

Волокна будущих петабитных сетей

Выход из кризиса найден - задействуем пространство

За последние два десятилетия были достигнуты значительные результаты в области производства стандартных одномодовых волокон SMF, включая разработку волокон с большой эффективной площадью для минимизации нелинейностей, волокон с пониженным содержанием гидроксильных групп, а также сверхпрозрачных волокон с коэффициентом затухания на длине волны 1550 нм менее 0,15 дБ/км. Кроме того, огромные успехи были достигнуты в совершенствовании методов изготовления SMF волокон, что позволило производить их с невысокими финансовыми затратами и в больших объемах (в настоящее время общемировые показатели составляют свыше 200 миллионов километров в год). Стоит отметить, что, несмотря на все эти улучшения и модификации параметров одномодовых волокон, они не претерпели существенных конструктивных изменений в течение многих лет. Как оказалось, используемый конструктив волокон по современным меркам растущих объемов передачи данных уже является препятствием для дальнейшей оптимизации производительности сетей.

Предел пропускной способности Шеннона останется неприступной крепостью для существующих одномодовых волокон даже при существенном улучшении их параметров: уменьшении значения коэффициента затухания в расширенных диапазонах, уменьшения коэффициента нелинейных эффектов и др. Расширение рабочего частотного диапазона стандартных волокон совместно с увеличением рабочего частотного диапазона оптических усилителей, конечно, может обеспечить увеличение пропускной способности, однако не более чем в пять раз. В совокупности использование волокон с меньшим затуханием и более широким рабочим частотным диапазоном может дать небольшой задел в решении проблемы стремительного роста объема трафика, однако в скором времени этого решения опять будет недостаточно. Ни один из аналогичных подходов не может обеспечить долгосрочного устойчивого пути повышения пропускной способности современных сетей, то есть обеспечить долговременный запас возможности ежегодного многократного повышения емкости оптических сетей.

Таким образом, помимо применения новых видов модуляции, методов цифровой обработки сигналов, увеличения спектральной эффективности и числа WDM-каналов, для непрерывного развития емкости оптических сетей в ближайшие несколько десятилетий потребуется задействовать еще одно измерение, которое ранее не использовалось – пространство.

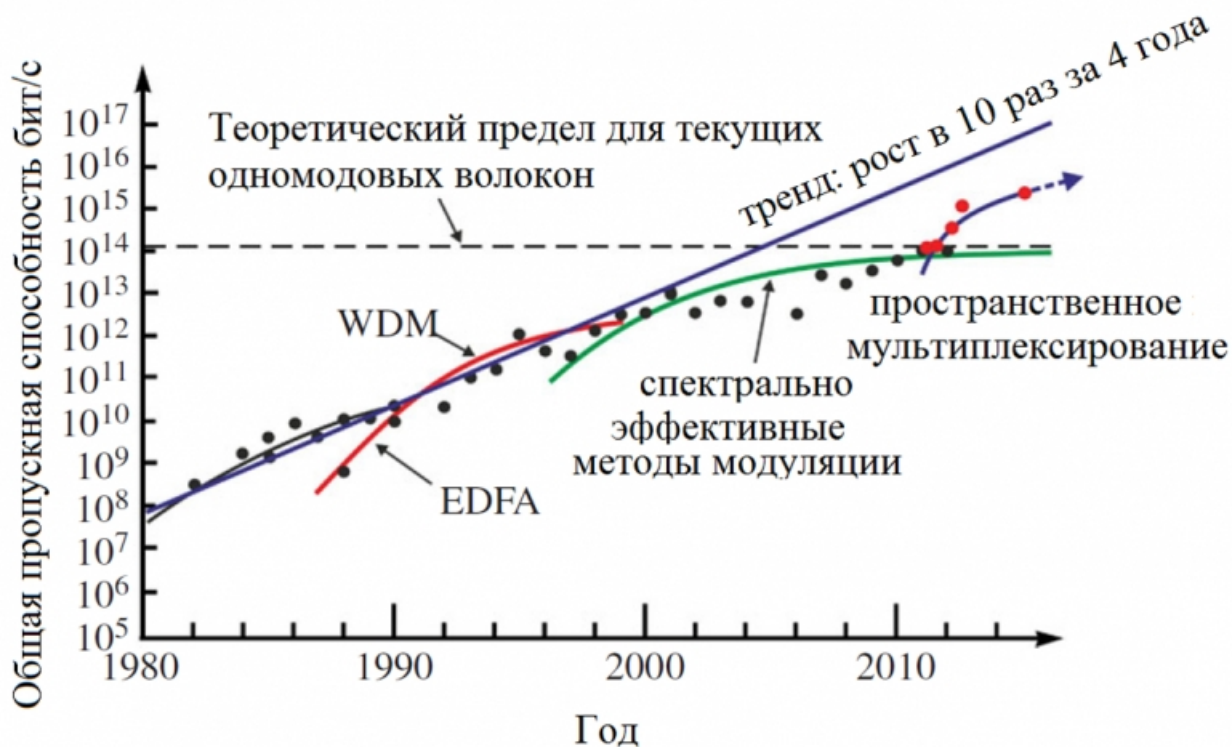


Рис. 1 – Темпы роста общей пропускной способности волоконно-оптических сетей

По построенному линейному тренду на рис. 1 можно сделать вывод, что емкости оптических сетей повышаются каждые 4 года приблизительно в 10 раз! Как уже было отмечено [здесь](#), дальнейший рост пропускной способности свыше 100 Тбит/с оказывается выше возможностей, используемых в настоящее время типовых одномодовых волокон. Данное обстоятельство побуждает к разработке и применению новых, конструктивно отличных оптических волокон, позволяющих удовлетворить

растущие потребности объема передаваемых данных. На рис. 1 красными точками показаны результаты экспериментов, основанных не пространственном мультиплексировании.

В принципе идею пространственного мультиплексирования можно назвать банальной. Каждый обыватель может предложить такое очевидное решение: для многократного повышения пропускной способности сетей необходимо увеличить число систем передачи на одну среду передачи, на один кабель. В беспроводной связи данный подход уже реализуется в технологии MIMO. В волоконно-оптических сетях нет такой бесплатной расточительной среды распространения как воздух, поэтому реализовать данный подход несколько сложнее и дороже. Однако прогресс дошел уже до того, что научились изготавливать микроскопические стеклянные волокна с несколькими сердцевинами в одной оболочке. Такие волокна называются многосердцевинными волокнами. Идея создания подобных волокон возникла еще в 1979 г. Основной задачей конструкции многосердцевинного волокна является повышение количества независимых для передачи сердцевин в поперечном сечении волокна. Конструкция ОВ и интервалы между сердцевинами выбираются таким образом, чтобы минимизировать взаимные перекрестные помехи и в то же время сохранить размеры волокна в несколько сот микрон. Если взаимные перекрестные помехи будут незначительны, в этом случае параллельно по каждой сердцевине можно организовать независимые каналы передачи. При этом если использовать многоуровневые форматы модуляции, DWDM-мультиплексирование, поляризационное мультиплексирование и по каждой сердцевине передавать данные со скоростью близкой к теоретической емкости одномодовых волокон, то можно достичь скорости передачи в сотни-тысячи терабит по одному такому волокну.

За последнее время были сделаны значительные успехи в разработке многосердцевинных волокон. Результаты экспериментов показывают, что максимальное число независимых сердцевин, которое можно практически реализовать для оптических систем дальней передачи, лежит где-то в диапазоне от 12 до 32. Стоит отметить, что для сетей небольшой протяженности количество сердцевин может быть больше.

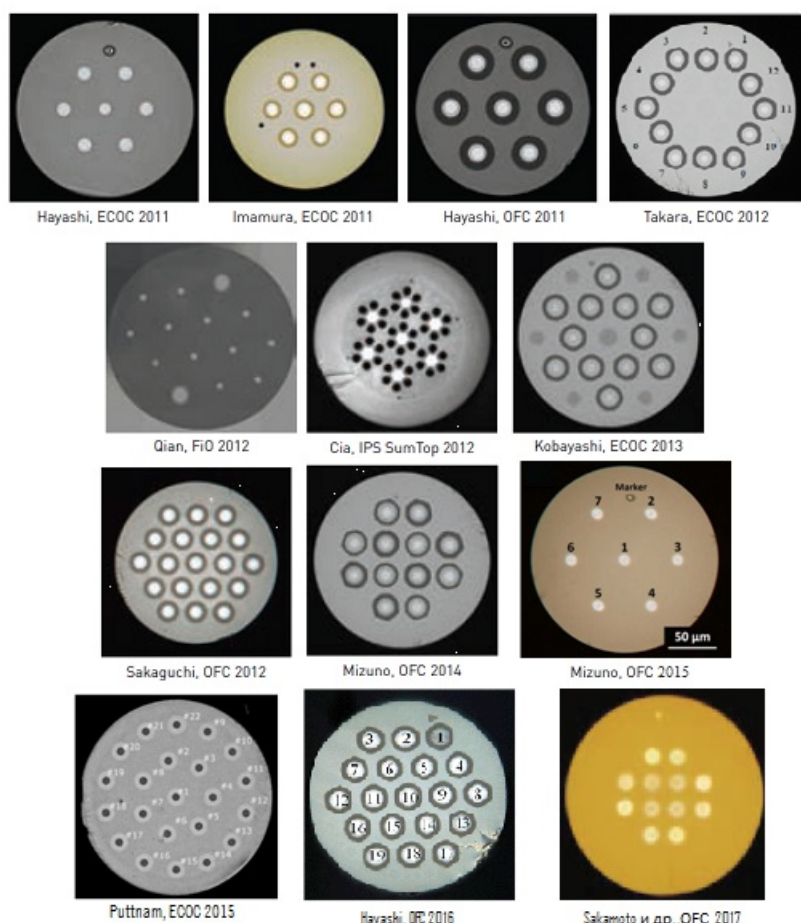


Рис. 2 – Разработанные многосердцевинные волокна

Впервые демонстрация линии с многосердцевинными волокнами со скоростью 100 Тбит/с была осуществлена в 2011 году (волокно содержало 7-сердцевин). Эксперименты систем с пространственным мультиплексированием со скоростями Пбит/с были реализованы спустя год в 2012 году на 12-сердцевинном волокне.

Одной из основных проблем многосердцевинных волокон является взаимное влияние, которое возникает вследствие непреднамеренного перехода части сигнала из одной сердцевины в другую (рис. 3). Как результат, аккумулятивное взаимных помех может стать серьезной преградой и

ограничивающим фактором по протяженности линий с многосердцевинными волокнами, а также снижения производительности оптической системы связи на больших расстояниях.

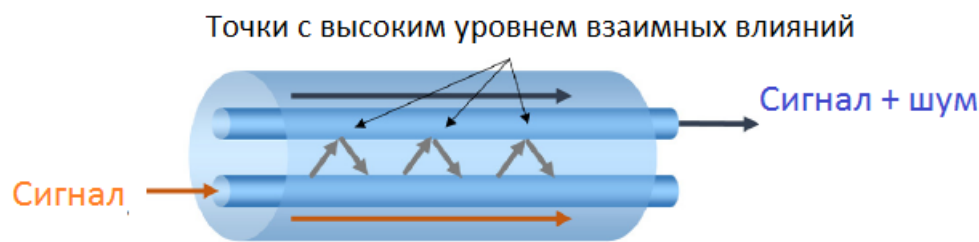


Рис. 3 – Взаимные влияния между сердцевинами

Как показали исследования в этой области, хотя влияния между сердцевинами существуют во всех точках волокна, самое существенное взаимное влияние имеет место в определенных дискретных точках вдоль волокна, где выполняется условие согласования по фазе. Положения этих точек и значения фазы в них могут изменяться случайным образом в зависимости от времени и условий окружающей среды. Таким образом, влияния между сердцевинами носят случайный характер.

Большинство волокон на сегодняшний день имеют шестиугольное расположение сердцевин (см. рис. 2). В этой конфигурации на центральную сердцевину приходится самый высокий уровень взаимных помех, так как она соседствует с шестью сердцевинами, в то время как любая другая внешняя сердцевина граничит только с тремя. Позднее стали разрабатываться 12 сердцевинные волокна, расположенные по окружности таким образом, что каждая сердцевина соседствует только с двумя светонесущими жилами.

Можно ограничить эффект взаимного влияния между сердцевинами, если расстояние между ними будет более 40 мкм. Это позволяет организовать передачу на несколько тысяч километров. Считается, что многосердцевинные волокна диаметром более 200 мкм будут непрактичными, что накладывает довольно жесткие ограничения на количество сердцевин.

Сегодня на рынке существуют оптические когерентные системы передачи с поляризационным мультиплексированием, использующие для передачи сигналов по одному волокну несколько источников и несколько фотоприемников. Здесь задействуются высокоскоростные DSP-процессоры небольшой стоимости, но с высоким энергопотреблением. С другой стороны, используемые оптоэлектронные компоненты имеют низкое энергопотребление, но высокую стоимость. В связи с этим можно сделать вывод, что разработка эффективных систем пространственного мультиплексирования будет в сильной степени зависеть от соблюдения баланса между используемой оптоэлектронной базой и методов цифровой обработки сигналов.

Очевидно, что одним из главных недостатков многосердцевинных волокон является их несочитаемость с используемыми сегодня стандартными волокнами, что требует построения принципиально новой оптической сети во всем мире и разработки новых оптических компонентов, аппаратов для сварки волокон, измерительных приборов, мультиплексоров и т.д. Можно чрезвычайно скептически относиться ко всей этой затее, поскольку даже поэтапная планомерная замена оптоволоконной базы и существующего оборудования потребует немало усилий, времени и особенно материальных затрат.

Как показывает история, только технологии, обеспечивающие плавное обновление имеющихся ресурсов, могут иметь шансы на воплощение. Операторы не примут решений, которые требуют принципиального изменения сетей, если только эти новые подходы не пообещают революционного преимущества, как например, в свое время в конце 1970-х – начале 1980-х годов появилось предложение о замене электрических кабельных систем и радиорелейных систем на волоконно-оптические системы. В то время оптоволоконные кабели гарантировали стократное увеличение скорости передачи в сравнении с коаксиальными кабелями, а их потенциал заявлял о возможности увеличения этого показателя еще на пять порядков. Кроме того, волокна в 10 раз тоньше и в 100 раз легче медных жил и позволяли увеличить длину регенерационного участка в 10 раз. В современных условиях, чтобы произвести аналогичное впечатление, новые волокна должны поддерживать скорость в несколько петабит (тысячи терабит) в секунду на участке линии длиной более 1000 км без усилителей, с возможным потенциалом дальнейшего увеличения пропускной способности до нескольких сотен эксабит (тысячи петабит) в секунду.

На сегодняшний день, такие возможности волокон явно принадлежат к области фантастики. Следовательно, системы пространственного мультиплексирования должны быть адаптированы для совместного использования существующей волоконной инфраструктуры и существующих оптических компонентов в максимально возможной степени. Сетям, поддерживающим пространственное мультиплексирование, придется работать в смешанной инфраструктуре параллельно с традиционными одномодовыми волокнами. Возможно в ближайшем будущем, когда возможности

одномодовых волокон будут полностью исчерпаны, постепенно все оптические кабели будут заменены на новые, с принципиально отличными волокнами.

Если взять за основу исторический опыт и учесть сроки развертывания стандартных одномодовых волокон, начиная с ранних исследований и заканчивая коммерческой завершенностью, можно сделать прогноз, что многосердцевинные волокна начнут использоваться в сетях примерно в 2025 году. Таким образом, технологический срок эксплуатации инфраструктуры на базе стандартных одномодовых волокон будет продлен до 60-70 лет.

Примером для оценки текущего состояния развития технологии многосердцевинных волокон может послужить следующий эксперимент, результаты которого были представлены несколько месяцев назад.

Группа компаний и институтов Японии, а именно: NTT (Nippon Telegraph and Telephone), KDDI Research (Исследовательский институт в Фудзимино, Япония), Sumitomo Electric, Fujikura, Furukawa, NEC и институт CIT (Chiba Institute of Technology) совместно разработали многосердцевинные волокна с диаметром оболочки как у стандартных одномодовых волокон.

Данный консорциум компаний определил руководящие принципы проектирования многосердцевинных волокон с обычным диаметром оболочки 125 мкм в соответствии с международным стандартом, а также волокна с диаметром оболочки 250 мкм. Преимущество данных волокон состоит в том, что их можно будет частично использовать с существующими оптоволоконными компонентами. Был сделан вывод, что четырех-пяти сердцевинные ОВ могут быть изготовлены с диаметром оболочки 125 мкм при сохранении того же качества передачи, как и в стандартных волокнах. В итоге на основе сконструированных в NTT и KDDI Research многосердцевинных волокон и далее изготовленных несколькими производителями (Fujikura, Sumitomo и Furukawa), была построена экспериментальная линия связи длиной 316 км с пропускной способностью 118,5 Терабит/с с применением многосердцевинных оптических усилителей. Использовались оптические коннекторы MU и SC-типов производства CIT и NTT. Конструкция оптических разъемов сделана таким образом, чтобы их можно было вращать для выравнивания и правильной стыковки 4 сердцевин.

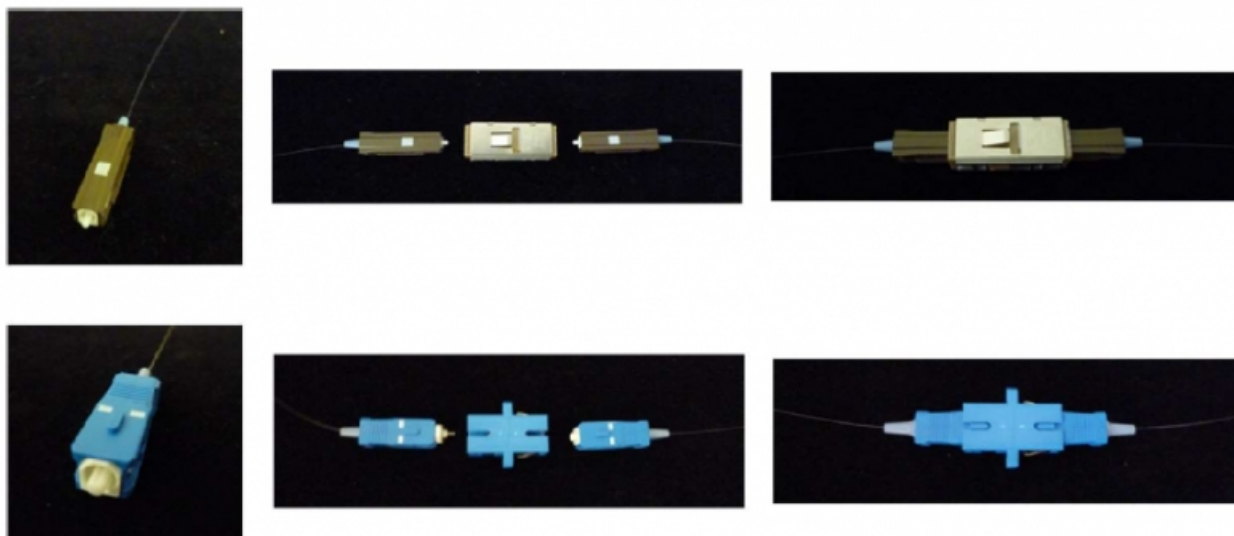


Рис. 4 – MU (сверху) и SC (снизу) коннекторы

Параметры волокон получились аналогичные стандартным: рабочий диапазон 1260 – 1625 нм, значение коэффициента затухания в волокнах в среднем составляло 0,21 дБ/км. Линия содержала три усилительных пролета с длинами 104-107 км, многосердцевинные волокна, предоставленные различными производителями, стыковались посредством сварки.

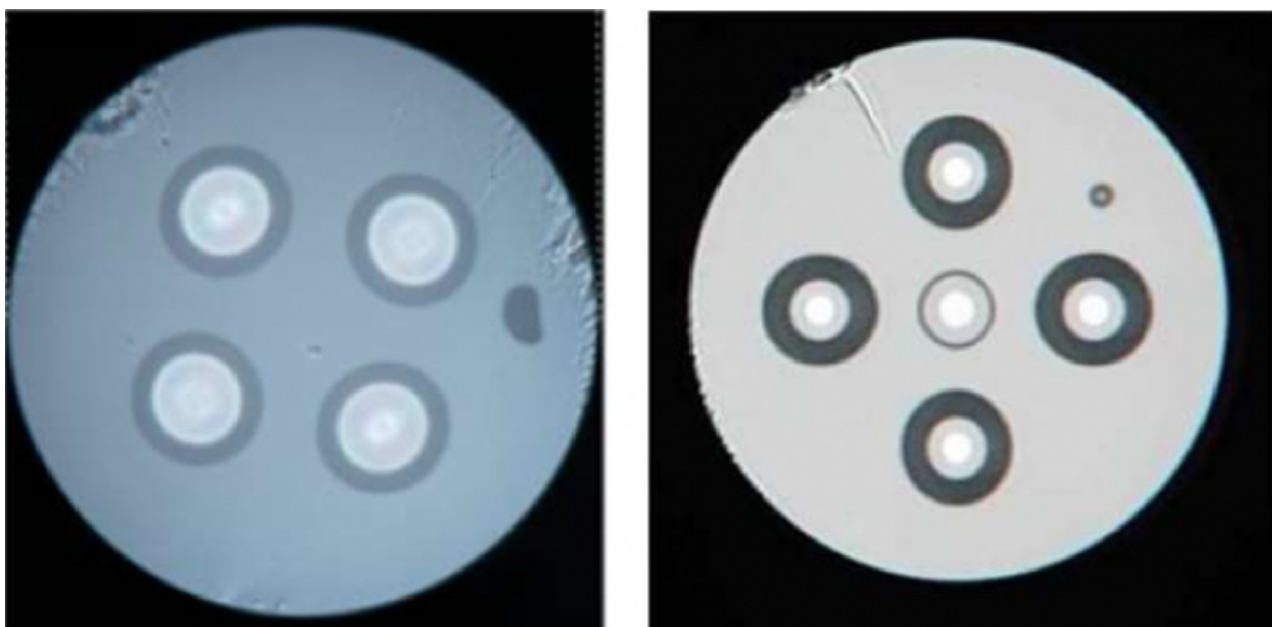
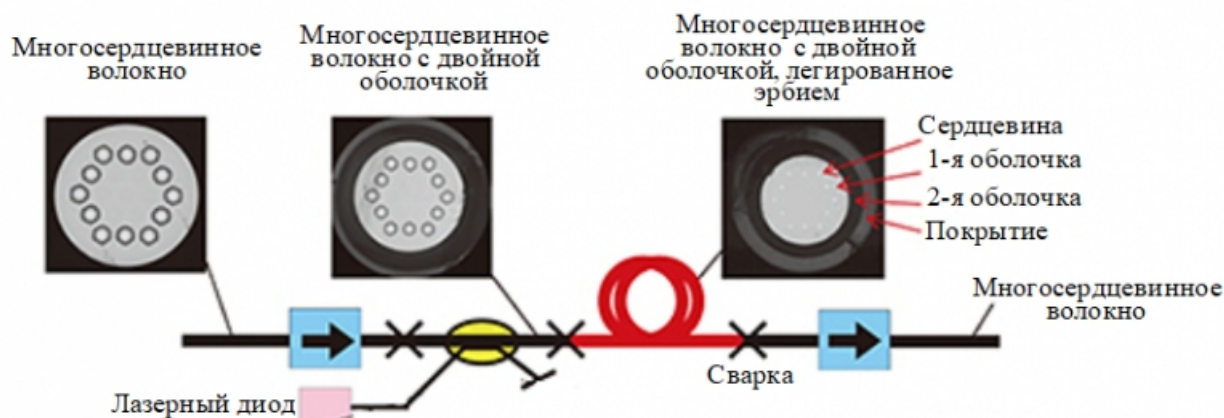


Рис. 5 – Многосердцевинные волокна с диаметром оболочки 125 мкм (слева разработка NTT, справа – KDDI Research)

Как заявили участники эксперимента, их целью является начать коммерческое использование многосердцевинных волокон со стандартным диаметром оболочки в первой половине 2020-х.

Стоит отметить, что для многосердцевинных волокон уже разработаны многие компоненты *: коннекторы, оптические усилители, оптические блоки для разделения/объединения сердцевин разных многосердцевинных волокон с целью ввода/вывода сигналов из отдельных сердцевин.

Структурная схема усилителя для многосердцевинных волокон



Внешний вид усилителя размеры 430x350x132.5 мм

Рис. 6 – EDFA усилитель для многосердцевинных волокон, разработанный исследователями NTT Device Technology Laboratories

Также стоит отметить, что на сегодняшний день существует уже несколько видов многосердцевинных волокон, в зависимости от поддерживаемого режима передачи световой волны. В данной статье мы пробежались лишь по поверхности айсберга, не касаясь сложных научных схем (сети становятся все более эффективными, но и технологии все более сложными), уделяя внимание

наиболее интересным моментам. Существуют также другие подходы концепции пространственного мультиплексирования, которые требуют отдельного внимания.

*Некоторые примеры по разработке компонентов для многосердцевинных волокон:

1. Optical Amplification Technologies for Space Division Multiplexing,
2. [Successful Development of World's First 19-Core Simultaneous Pumped Optical Amplifier](#),
3. Fiber-optic Components: Fiber Y-splitter handles seven-core optical fiber.