

5-й Международный  
радиоэлектронный  
«Прикладная радиоэлектроника»  
Состояние и перспективы  
развития»

**МРФ-2014**

**Том 4**

**КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА  
НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»**

Украина, г. Харьков, 2014

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ НА ОСНОВЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Мачехин Ю.П., Хайдер Али

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
(61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. ФОЭТ, тел. (057) 702-14-84)

The paper presents the results of research structure of fiber gyroscope, whose related to the influence of the material medium of the optical fiber to the phase shifts, propagating in a fiber optical waves. In this paper we proposed to use of a photonic crystal fiber with an inner hollow defect. The use of such fibers is not affected by a material medium on the propagation of optical radiation. On the other hand the complexity of using photonic - crystal fiber as part of the measuring devices is the lack of necessary equipment, which is formed due to the equipment and the properties of which are discussed in this paper. For example of fiber gyroscope, the report discusses the fundamental questions of construction equipment on the basis of new artificial materials.

### Введение

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) - прибор, который позволяет измерять угловую скорость и углы поворота объекта, на котором он установлен. Общепризнанна перспективность волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) для систем управления и навигации движущимися объектами различного рода (наземный транспорт, суда, самолеты и т.п.). При этом востребованными являются ВОГ в широком диапазоне характеристик точности — от 10,0 град/час до 0,001 град/час. В России лидером по производству целого ряда ВОГ класса точности. 10,0-1,0 град/час является ООО «Физоптика». Однако существует отставание от зарубежного уровня в области ВОГ навигационного класса точности (0,01 — 0,001 град/час). Точностные характеристики волоконно-оптического гироскопа. повышенной точности во многом зависят от характеристик его основных элементов и особенностей методик его сборки. Таким образом, разработка волоконно-оптического гироскопа и методик его изготовления является актуальной задачей.

Большое количество параметров и явлений влияют на фазу оптического излучения, которые дают дополнительные фазовые сдвиги, не связанные с вращением интерферометра. Поэтому, главная проблема, рассмотренная в настоящей работе связана с появлением дополнительных сигналов на выходе волоконного кольцевого интерферометра идентичных, но не связанных с вращением.

Целью настоящей работы было проведение теоретических исследований условий использования фотонно - кристаллического волокна (ФКВ) в составе ВОГ.

### Основные условия работы ВОГ

Принцип работы ВОГ заключается в том, что при распространении в замкнутом оптическом контуре встречно бегущих оптических волн фазовые набегу у этих волн неодинаковы, а разность фаз  $\Delta\varphi$  встречных волн пропорциональна угловой скорости вращения контура. В рассматриваемом случае разность фаз  $\Delta\varphi_c$ , обусловленная вращением контура является фазой Саньяка. Регистрируя эту разность фаз, благодаря фундаментальной связи [1] можно определить угловую скорость  $\Omega$ .

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega$$

Однако, для однозначного и точного определения угловой скорости необходимо исключить возможность аддитивного и мультипликативного влияния других физических эффектов на измеряемую величину разности фаз встречных волн. Главной проблемой на пути реализации прецизионных фазовых измерений является дрейф нуля, который

проявляется в том, что при физически неподвижном гироскопе на выходе гироскопа существует сигнал, который обусловлен физическими явлениями, не связанными с вращением контура. В волокне, как в материальной среде, получить стабильную фазу оптических колебаний практически невозможно. Поэтому в ВОГ могут иметь место аддитивные фазовые шумы. Одной из причин появления этих сигналов являются процессы рассеяния и отражения в волоконном контуре.

При вращении контура с угловой скоростью  $\Omega$  кажущееся расстояние между точками А и В для встречно бегущих лучей изменяется. Для волны бегущей из точки А в точку В, т.е. в направлении, совпадающем с направлением вращения контура, расстояние удлиняется, так как за время  $dt$  точка В переместится на угол  $d\varphi = \Omega \cdot dt$ , перейдя в точку С.

Это удлинение пути для светового луча будет равно  $v \cdot dt$ , поскольку в каждое мгновение луч направлен по касательной к контуру, по этой же касательной направлена проекция линейной скорости  $\vec{v} = \vec{v}' \cdot \cos \alpha = \Omega \cdot r \cdot \cos \alpha$ . Таким образом, отрезок пути, проходимый лучом, равен  $DI + v \cdot dt$ . Рассуждая аналогично, для встречно бегущего луча света будет иметь место кажущееся сокращение отрезка пути  $DI - v \cdot dt$ .

Считая скорость света инвариантной величиной, кажущиеся удлинения и сокращения путей для встречных лучей можно эквивалентно считать удлинениями и сокращениями отрезков времени, т.е.

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

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

Если относительное запаздывание встречных волн, возникающее при вращении, выразить через разность фаз встречных волн, то она составит

$$\Delta \varphi_0 = \omega \cdot \Delta t = \frac{4 \cdot \omega \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega \quad (1)$$

$$\text{где } \omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu, \lambda = c / \nu.$$

Основные приведенные условия работы ВОГ не позволяют понять ограничения, которые накладываются на точность измерений, выполняемых с его помощью.

До настоящего времени в ВОГ использовались кварцевые волокна, применяемые в оптической связи. В этих волокнах, представляющих собой аморфную, почти однородную и изотропную среду, могут распространяться поперечные оптические волны. Свет, отражаясь от границы раздела «сердцевина-оболочка», в результате полного внутреннего отражения распространяется вдоль сердечника как собственная волна оптического волновода.

Световая волна как электромагнитное колебание распространяется по волокну с фазовой скоростью, обратно пропорциональной показателю преломления. Даже слабая неоднородность может приводить к накопленным эффектам и изменять результат измерений. Поскольку оптическое излучение распространяется в материальной среде, а к таковой относится оптическое волокно, изготавливаемое из кварца или кварцевого стекла, то такие физические явления как эффект двулучепреломления, эффект Керра, эффект Фарадея и т.д. негативно влияют на углом поворота контура ВОГ и регистрируемой фазой оптического сигнала. Указанные эффекты, сопутствующие процессу распространения оптического излучения в материальной оптической среде,

приводят к сдвигу фаз встречных волн, который не связан с вращением замкнутого контура. К негативным также относятся эффекты, связанные с процессами рассеяния и отражения света в волоконном тракте, эффект поляризационной невязимности, связанный с несимметричным расположением анизотропных элементов, относительно середины волоконного контура, или анизотропных свойств волокна.

Однако, главная проблема ВОГ заключается в том, что по мере повышения точности измерений и снижения измеряемой величины угловой скорости все в большей степени оказывают влияние оптические эффекты не связанные с угловым перемещением оптического контура ВОГ. Поскольку оптическое излучение распространяется в материальной среде, а к таковой относится оптическое волокно, изготавливаемое из кварца или кварцевого стекла, то такие физические явления как эффект двулучепреломления, эффект Керра, эффект Фарадея и т.д. негативно влияют на углом поворота контура ВОГ и регистрируемой фазой оптического сигнала. Указанные эффекты, сопутствующие процессу распространения оптического излучения в материальной оптической среде, приводят к сдвигу фаз встречных волн, который не связан с вращением замкнутого контура. К негативным также относятся эффекты, связанные с процессами рассеяния и отражения света в волоконном тракте, эффект поляризационной невязимности, связанный с несимметричным расположением анизотропных элементов, относительно середины волоконного контура, или анизотропных свойств волокна.

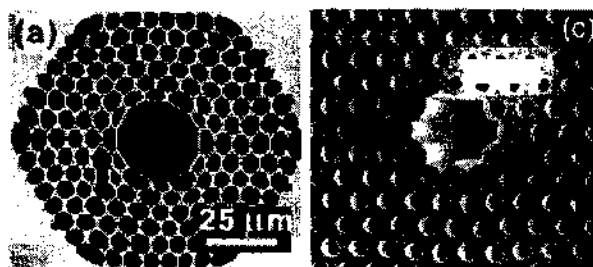
Эту проблему решали и решают путем использования частотной и фазовой модуляции используемого оптического излучения, которая позволяет смещать нулевую точку на склон с максимальной крутизной интерференционного сигнала. Тем не менее, полностью избавиться от сдвигов фаз, не связанных с вращением контура не удастся

Эффекты, связанные с локально взаимными, нестационарными изменениями параметров волокна, при их возбуждении несимметрично относительно середины волоконного контура. Основными эффектами являются эффект Фарадея, Френеля – Физо и нелинейный оптический эффект Керра.

Использование немонохроматического излучения СЛД (суперлюминесцентный диод с длиной когерентности 10-20 мкм) практически снимает проблему влияния отраженного и рассеянного излучения на фазу выходного сигнала ВКИ. Однако, применение СЛД сняло только часть проблем, приводящих к дополнительным сигналам.

#### **Фотонно-кристаллическое волокно в составе ВОГ**

Главный аргумент, в пользу замены оптического волокна на другую среду, заключается в том, что в первых экспериментах Саньяка, проводимых в полой трубе и при низком давлении воздуха, не наблюдались эффекты, проявляющиеся в оптическом волокне. В этой связи становится очевидной необходимость использования таких оптических сред, которые, с одной стороны, позволяли бы канализировать оптическое излучение, а с другой стороны не изменяли бы его частотных и фазовых характеристик. К таким средам относятся фотонные кристаллы с дефектами. В таких средах полый дефект является волноведущим, в котором изготавливаемые фотонно-кристаллические волокна характеризуются показателем преломления 1,82 при длине волны 500 нм, для этого волокна, типа кагоме, эффективное распространение одномодового излучения наблюдается в диапазоне длин волн от 750 до 1050 нм при основном диаметре 30 мкм и потерях около 0,7 Дб/м [1].



Пример фотонно-кристаллического волокна с полый сердцевинной диаметром около 30 мкм.

Эти волокна, наследуя свойства фотонных кристаллов, позволяют формировать фотонные запрещенные зоны, что открывает новые перспективы в управлении свойствами ОВ. Появляется возможность управлять волноводной дисперсией, сдвигая длину волны нулевой дисперсии в область видимого спектра, а также эффективным показателем преломления оболочки, формируя «бесконечно» одномодовые волокна, в том числе и волокна с большой эффективной площадью сердцевинной, необходимые для пропуска больших мощностей светового потока; формировать воздушные каналы не только в оболочке (что делает волокно более легким), но и в сердцевинной, открывая широкие возможности дальнейшего уменьшения затухания в волокне за пределы уже достигнутого.

Для решения перечисленных выше проблем проводится разработка волокон на основе фотонных кристаллов. Фотонно-кристаллическое волокно представляет собой структуры двумерного фотонного кристалла на основе композиции «кварцевое стекло-воздух», формируемой в оболочке ОВ.

ФКВ — это волокно, поперечное сечение которого постоянно по длине и представляет собой двумерный фотонный кристалл (ФК) с точечным дефектом, расположенным, как правило, в центре симметрии ОВ.

Структура двумерного фотонного кристалла формируется в оболочке с помощью симметрично расположенных вокруг сердцевинной полых капилляров в виде круглых или шестигранных плотно упакованных диэлектрических трубок, создающих периодическую двумерную микрорешетку (рис. 1).

Главная особенность ФКВ в том, что распространение энергии световой волны происходит вдоль линейного дефекта (которым является, как правило, область сердцевинной), а сама волна существует в виде поперечной моды  $TE_0$ , т. е. в поперечном сечении волокна (или в плоскости решетки фотонного кристалла).

### Заключение

В докладе обсуждаются условия реализации структуры волоконного гироскопа с использованием фотонно-кристаллического волокна. С помощью этого волокна и методов и устройств формирования волоконных интерферометров, может быть решена задача создания волоконно-оптического гироскопа на основе фотонно – кристаллического волокна.

### Список литературы:

1. X.Jiang, T.G. Euser, F.Abdolvand, et al, Single-mode hollow-core photonic crystal fiber made from sift glass, Optics express, No.16, Vol.19, 2011, pp 15438-15444]