

Результаты расчета схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы модового мультиплексирования на торце 16-LP-модового градиентного волоконного световода с асимметричной эллиптичностью геометрии 42-мкм сердцевины

А.В. Бурдин¹, В.А. Бурдин¹, О.Р. Дельмухаметов²

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

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Карла Маркса 12, Уфа, Россия, 450077

Аннотация. В работе представлены результаты расчета схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы модового мультиплексирования (MDM) на торце кварцевых маломодовых оптических волокон (FMF) с увеличенным диаметром сердцевины. Рассматривались ранее предложенные 16-LP-модовые FMF с диаметром сердцевины 42 мкм и оптимизированной специальной формой градиентного профиля показателя преломления, обеспечивающего снижение дифференциальной модовой задержки (DMD) менее 120 пс/км по всему модовому составу в «С»-диапазоне длин волн. Данные характеристики достигаются в случае идеальной геометрии сердцевины FMF – круглого поперечного сечения и симметричного, полностью соответствующего искомой оптимальной, формой градиентного профиля показателя преломления. Вместе с тем, в силу технологических особенностей промышленного производства кварцевых волоконных световодов, «реальные» FMF будут отличаться наведенной несимметричной эллиптичностью поперечного сечения и геометрии сердцевины в целом, а также локальными отклонениями профиля показателя преломления от оптимальной формы. Все это приводит к деградации спектральной характеристики DMD, и, как результат, неприемлемо высоким значениям последней, что требует проведения дополнительных мероприятий по фильтрации/подавлению соответствующих мод высших порядков. Для решения данной проблемы предлагается осуществлять селективное возбуждение основной и высших мод низшего (первого) радиального порядка. Последнее непосредственно реализуется с помощью предложенной схемы пространственного позиционирования каналов системы MDM на торце FMF, представляющей собой комбинацию прецизионного смещения вводимой моды относительно центра сердцевины FMF и согласования ее диаметра пятна моды при этом смещении с возбуждаемой модой FMF.

1. Введение

На сегодняшний день переход от традиционных одномодовых оптических волокон (ОВ) в линейном тракте волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) к маломодовым световодам

(FMF – Few Mode Fibers) с экстремально увеличенным, по сравнению с упомянутыми одномодовыми ОВ действующих рекомендаций ITU-T [1] и коммерческими FMF [2], диаметром сердцевин рассматривается как одно из перспективных решений задачи преодоления нелинейного предела Шеннона для оптических сетей связи нового поколения, ориентированных на сверхвысокие скорости передачи информации [3 – 6]. Увеличение диаметра сердцевин FMF непосредственно приводит к повышению модовой площади эффективного сечения, что, в свою очередь, неизбежно снижает нелинейность самого ОВ. Именно поэтому в настоящее время ВОЛП на базе FMF с сильно увеличенным диаметром сердцевин и практически нивелированной, с точки зрения вводимых мощностей групповых сигналов волоконно-оптических систем последнего поколения, в сочетании с технологиями модового мультиплексирования (MDM – Mode Division Multiplexing) и MIMO (Multiple Input Multiple Output – множественные входы/множественные выходы), ассоциируются с экстремально высокой пропускной способностью, ориентированной на сверхвысокие скорости передачи данных, достигающих десятки Тбит/с [7 – 13].

Очевидно, что существенное увеличение диаметра сердцевин FMF, необходимое для существенного снижения нелинейности ОВ, неизбежно приводит к появлению еще большего числа новых модовых составляющих высших порядков, удовлетворяющих условию отсечки рассматриваемого световода. Это требует проведения дополнительных мероприятий по уменьшению дифференциальной модовой задержкой (ДМЗ) [14], которая, в общем случае, является основным негативным линейным фактором искажения оптического сигнала при распространении по ОВ в маломодовом режиме [3 – 15]. И в этом смысле при разработке конструкций FMF ключевой проблемой является поиск компромисса между модовой эффективной площадью сечения ОВ, непосредственно связанной с диаметром сердцевин, который, в том числе, определяет модовый состав волоконного световода, и минимизацией ДМЗ на заданной оптической несущей или в определенном выделенном диапазоне длин волн [7 – 13].

Вместе с тем, подавляющее большинство известных методов и разработанных на их основе конструкций FMF с сильно увеличенным диаметром сердцевин [7 – 13], формально решают задачу существенного уменьшения ДМЗ для модельных ОВ идеального круглого сечения и соответствующей оптимальной формы профиля показателя преломления. В то время как геометрия реальных промышленных ОВ, в силу технологических особенностей полного цикла производства кварцевых волоконных световодов – от синтеза преформы, до вытяжки строительной длины – отличается не только локальными отклонениями профиля от искомой оптимальной формы, но и несимметричной эллиптичностью сердцевин в целом [15 – 17]. Очевидно, что описанное «искажение» геометрии ОВ не может не влиять в целом на дисперсионные параметры мод особенно высших радиальных порядков, поля которых сосредоточены в периферийной части сердцевин ближе к границе раздела сердцевина/оболочка. Таким образом, постоянные распространения направляемых мод идентичных порядков модельного и «реального» FMF не могут сильно отличаться, что в целом может привести к критическим, неприемлемо высоким значениям DMD модового состава «реальных» FMF.

В данной работе предложен простой подход для моделирования «искажений» геометрии FMF, обусловленных технологическими особенностями процессов этапов производства кварцевых ОВ. Представлены результаты его апробации на примере ранее полученного модельного образца градиентного профиля показателя преломления 16-LP-модового кварцевого FMF с сердцевинной 42 мкм, обеспечивающего теоретическое снижение DMD по всему модовому составу менее чем 120 пс/км в «С»-диапазоне длин волн, и анализ деградации спектральной характеристики DMD из-за наведенных «искажений» геометрии сердцевин. Продемонстрировала необходимость проведения дополнительных мероприятий по фильтрации/подавлению соответствующих мод высших порядков. Для решения данной проблемы предлагается осуществлять селективное возбуждение основной и высших мод низшего (первого) радиального порядка. Последнее непосредственно реализуется с помощью ранее предложенной схемы пространственного позиционирования каналов системы MDM на

торце FMF, представляющей собой комбинацию прецизионного смещения вводимой моды относительно центра сердцевинки FMF и согласования ее диаметра пятна моды при этом смещении с возбуждаемой модой FMF. Представлены результаты расчета параметров симметричной схемы прецизионного пространственного позиционирования 5 каналов системы MDM на торце указанного кварцевого 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевинки 42, наведенной несимметричной эллиптичностью геометрии поперечного сечения и сильными локальными флуктуациями показателя преломления профиля относительно оптимальных значений.

2. Исследование влияния отклонения геометрии промышленных образцов ОВ от оптимальной формы на деградацию спектральной характеристики DMD

2.1. Моделирование «искажений» геометрии сердцевинки, соответствующих промышленным образцам волоконных световодов

На первом этапе было проанализировано более 20 протоколов измерений профиля показателя преломления [16, 18] промышленных образцов многомодовых ОВ как первого поколения категории TIA/ISO OM2 [1], так и многомодовых ОВ, оптимизированных для совместной работы с когерентными источниками оптического излучения (LOMF – Laser Optimized Multimode Fibers) категории TIA/ISO OM2+/OM3 [1]. Данные измерения были выполнены сертифицированным лабораторным оборудованием – «анализатором волоконных световодов» [16, 18], реализующего метод отраженного ближнего поля [19] и обеспечивает возможность вывода распределения значений показателя преломления по радиальной координате поперечного сечения исследуемого ОВ в двух условных плоскостях «X» и «Y» с достаточно высоким пространственным разрешением – менее 0.5 мкм по радиальной координате и менее 0.001 по абсолютной разности локального значения показателя преломления ОВ и чистого кварца (см. спецификации [20] и др.).

Анализ полученных результатов измерений продемонстрировал, что даже в случае LOMF, отличающихся более строгими требованиями к воспроизведению искомого градиентного профиля ОВ, наблюдаются существенные локальные флуктуации показателя преломления. В результате статического анализа указанных выше протоколов измерений было выявлено, что данные флуктуации хорошо описываются с помощью нормального закона распределения: здесь локальное математическое ожидание соответствует непосредственно локальному значению показателя преломления, в то время как дисперсия не превышает $5 \cdot 10^{-5}$. Поэтому далее такие флуктуации рассматривались как «нормальные». В свою очередь, для имитации аномально сильных «искажений» профиля дисперсия была увеличена в 3 раза – непосредственно до $15 \cdot 10^{-5}$.

Кроме того, было выявлено, что промышленные образцы ОВ отличаются от модельных наличием несимметричной эллиптичностью поперечного сечения как самого ОВ по внешнему диаметру оболочки, так и непосредственно по сердцевине. Анализ более 20 упомянутых протоколов измерений профиля показателя преломления [16, 18] промышленных образцов многомодовых ОВ позволил выделить «наихудший» случай разброса значений радиусов сердцевинки полусечений ОВ для LOMF категории OM2+/OM3, которые далее использовались для моделирования «искажений» геометрии исследуемого FMF.

Очевидно, что внесенная асимметричная эллиптичность поперечного сечения сердцевинки в сочетании с сильными локальными искажениями профиля показателя преломления существенно усложняют геометрию исследуемого FMF. Поэтому на следующем этапе для расчета дисперсионных параметров модового состава такого FMF было предложено использовать ранее разработанную модификацию строгого метода смешанных конечных элементов (МСКЭ) [21], адаптированную на случай анализа ОВ с увеличенным диаметром сердцевинки [22, 23]. При этом формирование 3D-структуры исследуемого FMF для последующего анализа МСКЭ осуществляется с помощью предложенной методики восстановления 3D-структуры промышленного образца ОВ на основе штатных протоколов измерения профиля показателя преломления, которая подробно описана в опубликованных работах [24, 25].

2.2. Результаты исследования влияния «искажений» геометрии сердцевины на деградацию DMD модового состава 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевины 42 мкм

Представленный метод моделирования «искажений» геометрии сердцевины «промышленного образца» ОВ предложено апробировать на примере ранее полученного модельного образца градиентного профиля показателя преломления 16-LP-модового кварцевого FMF с сердцевинной 42 мкм [26, 27]. Данный профиль обеспечивает теоретическое снижение DMD по всему составу 16 направляемых мод этого модельного FMF с идеальным круглым поперечным сечением до 120 пс/кс и менее в «С»-диапазоне длин волн. Таким образом, согласно предыдущему разделу, в рассматриваемый оптимизированный профиль показателя преломления были внесены флуктуации: здесь также использовался нормальный закон распределения, при этом локальным математическим ожиданием являлось локальное значение показателя преломления n_k , в то время как дисперсия выбиралась равной $5 \cdot 10^{-5}$ в случае «нормальных» искажений и $15 \cdot 10^{-5}$ – в случае «аномально сильных» искажений. Градиентный профиль показателя преломления исследуемого 16-LP-модового FMF с внесенными искажениями приведен на рисунке 1(а).

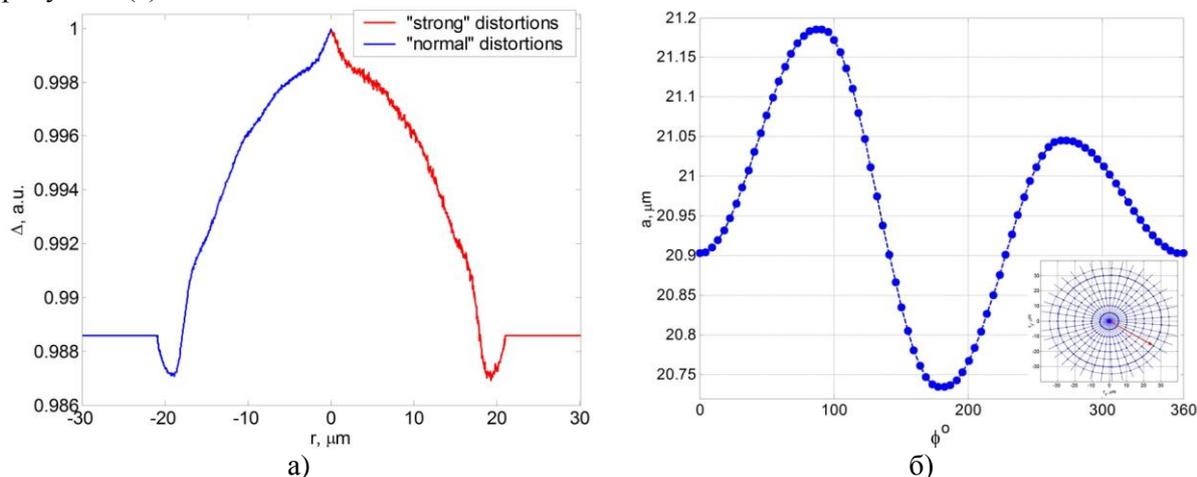


Рисунок 1. Моделирование искажений геометрии сердцевины исследуемого 16-LP-модового FMF, обусловленные особенностями технологического процесса производства ОВ промышленными способами: (а) градиентный профиль 16-LP-модового FMF с наложением «нормальных» и «аномально сильных» локальных флуктуаций показателя преломления; (б) асимметричная эллиптичность поперечного сечения сердцевины FMF: распределение вариаций радиуса сердцевины FMF по значениям полярного угла $\phi=0^\circ \dots 360^\circ$.

Далее с помощью разработанной оригинальной методики, подробно изложенной в [24, 25], была проведена реконструкция 3D-структуры исследуемого FMF для случая «аномально сильных» локальных флуктуаций показателя преломления и наведенной асимметричной эллиптичности геометрии сердцевины. Здесь вариации радиуса сердцевины относительно значений полярного угла выбирались также в соответствии с протоколами измерения профилей промышленных образцов LOMF, пропорционально масштабированным на усредненный («номинальный») радиус сердцевины FMF 21 мкм, которые в данном случае достигали до 0.47. Полученная в результате реконструкции зависимость значения радиуса сердцевины от полярного угла $\phi=0^\circ \dots 360^\circ$ для рассматриваемого ОВ представлена на рисунке 1(б). Затем для восстановленной 3D-структуры FMF была выполнена известная процедура формирования переменной адаптивной треугольной сетки представления анализируемого ОВ и проведен последующий расчет нормированной постоянной распространения, а также полей направляемых мод с помощью указанного выше строгого метода МСКЭ [22, 23].

Результаты расчета диаграммы ДМЗ направляемых мод для оптимизированного профиля модельного FMF, профиля с внесенными «аномально сильными» искажениями при идеально круглом поперечном сечении сердцевины и исследуемого FMF с описанной наведенной

асимметричной эллиптичностью сердцевинки при одновременно «аномально сильных» искажениях профиля показателя преломления представлены на рисунке 2. Как и ожидалось, асимметричная эллиптичность геометрии сердцевинки достаточно сильно деформирует поля направляемых высших мод, особенно последних радиальных порядков, что негативно сказывается на увеличении DMD, принимающему неприемлемо большие значения. Так, например, для моды LP_{04} этот параметр достигает более 750 пс/км в области верхней границы «С»-диапазона длин волн (рисунок 2(б), 3). Напротив, поля направляемых мод низшего (первого) радиального порядка по-прежнему хорошо описываются в базисе функций Лагерра-Гаусса в рамках приближения Гаусса [28] (рисунок 3), при этом их DMD по основной моде в среднем составляет порядка 11 пс/км (рисунок 2(а)). Анализ полученных результатов требует проведения дополнительных мероприятий по фильтрации/подавлению соответствующих мод высших порядков.

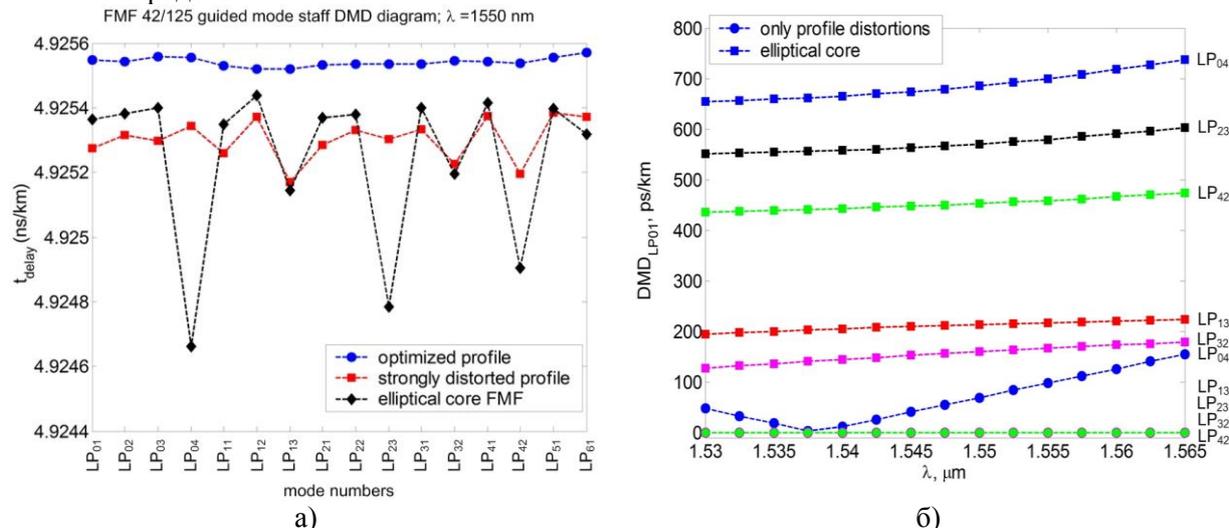


Рисунок 2. Влияние наведенного искажения геометрии сердцевинки исследуемого 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевинки 42 мкм на деградацию DMD: (а) диаграммы DMD FMF для разной степени отклонения геометрии сердцевинки от оптимальной формы; (б) DMD направляемых мод высших радиальных порядков по основной моде LP_{01} для разной степени отклонения геометрии сердцевинки FMF от оптимальной формы.

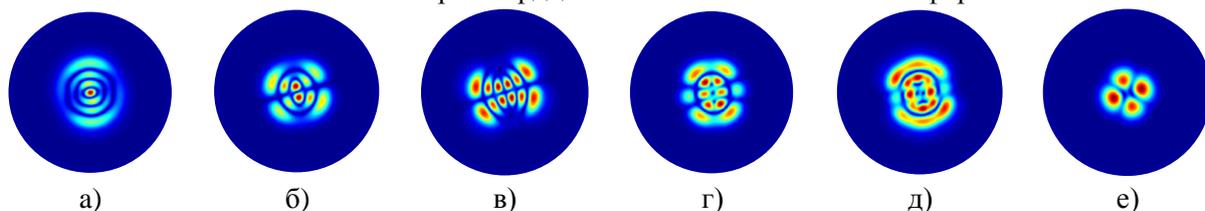


Рисунок 3. Поля мод высших порядков FMF с асимметричной эллиптичностью геометрии сердцевинки и «аномально сильными» искажениями профиля показателя преломления: : (а) LP_{04} ; (б) LP_{13} ; (в) LP_{23} ; (г) LP_{32} ; (д) LP_{42} ; (е) направляемая высшая мода низшего (первого) радиального порядка LP_{21} – поле хорошо описывается в рамках приближения Гаусса (базис функций Лагерра-Гаусса).

3. Расчет схемы прецизионного пространственного позиционирования 5 каналов системы MDM на торце 16-LP-модового FMF с асимметричной эллиптичностью геометрии 42-мкм сердцевинки

3.1. Общие положения

Описанную выше проблему управления направляемыми высшими модами последних радиальных порядков предлагается решать путем селективного возбуждения основной и высших мод низшего (первого) радиального порядка. Последнее непосредственно реализуется

с помощью ранее предложенной схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы MDM на торце FMF, представляющей собой комбинацию прецизионного смещения вводимой моды относительно центра сердцевины FMF и согласования ее радиуса пятна моды (MFR – Mode Field Radius) при этом смещении с возбуждаемой модой FMF [29, 30]. Данный подход базируется на известных работах [31, 32], где было экспериментально продемонстрировано, что если изначально подобрать условия ввода сигнала с выхода лазера в торец ОВ таким образом, чтобы практически вся мощность поступающего излучения передавалась непосредственно одной определенной моде заданного порядка, то и амплитуды новых компонентов, возбуждаемых в процессе распространения по ОВ, обусловленных его нерегулярной структурой, а также наличием микро-/макро изгибов и механических напряжений, будут пренебрежимо малы, по сравнению с ней. Таким образом, можно предположить, что использование данного подхода для «размещения» каналов системы MDM с выхода мультиплексора на торце FMF линии с некоторым заданным пространственным смещением относительно центра сердцевины ОВ при одновременном согласовании MFR искомым порядком, позволит реализовать селективное возбуждение заданных направляемых мод, характеризующихся минимальным разбросом задержки из всего модового состава данного ОВ и, тем самым, исключить сильное проявление ДМЗ.

Предлагаемое решение базируется на сочетании известного метода интеграла перекрытия полей (ИПП) [28] и ранее разработанной модификации приближения Гаусса, обобщенной на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющем ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления (ОМПГ) [22, 23, 26, 33]. ОМПГ базируется на совместном применении модификации приближения Гаусса [28] и методе стратификации [34], характеризуется малой погрешностью [22, 23], низкими требованиями к вычислительным ресурсам и при этом позволяет учесть конструктивные особенности профиля показателя преломления реальных градиентных ОВ. Последующая подстановка в ИПП радиального распределения полей мод соединяемых ОВ, описываемых в рамках ОМПГ простыми функциями Лагерра-Гаусса, обеспечивает возможность перехода к аналитическим выражениям для оценки коэффициентов связи мод (КСМ) произвольного порядка.

В частности, для случая радиального рассогласования, ИПП предварительно был записан в Декартовой системе координат с учетом введенного осевого смещения d . Далее для перехода к модам высших азимутальных порядков потребовалось совместное применение известных формул разложения $\cos(lx)$ относительно $\cos(x)$ представления алгебраической функции $(a+z)^n$ в виде конечного степенного ряда, а также умножения конечных степенных рядов неодинаковой степени [35] и ранее выведенных формул произведения полиномов Лагерра разной степени, порядка и аргумента [33], что в итоге позволило разделить переменные интеграла числителя ИПП и перейти к табличным интегралам по dy и dx [35]. Громоздкие аналитические выражения для оценки КСМ с учетом введенного прецизионного радиального рассогласования, записанные в виде конечных вложенных сумм, приведены в ранее опубликованных работах [29, 36, 37].

Таким образом, даже в рассматриваемом случае FMF с наведенной асимметрией эллиптичности геометрии сердцевины и «аномально сильными» искажениями градиентного профиля показателя преломления, данная методика может успешно применяться для расчета схемы селективного возбуждения основной и высших направляемых мод первых радиальных порядков, для которых, несмотря на внесенные отклонения геометрии сердцевины FMF относительно модельной формы, поля по-прежнему хорошо описываются в базисе функций Лагерра-Гаусса рамках приближения Гаусса [28].

3.2. Результаты расчета схемы

На первом этапе был проведен расчет КСМ возбуждаемых мод FMF и, соответственно, вводимых мод этих же порядков каналов системы MDM в зависимости от MFR последних и их положения относительно центра сердцевины возбуждаемого ОВ. Рассматривались следующие

диапазоны значений: MFR $\rho_0^{IN}=0.5\dots 8.0$ мкм; радиальное смещения $d=0.0\dots 18.0$ мкм. Полученные результаты расчетов коэффициентов связи позволили перейти к построению 3D-диаграмм зависимости минимального разброса нормированных амплитуд возбуждаемых мод FMF соответствующих азимутальных порядков, в зависимости от перечисленных выше параметров, которые приведены на рисунок 4(а). Поскольку для 5го и 6го азимутальных порядков условию отсечки FMF удовлетворяют только моды первого радиального порядка – LP_{51} и LP_{61} , для которых оптимальным, с точки зрения согласованности по MFR, является только центрированный ввод, предлагается рассмотреть 5-канальную систему MDM, обеспечивающую ввод 5 мод первого радиального порядка $LP_{0m}\dots LP_{4m}$. Анализ построенных диаграмм позволил выделить соответствующие значения MFR и локации торца FMF, как в центральной, так и периферийной части сердцевины ОБ, при которых для всех пяти перечисленных модовых групп $LP_{0m}\dots LP_{4m}$ минимальное отклонение нормированных амплитуд внутри одной группы идентичного азимутального порядка $l=0\dots 4$ составило не менее 0.90 при передаче практически всей мощности вводимых каналов MDM направляемым модам также первого радиального порядка FMF $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{31}, LP_{41}$, отличающихся минимальным разбросом задержки относительно основной моды LP_{01} . Более того, согласно полученным результатам расчета, указанный эффект для перечисленных направляемых мод достигается в периферийной области на расстоянии 3.0...3.4 мкм от центра сердцевины (рисунок 4(б)).

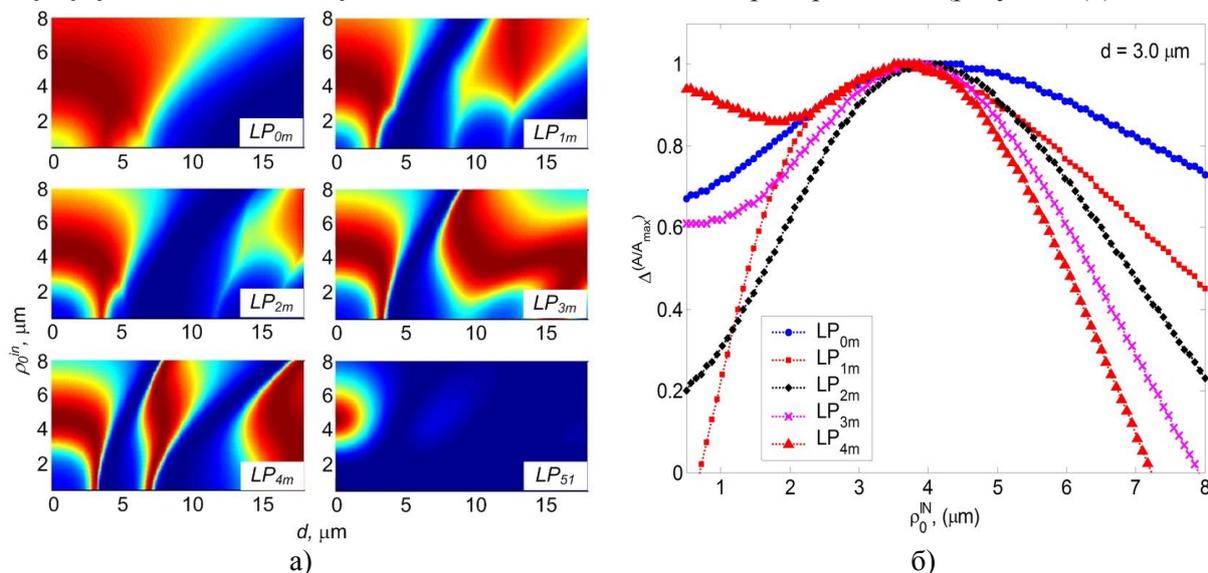


Рисунок 4. Зависимости минимального разброса нормированных амплитуд возбуждаемых мод FMF в зависимости от радиуса пятна вводимой моды LP_{1l} канала системы MDM и ее радиального смещения d относительно центра ОБ ($\lambda=1550$ нм): (а) 3D-диаграммы; (б) фиксированное смещение $d=3.0$ мкм.

Это позволило перейти к построению симметричной схемы пространственного позиционирования 5 каналов системы MDM на торце исследуемого ОБ. Так, основная мода LP_{01} вводится центрировано, в то время как остальные высшие моды $LP_{11}\dots LP_{41}$ – со смещением $d=3.0$ мкм относительно центра сердцевины FMF. При этом соотношения MFR вводимой / возбуждаемой мод следующие: LP_{01} – 4.700/4.637 мкм; LP_{11} – 3.650/4.764 мкм; LP_{21} – 3.950/4.746 мкм; LP_{31} – 3.800/4.717 мкм; LP_{41} – 3.650/4.685 мкм. Симметричная схема пространственного позиционирования 5 каналов системы MDM на торце исследуемого FMF представлена на рисунок 5(а), (б). Следует отметить, что амплитуды возбуждаемых в FMF высших мод первых радиальных порядков LP_{1l} меньше как минимум в 2 раза относительно возбуждаемой основной моды LP_{01} . Данный факт объясняется соответствующими вносимыми потерями на стыке ОБ, выполненном с радиальным рассогласованием (рисунок 5(б)), что

требует проведения дополнительных мероприятий по выравниванию амплитуд возбуждаемых в FMF селективных модовых составляющих.

Вместе с тем сопоставление спектральных характеристик DMD без и, напротив, с выбором параметров схемы прецизионного позиционирования, представленных на рисунке 6, показывает, что подбор сочетания MFR вводимых мод и их положения на торце FMF на заданном расстоянии от центра сердцевины $d=3.0$ мкм позволяет «сохранить» значение DMD менее 100 пс/км во всем «С»-диапазоне длин волн, несмотря на асимметричную эллиптичность геометрии сердцевины FMF и «аномально сильные» искажения градиентного профиля показателя преломления.

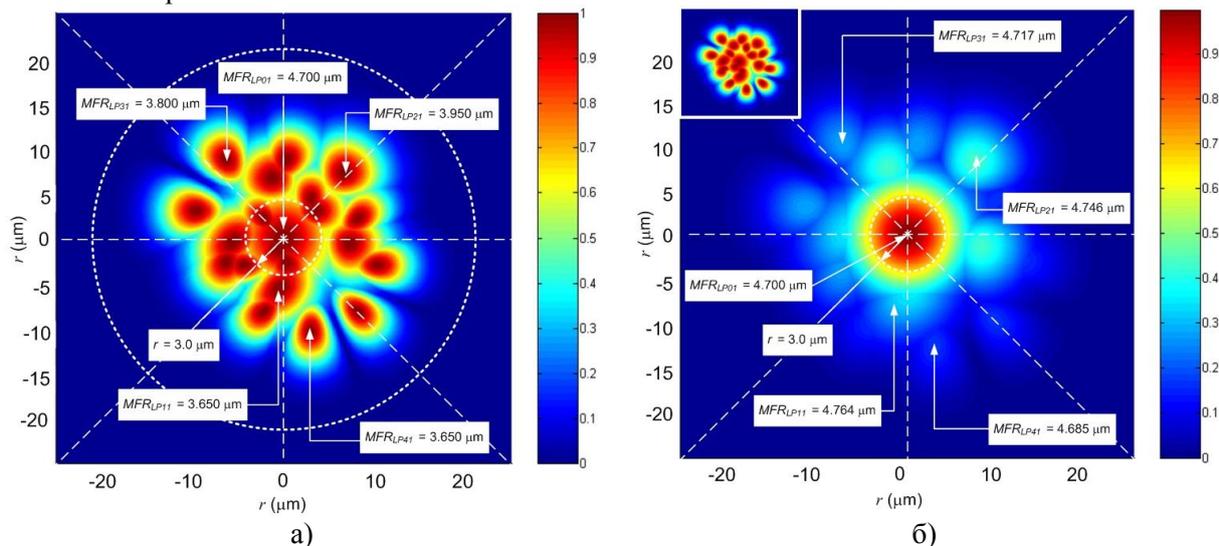


Рисунок 5. Симметричная схема пространственного позиционирования 5 каналов системы MDM на торце FMF ($\lambda=1550$ нм): (а) выход мультиплексора; (б) вход FMF с учетом потерь на стыке.

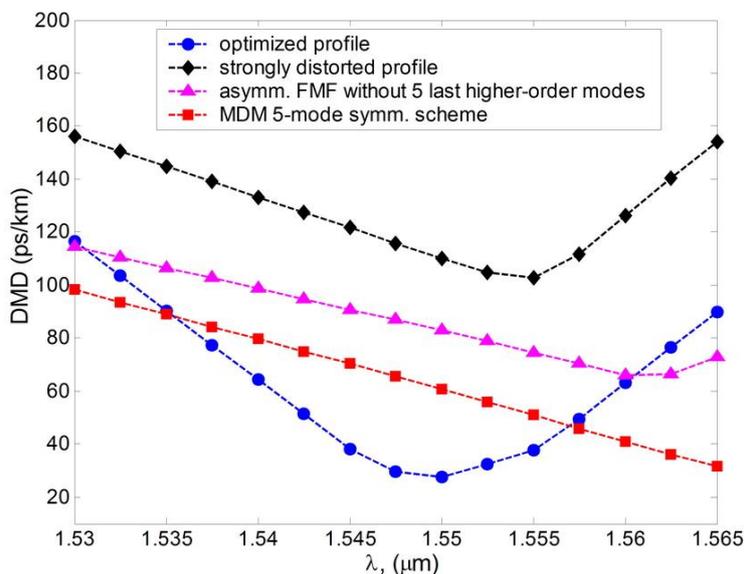


Рисунок 6. Спектральные характеристики DMD, построенные в «С»-диапазоне длин волн для исследуемого 16-LP-модового ОВ с диаметром сердцевины 42 мкм: для оптимизированного градиентного профиля показателя преломления и модельной идеализированной геометрии сердцевины; с внесенными «аномально сильными» искажениями профиля и круглым поперечным сечением сердцевины; с наведенной асимметрией эллиптичности геометрии сердцевины и подавлением 5 высших мод последних радиальных порядков либо применением симметричной схемы позиционирования 5 каналов MDM.

4. Заключение

Предложен простой подход для моделирования «искажений» геометрии FMF, обусловленных технологическими особенностями процессов этапов производства кварцевых ОВ. Представлены результаты его апробации на примере ранее полученного модельного образца градиентного профиля показателя преломления 16-LP-модового кварцевого FMF с сердцевинной 42 мкм, обеспечивающего теоретическое снижение DMD по всему модовому составу менее чем 120 пс/км в «С»-диапазоне длин волн, и анализ деградации спектральной характеристики DMD из-за наведенных «искажений» геометрии сердцевинной.

Представлен простой и быстрый метод расчета параметров схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы MDM на торце сердцевинной ОВ ВОЛП. Предлагаемое решение базируется на совместном использовании известного метода интеграла перекрытия полей и ранее разработанного приближенного метода ОМПГ. Показано, что при соответствующем сочетании значений MFR канала MDM и радиального рассогласования на вводе удастся добиться передачи практически всей мощности вводимой моды канала MDM отдельной направляемой моде ОВ этого же азимутального порядка. Приведены результаты расчета симметричной пространственной схемы позиционирования 5 каналов системы MDM на торце 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевинной 42 мкм, наведенной асимметричной эллиптичностью геометрии сердцевинной и «аномально сильными» искажениями градиентного профиля показателя преломления относительно оптимизированной формы. Данная схема обеспечивает возбуждение 5 направляемых мод исследуемого FMF – основной LP_{01} (центрированный ввод) и высших мод первого радиального порядка $LP_{11}...LP_{41}$ (смещение $d=3.0$ мкм). Показано, что применение описанной схемы позиционирования каналов системы MDM позволяет «удержать» значение DMD до 100 пс/км во всем «С»-диапазоне длин волн, несмотря на существенные отклонения геометрии сердцевинной FMF, имитирующие реальный промышленный образец ОВ, от модельной формы.

5. Литература

- [1] Optical Fibres, Cables and Systems (ITU-T Manual). – Geneva, 2009. – 300 p.
- [2] OFS. Few mode optical fiber series. OFS Fitel LLC. Product catalog [Electronic resource]. – Access mode: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/viewitems/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1?> (01.12.2018).
- [3] Hirano, M. Future of transmission fiber // IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3(2). – P. 316-319. DOI: IEEE Photonics Journal 3(2):316-319.
- [4] Essiambre, R.-J. Capacity trends and limits of optical communication networks / R.-J. Essiambre, R.W. Tkach // Proceedings of IEEE. – 2012. – Vol 100(5). – P. 1035-1055. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2182970.
- [5] Ellis, D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H-1-11. DOI: 10.1117/12.928093.
- [6] Richardson, D.J. Space-division multiplexing in optical fibers / D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7(5). – P. 354-362. DOI: 10.1038/nphoton.2013.94.
- [7] Ferreira, F.M. Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay / F.M. Ferreira, D. Fonseca, H.J.A. da Silva // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32(3). – P. 353-360. DOI: 10.1109/JLT.2013.2293066.
- [8] Mizuno, T. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber / T. Mizuno, H. Takara, A. Sano, Yu. Miyamoto // IEEE Journal of Lightwave Technologies. – 2016. – Vol. 34(2). – P. 582-592. DOI: 10.1109/JLT.2015.2482901.
- [9] Sillard, P. 50 μm multimode fibers for mode division multiplexing / P. Sillard, D. Molin, M. Bigot-Astruc, A. Amezcua-Correa, K. de Jongh, F. Achten // IEEE Journal of Lightwave Technologies. – 2016. – Vol. 34(8). – P. 1672-1677. DOI: 10.1109/JLT.2015.2507442.
- [10] Mori, T. Few-mode fiber technology for mode division multiplexing / T. Mori, T. Sakamoto, M. Wada, T. Yamamoto, K. Nakajima // Optical Fiber technology. – 2017. – Vol. 35(2). – P. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.07.011>.

- [11] Ferreira, F. On the feasibility of mode-division multiplexed transmission over few-mode fibres / F. Ferreira, Ch. Sánchez, St. Sygletos, A.D. Ellis // *Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. – 2017. – P. 1-5. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121160.
- [12] Shariati, B. Spectrally and spatially flexible optical networks: recent developments and findings / B. Shariati, D. Klonidis, J. Comellas, L. Velasco, I. Tomkos // *Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. – 2018. – P. We.C1.1-1–We.C1.1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2018.8473868.
- [13] Chebaane, S. Trenched raised cosine FMF for differential mode delay management in next generation optical networks / S. Chebaane, H. Fathallah, H. Seleem, M. Machhout // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 408. – P. 15-20. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.08.050.
- [14] Bottacchi, S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 654 p.
- [15] An, H. Characterization of surface crystallization in Ge doped graded-index silica glass / H. An, Yi. Tang, P. McNamara, S. Fleming // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(6). – P. 1055-1060. DOI: 10.1364/OPEX.12.001055.
- [16] Bourdine, A.V. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers / A.V. Bourdine, D.E. Praporshchikov, K.A. Yablochkin // *Proceedings of SPIE*. – 2011. – Vol. 7992. – P. 799206-1-8. DOI: 10.1117/12.887258.
- [17] Demidov, V.V. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects // V.V. Demidov, E.V. Ter-Nersesyants, A.V. Bourdine, V.A. Burdin, A.Yu. Minaeva, A.S. Matrosova, A.V. Khokhlov, A.V. Komarov, S.V. Ustinov, E.V. Golyeva, K.V. Dukelskii // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10342. – P. 103420X-1. DOI: 10.1117/12.2270784.
- [18] Бурдин, А.В. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2010. – № 2. – С. 22-27.
- [19] TIA/EIA-455-44B (FOTP-44B). Refractive Index Profile, Refracted Ray Method. IEC 60793 and ITU Recommendation G.651.
- [20] EXFO NR-9200 Optical Fiber Analyzer. Datasheet. EXFO, 1999 – 5 p.
- [21] Koshiba, M. A vector finite element method with the high-order mixed interpolation-type triangular elements for optical waveguiding problems / M. Koshiba, S. Maruyama, K. Hirayama // *Journal of Lightwave Technology*. – 1994. – Vol. 12(3). – P. 495-502. DOI: 10.1109/50.285332.
- [22] Бурдин, А.В. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов / А.В. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов // *Телекоммуникации*. – 2010. – № 9. – С. 33-40.
- [23] Bourdine, A.V. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method / A.V. Bourdine, O.R. Delmukhametov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2013. – Vol. 72(2). – P. 111-123. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30.
- [24] Бурдин, А.В. Расчет параметров передачи модового состава промышленных образцов кварцевых оптических волокон с увеличенным диаметром сердцевины / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов // *Инфокоммуникационные Технологии*. – 2018. – Т. 16(1). – P. 39-48.
- [25] Bourdine, A.V. Method for analysis of real commercially available optical fibers with large core diameter / A.V. Bourdine, V.A. Burdin, O.R. Delmukhametov // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 10774. – P. 10774-08-01-11. DOI: 10.1117/12.2317799.
- [26] Андреев, В.А. Моделирование градиентного профиля показателя преломления кварцевых оптических волокон с диаметром сердцевины 42 мкм и уменьшенной дифференциальной модовой задержкой / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, Е.В. Дмитриев, А.С. Евтушенко, Н.Л. Севрук, Р.Х. Халиков // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2016. – № 3. – С. 238-247.

- [27] Bourdine, A.V. Design of low DMD few-mode optical fibers with extremely enlarged core diameter providing nonlinearity suppression for operating over "C"-band central region / V.A. Andreev, A.V. Bourdine, V.A. Burdin, A.S. Evtushenko, R.H. Khalikov // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – P. 1034207-1-8. DOI: 10.1117/12.2270555.
- [28] Snyder, A.W. Optical waveguide theory / A.W. Snyder, J. Love. – London: Chapman & Hall, 1983. – 738 p.
- [29] Bourdine, A.V. Design of precision spatial positioning scheme for mode division multiplexing system channels placement over optical fiber core end / A.V. Bourdine // Procedia Engineering. – 2017. – Vol 201, P. 117-128. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.673.
- [30] Bourdine, A.V. DMGD reducing in few-mode fiber optic links by special refractive index profile and selective mode excitation provided by designed MDM channels placement scheme over fiber core end / A.V. Bourdine, V.A. Burdin // IEEE Xplore Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). – 2017. – P. 1032-1038. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261897.
- [31] Bunge, C.-A. Analysis of ring launching scheme using hollow optical fibre mode converter for 10 Gps multimode fibre communication / C.-A. Bunge, S. Choi, K. Oh // Optical Fiber Technology. – 2006. – Vol. 12. – P. 48-58. DOI: 10.1016/j.yofte.2005.05.001.
- [32] Sim, D.H. High-speed multimode fiber transmission by using mode-field matched center-launching technique / D.H. Sim, Y. Takushima, Y.C. Chung // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 27(8). – P. 1018-1026. DOI: 10.1109/JLT.2008.2005040.
- [33] Bourdine, A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime / A.V. Bourdine // Advances in Optical Technologies. – 2013. – Vol. 2013. – P. 469389-1-18. DOI: 10.1155/2013/469389.
- [34] Adams, M.J. An introduction to optical waveguides. – New York: John Wiley and Sons, 1981. – 401 p.
- [35] Таблицы интегралов / под ред. И.С. Градштейна, И.М. Рыжика. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
- [36] Бурдин, А.В. Метод расчета параметров согласованной схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы модового мультиплексирования на торце сердцевины волоконного световода линии передачи / А.В. Бурдин // Информационные технологии и нанотехнологии 2017 (ИТНТ – 2017). Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. – 2017. – С. 209-218.
- [37] Bourdine, A.V. Fast approximate method for VCSEL-MMF transverse mode coupling analysis // A.V. Bourdine, A.E. Zhukov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 7(11). – P. 979-999. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i11.30.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-6001515 мол_а_дк.

Computation of precision spatial positioning scheme for mode multiplexing system channels over 16-LP-mode graded-index optical fiber with asymmetrical ellipticity geometry of 42- μm core

A.V. Bourdine¹, V.A. Burdin¹, O.R. Delmukhametov²

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Lev Tolstoy str. 23, Samara, Russia, 443010

²Ufa State Aviation Technical University (USATU), Karl Marx str. 12, Ufa, Russia, 445077

Abstract. This work presents results of design and computation of the precision spatial positioning scheme for mode division multiplexing (MDM) system channels over core end of silica few-mode optical fiber (FMF) with enlarged core diameter. We considered earlier on designed 16-LP-mode 42- μm -core FMF with specially synthesized graded-index refractive index profile, which provides low differential mode delay (DMD) less 120 ps/km over the whole “C”-band under the optimized ideal core geometry, while the really manufactured optical fibers differ by asymmetrical ellipticity of cross-section as well as by refractive index profile distortions. Therefore DMD degrades and becomes unacceptable due to FMF core geometry asymmetrical ellipticity that requires additional operations for higher-order mode management. We propose to excite only low (the first radial) order guided modes in this FMF by proposed spatial positioning scheme for MDM system channels over FMF core end, which is based on combination of mode matching techniques and precision offset launching. Results in computation of described scheme for 5-mode MDM channels are represented.