

На правах рукописи



Судас Дмитрий Петрович

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА
НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА**

Специальность 1.3.8 - Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: **Голант Константин Михайлович** доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Официальные оппоненты: **Семёнов Сергей Львович** доктор физико-математических наук, руководитель, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова Российской академии наук.

Антипов Олег Леонидович доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

Защита состоится «10» февраля 2023 г. в _____ на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 (Д002.231.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук и на сайте диссертационного совета: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Sudas/dissertation.pdf>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.111.01 (Д002.231.01)
доктор физико-математических наук, доцент



Кузнецова
Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из способов получения импульсного режима генерации лазера является модуляция добротности резонатора [1]. Возможным вариантом достижения такого режима может быть включение в конструкцию резонатора пассивных модуляторов добротности, например, насыщаемых поглотителей (SA) [2, 3].

Распространенный тип модулятора добротности для импульсных волоконных лазеров с SA [4-7] представляет собой утонченный участок волокна с нанесенным на его поверхность насыщаемым поглощающим слоем [5, 8]. В этой конструкции материал SA в виде тонкой пленки [9, 10] или нанопорошка [11, 12] взаимодействует только с затухающим полем фундаментальной моды, локализованным в непосредственной близости от сердцевины волокна [13]. Поскольку материал SA подвергается воздействию только небольшой (эванесцентной) части светового поля, которая локализована в основном в сердцевине, он не подвергается воздействию света высокой интенсивности, типичного для лазерных схем. Это предотвращает ухудшение характеристик материала SA, вызванное локальным повышением температуры.

Для обеспечения более эффективного взаимодействия тонкопленочных и нанопорошковых поглощающих материалов с эванесцентным полем в качестве внешнего покрытия используются специальные прозрачные среды, например, полимеры [14-16]. Такое покрытие с высоким показателем преломления способствует вытягиванию затухающего поля моды изнутри волокна, а также действует как защита от внешних химических и механических воздействий. Температура окружающей среды сильно влияет на показатель преломления полимеров, используемых в качестве наружного покрытия, и, следовательно, на напряженность эванесцентного поля внутри материала SA.

В отличие от модуляторов добротности, построенных на нанопорошково-полимерных смесях, модуляторы в виде тонких пленок нанесенные непосредственно на поверхность сердцевины, способны функционировать без матрицы покрытия, но процесс их синтеза более трудоемкий и технологически сложный. Нанесенные тонкие пленки SA покрывают полимерами в первую очередь для предотвращения окисления на воздухе.

Теллурид висмута Bi_2Te_3 показал себя эффективным насыщаемым 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. При использовании Bi_2Te_3 в сочетании с аморфной средой в виде полимера можно ожидать сильной зависимости свойств полученной смеси от температуры окружающей среды. При охлаждении равновесная концентрация термически возбужденных электронов в зоне проводимости уменьшается. В предельном случае все электроны будут находиться в основном состоянии в валентной зоне.

Поскольку ширина запрещенной зоны теллурида висмута относительно мала, можно ожидать значительного влияния изменений температуры на его свойства. С понижением температуры большая часть энергии, переносимой через свет, оказывается за пределами световедущей сердцевины из-за увеличения показателя преломления полимера. В результате более интенсивный свет взаимодействует с насыщаемым поглотителем.

Цель работы - оценка и использование нелинейно оптических свойств тонкопленочного теллурида висмута для его применения в полностью волоконных системах. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

Первая задача – разработать методику изменения геометрии кварцевого световода таким образом, чтобы обеспечить контакт энергии, распространяющейся по световедущей сердцевине, с наноразмерным материалом без разрыва световода вдоль оси. Показано, что, используя малотоксичный полирующий травитель на локальной области кварцевого световода возможно добиться контакта окружающей среды с эванесцентным полем моды практически без увеличения потерь в спектре пропускания оптического тракта. К тому же по рефлектометрической картине, в процессе утонения волокна, обнаружен эффект перехода части энергии из световедущей сердцевины в оболочку и дальнейшего распространения по ней с высвечиванием на любых дефектах поверхности.

Вторая задача – создание или модификация существующей технологии синтеза тонких плёнок Bi_2Te_3 для использования со сложной поверхностью кварцевого стекла такой как цилиндрическая, малого диаметра (порядка 10 микрон). Для этого была адаптирована технология химического парофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD). Показана возможность контроля осаждения тонкоплёночного материала в реальном времени по изменению спектра пропускания волоконного образца в процессе синтеза покрытия. Обнаружено, что для увеличения равномерности и однородности роста покрытия Bi_2Te_3 на кварцевом световоде необходимо нанести дополнительный подслой ZnTe для пассивирования поверхности.

Третья задача состояла в исследовании влияния дополнительных слоёв на структуру $\text{SiO}_2 - \text{Bi}_2\text{Te}_3$, таких как подслой ZnTe и покрывающий полимерный композит полидиметилсилоксановый эластомер (PDMSe). Предварительный слой теллурида цинка приводит к более равномерному росту дальнейших наносимых слоёв, однако являясь оптически прозрачным материалом провоцирует эффект связи мод с световедущей сердцевиной. Впервые обнаружен резонанс затухающей моды (LMR), реализованный на покрытии теллурида цинка. Смещение резонанса по спектру пропускания оптического тракта позволило определить изменение температуры в покрытии

Bi_2Te_3 при взаимодействии его со светом. Дополнительным результатом послужило создание полностью волоконных рефрактометров для контроля параметров окружающей среды таких как температура и состав. Показано, что внешнее защитное полимерное покрытие приводит к увеличению глубины проникновения затухающего поля моды в оболочку световода и в покрытие из теллурида висмута.

Четвёртая задача – применение нелинейности низкоразмерного Bi_2Te_3 для использования его в полностью волоконных лазерных системах в качестве пассивного модулятора добротности. Были созданы новые волоконные кольцевые лазерные схемы, дающие импульсную генерацию. По параметрам выходного излучения лазера были оценены параметры материала насыщающегося поглотителя, встроенного в резонаторный контур.

Пятой задачей стало исследование влияния внешней температуры на волоконные модуляторы добротности на основе Bi_2Te_3 в процессе генерации лазера. Обнаружено, что изменение температуры влияет на интенсивность взаимодействия света с тонкоплёночным покрытием, а также позволяет управлять внутррезонаторными потерями за счёт изменения уровня ненасыщаемого поглощения. Понижение температуры приводит к перестроению длины волны лазерной генерации и нетипичному поведению зависимости длительности импульса от мощности накачки, что свидетельствует об изменении величины глубины модуляции насыщающегося поглотителя.

Научная новизна

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 (LMR), реализованный на покрытии теллурида цинка. Обнаружено, что изменение температуры покрывающего полимера в диапазоне от -20 до 36 °C влияет на интенсивность взаимодействия света с тонкоплёночным покрытием, а также позволяет управлять

внутрирезонаторными потерями за счёт изменения уровня ненасыщаемого поглощения. Более того понижение температуры от комнатной до 0 °С приводит к перестроению длины волны лазерной генерации с 1560 до 1530 нм и нетипичному поведению зависимости длительности импульса росте мощности накачки, что свидетельствует об уменьшении величины глубины модуляции насыщаемого поглотителя.

Практическая значимость

Данная работа демонстрирует комплекс методов и средств для создания конечных оптико-волоконных устройств таких как модулятор добротности резонатора лазера, а также полностью волоконный рефрактометр для определения показателя преломления окружающей среды. Показана технология утонения кварцевого световода с прецизионным контролем диаметра и выдающимся качеством поверхности при низких потерях позволяющая использовать конечную структуру как базу для нескольких видов устройств.

Адаптированная в ходе выполнения работы технология MOCVD 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.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. В результате изотропного полирующего травления боковой поверхности световода SMF-28 с использованием фторида аммония (NH_4F) возникают «серые» (не зависящие от длины волны) потери при достижении вытравленным участком волокна диаметра 11,2 мкм.
2. Контролируя спектр пропускания оптического тракта с утонённой секцией, длиной 5 мм, в процессе нанесения тонкой плёнки Bi_2Te_3 , можно получить пассивный модулятор добротности, если уровень поглощения на длине волны 1550 нм находится в диапазоне от 75 до 95 %.
3. В результате нанесения подслоя ZnTe толщиной 30 нм на поверхность травленной секции оптического волокна появляется резонанс затухающей моды на длине волны 1530 нм, спектральное положение которого смещается на 10 нм при изменении температуры на 1 °C. Наблюдаемое явление позволяет использовать такие структуры в качестве волоконных датчиков температуры.
4. Полимерное покрытие на основе полидиметилсилоксанового эластомера (PDMSe) структуры $\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ позволяет как усиливать, так и ослаблять взаимодействие света с поглощающим слоем теллурида висмута при изменении температуры от -20 до 35 °C. При нагревании величина пропускания на длине волны 1550 нм возрастает в два раза и уменьшается практически до нуля при охлаждении.
5. Снижение температуры тонкоплёночного покрытия теллурида висмута в модуляторе добротности от 24 до 0 °C приводит к 4х кратному сужению лазерных импульсов из-за эквивалентного увеличения глубины модуляции. Кроме того, длина волны лазерной генерации смещается от 1560 до 1530 нм из-за роста поглощения в модуляторе на 10%.

Апробация работы

По результатам этой работы были сделаны доклады на 20, 22-й Молодёжных конференциях по Физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника (Санкт-Петербург), XI Международной конференция по фотонике и информационной оптике (Москва), VIII Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь), IEEE 14th Nanotechnology Materials and Devices Conference (Стокгольм), Photonics & Electromagnetics Research Symposium 2019 (Рим), EW-MOVPE 18th (Вильнюс), также результаты работы представлялись на конкурсе научных работ имени Ивана Анисимкина 2021 (Москва).

Публикации

По результатам работы опубликовано 18 научных работ из которых 9 статей в рецензируемых журналах: 2 статьи входят в перечень ВАК, 7 статей в международных журналах, индексируемых WoS и Scopus, три из которых в журналах, входящих в первый квартиль (Q1). 9 публикаций в тезисах конференций.

Личный вклад автора

Все теоретические и практические результаты получены автором самостоятельно. Постановка первой и третьей задач выполнялась при консультации с научным руководителем. Все остальные работы, связанные с постановкой целей, разработкой методик, проведением экспериментов, обработкой и анализом данных, написанием научных публикаций выполнены автором самостоятельно или при основном участии.

Структура и объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследований, составивших диссертационную работу. Сформулированы цели и задачи.

В первой главе приведен обзор литературы по современному состоянию дел в физике конденсированного состояния по задачам, рассматриваемым в диссертационной работе. В первой части обзора рассмотрены низкоразмерные наноматериалы, как класс. Затем выделены материалы, обладающие феноменом насыщения поглощения. После описан класс материалов с проводящей поверхностью и изолирующим объёмом, к которому принадлежит Bi_2Te_3 . В конце рассмотрены методы оценки величины нелинейности материалов насыщающихся поглотителей.

Во второй главе демонстрируется способ формирования цилиндрических травлёных сегментов (тейперов) методом безопасного химического травления волоконных световодов для применений в сенсорике и лазерной технике. **Раздел 2.1** посвящён описанию существующих методов утонения секций волоконных световодов. **Раздел 2.2** подробно описывает созданную методику формирования сегментов утонённых оптических волокон. В качестве основы было выбрано одномодовое волокно SMF-28. Утонение секции волокна производилось с помощью изотропного химического травления в несколько этапов. Плата из фторопласта с зафиксированным на нём волокном, помещалась на механизм покачивания, схема которого представлена на Рисунке 1а, необходимый для получения высокого качества травлёной поверхности. Очищенная от защитного полимера секция заливалась раствором малотоксичного полирующего травителя $\text{NH}_4\text{F} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Состав травителя при температуре 25 °С обеспечивал скорость уменьшения диаметра 10 нм/с. Причём, показано, что в отличии от травителя основанного на разбавленной плавиковой кислоты

скорость изменяется практически линейно, без видимых ускорений (Рисунок 1б). После достижения диаметра 50-60 микрон травитель сливался и волокно промывалось бидистиллированной водой. Диаметр узкой цилиндрической части контролировался оптическим микроскопом. Процесс травления повторялся для достижения желаемого диаметра волокна.

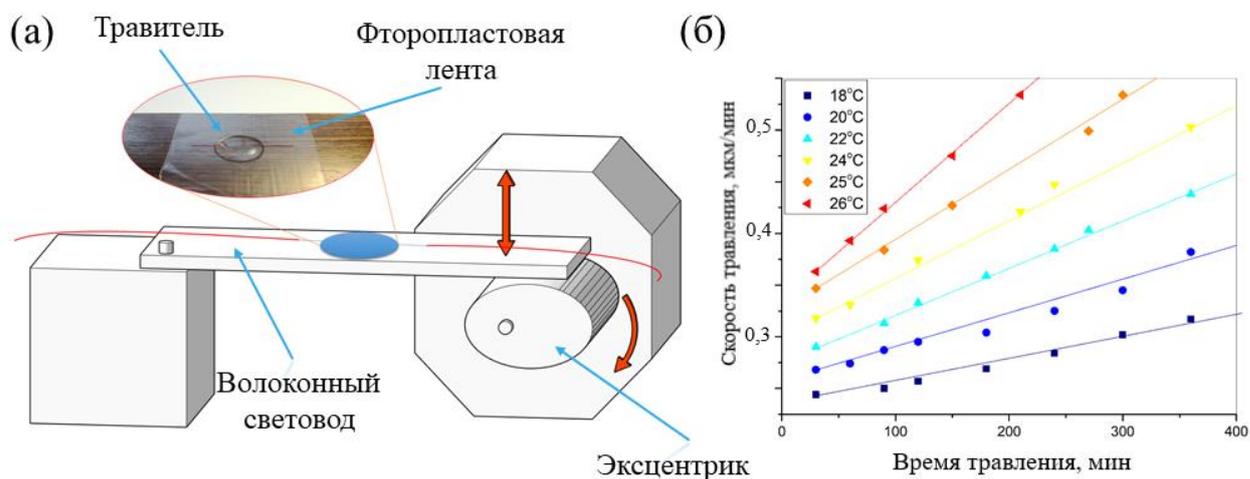


Рисунок 1 – Химическое утонение сегментов кварцевого волокна. (а) – схема установки для химического травления кварцевых волокон, (б) – зависимость изменения скорости травления при разных температурах.

Разработанная методика обладает очевидной простотой реализации, по сравнению с аналогами и низкой токсичностью применяемых реагентов. Измерения показали, что в тейперах с диаметром цилиндрической области более 11 мкм потери не превосходят 0.1 дБ. Увеличение потерь в волоконных тейперах происходит при уменьшении их диаметра и достигают величины 2 дБ при его значении 5.7 мкм. **Раздел 2.3** посвящён рефлектометрическому исследованию потерь, возникающих при травлении в зависимости от диаметра утонённой секции в реальном времени. После фиксирования уровня потерь в интересующем нас спектральном диапазоне, один конец волокна приваривался к волоконному выходу рефлектометра OBR Model 4400 от LUNA Тес. работающего в диапазоне длин волн 1530-1570 нм, а второй конец помещался в иммерсионную жидкость с показателем преломления близким к кварцу (~ 1,46). Измерения на рефрактометре позволяли определять с точностью порядка 10 мкм положение, а также величину потерь в утонённом

волокне. На рефлектометре определено пространственное положение источников потерь в спектральном диапазоне 1530-1570 нм (Рисунок 2а), которые возникают в местах с поверхностными дефектами травления, главным образом на конусах тейпера и границах лужицы травителя с атмосферой. В большинстве опытов наблюдалось отсутствие потерь в цилиндрической области тейпера. При достижении диаметра 11.4 микрон происходит существенное увеличение высвечивания на длине волны 1550 нм (Рисунок 2б). Волны в спектре пропускания обусловлены интерференцией с прилегающим слоем продуктов травления.

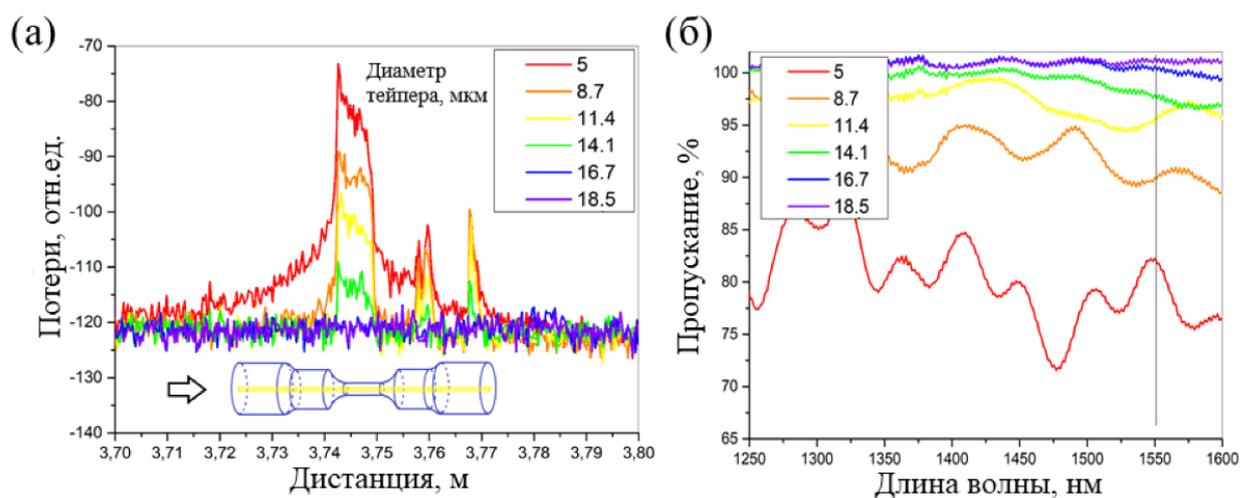


Рисунок 2 – Зависимость величины потерь в волокне от диаметра тейпера в процессе травления. (а) – величина потерь на длине волны 1548 нм, полученный на рефлектометре, (б) – спектр пропускания сегмента волокна в процессе травления.

Основное высвечивание (более 95%) происходит в области цилиндрического сегмента, однако пики, образованные от неоднородностей и места стыка с защитным покрытием видны из-за того, что часть излучения продолжает распространяться уже по оболочке. Всё это позволяет утверждать, что при нанесении на показанную область поглощающего материала, всё излучение, выводимое из волокна будет взаимодействовать.

Третья глава посвящена синтезу тонкоплёночных покрытий на боковую поверхность кварцевого оптического волокна. В **Разделе 3.1** описана

технология парофазного химического осаждения из элементоорганических соединений (MOCVD). **Раздел 3.2** иллюстрирует разработанный метод модернизации описанной ранее системы для работы с кварцевыми волокнами с возможностью работы в реальном времени (Рисунок 3а). В отличие от стандартной реализации для работы с плоскопараллельными пластинами, используется цилиндрический кварцевый реактор, герметизируемый с обоих концов и удерживающий волокно в натянутом положении (Рисунок 3б).

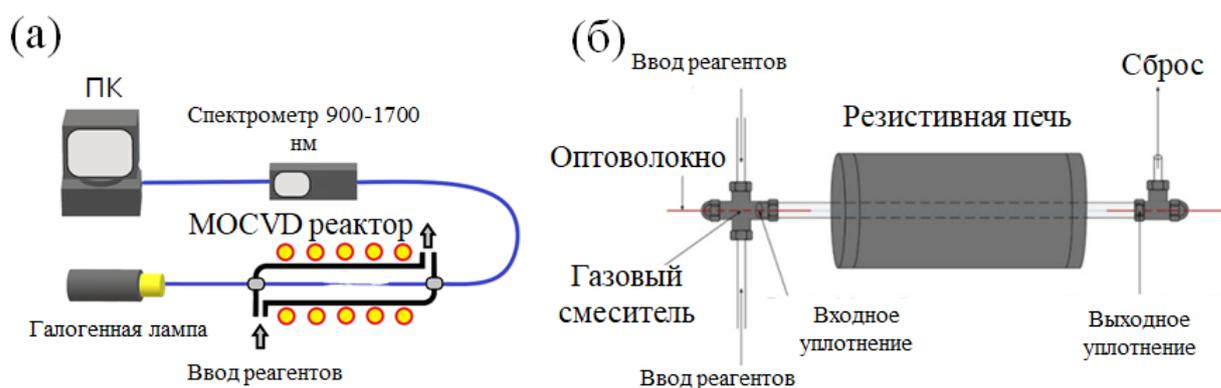


Рисунок 3 – Метода MOCVD для работы с волоконными световодами. (а) – схема фиксирования пропускания в реальном времени, (б) – схема кварцевого реактора в резистивной печи.

Раздел 3.3 описывает специфику ростовых процессов на поверхности кварцевого стекла. Показано, что островкам теллурида висмута более энергетически выгодно расти вверх чем вдоль плоскости, это приводит к тому что при высоких значениях рассеяния наблюдается относительно небольшая плотность заполнения (менее 5 %). Для увеличения склонности Bi_2Te_3 расти вдоль поверхности использовали подслоем теллурида цинка.

В Разделе 3.4 продемонстрирована созданная экспериментальная схема кольцевого волоконного лазера. Также экспериментально определен максимальный (10,5 мкм) диаметр для тейпера на волокне, при котором, нелинейное поглощение осаждённой пленки теллурида висмута переводит эрбиевый волоконный лазер в режим генерации с модуляцией добротности. В **Разделе 3.5** приводятся выводы по главе и показывается, что полученные данные позволят в дальнейшем оптимизировать методику изготовления

пассивных волоконных модуляторов добротности тейперного типа для работы в различных схемах импульсных волоконных лазеров.

Глава 4 посвящена экспериментальным и теоретическими результатам, которые показывают, что в волоконных тейперах, покрытых ультратонкими (толщиной <100 нм) пленками с достаточно высоким показателем преломления, при определенных условиях может возникать резонансная связь между основной модой, распространяющейся в световедущей сердцевине, и оболочечным покрытием. **Раздел 4.1** демонстрирует эффект резонанса затухающей моды при синтезе покрытий теллурида цинка. Подслоем теллурида цинка перед процессом осаждения теллурида висмута создаёт в спектре пропускания провал (Рисунок 4а) положение которого зависит от параметров окружающей среды в том числе температуры. Температурный дрейф резонанса составил 1 нм на 10 °С. Кроме того, положение резонанса зависело от толщины подслоя (Рисунок 4б).

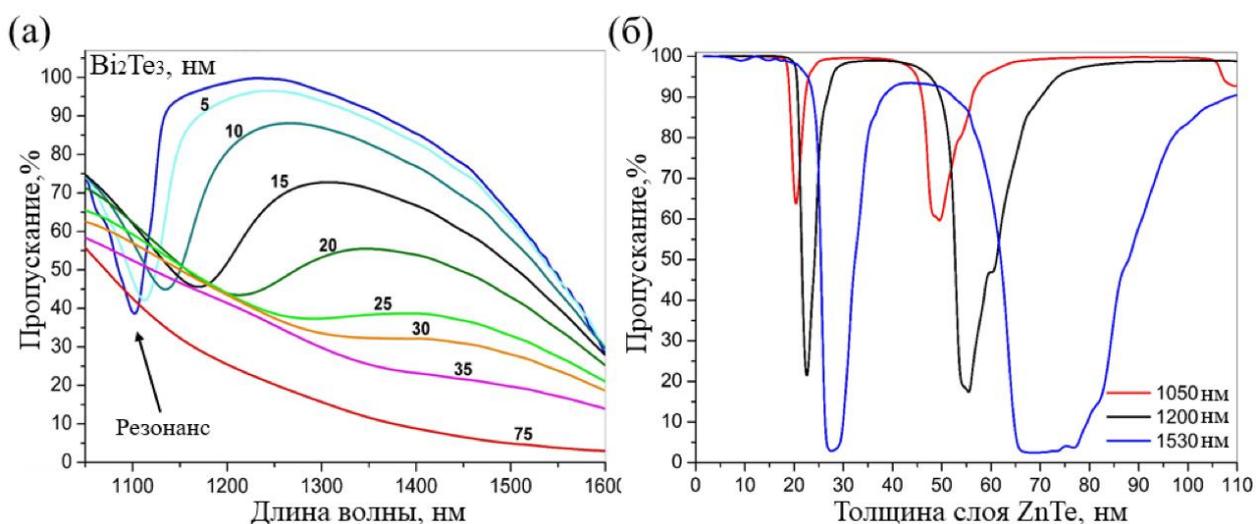


Рисунок 4 – Пропускание оптоволокна в процессе синтеза тонкоплёночных покрытий. (а) – осаждение Bi_2Te_3 на подслое ZnTe толщиной 50 нм, (б) – осаждение слоя ZnTe на кварцевое волокно.

В **Разделе 4.2** описано, что в пределах толщины ZnTe 25,5–26,5 нм упомянутая выше связь мод приводит к возбуждению исключительно мод покрытия с такой чрезвычайно высокой концентрацией оптического поля в покрывающей пленке, что практически вся световая мощность рассеивается в

пленке, независимо от ее сверхмалой толщины и низкого уровня поглощения (Рисунок 5).

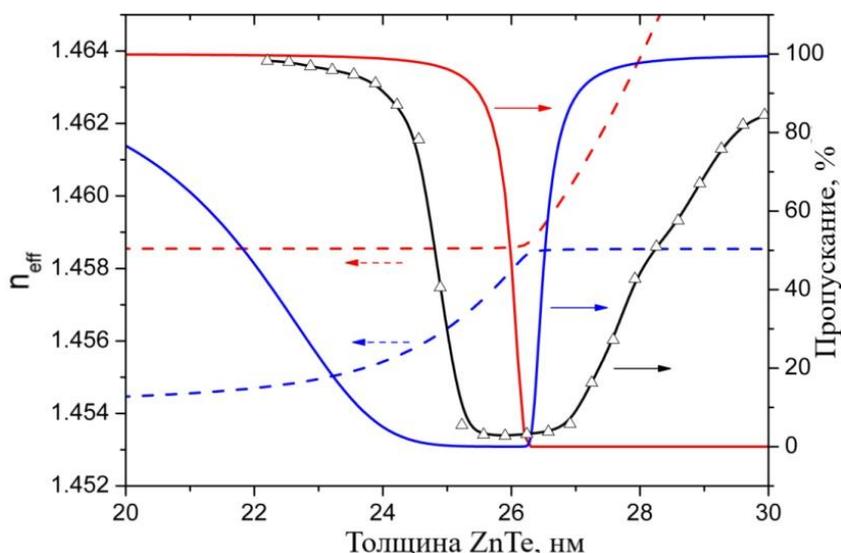


Рисунок 5 – Изменения коэффициента пропускания (вычисленный - сплошные линии; измеренный - точечный график) и действительной части эффективного показателя преломления (только вычисленный, пунктирные линии) при покрытии пленкой ZnTe утонённого участка волокна в диапазоне толщин пленки, соответствующих возбуждению LMR. Красные линии относятся к фундаментальной моде, синие линии к оболочечным модам.

В Разделе 4.3 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 LMR, вплоть до четвёртого порядка (Рисунок 6а-б).

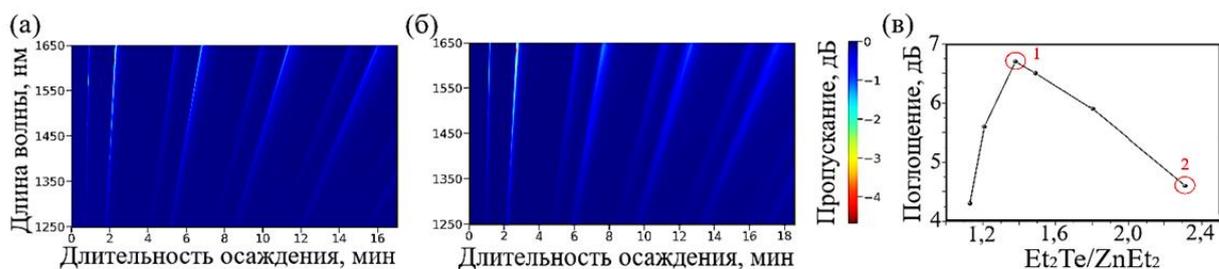


Рисунок 6 – Спектральные развёртки пропускания тейпера в процессе осаждения при отношении $\text{Et}_2\text{Te}/\text{ZnEt}_2$ равных: а – 1.38, б – 2.31, с – максимальная глубина резонанса для всех проведённых экспериментов.

Кроме того, глубина и полуширина резонанса сильно зависит от соотношения реагентов, и величины коэффициента экстинкции покрытия (Рис. 6в).

Раздел 4.4 даёт выводы по главе и касается описания возможным методов использования, полученных в процессе волоконных рефрактометров.

В пятой главе – пленки Vi_2Te_3 и Vi_{2n} нанометровой толщины в качестве насыщаемых поглотителей оптического излучения наносятся на поверхность тейперов кварцевых оптических волокон с помощью технологии MOCVD. Используя эти волоконные секции с пленочным покрытием, проектируются и исследуются пассивные модуляторы добротности для волоконных лазеров. В **Разделе 5.1** 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. Это явление связано с изменением конфигурации эванесцентного поля моды в утонённой части оптического волокна из-за изменения показателя преломления покрывающего полимера и, следовательно, из-за изменения поглощения оптического поля нанесенной тонкой пленкой SA.

В **Разделе 5.2** исследованы выходные импульсы кольцевого волоконного лазера, с активным волокном легированного эрбием, при различных температурах утонённого волокна, покрытого насыщающимся поглотителем в качестве модулятора добротности. Обнаружено, что снижение температуры насыщаемых поглотителей в виде нанопорошково-полимерной композиции Vi_2Te_3 и в виде покрытой полимером тонкой пленки Vi_2Te_3 позволяет увеличить частоту следования импульсов на 20% – 40% при той же мощности накачки. Волоконный лазер с модулятором добротности показал наличие максимума в зависимости частоты следования импульсов от

температуры. В процессе охлаждения пиковая длина волны лазерных колебаний изменяется от 1560 до 1530 нм (Рисунок 7).

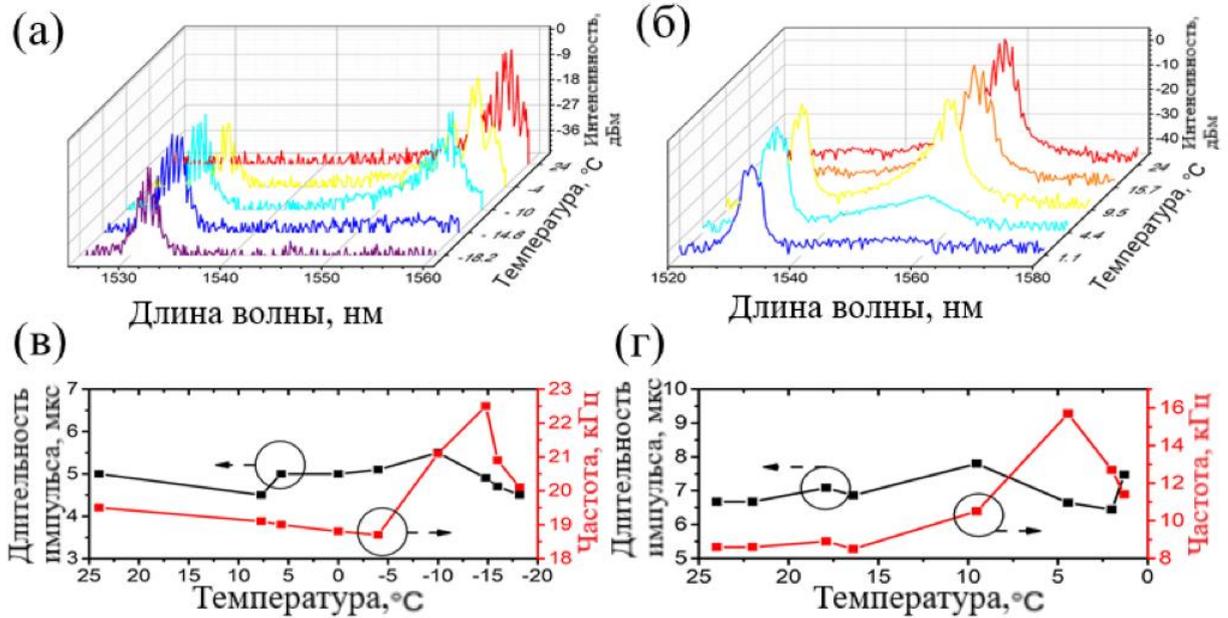


Рисунок 7 – Температурные зависимости: (а), (б) – спектров излучения; (в), (г) – длительность и частота следования импульсов; от температуры пассивного модулятора добротности для образцов нанопорошка (слева) и тонкой плёнки (справа).

Это происходит из-за роста потерь в волоконном кольце резонатора, вызванного охлаждением, так что запускаемая мощность накачки становится недостаточной для полной накачки по всей длине активного волокна и, следовательно, для поддержания импульсного режима лазера на длине волны 1560 нм. Длительность и частоту следования импульсов можно рассчитать следующим образом:

$$\tau_p^{PQ} \propto \frac{T_R}{\Delta R}, \quad (1)$$

$$f_{rep} \propto \frac{g_0}{\Delta R * \tau_L}, \quad (2)$$

где τ_p^{PQ} – длительность импульса, T_R – время обхода резонатора, ΔR – глубина модуляции, f_{rep} – частота следования импульсов, g_0 – усиление слабого сигнала, τ_L – время жизни активных ионов активной среды на верхнем энергетическом уровне.

Пониженная температура (0 °С) пассивного модулятора добротности в виде нанопорошка Bi_2Te_3 в полимере приводит к тому, что импульсы в начале лазерных колебаний в 2,75 раза короче, а частота повторения на 50% выше, чем при комнатной температуре при максимальной мощности накачки в 295 мВт. Незначительное стационарное охлаждение (до 15 °С) пассивного модулятора добротности с покрытой полимером тонкой пленкой Bi_2Te_3 привело к уменьшению длительности импульса в 3,25 раза по сравнению с комнатной температурой при мощности накачки, обеспечивающей переход лазера от непрерывного к импульсному режиму генерации лазера.

Насыщаемый поглотитель в виде тонкой пленки теллурида висмута в пассивном модуляторе добротности демонстрирует более высокие частоты импульсной генерации и более короткие импульсы по сравнению с нанопорошковой реализацией. Это также увеличивает частоту повторения импульсов при охлаждении (Рисунок 8).

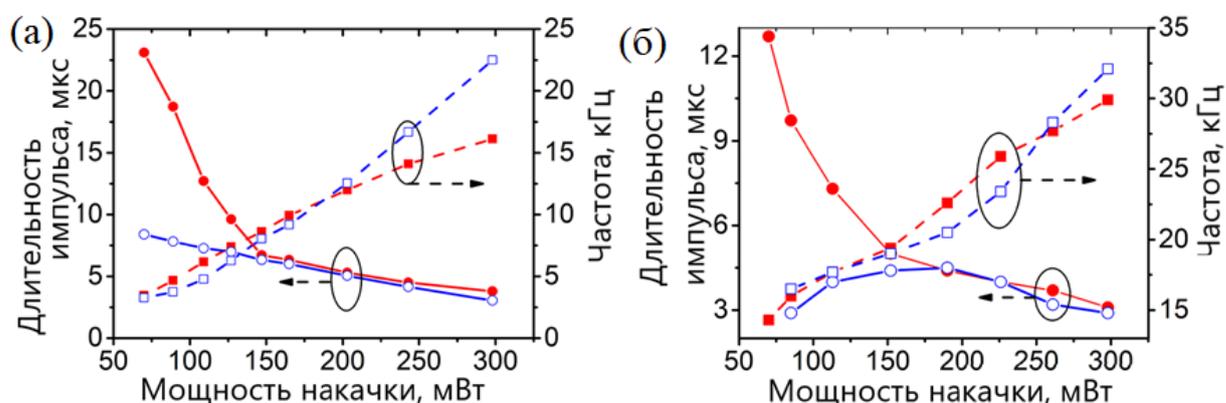


Рисунок 8 – Длительность импульсов и частота для кольцевого лазера при различных температурах пассивных модуляторов добротности: (а) – «нанопорошок» и (б) – «тонкая плёнка». Красные графики соответствуют температуре 24 °С, синие — 0 °С слева и 15 °С справа.

Принимая все это во внимание, тонкая пленка Bi_2Te_3 более предпочтительна в качестве насыщаемого поглотителя. Кроме того, путем изменения температуры пассивного модулятора добротности можно реализовать импульсный режим генерации в цепи, которая не поддерживала этот режим при комнатной температуре. Охлаждаемый насыщаемый

поглотитель в виде тонкой пленки Bi_2Te_3 , покрытой полимером, демонстрирует увеличение длительности лазерных импульсов с увеличением мощности накачки. Кроме того, семикратное уменьшение длительности импульса в лазерной схеме, вызванное охлаждением SA по сравнению с комнатной температурой, может указывать на увеличение глубины модуляции, вызванное поглощением насыщения в нанесенной пленке.

Охлаждение приводит к уменьшению концентрации равновесных носителей, термически активированных в зоне проводимости. Это, в свою очередь, снижает концентрацию фотоиндуцированных носителей заряда в полосах, необходимых для проявления эффекта насыщения поглощения, и приводит к наступлению насыщения поглощения при более высокой интенсивности света и, следовательно, к увеличению глубины модуляции. В **Разделе 5.3** представлены выводы по последней главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Показан механизм возникновения и локализации серых потерь при изотропном химическом травлении.
2. Адаптирована технология MOCVD для синтеза широчайшего спектра полупроводниковых материалов на поверхности кварцевого волокна.
3. Впервые обнаружен эффект резонанса затухающей моды (LMR), реализованный на покрытии теллурида цинка.
4. Обнаружено, что изменение температуры влияет на интенсивность взаимодействия света с тонкопленочным покрытием, а также позволяет управлять внутрирезонаторными потерями за счёт изменения уровня ненасыщаемого поглощения.
5. Понижение температуры приводит к перестроению длины волны лазерной генерации и нетипичному поведению зависимости

длительности импульса от мощности накачки, что свидетельствует об изменении величины глубины модуляции насыщающегося поглотителя.

ПУБЛИКАЦИИ

- 1) Kuznetsov, P.I. Transmission spectrum alteration of a silica fiber taper while covering lateral surface with heterostructure of ZnTe/Bi₂Te₃ thin film / P.I. Kuznetsov, V.A. Jitov, E.I. Golant, E.A. Savelyev, D.P. Sudas, G.G. Yakushcheva, K.M. Golant // *Physica Scripta*. – 2019. – Vol. 94, No. 2. – Art. 025802.
- 2) Kuznetsov, P. MOCVD deposition of zinc and bismuth chalcogenides films on the surface of silica optical fibers / P.Kuznetsov, G. Yakushcheva, E. Savelyev, V. Yapaskurt, V.Sherbakov, L. Zakharov, V. Jitov, D. Sudas, K. Golant // *Lithuanian Journal of Physics*. – 2019. – Vol. 59, No. 4.
- 3) Kuznetsov, P.I. Formation of Fiber Tapers by Chemical Etching for Application in Fiber Sensors and Lasers / P.I. Kuznetsov, D.P. Sudas, E.A. Savel'ev, // *Instrum Exp. Tech*. – 2020. – Vol. 63. – P. 516–521.
- 4) Sudas, D. P. Features of repetitively-pulsed oscillation of an erbium fiber laser with a saturable absorber Bi₂Te₃ covered by silicone at various temperatures / D. P. Sudas, et al // *Phys. Scr*. – 2021. – Vol. 96. – Art. 045501.
- 5) Kuznetsov, P.I. Fiber optic Lossy Mode Resonance based sensor for aggressive liquids / P.I. Kuznetsov, D.P. Sudas, E.A. Savelyev // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Art. 112576.
- 6) Судас, Д.П. Волоконно-оптические сенсоры на основе резонанса затухающей моды для агрессивных жидкостей / Д.П. Судас, Кузнецов П.И., Якушева Г.Г., Савельев Е.А. // *ФОТОН-ЭКСПРЕСС*. – 2021. – Vol. 6, No. 174. – P. 286-287.
- 7) Savelyev, E.A. Using lossy mode resonance for in situ measurement of the refractive index of a layer deposited on an optical fiber lateral surface / E.A. Savelyev, D. P. Sudas, and P. I. Kuztestov // *Opt. Lett*. – 2022. – Vol. 47. – P. 361-364.

- 8) Sudas, D.P. Silicon Oxynitride Thin Film Coating to Lossy Mode Resonance Fiber-Optic Refractometer / D.P. Sudas, L.Y. Zakharov, V.A.Jitov, K.M. Golant // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – Art. 3665.
- 9) Судас, Д.П. Охлаждение пассивных модуляторов добротности на основе покрытого силиконом теллурида висмута в волоконных эрбиевых лазерах / Д.П. Судас, Е.А. Савельев, К.М. Голант // *Нелинейный Мир*. – 2022. – Т.20, №2. – Стр. 38-42.
- 10) Судас, Д.П. Эрбиевый волоконный лазер с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающихся поглотителей в виде кристаллических тонких пленок Bi_2Te_3 / Д.П. Судас, Е.А. Савельев, П.И. Кузнецов, В.А. Житов, К.М. Голант // *Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов 20-й Всерос. молодежн. конф. 26–30 ноября 2018 г.* – СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС. – 2018. – С. 112.
- 11) Sudas, D.P. Passively Q-switched erbium fiber laser with a thin crystalline film of bismuth telluride used as a saturable absorber / D.P. Sudas, P.I. Kuznetsov, V.A. Jitov, E.A. Savelyev and K.M. Golant // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1199, No. 1.
- 12) Kuznetsov, P. MOCVD deposition of zinc and bismuth chalcogenides films on the surface of silica optical fibers / P. Kuznetsov, G. Yakushcheva, E. Savelyev, V. Yapaskurt, V.Sherbakov, L. Zakharov, V. Jitov, D. Sudas and K. Golant // *EW-MOVPE 18th 16 June - 19 June 2019 Vilnius, Lithuania Book of Abstracts*. – 2019. – p. P-B9.
- 13) Savelyev, E. A. Bismuth and bismuth telluride thin films deposited by MOCVD upon tapered fiber sections as Q-switches for fiber lasers / E. A. Savelyev, P. I. Kuznetsov, D. P. Sudas, L. Y. Zakharov, and K. M. Golant // *Photonics & Electromagnetics Research Symposium Abstracts, Rome, Italy, 17–20 June, PIERS 2019 Rome Abstracts*. – 2019. – p. 1428.
- 14) Kuznetsov, P. MOCVD synthesis of 2D saturable absorbers for pulsed fiber lasers / P. Kuznetsov, G. Yakushcheva, E. Savelyev, D. Sudas, V. Yapaskurt and

V. Sherbakov // 2019 IEEE 14th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), Stockholm, Sweden. – 2019. – pp. 1-4.

15) Судас, Д.П. Эрбиевый волоконный лазер с пассивной модуляцией добротности с насыщающимся поглотителем в виде различных фаз Ni-S / Д.П. Судас, П.И.Кузнецов, Е.А.Савельев, Г.Г.Якущева // Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов Всерос. науч. молодежн. конф., 23–27 ноября 2020 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 111 с.

16) P. I. Kuznetsov, E. A. Savelyev, D. P. Sudas, and G. G. Yakushcheva // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – No. 1851. – Art. 012018.

17) Судас, Д.П. Оптоволоконный рефрактометр с покрытием из диоксида олова для измерения параметров концентрированных кислот / Д.П. Судас, Савельев Е.А., Якущева Г.Г., Кузнецов П.И. // XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – 175 с.

18) Судас Д.П., Савельев Е.А., Кузнецов П.И., Голант К.М. // Влияние температуры на модулятор добротности на основе Bi_2Te_3 с полимерным покрытием в кольцевом волоконном лазере. // XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – 379 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Quimby, «Photonics and Lasers: An Introduction», Chapter 22 (2006).
2. A. Marini, J. D. Cox, and F. J. García de Abajo, «Theory of graphene saturable absorption», Phys. Rev. B 95, 12 (2017).
3. R. I. Woodward and E. J. R. Kelleher, «2D Saturable Absorbers for Fibre Lasers», Appl. Sci 5(4), 1440-1456 (2015).
4. J. Bogusławski et al., «Exploiting nonlinear properties of pure and Sn-doped $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ for passive Q-switching of all-polarization maintaining ytterbium- and erbium-doped fiber lasers», Scientific Reports 7, 7428 (2017).

5. H. Lee, W.S. Kwon, J. H. Kim, D. Kang, and S. Kim. «Polarization insensitive graphene saturable absorbers using etched fiber for highly stable ultrafast fiber lasers», *OPTICS EXPRESS* 23(17), 22116 (2015).
6. L. Gao, W. Huang, J. D. Zhang, T. Zhu, H. Zhang, C. J. Zhao, W. Zhang, and H. Zhang, «Q-switched mode-locked erbium-doped fiber laser based on topological insulator Bi₂Se₃ deposited fiber taper», *Applied Optics* 53(23), 5117-5122 (2014).
7. K. Yan, J. Lin, Y. Zhou, C. Gu, L. Xu, An. Wang, P. Yao and Q. Zhan, «Bi₂Te₃ based passively Q-switched fiber laser with cylindrical vector beam emission», *Applied Optics* 55(11), 3026-3029 (2016).
8. S. Ko, J. Lee, J. Koo, B. S. Joo, M. Gu and J. H. Lee, «Chemical Wet Etching of an Optical Fiber Using a Hydrogen Fluoride-Free Solution for a Saturable Absorber Based on the Evanescent Field Interaction», *J. of Lightwave Technology* 34(16), 3776-3784 (2016).
9. X. Zhang, Y. Yao, S. Wang, G. Ma, M. Lei and W. Liu, «Q-switched all-fiber laser based on MoSe₂ films with chemical vapor deposition method», *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 28(02), 1950019 (2019).
10. S. H. Kassani, R. Khazaeizhad, H. Jeong, T. Nazari, D. Yeom, and K. Oh, «All-fiber Er-doped Q-Switched laser based on Tungsten Disulfide saturable absorber», *Optical Materials Express* 5(2) (2015).
11. L. Gao, W. Huang, J. D. Zhang, T. Zhu, H. Zhang, C. J. Zhao, W. Zhang, and H. Zhang, «Q-switched mode-locked erbium-doped fiber laser based on topological insulator Bi₂Se₃ deposited fiber taper», *Appl. Opt.* 53, 5117-5122 (2014).
12. Y. H. Lin, S. F. Lin, Y.C. Chi, C. L. Wu, C. H. Cheng, W. H. Tseng, J. H. He, C. I. Wu, C. K. Lee and G. R. Lin, «Using n- and p-Type Bi₂Te₃ Topological Insulator Nanoparticles To Enable Controlled Femtosecond Mode-Locking of Fiber Lasers», *ACS Photonics* 2(4), 481–490 (2015).
13. M. Tabib-Azar, B. Sutapun, T. Srihirin, J. Lando, G. Adamovsky, «Fiber optic electric field sensors using polymer-dispersed liquid crystal coatings and evanescent field interactions», *Sensors and Actuators: B* 84, 134–139 (2000).

14. H. Lee, W. S. Kwon, J. H. Kim, D. Kang, and S. Kim, «Polarization insensitive graphene saturable absorbers using etched fiber for highly stable ultrafast fiber lasers», *Optics Express* 23(17), 22116-22122 (2015).
15. N. H. M. Apandi, F. Ahmad, S. Ambran, M. Yamada and S. W. Harun, «Bismuth (III) Telluride (Bi_2Te_3) Based Topological Insulator Embedded in PVA as Passive Saturable Absorber in Erbium-Doped Fiber Laser», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 210, 012032 (2017).
16. B. Xu, M. Omura, M. Takiguchi, A. Martinez, T.i Ishigure, S. Yamashita, and T. Kuga, «Carbon nanotube/polymer composite coated tapered fiber for four wave mixing based wavelength conversion», *Optics Express* 21(3), 3651-3657 (2013).