



Абдурахман А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В работе описаны преимущества использования фотонно-кристаллического волокна в телекоммуникационных системах. Фотонно-кристаллические волокна обеспечивают максимальную скорость передачи данных по сравнению с другими используемыми материалами и являются оптимальным решением для систем дальней связи. Использование фотонно-кристаллического волокна позволит повысить производительность всех систем оптической связи.

Ключевые слова: дисперсия, распространение, фотонно-кристаллическое волокно, телекоммуникационные системы.

1. Введение

Рассматриваемые в работе микроструктурированные оптические волокна основаны на новой и очень перспективной технологии. Они могут решить множество проблем в области связи и производстве осветительных приборов. Данные волокна уже вышли на новый уровень в области частотной метрологии. Низкая чувствительность к изгибам позволила использовать катушки с меньшим внутренним диаметром без потери оптической энергии в результате увеличенных потерь на изгибе. Термостойкость данного волокна позволяет использовать его при высоких температурах и перепад температур не изменяет его взаимный эффект (эфф-фekt Шупэ).

Это обуславливает актуальность проведенного исследования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

На сегодняшний день разработан новый класс микроструктурированных оптических волокон, которые содержат ряд отверстий, расположенных продольно вдоль оболочки оптокабеля [1]. Так как микроструктура волокна всегда является высокопериодичной, данные волокна обычно называются фотонно-кристаллическими волокнами (ФКВ) или дырчатыми волокнами [2]. В то время как электромагнитные волны в обычных оптических волокнах передаются за счет полного внутреннего отражения в сердечнике кабеля, в ФКВ предусмотрены два механизма передачи. Более того, существование двух различных направляющих механизмов позволяет расширить область применения данного волокна. Например, ФКВ используется в различных оптических компонентах и устройствах, включая длиннопериодическую решетку, многорежимные делители мощности помех, оптические лазеры регулируемых связанных резонаторов, волоконные усилители, фильтры ввода/вывода [3], волновые преобразователи [4], спектральные демультиплексоры [5]. Также как и при использова-

нии обычных оптических волокон, основной задачей при использовании ФКВ является сокращение общих потерь при передаче, которые составляют несколько сотен децибел на километр, даже если используется наиболее простая конструкция линии связи. Усовершенствованный контроль однородности структуры волокон и использование высокоочищенного кремния в большинстве типов ФКВ позволили сократить эти потери до нескольких децибел. Недавно было заявлено, что потери при использовании ФКВ составляют 0,3 дБ на 1 км при протяженности линии в 100 км [6].

До 1970 года оптические волокна использовались в диагностической визуализации на малых расстояниях [7]. Их использование в телекоммуникационных системах считалось невозможным по причине больших потерь (1000 дБ/км). Однако ситуация кардинально изменилась в 1970 г., когда удалось уменьшить потерю оптического волокна до 20 дБ/км [8]. Дальнейшие разработки позволили сократить потери до 0,2 дБ/км в области спектра 1,55 мкм к 1979 г. [9]. Наличие оптоволокон с малыми потерями привело к революции в оптической технологии и открыло эпоху оптоволоконной связи. Несколько книг, посвященных оптическим волокнам, описывают различные изменения в конструкции и понимании данных волокон [10].

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — фотонно-кристаллическое волокно.

Цель исследования — выявить преимущества использования фотонно-кристаллического волокна в телекоммуникационных системах.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Исследовать свойства фотонно-кристаллических волокон.
2. Сравнить технологию фотонно-кристаллических волокон и обычных оптических волокон.
3. Изучить процесс затухания в фотонно-кристаллических волокнах.

4. Исследовать дисперсию фотонно-кристаллических волокон.
5. Рассмотреть волоконнооптическую систему передачи данных.
6. Исследовать распространение света в фотонно-кристаллических волокнах.

4. Результаты исследования фотонно-кристаллических волокон

4.1. Фотонно-кристаллические волокна (ФКВ). Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой неоднородные диэлектрики с периодической вариацией коэффициента рефракции. ФКВ имеют фотонную запрещенную зону. Существует диапазон частот, в пределах которого свет не может проникать сквозь структуру. ФК являются оптическими проводящими материалами с пространственно-периодическими свойствами. Фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) [11], представляющие собой микроструктурные или дырчатые волокна, являются волоконными волноводами нового типа.

В ФКВ излучение передается через полую сердцевину (рис. 1), окруженный микроструктурной оболочкой, имеющей из ряда цилиндрических отверстий, расположенных вдоль оси волокна. Данная микроструктура создается путем использования капиллярных трубок и цельных кремниевых сердечников.

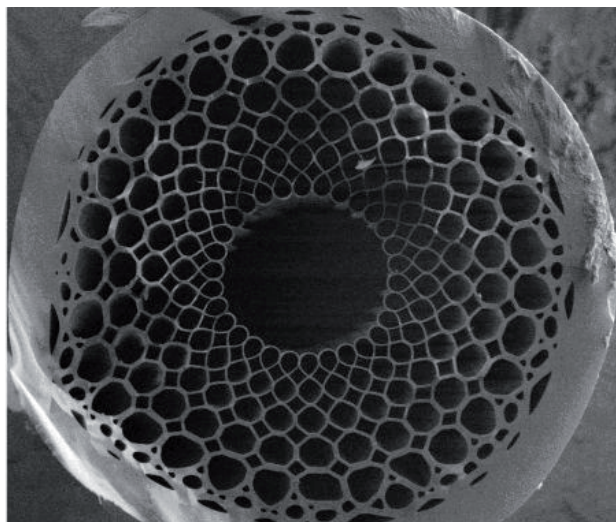


Рис. 1. Поперечное сечение фотонно-кристаллических волокон

Помимо обычного режима передачи волн, который обеспечивается за счет внутреннего отражения, ФКВ в определенных условиях могут передавать волны электромагнитного излучения благодаря высокому уровню отражаемости оболочки кабеля в пределах фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) или областях низкой плотности [12], а также благодаря использованию антирезонансного механизма передачи волн [13]. Данные режимы возможны благодаря использованию волокон с полым сердечником [14] и двухмерной периодической (фотонный кристалл) оболочки кабеля. Высокий уровень отражаемости, обеспечиваемый фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ) во время передачи волн по данной оболочке, ограничивает излучение полого сердечника, что приводит к уменьшению потерь, ко-

торые обычно возникают при передаче волн в случае использования обычных полых волноводов капиллярного типа и увеличиваются при уменьшении диаметра полого сердечника [15]. Уникальные свойства ФКВ используются при прокладке новых коммуникационных линий для передачи электромагнитных сигналов [11], а также нелинейно оптической передачи лазерных импульсов на большие расстояния. Увеличение поперечного сечения является стандартным методом для увеличения энергии лазерного импульса, передаваемого оптоволоконным лазером. Однако, стандартные волокна с большой площадью сердечника являются многомодовыми, в результате чего трудно достичь высококачественного поперечного профиля пучка. Использование ФКВ с отверстиями малого диаметра на оболочке позволяет решить эту проблему путем исключения колебаний в волноводе высшего порядка [16, 17].

4.2. Технология фотонно-кристаллических волокон и обычных оптических волокон. Существует разница между технологией обычных оптических волокон и фотонно-кристаллических волокон. В табл. 1 приведены более конкретные параметры.

Таблица 1

Сравнивает характеристики фотонно-кристаллических волокон и обычных оптических волокон

Свойство	Обычное волокно	Волокна с полым сердечником
Диаметр волокна	Тип. оболочка 80 мкм, покрытие 170 мкм	Разработанные волокна оболочка 125 мкм, оболочка 240 мкм
Диаметр и изгиба волокна	Тип. 2–3 дюйма	< 1 дюйм
Устойчивость к температурам	Пределы эффекта Шупц	Заявлено > 7 раз выше
Потери (волокно, сохраняющее поляризацию проходящего излучения) 1550 нм	< 3 дБ/км	< 15 дБ/км
Потери (волокно, сохраняющее поляризацию проходящего излучения) 1550 нм	< 3 дБ/км	< 2 дБ/км
Нелинейности	Пределы эффекта Керра	Заявлено > в 100 раз выше
Сохранение поляризации при повышении температуры	Низкое, если для сохранения поляризации используются напряженные детали	Лучше, чем конструкция, в которой используются напряженные детали
Чувствительность к излучению	Низкая, если используется солигированный кварц	Заявлено в 50 раз выше
Магнитная чувствительность	Пределы эффекта Фарадея (меньше в волокнах, сохраняющих поляризацию проходящего излучения)	Заявлено > в 100 раз выше

4.3. Затухание фотонно-кристаллических волокон. В последние годы уровень затухания фотонно-кристаллических волокон (ФКВ) был существенно уменьшен. Это касается кабелей, указанных в разделе [18, 19], а также кабелей, принцип действия которых основывается на эффекте фотонной запрещенной зоной [20]. Если размер фотонно-кристаллических волокон увеличивается

в поперечном направлении без изменения структуры волокон, спектр λ_c минимального затухания должен изменяться соответственно [21]. Без учета приближительных значений, указанных в предыдущем разделе, среднеквадратичная амплитуда компонента искажения, который соединяет источник света в данных модах с показателями эффективности в пределах между n и $n + \delta n$, будет следующей:

$$u^2 = \frac{k_B T}{4\pi\gamma(n-n_0)} \coth\left(\frac{(n-n_0)kW}{2}\right) \delta n, \quad (1)$$

где γ — поверхностное напряжение; k_B — постоянная Больцмана; T — температура.

Затухание этих модов пропорционально u^2 [22]. Однако, другим независимым масштабом расстояний, при котором может изменяться показатель затухания, является λ_c . Так как затухание выражено в единицах обратной длины, оно должно быть обратно пропорционально значению λ_c в кубе при размерном анализе. Если это утверждение верно для всех модов адресата, оно должно быть верным для полного затухания α во всех точках назначения, таким образом:

$$\alpha(\lambda_c) \approx \frac{1}{\lambda_c^3}. \quad (2)$$

Данное уравнение [21] предусматривает затухание данного волокна на различной длине волны. Эти результаты отличаются от известной зависимости рассеяния Рэля в объемных волноводах [23], и применяются к неоднородности в любом диапазоне длины, включая диапазон, который является малым в сравнении с λ . Волокна имели 7-ячеичные сердечники, однако они использовались для различных диапазонов, что придавало им разные λ_c , но сопоставимые свойства [21]. Минимальный уровень затухания изображен на рис. 2 по отношению к λ_c и выражен в виде двойной логарифмической шкалы. Прямая линия аппроксимации показана на рис. 2 и имеет наклон, равный 3,07, что подтверждает обратную кубическую зависимость, определенную уравнением (2).

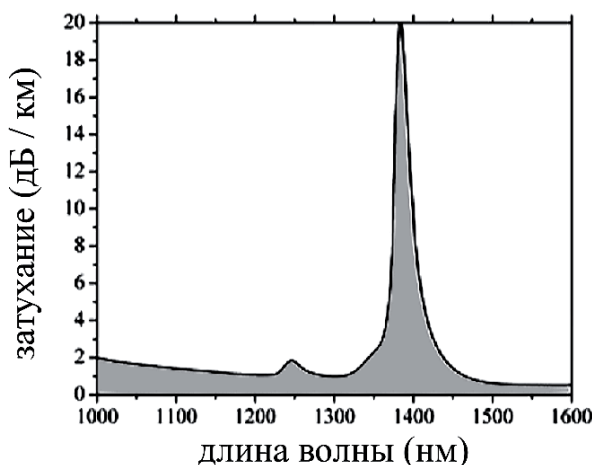


Рис. 2. Затухание спектр фотонного кристалла волокна

Минимальное оптическое затухание $\sim 0,15$ дБ/км в обычных волокнах определяется на основании процессов основного рассеяния и поглощения в высокочистом стекле [23], что оставляет мало возможностей для значительного улучшения.

Благодаря ФКВ 99 % света рассеиваются в воздухе [21] без вышеуказанных потерь. Благодаря этому ФКВ является оптимальным решением для систем передачи данных и характеризуется сверхнизкой потерей. Потери ФКВ составляют 1,7 дБ/км [21]. Недавно этот показатель уменьшили до 1,2 дБ/км. Так как только незначительная часть света проходит через кремний, эффект физической нелинейности не является существенным и данные волокна не имеют тех же ограничений, которым подвержены обычные волокна, изготовленные из цельных материалов.

4.4. Дисперсия фотонно-кристаллических волокон.

В однородной среде дисперсионное отношение между вектором волны k и частотой ω рассеиваемого света вырежется через показатель преломления материала $\omega = c|k|/n$. ФКВ обеспечивает комбинированный эффект дисперсии материала и полосовой структуры благодаря использованию 2-х мерного фотонного кристалла, который определяет дисперсные характеристики волокна. Распространение волны в волокнах определяется на основании дисперсии компонента волнового вектора в направлении оси $Z(kz)$, который является довольно интересным параметром. В литературе, посвященной волоконной оптике, kz определяется как постоянная распространения β . Таким образом, эффективный показатель преломления будет представлять собой следующее:

$$n_{eff} = \frac{\beta c}{\omega_{fund}}, \quad (3)$$

где ω_{fund} означает частоту низкого мода волокна. Более высокие производные постоянной распространения определены как:

$$\beta_n(\omega) = \frac{\partial^n \beta}{\partial \omega^n}, \quad (4)$$

и распространение второго порядка $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$ представляет собой всего лишь другой способ выражения β_2 . Длина волны с нулевой дисперсией (λ_{ZD}) определяется как длина волны в вакууме $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, где $\beta_2 = 0$.

Поперечное сечение световодных фотонно-кристаллических волокон приведено на рис. 3. Расчет дисперсных свойств и эффективной площади данных волокон будет определен. Дисперсия, определенная на основании $\beta_2(\lambda)$, показана на рис. 3 и волокно имеет $\lambda_{ZD} = 721$ нм, где длина волны с нулевой дисперсией для кварца составляет приблизительно 1300 нм.

Длина волны с нулевой дисперсией для данного волокна впоследствии была смещена в видимое поле благодаря использованию микроструктур. Дисперсия групповой скорости с широким диапазоном перестройки является наиболее значимым параметром ФКВ.

Дисперсия может регулироваться путем выбора отверстий подходящего размера, расстояния между данными отверстиями (шаг) и размера центрального дефекта. Длина волны с нулевой дисперсией является наиболее короткой волной. Доля поступающего воздуха увеличивается, и центральный дефект уменьшается [24].

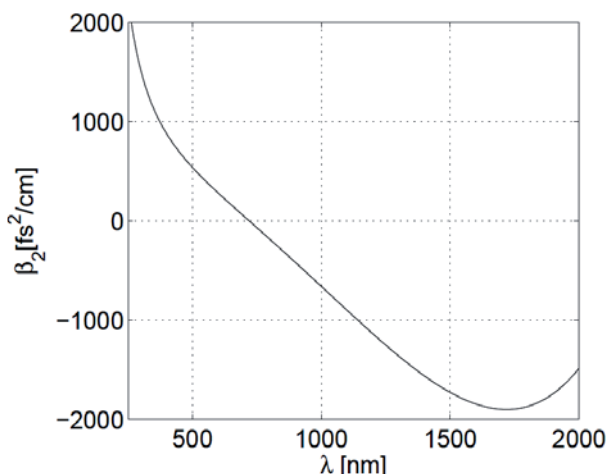


Рис. 3. Дисперсия характеристики для режима основной частоты диаметра сердечника ФКВ 1,7 мкм

Можно производить волокна для длины волны с нулевой дисперсией в пределах от 500 до 1500 нм. Другой общей тенденцией является то обстоятельство, что увеличение шага или размера отверстий приводит к большей кривизне профиля дисперсии, что, в свою очередь, приводит к возникновению близлежащих волн нулевой дисперсии. Волокна могут изготавливаться из сердечников до 1 мкм в диаметре. Малая площадь сердечника позволяет создать высокую интенсивность. Другим важным свойством волокон является то, что они могут иметь бесконечное одномодовое исполнение. Только один мод должен иметь константу распространения волны для оболочки и сердечника, т. е. $n_{core}k > \beta > n_{clad}k$, где k является постоянной распространения в свободном пространстве. Ограничение касается только уравнений Максвелла и касается только распространения волны в сердечнике и ее затухания в оболочке. Эффективный частотный параметр определяется на основании уравнения [25]:

$$V_{eff} = \left(\frac{2\pi\rho}{\lambda} \right) \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}, \quad (5)$$

где ρ — радиус сердечника. Для одномодовых волокон V_{eff} должно быть меньше 2,405. По мере уменьшения λ , показатель эффективности оболочки n_{clad} снижается, так как большая интенсивность света приходится на кварцевую часть оболочки. Таким образом, V_{eff} может оставаться ниже 2,405 в широком диапазоне волн, и волокно считается бесконечным одномодовым. В этом случае волокна, даже с очень большим сердечником, могут иметь бесконечную одномодовую конструкцию [26].

При увеличении площади волокна уменьшается относительная интенсивность света в сердечнике. Следовательно, волокна могут использоваться для линейного распространения, если большое количество энергии может передаваться без перехода в нелинейный режим распространения.

4.5. Волоконнооптическая система передачи данных.

Оптоволоконная передача данных представляет собой технологию, в которой используются импульсы для передачи информации от одной точки до другой с помощью оптических волокон. Принципиальная схема типовой системы передачи данных представлена на рис. 4.

Основной целью данной системы является передача сигнала от информационного источника через передающую среду (фотонно-кристаллических волокон) в место назначения. Оптоволоконная система передачи данных состоит из оптического передатчика, который преобразует электрический сигнал в оптический сигнал с целью его передачи через фотонно-кристаллические волокна в приемник места назначения.

С целью обеспечения оптоволоконной передачи данных информационный источник направляет электрический сигнал к передатчику, состоящему из электрического устройства, активирующего оптический источник с целью модуляции носителя световой волны.

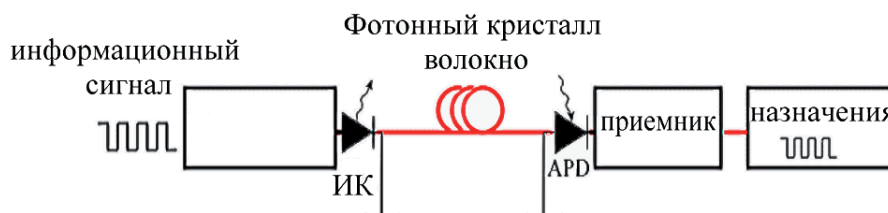


Рис. 4. Схема типовой системы передачи данных

Оптический источник, преобразующий электрический сигнал в световой, может быть представлен полупроводниковым источником инфракрасного излучения.

Среда передачи данных состоит из фотонно-кристаллических волокон, а приемник состоит из оптического детектора, который приводит в действие другое электрическое устройство и, тем самым, производит демодуляцию оптического носителя. Оптический приемник преобразует полученные оптические сигналы обратно в исходные электрические сигналы. Таким образом, электрическое соединение необходимо на обоих концах оптической связи. Обработка сигнала обычно осуществляется электрическим способом.

4.6. Распространение света в фотонно-кристаллических волокнах. Принимая во внимание тот факт, что распространение света в оптическом волокне основано на лучевой теории, необходимо учитывать индекс преломления диэлектрической среды. Индекс преломления среды выражается отношением скорости света в вакууме к скорости света в среде. Расстояние между отверстиями в диэлектрических материалах в фотонно-кристаллической структуре определяется на основании длины волны света, разделенной на индекс преломления диэлектрического материала.

Необходимость в создании этих малых структур возрастает, так как они наиболее оптимально подходят для создания фотонной запрещенной зоны в диэлектриках

с высоким индексом преломления, что позволяет дополнительно уменьшить размер решетки. Мощность инфракрасного излучения, поступающая от передатчика, может много раз отражаться и преломляться, прежде чем попадет в приемник. Приемник в оптической системе передачи данных представляет собой световой детектор (фотодиод). Большой размер фотодиода по отношению к длине волны света создает пространственное разнесение в приемнике, что позволяет устранить эффект многолучевого замирания. Многолучевое замирание не является основной помехой для оптической передачи данных. Проблема временного рассеивания получаемых сигналов в результате многолучевого распространения все еще не решена.

Данное рассеивание часто моделируется в виде инвариантной во времени линейной системы, так как свойства канала изменяются медленно в течение множества периодов символов [27].

На рис. 5 приведены результаты экспериментального определения распределения интенсивности излучаемого света в поперечном центре дефекта, а также результаты расчета распространения плотности энергии в поперечном сечении.

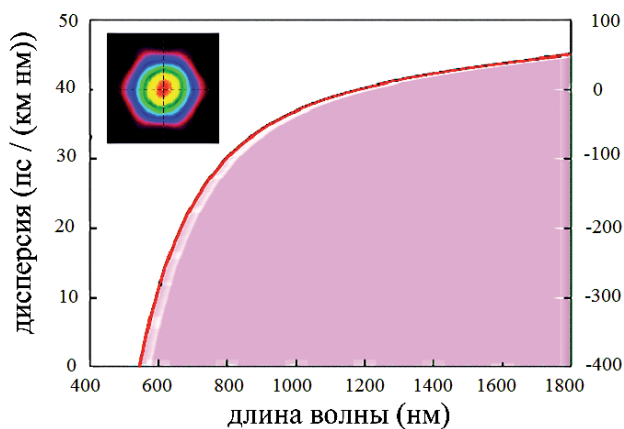


Рис. 5. Распределение выходной мощности фотоннокристаллических волокон

Проблема многолучевого распространения наиболее актуальна в системах связи в рассеянном ИК диапазоне. В отличие от обычных оптоволоконных систем, многолучевое замирание не является основной помехой для оптической передачи данных. Многолучевое рассеивание света приводит к затуханию амплитуды принимаемых электромагнитных сигналов на расстоянии в половину длины волны.

5. Обсуждение результатов исследования фотонно-кристаллических волокон

Использование фотонно-кристаллических волокон в оптоволоконных системах связи имеет ряд преимуществ перед использованием обычных оптических волокон. Фотонно-кристаллические волокна позволяют сократить потери и дисперсию и представляют конкуренцию для обычных волокон. Фотонно-кристаллические волокна могут эффективно использоваться в лазерной физике, нелинейной оптике и оптических технологиях, так как они позволяют регулировать дисперсию и обеспечивают изоляцию светового поля в сердечнике волокна.

Максимальный поток лазерного излучения в оптической системе ограничивается только порогом разрушения материала оптических компонентов. Наличие оптоволокна с низкими потерями позволило совершить революцию в оптической технологии и открыло эпоху оптоволоконной связи. Создание фотонного кристалла привело к дальнейшим разработкам в области его производства и использования. Компрессоры из фотонно-кристаллических волокон и стекловолконные лазерные системы позволяют создавать световые импульсы шириной в 100 фСм в диапазоне МВт пиковых мощностей. Таким образом, ФКВ играет важную роль в развитии современных стекловолконных лазерных источников световых импульсов и создании волоконных компонентов для управления такими импульсами.

6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Показано, что стандартные волокна с большой площадью сердечника являются многомодными, в результате чего трудно достичь высококачественного поперечного профиля пучка, а использование ФКВ с отверстиями малого диаметра на оболочке позволяет решить эту проблему путем исключения колебаний в волноводе высшего порядка.

2. Сравнивая технологию фотонно-кристаллических волокон и обычных оптических волокон автор статьи составил табл. 1.

3. При изучении процесса затухания в фотонно-кристаллических волокнах было показано, что ФКВ является оптимальным решением для систем передачи данных и характеризуется сверхнизкой потерей, так как благодаря ФКВ 99 % света рассеиваются в воздухе. Потери ФКВ составляют 1,7 дБ/км [21]. Недавно этот показатель уменьшили до 1,2 дБ/км. Так как только незначительная часть света проходит через кремний, эффект физической нелинейности не является существенным и данные волокна не имеют тех же ограничений, которым подвержены обычные волокна, изготовленные из цельных материалов.

4. Исследуя дисперсию фотонно-кристаллических волокон автор статьи выявил, что увеличение площади волокна уменьшает относительную интенсивность света в сердечнике. Следовательно, волокна могут использоваться для линейного распространения, если большое количество энергии может предаваться без перехода в нелинейный режим распространения.

5. При рассмотрении волоконнооптической системы передачи данных в статье было показано, что среда передачи данных состоит из фотонно-кристаллических волокон, а приемник состоит из оптического детектора, который приводит в действие другое электрическое устройство и, тем самым, производит демодуляцию оптического носителя. Оптический приемник преобразует полученные оптические сигналы обратно в исходные электрические сигналы. Таким образом, электрическое соединение необходимо на обоих концах оптической связи.

6. При исследовании распространения света в фотонно-кристаллических волокнах было выявлено, что многолучевое замирание не является основной помехой для оптической передачи данных. Проблема временного рассеивания получаемых сигналов в результате многолучевого распространения все еще не решена.

Литература

- DiGiovanni, D. J. Design of Optical Fibers for Communications Systems [Text] / D. J. DiGiovanni, S. K. Das, L. L. Blyler, W. White, R. K. Boncek, S. E. Golowich // Optical Fiber Telecommunications IV-A. — Elsevier BV, 2002. — P. 17–79. doi:10.1016/b978-012395172-4/50002-4
- Broderick, N. G. R. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [Text] / N. G. R. Broderick, T. M. Monro, P. J. Bennett, D. J. Richardson // Optics Letters. — 1999. — Vol. 24, № 20. — P. 1395–1397. doi:10.1364/ol.24.001395
- Bong-Shik, S. Multichannel add/drop filter based on in-plane hetero photonic Crystals [Text] / S. Bong-Shik, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, S. Noda // Journal of Lightwave Technology. — 2005. — Vol. 23, № 3. — P. 1449–1455. doi:10.1109/jlt.2004.841458
- Chow, K. K. Polarization-insensitive widely tunable wavelength converter based on four-wave mixing in a dispersion-flattened nonlinear photonic Crystal fiber [Text] / K. K. Chow, C. Shu, L. Chinlon, A. Bjarklev // IEEE Photonics Technology Letters. — 2005. — Vol. 17, № 3. — P. 624–626. doi:10.1109/lpt.2004.840929
- Niemi, T. Wavelength-division demultiplexing using photonic crystal waveguides [Text] / T. Niemi, L. H. Frandsen, K. K. Hede, A. Harpoth, P. I. Borel, M. Kristensen // IEEE Photonics Technology Letters. — 2006. — Vol. 18, № 1. — P. 226–228. doi:10.1109/lpt.2005.860001
- Kurokawa, K. Penalty-free dispersion-managed soliton transmission over a 100-km low-loss PCF [Text] / K. Kurokawa, K. Tajima, K. Tsujikawa, K. Nakajima, T. Matsui, I. Sankawa, T. Haibara // Journal of Lightwave Technology. — 2006. — Vol. 24, № 1. — P. 32–37. doi:10.1109/jlt.2005.861146
- Jupnik, H. Fiber Optics. Principles and Applications. N. S. Kapany. Academic Press, New York, 1967. 447 pp., illus. \$17.50 [Text] / H. Jupnik // Science. — 1968. — Vol. 159, № 3811. — P. 183–183. doi:10.1126/science.159.3811.183
- Kapron, F. P. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides [Text] / F. P. Kapron // Applied Physics Letters. — 1970. — Vol. 17, № 10. — P. 423. doi:10.1063/1.1653255
- Miya, T. Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm [Text] / T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyashita // Electronics Letters. — 1979. — Vol. 15, № 4. — P. 106. doi:10.1049/el:19790077
- Roberts, G. C. K. NMR Spectroscopy: An Introduction [Text] / G. C. K. Roberts // FEBS Letters. — 1981. — Vol. 124, № 1. — P. 130–130. doi:10.1016/0014-5793(81)80074-9
- Russell, P. Photonic Crystal Fibers [Text] / P. Russell // Science. — 2003. — Vol. 299, № 5605. — P. 358–362. doi:10.1126/science.1079280
- Knight, J. C. Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers [Text] / J. C. Knight // Science. — 1998. — Vol. 282, № 5393. — P. 1476–1478. doi:10.1126/science.282.5393.1476
- Kaminow, I. Guest Editorial—Special 40th Anniversary Issue on Optoelectronics [Text] / I. Kaminow, T. Li, A. Willner // Journal of Lightwave Technology. — 2006. — Vol. 24, № 12. — P. 4428–4432. doi:10.1109/jlt.2006.886406
- Cregan, R. F. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [Text] / R. F. Cregan // Science. — 1999. — Vol. 285, № 5433. — P. 1537–1539. doi:10.1126/science.285.5433.1537
- Marcuse, D. Analysis of a Tubular Gas Lens [Text] / D. Marcuse, S. E. Miller // Bell System Technical Journal. — 1964. — Vol. 43, № 4. — P. 1759–1782. doi:10.1002/j.1538-7305.1964.tb04107.x
- Zheltikov, A. M. Nonlinear optics of microstructure fibers [Text] / A. M. Zheltikov // Physics-Uspeski. — 2004. — Vol. 47, № 1. — P. 69–98. doi:10.1070/pu2004v047n01a-beh001731
- Knight, J. C. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [Text] / J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. M. Atkin // Optics Letters. — 1996. — Vol. 21, № 19. — P. 1547–1549. doi:10.1364/ol.21.001547
- Tajima, K. Low-loss photonic crystal fibers [Text] / K. Tajima, K. Nakajima, K. Kurokawa, N. Yoshizawa, M. Ohashi // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2002. — P. 523–524. doi:10.1109/ofc.2002.1036529
- Tajima, K. Low water peak photonic crystal fibers [Text] / K. Tajima, J. Zhou, K. Kurokawa, K. Nakajima // 29th European Conference on Optical Communication ECOC'03. — Rimini, Italy 2003. — P. 42–43.
- Smith, C. M. Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre [Text] / C. M. Smith, N. Venkataraman, M. T. Gallagher, D. Müller et al. // Nature. — 2003. — Vol. 424, № 6949. — P. 657–659. doi:10.1038/nature01849
- Kumar, V. V. R. Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation [Text] / V. V. R. Kumar, A. George, W. Reeves, J. Knight, P. Russell, F. Omenetto, A. Taylor // Optics Express. — 2002. — Vol. 10, № 25. — P. 1520. doi:10.1364/oe.10.001520
- Cregan, R. F. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [Text] / R. F. Cregan // Science. — 1999. — Vol. 285, № 5433. — P. 1537–1539. doi:10.1126/science.285.5433.1537
- Payne, F. P. A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides [Text] / F. P. Payne, J. P. R. Lacey // Optical and Quantum Electronics. — 1994. — Vol. 26, № 10. — P. 977–986. doi:10.1007/bf00708339
- Bjarklev, A. Fabrication of Photonic Crystal Fibres [Text] / A. Bjarklev, J. Broeng, A. S. Bjarklev // Photonic Crystal Fibres. — Springer Science & Business Media, 2003. — 298 p. doi:10.1007/978-1-4615-0475-7
- Knight, J. C. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model [Text] / J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, J. P. de Sandro // Journal of the Optical Society of America A. — 1998. — Vol. 15, № 3. — P. 748–752. doi:10.1364/josaa.15.000748
- Birks, T. A. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [Text] / T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell // Optics Letters. — 1997. — Vol. 22, № 13. — P. 961–963. doi:10.1364/ol.22.000961
- Gfeller, F. R. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation [Text] / F. R. Gfeller, U. Bapst // Proceedings of the IEEE. — 1979. — Vol. 67, № 11. — P. 1474–1486. doi:10.1109/proc.1979.11508

ВИКОРИСТАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНОГО ВОЛОКНА В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

В роботі описані переваги використання фотонно-кристалічного волокна в телекомунікаційних системах. Фотонно-кристалічні волокна забезпечують максимальну швидкість передачі даних в порівнянні з іншими використовуваними матеріалами і є оптимальним рішенням для систем телекомунікації. Використання фотонно-кристалічного волокна дозволить підвищити продуктивність всіх систем оптичного зв'язку.

Ключові слова: дисперсія, поширення, фотонно-кристалічне волокно, телекомунікаційні системи.

Абдурахман Али, кафедра телекомунікаційних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: alzabrmaouy@gmail.com.

Абдурахман Али, кафедра телекомунікаційних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Abdourahmane Ali, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: alzabrmaouy@gmail.com