применений.

Разработанные методы утонения волоконных кварцевых световодов в дополнение к впервые продемонстрированной методике нанесения нанопокровов на цилиндрическую поверхность сверхмалого диаметра позволяют создавать компактные сенсоры показателя преломления способные работать даже в кислотах и растворителях.

### **Замечания:**

1. В работе подробно описан режим пассивной модуляции добротности резонатора полностью волоконного лазера для исследования свойств насыщающегося поглотителя  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Почему не используются другие режимы импульсной генерации, например, пассивной синхронизации мод? Каким образом подобраны параметры лазерной схемы чтобы не

возникало переходного режима между модуляцией добротности и синхронизацией мод?

2. В разделе 3.3 упоминаются оптические и геометрические характеристики покрытия теллурида цинка используемые для расчетов, причём дан показатель преломления, при котором наблюдалось расхождение между теоретической оценкой толщины и полученной на практике. Затем указано, что показатель был изменён, но не приводится его значение, для сравнения с литературой.

3. Недостаточно подробно описаны некоторые параметры математической модели, использованной в работе, которые присутствуют только в оригинальных работах автора.

4. Не даётся объяснения почему не используется схема кольцевого волоконного лазера с модулятором добротности в виде тонкой плёнки между двух совмещённых коннекторов, часто упоминаемая в литературе и намного более простая в реализации?

5. Имеется некоторое количество опечаток и ошибок форматирования в тексте диссертации.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на хорошем научном уровне.

#### **Общая оценка диссертационной работы:**

Диссертационная работы Судаса Дмитрия Петровича является научной работой, в которой содержится оценка возможности и реализация использования нелинейно оптических свойств тонкоплёночного теллурида висмута для его применения в полностью волоконных системах. Решение данных задач является существенным шагом в создания новых простых методов оценки нелинейно-оптических свойств двумерных материалов. Представленная диссертация является самостоятельным и завершённым научным исследованием. Автореферат соответствует содержанию

диссертации. Научные положения диссертации аргументированы и обоснованы, а содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности. По результатам работы опубликовано 18 научных работ из которых 9 статей в рецензируемых журналах: 2 статьи входят в перечень ВАК Минобрнауки России, 7 статей в международных журналах, индексируемых WoS и Scopus, три из которых в журналах, входящих в первый квартиль (Q1). 9 публикаций в тезисах конференций. Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Судас Дмитрий Петрович заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

*Официальный оппонент:*

Семёнов Сергей Львович, д.ф.-м.н., руководитель, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М.Прохорова Российской академии наук». Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Адрес: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова РАН. E-mail: sls@fo.gpi.ru; тел.: +7 (916) 776-51-10. Сайт организации: <http://www.fibopt.ru/>

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.111.01 (Д002.231.01) на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и их дальнейшую обработку

  
/ С.Л. Семёнов



ПОДПИСЬ

*Семёнова С.Л.*

ЗАВЕРЯЮ

СЕКРЕТАРЬ ИОФ РАН

*Глушков В.В.*  
ГЛУШКОВ В.В.

2024г.