

Mamedov, A. T. (2005). Konstrukcionnye i antifrikcionnye poroshkovye materialy. Baku, Elm, 460. 8. Dorofeev, Yu. G. i dr. (2006). Konstrukcionnye poroshkovye materialy i izdelya. Moscow, Metallurgiya, 244. 9. Shatta, V. M. (2003). Poroshkovaya metallurgiya. Spechennye i

kompozicionnye materialy. Per. s nem. Pod red. Moscow, Metallurgiya, 520. 10. Fedorchenko, I. M., Pugina, L. I. (1980). Kompozicionnye spechennye antifrikcionnye materialy. Kiev, Naukova dumka, 409.

Поступила (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мамедов Ариф Тандыг оглы – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Конструкционные материалы» Азербайджанский Технический Университет, пр. Г. Джавида, 25, г. Баку, Азербайджан, AZ1073.

Мамедов Ариф Тандыг Огли – доктор технічних наук, завідувач кафедрою «Конструкційні матеріали» Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, м. Баку, Азербайджан, AZ1073.

Mamedov Arif Tapdig oglu – doctor of science department of Materials Konstruktion Engineering Technical University, Huseyn Djavid str. 25, Baku, Azerbaijan, AZ1073.

Алиев Чингиз Ариф оглы – докторант кафедры «Конструкционные материалы» Азербайджанский Технический Университет, пр. Г. Джавида, 25, г. Баку, Азербайджан, AZ1073.

Алиев Чингиз Ариф оглы – докторант кафедри «Конструкційні матеріали», Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, м. Баку, Азербайджан, AZ1073.

Aliyev Ch. Arif oglu – doctorant of science department of Materials Konstruktion Engineering Technikal University, Huseyn Djavid str.25, Baku, Azerbaijan, AZ1073.

УДК: 621.373.826

А. М. АЛЬ-СУДАНИ ХАЙДЕР

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ГИРОСКОПОВ

Фотонно-кристаллические волокна играют главную роль в разработке новых волоконно-лазерных источников сверхкоротких световых импульсов и создания компонентов волоконного формата для контроля таких импульсов. Волоконно-оптический гироскоп – это одна из сфер применения оптических волокон, зависящая главным образом от эффекта Саньяка. Она принадлежит к важным сферам применения в области космической навигации. В этой статье мы предложили использовать фотонно-кристаллическое волокно с полым сердечником 1550nm, Ø10 мкм в оптическом гироскопе. Фотонно-кристаллические волокна демонстрируют специфические свойства и возможности, которые приводят к огромному потенциалу для использования в области измерений.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, эффект Саньяка, фотонно-кристаллическое волокно с полым сердечником

Введение. Благодаря своей уникальной геометрической структуре фотонно-кристаллические волокна демонстрируют специфические свойства и возможности, которые приводят к огромному потенциалу для использования в области измерений. Разнообразие необычных особенностей фотонно-кристаллических волокон, сверх того, что могут предложить традиционные волокна, приводит к увеличению возможностей для новых и улучшенных датчиков. Научное сообщество проявляет огромный интерес к этой оригинальной технологии для применения в различных областях. Целью данной работы было проведение теоретических исследований условий использования фотонно-кристаллического волокна (ФКВ) как части волоконно-оптического гироскопа. С развитием оптоэлектронной технологии [1] оптические волокна интенсивно исследовались в различных полях обнаружения благодаря их уникальным характеристикам, таким как мультиплексирование, дистанционное измерение, высокая гибкость, низкая потеря сигнала, высокая чувствительность, низкая стоимость изготовления, малый форм-фактор, высокая точность, возможность одновременных измерений и устойчивость к электромагнитным помехам. Это действительно так для фотонно-кристаллических волокон (ФКВ), также называемых дырчатыми волокнами, которые содержат ряды крошечных воздушных отверстий вдоль своей структуры и позволяют, в числе других новых сфер применения, создавать новые волоконно-оптические датчики. Благодаря гибкости для кон-

струкции поперечного сечения фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) [2] добились отличных свойств в части двойного лучепреломления [3], дисперсии [4], одиночной моды одиночной поляризации [5], нелинейности и эффективной площади мод [6], а также отличные показатели в применении волоконных датчиков [7], волоконных лазеров и нелинейной оптики [8] в течение последних нескольких лет. Большое количество научно-исследовательских работ выделяли некоторые оптические свойства ФКВ, такие как сверхвысокое двойное лучепреломление и уникальная хроматическая дисперсия, которые почти невозможны для традиционных оптических волокон. Несколько лет спустя, в 1991 году, Яблоневич и его коллеги изготовили первый фотонный кристалл, механически просверливая отверстия с миллиметровым диаметром в блок материала с показателем преломления, равным 3,6 [9]. В 1995 году Биркс и др. предложили волокно с воздушными отверстиями по его длине, которое могло направлять свет сквозь эту структуру с интересными свойствами [10]. В настоящее время ФКВ стало предметом обширных исследований и открыло новый диапазон возможных сфер применения. Структура ФКВ позволяет иметь различные типы волокон, такие как бесконечное одномодовое, с двойной оболочкой, германиевое или легированное редкоземельными элементами, с высоким двойным лучепреломлением и многие другие с особыми параметрами благодаря его технологической

©А. М. Аль-Судани Хайдер. 2015

гибкости. Такое разнообразие вариантов позволяет использовать ФКВ в многочисленных сферах, таких как датчики, которые измеряют физические параметры (температура, давление, сила и т.д.), химические соединения в газе и жидкости и даже биосенсоры [11].

Цель и задачи исследования. В части волокон с полой сердцевиной реализовать их потенциал и преимущества по сравнению с традиционными волокнами в волоконно-оптических гироскопах. Большая длина волон в гироскопах с ФКВ, как правило, обеспечивает повышенную чувствительность измерения. Уровни потерь по току у полых волокон, предназначенных для одномодовой передачи, ограничивают длину волон. Хотя больше всего света распространяется в воздухе, часть, которая взаимодействует со стенкой полой сердцевины из диоксида кремния, претерпевает рассеяние и действие других механизмов потерь из-за изъянов на этой границе.

Волокна с полой сердцевиной, описанные здесь, были разработаны с геометрией для диаметра по стеклу или покрытию, такого же, как у традиционных телекоммуникационных волокон. При применении в гироскопах с ФКВ наматывание большого количества витков выигрывает от волон с уменьшенным диаметром, например, волон с диаметром по стеклу 80 мкм, которое является типичным для многих гироскопов с ФКВ. Волокна с полой сердцевиной обеспечивают повышенную чувствительность к изгибам, создающую возможность для катушек с более тугой намоткой, но требуют модернизации диаметра волон для дальнейшего уменьшения пространства, занимаемого волон на катушке. Это потребует, чтобы проектирование и разработка гарантировали, что уменьшенный размер не ухудшит оптические параметры, обеспечиваемые специальными запрещёнными зонами сердцевины и оболочки.

Волон с полой сердцевиной предлагает поверхность раздела с низкими отражательными характеристиками, предлагая повышенную стабильность. Там, где конструкции требуют альтернативной поверхности раздела, например, склейки, механического соединения или другого типа, понадобится контролировать отражения и механическую целостность поверхности раздела.

Фотонно-кристаллические волон с полой сердцевиной (ПС-ФКВ) (НС-PCF). Фотонно-кристаллические волон с полой сердцевиной – это оптические волон с оболочками из стекла, включающего ряды воздушных отверстий. Сердцевина образована путём исключения нескольких ячеек материала из оболочки. «Дырчатая» оболочка имеет двухмерную фотонную запрещённую зону, которая может удерживать свет в сердцевине для длин волн примерно как длина волн с минимальными потерями λ_c , даже когда сердцевина полая и заполнена воздухом [12]. В отличие от этого традиционное волон направляет свет посредством полного внутреннего отражения, так что его сердцевина должна иметь более высокий показатель преломления, чем оболочка. Как правило, эта заготовка сначала вытягивается в стержень с диаметром, например, 1 мм, а после этого в волон с конечным диаметром, например, 125 мкм. Особенно мягкие стёкла и полимеры (пластики) также позволя-

ют изготавливать заготовки для фотонно-кристаллических волокон методом экструзии [13]. Существует большое разнообразие расположений отверстий, что приводит к ФКВ с очень разными свойствами. Все эти ФКВ можно рассматривать как специализированные волон. В этой статье использован тип Фотонно-кристаллических волокон с полой сердцевиной, 1550 нм, Ø10 мкм, Фотонно-запрещённые световоды с полой сердцевиной направляют свет в полой сердцевины, окруженной микроструктурированной оболочкой из воздушных отверстий и диоксида кремния. На рис. 1 показано типичное дисперсия.

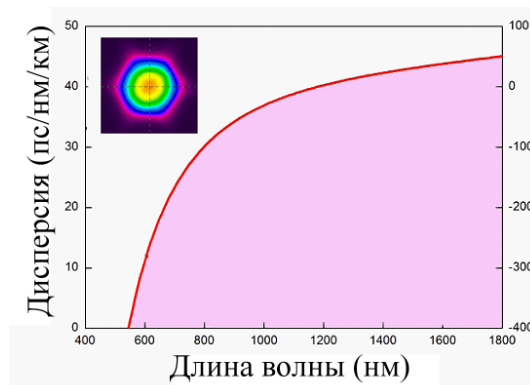


Рис. 1 – Типичные дисперсия

Если поперечный масштаб Полых фотонно-кристаллических волокон изменяется без других изменений структуры волон, длина волн λ_c минимального затухания должна пропорционально масштабироваться [14]. Без обращения к приближениям из предыдущего раздела, среднеквадратичная амплитуда компонента шероховатости, который соединяет свет в моды с эффективными показателями между n и $n+\delta n$ - это затухание в этих модах и оно пропорционально u^2 [15], но единственный другой независимый масштаб длин, в зависимости от которого она может варьироваться - это λ_c .

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

где: γ - поверхностное натяжение, k_B - Постоянная Больцмана, T - Температура,

Поскольку затухание имеет единицы обратной длины, оно, следовательно, путём размерного анализа, должно быть обратно пропорционально кубу λ_c .

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

Если это верно для каждого множества мод назначения, это должен быть верно и для чистого затухания α для всех мод назначения, так что это уравнение (феноменологическое описанное в [16], но без теоретического основания) прогнозирует затухание данного волон, вытянутого для работы при разных длинах волн. Результат отличается от знакомой зависимости рэлеевского рассеяния $1/\lambda^4$ в насыпных средах [17], и, что важно, относится к неоднородностям на всех масштабах длины, не только небольших по сравнению с λ . Мы измерили спектры затухания методом редуцирования. Длина редуцирования, по

крайней мере 50 м, позволила переходным вытекающим модам затухнуть, так что измеряется только основная мода. Для набора аналогичных Полых фотонно-кристаллических волокон мы определили минимальное затухание как функцию длины волны λ_c минимума. Волокна имели сердцевинны с 7 ячейками, но были вытянуты до разных масштабов, что дало им различное λ_c , но в остальном - сопоставимые свойства [14]. Минимальное затухание построено на рис. 2 в зависимости от λ_c на двойной логарифмической шкале. Аппроксимация прямой линией показана и имеет уклон, равный -3,07, поддерживая спрогнозированную обратную кубическую зависимость в Уравнении (6).

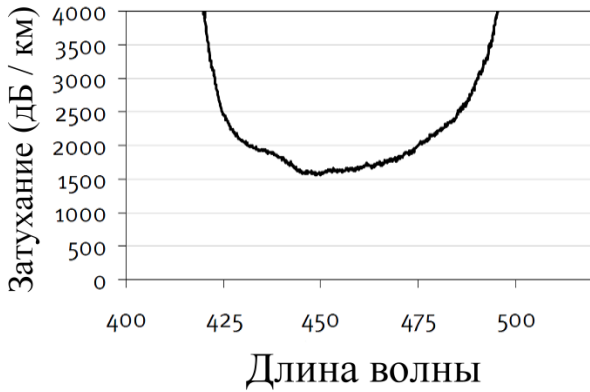


Рис. 2 – Затухание спектр фотонного кристалла волокна (дБ / км)

Минимальное оптическое затухание $\sim 0,15$ дБ/км в традиционных волокнах [18] определяется фундаментальными процессами рассеяния и поглощения в стекле высокой чистоты [17], оставляя небольшие перспективы для значительных улучшений. Тем не менее, более 99% света в ПС-ФКВ может распространяться в воздухе [16] и избежать этих механизмов потерь, что делает Полые фотонно-кристаллические волокна перспективным вариантом в качестве будущих телекоммуникационных волокон со сверхнизкими потерями. Тем не менее, самая низкая потеря, описанная для Полых фотонно-кристаллических волокон, составляет 1,7 дБ/км [16], хотя с тех пор мы сократили её до 1,2 дБ/км. Следовательно, понимание фундаментальных ограничений этой потери имеет большое значение. Так как только небольшая часть света распространяется в диоксиде кремния, эффект нелинейностей материала незначителен, и волокна не страдают от тех же ограничений в части потерь, как традиционные волокна, изготовленные только из сплошного материала.

Волоконно-оптический гироскоп. Волоконно-оптические гироскопы основаны на эффекте Саньяка. Эффект Саньяка генерирует разность оптических фаз, $\Delta\phi$, между двумя противоположно направленными волнами во вращающейся волоконной катушке (оптический путь) [19].

Рис. 3 показывает, что волоконно-оптические гироскопы - это самые простые датчики вращения. Они широко используются в промышленном масштабе, где их пределы в части динамического диапазона и линейности не накладывают ограничений.

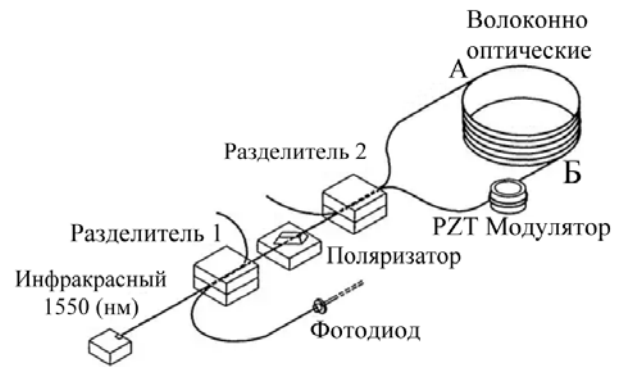


Рис. 3 – Схема волоконно-оптических гироскопов

На протяжении контура угловой скорости вращения (Ω) изменяется видимое расстояние между точками А и В для противоположно движущихся лучей. Для волны, движущейся из точки А в точку В, то есть в направлении, совпадающем с направлением вращения контура, расстояние увеличивается, тогда как за время dt точка В движется к углу ($d\phi = \Omega \cdot dt$). Это когда удлинение пути светового луча равно dt , так как в каждый момент луч направлен по касательной к контуру при той же направленной проекции тангенциальной линейной скорости ($\vec{v} = \vec{v} \cdot \cos \alpha = \Omega \cdot r \cdot \cos \alpha$). Таким образом, длина пути, проходимого лучом, равна $Dl + \dot{v} dt$. Рассуждая аналогично, для противоположно направленного движущегося луча света будет иметь место уменьшение отрезка видимой траектории $Dl - \dot{v} dt$. Учитывая инвариантную величину скорости света, видимое удлинение и сокращение путей для противоположно направленных лучей могут рассматриваться как эквивалентные расширениям и сужениям временных интервалов, т.е.

$$\Delta t_1 = \frac{1}{c} (\Delta l + v \cdot dt) \tag{3}$$

$$\Delta t_2 = \frac{1}{c} (\Delta l - v \cdot dt) \tag{4}$$

Если относительная задержка противоположно направленных волн, возникающих при вращении, выражается через разность фаз противоположно направленных волн, то это будет

$$\Delta \phi = \omega \cdot \Delta \tau = \frac{4 \cdot \omega \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot v \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega \tag{5}$$

где: ($\Delta\phi$) - разность фаз, Ω - угловая скорость, c - свет - / скорость сигнала, λ : длина волны, S : масштабный фактор, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot v$,

В волоконно-оптическом гироскопе оптическое волокно используется как среда распространения для ИК 1550 нм. Длинный волоконно-оптический кабель наматывается в петли, чтобы увеличить эффективную площадь системы. Два луча снова распространяются по волокну в противоположных направлениях. Из-за эффекта Саньяка луч, движущийся против вращения, испытывает немного более короткую задержку распространения сигнала, чем другой луч. Поскольку оптическое излучение распространяется в материальной

среде, и оно относится к оптическому волокну, которое изготовлено из кварца или кварцевого стекла, такие физические явления, как эффект двойного лучепреломления, эффект Керра, эффект Фарадея и т.д. неблагоприятно влияют на угол вращения петли волоконно-оптических гироскопов и фиксируемую фазу оптического сигнала. Эти эффекты, связанные с процессом распространения оптического излучения в материале оптической среды, приводят к сдвигу фаз противоположно направленных волн, что не связано с вращением замкнутой петли. Негативные эффекты также связаны с процессами рассеяния и отражения света в оптическом пути, эффектом поляризационной невязанности, связанным с несимметричным расположением анизотропных элементов по отношению к центру петли волокна, или анизотропными свойствами волокна. Эта проблема была решена, и решена с помощью частотной и фазовой модуляции оптического излучения, что позволяет сместить нулевую точку на уклоне с максимальным уклоном сигнала помех. Получающийся в результате дифференциальный фазовый сдвиг измеряется посредством интерферометрии, таким образом, переводя один компонент угловой скорости в сдвиг интерференционного узора, который измеряется фотометрически.

Интерферометр на основе фотонно-кристаллических волокон. Главный аргумент в пользу замены оптического волокна на другую среду состоит в том, что первые опыты Саньяка проводились в полой трубке и воздух с низким давлением не демонстрирует эффекты, проявляющиеся в оптическом волокне. В связи с этим, очевидно, что использование такой оптической среды, которая, с одной стороны, позволила бы направляться оптическому излучению, а с другой стороны, не изменяла бы его частотных и фазовых характеристик. Такие среды включают фотонные кристаллы с дефектами. В таких средах дефект представляет собой полый волновод. Изготовленное фотонно-кристаллическое волокно имеет показатель преломления 1,82 при длине волны 500 нм для этого типа волокна. Эффективное одномодовое распространение типа «кагоме» происходит в диапазоне длин волн от 750 до 1050 нм в диаметре в основном 30 микрон и при потере около 0,7 дБ/м [20] (рис.4).

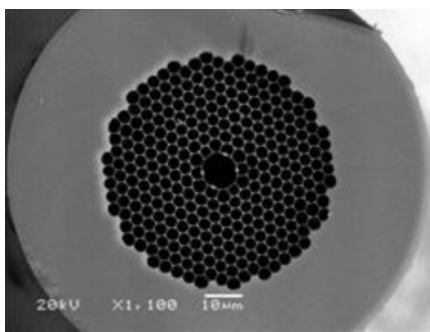


Рис. 4 – Пример фотонного кристалла волокна с полой сердцевины диаметром около 30 микрон

Разрушившиеся зоны в ФКВ вызывают расширение луча, когда он распространяется от одномодового оптического волокна (SMF) в ФКВ [14,15]. Рас-

ширение луча в сочетании с осевой симметрией и модовыми свойствами ФКВ - вот что делает возможным возбуждение (и рекомбинацию) мод, которые имеют аналогичную азимутальную симметрию [17]. Моды, возбуждаемые в ФКВ, имеют разные эффективные показатели (или различные константы распространения), таким образом, они движутся с различными скоростями. В результате, моды накапливают разность фаз, по мере того, как они распространяются по ФКВ. В связи с возбуждением и рекомбинацией мод в устройстве, спектр отражения, как ожидается, демонстрирует ряд максимумов и минимумов (интерференционный узор). Когда две моды участвуют в интерференции, интенсивность прошедшего или отраженного излучения (I) может быть выражена как:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (6)$$

В Уравнении (7) I_1 и I_2 – это, соответственно, интенсивность моды сердцевины и моды оболочки, а $\Delta\Phi = 2\pi\Delta nL/\lambda$ - это полный сдвиг фазы. $\Delta n = nf - nc$, при этом nf и nc являются, соответственно, эффективным показателем преломления моды сердцевины и моды оболочки. L - это физическая длина ФКВ, а λ - это длина волны источника света. Шаг полос и период (P) интерференционного узора описывается формулой $P = \lambda^2/(\Delta nL)$. Максимумы интерференционного узора появляются при длинах волн, удовлетворяющих условию $\Delta\Phi = 2m\pi$, с $m = 1, 2, 3, \dots$ Это значит, при длинах волн, описываемых

$$\lambda_m = \Delta n \frac{L}{m} \quad (7)$$

Контраст полос или видимость (V) модового интерферометра является важным параметром, в частности, когда интерферометр используется для измерений. Как правило, желательна более высокая видимость, так как она приводит к более высокому отношению сигнал/помеха и более точному измерению. Видимость двухмодового интерферометра может быть рассчитана по известной формуле: $V = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} - это соответственно, максимальное и минимальное значения I в Уравнении (7). В соответствии с определением и Уравнением (7) V может быть выражено как [18]:

$$V = \frac{2\sqrt{k}}{(1+k)}, \quad (5)$$

где: $k = I_1/I_2$.

Многие исследовательские группы предпочитают контраст полос (выраженный в дБ), а не видимость. Контраст полос (FC) определяется здесь как $FC = -10\log(1-V)$. На рис. 5 показана зависимость контраста полос от k наряду с теоретическим интерференционным узором устройства с $L = 10$ мм для двух значений k . Можно отметить, что контраст полос увеличивается по мере того, как k приближается к 6, то есть когда две моды, которые участвуют в интерференции, имеют равные интенсивности. Рис. 5. Контраст полос в моде интерферометра как функция k или соотношения интенсивности моды оболочки к интенсивности моды сердцевины. Вставка показывает теоретический спектр отражения в случае $k=0,4$ (пунктирная линия) и $k=0,96$ (сплошная линия).

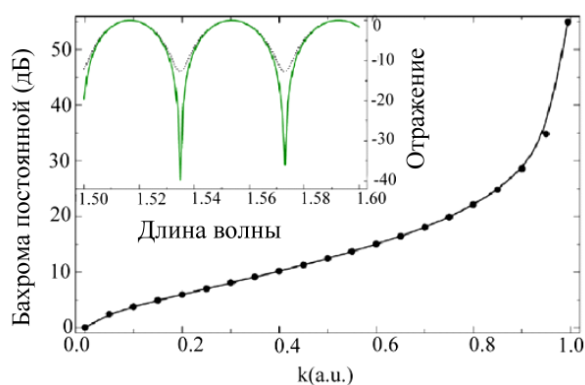


Рис. 5 – Бахрома контраст в режиме интерферометра

Физический механизм для волноводного распространения излучения в фотонных волокнах не связан с явлением полного внутреннего и с наличием фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания оболочки волокна. Волноводы этого типа перспективны для создания газовых датчиков, спектральных элементов, а также управления атомами с лазерным охлаждением. Экспериментальные исследования показали, что в некоторых случаях [21] Относительно высокая потеря оптических волокон с воздухом в сердцевине происходит благодаря рассеянию света неоднородностями поверхности стекла из-за застывших капиллярных волн. Решение для снижения оптических потерь фотонных волокон требует дальнейшего фундаментального исследования, однако, мы уже можем использовать небольшие части фотонных волокон в специальных измерительных приборах, которые включают ВОГ. Фотонно-кристаллическое волокно – это двумерная фотонно-кристаллическая структура, основанная на композиции «кварцевое стекло – воздух», сформированной в оболочку.

Распространение оптического излучения в дефекте фотонного кристалла. В работе [22] были подробно рассмотрены условия формирования фотонно-кристаллических волокон и распространение в них оптического излучения. Экспериментальные исследования ФКВ были проведены в ряде исследований, например, [23]. Фотонные запрещенные зоны, возникающие в спектре пропускания двумерной периодической оболочки, обеспечивают высокий коэффициент отражения для излучения, распространяющегося вдоль полой сердцевины, осуществляя волноводное распространение моды. В работе [23] приведены результаты экспериментального определения распределения интенсивности оптического излучения в центре поперечного сечения дефекта и результаты численного расчёта распределения плотности энергии в поперечном сечении. Эти результаты показаны на рис. 6.

На сегодняшний день опубликованы исследования об условиях использования ФКВ для передачи оптических информационных сигналов в телекоммуникационных системах, однако использование ФКВ в оптических интерферометрах только начали изучать для прецизионных измерений некоторых физических величин. В работе [24] – результаты измерения напряжения с помощью цилиндрического ФКВ, которое формируется с помощью интерферометра.

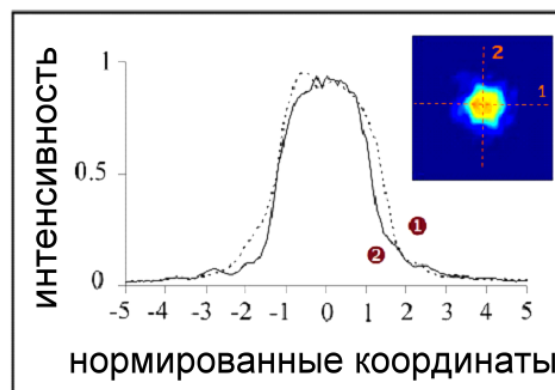


Рис. 6 – Распределение мощности с полой сердцевиной ФКВ

Для описания работы волоконно-оптического гироскопа на основе ФКВ нужно использовать описание оптических волн, распространяющихся вдоль двумерного дефекта фотонного кристалла [25]. Нужно реализовать необходимый волоконно-оптический гироскоп на основе ФКВ с минимальной потерей менее 1 дБ/км, который распространяет одномодовое излучение. Эти волокна включают в себя, например, имеющийся на рынке РСФ - HC19-1550 (0,03 дБ/км) или LMA -25 (1,5 дБ/км), работающие при 1550 нм. Низкий уровень поглощения в этих волокнах позволяет создать на их основе многовитковую кольцевой интерферометр, который реализует эффект Саньяка. Основная техническая проблема в применении ФКВ – это соединение отдельных элементов ФКВ. Вот некоторые отличительные особенности сборки волоконно-оптического интерферометра.

Выводы. Гироскопы на основе фотонно-кристаллических волокон - это вид оптических гироскопов, которые демонстрируют разнообразие новых и усовершенствованных характеристик сверх того, что могут предложить традиционные волоконно-оптические гироскопы. Благодаря своей уникальной геометрической структуре, фотонно-кристаллические волокна демонстрируют особые свойства и возможности, которые приводят к огромному потенциалу в области измерений. В статье обсуждается использование фотонно-кристаллического волокна с полой сердцевиной, 1550 nm, Ø10 мкм в оптическом гироскопе. Они могут обеспечить реальную диэлектрическую изоляцию между датчиком и системой опроса в присутствии очень высоких электромагнитных полей. В соответствии с этими характеристиками мы можем устранить много проблем, которые существуют в традиционном волоконно-оптическом гироскопе, и получить более хорошие и более точные результаты в тех же условиях при использовании Фотонно-кристаллических волокон.

Список литературы: 1. Knight, J. C. (1996). All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [Text] / J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell, D. M. Atkin // Optics Letters. – 1996. – Vol. 21 (19). – P. 1547–1549. doi: 10.1364/ol.21.001547 2. Chau, Y.-F. (2010). A comparative study of high birefringence and low confinement loss photonic crystal fiber employing elliptical air holes in fiber cladding with tetragonal lattice [Text] / Y.-F. Chau, C.-Y. Liu, H.-H. Yeh, D. P. Tsai // Progress In Electromagnetics Research B. – 2010. – Vol. 22. – P. 39–52. doi: 10.2528/pierb10042405 3. Chen, D. Ultrahigh Birefringent

Photonic Crystal Fiber With Ultralow Confinement Loss [Text] / *D. Chen, L. Shen* // IEEE Photonics Technology Letters. – 2007. – Vol. 19 (4). – P. 185–187. doi: 10.1109/lpt.2006.890040 **4. Ju, J.** Design of single-polarization single mode photonic crystal fibers [Text] / *J. Ju, W. Jin, M. S. Demokan* // J. Lightwave Technol. – 2001. – Vol. 24. – P. 825–830. **5. Knight, J. C.** (2007). Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibers [Text] / *J. C. Knight, D. V. Skryabin* // Optics Express. – 2007. – Vol. 15 (23). – P. 15365–15376. doi: 10.1364/oe.15.015365 **6. Folkner, J. R.** Polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber [Text] / *J. R. Folkner, M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, C. Jakobsen, H. R. Simonsen* // Optics Express. – 2004. – Vol. 12 (5). – P. 956–960. doi: 10.1364/opex.12.000956 **7. Wadsworth, W. J.** Yb³⁺-doped photonic crystal fiber laser [Text] / *W. J. Wadsworth, J. C. Knight, W. H. Reeves, P. S. J. Russell, J. Arriaga* // Electronics Letters. – 2000. – Vol. 36 (17). – P. 1452–1453. doi: 10.1049/el:20000942 **8. Overview of Fiber Optic Sensors.** Available at: http://www.bluer.com/images/Overview_of_FOS2.pdf (Last accessed: 8.02.2012). **9. Yablouovitch, E.** (1991). Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms [Text] / *E. Yablouovitch, T. Gmitter, K. Leung* // Physical Review Letters. – 1991. – Vol. 67 (17). – P. 2295–2298. doi: 10.1103/physrevlett.67.2295 **10. Birks, T. A.** Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures [Text] / *T. A. Birks, D. M. Atkin, T. J. Shepherd, P. S. J. Russell, P. J. Roberts* // Electronics Letters. – 1995. – Vol. 31 (22). – P. 1941–1943. doi: 10.1049/el:19951306 **11. Ho, H. L.** (2007). Optimizing microstructured optical fibers for evanescent wave gas sensing [Text] / *H. L. Ho, Y. L. Hoo, W. Jin, J. Ju, D. N. Wang, R. S. Windeler, Q. Li* // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2007. – Vol. 122 (1). – P. 289–294. doi: 10.1016/j.snb.2006.05.036 **12. Russell, P. S. J.** Photonic crystal fibers [Text] / *P. S. J. Russell* // Science **299**. – 2003. – P. 358–362. **13. 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 **14. Cregan, R. F.** “Singlemode photonic band gap guidance of light in air,” [Text] / *R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell, P. J. Roberts and D. C. Allan* // Science **285**. – 1999. – P. 1537–1539. **15. Snyder, A. W.** *Optical Waveguide Theory* [Text] / *A. W. Snyder, J. D. Love* // Chapman and Hall, London, 1983. **16. Mangan, B. J.** Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber [Text] / *B. J. Mangan, L. Farr, A. Langford, P. J. Roberts, D. P. Williams, F. Couny, M. Lawman, M. Mason, S. Coupland, R. Flea, H. Sabert, T. A. Birks, J. C. Knight and P. S. J. Russell* // in Proc. Opt. Fiber. Commun. Conf. 2004. – P. PDP24. **17. Miya, T.** Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm [Text] / *T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka and T. Miyashita* // Electron. Lett. **15**. – P. 106–108. **18. Nagayama, K.** Ultra-low-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance [Text] / *K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, I. Saitoh, Y. Chigusa* // Electron. Lett. **38**. – P. 1168–1169. **19. Shinde, Y. S.** Dynamic Pressure Sensing Study Using Photonic Crystal Fiber: Application to Tsunami Sensing [Text] / *Y. S. Shinde, H. Kaur Gahir* // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Vol. 20 (4). – P. 279–281. doi: 10.1109/lpt.2007.913741 **20. Ebendorff-Heidepriem, H.** (2009). Suspended nanowires: fabrication, design and characterization of fibers with nanoscale cores [Text] / *H. Ebendorff-Heidepriem, S. C. Warren-Smith, T. M. Monro* // Optics Express. – 2009. – Vol. 17 (4). – P. 2646. doi: 10.1364/oe.17.002646 **21. Ohashi, M.** Optical loss property of silica-based single-mode fibers [Text] / *M. Ohashi, K. Shiraki, K. Tajima* // IEEE J. Lightwave Technol. – 1992. – Vol. 10. – P. 539–543. **22. Russell, P. S. J.** (2006). Photonic-Crystal Fibers [Text] / *P. S. J. Russell* // Journal of Lightwave technology. – 2006. – Vol. 24 (12). – P. 4729–4749. **23. Fedotov, A. B.** Volnovodnye svoystva i spektr sobstvennykh mod polykh fotonno-kristallicheskih volokon [Text] / *A. B. Fedotov, S. O. Kononov, O. A. Koletovatova, et al.* // Kvantovaya elektronika. – 2003. – Vol. 33 (3). – P. 271–274. **24. Chen, W.** Ring-core photonic crystal fiber interferometer for strain measurement [Text] / *W. Chen* // Optical Engineering. – 2010. – Vol. 49 (9). – P. 094402. doi: 10.1117/1.3488045 **25. Mogilevtsev, D.** (1999). Localized function method for modeling defect modes in 2-D photonic crystals [Text] / *D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. S. J. Russell* // Journal of Lightwave Technology. – 1999. – Vol. 17 (11). – P. 2078–2081. doi: 10.1109/50.802997

Bibliography (transliterated): **1. Knight, J. C., Birks, T. A., Russell, P. S. J., Atkin, D. M.** (1996). All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. Optics Letters, 21 (19), 1547–1549. doi: 10.1364/ol.21.001547 **2. Chau, Y.-F., Liu, C.-Y., Yeh, H.-H., Tsai, D. P.** (2010). A comparative study of high birefringence and low confinement loss photonic crystal fiber employing elliptical air holes in fiber cladding with tetragonal lattice. Progress In Electromagnetics Research B, 22, 39–52. doi: 10.2528/PIER10042405 **3. Chen, D., Shen, L.** (2007). Ultrahigh Birefringent Photonic Crystal Fiber With Ultralow Confinement Loss. IEEE Photonics Technology Letters, 19 (4), 185–187. doi: 10.1109/lpt.2006.890040 **4. Ju, J., Jin, W., Demokan, M. S.** (2001). Design of single-polarization single mode photonic crystal fibers. J. Lightwave Technol., 24, 825–830. **5. Knight, J. C., Skryabin, D. V.** (2007). Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibers. Optics Express, 15 (23), 15365–15376. doi: 10.1364/oe.15.015365 **6. Folkner, J. R., Nielsen, M. D., Mortensen, N. A., Jakobsen, C., Simonsen, H. R.** (2004). Polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber. Optics Express, 12 (5), 956–960. doi: 10.1364/opex.12.000956 **7. Wadsworth, W. J., Knight, J. C., Reeves, W. H., Russell, P. S. J., Arriaga, J.** (2000). Yb³⁺-doped photonic crystal fiber laser. Electronics Letters, 36 (17), 1452–1453. doi: 10.1049/el:20000942 **8. Overview of Fiber Optic Sensors.** Available at: http://www.bluer.com/images/Overview_of_FOS2.pdf (Last accessed: 8.02.2012). **9. Yablouovitch, E., Gmitter, T., Leung, K.** (1991). Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. Physical Review Letters, 67 (17), 2295–2298. doi: 10.1103/physrevlett.67.2295 **10. Birks, T. A., Atkin, D. M., Shepherd, T. J., Russell, P. S. J., Roberts, P. J.** (1995). Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures. Electronics Letters, 31 (22), 1941–1943. doi: 10.1049/el:19951306 **11. Ho, H. L., Hoo, Y. L., Jin, W., Ju, J., Wang, D. N., Windeler, R. S., Li, Q.** (2007). Optimizing microstructured optical fibers for evanescent wave gas sensing. Sensors and Actuators B: Chemical, 122 (1), 289–294. doi: 10.1016/j.snb.2006.05.036 **12. Russell, P. S. J.** (2003). “Photonic crystal fibers,” Science 299, 358–362. **13. Kumar, V. V. R., George, A., Reeves, W., Knight, J., Russell, P., Omenetto, F., Taylor, A.** (2002). Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation. Optics Express, 10 (25), 1520. doi: 10.1364/oe.10.001520 **14. Cregan, R. F., Mangan, B. J., Knight, J. C., Birks, T. A., Russell, P. S. J., Roberts P. J., Allan, D. C.** (1999). “Singlemode photonic band gap guidance of light in air,” Science 285, 1537–1539. **15. Snyder, A. W., Love, J. D.** (1983). *Optical Waveguide Theory* (Chapman and Hall, London). **16. Mangan, B. J., Farr, L., Langford, A., Roberts, P. J., Williams, D. P., Couny, F., Lawman, M., Mason, M., Coupland, S., Flea, R., Sabert, H., Birks, T. A., Knight J. C., Russell, P. S. J.** (2004). “Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber,” in Proc. Opt. Fiber. Commun. Conf., paper PDP24. **17. Miya, T., Terunuma, Y., Hosaka, T., Miyashita, T.** (1979). “Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm ,” Electron. Lett. 15, 106–108. **18. K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, I. Saitoh and Y. Chigusa,** “Ultra-low-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance,” Electron. Lett. 38, 1168–1169 (2002). **19. Shinde, Y. S., Kaur Gahir, H.** (2008). Dynamic Pressure Sensing Study Using Photonic Crystal Fiber: Application to Tsunami Sensing. IEEE Photonics Technology Letters, 20 (4), 279–281. doi: 10.1109/lpt.2007.913741 **20. Ebendorff-Heidepriem, H., Warren-Smith, S. C., Monro, T. M.** (2009). Suspended nanowires: fabrication and characterization of fibers with nanoscale cores. Optics Express, 17 (4), 2646. doi: 10.1364/oe.17.002646 **21. Ohashi, M. Shiraki K., Tajima, K.** (1992). “Optical loss property of silica-based single-mode fibers,” IEEE J. Lightwave Technol. 10, 539–543. **22. Russell, P. S. J.** (2006). Photonic-Crystal Fibers. Journal of Lightwave technology, 24 (12), 4729–4749. **23. Fedotov, A. B., Kononov, S. O., Koletovatova, O. A. et al.** (2003). Volnovodnye svoystva i spektr sobstvennykh mod polykh fotonno-kristallicheskih volokon. Kvantovaya elektronika, 33 (3), 271–274. **24. Chen, W.** (2010). Ring-core photonic crystal fiber interferometer for strain measurement. Optical Engineering, 49 (9), 094402. doi: 10.1117/1.3488045 **25. Mogilevtsev, D., Birks, T. A., Russell, P. S. J.** (1999). Localized function method for modeling defect modes in 2-D photonic crystals. Journal of Lightwave Technology, 17 (11), 2078–2081. doi: 10.1109/50.802997

Поступила (received) 21.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аль-Судани Хайдер Али Муса – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки; Кафедра фізических основ електронної техніки, пр. Леніна, 14, г. Харків, Україна, 61166.

Аль-Судані Хайдер Алі Муса – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки; Кафедра фізических основ електронної техніки, пр. Леніна, 14, м. Харків, 61166.

Haider Ali Muse – postgraduate student, Kharkiv national university of radio electronics; Department of Physical Foundations of Electronic Engineering, Lenina ave., 14, Kharkov, 61166