

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Рассмотрены структурные схемы и принципы функционирования оптических датчиков на основе волноводных структур. Датчики предназначены для измерения направления и величины изгибов и напряжений в строительных конструкциях, а также измерения напряженности внешних электрических полей. Проанализировано влияние структуры волноводов, а также интерферометров и микрорезонаторов на их основе на чувствительность датчика. Проведена оптимизация параметров чувствительного элемента датчика в зависимости от его назначения.

Ключевые слова: оптический датчик, микроструктурированное волокно, кольцевой микрорезонатор, щелевой волновод, жидкий кристалл, эффективный показатель преломления, напряженность электрического поля, распределение полей мод, метод линий.

V.N. Reabtsev

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR MEASURING EXTERNAL IMPACT ON THE BASE OF OPTICAL WAVEGUIDE STRUCTURES

We considered the structural diagrams and operation principles of the optical sensors based on the waveguide structures. The sensors are meant for the measuring the direction and values of the bend and stress in building structures and the intensity of the external electric fields. The sensitivity of the sensors in dependence of the structure of the waveguides as well as the interferometers and microresonators on its base is analyzed. The optimization of the sensitive element parameters depending on the purpose of use is carried out.

Key words: optical sensor, microstructured fiber, ring microresonator, slot waveguide, liquid crystal, effective index, electric field intensity, mode field distribution, Method of Lines.

Постановка проблемы. Оптические волноводные структуры представляют собой перспективные и потенциально привлекательные инструменты для создания информационно-измерительных систем различного назначения. В волоконно-оптических системах измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передающийся по оптоволокну. Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие физические параметры, например: давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, электрическое поле, электрический ток, магнитное поле, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т.д.

Датчики на основе оптических волокон имеют значительные преимущества перед традиционными устройствами [1-2]. Они отличаются высокой механической прочностью, стойкостью к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, отсутствием электромагнитных помех, химической инертностью, позволяют выполнять бесконтактные и дистанционные измерения. Кроме того, волоконно-оптические датчики могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду их абсолютной взрывобезопасности. Сенсоры на основе волокна не подвержены временному дрейфу и потому не требуют перекалибровки. Введение волоконно-оптических сенсоров в структуру сооружений дает возможность отслеживать изменение их состояния в течение длительного времени по большому числу результатов непрерывных измерений, собранных на центральном пункте слежения.

В Университете гражданской защиты МЧС Беларуси проводятся исследования влияния внешних воздействий на спектральные и пространственно-временные характеристики оптического излучения для разработки методов и средств измерения физических величин на основе волноводов и оптических волокон, а также микрокольцевых волноводных резонато-

ров, разработаны алгоритмы и программные продукты для расчета таких структур. На основе результатов исследований предложен ряд конструкций и схемотехнических решений датчиков на основе волноводных и волоконных резонаторов и интерферометров для измерения величины и направления изгибов и деформаций измеряемых объектов, определения внешнего электрического поля. Некоторые из этих структур рассматриваются в данной работе.

Один из недостатков существующих датчиков – отсутствие возможности определять направление изгиба, что важно, например, при использовании датчиков для мониторинга состояния мостов, строительных кранов, лопастей ветровых турбин и т. д. Таким образом, существует необходимость разработки датчиков, которые позволят измерять как величину, так и направление деформаций по всей длине контролируемого объекта с достаточной для практики точностью.

В качестве чувствительного элемента одной из разработанных нами схем векторного датчика изгибов и напряжений использовано микроструктурированное волокно с тремя сердцевинами [3]. Структурная схема датчика представлена на рис. 1.

Микроструктурированное волокно представляет собой направляющую структуру из оптически прозрачного материала с периодической решеткой воздушных отверстий, расположенных по всей длине. Такие волокна сочетают возможности получения сложных микроструктур с относительной простотой их изготовления и работой в одномодовом режиме в более широком спектральном диапазоне, чем обычные волокна. Изменяя диаметр воздушных отверстий, разнесение отверстий, количество слоев воздушных отверстий, расстояния между сердцевинами в микроструктурированных волокнах, можно контролировать свойства оптических волокон (дисперсию, потери, спектральный диапазон одномодового режима работы, числовую апертуру и эффективную площадь моды) и управлять распределением полей мод, тем самым модифицируя характеристики датчика. Три сердцевина соответствуют симметрии гексагональной структуры микроструктурированного волокна и дают возможность по наиболее простому алгоритму производить расчет направления изгиба.

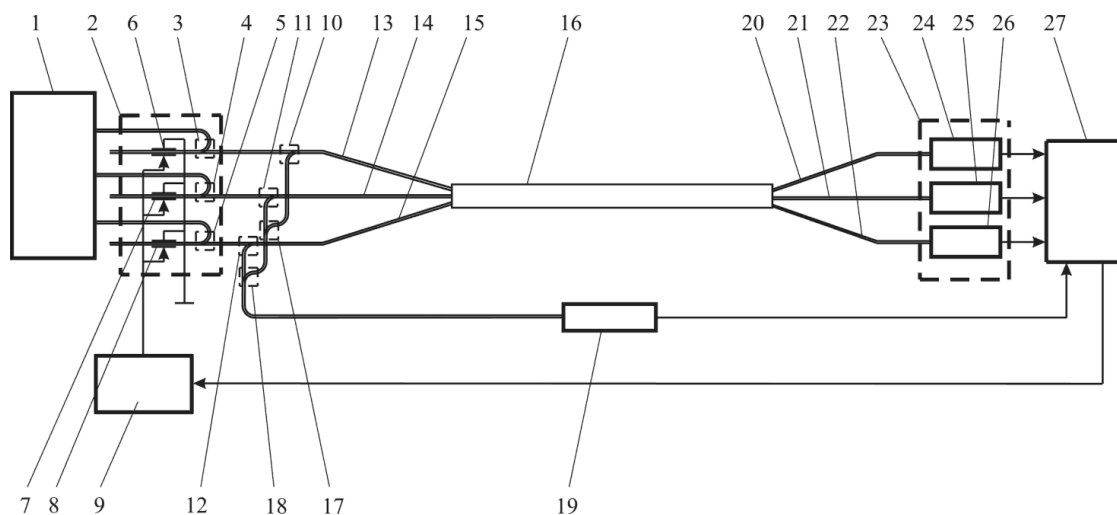


Рисунок 1 – Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов и напряжений

1 – широкополосный источник излучения; 2 – управляемый спектральный фильтр;
3–5, 10–12, 17–18 – Y-образные разветвители; 6–8 – волоконно-оптические брэгговские решетки; 9 – блок управляющего напряжения; 13–15 – входные оптические волокна; 16 – микроструктурированное волокно;
19 – фотоприемник излучения обратного хода; 20–22 – выходные оптические волокна; 23 – блок фотоприемников; 24–26 – фотоприемники; 27 – измеряющее устройство.

Излучение от широкополосного источника одновременно поступает на соответствующие входы сердцевин микроструктурированного оптического волокна. Изгиб микроструктурированного волокна приводит к перераспределению оптической мощности световых мод между сердцевинами (рис.2). Разность между амплитудами мод в различных сердцевинах возрастает пропорционально с уменьшением радиуса изгиба. Причем отношение оптических мощностей, распространяющихся по двум сердцевинам, расположенным на направлении изгиба, определяет его величину, а относительная доля оптической энергии в каждой из трех сердцевин зависит от направления изгиба. Таким образом, по соотношению интенсивностей оптического излучения в трех сердцевинах волокна можно определить как направление, так и величину его изгиба.

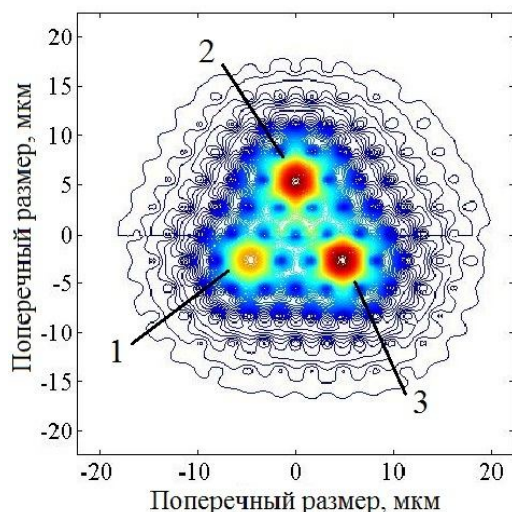


Рисунок 2 – *Контурное изображение распределения интенсивности оптического излучения в сердцевинах изогнутого микроструктурированного волокна (чувствительный элемент датчика)*

1, 2, 3 – *сердцевины микроструктурированного волокна с различными интенсивностями оптического излучения.*

Вторая схема векторного датчика изгибов и напряжений базируется на двух волоконно-оптических интерферометрах [4]. Первый интерферометр образуют несколько оптических волокон соединенных разветвителем (рис. 3).

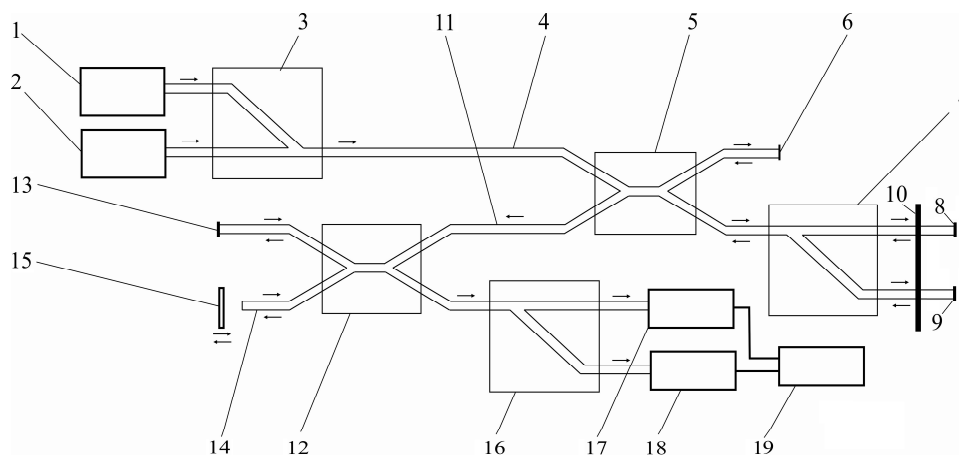


Рисунок 3 – *Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов*

1, 2 – *источник излучения λ_1 и λ_2 ; 3 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель; 4, 11 – подводящее оптическое волокно; 5, 12 – X-образный волоконно-оптический разветвитель; 6 – опорное оптическое волокно; 7, 16 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель с разделением по длинам волн; 8, 9 – измерительное оптическое волокно; 10 – соединительный стержень; 13, 14 – эталонное оптическое волокно; 15 – регулируемая линия задержки; 17, 18 – фотодетектор; 19 – блок обработки сигналов.*

Два волокна (измерительные волокна) жестко соединены с измеряемым объектом и следуют за всеми его деформациями. Еще одно волокно, расположенное в трубке свободно, т.е. таким образом, что любые перемещения измеряемого объекта не вызовут его деформаций, служит в качестве опорного. Возникновение изгибов или напряжений в объекте приводит к изменению оптической длины измерительных волокон и, соответственно, к смещению интерференционной картины суммарного излучения после разветвителя. Для определения направления изгибов используются два измерительных волокна, связанных жестким стержнем друг с другом и измеряемым объектом. Вследствие этого, изгиб измеряемого объекта вызывает изгиб измерительных волокон. При этом радиус изгиба измерительных волокон различен. В зависимости от направления изгиба то или иное волокно изгибается сильнее. В каждое из волокон вводится излучение на различной длине волны. Это позволяет отслеживать изгиб каждого волокна в отдельности.

Интерференционный сигнал на двух длинах волн с выхода первого интерферометра подается на второй волоконный интерферометр с подвижным зеркалом, расположенным в одном из его плеч. Перемещая зеркало можно получить интерференционную картину с центральным и двумя боковыми пиками для каждой из длин волн (рис. 4). Разнесение центрального и одного из боковых пиков соответствует смещению измеряемого объекта. Сравнение расстояний между боковыми пиками на разных длинах волн позволяет определить, какое из измерительных волокон имеет больший радиус изгиба, т.е. определить направление деформации объекта в плоскости его изгиба.

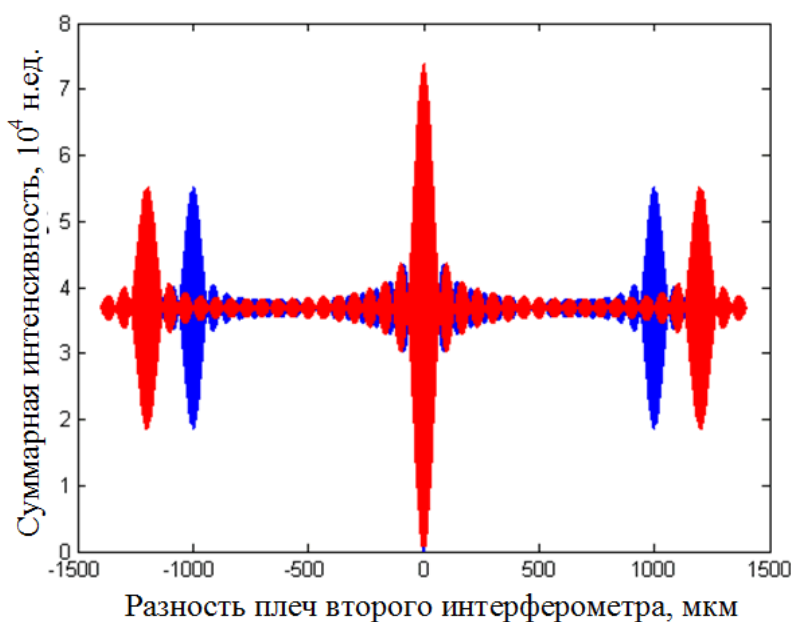


Рисунок 4 – Интерференционная картина на выходе второго интерферометра на двух длинах волн

Прогрессивное развитие технологий промышленности сопровождается как целенаправленной генерацией электростатических полей для технологических процессов, так и побочным их возникновением при работе электротехнического оборудования. Систематическое воздействие на организм человека сверхдопустимых уровней электрического поля отрицательно воздействует на здоровье человека, может привести к необратимым изменениям в организме (функциональное состояние нервной системы, сердечно сосудистой и эндокринной системы и пр.). Не менее важно определение величины напряженности электростатических полей и в других областях – в нефтяной (при перекачке, транспортировке и хранении

нефтепродуктов), в химической, текстильной и электронной промышленности (т.е. там, где возникает вероятность появления электрических зарядов, приводящих к взрыву или пожарам), а также в области изучения атмосферного электричества, в экологии, медицине и др.

В традиционных датчиках электрического поля используются антенны, проводящие электроды или металлические соединения, требующие создания дорогостоящих и громоздких изоляционных устройств на полное рабочее напряжение. В этом отношении перспективными являются электрооптические методы, основанные на преобразовании измеряемых электрических величин в параметры оптического излучения и применении оптических каналов связи для передачи измерительной информации из зоны высокого напряжения на низковольтную часть измерительного устройства. Преимуществами этих методов являются высокое быстродействие, защищенность от электромагнитных помех, а также надежная естественная электрическая изоляция между высоковольтной и вторичной измерительными цепями вследствие их полной электрической развязки [5].

Для измерения напряженности внешних электрических полей разработан датчик (рис. 5) на основе кольцевого микрорезонатора на базе волновода с вертикальной и горизонтальной щелью с заполнением жидким кристаллом (ЖК) [6]. Кольцевой микрорезонатор имеет набор резонансных длин волн. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, поступает в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод поступает излучение узких спектральных диапазонов, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора.

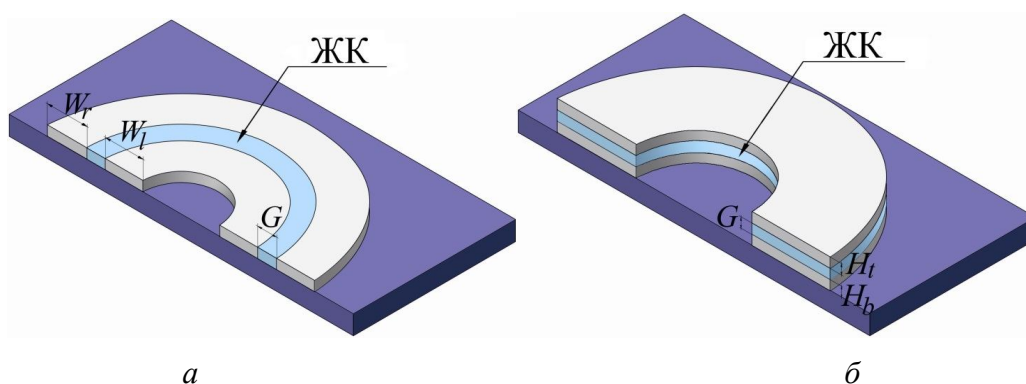


Рисунок 5 – Структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с ЖК заполнением

Если щелевой волновод с ЖК заполнением внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЖК, заполняющего щель, изменится пропорционально величине электрического поля. Это в свою очередь приведет к изменению эффективного показателя преломления щелевого волновода. В результате изменится оптическая длина кольцевого резонатора и сместится его резонансная длина волны. Это приведет к изменению интенсивности выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора (см. рис. 6). Таким образом, измеряя интенсивность выходного оптического сигнала на выходе резонатора, можно определять напряженность электрического поля, воздействующего на резонатор.

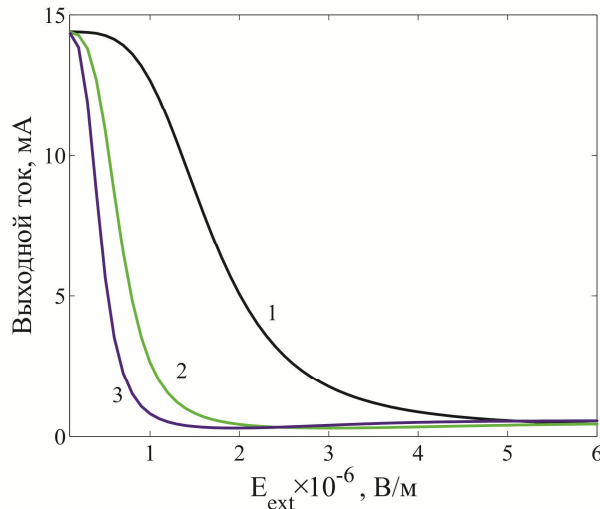


Рисунок 6 – Зависимость сигнала на выходе микрокольцевого резонатора на основе волновода с вертикальной щелью, заполненной жидким кристаллом, от интенсивности внешнего электрического поля

1 – ширина щели 100 нм; 2 – ширина щели 200 нм, 3 – ширина щели 300 нм.

Заключение. В работе рассмотрен ряд конструкций и схемотехнических решений датчиков на основе волноводных и волоконных резонаторов и интерферометров для измерения величины и направления изгибов и деформаций измеряемых объектов, определения напряженности электрического поля. Предложены новые принципы определения направления изгиба: с использованием волокна с тремя сердцевинами, а также с использованием волоконного интерферометра с двумя измерительными волокнами с сигналами на различных длинах волн. Предложен новый принцип определения интенсивности внешних электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов с заполнением жидким кристаллом.

Список литературы:

1. Гуляев, Ю. В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, В. Т. Потапов, Ю. К. Чаморовский // «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – №6. – С. 114–127.
2. Гармаш, В. Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В. Б. Гармаш, Ф. А. Егоров, Л. Н. Коломиец, А. П. Неугодинов, В. И. Поспелов // «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – №6. – С. 128–140.
3. Goncharenko, I. A. Optimization of the structure of an optical vectoral bend and stress sensor based on a three-core microstructured fiber / I. A. Goncharenko, V. N. Ryabtsev, M. Marciniak, A. I. Konoiko // Measurement Techniques. – 2013. – Т.56, №1. – P.65–71.
4. Гончаренко, И. А. Волоконно-оптический векторный датчик изгибов и напряжений на основе интерферометров Майкельсона / И. А. Гончаренко, А. И. Конойко, В. Н. Рябцев, А. В. Ильющонок // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2015. – № 2 (38). – С.45–56.
5. Passaro, V. M. N. Electromagnetic field photonic sensors / V. M. N. Passaro, F. Dell’Olio, F. De Leonardis // Progress in Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 30. – P.45–73.
6. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56. – P.7629–7635.

References:

1. Gulyaev, Yu.V. Volokonno-opticheskie tekhnologii, ustroystva, datchiki i sistemy / Yu.V. Gulyaev, S.A. Nikitov, V.T. Potapov, Yu.K. Chamorovskiy // «Foton-ekspress» – Nauka («Photon-express», Science). – 2005. – №6. – P. 114–127..
2. Garmash, V.B. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii / V.B. Garmash, F.A. Egorov, L.N. Kolomiets, A.P. Neugodnikov, V.I Pospelov // «Foton-ekspress» – Nauka («Photon-express», Science). – 2005. – №6. – P. 128–140.
3. Goncharenko, I.A. Optimization of the structure of an optical vectoral bend and stress sensor based on a three-core microstructured fiber / I.A. Goncharenko, V.N. Ryabtsev, M. Marciniak, A.I. Konoiko // Measurement Techniques. – 2013. – T.56, №1. – P. 65–71.
4. Goncharenko, I.A. Volokonno-opticheskiy vektorny datchik izgibov i napryazheniy na osnove interferometrov Maykel'sona / I.A. Goncharenko, A.I. Konoyko, V.N. Ryabtsev, A.V. Il'yushonok // Chrezvychnyye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya (Emergency situations: prevention and elimination.). – 2015. – № 2 (38). – P. 45–56.
5. Passaro, V.M.N. Electromagnetic field photonic sensors / V.M.N. Passaro, F. Dell'Olio, F. De Leonardis // Progress in Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 30. – P.45–73.
6. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56. – P.7629–7635.

