

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ МЕТОДОМ ПЕРЕТЯЖКИ

Дашков М.В.¹, Белов Э.В.², Сахабутдинов А.Ж.²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Российская Федерация, 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, 10

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В работе приведены результаты сравнительного анализа вариантов изготовления волоконно-оптических зондов методом перетяжки, проведенного на основе экспериментальных исследований. Представлены результаты измерения передаточных характеристик волоконно-оптических зондов при использовании в качестве чувствительного элемента зонда интерферометра Фабри-Перо.

Ключевые слова: оптическое волокно, сенсор, интерферометр Фабри-Перо, перетяжка, передаточная характеристика.

Введение

Множество различных биологических и медицинских исследований, где точные и ненавязчивые измерения температуры имеют важное значение, требуют применения сверхтонких химически и биологически нейтральных температурных зондов. Сверхтонкие биологически нейтральные зонды могут быть использованы в медицине, биологии, нейробиологии, то есть там, где требуется измерять температуру без значительного воздействия на биологические процессы (в теле, клетках, головном мозге или в других частях нервной системы). Сверхтонкие температурные зонды требуются в области микро- и нано-электроники, где они необходимы для контроля температуры на разных этапах для оценки тепловых характеристик и надежности компонентов, особенно в приложениях с экстремальными температурами или контактом с агрессивной средой.

Оптические кварцевые волокна устойчивы к электромагнитным помехам, химически инертны, нетоксичны и биологически нейтральны. Они не оказывают вмешательства в работу электроники, а физические характеристики чрезвычайно привлекательны для применения волокон в качестве чувствительных элементов измерительных систем в биомедицине [1–3], химии [4], технике и электронике [5–7]. Оптические волокна, диаметр которых обычно менее 125 мкм, могут быть использованы непосредственно в иглах или катетерах, так что их воздействие является одновременно и минимально инвазивным и высоко локализованным [8].

Принцип работы волоконно-оптических сенсоров основан на измерении выбранных характеристик окружающей среды посредством регистрации и анализа изменений параметров оптического излучения, распространяющегося в оптическом волокне, вызванные влиянием внешних воздействий [9].

По сравнению с другими типами волоконно-оптических датчиков, датчики на основе интерферометра Фабри-Перо [10] обладают такими преимуществами, как компактность, простота конструкции и изготовления. Существует две основные категории волоконно-

оптических интерферометров Фабри-Перо: внутренние и внешние, обе из которых могут быть реализованы в различных конфигурациях. Внутренние интерферометры Фабри-Перо формируются внутри оптического волокна между двумя коаксиальными волоконными отражателями [11]. Между торцом сколотого волокна и внешним отражателем формируются внешние полости Фабри-Перо. Внешний резонатор интерферометра может быть сплошным, заполненным воздухом (газом) или жидкостью, с внешним отражателем из тонкой пленки или выполненным в виде границы раздела среды резонатора с окружающей средой [12]. Внешний торцевой интерферометр Фабри-Перо является крайне привлекательным элементом для создания температурных чувствительных элементов [13].

Оптическое волокно по факту является миниатюрным для множества приложений. Однако в ряде биологических задач, требующих экстремально малой инвазивности и/или сверхлокализованного контакта, например, при необходимости контроля температуры отдельной клетки или бактерии, диаметр оптического волокна сопоставим с размерами объекта контроля. В данной работе мы поставили перед собой цель разработки технологии изготовления максимально заостренного торца оптического волокна при сохранении приемлемых значений передаточных характеристик для отраженного сигнала. Что позволит ему стать базовым конструктивным элементом, позволяющим формировать на острие внешний торцевой интерферометр Фабри-Перо из материала, физические характеристики которого чувствительны к изменению температуры.

Изготовление волоконно-оптических зондов методом перетяжки

Для решения поставленной задачи была выбрана технология перетяжки оптического волокна. Принцип изготовления заключается в разогревании участка оптического волокна до температуры плавления кварца и плавном растяжении с образованием области перетяжки. Самое тонкое место перетяжки носит название «талиа». На рис. 1 приведено схематическое изображение перетяжки оптического волокна [14].

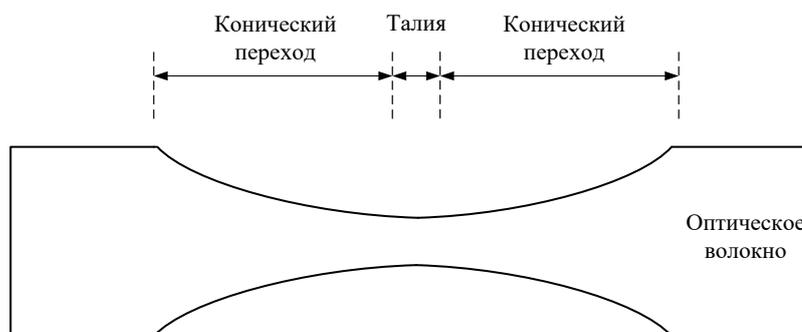


Рис.1. Перетяжка оптического волокна

Для изготовления волоконно-оптических зондов использовался сварочный аппарат для оптического волокна Ericsson FSU975, работающий в специализированном режиме. Процесс вытяжки осуществлялся в три этапа, для каждого из которых задавались управляющие параметры, определяющие ток и время электрической дуги. Подбор данных параметров производился опытным путем с учетом индивидуальных особенностей использованных оптических волокон.

Анализ параметров изготавливаемых образцов производился на основе изображений, полученных по видео и «тепловым» снимкам сварочного аппарата. «Тепловые» снимки регистрируют излучение нагретого тела в инфракрасном диапазоне и позволяют отличать по интенсивности свечения различные области оптического волокна.

Для оптических волокон, в которых сердцевина оптического волокна легирована диоксидом германия GeO_2 , соответствует более интенсивное свечение.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования и проведен сравнительный анализ трех вариантов изготовления волоконно-оптических зондов.

Вариант № 1. В качестве исходного элемента используется стандартное телекоммуникационное одномодовое оптическое волокно, соответствующее рекомендации МСЭ-Т G.652. На участке оптического волокна удалялось защитно-упрочняющее покрытие и производилась перетяжка до обеспечения требуемых размеров «тали» путем подбора подходящих величин тока и времени дуги. Далее в месте перетяжки производился скол с использованием ручного или штатного прецизионного скалывателя, настраиваемого индивидуально (см. рис. 2). При этом торец волоконно-оптического зонда представлял собой скол под углом, близким к 90° .

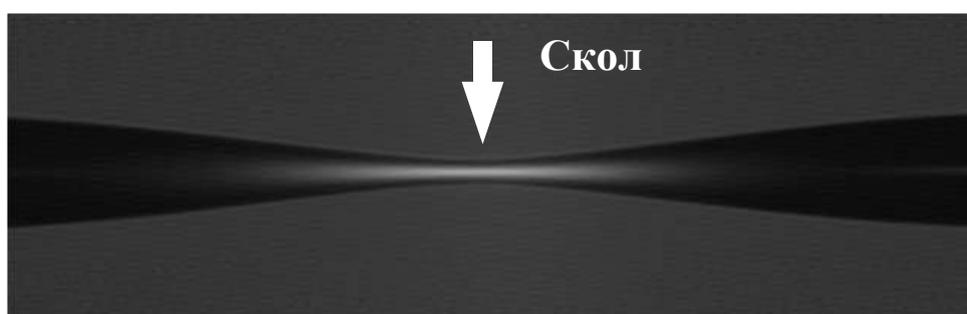


Рис. 2. Тепловой снимок перетяжки при изготовлении в соответствии с Вариантом № 1

Вариант № 2. В качестве исходного элемента используется стандартное телекоммуникационное одномодовое оптическое волокно, соответствующее рекомендации МСЭ-Т G.652. Участок оптического волокна с удаленным защитно-упрочняющим покрытием помещался в зоне действия электрической дуги сварочного аппарата. Программа вытяжки подбиралась таким образом, чтобы перетяжка осуществлялась до разрыва «тали» и последующего оплавления торцов с формированием на торце микролинзы. На рис. 3 приведены «тепловые» снимки, полученные после разрыва перетяжки.



Рис. 3. Тепловой снимок перетяжки при изготовлении в соответствии с Вариантом № 2

Вариант № 3. В качестве исходного элемента используется место сварного соединения стандартного телекоммуникационного одномодового оптического волокна, соответствующего рек. МСЭ-Т G.652, и оптического волокна со значительно увеличенным размером сердцевины (например, многомодовое оптическое волокно). Перетяжка осуществляется вблизи зоны сварного соединения до разрыва «тали» и последующего оплавления торцов с формированием микролинзы на торце. При этом одномодовое волокно служит в качестве транспортного элемента, а оптическое волокно с увеличенным размером сердцевины – в качестве согласующего элемента.

Изготовление зонда производилось в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Транспортные и согласующие оптические волокна сращиваются друг с другом с использованием соответствующих программ сварки (разрабатываются отдельно для каждой пары разных типов волокон). Согласование соосное, без смещений.

2. Точка сварного соединения ориентируется относительно области интенсивности горения дуги по заданным параметрам, определяемым в ходе экспериментальных исследований. Местоположение сварного соединения оптических волокон различного типа на видеоизображении сварочного аппарата, как правило, однозначно идентифицируется в виде вертикальной черной полосы в области сердцевины.

На рис. 4 приведен пример «тепловых» снимков в процессе изготовления.

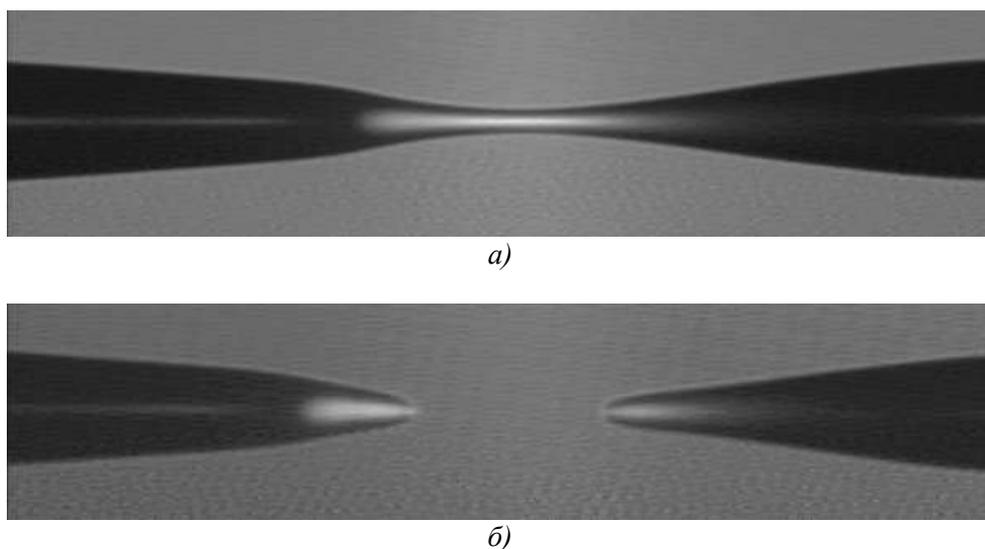


Рис. 4. Тепловой снимок перетяжки при изготовлении в соответствии с методом №3:
а) перетяжка; б) формирование микролинз

Результаты экспериментальных исследований

Для определения передаточных характеристик зонда использовалась схема, представленная на рис. 5.

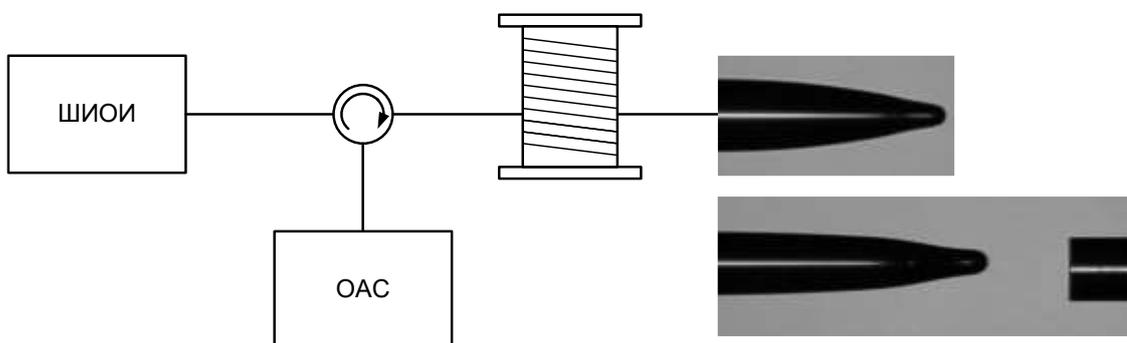


Рис. 5. Схема измерения передаточных характеристик зонда

В качестве широкополосного источника оптического излучения (ШИОИ) использовался суперлюминисцентный светодиод с центральной длиной волны 1550 нм. Регистрация оптического излучения производилась оптическим анализатором спектра (ОАС) Yokogawa AQ6370. Для развязки прямого и обратного потоков оптического

излучения использовался оптический циркулятор. К общему порту циркулятора подключалась катушка стандартного телекоммуникационного одномодового оптического волокна Corning SMF-28e+ длиной 500 метров.

Предварительно производилось измерение опорного значения для отражения от торца транспортного оптического волокна, сколотого под углом 90^0 . После изготовления зонда снималась спектральная характеристика сигнала, отраженного от торца зонда для свободного пространства и при реализации резонатора Фабри-Перо при различных размерах резонатора (заполнение резонатора - воздух).

Результаты для образцов, изготовленных по Варианту № 1.

В результате экспериментальных исследований были выявлены основные недостатки данного метода:

- низкий уровень воспроизводимости результатов при производстве скола в области перетяжки, заключающийся в сложности позиционирования перетяжки относительно ножа и индивидуальной настройки высоты ножа при использовании штатных скалывателей для оптического волокна;
- низкий уровень передаточной характеристики для отраженного излучения и при использовании в составе интерферометра Фабри-Перо для торцов с диаметром менее 35 мм;
- контрастность интерференционной картины для изготовленных образцов не превышала 0.15 дБ.

Результаты для образцов, изготовленных по Варианту № 2.

В результате экспериментальных исследований был выявлен основной недостаток данного метода - низкий уровень передаточной характеристики для отраженного излучения и при использовании в составе интерферометра Фабри-Перо.

Результаты для образцов, изготовленных по Варианту № 3.

Для исследования были изготовлены образцы зондов с использованием многомодового оптического волокна, соответствующего рек. МСЭ-Т G.651 (50/125 мкм) с градиентным профилем показателя преломления.

Реализованный зонд анализировался по видеоизображению сварочного аппарата (PAS) с использованием микроскопа и окулярного винтового микрометра МОВ-1-15х (для калибровки использовался объект-микрометр проходящего света с ценой деления 0.01 мм).

На рис. 6 приведены изображения, полученные при различных значениях увеличения.

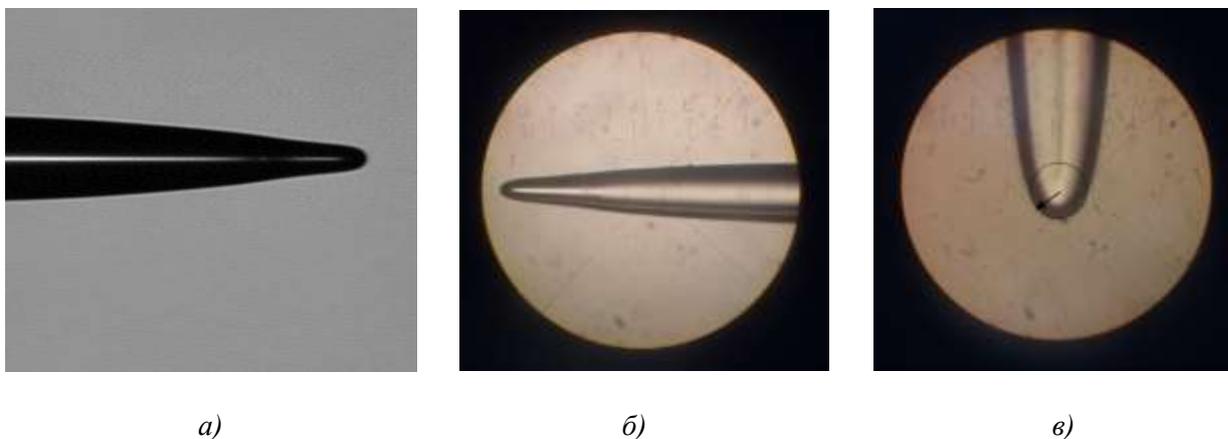


Рис. 6. Изображения зонда: а) видеоизображения сварочного аппарата; б), в) полученные на микроскопе при различных значениях увеличения

В результате анализа было определено, что радиус линзовой части на поверхности зонда в среднем составлял порядка 15 мкм.

На рис. 7,а) приведены примеры получаемых спектральных характеристик: линия 1 соответствует опорной характеристике отражения от торца транспортного волокна; линия 2 соответствует отражению от торца зонда для свободного пространства; линии 3 и 4 соответствуют характеристикам отражения интерферометра Фабри-Перо при различных размерах резонатора.

На рис. 7,б) приведена спектральная характеристика затухания, вычисленная как разность характеристик 1 и 2, демонстрирующая снижение уровня отражения от торца зонда, по сравнению с торцом одномодового оптического волокна, сколотого под углом 90^0 .

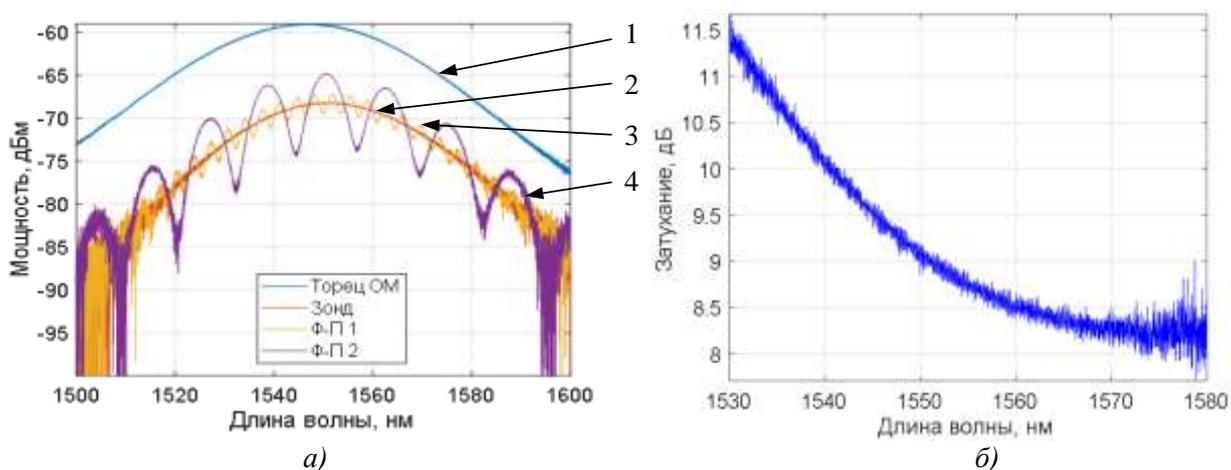


Рис. 7. Спектральные характеристики отражения волоконно-оптического зонда

Анализируя полученные зависимости можно отметить, что снижение уровня отражения от торца зонда, по сравнению с торцом одномодового оптического волокна, сколотого под углом 90^0 , может составлять от 8 до 11 дБ в диапазоне длине волн 1530 – 1580 нм.

Экспериментальные исследования продемонстрировали работоспособность зонда в составе внешнего интерферометра Фабри-Перо. Для свободного пространства и использования в качестве второго отражающего элемента торца оптического волокна была определена зависимость контрастности картины интерференции от длины резонатора: при увеличении длины резонатора от 100 до 335 мкм контрастность уменьшалась от 9.55 до 2.26 дБ.

Выводы

В работе было предложено три метода изготовления волоконно-оптических зондов на основе технологии перетяжки с использованием сварочного аппарата для оптического волокна.

На основе экспериментальных исследований в результате сравнительного анализа были определены преимущества метода с использованием согласующего волокна. Принцип реализации основан на сращивании транспортного оптического волокна с согласующим оптическим волокном, отличающимся увеличенным размером сердцевины, и последующей перетяжкой с формированием микролинзы на торце.

Для изготовленных по разработанному методу образцов радиус микролинзы в среднем составлял порядка 15 мкм.

В результате исследования передаточных характеристик изготовленных образцов было определено, что снижение уровня отражения от торца зонда, по сравнению с торцом одномодового оптического волокна, сколотого под углом 90^0 , может составлять от 8 до 11 дБ в диапазоне длин волн 1530 – 1580 нм.

Список литературы

1. Tang, S. Fabry-Perot Interferometer Based on a Fiber-Tip Fixed-Supported Bridge for Fast Glucose Concentration Measurement / S. Tang, M. Zou, C. Zhao et al. // *Biosensors*. - 2022. - 12. - 391, doi:10.3390/bios12060391
2. Ahmed, D. Design and Implementation of the Temperature Sensor for Health Care Monitoring Based on Optical Fiber Technology / D. Ahmed, A. Ali, S. Kadhim, S. Fandi // *ETJ*. - 2021. - 39. - 1583–1587, doi:10.30684/etj.v39i10.2170.
3. Roriz, P. Optical Fiber Temperature Sensors and Their Biomedical Applications / P. Roriz, S. Silva, O. Frazão, S. Novais // *Sensors*. - 2020. - 20. - 2113, doi:10.3390/s20072113.
4. Seitz, W.R. Chemical Sensors Based on Immobilized Indicators and Fiber Optics / W.R. Seitz, M.J. Sepaniak // *C R C Critical Reviews in Analytical Chemistry*. - 1988. - 19. - 135–173, doi:10.1080/10408348808542810.
5. Касимова, Д.И. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / Д.И. Касимова, А.А. Кузнецов, П.П. Крыницкий и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2013.
6. Agliullin, T.A. Tire Strain Measurement System Based on Addressed FBG-Structures / T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin, O.G. Morozov et al. // *In Proceedings of the 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications; March 1 2019*. - pp. 1–5.
7. PurtoV, V. Few and Multisensor Catheters for the High-Resolution Manometry on the Basis of Addressed Fiber Bragg Gratings / V. PurtoV, A. Sakhabutdinov, I.Nureev et al. *AP*. - 2018. - 310–335, doi:10.15593/2411-4367/2018.4.02.
8. Tosi, D. Fiber Optic Sensors for Biomedical Applications / D. Tosi, S. Poeggel, I. Iordachita, E.Schena // *In Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors; Alemohammad, H., Ed.; Butterworth-Heinemann*. - 2018. -pp. 301–333, ISBN 978-0-12-803131-5.
9. Kashyap, R. Photosensitive Optical Fibers: Devices and Applications / R. Kashyap // *Optical Fiber Technology*. - 1994. - 1. - P.17–34, doi:10.1006/ofte.1994.1003.
10. Fabry, C. Sur Les Franges Des Lames Minces Argentées et Leur Application à La Mesure de Petites Épaisseurs d'air / C. Fabry, A. Pérot // *Ann. Chim. Phys.* - 1897. - 12. - 459–501.
11. Gong, Y.-J.R. Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors: An Introduction / Y.-J.R. Gong, Zeng-Ling Ran, Yuan // *CRC Press: Boca Raton, 2017; ISBN 978-1-315-12099-7*.
12. Islam, Md.R. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review. Md.R. Islam, M.Ali, M.-H. Lai, K.-S. Lim, H. Ahmad // *Sensors*. - 2014. - 14. - 7451–7488, doi:10.3390/s140407451.
13. Ermakova, Y.G. Thermogenetic Neurostimulation with Single-Cell Resolution / Ermakova, Y.G.; Lanin, A.A.; Fedotov, I.V. et al. // *Nat Commun*. - 2017. - 8. - 15362, doi:10.1038/ncomms15362.
14. Birks, T.A. The shape of fiber tapers / T.A. Birks, Y.W. Li // *Journal of Lightwave Technology*. – 1992. – 10. – 4. – P.432 – 438, doi:10.1109/50.134196.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MANUFACTURING FIBER OPTIC PROBES USING THE TAPERING TECHNIQUE

Dashkov M.V.¹, Belov E.V.², Sahabutdinov A.Zh.²

¹Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Samara, st. L. Tolstoy, 10

²Kazan National Research Technical University after named A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper provides a comparative analysis of methods for manufacturing fiber-optic probes using the tapering technique based on experimental studies. The transfer characteristics of fiber-optic probes for application in Fabry-Perot interferometer were measured and results are presented.

Keywords. Optical fiber, sensor, Fabry-Perot interferometer, tapering, transfer characteristic.

Дата отправки статьи в редакцию 19.10.2023г