

Одно/мало/много-модовые волокна, в чем соль?

Как говорится "все новое – это хорошо забытое старое". Данная фраза подходит ко многим технологиям: DWDM, MIMO, OFDM, CDMA и сейчас мы этот список еще немного расширим. Первые созданные волокна были многомодовыми (ММ), позднее их решили модернизировать с целью увеличения полосы пропускания и дальности передачи, и в итоге пришли к одномодовым волокнам (SM). Однако сейчас после многих лет ненасытной эксплуатации последних возникает необходимость сделать маленький шаг назад – снова возвращаемся в сторону многомодовых волокон. В результате объединения полезных качеств SM и MM волокон мы получаем новый класс волокон – маломодовые волокна.

Как было рассмотрено ранее, на сегодняшний день существуют уже несколько видов многосердцевинных волокон и все они способны поддерживать разные режимы передачи световой волны. Маломодовые волокна, по сути, представляют еще один подход пространственного мультиплексирования, который заключается в организации множества независимых информационных каналов передачи по одной сердцевине, поддерживающей распространение небольшого количества пространственных мод.

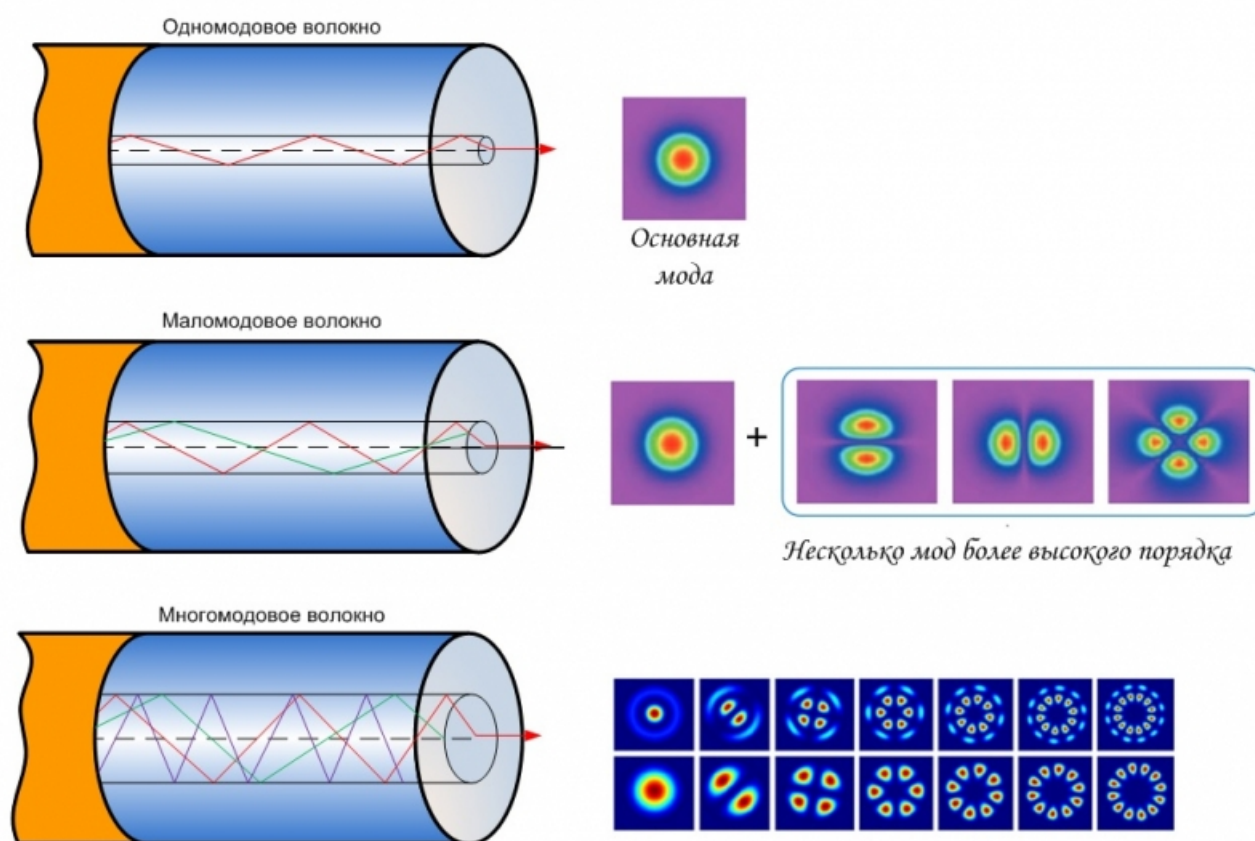


Рис. 1 Различие волокон

Одно из самых распространенных заблуждений о волокнах заключается в предположении о том, что много мод в волокне лучше, чем одна. Сейчас же можно сказать так: "много мод это конечно хорошо, но мало лучше".

Преимущества маломодовых волокон:

1. Масштабируемость до ~50 мод (уже продемонстрирована возможность благоприятного режима передачи 15 мод);
2. Диаметр оболочки волокна стандартный 125 мкм;
3. Возможна сварка с помощью традиционных аппаратов для сварки волокон;
4. Обеспечивают самое большое количество мод на поперечное сечение волокна;
5. Возможна эффективная накачка волокна для обеспечения оптического усиления;
6. Многие традиционные оптические компоненты можно легко приспособить к маломодовым волокнам.

В первых работах данного направления рассматривались волокна, передающие всего 3 пространственные моды. Основные проблемы, с которыми столкнулись инженеры-исследователи при создании таких волокон, заключались в большой вероятности смешения мод, а также в большой величине межмодовой дисперсии.

Как оказалось, для борьбы с данными явлениями можно использовать методы цифровой обработки

сигналов, которые во многом аналогичны методам устранения эффекта поляризационной модовой дисперсии (ПМД). В настоящее время активно ведутся исследования по разработке волокон с малой величиной межмодовой дисперсии. Также актуальной задачей является подход по увеличению количества мод с сохранением дальности передачи данных и их достоверностью.

В 2015 г. была успешно реализована линия связи длиной 23.8 км, использующая волокно с поддержкой 15 различных пространственных мод. Также уже были поставлены эксперименты по передаче данных с использованием маломодовых волокон и на гораздо большие расстояния (более 1000 км), однако число мод было ограничено пока только тремя.

Стоит отметить, что концепция маломодовых волокон может быть выполнена в сочетании с многосердцевинными волокнами. Этот подход может обеспечить повышенную гибкость в плане контроля величины межмодовой дисперсии, а также определенные преимущества в мультимплексировании/демультиплексировании сигналов отдельных пространственных каналов.

Объединение технологии маломодового режима передачи с N модами и технологии многосердцевинных волокон с M сердцевинами обеспечит MxN пространственных каналов. Маломодовые многосердцевинные волокна обозначаются аббревиатурой FM-MCF (Few-Mode Multicore Fibre).

В настоящее время активно ведутся исследования в области создания конструктивных FM-MCF волокон с целью возможности их применения в будущих сетях связи. Например, в 2016 г. NTT, Fujikura и Hokkaido University была осуществлена передача данных с рекордной спектральной эффективностью 345 бит/с/Гц при длине линии 9.8 км. Использовалось FM-MCF волокно с 19-ю сердцевинами, каждая из которых поддерживала передачу 6 мод. В общей сложности обеспечивалось $19 \times 6 = 114$ отдельных пространственных каналов.

В 2017 г. Sumitomo Electric совместно с KDDI Research поставили эксперимент, в котором использовали также 19-ти сердцевинное волокно с 6 модами. В результате им удалось достичь рекордной скорости передачи в 10 Петабит/с, с длиной линии 11,3 км.

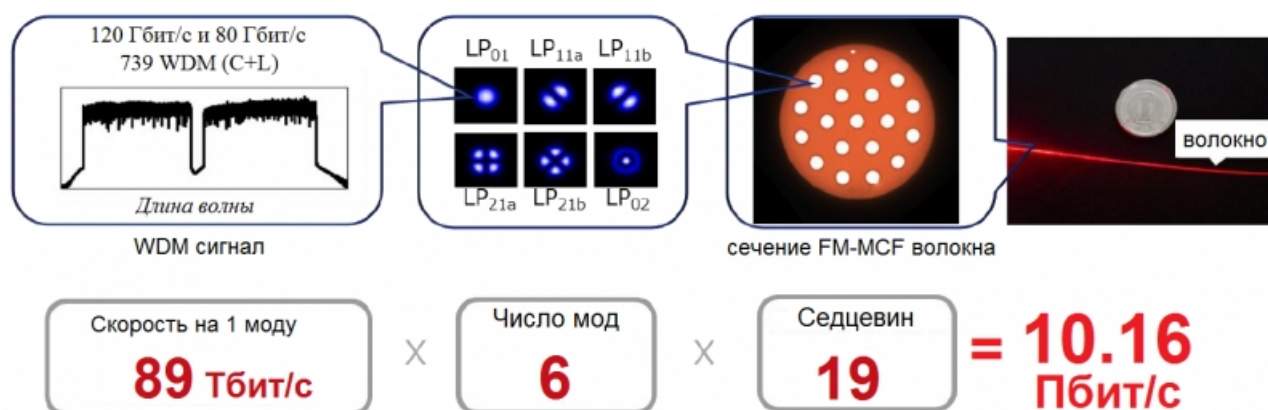


Рис. 2

В эксперименте было осуществлено мультимплексирование с разделением по длине волны 739 сигналов, модулированных с символьной скоростью 12 Гигабод (применялась модуляция 64QAM – канальная скорость 144 Гбит/с, а также модуляция 16QAM – канальная скорость 96 Гбит/с). Помимо пространственного разделения каналов, использовалось также поляризационное уплотнение. Пространствие всех описанных подходов в сочетании с кодами прямой коррекции ошибок FEC с избыточностью 25,5%, 20% и 12,75% позволило достигнуть общей пропускной способности 10,16 Петабит/с. Напомним, что десять петабит это 10 квадриллионов бит (10 в 16-ой степени), а скорость 10 Пбит/с = 10,000,000 Гбит/с.

Только вдумайтесь в эти слова: разработка петабитных систем связи и создание петафлопных суперкомпьютеров означает, что наш мир информационной реальности находится уже на пороге Пета-эры.

Также уже были проведены практические эксперименты по использованию FM-MCF волокон на более длинные дистанции. Лучший результат на данный момент – организация 20 WDM каналов по 40 Гбит/с с использованием поляризационного мультимплексирования на линии связи длиной 527 км. В этом эксперименте FM-MCF волокно состояло из 12 сердцевин, каждая из которых поддерживала передачу 3 мод (т. е. в общей сложности было организовано 36 отдельных пространственных каналов).

Пока неясно, насколько экономически будет оправдано применение многосердцевинных волокон. Скорее всего, при развитии многосердцевинных волокон в первую очередь будет делаться упор на сокращение интерфейсных расходов (стоимость коннекторов, сварочных аппаратов), а уже во вторую

очередь на снижение стоимости самих волокон. Однако уже подсчитано, что использование маломодовых волокон, по крайней мере, при большом числе мод, может дать значительную экономию средств: уже сейчас волокна, поддерживающие передачу нескольких десятков мод, не в десятки раз дороже стандартного одномодового волокна.

Большое количество исследований посвящено использованию маломодовых волокон для увеличения пропускной способности сетей. Однако есть другие подходы использования маломодовых волокон, например передача изображения через кодирование/декодирование состояний пространственных мод.

На рис. 3 представлен принцип кодирования/декодирования 4 пространственных мод для передачи черно-белой картинки. Сперва определяется значение оттенка серого (0-255) для каждого пикселя изображения. Далее это значение представляется в четверичной системе: значение 180 в десятичной системе переводим в четверичную и получаем 2310. Далее каждой из четырех возможных цифр четверичного числа назначается своя пространственная мода. Для генерации соответствующей моды используется фазовая пластинка. Далее оптический сигнал вводится в маломодовое волокно, которое поддерживает передачу каждой из используемых мод.

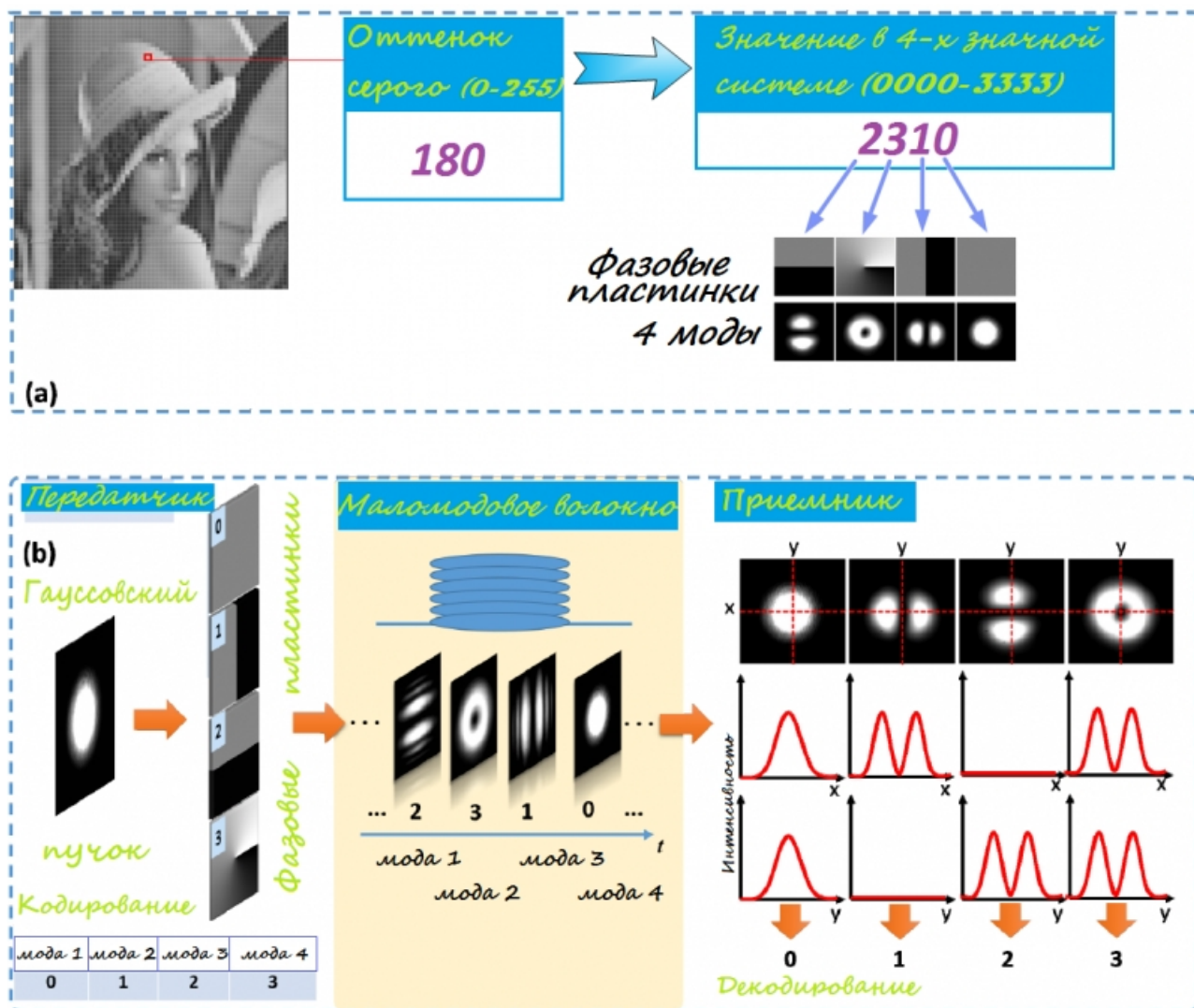


Рис.3

Четыре переданные пространственные моды имеют различное распределение интенсивности. Таким образом, регистрируя это распределение различных пространственных мод, можно получить на приемной стороне последовательность передаваемых данных. Интенсивность поля измеряется вдоль двух перпендикулярных линий – осей x и y , проведенных в центре каждого записанного профиля интенсивности. Таким образом, мы получаем распределение интенсивности поля по каждой оси. Мода 1 (LP01) имеет по одному пику в обоих направлениях x и y распределения интенсивности. Мода 2 (LP11a) по оси абсцисс содержит два пиковых значения распределения интенсивности, а по оси ординат ни одного. Мода 3 (LP11b) дает обратную картину: ни одного пика по оси абсцисс и два пика по оси ординат. У четвертой моды на каждой из осей содержится по 2 пика. То есть, каждая мода обеспечивает свою уникальную комбинацию распределения интенсивности по направлениям x и y , и если определить число пиков распределения интенсивности света на каждой оси, то можно регистрировать каждый переданный сигнал с соответствующим типом волны.

Напоследок представляем вашему вниманию нетривиальную моду.



Такую моду оптическое волокно еще не видело!



Стоит ли поддерживать распространение такой моды? Одно можно сказать точно: такую моду, оптическое волокно еще не видело и вряд ли поддержит. Таким образом, встречается еще здравомыслие на нашем свете и в свете волоконно-оптических источников излучения.