

©КИИ МЧС РФ

ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

В. Н. РЯБЦЕВ, И. А. ГОНЧАРЕНКО

In the paper the optical sensor allowing measuring a direction, values and localization of bends and stresses in building structures is described. The sensitive element of the sensor is the microstructure fiber with three cores. The use of three-core

fiber makes it possible to define the direction of deformation. Localizing the external action on sensing element is provided by the measurement of backscattered radiation. Distribution of mode fields in fiber cores depending on fiber structure and bend and direction value is analyzed. The optimization of the sensitive element parameters depending on the application is proposed

Ключевые слова: микроструктурированное волокно, волокно с несколькими сердцевинами, оптический датчик, изгиб волокна, распределение полей мод, метод линий

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасного функционирования зданий, мостов, туннелей, дамб, строительных кранов и других сооружений необходимо осуществлять постоянный контроль их состояния, т.е. измерять изгибы, напряжения, деформации, температуру, вибрации, трещинообразование, однородность конструктивных элементов и т.д. Полученная информация о контролируемых параметрах вкпе со значениями температуры позволяет рассчитать осадки фундамента и внутренние напряжения в конструкциях сооружений, получить представление о перемещении элементов конструкций с учетом углов поворота, а также на основе численного моделирования и сопоставления измеренных данных с эталонными сделать вывод о степени безопасности эксплуатации сооружений.

Весьма привлекательными инструментами для контроля строительных и инженерных конструкций различного назначения являются волоконно-оптические информационно-измерительные системы [1-3]. Датчики на основе оптических волокон имеют значительные преимущества перед традиционными устройствами. Они обладают высокой механической прочностью, стойкостью к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, отсутствием электромагнитных помех, они химически инертны, позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения. Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений, можно отслеживать изменение их состояния в течение длительного времени, собирая на центральном пункте слежения большое число непрерывных измерений.

Волоконно-оптические датчики можно условно разделить на три типа: точечные, распределенные и квазираспределенные [1,3-5]. Точечные датчики позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке объекта, как и большинство неволоконных датчиков. Как правило, такие датчики обладают малым размером и высокой точностью измерения. Наиболее часто используют точечные датчики на основе волоконных брэгговских решеток, длиннопериодных решеток и интерферометров. Они могут быть использованы в качестве локальных термометров, тензодатчиков, датчиков давления, акселерометров и т.п.

Бесспорным преимуществом распределенных датчиков является возможность осуществления непрерывного контроля параметров по длине (объему) объекта в любой его точке, где установлен сенсорный световод. Принцип действия таких сенсорных систем основан на анализе изменения параметров по длине волновода и на нелинейных эффектах. Недостатком распределения измеряемого параметра по длине является относительно невысокая точность определения локализации возмущения (несколько метров по длине) и относительно невысокая точность измерения величины. Распределенные сенсорные системы могут быть использованы для контроля больших территорий в качестве датчиков радиации и температуры, позволяют анализировать градиенты температур и т.д.

Измерительные системы на основе квазираспределенных датчиков объединяют преимущества первых двух схем. Квазираспределенный датчик представляет собой массив точечных сенсорных элементов объединенных одним общим волноводом. Каждый элемент обладает своими уникальными характеристиками, что позволяет проанализировать его состояние независимо от других сенсорных элементов. Точность таких систем определяется точностью отдельных датчиков, а массив может объединять более 100 элементов. Сенсорные массивы позволяют проводить мониторинг сложных объектов, инженерных сооружений, мостов, тоннелей, корпусов кораблей и летательных аппаратов, нефтяных скважин и т.п., анализировать градиент распределения температуры, нагрузок, давления, контролировать большое количество точечных объектов.

Однако квазираспределенные датчики все же не позволяют проводить измерения в произвольной точке объекта по всей длине волокна и тем самым полностью распределенные датчики не заменяют. Кроме того, для передачи данных от набора датчиков по одному волокну необходимо использовать системы мультиплексирования сигналов и набор фотоприемников. При этом число сенсорных элементов ограничено числом каналов по длинам волн.

Поэтому практический интерес представляет все же разработка и оптимизация структуры распределенных датчиков для непрерывного измерения контролируемых параметров объекта. Одним из способов повышения точности распределенных датчиков может быть измерение на нескольких длинах волн и последующее усреднение регистрируемого сигнала. При этом волокна должны работать в од-

номодовом режиме для всего используемого диапазона длин волн. Это может быть обеспечено использованием в качестве чувствительного элемента микроструктурированных волокон. Микроструктурированные волокна сочетают возможности получения сложных микроструктур с относительной легкостью их изготовления и могут оперировать в одномодовом режиме в более широком спектральном диапазоне, чем обычные волокна [6,7]. В качестве сенсоров предпочтительнее использовать волокна с двумя и более световедущими сердцевинами [8–12]. Изменяя диаметр воздушных отверстий d , разнесение отверстий Λ , количество слоев воздушных отверстий N , расстояния между сердцевинами в микроструктурированных волокнах, можно контролировать свойства оптических волокон, такие как дисперсия, потери, спектральный диапазон одномодового режима работы, числовая апертура и эффективная площадь моды, и управлять распределением полей мод, тем самым модифицируя характеристики датчика.

Одним из недостатков существующих датчиков является отсутствие возможности определения направления изгиба. Направление изгиба играет важную роль, 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 работе описан векторный датчик изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами. В первой части работы рассмотрены структурная схема и принципы функционирования датчика. Подобный датчик может быть использован как в качестве точного измерителя величины и направления изгибов и смещений строительных конструкций, так и для измерений их внутренних усилий и напряжений. Отсюда возникает необходимость оптимизации параметров сенсорных элементов датчиков в зависимости от их назначения. С этой целью во второй части нами произведен расчет распределения полей мод в сердцевинах волокна и оценка его зависимости от изгибов и структуры волокна.

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАТЧИКА

Структурная схема датчика представлена на рис. 1. Устройство состоит из широкополосного источника излучения в виде матрицы из трех светодиодов, управляемого спектрального фильтра на основе волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР), чувствительного элемента, блока управляющего напряжения, фотоприемника излучения обратного хода, блока фотоприемников и измеряющего устройства. В качестве чувствительного элемента датчика мы предлагаем использовать микроструктурированное волокно с тремя сердцевинами. Три сердцевины соответствуют симметрии гексагональной структуры микроструктурированного волокна и дают возможность по наиболее простому алгоритму производить расчет направления изгиба [11,12].

Свет от широкополосного источника излучения одновременно поступает через подводящие оптически волокна на соответствующие входы сердцевин микроструктурированного оптического волокна. Изгиб микроструктурированного волокна приводит к перераспределению оптической мощности световых мод между сердцевинами [9,10]. Разность между амплитудами мод в различных сердцевинах

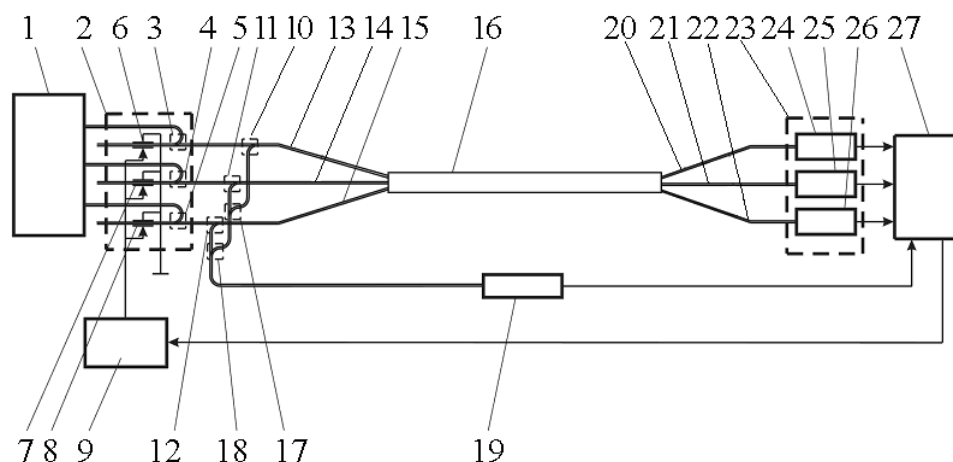


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов и напряжений:

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 – входящие оптические волокна; 16 – микроструктурированное волокно (чувствительный элемент); 19 – фотоприемник излучения обратного хода; 20–22 – выводные оптические волокна; 23 – блок фотоприемников; 24–26 – фотоприемники; 27 – измеряющее устройство.

возрастает с уменьшением радиуса изгиба. Таким образом, сравнивая измеренную мощность в сердцевинах микроструктурированного волокна, можно определить величину радиуса изгиба волокна. Направление изгиба определяется по соотношению амплитуд излучения отдельных диапазонов длин волн в сердцевинах микроструктурированного волокна.

Управляемые волоконно-оптические брэгговские решетки служат для измерения частотных составляющих приходящих на фотоприемники сигналов. Для повышения точности измерения величины и направления изгиба микроструктурированного волокна в каждую его сердцевину можно подавать набор сигналов на разных длинах волн. Причем спектральные диапазоны сигналов для каждой сердцевины различны. При изгибе волокна оптическая мощность на разных длинах волн будет перераспределяться по всем сердцевинам. По команде измеряющего устройства на электроды ВБР подается управляющее напряжение. Под его воздействием происходит изменение показателя преломления в электрооптическом материале, что приводит к изменению длины световой волны, при которой отражение от волоконно-оптических брэгговских решеток максимально (брэгговской длины волны). Вследствие этого, ВБР одновременно отражают излучение с одной и той же длиной волны в обратном направлении. Таким образом, подавая переменное управляющее напряжение на электроды волоконно-оптических брэгговских решеток, можно последовательно сканировать спектр сигнала, приходящего на фотоприемники. Усредняя выходящие из чувствительного элемента сигналы на разных длинах волн, можно определять направление и величину изгиба с большей точностью.

При распространении оптического излучения по микроструктурированному волокну по всей длине волокна возникает обратное излучение. Временная зависимость уровня интенсивности светового потока обратного хода регистрируется фотоприемником излучения обратного хода и позволяет рассчитать местоположение изгиба, т.е. локализацию внешнего воздействия на сенсорный элемент.

2. РАСЧЕТ ПОЛЕ МОД И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКА

Для расчета распределения полей мод и дисперсионных характеристик микроструктурированных волокон с несколькими сердцевинами использовался алгоритм, основанный на методе линий [9,10,13–15].

На базе разработанного алгоритма было рассчитано поперечное распределение полей распространяющихся по волокну мод при различных величинах изгиба, а также различных параметрах волокна (отношения диаметра отверстия d к расстоянию между отверстиями Λ , разнесения сердцевин и т.д.).

Результаты расчетов приведены на рис. 2–4. На рис. 2 представлено контурное изображение распределения интенсивности оптического излучения с длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм в сердцевине изогнутого микроструктурированного волокна с разнесением сердцевин в два отверстия, $d/\Lambda = 0,2$ и $\Lambda = 3,2$ нм. Радиус изгиба волокна $R = 10$ см.

Как следует из рисунка, при изгибе волокна происходит перераспределение энергии моды между сердцевинами. Причем отношение оптических мощностей, распространяющихся по двум сердцевинам, определяет величину изгиба, а относительная доля оптической энергии в каждой из трех сердце-

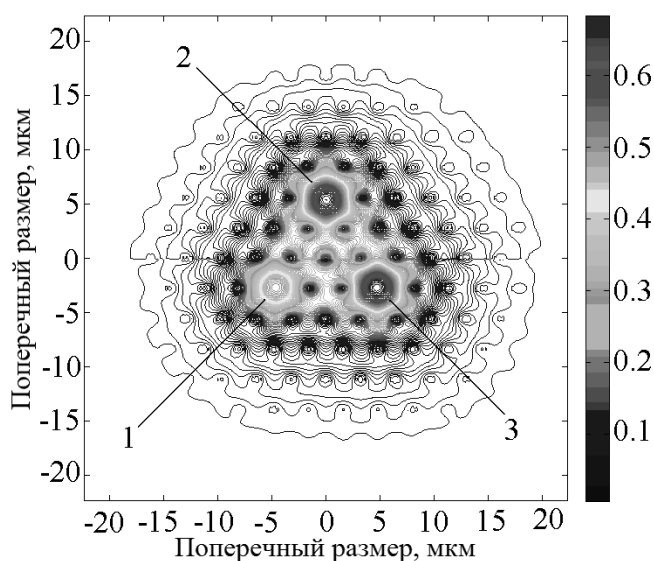


Рис. 1. Поперечное распределение интенсивности оптического излучения в сердцевине микроструктурированного волокна с радиусом изгиба $R = 10$ см и разнесением сердцевин в два отверстия, $d/\Lambda = 0,2$, $\Lambda = 3,2$ мкм для длины волны $\lambda = 1,5$ мкм

вин зависит от направления изгиба. Таким образом, по соотношению интенсивностей оптического излучения в трех сердцевинах волокна можно определить как направление, так и величину его изгиба. Например, на рис. 2 направление изгиба соответствует линии, соединяющей сердцевин 1 и 3, и перераспределение оптической энергии вследствие изгиба происходит в основном между этими сердцевинами. При изменении направления изгиба на 60° перераспределение энергии происходит в основном между сердцевинами 1 и 2 и т.д.

На рис. 3 приведены максимальные значения амплитуд полей мод в сердцевинах 1 и 3 волокна, расположенных на оси изгиба, нормированных на амплитуду моды в сердцевине 2. Номера сердцевин показаны на рис. 2, длина волны оптического излучения $\lambda = 1,5$ мкм. Кривые 1 и 2 описывают соответственно распределение мод в 1 и 3 сердцевинах волокна с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением сердцевин в два отверстия, кривые 3 и 4 – в сердцевинах волокна $d/\Lambda = 0,4$, разнесением в два отверстия, 5 и 6 – в волокнах с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением в пять отверстий. Для всех кривых расстояние между отверстиями в волокне составляет $\Lambda = 3,2$ мкм. Кривые 7 и 8 представляют соответственно амплитуды мод в сердцевинах 1 и 3 оптического волокна с разнесением сердцевин в два отверстия, $\Lambda = 1,6$ мкм; кривые 9, 10 относятся к волокну с $\Lambda = 4,8$ мкм. При этом отношение $d/\Lambda = 0,2$. На рис. 4 показаны относительные амплитуды полей в правой и левой по отношению к изгибу сердцевинах для волокон с разнесением сердцевин в два отверстия, $\Lambda = 1,6$ мкм и $d/\Lambda = 0,2$ (кривая 1); $\Lambda = 3,2$ мкм, $d/\Lambda = 0,2$ (2); $\Lambda = 4,8$ мкм, $d/\Lambda = 0,2$ (3); $\Lambda = 3,2$ мкм, $d/\Lambda = 0,4$ (4) и разнесением сердцевин в пять отверстий для $\Lambda = 3,2$ мкм и $d/\Lambda = 0,2$ (5) для длины волны $\lambda = 1,5$ мкм. Кривая 6 построена для параметров, аналогичных кривой 2, но для длины волны $\lambda = 1,3$ мкм.

Как следует из рисунков, волокна с большим отношением диаметров воздушных отверстий d к расстоянию между отверстиями Λ , т.е. с большим воздушным заполнением, а также волокна с большим разнесением сердцевин оказываются более чувствительными к изгибам. В таких волокнах поля мод сильнее сконцентрированы в отдельных сердцевинах, и любое нарушение стационарных условий приводит к значительной перекачке энергии из одной сердцевины в другую. В волокнах с меньшими величинами d/Λ , Λ или меньшим разнесением сердцевин поля мод в различных сердцевинах сильнее взаимодействуют друг с другом, и такая конфигурация оказывается более устойчивой к внешним воздействиям. Так для волокон с $d/\Lambda = 0,2$ и разнесением сердцевин в два отверстия заметная перекачка оптической мощности между сердцевинами происходит при радиусах изгиба порядка 500 см, а при увеличении разнесения сердцевин до пяти отверстий – при R меньших 900 см. Резкое увеличение концентрации мощности в одной сердцевине, которая уже непригодна для измерения, и сопутствующие этому большие потери на излучение наступают для таких волокон при радиусах изгиба соответственно около 1,5 и 10 см. Для волокон с Λ равным 1,6 и 4,8 мкм заметное увеличение перекачки мощности мод между сердцевинами происходит при радиусах изгиба 300 и 600 см соответственно. Резкое увеличение концентрации мощности в одной сердцевине возникает при радиусах изгибов соответственно около 1 и 15 см.

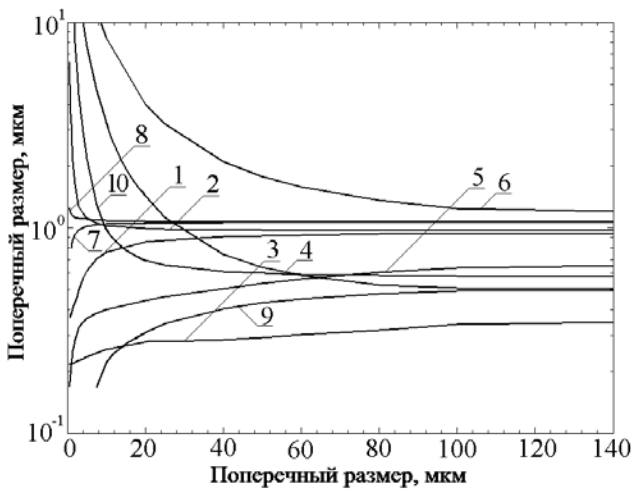


Рис. 3. Максимальные значения амплитуд полей мод в сердцевинах волокна, расположенных на оси изгиба при различных величинах разнесения сердцевин, отношения d/Λ и расстояния между отверстиями Λ для длины волны $\lambda = 1,5$ мкм

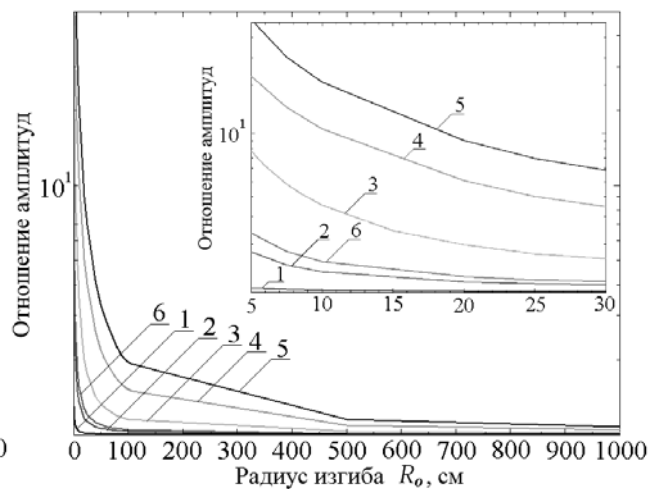


Рис. 4. Зависимость относительных амплитуд полей мод в сердцевинах волокна расположенных на оси изгиба

Уменьшение длины волны оптического излучения λ также приводит к увеличению чувствительности датчика. Но, поскольку изменение λ возможно лишь в ограниченном диапазоне, то таким образом можно только незначительно увеличить перекачку мощности мод из одной сердцевинки в другую при изгибе волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена структура и принципы функционирования распределенного оптического векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна с тремя сердцевинками. Датчик имеет более высокую точность по сравнению с существующими распределенными датчиками. Это достигается измерением на нескольких длинах волн и последующим усреднением регистрируемого сигнала, что обеспечивается применением в качестве чувствительного элемента микроструктурированного волокна, имеющего широкий спектральный диапазон одномодового режима работы. Использование волокна с тремя сердцевинками дает возможность определения направления деформаций, а измерение обратного рассеяния – определения их локализации по длине волокна.

Проведена оптимизация чувствительного элемента на основе численных расчетов параметров и распределения полей мод по сердцевинкам микроструктурированного волокна в зависимости от его структуры и величины изгиба. Показано, что волоконно-оптические датчики, сенсорным элементом которых служит волокно с малым разнесением сердцевин и малым воздушным заполнением (малым d/Λ), обладают большим диапазоном измерения величины изгиба, и их предпочтительнее использовать для измерения деформаций гибких конструкций. Например, волокна с $d/\Lambda = 0.2$, $\Lambda = 3.2$ мкм и разнесением сердцевин в два отверстия позволяют производить измерения изгибов с радиусом вплоть до $R = 3$ см. Волокна с большим значением d/Λ и/или большим разнесением сердцевин более чувствительны к изгибу и обеспечивают большую точность измерения. Поэтому их целесообразнее использовать для измерения малых изгибов и отклонений жестких строительных конструкций, т.е. тех эффектов, которые вызывают внутренние напряжения в таких элементах и могут приводить к их разрушениям. Например, волокна с $d/\Lambda = 0.4$ позволяют измерять изгибы, начиная с $R = 800$ см.

Следует иметь в виду, что значительное увеличение разнесения сердцевин волокна или воздушно-го заполнения фотонно-кристаллической оболочки приведет к тому, что сердцевинки окажутся полностью изолированными друг от друга, моды такой структуры будут соответствовать модам отдельных волокон, и перекачка оптической мощности между сердцевинками будет отсутствовать. Следовательно, такие волокна не позволяют проводить измерения направления изгиба.

Небольшую корректировку параметров чувствительного элемента датчика можно проводить, меняя диапазон длин волн оптического излучения.

При установке волокна на поверхность контролируемого объекта следует обращать внимание на его регулярную укладку. Это необходимо для того, чтобы избежать скручивания волокна, что может привести к неправильному определению направления изгиба.

Литература

1. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов В.Т., Чаморовский Ю.К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы // «Фотон-экспресс» – Наука. 2005. №6. С. 114–127.
2. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодинов А.П., Поспелов В.И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // «Фотон-экспресс» – Наука. 2005. №6. С. 128–140.
3. Connolly C. Structural monitoring with fibre optics // Europhotonics. 2009. No.2-3. P.16–18.
4. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Москва: Техносфера, 2008. 520 с.
5. Inaudi D., A. del Grosso. Fiber optic sensors for structural control // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008. Beijing, China. No. S 25-013.
6. Broeng J., Mogilevtsev D., Barkou S.E., Bjarklev A. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides // Optical Fiber Technology. 1999. Vol.5. No.3. P.305-330.
7. Russell P.St.J. Photonic-crystal fibers // J. Lightwave Technology. 2006. Vol.24. No.12. P.4729-4749.
8. Rothwell J.H., Flavin D.A., MacPherson W.N., Jones J.D.C., Knight J.C., Russell P.St.J. Photonic sensing based on variation of propagation properties of photonic crystal fibres // Optics Express. 2006. Vol. 14. No. 25. P. 12445-12450.
9. Гончаренко И.А. Излучение и потери на изгибе в микроструктурированных волокнах с несколькими сердцевинками // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2006. №3. С.91-98.
10. Goncharenko I.A., Marciniak M. Analysis of propagation of orthogonally polarized supermode in straight and curved multicore microstructured fibres // J. Telecommunications and Information Technology. 2007. No.4. P.63–69.
11. Burnett J.G., Blanchard P.M., Greenaway A.H. Optical fibre-based vectorial shape sensor // Strain. 2000. Vol. 36, No. 3. P. 127-133.
12. Blanchard P.M., Burnett J.G., Erry G.R.G. et al. Two-dimensional bend sensing with a single, multi-core optical fibre // Smart Material Structures. 2000. No. 9. P. 132–140.

13. Pregla R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends // J. Lightwave Technol. 14. 1996. P. 634–639.
14. Helfert S.F., Pregla R. The method of lines: a versatile tool for the analysis of waveguide structures // Electromagnetics. 2002. Vol. 22. P. 615-637.
15. Goncharenko I.A., Helfert S.F., Pregla R. Radiation loss and mode field distribution in curved holey fibers // Intern. J. Electronics and Communications (AEÜ). 2005. Vol.59. № 3. P. 185-191.