

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ТЕЙПЕРОВ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКАХ И ЛАЗЕРАХ¹

© 2020 г. П. И. Кузнецов^a, Д. П. Судас^{a,b,*}, Е. А. Савельев^a

^a Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, С.-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: dmitriisudas@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 14.03.2020 г.

Разработан метод безопасного химического травления волоконных световодов для последующего применения их в сенсорике и лазерной технике. Подготовлена серия утоненных волокон (тейперов) с диаметрами тонкой части от 5.7 до 24.1 мкм и длиной от 2.3 до 11.1 мм. При помощи частотного рефлектометра показано местоположение возникающих потерь в тейперах малого диаметра. Наблюдается сильная зависимость возникающих потерь от дефектов на поверхности конусов и цилиндрической части тейпера. В спектрах пропускания тейперов большого диаметра при осаждении на них тонких ZnTe-пленок наблюдались LMR-резонансы. Их чувствительность к изменению показателя преломления водных растворов составила 5230 нм/RIU (Refractive Index Unit). На тейперы с диаметрами <10 мкм наносили полимерный композит с нанопорошками Bi₂Se₃, MoSe₂, NiO. В таком виде они использовались в качестве пассивных модуляторов добротности в кольцевом волоконном эрбиевом лазере.

DOI: 10.31857/S0032816220040308

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время приборы, построенные на основе волоконных световодов, нашли применения во многих сферах, таких как средства передачи информации [1], сенсорика [2], медицина [3], тяжелая промышленность [4] и другие цели [5]. Небольшие размер и масса, простота и долговечность в использовании, а также относительно невысокая цена послужили широкой распространенности оптоволоконных устройств. В частности, волоконные лазеры [6] позволяют достигать мощностных характеристик излучения, ничем не уступающих аналогам с объемным резонатором, при более низкой стоимости.

Широко распространены волоконные сенсоры, использующие эффекты поверхностного плазмонного резонанса (SPR) [7, 8] или резонанса затухающей моды (LMR — lossy mode resonance) [2, 9, 10] для исследования характеристик и свойств различных сред: влажности [11], показателя прелом-

ления [2, 7] и т.д. Для исследования конкретной среды или объекта волоконные сенсорные системы используют фактор влияния параметров внешней среды на электромагнитное излучение, распространяющееся по сердцевине волокна, изменение характеристик которого дает представление об исследуемом объекте или среде.

Далее рассматриваются только полностью волоконные системы, исключаяющие прямолинейное распространение света по воздуху или любой другой среде и предполагающие его распространение только по оптическому волокну. Взаимодействие среды с излучением может осуществляться двумя способами. Первый — взаимодействие с основной частью энергии фундаментальной моды, когда частично вскрывается волноведущая сердцевина волокна и возникают потери за счет высвечивания во внешнюю среду [12]. Второй способ — через эванесцентное поле моды, распространяющейся по сердцевине волокна [13].

Затухание интенсивности фундаментальной моды вдоль диаметра волокна происходит таким образом, что часть энергии распространяется по оболочке, при этом распределение поля сильно

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (<http://or-2020.permsc.ru/>, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

зависит от параметров внешней среды. Например, при нанесении тонких пленок халькогенидов цинка (ZnO [8, 14], ZnS, ZnTe [15], ZnSe), обладающих большим показателем преломления в спектральном диапазоне 1–2 мкм [16], проявляется явление резонанса моды утечки.

Оно возникает, когда выполняется фазовая синхронизация между модами, распространяющимися в сердцевине волокна и в тонком слое покровного материала. Спектральное положение резонанса определяется толщиной покрытия и его действительной частью показателя преломления и сильно зависит от характеристик внешней среды, в которой находится такой сенсор, например, при изменении ее показателя преломления. На этом основано их использование в качестве сенсоров.

Реализация пассивных модуляторов добротности волоконных лазеров также основана на принципе взаимодействия насыщающихся поглотителей (SA – saturable absorber) с исчезающим полем моды. Нанесение на поверхность волоконных тейперов наноразмерных материалов, обладающих свойством насыщения поглощения, позволяет перевести непрерывный режим генерации лазера в импульсный (Q-switch). К таким материалам относятся Bi_2Te_3 [17], Bi_2Se_3 [18], MoSe_2 [19], WS_2 [20] и многие другие.

Для увеличения взаимодействия эванесцентного поля с внешней средой необходимо уменьшение внешнего диаметра волокна. Это может быть сделано методами боковой полировки [17], термической перетяжки волокна [18] и методом прецизионного химического травления оболочки волокна [21, 22]. Полировку волокна применяют главным образом в случае использования света с постоянной поляризацией. Основным ее недостатком является маленькая площадь взаимодействия пленки с исчезающим полем моды.

В случае использования метода термической перетяжки сохраняются пропорции волокна, однако нарушается геометрия световедущей сердцевины. Кроме того, для воспроизводимого изготовления тейперов (утоненных секций волокна) с низкими потерями таким методом требуется дорогостоящее оборудование. Применение химического травления позволяет сохранить диаметр сердцевины, проще в реализации и не требует специальных дорогостоящих установок. Главный его недостаток заключается в использовании фтороводородной кислоты, пары которой представляют серьезную опасность для здоровья человека.

В данной работе демонстрируется способ приготовления цилиндрических тейперов методом безопасного химического травления оптического волокна SMF28 с целью последующего их использования для реализации как сенсоров, так и импульсных волоконных лазеров. Изучена зави-

симость “серых” потерь от диаметра цилиндрической области тейпера. Использование частотного рефлектометра [23] позволило определить величину и положение потерь в тейпированных волокнах в процессе их поэтапного химического травления с понижением диаметра оболочки, вплоть до сердцевины.

Демонстрируется возможность использования тейперов относительно большого диаметра (16–30 мкм), после их покрытия халькогенидами цинка, в качестве LMR-сенсоров и тейперов с диаметром (6–10 мкм), после их покрытия тонкими слоями халькогенидов висмута – в качестве модуляторов добротности в схеме волоконного эрбиевого лазера.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Изготовление тейперов методом химического травления

Нам известны два подхода к изготовлению тейперов методом химического травления. В первом подходе используется раствор плавиковой кислоты. Авторы работы [21] используют методику движения микрокапелек HF от основного объема травителя под воздействием сил поверхностного натяжения, что приводит к формированию плавных конусов и, как следствие, низким потерям в тейперах малого диаметра, вплоть до 1 мкм. Серьезное ограничение в использовании данного метода мы видим в высокой токсичности плавиковой кислоты. Опасные уровни ее концентрации не имеют заметного запаха. Кроме того, в данном подходе трудно решить задачу малой длины протравленного волокна.

Второй подход связан с использованием малотоксичного раствора $\text{NH}_4\text{F}-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$, предложенного в работе [22]. Длину протравленного участка ограничивает небольшая ванна из фторопласта. На наш взгляд, отсутствие движения раствора вдоль оси волокна должно привести к резким конусам и, как следствие, к высоким потерям в тейперах малого диаметра, в первую очередь необходимых для изготовления пассивных модуляторов добротности импульсных волоконных лазеров.

В настоящем исследовании для изготовления тейперов также используется малотоксичный раствор $\text{NH}_4\text{F}-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$. Длина тейперов регулируется размером удаленного участка защитного полимера волокна. На первом этапе травления одновременно до 10 волокон закрепляются на планке с фторопластовой лентой и заливаются таким объемом раствора, чтобы он перекрыл оголенные участки с большим запасом.

После утонения волокон до диаметра около 50 мкм заканчивается первый этап травления. Далее снимается полимерная оболочка на длине 7 см по обе стороны от тейпера и каждое волокно

по одному снова закрепляется на гидрофобной планке. Тейпер заливается лужицей раствора диаметром около 20 мм и за счет изменения знака наклона планки эксцентриком, закрепленным на оси мотора, происходит движение лужицы раствора на расстояние ± 2 см от центра тейпера (рис. 1).

За счет перемещения раствора осуществляется плавный переход от цилиндрической части тейпера к основному диаметру волокна. На заключительном этапе формирования тейпера его диаметр неоднократно измеряется на оптическом микроскопе, для чего волокно освобождается от раствора и тщательно промывается бидистиллированной водой.

2.2. Характеризация изготовленных тейперов

По завершении процесса травления производился замер окончательного диаметра тейпера на микроскопе, при этом также оценивалось оптическое качество цилиндрической поверхности и “серые” потери тейпированного волокна. Пропускание тейпированного волокна в диапазоне длин волн 1150–1650 нм определялось с помощью волоконного спектрометра NIRQuest-512 фирмы OceanOptics. Источником излучения служила галогенная лампа накаливания с волоконным выходом LS-1 (OceanOptics).

После фиксирования уровня потерь в интересующем нас спектральном диапазоне, один конец волокна приваривался к волоконному выходу частотного 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 рефлектометре позволяли нам определять с точностью порядка 10 мкм положение, а также величину потерь в тейпированном волокне.

Далее тейпированные волокна с большим диаметром использовались для создания LMR-сенсоров. После отбраковки образцов с большими “серыми” потерями на длине волны 1.56 мкм тейперы малого диаметра применялись в качестве основы для формирования пассивных модуляторов добротности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Оптические потери в тейперах

В таблице 1 приведены результаты определения оптических потерь на длине волны 1.56 мкм в серии тейперов различной длины и диаметром от 5.7 до 24.1 мкм. В тейперах диаметром > 11 мкм потери оказались ниже порога их обнаружения, равного 0.1 дБ. В конусах меньшего диаметра потери существенны, в тейпере № 18 $\varnothing 5.7$ мкм они составляют 1.9 дБ.

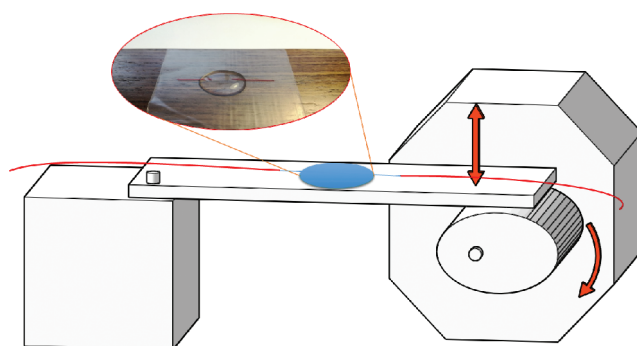


Рис. 1. Схема установки для травления волокон. На вставке сверху приведен снимок участка планки с лужицей раствора при травлении одиночного волокна на первом этапе.

Рассмотрим причины возникновения оптических потерь в тейперах диаметром < 10 мкм. Изготовленный тейпер схематично можно разбить на несколько частей (рис. 2). Из-за процедурной специфики многоэтапного процесса травления с каждой стороны от цилиндрической области тейпера есть две области плавного уменьшения диаметра: переходная область с 125 до ~ 50 мкм и далее конус до цилиндрической части. В работах [24, 25] отмечается, что неоднородности на поверхности конической части являются одной из главных причин потерь, поскольку именно здесь расположена граница, за которой крылья исчезают.

Таблица 1. “Серые” потери изготовленных тейперов на длине волны 1.56 мкм

№ тейпера	Длина, мм	Диаметр, мкм	Потери, дБ
1	4.1	24.1	< 0.1
2	12	20.4	< 0.1
3	5.0	15.5	< 0.1
4	8.2	12.7	< 0.1
5	5.4	11.2	< 0.1
6	4.5	10.9	0.15
7	6.1	10.4	< 0.1
8	8.1	10.0	0.35
9	~ 3.0	9.7	0.4
10	9.1	9.5	0.55
11	9.0	9.5	0.7
12	2.6	9.1	0.4
13	2.4	8.4	0.85
14	9.5	7.3	1.5
15	2.3	7.3	0.5
16	3.0	6.8	1.3
17	2.0	6.4	0.7
18	8.7	5.7	1.9

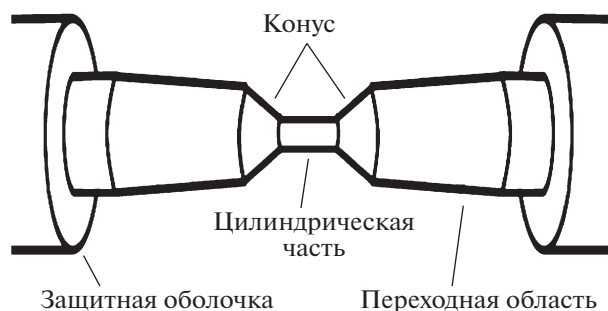


Рис. 2. Схематическое изображение тейпированного сектора волоконного световода.

ющего поля моды начинают высвечиваться в окружающую среду.

Очевидно, что на вывод излучения оказывают влияние гофрированная поверхность, неоднородность диаметра цилиндрической части, отсутствие плавности и симметрии в конусной части. Перед закреплением волокно опускалось на 20 с в ацетон для удаления остатков полимерной оболочки на оголенном участке. При этом успевал раствориться мягкий внутренний полимер на длине 100–150 мкм. На этом участке образуется часть конуса с неоднородной поверхностью (см. вставку на рис. 3).

Следует отметить, что поверхность заметно сглаживается на втором этапе травления после удаления полимерной оболочки, поэтому первый этап травления заканчивали при относительно больших диаметрах тейперов 50–60 мкм, когда уже определена их конечная длина. С другой стороны, на втором этапе травления за конусами в местах смещения лужицы раствора на волокне образуются панцирные участки (типа апельсиновой корки) протяженностью около 0.2 см. Рефлектометрическим методом установлено, что эти дефекты при малом диаметре тейпера также участвуют в рассеивании света.

Для определения порога и пространственного положения источников потерь на частотном рефлектометре проведено сканирование тейпера длиной 4.1 мм при последовательном уменьшении его диаметра. Пороговый диаметр, после которого следует резкое увеличение потерь, составил около 8.5 мкм (рис. 3).

На вставке рис. 3 представлено электронное изображение конуса, на котором хорошо видны выступы и канавки, образовавшиеся на его поверхности вследствие неоднородной скорости травления в пространстве под защитной оболочкой. На рефлектометрической кривой для тейпера $\varnothing 8.2$ мкм стрелкой обозначен всплеск потерь на конусе — пик 2. Пик 1 соответствует положению панцирной поверхности, образовавшейся на границе раствор–воздух, пик 3 находится в месте

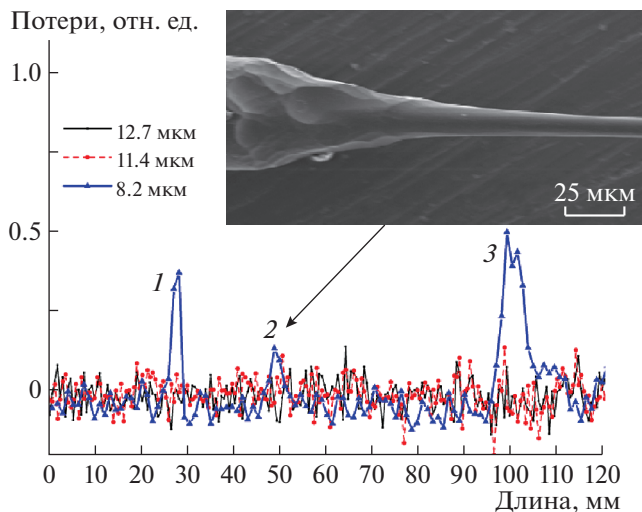


Рис. 3. Зависимость величины потерь в волокне от места на тейпере.

окончания оголенной части волокна, а его высокая интенсивность свидетельствует о том, что здесь существенная часть излучения, распространяющегося в оболочке, выводится в окружающую среду.

На цилиндрической части тейпера $\varnothing 8.2$ мкм потерь нет, что свидетельствует о высоком оптическом качестве поверхности перетяжки тейпера. Замеры диаметра цилиндрической части этого тейпера показали, что разброс значений (0.1 мкм) не превышает точности его измерения на оптическом микроскопе.

Нами специально был подготовлен тейпер № 19 длиной 11.1 мм с двухмикронной неоднородностью диаметра цилиндрической части при среднем его значении 8.1 мкм. Он не представлен в табл. 1, а результаты его исследования на рефлектометре приведены на рис. 4.

Пик 1 на обоих графиках, как и в прошлом случае, — следствие высвечивания на конусе, а пик 2 соответствует дефектам поверхности, образовавшимся на границе лужицы травителя. При дальнейшем уменьшении диаметра перетяжки вследствие увеличения размера этого дефекта возник пик 5 (рис. 4б). В данном случае по всей длине тейпера (11.1 мм) наблюдается высокий уровень высвечивания, особенно после достижения сердцевин. Пики 3 и 4 вызваны неоднородностями на конусах тейпера.

3.2. Практическое применение тейперов в сенсорике и лазерной технике

Тейперы с диаметрами перетяжки от 16 до 30 мкм не имели потерь в спектральном диапазоне 1150–1650 нм и использовались нами в качестве основы

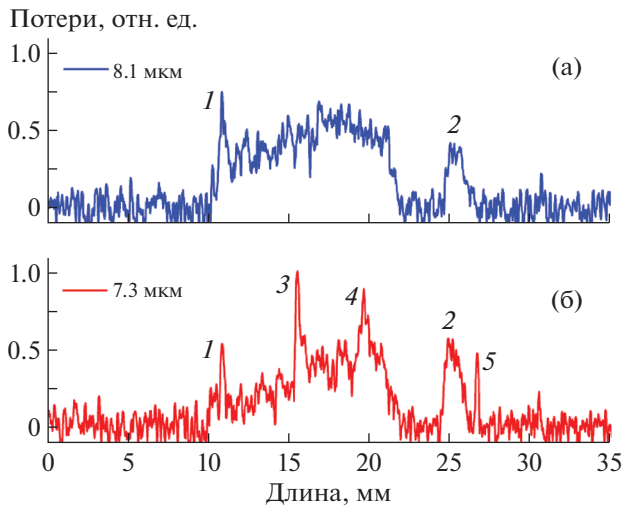


Рис. 4. Зависимость величины и положения потерь в неоднородном тейпере № 19 при среднем диаметре 8.1 мкм (а) и 7.3 мкм (б).

для изготовления LMR-сенсоров. Для этого на утоненную поверхность волокна методом MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) наносилась пленка теллурида или селенида цинка. Подробно процесс их осаждения описан в работе [26]. В процессе формирования покрытия проводился in-situ контроль пропускания тейпера.

На рис. 5 представлены 1-е LMR-резонансы на тейпере длиной 4.2 мм и диаметром 19.1 мкм с тонким ZnTe-покрытием (~16 нм). После осаждения на воздухе резонанс был неглубоким (пропускание 91.7%) на длине волны 880 нм. После заливки сенсора водой и изопропиловым спиртом положение резонанса сместилось значительно в длинноволновую область, а его глубина резко увеличилась. Чувствительность полученного сенсора составила 5230 нм/RIU (Refractive Index Unit). Столь высокая чувствительность сопоставима с рекордными результатами на LMR-сенсорах [2, 10].

Тейперы с диаметром < 10 мкм использованы нами для изготовления модуляторов добротности волоконных эрбиевых лазеров. Для этого образцы заливались смесью силикона (полидиметилсилоксановый эластомер “СИЭЛ”) и нанопорошка насыщающегося поглотителя. Толстые пленки MoSe₂, NiO и Bi₂Se₃, синтезированные методом MOCVD, использованы в качестве исходного материала для приготовления соответствующих нанопорошков. Удаленные механически с подложки наночешуйки дополнительно растирали в ступке и смешивали с силиконом в пропорциях, обеспечивающих после нанесения на тейпер значение коэффициента пропускания 10–60% на длине волны 1560 нм. Затем тейперы встраивались в схему кольцевого волоконного лазера, схема которого изображена на рис. 6.

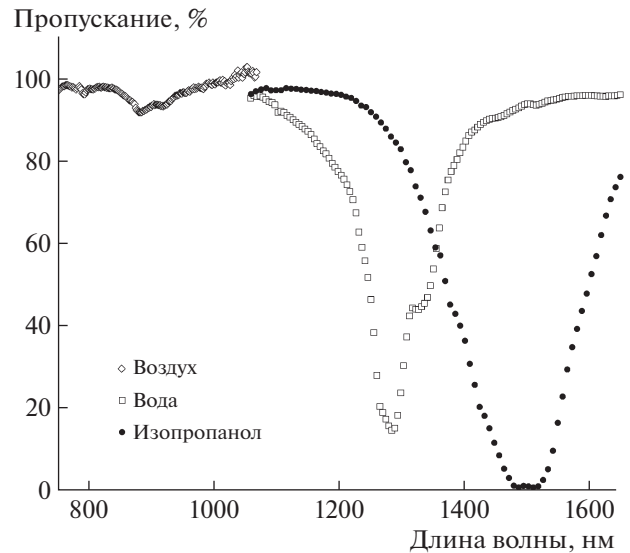


Рис. 5. Демонстрация эффекта LMR на полученном сенсоре в различных средах.

Все волоконные компоненты и соединители выполнены на основе одномодового волокна SMF28. В качестве накачки использовали лазерный диод с длиной волны генерации 980 нм и выходной мощностью до 300 мВт. В качестве активной среды в данной схеме использовалось оптическое волокно собственного производства на основе кварцевого стекла, с активированной ионами эрбия Er³⁺ сердцевиной и поглощением около 10 дБ/м на длине волны 980 нм. Длина помещенного в резонатор отрезка этого волокна составляла 2.4 м. Полная длина резонатора 16.4 м. На всех трех материалах, апробированных нами в качестве SA, получена генерация микросекундных импульсов.

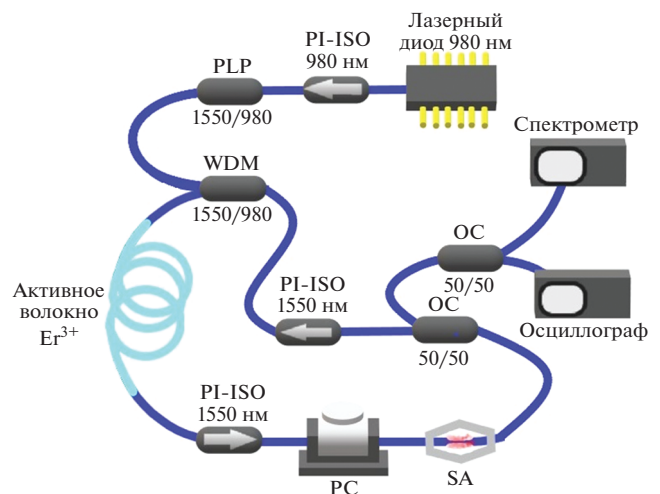


Рис. 6. Схема импульсного кольцевого эрбиевого лазера, используемого в наших экспериментах.

Таблица 2. Характеристики выходного импульсного излучения полученных лазеров

Материал	Длительность импульса, мкс	Длина тейпера, мм	Диаметр тейпера, мкм	Частота следования, кГц
Bi ₂ Se ₃	4	5.1	9.5	21.39
MoSe ₂	8.06	9	9.5	20.2
NiO	9.47	9	8.6	21.74

Геометрические параметры тейперов, использованных для изготовления модуляторов добротности, а также характеристики выходного импульсного лазерного излучения представлены в табл. 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Демонстрируется способ формирования цилиндрических перетяжек (тейперов) методом безопасного химического травления волоконных световодов для применений в сенсорике и лазерной технике. 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 2 дБ при его значении 5.7 мкм. На частотном рефлектометре определено пространственное положение источников потерь, которые возникают, главным образом, на конусах тейпера.

LMR-резонансы появляются в спектре пропускания тейперов диаметром 16–30 мкм после их покрытия тонкими слоями ZnSe или ZnTe. Показана перспектива таких LMR-сенсоров, поскольку положение резонансов резко зависит от показателя преломления окружающей среды. Тейперы диаметром <11 мкм успешно использованы нами в качестве основы при изготовлении модуляторов добротности для кольцевого импульсного волоконного эрбиевого лазера.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.М. Попову за помощь в проведении работ на частотном рефлектометре.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по госзаданию Института радиотехники и электроники РАН и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-07-00326).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Idachaba. F., Ike D.U., Hope O.* // Proceedings of the World Congress on Engineering. 2014. V. 1. P. 438.
2. *Arregui F.J., Villar I.D., Corres J.M., Goicoechea J., Zamarreño C.R., Elosua C., Hernaez M., Rivero P.J., Socorro A.B., Urrutia A., Sanchez P., Zubiate P., Lopez D., De Acha N., Matias I.R.* // Procedia Engineering. 2014. V. 87. P. 3.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.253>
3. *Kalokasidis K., Onder M., Trakatelli M.G., Richert B., Fritz K.* // Dermatology Research and Practice. 2013. V. 2013. Article ID 379725.
<https://doi.org/10.1155/2013/379725>
4. *Gräf S., Staupendahl G., Krämer A., Müller F.A.* // Optics and Lasers in Engineering. 2015. V. 66. P. 152.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.09.007>
5. *Vallet M., Barreaux J., Romanelli M., Pillet G., Thévenin J., Wang L., Brunel M.* // Appl. Optics. 2013. V. 52. Issue 22. P. 5402.
<https://doi.org/10.1364/AO.52.005402>
6. *Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A.* // Nature Photonics. 2013. V. 7. № 11. P. 861.
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.273>
7. *Rodríguez-Schwendtner E., González-Cano A., Díaz-Herrera N., Navarrete M.C., Esteban Ó.* // Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. V. 268. P. 150.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.083>
8. *Wang Q., Zhao W.-M.* // Optics and Lasers in Engineering, 2018. V. 100. P. 47.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.009>
9. *Villar I.D., Arregui F.J., Zamarreño C.R., Corres J., Barriain C., Goicoechea J., Cesar E., Hernaez M., Rivero P.J., Lerános A.B.S., Urrutia A., Sanchez P., Zubiate P., Lopez-Torres D., De Acha N., Ascorbe J., Matias I.* // Sensors and Actuators B. 2017. V. 240. P. 174.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.126>
10. *Paliwal N., John J.* // IEEE Sens. J. 2015. V. 15. № 10. P. 5361.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2448123>
11. *Rivero P.J., Urrutia A., Goicoechea J., Arregui F.J.* // Sensors and Actuators B: Chemical. 2012. V. 173. P. 244.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.07.010>
12. *Bilro L., Alberto N.J., Sá L.M., Pinto J. de L., Nogueira R.* // J. Lightwave Technology. 2011. V. 29. № 6. P. 864.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2105462>
13. *Tabib-Azar M., Sutapun B., Srikuhirin T., Lando J., Adamovsky G.* // Sensors and Actuators B. 2000. V. 84. P. 134.
[https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00352-0](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00352-0)
14. *Usha S.P., Gupta B.D.* // Appl Optics. 2017. V. 56. № 20. P. 5716.
<https://doi.org/10.1364/AO.56.005716>
15. *Kuznetsov P., Yakushcheva G., Savelyev E., Yapaskurt V., Shcherbakov V., Temiryasev A., Zakharov L., Jitov V., Sudas D.* // Lithuanian J. Physics. 2019. V. 59. № 4.

- P. 201.
<https://doi.org/10.3952/physics.v59i4.4136>
16. *Li H.H.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. V. 13. № 1. P. 103.
<https://doi.org/10.1063/1.555705>
17. *Koo J., Lee J., Chi C., Lee J.H.* // J. Optical Society of America B. 2014. V. 31. № 9. P. 2157.
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.31.002157>
18. *Gao L., Huang W., Zhang J.D., Zhu T., Zhang H., Zhao C.J., Zhang W., Zhang H.* // Appl. Optics. 2014. V. 53. № 23. P. 5117.
<https://doi.org/10.1364/AO.53.005117>
19. *Zhang X., Yao Y., Wang S., Ma G., Lei M., Liu W.* // J. Nonlinear Optical Physics & Materials. 2019. V. 28. № 2. P. 1950019.
<https://doi.org/10.1142/S021886351950019X>
20. *Kassani S.H., Khazaeizhad R., Jeong H., Nazari T., Yeom D., Oh K.* // Optical Materials Express. 2015. V. 5(2).
<https://doi.org/10.1364/OME.5.000373>
21. *Lee H., Kwon W.S., Kim J.H., Kang D., Kim S.* // Opt. Express., 2015. V. 23. № 17. P. 22116.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.022116>
22. *Ko S., Lee J., Koo J., Joo B.S., Gu M., Lee J.H.* // J. Lightwave Technology. 2016. V. 34. № 16. P. 3776.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2583061>
23. *Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E.* // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 666.
<https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>
24. *Brambilla G., Finazzi V., Richardson D.J.* // Opt. Express. 2004. V. 12. № 10. P. 2258. // <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.002258>
25. *Brambilla G.* // J. Optics. 2010. V. 12. Article ID 043001. P. 19.
<https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/4/043001>
26. *Kuznetsov P.I., Jitov V.A., Golant E.I., Savelyev E.A., Sudas D.P., Yakushcheva G.G., Golant K.M.* // Physica Scripta. 2019. V. 94. № 2. Article ID 025802.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaf550>