

Оптоволоконное устройство для разделения мод

В.А. Бурдин¹, А.В. Бурдин¹, О.Г. Морозов², А.А. Кузнецов², А.М. Юдаков¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Льва Толстого 23, Самара, Россия, 443010

²Казанский национальный исследовательский технический университет (КНИТУ-КАИ), Карла Маркса 10, Казань, Россия, 420111

Аннотация. В данной работе описано простое устройство для деления мод на основе волоконно-оптических разветвителей из плавленного кварцевого волокна. Рассмотрена эквивалентная схема фотонного фонаря для такого устройства. Представлены экспериментальные данные испытаний образцов устройства. Как показали испытания образцов, эта технология позволяет получить удовлетворительные параметры для простых и недорогих устройств с одним многомодовым портом и 2-5 одномодовыми портами.

1. Введение

На современном этапе развития инфокоммуникационных технологий стандартные одномодовые оптические волокна, которые сегодня применяются на транспортных сетях связи, практически исчерпали свой ресурс увеличения пропускной способности. Волоконно-оптические линии передачи с одномодовыми оптическими волокнами приближаются к так называемому «нелинейному пределу Шредингера» [1-4]. Основными факторами искажений сигналов в оптических каналах становятся факторы нелинейности, которые, учитывая малый диаметр сердцевины стандартных одномодовых оптических волокон, увеличение вводимой в оптическое волокно мощности с увеличением числа оптических каналов при спектральном уплотнении и протяженность линий передачи транспортных сетей, действие которых на физическом уровне в стандартных одномодовых оптических волокнах уменьшить практически невозможно. В качестве альтернативы, рассматриваются системы пространственного мультиплексирования [5 - 10] с многосердцевинными, маломодовыми или даже многомодовыми оптическими волокнами в маломодовом режиме передачи, практическое использование которых по прогнозам аналитиков [8] ожидается на транспортных сетях связи уже к 2025 году. При использовании маломодовых или многомодовых оптических волокон требуются модовые мультиплексоры/демультиплексоры, обеспечивающие разделение мод световода. Модовое мультиплексирование известно достаточно давно [11]. С точки зрения разделения мод хорошие показатели демонстрируют устройства на дифракционных оптических элементах (ДОЭ) [5,7, 12-14]. Основная проблема, ограничивающая применение ДОЭ в волоконной оптике, связана со сложностью встраивания их в волоконные устройства для реализации технологии «in-fiber». Этот же недостаток характерен для устройств на элементах макро-оптики. На сегодняшний день наибольшее распространение получили мультиплексоры, построенные по принципу «китайского фонарика» [5-10, 15-23]. Устройства, реализующие такой принцип, получили название «photonic lantern» - фотонный фонарь [15]. В

таких мультиплексорах пучок одномодовых оптических волокон вытягивается в одно волокно, которое согласуется с многомодовым оптическим волокном. Известны мультиплексоры типа «фотонный фонарь», имеющие 3-7, 19 и даже до 61 одномодового порта [5,7,16,18]. Также, известны относительно простые волоконные модовые мультиплексоры на основе технологии изготовления волоконно-оптических разветвителей [24-30]. Если в мультиплексорах типа «фотонный фонарь» в первом приближении торец многомодового оптического волокна стыкуется с торцами пучка из нескольких тейпированных в общую структуру одномодовых оптических волокон, то в мультиплексорах типа «волоконно-оптический разветвитель» многомодовое оптическое волокно соединяется с одномодовым оптическим волокном сплавлением боковых поверхностей волокон на некотором участке при определенном расстоянии между осями световодов. Выдвинуто предположение, что при определенных условиях разделение мод в оптических мультиплексорах, выполненных по технологии «фотонный фонарь» и технологии волоконно-оптических разветвителей, будет эквивалентным. В данной работе представлены результаты экспериментальной проверки данного предположения.

2. Краткое описание «фотонного фонаря»

Впервые термин «photonic lantern» введен очевидно в работе [15]. Там же приведена известная условная схема фотонного фонаря (рис.1), поясняющая его конструкцию и принцип работы. Здесь MMF core – сердцевина многомодового оптического волокна, SMF core – сердцевинки одномодовых оптических волокон. Как следует из рисунка 1 пучок одномодовых оптических волокон вытягивается в общую волоконную структуру, согласованную с многомодовым оптическим волокном. В процессе вытяжки одномодовые волокна тейпируются – вытягиваются на конус. Как уже отмечалось, в первом приближении торцы тейпированных одномодовых оптических волокон стыкуются с торцом многомодового оптического волокна.

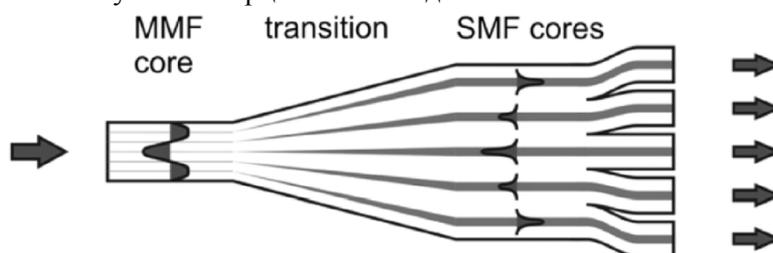


Рисунок 1. Схема «фотонного фонаря» [15].

3. Изготовление волоконно-оптических разветвителей

Технология производства волоконно-оптических разветвителей хорошо известна и отработана. В нашей работе для изготовления модового мультиплексора на основе волоконно-оптического разветвителя была использована рабочая станция Lightel CW-5000, которая дает возможность проводить различные типы специфической обработки волокна и обеспечивает возможность изготовления широкого спектра волоконно-оптических изделий, в том числе сплавных разветвителей, волоконных конусов и т.п. Гибкая структура и интеллектуальное автоматическое управление делает эту рабочую станцию эффективным средством для производства связанных с волокном продуктов и проведения исследований. Станция представляет собой сварочный аппарат, состоящий из трех основных частей: водородной горелки, подвижных вакуумных головок и панели управления. Рабочая станция может управляться или с компьютера, что дает возможность пошагово задавать выполнение изделия или с панели управления, на которой задаются функции, с помощью которых можно выполнять работу в стандартных настройках. Основные устанавливаемые параметры технологического процесса включают в себя шаг, температуру и время сварки. Для определения процента перекрытия волокон используется встроенный тестер, который автоматически показывает соотношение мощностей в портах разветвителя на дисплее компьютера. С помощью указанной рабочей станции был изготовлен волоконно-оптический разветвитель X-типа из стандартного

многомодового кварцевого оптического волокна с диаметром сердцевины 50 мкм и стандартного одномодового оптического волокна SMF-28e. Схематичное изображение изготовленного модового мультиплексора на основе волоконно-оптического разветвителя X-типа представлено на рисунке 2.

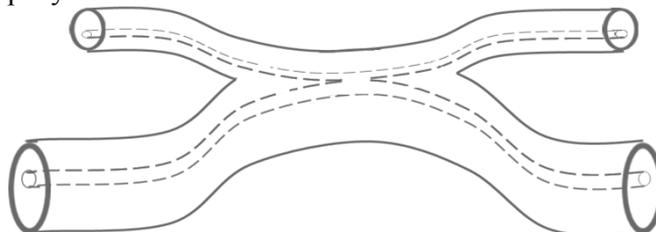


Рисунок 2. Схема модового мультиплексора на основе волоконно-оптического разветвителя.

4. Описание эксперимента

В целях проверки выдвинутой гипотезы был изготовлен модовый мультиплексор на основе волоконно-оптического разветвителя X-типа. При его изготовлении перекрытие оптических волокон специально не задавали. Испытания проводили по схеме, которая представлена на рисунке 3.

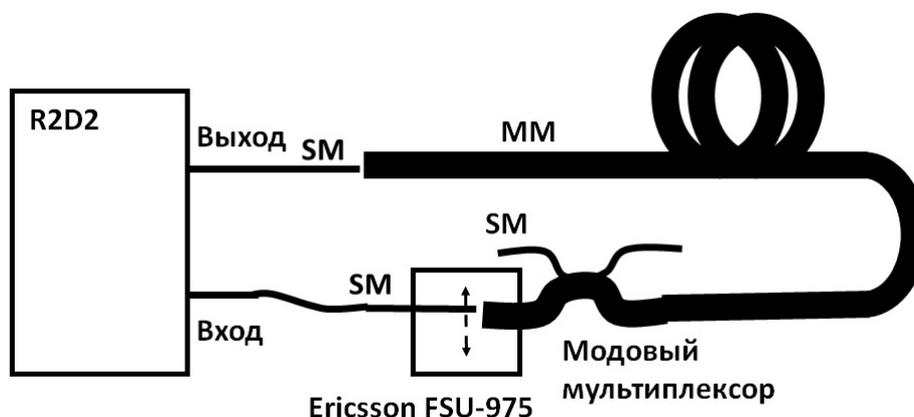


Рисунок 3. Схема испытаний.

Для выполнения измерений использовали комплект R2D2, включающий генератор зондирующих оптических импульсов гауссовой формы с длительностью 580 пс и стробоскопический осциллограф с фотоприемником. Оптические импульсы с выхода R2D2 через короткий отрезок стандартного одномодового оптического волокна SMF28e длиной около 2,0 м вводились в стандартное многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм. Ввод осуществляли с осевым рассогласованием 10,0 мкм, что обеспечивало равномерное возбуждение направляемых мод в многомодовом волокне[31]. Длина волокна составляла 223 м. Выход многомодового оптического волокна был подключен к входному многомодовому порту изготовленного модового мультиплексора. Ко входу фотоприемника комплекта R2D2 был подключен короткий отрезок стандартного одномодового оптического волокна SMF28e длиной около 2,0 м.

Предварительно, второй конец одномодового оптического волокна после необходимой обработки с помощью юстировочного устройства полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 стыковали соосно с оптическим волокном выходного одномодового порта, изготовленного модового мультиплексора, с помощью комплекта R2D2 измеряли импульсный отклик на одномодовом выходе мультиплексора и запоминали результат измерений.

На следующем шаге второй конец одномодового оптического волокна с помощью юстировочного устройства полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 стыковали с многомодовым оптическим волокном выходного многомодового порта, изготовленного модового мультиплексора, и с некоторым шагом сканировали торец многомодового

оптического волокна на выходе мультиплексора одномодовым оптическим волокном. При этом, на каждом шаге сканирования измеряли и запоминали импульсный отклик на многомодовом выходе мультиплексора и запоминали тепловую фотографию со сварочного аппарата, отображающую взаимное расположение оптических волокон в юстировочном устройстве шаге. Результат измерения типичного импульсного отклика на одном из шагов сканирования приведен на рисунке 4, а пример тепловой фотографии на рисунке 5.

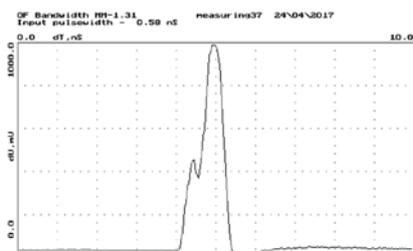


Рисунок 4. Пример отклика на выходе многомодового порта мультиплексора на шаге сканирования.

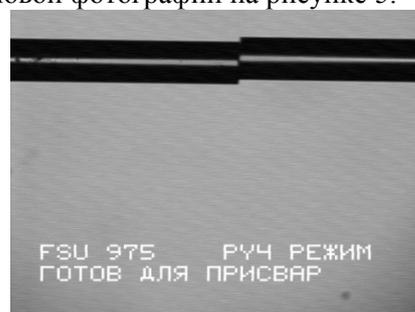


Рисунок 5. Пример тепловой фотографии юстируемых оптических волокон в Ericsson FSU-975.

По завершении сканирования импульсные отклики, измеренные на выходе многомодового порта мультиплексора, сравнивали с импульсным откликом на выходе одномодового порта. В качестве критерия сравнения был выбран коэффициент корреляции. Значение осевого рассогласования на каждом шаге оценивали по тепловой фотографии. Полученная в результате обработки данных измерений зависимость коэффициента корреляции от осевого рассогласования одномодового волокна на входе фотоприемника средства измерений и многомодового волокна порта модового мультиплексора приведена на рисунке 6.

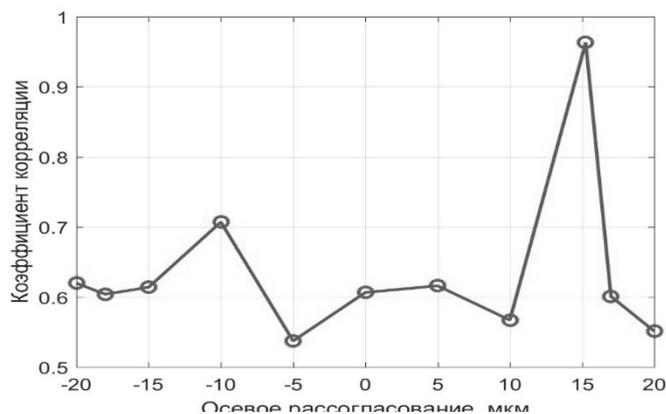


Рисунок 6. Зависимость коэффициента корреляции от осевого рассогласования.

5. Анализ результатов испытаний

При анализе результатов испытаний исходили из следующих положений.

Учитывая конструкцию фотонного фонаря, полагаем, что при равномерном возбуждении мод на входе многомодового оптического волокна отклик на выходе многомодового волокна при некотором значении осевого рассогласования эквивалентен соответствующему одномодовому порту фотонного фонаря.

Форма отклика на зондирующий импульс гауссовой формы позволяет сделать заключение о существенном проявлении дифференциальной модовой задержки и, соответственно, зависимости импульсного отклика на выходе одномодового оптического волокна, сканирующего торец многомодового оптического волокна порта мультиплексора, от модового состава и соотношения уровней мощности отдельных мод.

Это позволяет по степени совпадения импульсных откликов на одномодовом выходе мультиплексора и многомодовом выходе при некотором осевом рассогласовании оценивать степень соответствия одномодового порта мультиплексора на основе волоконно-оптического разветвителя некоторому порту мультиплексора типа фотонный фонарь.

Как показывает анализ зависимости, представленной на рисунке 6 для большинства значений осевого рассогласования из диапазона от -20 мкм до +20 мкм коэффициент корреляции сопоставляемых импульсных откликов лежит в пределах от 0.5 до 0.7. Однако, для осевого рассогласования 15,25 мкм коэффициент корреляции составил 0.97. Это позволяет сделать вывод, что при соответствующем выборе технологических параметров на отдельных портах мультиплексоров, выполненных по технологии фотонного фонаря и технологии волоконно-оптического разветвителя, можно получить сигналы близкие по модовому составу и соотношению между уровнями отдельных мод. Другими словами, эксперимент подтверждает справедливость выдвинутого предположения о том, что при определенных условиях разделение мод в оптических мультиплексорах, выполненных по технологии «фотонный фонарь» и технологии волоконно-оптических разветвителей, будет эквивалентным.

6. Заключение

Экспериментально подтверждено, что при соответствующем выборе параметров модового мультиплексора на основе технологии волоконно-оптического разветвителя можно получить такое же разделение мод как в модовом мультиплексоре типа фотонный фонарь. Это позволяет полагать, что данная технология позволяет получить простое и недорогое устройство с одним многомодовым портом и 2-5 одномодовыми портами с вполне удовлетворительными параметрами.

7. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60015 мол_а_дк.

8. Литература

- [1] Mitra, P.P. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications / P.P. Mitra, J.B. Stark // *Nature*. – 2001. – Vol. 411. – P. 1027-1030.
- [2] Essiambre, R.-J. Capacity Limits of Optical Fiber Networks / R.-J. Essiambre, G. Kramer, P.J. Winzer, G.J. Foschini, B. Goebel // *Journal of Lightwave Technology*. – 2010. – Vol. 28(4). – P. 662-701.
- [3] Mecozzi, A. Nonlinear Shannon Limit in Pseudolinear Coherent Systems/ A. Mecozzi, R.-J. Essiambre // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30(12). – P. 2011-2024.
- [4] Ellis, A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres / A.D. Ellis // *Proc. of SPIE*. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H.
- [5] Richardson, D.J. Space-division multiplexing in optical fibres / D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 354-362.
- [6] Amaya, N. Software defined networking (SDN) over space division multiplexing (SDM) optical networks: features, benefits and experimental demonstration / N. Amaya, S. Yan, M. Channegowda, B.R. Rofoee, Y. Shu, M. Rashidi, Y. Ou, E. Hugues-Salas, G. Zervas, R. Nejabati, D. Simeonidou, B.J. Puttnam, W. Klaus, J. Sakaguchi, T. Miyazawa, Y. Awaji, H. Harai, N. Wada // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(3). – P. 3638-3647.
- [7] Amphawan, A. Review of optical multiple-input–multiple-output techniques in multimode fiber / A. Amphawan // *Optical Engineering*. – 2011. – Vol. 50(10) – P. 102001-1-102001-6.
- [8] Kushnerov M. Multi-mode SDM systems: upgrade scenario for legacy systems and achievable system cost / M. Kushnerov, V. Sleiffer// ECOC 2013 [Electronic resource]. – Access mode: <http://modegap.eu/wp-content/uploads/2013/10/Coriant-Kushnerov-ECOC-Market-Focus-20131.pdf> (25.09.2013).
- [9] Li, G. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication / G. Li, N. Bai, N. Zhao, C. Xia // *Advances in Optics and Photonics*. – 2014. – Vol. 6. – P. 413-487.

- [10] Klaus, W. Advanced Space Division Multiplexing Technologies for Optical Networks / W. Klaus, B.J. Puttnam, R.S. Luís, J. Sakaguchi, J.-M. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada // *Opt. Commun. Netw.* – 2017. – Vol. 9(4). – P. C1-C11.
- [11] Berdague, S. Mode division multiplexing in optical fibers / S. Berdague, P. Facq // *Applied Optics.* – 1982. – Vol. 21(11). – P. 1950-1955.
- [12] Павельев, В.С. Экспериментальное исследование применения гауссовых мод для уплотнения оптических информационных каналов / В.С. Павельев, В.А. Соيفер, М. Дюпарре, Р. Коваршик, Б. Людге, Б. Клей, С.В. Карпеев // *Компьютерная оптика.* – 1998. – Т. 18. – С. 115-121.
- [13] Карпеев, С.В. Анализ и формирование поперечно-модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОЭ / С.В. Карпеев, В.С. Павельев, М. Дюпарре, Б. Людге, К. Рокштул, З. Шротер // *Компьютерная Оптика.* – 2002. – Т. 23. – С.4-9.
- [14] Хонина, С.Н. Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОЭ / *Компьютерная Оптика.* – 2002. – Т. 23. – С. 15-22.
- [15] Leon-Saval, S.G. Multimode fiber devices with single-mode performance/ S.G. Leon-Saval, T.A. Birks, J. Bland-Hawthorn, M. Englund // *Optics Letters.* – 2005. – Vol. 30(19). – P. 2545-2547.
- [16] Noordegraaf, D. Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port Photonic Lantern / D. Noordegraaf, P.M.W. Skovgaard, M.D. Maack, J. Bland-Hawthorn, R. Haynes, J. Lægsgaard // *Optics Express.* – 2010. – Vol. 18(5). – P. 4673-4678.
- [17] Leon-Saval, S.G. Photonic lanterns: a study of light propagation in multimode to single-mode converters / S.G. Leon-Saval, A. Argyros, J. Bland-Hawthorn // *Optics Express.* – 2010. – Vol. 18(8). – P. 8430-8439.
- [18] Noordegraaf, D. Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber / D. Noordegraaf, P.M.W. Skovgaard, R.H. Sandberg, M.D. Maack, J. Bland-Hawthorn, J.S. Lawrence, J. Lægsgaard // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol.37. – P. 452-454.
- [19] Birks, T.A. “Photonic lantern” spectral filters in multi-core fibre / T.A. Birks, B.J. Mangan, A. Díez, J.L. Cruz, D.F. Murphy // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20(13). – P. 13996-14008.
- [20] Fontaine, N.K. Geometric requirements for photonic lanterns in space division multiplexing / N.K. Fontaine, R. Ryf, J. Bland-Hawthorn, S.G. Leon-Saval // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20(24). – P. 27123-27132.
- [21] Leon-Saval, S.G. Mode-selective photonic lanterns for spacedivision multiplexing / S.G. Leon-Saval, N.K. Fontaine, J.R. Salazar-Gil, B. Ercan, R. Ryf, J. Bland-Hawthorn // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22(1). – P. 1-9.
- [22] Birks, T.A. The photonic lantern / T.A. Birks, I. Gris-Sánchez, S. Yerolatsitis, S.G. Leon-Saval, R.R. Thomson // *Advances in Optics and Photonics.* – 2015. – Vol. 7. – P. 107-167.
- [23] Ryf, R. Mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibers / R. Ryf, N.K. Fontaine, H. Chen, B. Guan, B. Huang, M. Esmaelpour, A.H. Gnauck, S. Randel, S.J.B. Yoo, A.M.J. Koonen, R. Shubochkin, Y. Sun, R. Lingle // *Optics Express.* – 2015. – Vol. 23(1). – P. 235-246.
- [24] Shin, W. All-fiber wavelength- and mode-selective coupler for optical interconnections / W. Shin, S. Choi, K. Oh // *Optics Letters.* – 2002. – Vol. 27(21). – P. 1884-1886.
- [25] Love, J.D. Mode-selective couplers for few-mode optical fiber networks / J.D. Love, N. Riesen // *Optics Letters.* – 2012. – Vol. 37(19). – P. 3990-3992.
- [26] Jung, Y. Dual mode fused optical fiber couplers suitable for mode division multiplexed transmission / Y. Jung, R. Chen, R. Ismaeel, G. Brambilla, S.-U. Alam, I.P. Giles, D.J. Richardson // *Optics Express.* – 2013. – Vol. 21(20). – P. 24326-24331.
- [27] Rand, I. All-fiber fused directional coupler for highly efficient spatial mode conversion / R. Ismaeel, T. Lee, B. Oduro, Y. Jung, G. Brambilla // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22(10). – P. 11610-11619.
- [28] Chang, S.H. Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers /S.H. Chang, H.S. Chung, R. Ryf, N.K. Fontaine,

- Ch. Han, K.J. Park, K. Kim, J.C. Lee, J.H. Lee, B.Y. Kim, Y.K. Kim // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(6). – P. 7164-7172.
- [29] Park, K.J. Broadband mode division multiplexer using allfiber mode selective couplers / K.J. Park, K.Y. Song, Y.K. Kim, J.H. Lee, B.Y. Kim // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(4). – P. 3543-3549.
- [30] Chang, S.H. All-fiber 6-mode multiplexers based on fiber mode selective couplers / S.H. Chang, S.-R. Moon, H. Chen, R. Ryf, N.K. Fontaine, K.J. Park, K. Kim, J.K. Lee // Optics Express. – 2017. – Vol. 25(5). – P. 5734-5741.
- [31] Андреев, В.А. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи / В.А. Андреев, А.В. Бурдин. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.

Fiber-optic device for mode division

V.A. Burdin¹, A.V. Bourdine¹, O.G. Morozov², A.A. Kuznetsov², A.M. Yudakov¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy street 23, Samara, Russia, 443010

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Karl Marx street 10, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420111

Abstract. In this paper, we describe a simple device for mode division based on fused quartz fiber-optic coupler. An equivalent circuit of a photon lantern for such a device is considered. The experimental test data of the device samples are presented. As test samples showed, this technology allows to obtain satisfactory parameters for simple and inexpensive devices with one multimode port and 2-5 single-mode ports.

Keywords: In-fiber device, mode division multiplexing, space division multiplexing, multimode, singlemode, fused silica fiber coupler, photonic lantern.