



ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МОДОВЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ. АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Б. Ромашова^{1,4}, К. Дж. Пак², Д. С. Шаймадиева³,
Н. В. Буров¹

¹АО "Ленинградские лазерные системы", Санкт-Петербург

²KS Photonics Inc., Южная Корея

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

⁴Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Продемонстрирован принцип работы волоконного модового мультиплексора на основе каскадных модоселективных разветвителей с широким диапазоном пропускания. Эффективность соединения в диапазоне длин волн от 1515 до 1590 нм варьировалась от 87% до 55%. Эксперимент по передаче данных на 58,5 км с усилением по ММ-EDFA показал, что передача методом мультиплексирования мод возможна. Производительность мультиплексора может быть улучшена за счет эффективного мультиплексирования дегенеративных асимметричных мод.

ВВЕДЕНИЕ

Существует мнение, что пропускная способность оптоволоконной линии при передаче сигналов методом мультиплексирования с временным разделением и мультиплексирования с разделением по длине волны достигла своего предела [1]. Однако метод пространственного разделения каналов все еще остается не полностью реализованным. Двумя популярными подходами являются Space division multiplexing (SDM) – разделение по пространству (рис. 1), реализованное на основе многосердцевидных волокон (например от компании OFS) и Mode Division multiplexing (MDM) – мультиплексирование с разделением мод (рис. 2).

BROADBAND MODE MULTIPLEXER. ALTERNATIVE SOLUTION FOR TELECOMMUNICATIONS AND RESEARCH

V. B. Romashova^{1,4}, K. J. Park², D. S. Shaimadiyeva³,
N. V. Burov¹

¹JSC "Leningrad Laser Systems", St. Petersburg

²KS Photonics Inc., South Korea

³St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg

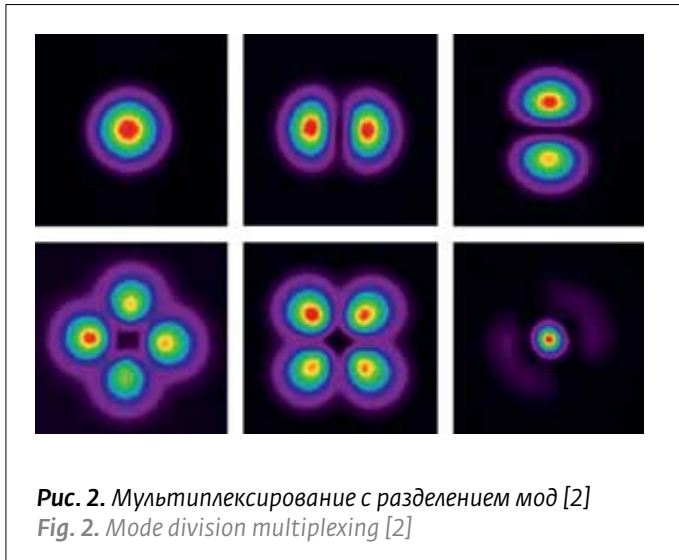
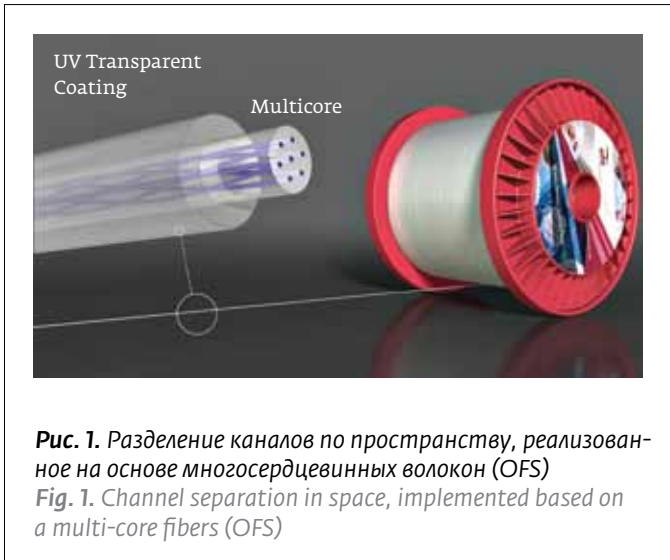
⁴Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg

The operation principle of a fiber mode multiplexer based on cascaded mode selective couplers with a broad bandwidth was demonstrated. The coupling efficiency over the wavelength range from 1515 to 1590 nm varied from 87% to 55%. The experiment for the transfer of information for 58,5 km by the method of multiplexing modes showed that is possible. It can also be expected that the performance of the multiplexer can be improved by efficiently multiplexing degenerative asymmetric modes.

INTRODUCTION

There is a perception that the transmission capacity of a fiber optic line during signal transmission using time-division multiplexing and wavelength-division multiplexing has reached its limit [1]. However, the method of spatial division of channels is still not fully implemented. Two popular approaches are Space division multiplexing (SDM) (Fig. 1), implemented based on multi-core fibers (e.g., by OFS) and Mode Division multiplexing (MDM) (Fig. 2).

In the second case, a few-mode fiber (FMF) with a core, where several polarization or spatial modes propagate, is used [3, 4]. These methods can potentially increase the line capacity by almost an order of magnitude and, apparently, are promising solutions for overcoming the limitation imposed by the nonlinear effect in the DWDM systems.



Во втором случае используется маломодовое оптическое волокно (FMF) с сердцевинной, в которой распространяются несколько поляризационных или пространственных мод [3, 4].

Эти методы потенциально могут увеличить пропускную способность линии почти на порядок и, по-видимому, являются перспективными решениями для преодоления ограничения, налагаемого нелинейным эффектом в DWDM-системах.

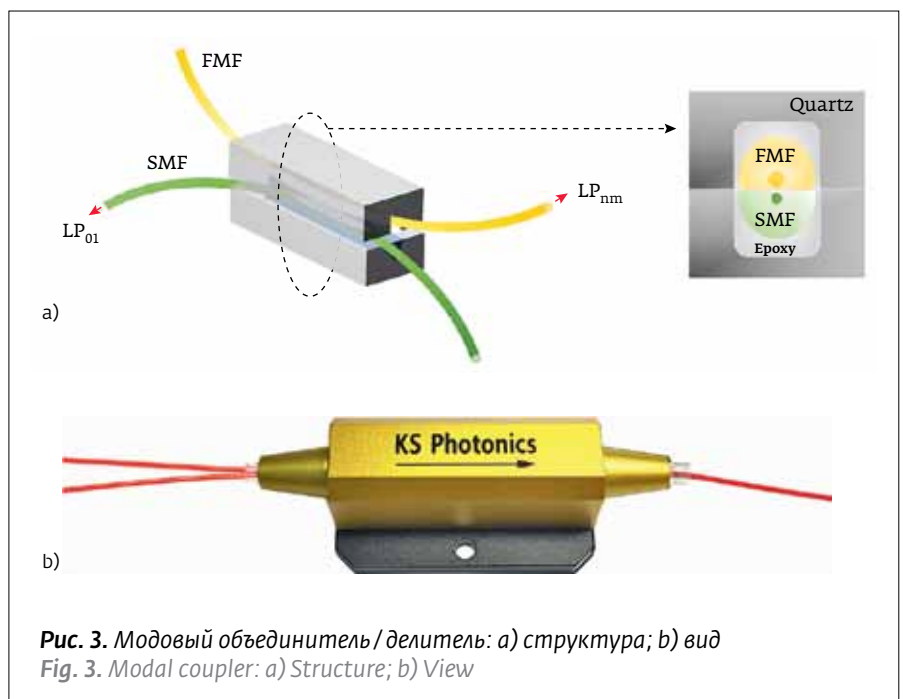
ПРИНЦИП РАБОТЫ СЕЛЕКТИВНОГО МОДОВОГО ОБЪЕДИНИТЕЛЯ

В работе [5] предложена структура и основные принципы пространственного модового объединителя. Объединитель представляет собой конструкцию из маломодового и одномодового волокна, сплированных сбоку и закрепленных рядом друг с другом в кварце со сходным показателем преломления (рис. 3).

Когда постоянная распространения и, следовательно, показатель преломления (n_{eff}) для распространяющихся мод в SM волокне совпадает с распространяющимися модами в FM волокне, между этими модами происходит эффективное соединение

OPERATION PRINCIPLE OF THE SELECTIVE MODE MULTIPLEXER

The authors of [5] suggested the structure and basic principles of the spatial mode multiplexer. A multiplexer is a structure of few-mode and single-mode fiber, polished from the side and fixed next to each other in quartz with a similar refractive index (Fig. 3). When the propagation constant and, therefore, the refractive index (n_{eff}) for the guided modes in the SM fiber coincides with the propagating modes in the FM fiber, an efficient coupling occurs between these modes in the evanescent fields screening field. Perfect



в экранирующем поле. Идеальное сцепление в малоимодовых волокнах невозможно по причине фазового рассинхронизма. Практически идеальное сцепление возможно с изоляцией высших мод, как в экспериментах [5,6]. Ключевым параметром является согласование фаз соединяемых мод.

Излучение заводится через SM волокно и сцепляется в FM волокне с соответствующей модой LP_{nm}. И наоборот, если в моды LP_{nm} заведены в FM волокно, излучение также должно появиться в SM волокне при том, что условие фазового соответствия выполнено. Чтобы получить широкополосную операцию, n_{eff} должен быть одинаковыми в широком спектральном диапазоне. При использовании стандартного SM волокна, его n_{eff} не соответствовал n_{eff} для FM волокна во всем рабочем диапазоне длин волн, что, соответственно, не позволяет использовать объединитель в широком диапазоне длин волн. Другой подход основан на тейпированной структуре, которая обеспечивает гораздо лучшую стабильность, однако она сложно реализуема, особенно в каскадной структуре.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ (ПП)

Измерение ПП для мод имеет важное значение для изготовления делителя. Измерение производится через призму, как показано на рис. 4. Экранирующее поле протекающих мод

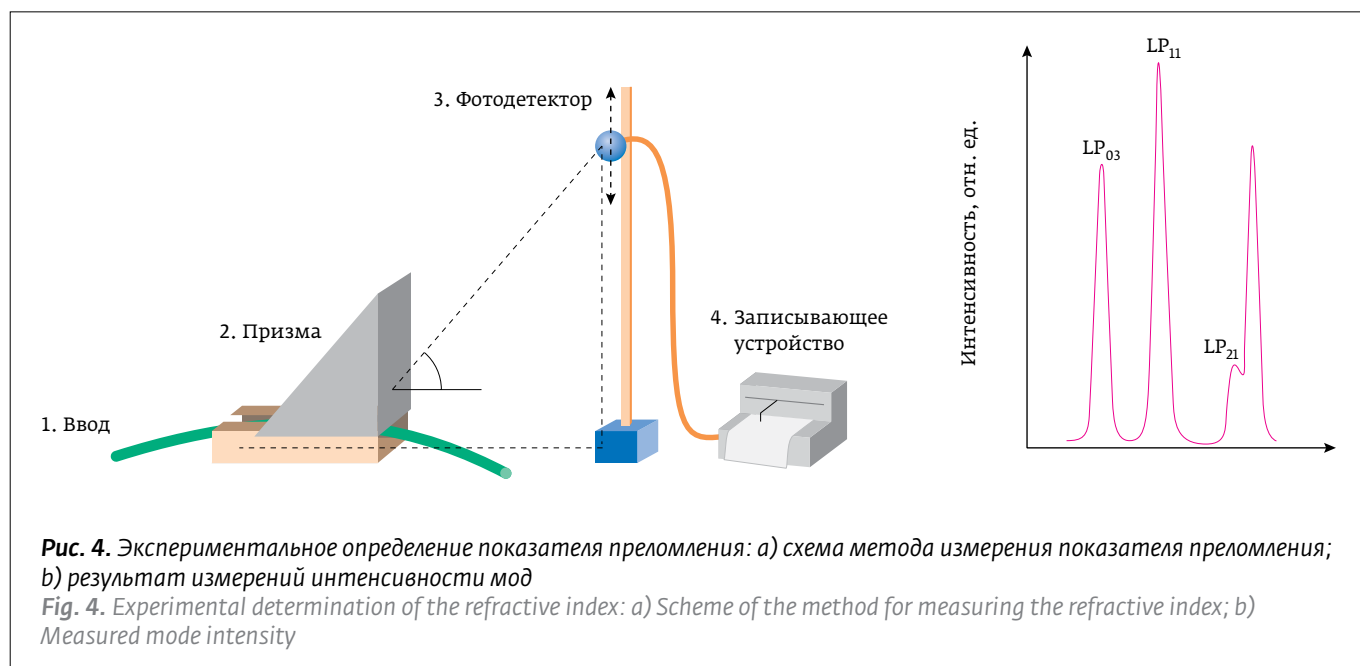
coupling in few-mode fibers is impossible due to phase mistiming dissynchronism. Almost perfect coupling is possible with the isolation of higher modes, as in experiments [5, 6]. The key parameter is the phase matching of the coupling modes.

Light launched through the SM fiber and couples in the FM fiber with the corresponding LP_{nm} mode. Conversely, if the LP_{nm} modes are injected into an FM fiber, the light should also appear in the SM fiber, provided that the phase matching condition is fulfilled. To obtain a broadband operation, n_{eff} should be the same in a wide spectral range. When using standard SM fiber, its n_{eff} did not match n_{eff} for FM fiber in the entire working wavelength range, which, accordingly, does not allow the use of a multiplexer in a wide wavelength range. Another approach is based on the tapered structure, which provides much better stability, but it is difficult to implement, especially in a cascade structure.

DETERMINATION OF THE REFRACTIVE INDEX (RI)

Measuring RI for the modes is important for manufacturing a coupler. The measurement is made through a prism, as shown in Fig. 4. The evanescent fields of the flowing modes in the region of polished fibers leak penetrates the prism, and depending on the angle deviation we can determine n_{eff}

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \theta},$$



в области полированных волокон проникает в призму, и в зависимости от отклонения угла мы можем определить n_{eff}

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \theta},$$

где n_p - показатель преломления призмы. На рисунке 4b измеренный график интенсивности излучаемого света в зависимости от высоты экрана (h) для мод в волокне FM на длине волны 1550 нм.

На рис. 5 изображены графики измеренного ПП для различных мод в зависимости от длины волны (1515–1590 нм) и используемых волокон. Как видно на рис. 5 (верхний), зависимость n_{eff} от длины волны почти линейна, но с разными наклонами для разных мод. В идеальном случае следует использовать три разных SM волокна, которые имеют соответствующие значения ПП, согласующегося с характеристиками мод высших порядков в FM волокне в широком диапазоне длин волн. На практике используется SM волокно, но с большей числовой апертурой (NA). При этом сохраняется зависимость длины волны от ПП ($dn_{\text{eff}}/d\lambda$).

В качестве примера на рис. 5 (нижний) изображена зависимость ПП от длины волны для моды LP02 в FM волокне (красная линия) по сравнению с результирующим режимом в SM волокне (темно-синяя линия), показывающая хорошее совпадение. Для сравнения показаны значения для согласования в стандартном SM волокне, где можно увидеть большее несоответствие (зеленая линия).

Волокна в эксперименте имели номинальные NA в диапазоне 0,2–0,3. Сужение волокон проводилось путем нагрева и вытягивания (тейпирования), что уменьшает n_{eff} [7]. Правильный диаметр конуса рассчитывали путем численного моделирования распространения мод в SM волокне [8]. Оптимальный диаметр конуса определяли после эксперимента.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ МОД

Взаимодействие мод между модами более высокого порядка (НОМ) в маломодовом волокне (FMF) и модами LP₀₁ в одномодовом волокне (SMF) описывается теорией связи мод [9]:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \frac{k^2}{k^2 + \delta^2} \sin^2 \left[\sqrt{(k^2 + \delta^2)z} \right],$$

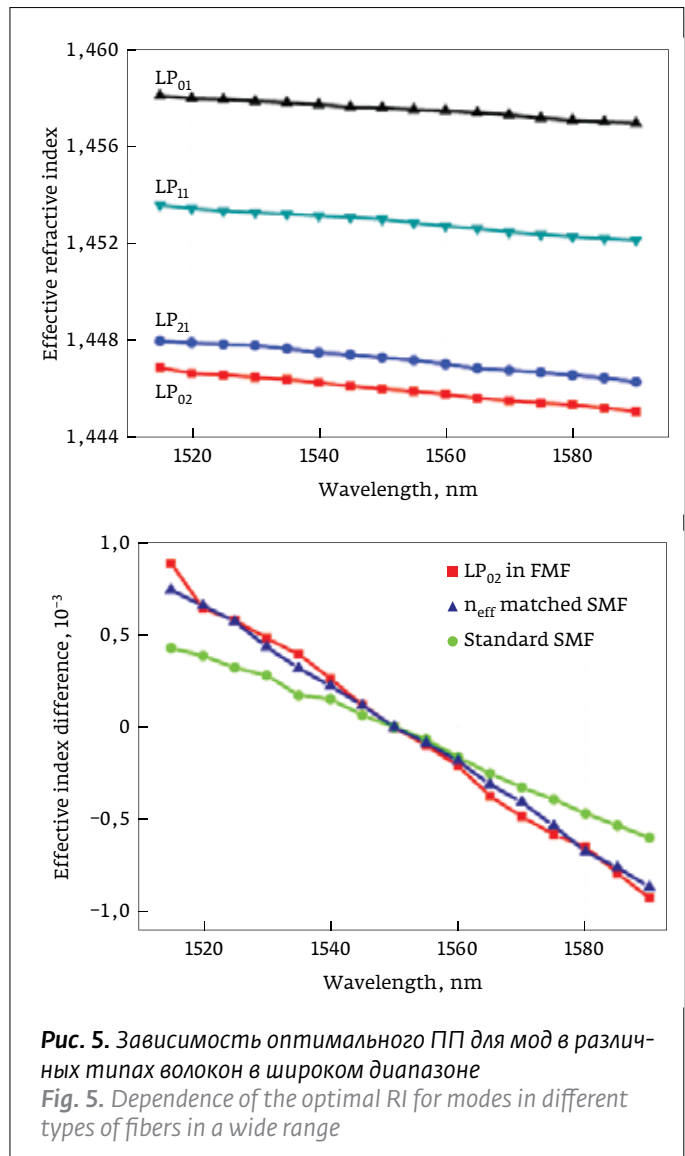


Рис. 5. Зависимость оптимального ПП для мод в различных типах волокон в широком диапазоне
Fig. 5. Dependence of the optimal RI for modes in different types of fibers in a wide range

where n_p is the refractive index of the prism. In Fig. 4b, the measured graph of the intensity of the emitted light versus screen height (h) for modes in an FM fiber at a wavelength of 1550 nm.

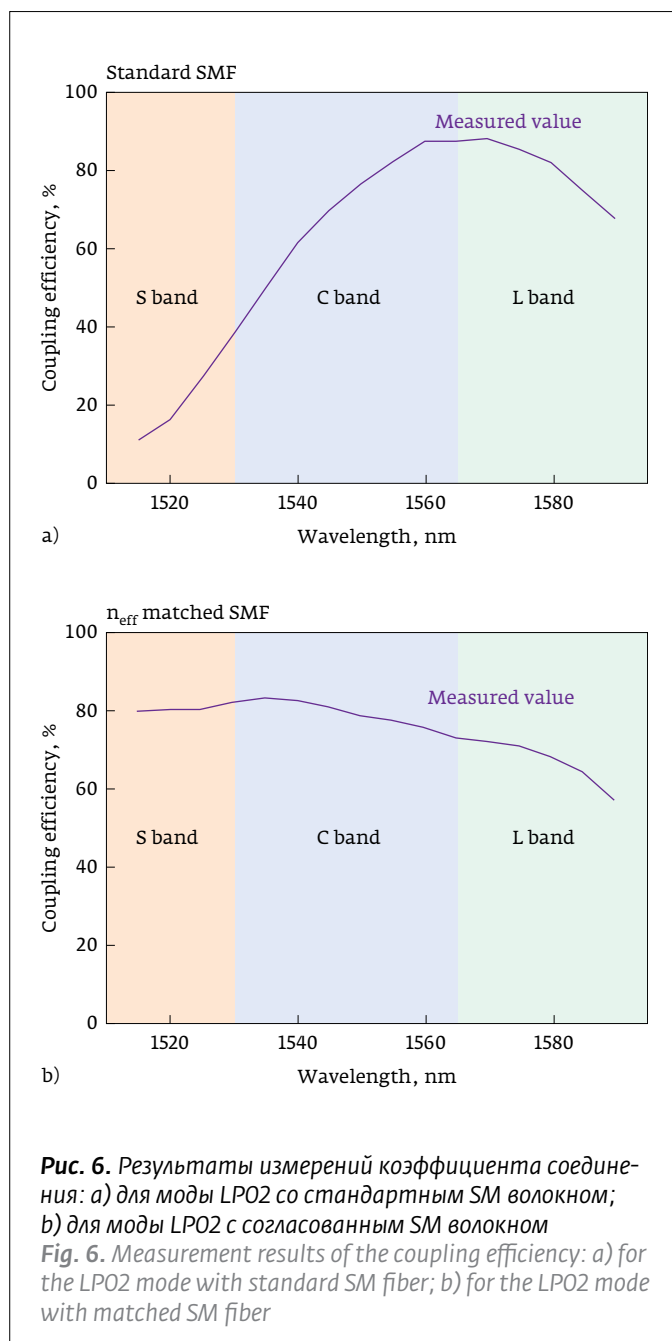
Fig. 5 shows graphs of the measured RI for various modes depending on the wavelength (1515–1590 nm) and the fibers used. As can be seen in Fig. 5 (top), the dependence of n_{eff} on the wavelength is almost linear, but with different slopes for different modes. In the ideal case, three different SM fibers should be used, which have corresponding RI values consistent with the characteristics of higher-order modes in the FM fiber in a wide range of wavelengths. In practice, SM fiber is used, but with a larger numerical aperture (NA). In this case, the dependence of the wavelength on the RI ($dn_{\text{eff}}/d\lambda$) is preserved.

где P_{in} и P_{out} – входная мощность и мощность соединения соответственно, k – постоянная соединения, z – длина взаимодействия и $\delta = \Delta/2\beta$ – постоянная распространения волны (β) между модами в FM и SM волокне. Согласно уравнению 2, разность в n_{eff} между модой (target mode) в маломодовом волокне и модой LP_{01} в одномодовом волокне должна быть минимизирована для увеличения мощности взаимодействия. Например, когда значение z составляет 1,6 мм (что соответствует нашему случаю), и $kz = \pi/2$ при 1550 нм, значение δ должно быть меньше $2,2 \times 10^{-4}$, тем самым коэффициент соединения составит 80%. В данной работе эффективность соединения (C_e) определяется отношением выходной мощности моды в FM волокне и выходной мощностью моды LP_{01} в SM волокне.

Остальная часть входной мощности пришла на нежелательную моду LP_{21} (8,2%), потери в точках сращивания (номинально 6-10%) и некоторые оставшиеся моды в SMF (~1%). Измерения проводились следующим способом. Входная мощность была измерена при помощи измерителя мощности. Общая выходная мощность FM волокна, которую измеряли также с помощью измерителя мощности, может содержать сигналы от нежелательных мод. Для измерения потерь при изгибе на выходном маломодовом волокне была сформирована петля. Результаты показали, что при диаметре изгиба волокна 20 мм потери составляют 20 дБ для моды LP_{02} без существенного влияния на другие моды. В случае с модой LP_{21} потери на изгибе составляют менее 0,1 дБ при диаметре 20 мм и 17 дБ при требуемом диаметре изгиба – 6 мм. Значения потерь на изгибе для мод LP_{01} и LP_{11} были незначительными. Деградация C_e в L – диапазоне на рис. 6 (b) считается из конечной спектральной полосы пропускания экранирующего поля разветвителя, т. е. неидеального согласования ПП.

МУЛЬТИПЛЕКСОР С РАЗДЕЛЕНИЕМ МОД (МОДОВЫЙ МУЛЬТИПЛЕКСОР)

Четырехмодовые мультиплексоры (MDM) компании KS Photonics сконструированы путем каскадирования трехмодовых объединителей (MSC), как показано на рис. 6. Чтобы предотвратить потери в точках сращивания, была использована непрерывная цепь из FM волокон для всех трех MSC. Входные порты для четырех мод оснащены пигтейлами со стан-



As an example, Fig. 5 (bottom) shows the RI dependence on the wavelength for the LP_{02} mode in the FM fiber (red line) as compared with the resulting mode in the SM fiber (dark blue line), showing good coincidence level. For comparison, the values are shown for matching in a standard SM fiber, where a large discrepancy can be seen (green line).

The fibers in the experiment had nominal NA in the range of 0.2–0.3. The narrowing of the fibers was carried out by heating and stretching (tapering), which reduces n_{eff} [7]. The correct diameter of the

дартным одномодовым волокном, чтобы сделать их совместимыми с системами связи. Чтобы отсечь нежелательный оптический сигнал в моде LP_{02} , соединенной с LP_{21} MSC, был установлен модовый фильтр между LP_{21} и LP_{02} , выполненный изгибом волокна диаметром 20 мм. Однако наличие фильтра не позволяло измерить соединение мод LP_{21} или LP_{02} , которое, как полагают, связано с большим разделением ПП между модой LP_{11} и модами более высокого порядка.

Коэффициент экстинкции R_E MSC является важным параметром и определяется формулой:

$$R_E = 10 \log \left(\frac{P_{\text{target}}}{P_{\text{other}}} \right).$$

где P_{target} – оптическая мощность соединения с выбранной (желаемой) модой, P_{other} – оптическая мощность соединения с нежелательными модами.

Измерение R_E для мод LP_{01} и LP_{11} должно производиться в процессе изготовления MSC, поскольку после сборки измерение коэффициента экстинкции становится невозможным. Чтобы определить R_E , излучение подается на один входной порт, оптическая мощность измеряется на выходном порту до и после нежелательных мод, как описано в предыдущем разделе. Разделение мод выполнялось путем изгиба волокна или с использованием жидкости со сходным ПП, на половинках разветвителя после измерения каждого MSC. С этой целью MSC были собраны в порядке мод: LP_{11} , LP_{21} и LP_{02} . Было подтверждено, что процесс сборки LP_{21} и LP_{02} MSC не вызвал дополнительных потерь для мод LP_{01} и LP_{11} .

ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЕСТИМОДОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА

Структура шестимодового мультиплексора схожа со структурой, представленной на рис. 7. Для согласования ПП для моды LP_{01} в одномодовом волокне с модами высших порядков в FM волокне SM волокно подверглось тейпированию. FM волокно, легированное германием, со ступенчатым

taper was calculated by numerical simulation of mode propagation in the SM fiber [8]. The optimum diameter of the taper was determined after the experiment.

MODE COUPLING EFFICIENCY

Mode coupling between higher order modes (HOM) in a few-mode fiber (FMF) and LP_{01} modes in a single-mode fiber (SMF) describes the theory of mode coupling [9]:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \delta^2} \sin^2 \left[\sqrt{(\kappa^2 + \delta^2)} z \right],$$

where P_{in} and P_{out} are the input power and output power, respectively, κ is the coupling constant, z is the interaction length, and $\delta = \Delta/2\beta$ is the wave propagation constant (β) between the modes in the FM and SM fibers. According to equation 2, the difference in n_{eff} between the target mode in a few-mode fiber and the LP_{01} mode in a single-mode fiber should be minimized to increase the interaction power. For example, when the value of z is 1.6 mm (which corresponds to our case), and $\kappa z = \pi/2$ at 1550 nm, the value of δ should be less than 2.2×10^{-4} , thus the coupling coefficient will be 80%. In this paper, the efficiency of the coupling (C_e) is determined by the ratio of the output power of the mode in the FM fiber and the output power of the LP_{01} mode in the SM fiber.

The rest of input power fell on the unwanted LP_{21} mode (8.2%), loss at the splice points (nominally 6–10%) and some of the remaining modes in SMF (~1%). The measurements were carried out as follows. The input power was measured using a power meter. The total output power of the FM fiber, which was also measured with a power meter, may contain signals from unwanted modes. A loop was formed to measure bending losses on the output modeless

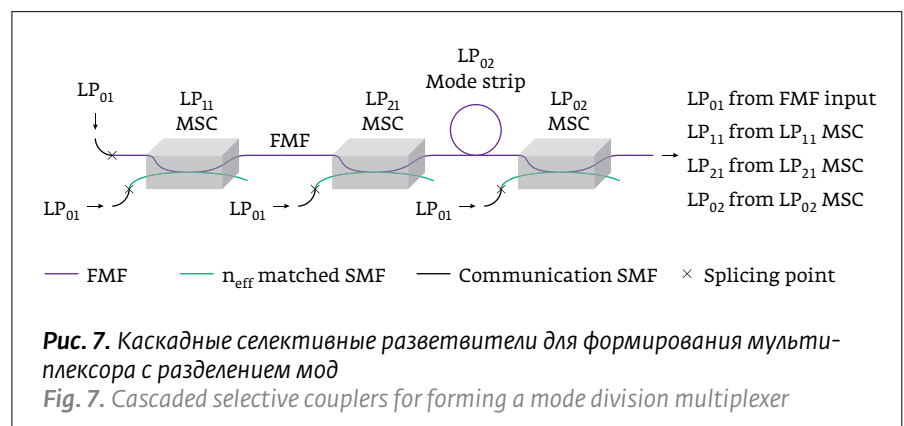


Рис. 7. Каскадные селективные разветвители для формирования мультиплексора с разделением мод

Fig. 7. Cascaded selective couplers for forming a mode division multiplexer

индексом ПП использовалось для передачи шести мод LP₀₁, LP_{11a/11b}, LP_{21a/21b}, and LP₀₂. Каждое волокно заключено в кварцевый блок, а оболочка волокна частично сполирована. Стандартные эффективности объединения мод LP₁₁, LP₂₁, and LP₀₂ были 80%, 70%, и 80% в С-диапазоне. Полная конструкция представлена на рис. 8.

Для измерения характеристик использовался сканирующий интерферометр. Он измерял матрицу передаточных функций амплитуды и фазы между вводом и выводом. Модовые потери (MDL) анализировались разложением сингулярных значений из измеренной матрицы. Схема измерения представлена на рис. 9.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

На рис. 10 изображена экспериментальная установка для передачи данных методом модового разделения каналов. Тридцать каналов с шагом 100 ГГц в С-диапазоне (1534,25–1557,36 нм) генерировались лазерами с распределенной обратной связью (DFB). Переключатель с выборкой по длине волны использовался для выравнивания оптической мощности во всех каналах. Каждая группа каналов усиливалась эрбиевым усилителем, а затем направлялась на IQ-модулятор. Оба IQ-модулятора управлялись независимыми битовыми после-

fiber. The results showed that with a fiber bend diameter of 20 mm, the loss is 20 dB for the LP₀₂ mode without significant influence on other modes. In the case of the LP₂₁ mode, bending losses are less than 0.1 dB with a diameter of 20 mm and 17 dB with a required bending diameter of 6 mm. Bending loss values for modes LP₀₁ and LP₁₁ were insignificant. The degradation of C_e in the L-range in Fig. 6 (b) is calculated from the finite spectral bandwidth of the splitter's shielding field, i. e. imperfect matching of RI.

MODE DIVISION MULTIPLEXER

The four-mode multiplexers (MDM) by KS Photonics are designed by cascading three mode multiplexers (MSC), as shown in Fig. 6. To prevent losses at the splice points, a continuous chain of FM fibers was used for all three MSC. Four-mode input ports are equipped with standard single-mode pigtailed to make them compatible with communications systems. To cut off the unwanted optical signal in the LP₀₂ mode, connected to the LP₂₁ MSC, a mode filter was installed between the LP₂₁ and LP₀₂, made by bending a fiber with a diameter of 20 mm. However, the presence of the filter did not allow to measure the coupling of the LP₂₁ or LP₀₂ modes, which is believed to be associated with a large separation of the RI between the LP₁₁ mode and higher-order modes.

The extinction ratio of the R_E MSC is an important parameter and is determined by the formula:

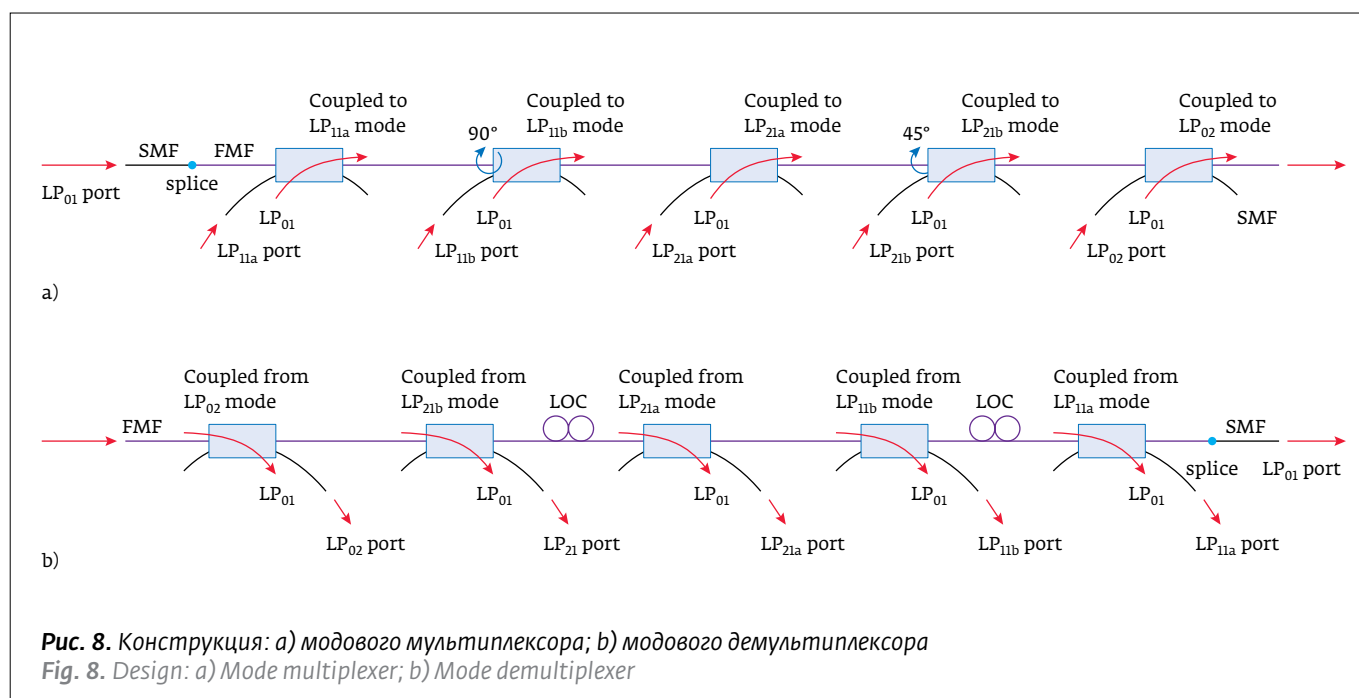


Рис. 8. Конструкция: а) модового мультиплексора; б) модового демультиплексора
Fig. 8. Design: a) Mode multiplexer; b) Mode demultiplexer

довательностями длиной 2^{16} символов, сгенерированными цифровыми аналоговыми преобразователями 60 Гигавыборок/с (ЦАП). Модуляторы были с волоконными выводами. Сигналы поступают на стадию мультиплексирования с разделением поляризации, где два поляризационных разделения задерживаются на 382 нс. Полученный поляризованный квадратурный фазовый сдвиг (120 Гбит/с (DP-QPSK)) был разделен на шесть копий с относительными задержками 0, 50, 100, 150, 200 и 250 нс. Шесть декоррелированных сигналов были подключены к волоконным вводам 6-модового мультиплексора.

6-режимные мультиплексированные сигналы подавались в циркуляционный контур. Для передачи сигналов по многооборотным циклам использовался акустооптический переключатель (AOS). Такие оптические компоненты, как AOS, линзы и светоделители (BS) были установлены для поддержания распространения нескольких мод.

Все четыре порта петли были с волокном со ступенчатым профилем ПП, поддерживающими приблизительно 15/9 мод. Затем эти волокна тейпированы (вытяжка до 1 м), что дало нам шестимодовое волокно. Данная вытяжка была нацелена на уменьшение количества мод, передающих сигнал.

Линия передачи составляла 58,5 км с усилением по ММ-EDFA. ММ-EDFA (с) использовался

$$R_E = 10 \log \left(\frac{P_{\text{target}}}{P_{\text{other}}} \right),$$

where P_{target} is the optical power of the coupling with the selected (desired) mode, P_{other} is the optical power of the coupling with the unwanted modes.

The R_E measurement for modes LP_{01} and LP_{11} must be made during the manufacturing process of the MSC, since after assembly the measurement of the extinction ratio becomes impossible. To determine the R_E , radiation is applied to one input port, the optical power is measured at the output port before and after the unwanted modes, as described in the previous section. Mode separation was performed by bending the fiber or using a liquid with a similar RI on the coupler halves after measuring each MSC. To this end, the MSC were assembled in the following mode order: LP_{11} , LP_{21} and LP_{02} . It was confirmed that the assembly process of the LP_{21} and LP_{02} MSC did not cause additional losses for the LP_{01} and LP_{11} modes.

CHARACTERISTICS OF THE SIX-MODE MULTIPLEXER

The six-mode multiplexer is similar to the structure shown in Fig. 7. In order to match the RI for the LP_{01} mode in a single-mode fiber with the higher-order modes in the SM fiber, the SM fiber was tapered. Germanium-doped FM fiber

with a step refractive index was used to transmit six modes of LP_{01} , $LP_{11a/11b}$, $LP_{21a/21b}$, and LP_{02} . Each fiber is enclosed in a quartz unit, and the fiber cladding is partially polished. The standard efficient coupling of the LP_{11} , LP_{21} , and LP_{02} modes were 80%, 70%, and 80% in the C-band. The complete structure is shown in Fig. 8.

A scanning interferometer was used to measure the characteristics. It measured the matrix of the transmissibility of amplitude and phase between input and output. The mode loss (MDL) was analyzed by decomposing the singular values from the measured matrix. The measurement scheme is shown in Fig. 9.

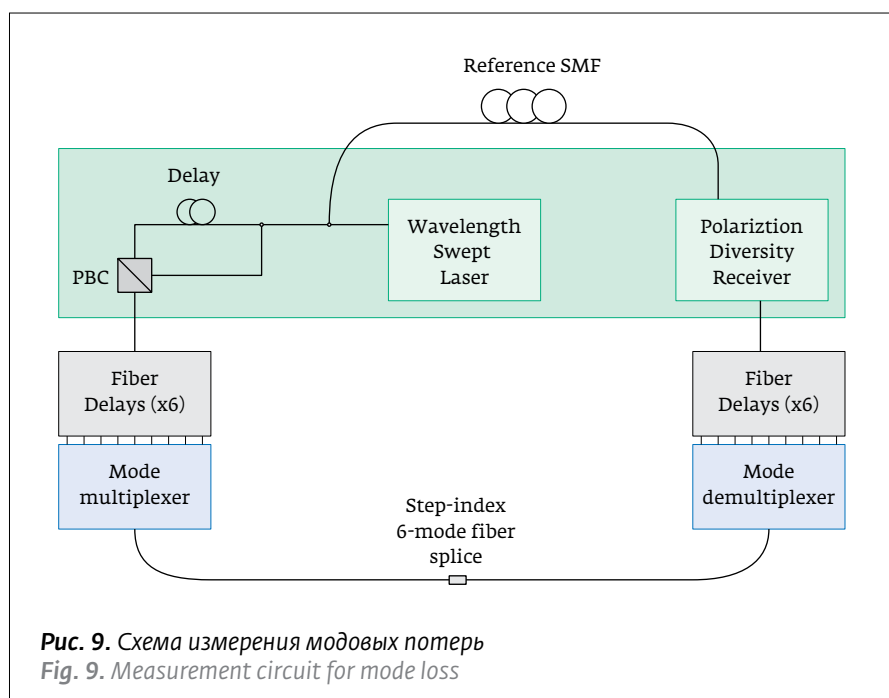


Рис. 9. Схема измерения модовых потерь
Fig. 9. Measurement circuit for mode loss

в качестве линейного усилителя для компенсации потерь в волокне и других оптических компонентов в линии. Сигналы были направлены сквозь поляризационный делитель (BS), а затем демультиплексированы на шесть мод. Тестируемый канал длины волны фильтровали с помощью блока (WB). Шесть когерентных приемников с поляризационным разнесением (PD-CRx) использовались для детектирования сигналов. Итого двадцать четыре электрических сигнала в интервале времени 100 мкс были одновременно переданы на модульный цифровой осциллограф, работающий со скоростью дискретизации 40 ГГц/с и полосой пропускания 20 ГГц.

EXPERIMENTAL SETUP. DATA TRANSFER

Fig. 10 shows an experimental setup for data transmission using the mode channel separation method. Thirty channels with a pitch of 100 GHz in the C-band (1534.25–1557.36 nm) were generated by distributed feedback (DFB) lasers. A wavelength selective switch was used to equalize the optical power in all channels. Each channel group was amplified by an erbium amplifier, and then directed to an IQ modulator. Both IQ modulators were controlled by independent bit sequences of 2^{16} characters in length generated by digital analog converter of 60 Giga-samples/s (DAC). The modulators were with fiber outputs. The signals arrive at the polarization separation multiplexing

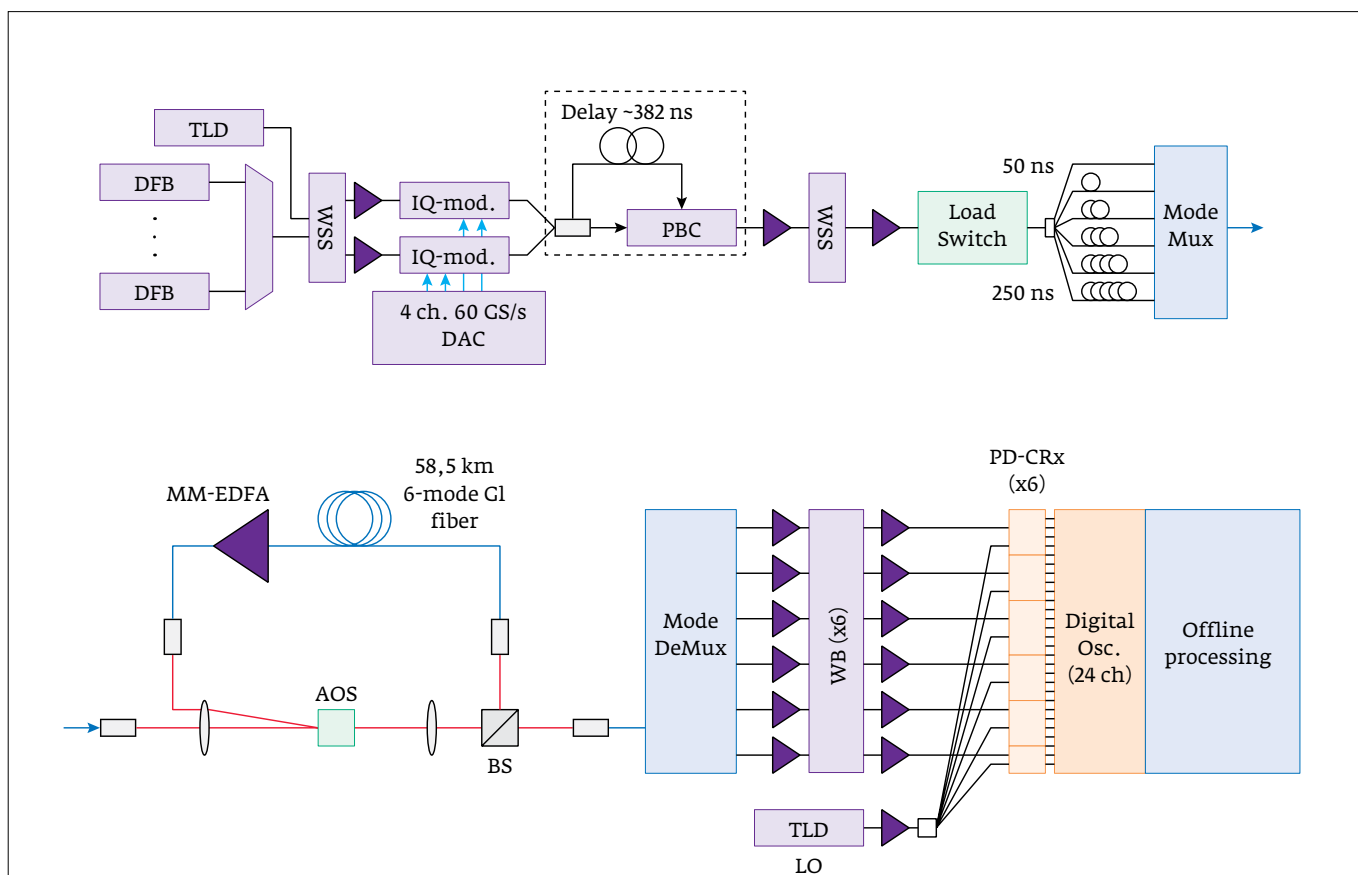


Рис. 10. Схема экспериментальной передачи данных: TLD – перестраиваемый лазерный диод, DFB – лазер с распределенной обратной связью, WSS – свич с разделением по длине волны, IQ – IQ-модулятор, DAC – ЦАП, PBC – поляризационный разветвитель, MUX/DeMux – мультиплексор/демультиплексор, MM-EDFA – многомодовое волокно, легированное эрбием, AOS – акустооптический переключатель, WB – блокиратор длин волн, FMF – маломодовое волокно, PD-CRx – когерентный приемник с поляризационным разделением, LO – локальный осциллятор, OSC – осциллограф

Fig. 10. Experimental data transfer scheme: TLD – tunable laser diode, DFB – distributed feedback laser, WSS – wavelength separation switch, IQ – IQ modulator, DAC – digital analog converter, PBC – polarization splitter, MUX/DeMux – multiplexer/demultiplexer, MM-EDFA – erbium-doped multimode fiber, AOS – acousto-optic switch, WB – wavelength blocker, FMF – few-mode fiber, PD-CRx – coherent receiver with polarization separation, LO – local oscillator, OSC – oscilloscope



Также для линии был измерен параметр BER – достоверность передачи данных, составивший для моды LP₀₁ менее $2 \cdot 10^{-5}$ во всем диапазоне длин волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирован принцип работы волоконного модового мультиплексора на основе каскадных модоселективных разветвителей с широким диапазоном пропускания. Эффективность соединения на всем диапазоне длин волн от 1515 до 1590 нм варьировалась от 87% для моды LP₀₁, в худшем случае – более 55% для моды LP₂₁. Значительно улучшенная производительность была достигнута путем сопоставления n_{eff} по рабочей длине волны для малоимодового и одноимодового волокон. Это устройство может быть полезно для дальнейшей разработки мультиплексированных систем связи с высокой пропускной способностью. Эксперимент показал, что передача информации методом мультиплексирования мод возможна. Также можно ожидать, что производительность мультиплексора может быть улучшена за счет эффективного мультиплексирования дегенеративных асимметричных мод.

stage, where two polarization separations are delayed by 382 ns. The resulting polarized quadrature phase shift (120 Gbit/s (DP-QPSK)) was divided into six copies with relative delays of 0, 50, 100, 150, 200 and 250 ns. Six decorrelated signals were connected to the fiber inputs of a 6-mode multiplexer.

6-mode multiplexed signals were fed into the circulation loop. An acousto-optic switch (AOS) was used to transmit signals through multi-turn cycles. Optical components such as AOS, lenses and beam splitters (BS) were installed to support the propagation of several modes.

All four ports of the loop were with fiber with a RI stepped profile supporting approximately 15/9 modes. Then these fibers are tapered (stretch up to 1 m), which gave us 6 modal fibers. This extension was aimed at reducing the number of modes transmitting the signal.

The transmission line was 58.5 km long with a gain in MM-EDFA. MM-EDFA, (c), was used as a linear amplifier to compensate for losses in the fiber and other optical components in the line. The signals were sent through a polarization splitter (BS), and then demultiplexed into 6 modes. The test channel wavelength was filtered using a unit (WB). Six coherent polarization diversity receivers (PD-CRx)



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tkach R. Scaling optical communications for the next decade and beyond. Bell Labs Technical Journal. 2010; 14(4): 3–9.
2. Mode Division Multiplexer. KS Photonics website. Available at: <http://ksphotonics.com/product/directional-couplers/pm-fiber-coupler/>.
3. Iano S. et al. Multicore optical fiber. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 1979; WB1.
4. Berdagué S. S., Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers. Applied optics. 1982; 21(11): 1950–1955.
5. Sorin W. V., Kim B. Y., Shaw H. J. Highly selective evanescent modal filter for two-mode optical fibers. Optics Letters. 1986; 11(9): 581–583.
6. Park K. J. et al. All-fiber mode division multiplexer optimized for C-band. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2014; M3K. 2.
7. Love J. D. et al. Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria. IEE Proceedings J (Optoelectronics). 1991; 138(5): 343–354.
8. Ромашова В. Б., Лин Дж., Буров Н. Высокомощные волоконные объединители. Фотоника. 2018; 69 (1):16–28. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.16.28.
Burov N. V., Lin J., Romashova V. B. High-power fiber combiners. Photonics Russia. 2018; 69(1): 16–28. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.16.28.
9. Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1973; 9(9): 919–933.

were used to detect signals. A total of twenty-four electrical signals in the time interval of 100 μ s were simultaneously transmitted to a modular digital oscilloscope operating at a sampling rate of 40 GHz/s and a bandwidth of 20 GHz.

Also, the BER parameter was measured for the line, which made the data transmission mode LP₀₁ less than $2 \cdot 10^{-5}$ over the entire wavelength range.

CONCLUSIONS

The paper demonstrates the operation principle of a fiber mode multiplexer based on cascaded mode selective couplers with a broad bandwidth. The coupling efficiency over the entire wavelength range from 1515 to 1590 nm varied from 87% for the LP₀₁ mode, in the worst case – more than 55% for the LP₂₁ mode. Significantly improved performance was achieved by comparing n_{eff} over the operating wavelength for few-mode and single-mode fibers. This device may be useful for the further development of multiplexed communication systems with high bandwidth. The experiment showed that the transfer of information by the method of multiplexing modes is possible. It can also be expected that the performance of the multiplexer can be improved by efficiently multiplexing degenerative asymmetric modes.