

The proposed method of speech compression without pauses allows providing compression ratios up to 12 times, depending on the starting bit of mentioned data samples.

Keywords: speech segment, speech data, the power distribution, the subband matrix, subband eigenvectors of subband matrix, information frequency intervals, codebook quasi-optimal quantizers, compression ratio

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.1.02

Zhilyakov Evgeny Georgiyevich, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy str., Belgorod, 308015, Russian Federation; the Head of Department of Information-telecommunication systems and technologies, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +74722301392. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Belov Sergey Pavlovich, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy str., Belgorod, 308015, Russian Federation; Professor of the Department Information-telecommunication systems and technologies, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79803236104. E-mail: belov@bsu.edu.ru

Belov Alexander Sergeevich, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy str., Belgorod, 308015, Russian Federation; Assistant Professor of the Department Information-telecommunication systems and technologies, PhD in Technical Sciences, Assistant Professor. Tel.: +79194368685. E-mail: belov_as@bsu.edu.ru.

Belov Andrey Sergeevich, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy str., Belgorod, 308015, Russian Federation; the Chief of Laboratory of Department Information-telecommunication systems and technologies. Tel.: +79803236114.

Medvedeva Alexandra Alexandrovna, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy str., Belgorod, 308015, Russian Federation; Senior Lecturer of the Department Information-telecommunication systems and technologies. Tel.: +79606375523. E-mail: medvedeva_aa@bsu.edu.ru

References

1. Sergienko V.S., Barinov V.V. *Szhatie dannyh, rechi, zvuka i izobrazhenij v telekommunikacionnyh sistemah* [Compression of data, speech, sound and images in telecommunication systems]. Moscow, Radio Soft Publ., 2009. 360 p.
2. Sviridenko V.A. *Szhatie dannyh v sistemah sbora i peredachi informacii* [Data compression in systems of information collection and transmission]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1985. 184 p.
3. Sjelomon D. *Szhatie dannyh, izobrazhenij i zvuka* [Compressing of data, images and sound]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2004. 368 p.
4. Sheluhina O.I. *Cifrovaja obrabotka i peredacha rechi* [Digital processing and voice transmission]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 2000. 456 p.

Received 25.03.2016

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 535.3; 621.373.826; 681.7; 53.082.5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАКРОДЕФЕКТОВ В СТРУКТУРЕ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Андреев В.А.¹, Бурдин А.В.¹, Бурдин В.А.¹, Василец А.А.², Гаврюшин С.А.¹, Евтушенко А.С.¹,
Казаков В.С.¹, Морозов О.Г.², Севрук Н.Л.¹, Соколов Е.Д.¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, РФ
E-mail: bourdine@yandex.ru

В работе предложена методика формирования прецизионных макроструктурных дефектов типа «перетяжка» и «бочка» в кварцевых многомодовых оптических волокнах с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата и его модифицированного соответствующим образом программного обеспечения. Приведены результаты ее экспериментальной апробации. Разработаны практические рекомендации по выбору установок параметров

программ. Представлены результаты исследований стабильности воспроизведения макродефектов как с точки зрения их геометрии, так и базового параметра передачи – вносимых потерь.

Ключевые слова: макроструктурные дефекты, «перетяжки», «бочки», многомодовые оптические волокна, сварочный аппарат, ток дуги, время подачи дуги, вносимые потери, геометрические параметры дефекта

Введение

На сегодняшний день известно достаточно большое количество публикаций, посвященных исследованию влияния макроструктурных дефектов, сформированных в кварцевых волоконных световодах, на характер распространения оптического излучения в таких оптических волокнах (ОВ) с нанесенными дефектами и их практическому приложению в различных областях волоконной оптики и фотоники.

В общем случае среди подобных дефектов целесообразно выделить так называемые «перетяжки» («tapers», в отдельных источниках известные как «конические ответвители» – см. рис. 1а) и «бочки» («up-tapers», в отдельных источниках известные как «bubbles» – «пузыри» – см. рис. 2а), которые находят свое применение в качестве способов решения задачи сращивания волокон не только с разбросом технологических параметров, в частности например диаметров сердцевин или диаметра пятна моды [1-5], но и неодинаковой структуры [6-7], в различных устройствах согласования источников оптического излучения с ОВ [3-5; 8-11], а также в локальных сенсорах внешних воздействий измерительных систем на базе волоконно-оптических датчиков [12-20], интерферометрии [16-20] и устройствах управления модовым составом оптического излучения [3-5; 9-11; 8-10, 21]. Нередко эти дефекты используются в сочетании с волоконными решетками Брэгга (ВРБ). При этом они могут наноситься как в непосредственной близости от ВРБ – буквально на расстоянии нескольких диаметров световода, так и сами решетки могут быть записаны на сформированный дефект [22-27]. Подобное сочетание также ориентировано в основном на применение в различных приложениях интерферометрии и сенсорики, однако при этом для подавляющего большинства работ и решетка, и дефект наносятся на одномодовые ОВ, а экспериментальные исследования, результаты которых представлены в указанных публикациях, ориентированы исключительно на анализ изменений спектрального отклика оптического сигнала при прохождении данной схемы в одномодовом режиме. Поэтому для ряда практических приложений отдельный интерес представляет измерение как импульсного, так и спектрального откликов при возбуждении когерентными источниками оптического излучения многомодовые ОВ с включением отрезков также многомодовых волоконных световодов, на которые нанесены ВРБ в сочетании с упомянутыми макродефектами («боч-

ка» или «перетяжка») в маломодовом режиме передачи оптического сигнала.

В общем случае формирование прецизионных макроструктурных дефектов, в том числе упомянутых выше «перетяжек» и «бочек», с заданными геометрическими параметрами в оптических волноводах требует применения дорогостоящего специализированного лабораторного оборудования. Вместе с тем известен ряд публикаций – например [27-28] и др., в которых демонстрируется возможность реализации данных макродефектов с помощью традиционных полевых аппаратов для сварки телекоммуникационных кварцевых ОВ. Данная работа посвящена разработке и экспериментальной апробации методики формирования прецизионных макроструктурных дефектов обоих указанных типов в кварцевых телекоммуникационных ОВ с помощью комплекта полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 [29].

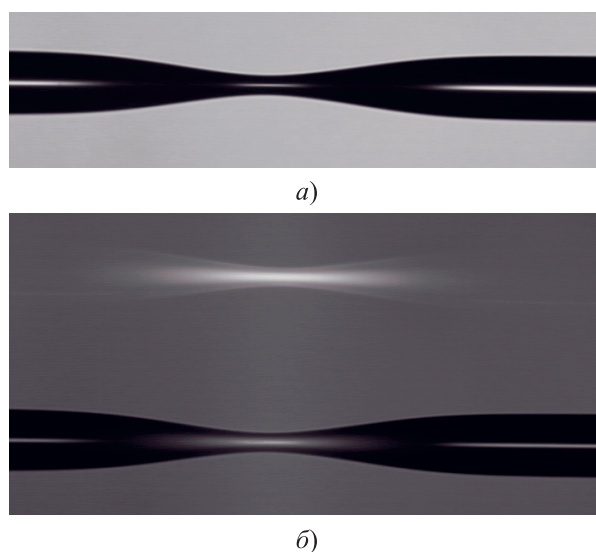


Рис. 1. Скриншоты дисплея сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по окончании процесса нанесения «перетяжки»: а) фотография дефекта; б) тепловое изображение

Общие вопросы формирования макродефектов в структуре кварцевых оптических волокон с помощью полевого сварочного аппарата

Как было отмечено выше, для решения данной задачи использовался штатный комплект полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 [29]. Предварительно, используя типовые установки программного обеспечения, в отрезках промыш-

ленных образцов многомодовых ОВ 50/125 категории OM2+/OM3 было успешно сформировано несколько пилотных образцов искомых макроструктурных дефектов обоих типов. Так, для нанесения «перетяжки» применялась программа №9 «SM Fiber Lens» с предустановленными параметрами. В свою очередь, «бочка» формировалась в процессе выполнения сварного соединения двух отрезков многомодовых ОВ также кат. OM2+/OM3 по программе №4 «Normal MM – MM» с последующей доводкой световодов «вручную» для формирования искомого дефекта непосредственно в процессе подачи дуги. На рис. 1-2 показаны примеры пилотных образцов полученных прецизионных макродефектов на аппарате Ericsson FSU-975 (*a* – скриншот макродефекта, *b* – его тепловое изображение).

Вместе с тем с точки зрения практических приложений в измерительных схемах разного назначения, возникает задача возможности нанесения дефекта с заданными геометрическими параметрами – в частности, длины и диаметра в зоне обжига. Последние непосредственно определяются установленными параметрами программы. Кроме того, для формирования «бочки» еще одним немаловажным фактором является также навык оператора реализации дополнительной подачи ОВ в ручном режиме в зону обжига дуги электродов.

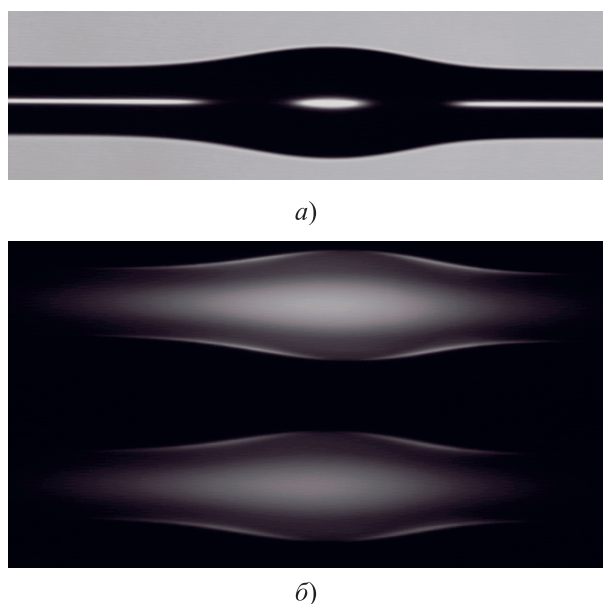


Рис. 2. Скриншоты дисплея сварочного аппарата Ericsson FSU-975 по окончании процесса формирования «бочки»: *a*) фотография дефекта; *b*) тепловое изображение

Вышесказанное требует проведения дополнительных исследований влияния выбора комбинации соответствующих установок программы свар-

ки на геометрию дефекта, а также стабильности его воспроизведения при этих параметрах как с точки зрения также геометрии, так и вносимых потерь. При этом возникает проблема корректного определения длины и диаметра дефекта. Очевидным решением данной задачи является визуальная оценка параметров дефекта по сделанным в процессе сварки скриншотам и тепловым изображениям зоны обжига, снимаемым с видеовыхода сварочного аппарата. Однако вопрос перехода от относительных значений геометрических параметров, нормированных на диаметр оболочки ОВ, к фактическим остается открытым: известно, что для многомодовых ОВ отклонение диаметра оболочки от номинального значения 125 мкм может достигать до 2 мкм включительно [30-31]. В результате на первом этапе потребовалось проведение дополнительной разработки методики оценивания геометрических параметров макроструктурного дефекта по скриншотам дисплея сварочного аппарата.

Разработка методики оценивания геометрических параметров прецизионных макроструктурных дефектов

Для решения сформулированной выше задачи было подготовлено 12 отрезков промышленных образцов многомодовых ОВ категории OM2 длиной не менее 0,5 м каждый и далее с помощью анализатора ОВ EXFO NR-9200HR Optical Fiber Analyzer проведены измерения профиля показателя преломления, протоколы которых включают в себя непосредственно массивы данных радиальной координаты в условных сечениях «X» и «Y». Таким образом, значение радиальной координаты, локализованное по протоколу на границе раздела оболочка/иммерсионная жидкость, принималось за действительное в левой или правой части заданного сечения (см. рис. 3).

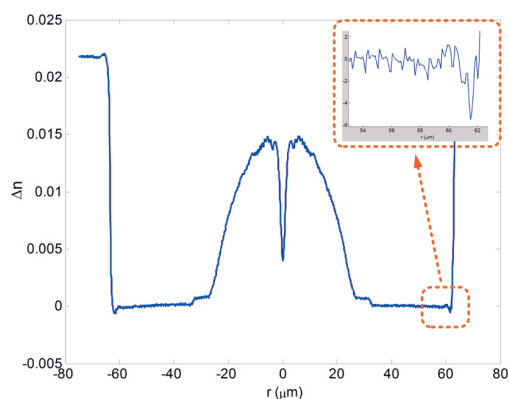


Рис. 3. Протокол измерения профиля показателя преломления тестируемого отрезка образца ОВ №A04-02: условное сечение «X», диаметр оболочки 123,44 мкм

Для последующей идентификации концы тестируемых отрезков ОВ после погружения в кювету анализатора EXFO соответствующим образом маркировались, затем этот же отмеченный конец ОВ закладывался в каретку сварочного аппарата Ericsson FSU-975, цифровое изображение которого с дисплея через видеовыход выводилось в ПЭВМ и, после соответствующей обработки в графическом редакторе, также позволяло получить искомый диаметр ОВ по оболочке уже непосредственно в пикселях (см. рис. 4). Данная процедура повторялась для каждого из 12 образцов. Таким образом, в результате сопоставления количества пикселей изображения ОВ и действительного значения диаметра ОВ по оболочке, согласно протоколу измерения, после проведения соответствующего статистического анализа было получено эмпирическое значение поправочного коэффициента 1,523 мкм/пиксель. Это позволило далее непосредственно перейти к исследованию влияния установок программного обеспечения на геометрические параметры формируемого макроструктурного дефекта.

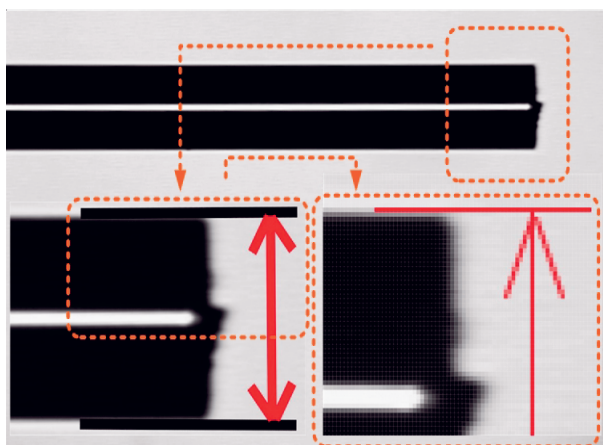


Рис. 4. Визуальная оценки геометрических параметров ОВ по результатам анализа выведенного на экране дисплея сварочного аппарата изображения ОВ: условное сечение «X» после обработки в графическом редакторе (коррекция цвета и контраста) – 81 пиксель

Экспериментальные исследования зависимости геометрических параметров «перетяжек» от установок программного обеспечения сварочного аппарата

Как было отмечено выше, для нанесения «перетяжек» используется программа №9 «SM Fiber Lens». Согласно [29], именно на втором

этапе подачи дуги осуществляется процедура вытяжки зоны обжига ОВ. Поэтому можно предположить, что время подачи дуги «2» (Fusion Time 2) и ток дуги «2» (Fusion Current 2) в основном будут определять геометрию «перетяжки». По умолчанию значения указанных параметров составляют 7 с и 12 мА, соответственно.

На первом этапе исследовалось влияние установки тока дуги «2» при фиксированном времени сварки «2». Значение данного параметра варьировалось начиная от 0 до 14 мА включительно. При этом последующее увеличение приводило к прожиганию перетяжки. Сварка осуществлялась между волокнами строительных длин катушек многомодовых ОВ 50/125 категории OM2+/OM3 протяженностью по 400 м каждая, предварительно оконцованных пигтейлами FC/UPC. После окончания процесса нанесения «перетяжки» с помощью оптического рефлектометра обратного рассеяния (OTDR) проводился тест на прохождение оптического сигнала. В качестве примера на рис. 5 представлена полученная в результате сопоставления данных диаграмма зависимости диаметра «перетяжки» от тока дуги «2».

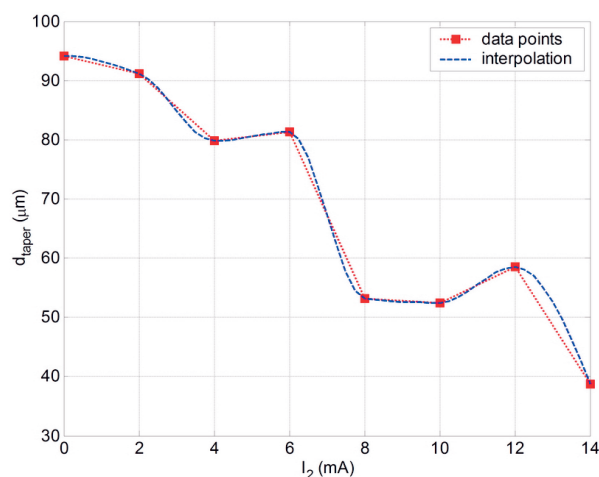


Рис. 5. Диаграмма зависимости диаметра «перетяжки» d_{taper} в зоне обжига от установленного значения тока дуги «2»

На следующем этапе варьировалось время подачи дуги «2» при фиксированном токе дуги «2» 10 мА. Значение данного параметра исследовалось в диапазоне от 0 до 12 с, при этом последующее его увеличение приводило к разрыву «перетяжки». Диаграмма зависимости диаметра «перетяжки» от времени подачи дуги «2» приведена на рис. 6.

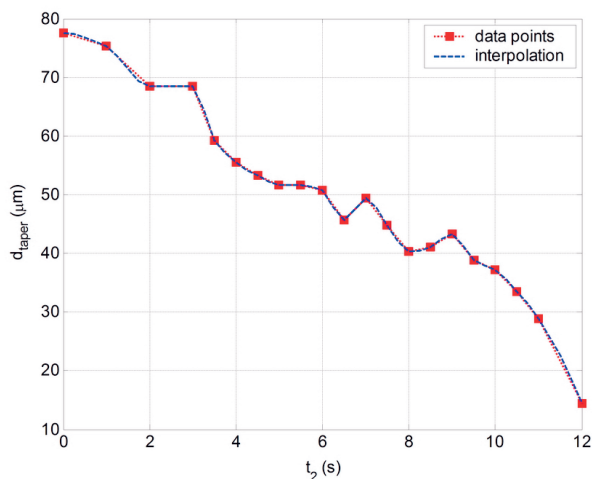


Рис. 6. Диаграмма зависимости диаметра «перетяжки» в зоне обжига от установленного значения времени подачи дуги «2»

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволил выбрать наиболее оптимальную, с точки зрения соотношения диаметра и длины «перетяжки», комбинацию параметров дуги этапа «2»: время подачи дуги «2» 6 с, ток подачи дуги «2» 10 мА. В данном случае обеспечивается уменьшение диаметра световода в зоне обжига не менее чем в два раза по сравнению с диаметром ОВ оболочки.

Однако при этом область дефекта достаточно прочная, при извлечении из юстировочных кареток сварочного аппарата не разрушается, а последующее подключение OTDR демонстрирует возможность прохождения оптического сигнала через данную сформированную волоконно-оптическую структуру.

Экспериментальные исследования зависимости геометрических параметров «бочек» от установок программного обеспечения сварочного аппарата

Аналогичные исследования были проведены для установок программы сварки при нанесении «бочек». Как было отмечено выше, для нанесения перетяжек использовалась программа №04 «Normal MM + MM» для сварки стандартных многомодовых ОВ с последующей доводкой световодов «вручную» для формирования искомого дефекта непосредственно в процессе подачи дуги. При этом уже на стадии изготовления пилотных «бочек» потребовалась коррекция ряда установок программы исходя из визуальной оценки качества полученного образца (плавность перехода, габариты, глубина прожигания и пр.).

В частности, возникла необходимость в усиленном разогреве торцов ОВ на стадии выполнения сварного соединения до их непосредственного соприкосновения, так как при стандартных предустановленных времени подачи и тока дуги «1» (2с и 12мА) диаметр сформированной «бочка» в зоне обжига слабо отличался от исходного диаметра оболочки ОВ. В результате эмпирического подбора указанные параметры были увеличены до 5с и 15мА, соответственно. Также потребовалось изменение предустановленных по умолчанию аналогичных параметров «релаксационного» этапа «3» сварки (1с и 12,5мА), которые не обеспечивали искомую плавность перехода «бочки», сформированной, как было отмечено выше, в результате доводки волокон в «ручном» режиме на этапе «2» сварки. Таким образом, время подачи и ток дуги «3» в результате серии проведенных экспериментальных реализаций пилотных образцов «бочек» были увеличены до 5с и 10мА, соответственно.

После коррекции перечисленных установок программы №04 далее были проведены исследования влияния параметров этапа «2» выполнения сварного соединения, непосредственно определяющего процесс сплавления сращиваемых ОВ, на геометрические параметры «бочки». По аналогии с предыдущим пунктом, первая серия тестов предполагала получение зависимости тока дуги «2» при фиксированном времени сварки «2» 7 с (увеличено на 5 с относительно предустановленного для реализации вспомогательной доводки торцов ОВ). Здесь значение тока дуги «2» варьировалось в диапазоне от 0 до 20мА включительно. Результаты сопоставления диаметра $d_{\text{up-taper}}$ «бочки» в виде диаграммы зависимости от тока дуги «2» представлены на рис. 7.

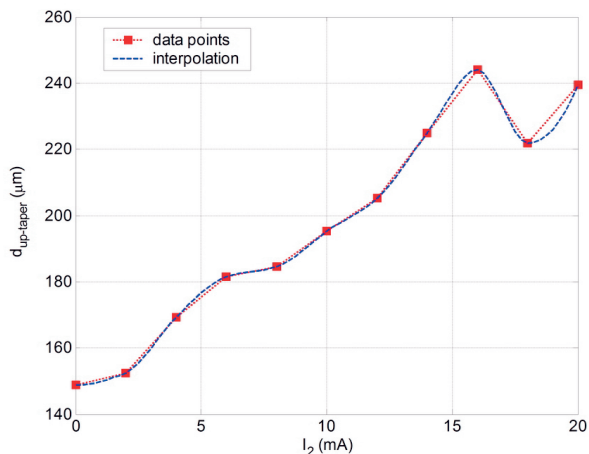


Рис. 7. Диаграмма зависимости диаметра «бочки» $d_{\text{up-taper}}$ в зоне обжига от установленного значения тока дуги «2»

На следующей стадии испытаний варьировалось время подачи дуги при фиксированном токе дуги «2» 15 мА. Значение данного параметра исследовалось в диапазоне от 0 до 10 с, при этом последующее его увеличение приводило к прожиганию «бочки». Диаграмма зависимости диаметра «бочки» $d_{up-taper}$ от времени подачи дуги «2» приведена на рис. 8.

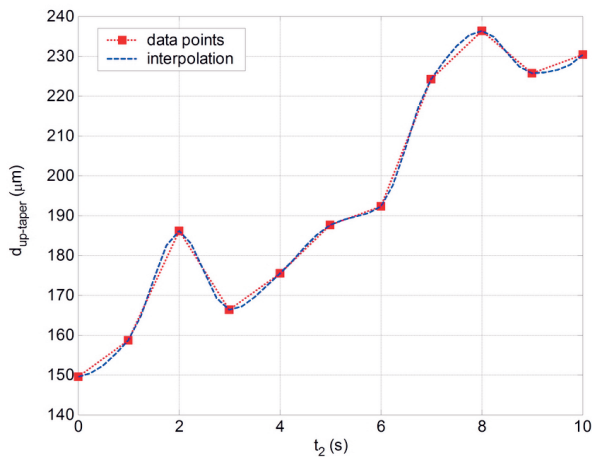


Рис. 8. Диаграмма зависимости диаметра «бочки» $d_{up-taper}$ в зоне обжига от установленного значения времени подачи дуги «2»

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволил выбрать наиболее оптимальную, с точки зрения соотношения диаметра и длины «бочки», комбинацию параметров дуги этапа «2», при соответствующих практических навыках оператора, необходимых для вспомогательной доводки световодов «вручную» в процессе подачи дуги «2», а также результатов контроля прохождения оптического сигнала через такую волоконно-оптическую структуру, выполняемого с помощью OTDR.

Таким образом, ток дуги «2» 15 мА гарантированно обеспечивает увеличение диаметра дефекта не менее чем в 1,5 раза относительно исходного диаметра оболочки ОВ 125 мкм, а время подачи дуги «2» 5 с – сформировать «бочку» без внесения дополнительных искажений в структуру световода, которые, как показала серия тестов, возникают при последующем увеличении указанного параметра и негативно влияют на вносимые потери.

Экспериментальные исследования стабильности воспроизведения прецизионных макродефектов в структуре кварцевых волоконных световодов

Следующая серия тестов включала в себя экспериментальные статистические исследования стабильности воспроизведения геометрических

и параметров передачи макродефектов обоих типов, формируемых в структуре кварцевых многомодовых ОВ по скорректированным соответствующим образом программам №09 и №04 сварочного аппарата Ericsson FSU-975.

На первом этапе исследовались «перетяжки»: для этой цели на стыке одних и тех же промышленных образцов строительных длин многомодовых ОВ категории OM2+/OM3 (катушки длиной по 400 м) были многократно сформированы данные дефекты. На основании предложенной методики оценивания геометрических параметров по окончании нанесения дефекта определялись диаметр d_{taper} и длина L_{taper} «перетяжки». Затем с помощью OTDR на рабочей длине волны $\lambda = 1310$ нм методом обратного рассеяния осуществлялись измерения вносимых потерь.

Всего был подготовлен 31 образец описанной волоконно-оптической структуры, из них 3 «перетяжки» были разрушены либо непосредственно при подаче дуги, либо в процессе извлечения из юстировочных кареток. Также через каждые 10 испытаний проводилась дуговая чистка электродов сварочного аппарата в соответствующем режиме [29].

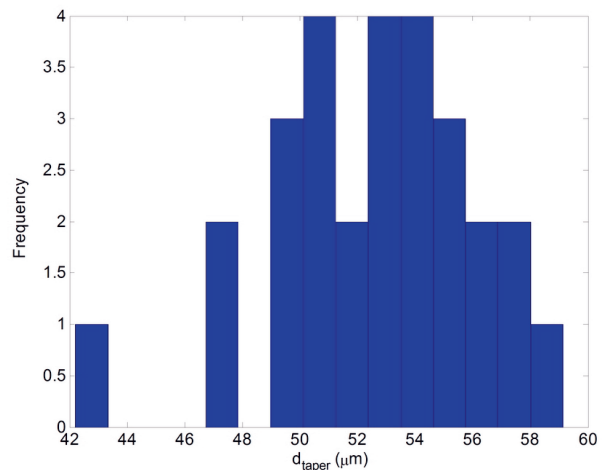


Рис. 9. Гистограмма статистики значений диаметра «перетяжки» d_{taper}

На рис. 9-10 представлены гистограммы статистики распределения значений диаметра «перетяжки» и соответствующих значений вносимых потерь. Несмотря на сравнительно большой разброс значений диаметра полученных образцов, который, за исключением отдельных образцов, может достигать до 12% относительно среднего $d_{taper} = 52,62$ мкм, при формировании «перетяжки» по скорректированной соответствующим образом программе вносимые потери в общем случае не будут превышать 1,35 дБ.

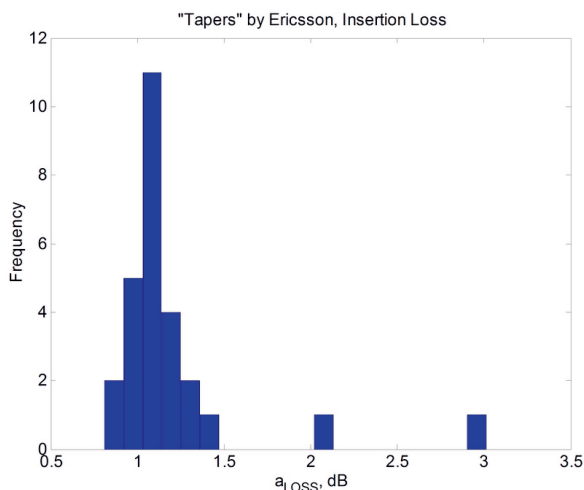


Рис. 10. Гистограмма вносимых потерь на «перетяжках»

Аналогичным образом далее по скорректированной программе №04 на стыке тех же промышленных образцов строительных длин многомодовых ОВ категории OM2+/OM3 были многократно сформированы «бочки». Так же, как и в предыдущем случае, после нанесения дефекта проводилась оценка его геометрических параметров и далее с помощью OTDR проводились измерения вносимых потерь. Всего было проведено 40 тестов.

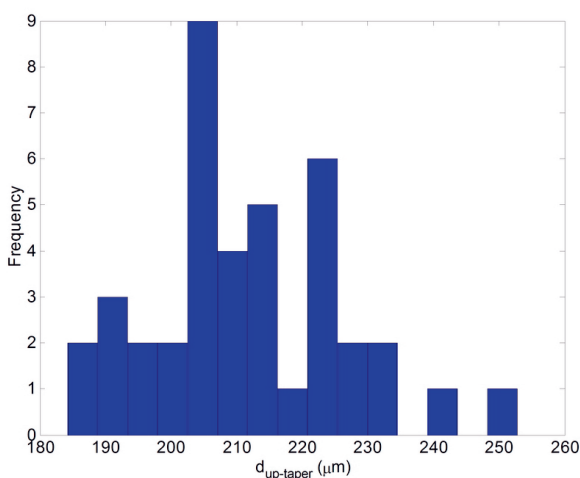


Рис. 11. Гистограмма статистики значений диаметра «бочки» $d_{up-taper}$

Гистограммы статистики распределения значений диаметра $d_{up-taper}$ и вносимых потерь сформированных «бочек» приведены на рис. 11-12. Согласно полученным результатам, при формировании «бочки» по скорректированной соответствующим образом программе №04 вносимые потери в подавляющем большинстве случаев не более 3 дБ.

Однако для отдельных образцов дефекты могут достигать больших значений (вплоть до 5,5 дБ), что объясняется необходимостью выполнения вспомогательной доводки ОВ оператором непосредственно в процессе подачи дуги в ручном режиме. Этот же фактор определяет и увеличенный диапазон разброса диаметров дефектов, который для большинства реализованных «бочек» составляет до 15% относительно среднего $d_{up-taper} = 211,58$ мкм.

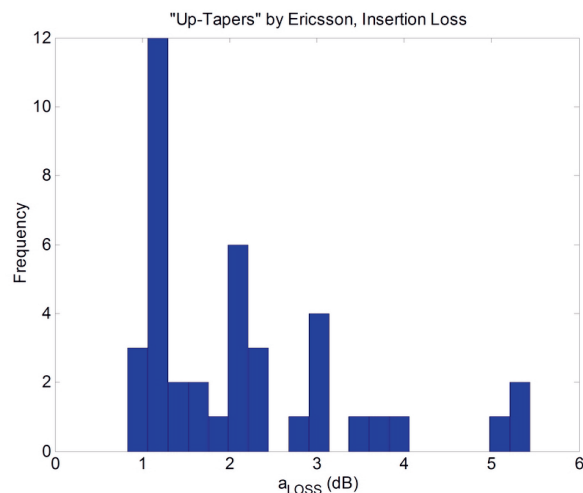


Рис. 12. Гистограмма вносимых потерь на «бочках»

Заключение

Предложена методика формирования прецизионных макроструктурных дефектов типа «перетяжка» и «бочка» в кварцевых многомодовых оптических волокнах с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 и его модифицированного соответствующим образом программного обеспечения. Разработана оригинальная методика оценивания геометрических параметров макродефектов по результатам анализа фотографии зоны обжига, сделанной по окончании процесса нанесения дефекта на ОВ и выведенной на дисплей сварочного аппарата.

Проведена серия экспериментальных исследований влияния установок программ аппарата на геометрические параметры дефектов, что далее позволило разработать практические рекомендации по коррекции предустановленных параметров, в частности времени подачи и тока дуги программ №09 и №04 для «перетяжек» и «бочек», соответственно. Представлены результаты исследований стабильности воспроизведения макродефектов как с точки зрения их геометрии, так и базового параметра передачи – вносимых потерь.

Анализ полученных результатов показал, что для «перетяжек», нанесенных на кварцевые многомодовые ОВ по скорректированной программе, вносимые потери в общем случае не превышают 1,35 дБ при разбросе значений диаметра полученных образцов дефекта вплоть до 12% относительно среднего $d_{taper} = 52,62$ мкм при гарантированном уменьшении диаметра световода в центре зоны обжига не менее чем в два раза относительно номинального диаметра оболочки типовых кварцевых телекоммуникационных ОВ 125 мкм.

При нанесении дефектов типа «бочка» на ОВ с помощью этого же аппарата для отдельных образцов вносимые потери могут достигать значений вплоть до 5,5 дБ и в среднем не превышают 3 дБ: здесь сам процесс формирования «бочки» проводится вручную, качество дефекта во многом зависит от соответствующих практических навыков оператора. Однако и в этом случае диапазон разброса диаметров дефектов для большинства реализованных «бочек» составляет менее 15% относительно среднего $d_{up-taper} = 211,58$ мкм при общем гарантированном увеличении диаметра световода в центре зоны обжига не менее чем в 1,5 раза также относительно номинального диаметра оболочки 125 мкм.

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта 16-37-50087 мол_нр.

Литература

- Jedrzejewski K., Martinez F., Minelly J., Hussey C., Payne P. Tapered beam expander for single-mode optical-fibre gap devices // *Electronics Letters*. Vol. 22(2), 1986. – P. 105-106. doi: 10.1049/el:19860073
- Ishikura A., Kato Y., Miyauchi M. Taper splice method for single-mode fibers // *Applied Optics*. Vol. 19, 1986. – P. 3460-3465. doi: 10.1364/AO.25.003460
- Patent US 4763976 United States Patent, IPC Classification G02B6/26. Connector employing mode field modification / D. Nolan, C.M. Truesdale, Corning Glass Works. USA, No 52281, Priority Date 21.05.1987; Publication Date 16.08.1988.
- Patent WO 01/35136 World Intellectual Property Organization, IPC Classification G02B6/26. Mode adaptation for multimode optical fiber systems / D.E. Harsbarger, D.A. Nolan, C.L. Thomas, C.M. Truesdale, Corning Inc. USA, No PCT/US00/27919, Priority Date 10.10.2000; Publication Date 17.05.2001.
- Patent US6415076 United States Patent, IPC Classification G02B6/14, G02B6/26. Mode conditioning patch for facilitating signal transmission from single mode optical fiber to multimode fiber / C. DeCusatis, International Business Machines Corporation, USA, No US20000512249, Priority Date 24.02.2000; Publication Date 02.07.2002.
- Joannopoulos J.D., Mekis A. Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 19(6), 2001. – P. 861-865. doi: 10.1109/50.927519
- Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.G., Meade R.D. *Photonic crystals. Molding flow of the light*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008. – 286 p.
- Presby H.M., Amitay N., Scotti R., Benner A.F. Laser-to-fiber coupling via optical fiber up-tapers // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 7(2), 1989. – P. 274-278. doi: 10.1109/50.17767
- Choi S., Oh K., Shin W., Park C.S., Pack U.C., Chang Y.C., Kim G.Y., Lee Y.G. Novel mode converter based on hollow optical fiber for Gigabit LAN communication // *IEEE Photonics Technology Letters*. Vol. 14(2), 2002. – P. 248-250. doi: 10.1109/68.980537
- Patent US 2003/0072525 A1 United States Patent, IPC Classification G02B6/26, G02B6/32. Multi-mode fiber bandwidth enhancement using an optical fiber coupler / T. Sjodin, K. Kang. USA, No 10/183837, Priority Date 27.06.2002; Publication Date 17.04.2003.
- Bunge C.-A., Choi S., Oh K. Analysis of ring launching scheme using hollow optical fibre mode converter for 10 Gps multimode fibre communication // *Optical Fiber Technology*. Vol. 12, 2006. – P. 48-58. doi:10.1016/j.yofte.2005.05.001.
- Kumar A., Subrahmanyam T., Sharma A., Thyagarajan K., Pal B., Goyal I. Novel refractometer using a tapered optical fibre // *Electronics Letters*. Vol. 20(13), 1984. – P. 534-535. doi: 10.1049/el:19840370
- Bobb L.C., Shankar P.M., Krumboltz H.D. Bending effects in biconically tapered single-mode fibers // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. Vol. 8(7), 1990. – P. 1084-1090. doi: 10.1109/50.56411.
- Bobb L.C., Krumboltz H.D., Shankar P.M. Pressure sensor that uses bent biconically tapered single-mode fibers // *Optics Letters*. Vol. 16(2), 1991. – P. 112-114. doi: 10.1364/OL.16.000112.

15. Kieu K.Q., Mansuripur M. Biconical fiber taper sensors // IEEE Photonics Letters. Vol. 18, 2006. – P. 2239-2241. doi: 10.1109/LPT.2006.884742.
16. Frazao O., Caldas P., Araujo F. M., Ferreira L. A., Santos J.L. Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single non-adiabatic fiber taper // Optics Letters. Vol. 32(14), 2007. – P. 1974-1976. doi: 10.1364/OL.32.001974
17. Zhang Sh., Zhang W., Gao Sh., Geng P., Xue X. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper // Optics Letters. Vol. 37(21), 2012. – P. 4480-4482. doi: 10.1364/OL.37.004480
18. Xu L., Jiang K., Wang S., Li B., Lu Y. High temperature sensor based on an abrupt-taper Michelson interferometer in single-mode fiber // Applied Optics. Vol. 52, 2013. – P. 2038-2041. doi: 10.1364/AO.52.002038
19. Pu Sh., Dong Sh. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints // IEEE Photonics Journal. Vol. 6(4), 2014. – P. 5300206-1-5300206-6. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2332476
20. Yadav T.K., Mustapa M.A., Abu Bakar M.H., Mahdi M.A. Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor // Journal of the European Optical Society. Vol. 9, 2014. – P. 14024-1-14024-5. doi: 10.2971/jeos.2014.14024
21. Jung Y., Brambilla G., Richardson D.J. Efficient higher-order mode filtering in multimode optical fiber based on an optical microwire // Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, Shanghai, China: OSA Technical Digest, 2008. – P. SuB4-1-SuB4-3. doi: 10.1364/AOE.2008.SuB4
22. Xu M.G., Dong L., Reekie L., Tucknott J.A., Cruz J.L. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre // Electronics Letters. Vol. 31, 1995. – P. 823-825. doi: 10.1049/el:19950542.
23. Kim S., Kwon J., Kim S., Lee B. Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube // IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 12, 2000. – P. 678-680. doi: 10.1109/68.849082.
24. Frazao O., Melo M., Marques P.V.S., Santos J.L. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain and temperature discrimination // Measurement Science and Technology. Vol. 16(4), 2005. – P. 984-988.
25. Kim S.-Ch., Kim S., Kwon J., Lee B. Fibre Bragg grating strain sensor demodulator using a chirped fibre grating // IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 13, 2001. – P. 839-841. doi: 10.1109/68.935821
26. Frazao O., Falate R., Fabris L., Santos J.L., Ferreira L.A., Araújo F.M. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper // Optics Letters. Vol. 31(20), 2006. – P. 2960-2962. doi: 10.1364/OL.31.002960
27. Tao Qi, Shilin Xiao, Jie Shi, Lilin Yi, Zhao Zhou, Meihua Bi, Weisheng Hu. Cladding-mode backward-recoupling-based displacement sensor incorporating fiber up-taper and Bragg grating // IEEE Photonics Journal. Vol. 5(4), 2013. – P. 7100608-1-7100608-8. doi: 10.1109/JPHOT.2013.2274770
28. Karra S., Soumya M. Preparation of tapered optical fibers to utilize the evanescent field for sensing applications // International Journal of Engineering Trends and Technology. Vol. 4, No. 3, 2013. – P. 442-446.
29. Ericsson FSU-975. Руководство пользователя. Пер. с англ. Ericsson, 2001. – 76 с.
30. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕ-САРпт, 2003. – 288 с.
31. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.

Получено 30.01.2017

Андреев Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), Президент ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61.

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., профессор Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: bourdine@psuti.ru

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновациям ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: burdin@psati.ru

Василец Александр Александрович, аспирант Кафедры микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (г. Казань). Тел. 8-937-529-50-55. E-mail: a.vasilets@mail.ru

Гаврюшин Сергей Александрович, ассистент Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: sagasg@inbox.ru

Евтушенко Александр Сергеевич, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: alex2194ru@yandex.com

Казakov Вадим Сергеевич, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: vadim.kazakov5@gmail.com

Морозов Олег Геннадьевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (г. Казань). Тел. 8-917-266-32-27. E-mail: microoil@mail.ru

Сеvрук Никита Львович, магистрант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: nikasevruk@mail.ru

Соколов Евгений Дмитриевич, студент ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-21-61. E-mail: carlcarl-son@list.ru

METHOD FOR PRECISION MACRO-DEFECT FORMING IN SILICA OPTICAL FIBER STRUCTURE

*Andreev V.A.¹, Bourdine A.V.¹, Burdin V.A.¹, Vasilets A.A.², Gavryushin S.A.¹,
Evtushenko A.S.¹, Kazakov V.S.¹, Morozov O.G.², Sevruk N.L.¹, Sokolov E.D.¹*

*¹Dept. of Communications Lines, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77,
Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation;*

*²Dept. of Radiophotonics and Microwave Tech., Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev, 10, K.Marks str., Kazan, 420111, Russian Federation
E-mail: bourdine@yandex.ru*

This work presents a method for precision microstructure defects «tapers» and «up-tapers» forming in conventional silica telecommunication multimode optical fibers by commercially available field fusion splicer with modified software sets. We developed technique for micro-defect geometry parameters estimation via analysis of photo-image performed after defect writing and displayed on fusion splicer monitor. Some research results of defect geometry dependence on fusion current and fusion time values re-set in splicer program are represented that provided an ability to choose their «the best» combination. Additionally, we produced experimental statistical researches of «taper» and «up-taper» diameter stability as well as their insertion loss values during their writing under fixed corrected splicer program parameters which results are presented in this paper.

Keywords: microstructure defects, tapers, up-tapers, multimode optical fibers, fusion splicer, fusion current, fusion time, insertion loss, defect geometry parameters

The reported study was funded by Grant of RFBR, research project No. 16-37-50087.

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.1.03

Andreev Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Associated Professor. Tel.: +78462280077. E-mail: andreev@psuti.ru

Bourdine Anton Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Associated Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: bourdine@psuti.ru

Burdin Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L. Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; vice-rector on science activity and innovation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: burdin@psati.ru

Vasilets Alexander Alexandrovich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; PhD student of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Tel.: +79375295055. E-mail: a.vasilets@mail.ru

Gavryushin Sergey Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Assistant of the Department of Communication Lines. Tel.: +78462280077. E-mail: sagasg@inbox.ru

Evtushenko Alexander S. Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78462280066. E-mail: alex2194ru@yandex.com

Morozov Oleg Gennadievich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, 10 K.Marks str., Kazan 420111, Russian Federation; Head of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +79172663227; E-mail: microoil@mail.ru

Sevruk Nikita Lvovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Master Student of the Department of Communication Lines. Tel.: +78462280066. E-mail: nikasevruk@mail.ru

References

- Jedrzejewski K., Martinez F., Minelly J., Hussey C., Payne P. Tapered beam expander for single-mode optical-fibre gap devices. *Electronics Letters*, 1986, vol. 22, pp. 105-106. doi: 10.1049/el:19860073
- Ishikura A., Kato Y., Miyauchi M. Taper splice method for single-mode fibers. *Applied Optics*, 1986, vol. 19, pp. 3460-3465. doi: 10.1364/AO.25.003460
- Nolan D., Truesdale C.M., Corning Inc., *Connector employing mode field modification*. Patent US 4763976, 1988.
- Harsbarger D.E., Nolan D.A., Thomas C.L., Truesdale C.M., Corning Inc. *Mode adaptation for multimode optical fiber systems*. Patent WO 01/35136, 2001.
- DeCusatis C., International Business Machines Corporation. *Mode conditioning patch for facilitating signal transmission from single mode optical fiber to multimode*. Patent US6415076, 2002.
- Joannopoulos J.D., Mekis A. Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2001, vol. 19, pp. 861-865. doi: 10.1109/50.927519
- Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.G., Meade R.D. *Photonic crystals. Molding flow of the light*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008. 286 p.
- Presby H.M., Amitay N., Scotti R., Benner A.F. Laser-to-fiber coupling via optical fiber up-tapers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1989, vol. 7, pp. 274-278. doi: 10.1109/50.17767
- Choi S., Oh K., Shin W., Park C.S., Pack U.C., Chang Y.C., Kim G.Y., Lee Y.G. Novel mode converter based on hollow optical fiber for Gigabit LAN communication. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, vol. 14, pp. 248-250. doi: 10.1109/68.980537.
- Sjodin T., Kang K. *Multi-mode fiber bandwidth enhancement using an optical fiber coupler*. Patent US 2003/0072525 A1, 2003.
- Bunge C.-A., Choi S., Oh K. Analysis of ring launching scheme using hollow optical fibre mode converter for 10 Gps multimode fibre communication. *Optical Fiber Technology*, 2006, vol. 12, pp. 48-58. doi:10.1016/j.yofte.2005.05.001.
- Kumar A., Subrahmanyam T., Sharma A., Thyagarajan K., Pal B., Goyal I. Novel refractometer using a tapered optical fibre. *Electronics Letters*, 1984, vol. 20, pp. 534-535. doi: 10.1049/el:19840370
- Bobb L.C., Shankar P.M., Krumboltz H.D. Bending effects in biconically tapered single-mode fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1990, vol. 8, pp. 1084-1090. doi: 10.1109/50.56411
- Bobb L.C., Krumboltz H.D., Shankar P.M. Pressure sensor that uses bent biconically tapered single-mode fibers. *Optics Letters*, 1991, vol. 16, pp. 112-114. doi: 10.1364/OL.16.000112.
- Kieu K.Q., Mansuripur M. Biconical fiber taper sensors. *IEEE Photonics Letters*, 2006, vol. 18, pp. 2239-2241. doi: 10.1109/LPT.2006.884742.
- Fraza O., Caldas P., Araujo F.M., Ferreira L.A., Santos J.L. Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single nonadiabatic fiber taper. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, pp. 1974-1976. doi: 10.1364/OL.32.001974

17. Zhang Sh., Zhang W., Gao Sh., Geng P., Xue X. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach–Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper. *Optics Letters*, 2012, vol. 37, pp. 4480-4482. doi: 10.1364/OL.37.004480.
18. Xu L., Jiang K., Wang S., Li B., Lu Y. High temperature sensor based on an abrupt-taper Michelson interferometer in single-mode fiber. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, pp. 2038-2041. doi: 10.1364/AO.52.002038
19. Pu Sh., Dong Sh. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints. *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, 5300206. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2332476.
20. Yadav T.K., Mustapa M.A., Abu Bakar M.H., Mahdi M.A. Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor. *Journal of the European Optical Society*, 2014, vol. 9, 14024. doi: 10.2971/jeos.2014.14024.
21. Jung Y., Brambilla G., Richardson D.J. Efficient higher-order mode filtering in multimode optical fiber based on an optical microwire. *Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference*, Shanghai, China: OSA Technical Digest, 2008, pp. SuB4. doi: 10.1364/AOE.2008.SuB4
22. Xu M.G., Dong L., Reekie L., Tucknott J.A., Cruz J.L. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre. *Electronics Letters*, 1995, vol. 31, pp. 823-825. doi: 10.1049/el:19950542.
23. Kim S., Kwon J., Kim S., Lee B. Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, pp. 678-680. doi: 10.1109/68.849082.
24. Frazao O., Melo M., Marques P.V.S., Santos J.L. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain and temperature discrimination. *Measurement Science and Technology*, 2005, vol. 16, pp. 984 – 988.
25. Kim S.-Ch., Kim S., Kwon J., Lee B. Fibre Bragg grating strain sensor demodulator using a chirped fibre grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, pp. 839-841. doi: 10.1109/68.935821
26. Frazao O., Falate R., Fabris L., Santos J.L., Ferreira L.A., Araújo F.M. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper. *Optics Letters*, 2006, vol. 31, pp. 2960-2962. doi: 10.1364/OL.31.002960
27. Tao Qi, Shilin Xiao, Jie Shi, Lilin Yi, Zhao Zhou, Meihua Bi, Weisheng Hu. Cladding-mode backward-recoupling-based displacement sensor incorporating fiber up-taper and Bragg grating. *IEEE Photonics Journal*, 2013, vol. 5, 7100608. doi: 10.1109/JPHOT.2013.2274770
28. Karra S., Soumya M. Preparation of tapered optical fibers to utilize the evanescent field for sensing applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 442-446.
29. Ericsson FSU-975. User manual. Ericsson, 2001, pp. 76.
30. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskie volokna dlya liniy svyazi* [Optical fiber for communication lines]. Moscow, LESARart Publ, 2003. 288 p.
31. Semenov A.B. *Volokonno-opticheskie podsystemy sovremennykh SKS* [Fiber-optic subsystem of modern SCS]. Moscow, Akademiya AyTi, DMK Press, 2007. 632 p.

Received 30.01.2017

УДК 004.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ КАНАЛОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

Васин Н.Н., Ирбахтин А.А.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: vasin@psuti.ru*

В современных условиях работы телекоммуникационных систем возникают различного рода угрозы безопасности. Для того чтобы предупредить возможность их реализации, необходимы современные методы защиты. Для испытания методов защиты от возможных угроз наиболее целесообразным является метод моделирования. В работе рассматривается программно-аппаратный комплекс по моделированию защищенных каналов связи с использованием средств виртуализации. Описаны составные компоненты программно-аппаратного комплекса и их взаимодействие между собой. Рассмотрены два примера по использованию данного комплекса. Первый пример описывает передачу FTP-трафика по защищенному и незащищенному каналам связи. Этот пример показывает