

# ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО – УЖЕ РЕАЛЬНОСТЬ

## НОВЫЕ ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

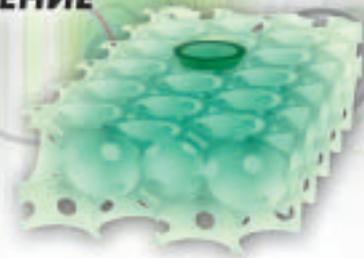
Создание оптического волокна (ОВ) на основе кварцевого стекла было поворотным моментом в развитии среды передачи, так как позволило системам дальней связи не только снять ограничения на скорость передачи и ширину полосы пропускания, но и снизить затухание сигнала настолько, чтобы иметь возможность передавать его без регенерации на многие сотни километров. Однако поиск новых, более перспективных, волокон продолжался и привел к очередному прорыву – созданию фотонно-кристаллического волокна.

Это волокно, наследуя свойства фотонных кристаллов, позволяет формировать фотонные запрещенные зоны, что открывает огромные, недоступные ранее, возможности в управлении свойствами ОВ. Оно позволяет управлять: волноводной дисперсией, сдвигая длину волны нулевой дисперсии в область видимого спектра; эффективным показателем преломления оболочки, формируя "бесконечно" одномодовые волокна, в том числе и волокна с большой эффективной площадью сердцевины, необходимые для пропуска все возрастающей мощности светового потока; формировать воздушные каналы не только в оболочке (что делает волокно все более легким), но и в сердцевине, открывая фантастические возможности дальнейшего уменьшения затухания в волокне за пределами уже достигнутого. Самое важное, что эти волокна уже производятся и используются на практике в ряде приложений.

### ВВЕДЕНИЕ

Оптическое волокно (ОВ) появилось около 35 лет назад, в первую очередь благодаря усилиям компании Corning (США). Через пять лет затухание в ОВ удалось снизить до уровня менее 20 дБ/км (сегодня этот показатель составляет десятые доли дБ/км). И вот уже 30 лет этот носитель используется в качестве среды передачи сигналов в локальных вычислительных сетях (ЛВС) и волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). ОВ обычно изготавливается из кварцевого стекла – аморфной однородной изотропной среды, в которой могут распространяться продольные и поперечные упругие волны. Физически

Н.Слепов  
nsleпов@online.ru

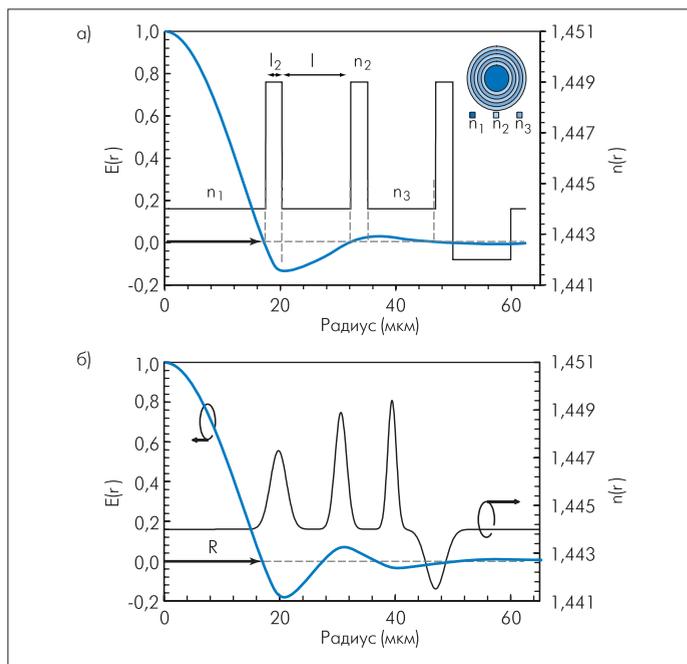


ОВ представляет собой стеклянную цилиндрическую нить (сердцевину) диаметром  $d_c$ , покрытую стеклянной оболочкой (диаметром 125 мкм). Показатель преломления (ПП) у сердцевинки  $n_c$  больше, чем у оболочки ( $n_{об}$ ). Это позволяет создать условия полного внутреннего отражения (ПВО) на границе раздела сердцевина-оболочка для пучка лучей, попадающего в сердцевину под определенными углами, не превышающими некоторого максимально допустимого угла  $2\alpha$  (т.е. с заданной числовой апертурой  $NA = \sin \alpha = \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2}$  [1]).

Свет, отражаясь от границы раздела сердцевина-оболочка в результате ПВО, распространяется вдоль сердечника, как волна по световоду (оптическому волноводу). Световая волна, как электромагнитное колебание, распространяется по ОВ с фазовой скоростью, обратно пропорциональной ПП, и состоит из многих типов колебаний (мод). При этом соблюдается соответствующее условие распространения: длина волны света  $\lambda_c \ll d_c$ . Моды определяются решениями уравнения Максвелла и существуют в виде четырех типов колебаний: поперечных  $T$  и продольных: электрических  $E$ , магнитных  $H$  и смешанных  $EH$  или  $HE$ .

Чем меньше  $d_c$ , тем меньше сечение светового потока в ОВ и меньше число возникающих в нем мод. Соответственно, ОВ разделяют на одномодовые (ОМ, в ОВ существует только одна мода) и многомодовые (ММ). Диаметр сердцевинки ОМ-волокна – 8–10 мкм, ММ-волокна – 50 или 62,5 мкм. Для дальней связи используется практически исключительно ОМ-волокно ввиду очень низкого уровня затухания (0,20–0,25 дБ/км). В ЛВС применяют в основном ММ-волокно по причине большей апертуры и передаваемого светового потока, хотя и с большим затуханием (0,45–0,7 дБ/км).

Для ВОЛС важно то, что полоса пропускания ОМ-волокна очень велика (порядка 100 ТГц), поскольку наиболее широкополосные ВОЛС уже достигли ширины полосы частот 10 ТГц (системы DWDM – многоканальные плотные системы с мультиплексированием по длине волны). Однако основной недостаток ОМ ОВ – очень малая площадь поперечного сечения сердцевинки, в 25–50 раз меньше, чем у ММ-волокна. В одноканальных системах оптический поток, проходящий через это сечение, последовательно рос на протяжении последних 15 лет в связи с постоянной тенденцией к увеличению длины пролетов и секций (последние могут достигать 640 км). Действительно, если мощность оптического потока в первых системах с синхронной цифровой иерархией (SDH) не превышала -3 дБм, то сейчас она может достигать +12 дБм, а в многоканальных системах WDM – более +23 дБм. Увеличение плотности мощности оптического потока приводит к возрастанию уровня нелинейных эффектов различного рода в ОВ [1, 2]. Их действие деструктивно в целом и сводится к увеличению уровня ошибок, уменьшению длины пролета/секции, снижению допустимой скорости передачи в одноканальных системах, росту шага несущих частот в многоканальных системах и т.д.



**Рис. 1. Профили ПП и распределение электрического поля в брэгговском волокне: а) расчетные, б) экспериментальные**

Проблемы, вызванные малой площадью поперечного сечения ОВ, обостряются в специальных волокнах для компенсации дисперсии (явления зависимости ПП от частоты), которые имеют еще меньшие диаметры сердцевин (6–8  $\mu\text{м}$ ) [1], и в оптических шнурах для стыковки с мощными лазерами WDM-систем (в том числе и при измерениях).

На практике в качестве нормируемого параметра, эквивалентного диаметру сердечника  $d_c$ , используется понятие диаметра электрического поля моды  $2R$  (который обычно больше  $d_c$ ) или соответствующей ему площади сечения светового потока  $A_{эфф}$  (рис. 1). До сих пор максимальная величина  $A_{эфф}$  у промышленных волокон (например, у волокна LEAF компании Corning) составляла 72  $\mu\text{м}^2$ , что было вполне достаточно для того, чтобы уровень нелинейных искажений не превышал допустимые пределы. Сегодня необходимая плотность мощности светового потока растет, и 72  $\mu\text{м}^2$  уже мало. Однако увеличивать  $A_{эфф}$  за счет увеличения диаметра сердечника  $d_c$  у существующих волокон проблематично, поскольку необходимо сохранить ОМ-режим волокна в рабочей области частот, ограниченной частотой отсечки  $\lambda_{отс}$  (граница ОМ- и ММ-режимов ОВ).

Действительно, чтобы в ОВ существовали только поперечные моды первого порядка ( $TE_{01}$  или  $TH_{01}$ ), параметры  $d_c$  и  $\lambda_{отс}$  должны быть связаны соотношением  $d_c \leq 0,765\lambda_{отс}/NA_0$  [2]. Апертура существующих ОВ  $NA_0$  не может быть существенно уменьшена в силу технологических причин (у современных ОВ  $NA \sim 0,13-0,17$ ). Следовательно,  $d_c$ , а значит и  $A_{эфф}$ , нельзя значительно увеличить за счет  $NA$ .

Как же достичь большого значения  $A_{эфф}$ , сохранив одномодовый режим ОВ? Оказывается, этого можно добиться на базе по крайней мере двух оптоволоконных технологий, приводящих к формированию фотонных запрещенных зон (ФЗЗ). ФЗЗ названа так по аналогии с запрещенной зоной в полупроводниках. ФЗЗ накладывает условия, препятствующие распространению световых мод в определенном частотном диапазоне. Первая технология, позволяющая сформировать так называемое брэгговское волокно (BF – Bragg Fiber), известна относительно давно (1978 год, Yeh и др.). Вторая, основанная на формировании так называемого фотонно-кристаллического волокна, появилась недавно (одна из первых публикаций в 1995 году, Birks и

др. [3]). В последнее время эти технологии и соответствующие им типы ОВ интенсивно развиваются. Рассмотрим их подробнее.

## БРЭГГОВСКОЕ ВОЛОКНО

Брэгговское волокно является дальнейшим развитием многооболочечных ОВ. Их производят по одной из стандартных технологий химического осаждения из газовой фазы (MCDV). Новаторская идея создателей (Yeh и др.) заключалась в формировании многослойной оболочки, концентрические слои которой имеют чередующийся (высокий/низкий) уровень ПП (рис. 1а) [4]. Такая структура, при определенном образом рассчитанных параметрах (таких как ширина слоев оболочки, расстояние между ними и уровень ПП каждого слоя), работает как цилиндрическое брэгговское зеркало – в ней формируются радиальные ФЗЗ, которые обуславливают новые направляющие свойства волокна. Эти свойства проявляются в том, что различные моды испытывают различные условия распространения, приводящие к тому, что такое ОВ при большом диаметре сердечника (и  $A_{эфф}$ ) обеспечивает, начиная с определенной небольшой длины, распространение только одной моды.

Отметим, что хотя первые публикации про брэгговское волокно относятся к 1978 году, реальные работы в этой области начались относительно недавно (например, начало интенсивных исследований компании Corning относится к 1997 году [5]).

Так, в работе [4] исследовался экспериментальный образец многослойного брэгговского волокна длиной 2 м и внешним диаметром оболочки 195  $\mu\text{м}$ . Радиус его сердцевинки составлял 17,5  $\mu\text{м}$ . Собственно оболочка состояла из трех пар слоев (см. рис. 1а). Первый слой был толщиной  $l_2 = 2,8$   $\mu\text{м}$ , второй слой – толщиной  $l_3 = 11,9$   $\mu\text{м}$ . ПП  $n_2$  первого слоя в паре был выше, чем ПП второго слоя  $n_3$ . Причем в третьей паре ПП внешнего слоя  $n_4$  был еще меньше ( $n_4 < n_3$ ) и формировал вдавленный участок профиля ПП. Разность показателей преломления слоев оболочки не превышала  $5 \cdot 10^{-3}$ , что идеально подходило для использования стандартной технологии изготовления MCDV. Расчетное значение ПП основной расчетной моды  $HE_{11}$  выбрано 1,4436 – несколько меньше ПП сердцевинки, для строгой локализации поля моды внутри оболочки.

Измеренный фактический профиль и распределение электрического поля  $E(r)$  моды  $HE_{11}$  образца представлены на рис. 1б. Полученное значение радиуса поля моды равно 17  $\mu\text{м}$  (первая точка, где  $E(r) = 0$ ), что хорошо совпадает с расчетным. Тестируемый образец – двухметровый отрезок ОМ волокна с диаметром поля моды 34  $\mu\text{м}$  и  $A_{эфф} = 517$   $\mu\text{м}^2$ . Коэффициент затухания этого отрезка – 0,4 дБ/м для длины волны 1550 нм, дополнительные потери при изгибе на оправке 7,5 см – 0,2 дБ/м, т.е. максимальные потери на передачу составили порядка 0,6 дБ/м. Вносимые потери сварного соединения со стандартным одномодовым ОВ – 2,5 дБ. Брэгговское волокно демонстрирует высокую чувствительность затухания от длины волны. Так, данный образец на длине волны 1530 нм имел затухание 0,15 дБ/м.

Конечно, высокий уровень затухания такого волокна пока не делает его пригодным для линий дальней связи. Однако это волокно можно применять прежде всего для мощных волоконных усилителей и лазеров, которые используют бухты ОВ длиной несколько десятков метров. Также эффективно его использование в интерфейсных оптических соединительных шнурах длиной несколько метров. Для этих применений уровень уже достигнутого затухания порядка 1–10 дБ вполне приемлем. Учитывая, что технология изготовления такого волокна находится на начальной стадии, можно надеяться, что в ближайшем будущем, по завершении ее разработки, уровень затухания снизится в десятки раз – как это было и при создании обычного ОВ.

Что касается возможности получения ОМ-волокон большего диаметра (и  $A_{эфф}$ ), то в работе [4] сообщается, что с использованием той же самой техники расчета была спроектирована модель брэгговского волокна с диаметром сердцевины 100 мкм. Из других источников ясно также, что формируя аналогичные структуры, но с меньшим числом пар слоев в оболочке (например, две пары), можно получить брэгговское ОМ волокно с меньшей  $A_{эфф}$  (150–300 мкм<sup>2</sup>), но и с существенно более низким затуханием.

Выше мы рассматривали брэгговское волокно, сердцевина которого была заполнена стеклом. Сам факт появления ФЗЗ при наличии чередующихся в определенной последовательности оболочек (брэгговского зеркала) говорит о том, что ФЗЗ могут существовать и при пустой (заполненной воздухом) сердцевине, что и подтверждается на практике. Этот новый тип брэгговского волокна в настоящее время активно изучается и сулит большие возможности.

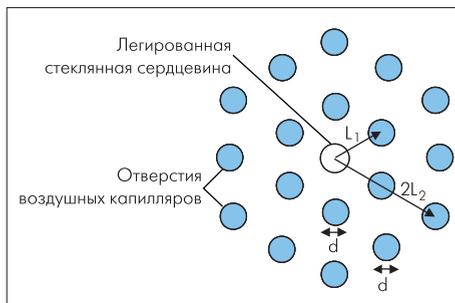
**ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ**

Прежде чем перейти к описанию ОВ на основе технологии фотонных кристаллов (ФК), рассмотрим кратко, что собой представляют ФК и каковы их основные особенности. Фотонный кристалл – это искусственно созданная периодическая диэлектрическая макроструктура, моделирующая, в некотором смысле, реальный кристалл, которая при наличии дефекта структуры может иметь ФЗЗ, препятствующую распространению света в определенном частотном диапазоне (подробнее см. работу [6]).

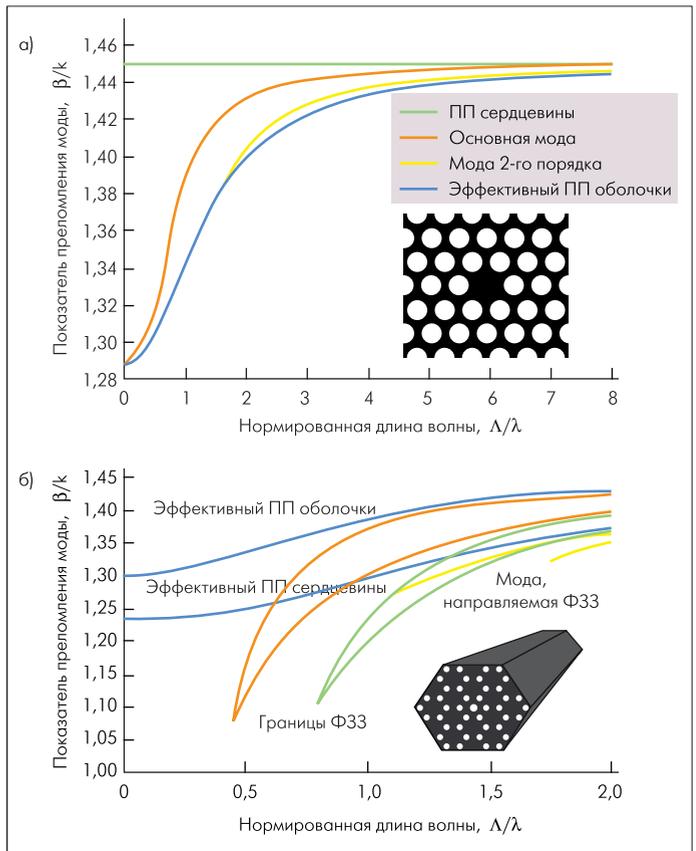
Насколько известно из источников, идея создания таких структур была независимо высказана двумя исследователями (E.Yablonovitch и S.John) в 1987 году [3]. Существуют три типа ФК: одномерный, двумерный и трехмерный, в которых могут быть сформированы, соответственно, точечный, линейный и пространственный дефекты структуры [5]. Поскольку для создания ОВ используются только двумерные ФК, рассмотрим только эти кристаллы.

Моделью двумерного ФК может быть, например, структура, состоящая из девяти параллельных диэлектрических (Si) стержней, расположенных по углам квадрата (4 шт.), в его центре (1 шт.) и в средних точках его сторон (4 шт.). Причем диаметр центрального стержня должен быть немного больше остальных, чтобы создать точечный дефект. Собственно двумерным ФК называют плоскость сечения такой структуры, перпендикулярную осям стержней. В такой структуре центральный стержень создает линейный дефект, в результате чего луч света на резонансной частоте распространяется именно вдоль него. Принципиально важно, что продольные моды колебаний подавляются двумерным ФК и распространяться может только определенная поперечная мода.

Другая модель двумерного ФК – семь вертикальных полых (или заполненных прозрачной диэлектрической средой) трубок, шесть из которых, равного диаметра, расположены по углам шестигранника, а одна – в центре, с отличным от других диаметром для создания дефекта структуры (рис.2). Эта модель широко используется при получении структуры двумерного ФК в сечении оболочки ОВ на основе фотонных кристаллов. Причем она может быть размножена как



**Рис.2. Структуры двумерного ФК с точечным дефектом на примере простой 6-гранной централизованной ячейки**



**Рис.3. Зависимость ПП основной (фундаментальной) моды, моды второго порядка, а также расчетного эффективного ПП оболочки от нормированной длины волны (L/λ): а) для волокна типа ФКВ-ПВО (ПР-РСF); б) для волокна типа ФКВ-ФЗЗ (РВG-РСF)**

с сохранением центральной симметрии (в простейшем случае создания многослойной структуры, рис. 3а), так и в более произвольной форме, например при создании сотовой структуры двумерного ФК-волокна с одним или многими сердечниками (рис.3б) [7].

**ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО**

Фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ, PCF – Photonic Crystal Fiber) – новый класс оптических волноводов. ФЗЗ в этой структуре была реализована путем создания структуры двумерного фотонного кристалла на основе композиции "кварцевое стекло–воздух", формируемой в оболочке ОВ [8]. ФКВ – это ОВ, поперечное сечение которого, постоянное по длине волокна, представляет собой двумерный ФК с точечным дефектом, расположенным, как правило, в центре симметрии ОВ.

Структура двумерного ФК формируется в оболочке с помощью симметрично расположенных вокруг сердцевины полых капилляров в виде круглых или шестигранных плотноупакованных диэлектрических трубок, создающих периодическую двумерную макрорешетку с постоянной решеткой (расстоянием между центрами трубок)  $L$ . При определенных условиях такая структура может формировать ФЗЗ. Основная особенность ФКВ в том, что распространение энергии световой волны в таком ОВ происходит вдоль линейного дефекта (которым является, как правило, область сердцевин), т.е. вдоль сердцевины волокна, а сама волна существует в виде поперечной моды TE01 или TM01, т.е. в поперечном сечении волокна (или в плоскости решетки ФК).

Существует два основных типа ФКВ [8]:

- ФКВ с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, обладающей высоким ПП, и окружающей ее оболочкой, имеющей структуру

двумерного ФК и характеризующейся неким эффективным (низким) ПП. Характерным для данного ФКВ является то, что оно похоже на обычное ОВ, и свет в нем направляется по сердцевине на основе закона ПВО (но мода – не продольная, а поперечная). Следуя работе [8], назовем этот тип волокна ФКВ-ПВО (TIR-PCF);

- ФКВ с полый (воздушной) сердцевиной, имеющей низкий ПП, и окружающей ее оболочкой со структурой двумерного ФК, обладающей неким эффективным ПП, высоким по отношению к ПП сердцевины. Данное ФКВ не похоже на обычное ОВ, так как в нем не может быть ПВО, поскольку  $n_{об} > n_c$ . Определенная же световая мода направляется по полый сердцевине, благодаря локализирующему и направляющему свойству сформированной ФЗЗ. Назовем этот тип волокна ФКВ-ФЗЗ (PBG-PCF) [8].

Отметим, что ряд авторов (например, [5]) выделяют четыре типа ФКВ: микроструктурированные волокна, брэгговские волокна, собственно ФКВ (ФКВ-ПВО) и ФКВ с запрещенной зоной. На наш взгляд, это не совсем верно, учитывая, что, во-первых, микроструктурированными первоначально назывались все ФКВ, во-вторых, брэгговские волокна, строго говоря, не имеют в сечении структуры ФК, а значит, даже обладая сходными свойствами, не могут называться ФКВ.

Рассмотрим кратко особенности каждого типа ФКВ.

### ВОЛОКНО ТИПА ФКВ-ПВО

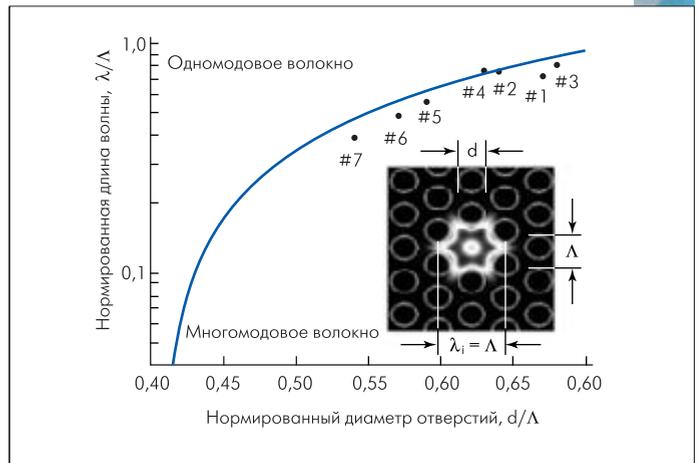
Для описания волокна типа ФКВ-ПВО была предложена модель, использующая понятие эффективного ПП оболочки (1997 год). Идея состояла в том, чтобы исследовать направляющие свойства оболочки со структурой ФК в поперечном сечении по отношению к модам низшего порядка и, вычислив соответствующий им эффективный ПП, попытаться оперировать соотношением между величинами ПП сердцевины, направляемых мод и эффективного ПП оболочки, используя при этом закон ПВО.

На рис.3а показана зависимость ПП основной (фундаментальной) моды, моды второго порядка, а также расчетного эффективного ПП оболочки от нормированной длины волны  $\lambda/\lambda$  для ФКВ с гексагональной (6+1) решеткой. Точечный дефект в центре решетки вызван заменой полый трубки кварцевым сердечником того же диаметра, и он совпадает с центром ОВ [8].

Видно, что в представленном диапазоне нормированных длин волн только кривые изменения эффективного ПП фундаментальной моды и моды второго порядка расположены между прямой ПП сердечника (он выбран равным 1,45) и кривой эффективного ПП оболочки. Это значит, что только фундаментальная мода и мода второго порядка могут распространяться на основе ПВО.

При этом фундаментальная мода существует во всем диапазоне нормированных длин волн, а значит, не имеет длины волны отсечки (по крайней мере, теоретически). Мода второго порядка также может существовать и распространяться в такой системе, но имеет частоту отсечки, примерно равную нормированной длине волны 1,5, что соответствует, например при длине волны 1550 нм, постоянной решетки  $\Lambda = 2325$  нм. То есть надлежащим выбором  $\Lambda$  (в нашем случае 2,3 мкм и ниже) можно сделать волокно чисто одномодовым.

Для стандартного волокна существует, как известно, частота/длина волны отсечки, которая с помощью V-параметра определяет границу существования одномодового и многомодового режима [1, 2]. Аналогичная граница может быть установлена с помощью параметра  $V_{PCF}$  для ФКВ-ПВО [9]. Эта граница зависит от соотношения нормированной длины волны  $\lambda/\Lambda$  и нормированного диаметра отверстий в оболочке волокна  $d/\Lambda$ . Ее вид представлен на рис.4 кривой, аппрок-



**Рис. 4. Положение границы между ОМ- и ММ-режимами в зависимости от соотношения нормированной длины волны и диаметра отверстий ФКВ-ПВО**

симирующей 7 экспериментальных точек и задаваемой уравнением вида:  $\lambda^*/\Lambda = \alpha (d/\Lambda - d^*/\Lambda)\gamma$ , где  $\alpha = 2,80 \pm 0,02$ ,  $d^*/\Lambda = 0,406$ ,  $\gamma = 0,89 \pm 0,02$ .

### ВОЛОКНО ТИПА ФКВ-ФЗЗ

Направляющие свойства ОВ типа ФКВ-ФЗЗ связаны исключительно с ФЗЗ, так как ПВО в этом типе волокна невозможно ни при каких значениях эффективного ПП оболочки, поскольку ПП собственно сердечника – воздушная среда – равен 1 (хотя более точно было бы оперировать эффективным ПП сердечника, который несколько больше 1). ФЗЗ создается в результате наличия дефекта (полый сердечник). Если такая ФЗЗ поддерживает распространение моды с длиной волн, лежащими в области ее действия, то эти моды будут строго поперечно локализованы внутри зоны дефекта. В этом случае можно сделать важный вывод: для распространения моды в зоне дефекта не требуется соблюдения условий ПВО, то есть ПП зоны дефекта может быть меньше ПП окружающей среды.

Было установлено, что ФКВ на основе ФК с полыми трубками, организованными в виде шестигранных сот, и точечным дефектом, образованным полый трубкой того же диаметра, в центре центральной соты (аналога сердечника) (рис.3б), демонстрирует направляющую ФЗЗ [8]. Причем отношение диаметра отверстий в оболочке к диаметру центрального отверстия (сердечника) оказывается существенно меньше по сравнению с ФКВ-ПВО. Такое волокно содержит 30% воздуха по занимаемому объему и оказывается чрезвычайно легким и экономичным.

На рис.3б видно, что в ФЗЗ открываются две низкочастотные разрешенные области, лежащие ниже кривой изменения эффективного ПП оболочки. В одной из них, правой, начинающейся в точке с координатами (0,35; 1, 1), показана основная направляемая мода, которая существует (направляется) только в границах действия ФЗЗ, формирующих своеобразное окно передачи в диапазоне нормированных длин волн 1,09–1,68, что соответствует ширине окна порядка 910 нм при центральной длине волны 1550 нм. Внутри первичной ФЗЗ (на рис.3б справа) показана одиночная вырожденная (запрещенная) мода.

### ПРОИЗВОДСТВО ФКВ

ФКВ производится по технологической схеме "складывай и вытягивай" (stack and draw), существенно отличающейся от процессов производства обычного оптического волокна. По этой схеме заготовка сердечника обкладывается несколькими слоями пустотелых стеклянных трубок-заготовок с круглым или шестигранным сечением. Затем

полученная заготовка нагревается и подвергается двух- или трехэтапному вытягиванию (как и обычное ОВ) до приемлемых размеров оболочки (диаметром 125–400 мкм или выше). Длина полученного волокна сегодня достигает 10–500 м.

Такое волокно уже выпускают небольшими партиями не только известные компании, такие как Corning (волокно PureMode: HI 780, PC 1300, PC 1550, Er 1550C, DCM), но и небольшие фирмы, например Blaze Photonics (UK), TEGS (РФ) (см. www.tegs.ru). Причем последняя производит ФКВ пяти типов с диаметром отверстий в оболочке 0,2; 2 и 8 мкм, шагом решетки 0,4; 3 и 10 мкм, внешним диаметром оболочки 125/400 мкм и длиной образцов 100 м. Компания выпускает также ФКВ с несколькими сердцевинами (до 6) и различными композициями: оптическое стекло-воздух, стекло-стекло, стекло-металл.

С точки зрения уровня затухания, существующие типы ФКВ резко отличаются друг от друга. Для ФКВ-ПВО наименьшие потери достигнуты компанией Blaze Photonics – 0,6 дБ/км (у компании Corning – 2,6 дБ/км на длине волны 1570 нм при пике 50 дБ/км на длине волны 1383 нм [5]). Для волокна ФКВ-ФЗЗ наименьших потерь достигла компания Corning – 13 дБ/км [5], рядовые потери составляют 0,1–0,4 дБ/м и существенно зависят от относительных размеров и точности соблюдения геометрии ФКВ.

### ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ВОЛОКОН

Одним из первых и востребованных применений ФКВ, как и брэгговских волокон, стало создание световодов с большой эффективной площадью для стыковки с мощными лазерами. Вообще, сегодня ФКВ более всего используют для создания высокоэффективных шнуров коммутации лазерного и оптического усилительного оборудования, а также сплавных разветвителей.

Широкие перспективы открываются перед ФКВ-ПВО в оптических усилителях типа EDFA, где оно применяется в качестве отрезка волокна, легированного эрбием (например, волокна PureMode Er 1550C компании Corning). Последним усовершенствованием здесь стало использование нескольких (от двух и более) концентрических слоев воздушных отверстий в оболочке с большим внутренним диаметром (52 мкм) и большой апертурой ( $NA = 0,5$  при длине волны 980 нм), позволяющей практически полностью задействовать световой поток мощных лазерных диодов накачки, направляя его через воздушные каналы оболочки ФКВ [10]. Такие усилители позволяют достигать не только высокого уровня мощности, порядка 33 дБм, и высокой эффективности преобразования энергии накачки свыше 21%, но и сохранить линейный режим для входного информационного сигнала.

Еще одна важная область использования ФКВ – модули компенсации дисперсии (DCM), где с помощью ФКВ удается совместить высокую степень легирования, а значит и высокую эффективность компенсации дисперсии, с приемлемым затуханием волокна модуля и его линейности. Примером может служить модуль DCM с ФКВ PureMode компании Corning.

Другие применения могут быть основаны на свойствах ОВ, указанных ниже, например возможности управлять волноводной дисперсией, сдвигая длину волны нулевой дисперсии в область видимого спектра. Дисперсия ФКВ в области длинных волн при этом имеет существенно нелинейный (экспоненциально-возрастающий) характер вблизи границы зоны (1620–1660 нм), достигая нескольких тысяч пс/нм/км за счет очень большой волноводной дисперсии [5].

Наконец, наиболее фантастические возможности дальнейшего уменьшения затухания оптической волны за пределы уже достигнутого открываются в волокнах с поллой (воздушной) сердцевиной. Теоретически в них могут быть достигнуты затухания меньше мини-

мального предельного затухания обычного ОВ (0,16 дБ/км), хотя это потребует существенного ужесточения допусков на точность формирования элементов структуры ФКВ в поперечном сечении волокна. Достижения (динамика снижения затухания) здесь пока еще довольно скромные (13 дБ/км), но так было в начале и с обычным ОВ.

### КРАТКИЕ ИТОГИ: ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ФКВ

В заключение кратко сформулируем основные свойства ФКВ, которые, надо отметить, могут зависеть от определенных условий, а значит не появляться одновременно или даже быть взаимоисключающими. Итак, ФКВ сулит такие возможности, как:

- формирование условий существования только фундаментальной моды, локализованной в сердцевине (для обоих типов ФКВ);
- возможность получения, аналогично брэгговскому волокну, большой эффективной площади  $A_{эфф}$  (до нескольких сотен мкм<sup>2</sup>), позволяющей снизить уровень нелинейных искажений и увеличить передаваемую волоконной оптической мощностью;
- существенное уменьшение удельного веса ОВ (удельный объем воздуха в ФКВ-ФЗЗ может быть доведен до 80–90%);
- изменение частоты отсечки, а в ФКВ-ПВО – ее полное исключение, тот феномен, что приводит к появлению так называемого "бесконечно" одномодового волокна;
- достижение высоких значений дисперсии (до 2000 пс/нм/км) – как нормальной, так и аномальной, причем с практически постоянным значением дисперсионного коэффициента (наклон не более 0,002 пс/нм/км);
- формирование аномальной и нулевой дисперсии для длин волн, меньших чем 1300 нм;
- достижение двойного лучепреломления путем создания существенной асимметрии в структуре ФКВ;
- формирование волокна со многими сердечниками, что открывает те же широкие возможности создания многоканальной волоконной среды с управляемым числом каналов, что и в кабелях с воздушной задувкой микротрубок (с пучком волокон внутри), используемых в ЛВС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е изд., испр. – М.: Радио и связь, 2003.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
3. Birks T.A., P.J.Roberts, P.St.J.Russell, D.M.Atkin and T.J.Shepherd. Full 2-D photonic bandgap in silica/air structures. – IEE Electr. Letters, v.31, 1995, p.1941–1943.
4. S.Fevrier et al. 517 mkm 2 Effective Area Single-Mode Bragg Fiber. ECOC'03, 2003.
5. Прошински Дж. Управление распространением света в волокнах на базе фотонных кристаллов. – Доклад на семинаре компании Corning, Москва, декабрь 2002.
6. Слепов Н. Фотонные кристаллы и их использование. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2000, № 2, с.32–35.
7. Phillip Russell. New Age Fiber Crystals. – IEEE LEOS Newsletter, Feb. 2003, p.14–15.
8. Bjarklev A et al. Photonic crystal fiber modeling and application. OFC'01, TuC1-1, Anaheim, March 2001.
9. M.D.Nielsen et al. Optical properties of photonic crystal fibers expressed by the V-parameter. – ECOC'03, We-1.7.5. 2003.
10. C. Simonneau et al. High-Power air-clad photonic crystal fiber cladding-pumped EDFA for WDM applications in the C-band. – ECOC'03, 2003.