

УДК 621.373.826:315.61 004.056.53

И.В. Денисов, Я.А. Ларин

Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Российская Федерация

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА МНОГОМОДОВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

В работе представлены результаты модельного и экспериментального поиска оптимальной конфигурации чувствительного элемента на основе волоконно-оптического многомодового интерферометра с межмодовой интерференцией в фазово-амплитудном фильтре. Приведены результаты моделирования, на их основании выбраны комбинации многомодовых волоконных световодов с одномодовыми, наиболее подходящими для построения чувствительной части. Проведены лабораторные испытания выбранных конфигураций. Выработаны требования к необходимым компонентам. Получены динамические характеристики чувствительных элементов в зависимости от варьируемых параметров при различных способах сварки волоконных световодов.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, волоконный световод, межмодовая интерференция, многомодовый интерферометр.

I.V. Denisov, Y.A. Larin

I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

OPTIMAL FIBER-OPTICAL SENSING ELEMENT SELECTION ON MULTIMODE INTERFEROMETER

The paper presents the results of model and experimental search for optimal configuration of sensing element based on fiber-optical multimode interferometer with intermode interference in the phase-amplitude filter. Simulation results are presented. Based on them, combinations of multimode fiber light guides with single-mode ones are selected, the most suitable for constructing the sensitive part. Laboratory tests of the selected configurations were carried out. The requirements for the necessary components have been developed. The dynamic characteristics of the sensing elements are obtained depending on the variable parameters for different methods of welding fiber light guides.

Keywords: optical fiber, fiber-optical sensor, intermodal interferential, multimode interferometer.

Актуальность темы

Развитие технологий волоконной оптики дает постоянные импульсы и для развития технических средств на их основе. В полной мере это относится к средствам охраны, чувствительные элементы (ЧЭ) которых построены на основе волоконно-оптических кабелей (ВОК). Соответствующие технические средства имеют широкий диапазон

измеряемых величин, высокую точность измерений, являются протяженными, невосприимчивыми к внешнему электромагнитному излучению и взрыво- пожаробезопасными.

Существуют различные методы регистрации физических воздействий при помощи ВОК, основными из которых являются рефлектометрические и интерферометрические.

К числу последних относится межмодовая интерферометрия в волоконных световодах (ВС). Такие датчики чувствительны к изменению оптического пути мод в ВС, которые происходят в результате соответствующих внешних физических воздействий на ЧЭ контролируемой зоны, содержащие эти ВС. В качестве ЧЭ используется ВС, в котором распространяется малое количество мод, но больше одной. Применение маломодовых интерферометров в качестве ЧЭ для регистрации внешних физических полей достаточно хорошо описано [1]. В работе [2] подробно описан принцип действия такого ЧЭ с использованием в качестве чувствительной части двухмодового ВС. При этом ключевую роль играет разность фаз на выходном торце подводящего ВС и угол, под которым моды приходят на торец ОВС. Эффекты в многомодовых интерферометрах также хорошо описаны с точки зрения физики [3]. Однако примеров применения многомодовых ВС (МВС) в качестве ЧЭ для контроля внешних деформационных полей представлено недостаточно.

Поэтому приложение опыта разработки маломодовых интерферометров на теорию многомодовой интерферометрии со стандартными телекоммуникационными МВС для конфигурирования ЧЭ контролируемых зон актуально и явилось предметом рассмотрения в настоящей статье.

1. Конфигурация волоконно-оптического чувствительного элемента на многомодовом интерферометре

Ввод когерентного излучения в МВС и модовая перекачка энергии из МВС в выходной одномодовый волоконный световод (ОВС) формируют волоконно-оптический многомодовый интерферометр (ВОМИ). По своей сути они представляют собой волоконно-оптические фазово-амплитудные фильтры (ВОФАФ) из сварного соединения МВС, являющегося ЧЭ длиной $l_{чэ}$, с ОВС, выполняющим функцию приемника фильтра и отводящего световода длиной $l_{ос}$ (рис. 1).

На выходе МВС поля мод различного порядка складываются. Между ними возникают дополнительная разность фаз и соответствующее изменение длины оптического пути вследствие деформации ВС от внешнего физического воздействия [4]. В результате меняется интерференционное распределение оптического излучения в плоскости границы ОВС – начало сварного соединения волокон (ССВ). В свою очередь, ССВ толщиной x перераспределяет излучение в ВОФАФ на выходной плоскости «ССВ – ОВС» и является вторичным источником возбуждения мод для ОВС.

Таким образом, МВС можно считать как диффузный источник излучения для ОВС. Тогда мощность моды, возбуждаемой в ОВС, будет равна [5]:

$$P_{om} = 2\pi \int_0^{\theta_m} P_j(\theta) \sin\theta d\theta, \quad (1)$$

где $P_j(\theta)$ – часть мощности, возбуждаемой в моде пучком, распространяющимся под углом θ к оси ВС; θ_m – критический угол.

В случае рассматриваемого ВОФАФ при перекачке оптического излучения из МВС в ОВС часть мод LP_{nj} будет рассеиваться в оболочке ОВС. Это будут моды, находящиеся за пределами диаметра модового поля ОВС, а также моды, находящиеся в пределах диаметра модового поля (Mode Field Diameter – MFD), но угол распространения которых превышает θ_m . Отсюда понятно, что только направленные осевые моды будут возбуждать фундаментальную моду ОВС LP'_{01} . При этом, ввиду большого количества мод (около 100), распространяемых в МВС, ключевую роль будет играть не фазовая составляющая, а общая мощность направляемых мод, участвующих в формировании моды в ОВС на выходном торце МВС [5]:

$$P_{mm} = \sum_{j=1}^M P_j, \quad (2)$$

где M – количество направляемых мод в МВС; P_j – мощность, переносимая в j -й моде с учетом физических воздействий на ВС (включая изменение оптического пути).

Таким образом, видно, что для анализа и модельного представления элементов волоконно-оптического ЧЭ на многомодовом интерферометре с целью выбора оптимальной конфигурации достаточно оперировать мощностными характеристиками. Это особо привлекательно

тем, что при экспериментальной проверке достаточно использовать измеритель оптической мощности и фотодиодные приемники. В пользу этого также говорит то, что фазовая модуляция излучения интерферирующих мод на выходе не может быть непосредственно зафиксирована обычными фоторегистрирующими устройствами, поэтому для определения количественных величин происходящих перекачек энергии между модами излучений требуется дополнительное её преобразование в амплитудную.

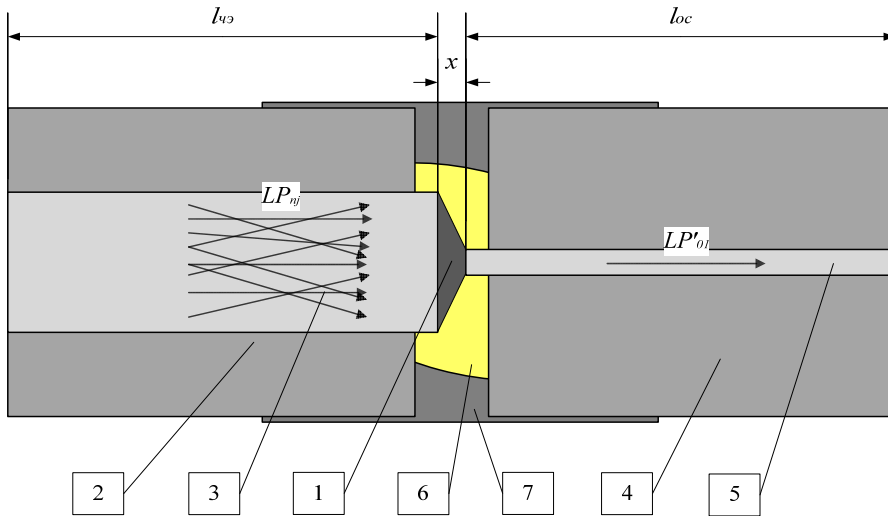


Рис. 1. Волоконно-оптический фильтр фазовой демодуляции света: 1 – сварное соединение толщиной x ; 2 и 3 – оболочка и сердцевина МВС соответственно; 4, 5 – оболочка и сердцевина ОВС соответственно; 6 – эпоксидный клей; 7 – защитная оболочка; LP_{nj} – моды, распространяющиеся в МВС; LP'_{01} – мода, получаемая в ОВС; $l_{чэ}$ – длина подводящего ВС (чувствительного элемента); l_{oc} – длина отводящего световода (ОВС)

В связи с тем, что при возбуждении моды в ОВС будут участвовать только те из них, которые находятся в пределах MFD ОВС и угол распространения которых не превышает θ_m , необходимо ввести коэффициент прохождения мод. Его можно представить как произведение соответствующих коэффициентов прохождения на границах «МВС-ВСС» – T_1 , «ВСС-ОВС» – T_2 и в ВОФАФ – T_ϕ :

$$Y = T_1 \cdot T_2 \cdot T_\phi = \left(\frac{P_\phi^1}{P_1} \right)^2 \cdot \frac{P_2}{P_\phi^2} \cdot e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где P_1 – мощность направляемых мод на выходном торце МВС; P_2 – мощность мод, возбуждающих ОВС; P_{ϕ}^1 – мощность оптического излучения, вошедшая из МВС в ВОФАФ; P_{ϕ}^2 – мощность оптического излучения, вышедшая из ВОФАФ; α – коэффициент затухания в диффузном ВОФАФ. С учетом максимальности T_1 и малости показателя экспоненты выходит, что Y определяется мощностями коэффициента T_2 .

2. Модельная оптимизация конфигурации чувствительного элемента

С целью выработки оптимальных решений по элементам конфигурации рассматриваемого ЧЭ необходимо из стандартной телекоммуникационной волоконно-оптической элементной базы выделить наиболее подходящие. Для этого необходимо:

- проанализировать те характеристики ВС стандартов МСЭ-Т, которые влияют, с одной стороны, на чувствительность ЧЭ, а с другой – на возбуждение мод;

- учесть особенности распространения мод и распределения мощности в них;

- выбрать тип сварки ВОФАФ с максимальной линейностью и крутизной.

Исходя из практики [6], волоконно-оптический ЧЭ на разных участках будет иметь разную чувствительность. При этом стоит заметить, что найти максимум или минимум передаточной функции практически очень проблематично, вследствие чего оптическая мощность на выходе такого ЧЭ при физическом воздействии на него может как возрастать, так и уменьшаться. Важнейшую роль здесь будет играть MFD ОВС (чем он меньше, тем выше его чувствительность), а также способ сварки МВС с ОВС. Кроме того, при построении такого ЧЭ необходимо учитывать, что чрезмерная чувствительность отрицательно влияет на стабильность его работы.

Очевидно, что для удовлетворения этим требованиям необходимо использовать те МВС, в которых при распространении по ним оптического излучения гарантированно возбуждается много мод, а потери на макроизгибах достаточно велики. ОВС, в свою очередь, для исключения искажений получаемого сигнала от объекта обнаружения необходимо обеспечивать распространение только одной моды с минимальными

потерями на макроизгибах. Вместе с тем такие ВС должны обладать приемлемой стоимостью, доступностью и быть надежными в эксплуатации. По последней причине специализированные ВС в работе не рассматриваются.

Рассмотрим классификацию ВС различных стандартов в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т*, которая приведена в работе [7], проанализировав необходимые для работы параметры и выделив MFD (таблица).

Классификация ВС

№ п/п	Наименование категории ВС	Описание
1	G.651.1	50 мкм с градиентным профилем показателя преломления. Применяется для широкополосного доступа в сетях зданий.
2	G.652 (A, B, C, D)	8,6 – 9,5 мкм на длину волны 1310 нм со ступенчатым профилем показателя преломления и несмещенной дисперсией. Используется в LAN и MAN, сети доступа и передачи данных при мультиплексировании CWDM.
3	G.653 (A, B)	7,8 – 8,5 мкм с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в область 1550 нм и со специально заданным распределением показателя преломления. Применяется в системах передачи данных на большие расстояния с использованием волоконно-оптических усилителей на основе эрбия (EDFA).
4	G.654 (A, B, C, D, E)	9,5 – 15 мкм с длиной волны нулевой дисперсии около 1310 нм и со смещением отсечки в 1550 нм. Используется в подводных системах передачи данных на большие расстояния с более высокой пропускной способностью.
5	G.655 (A, B, C, D, E)	8 – 11 мкм, с ненулевой смещенной дисперсией, оптимизировано для 1530-1565 нм с поддержкой до 1652 и 1460 нм. Применяется в системах дальней связи, использующих плотную передачу данных (DWDM).
6	G.656	7,0 – 11,0 мкм с ненулевой дисперсией и положительным коэффициентом хроматической дисперсии в диапазоне длин волн 1460-1625 нм. Используется в системах дальней связи, использующих передачу CWDM и DWDM в указанном диапазоне длин волн.
7	G.657 (A1, A2, B2, B3)	8,6 – 9,2 мкм с уменьшенными потерями при малых радиусах изгиба. Применяются в волоконно-оптических сетях до границ жилой площади (FTTH).

*Примечание. В таблице применены следующие сокращения: локальные сети – Local Area Network (LAN); городская вычислительная сеть – Metropolitan Area Network (MAN); системы с разносом более 2,5 ТГц – Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM); волоконно-оптический усилитель на основе эрбия – Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA); плотное волновое мультиплексирование – Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM); волоконно-оптические сети – Fiber To The Home (FTTH).

Из приведенных стандартов МВС является только G.651.1, а остальные стандарты относятся в ОВС. Однако, с учетом специфики применения, различные условно ОВС можно возбудить в маломодовом режиме, что дает возможность исследовать возможность их применения в качестве МВС.

В статье [8] приведен анализ современных ВС на предмет формирования у них вытекающих мод при изгибах. Пересечение множеств этих стандартов с учетом верхнего исключающего множества окончательно определяет следующие 5 стандартов, которые, вероятно, по своим характеристикам позволяют их использовать в качестве волоконно-оптических изгибных датчиков: G.651.1; G.654.D; G.655.(A, B); G.656. Для использования в качестве ОВС подходят следующие пять стандартов: G.652.D; G.657.(A1, A2, B2, B3). Из перечисленных стандартов с учетом доступности их приобретения были выделены следующие ВОФАФ, целесообразные для проведения дальнейших исследований: «МВС 62,5/125 – ОВС G.657.A1»; «МВС 50/125 – ОВС G.657.A1»; «МВС 62,5 – ОВС G.652.D»; «МВС 50 – ОВС G.652.D». Впоследствии после первых экспериментов стандарт G.652.D был убран ввиду экспериментальных подтверждений схожести его ключевых параметров со стандартом G.657.A1 и отсутствия существенной разницы в результатах.

3. Результаты экспериментов

Для тестирования различных типов ВОФАФ и определения их динамических характеристик была собрана экспериментальная установка (рис. 2), состоящая из подсистемы излучения, ЧЭ и измерителя оптической мощности.

Главным элементом подсистемы излучения являлись лазерные диоды (ЛД) с распределенной обратной связью (РОС-лазер или DFB-laser) на длину волны $\lambda = 1310$ и 1550 нм, интегрированные с МВС. Для обеспечения их управления и стабильной работы использовались драйверы управления и температуры Wavelength «LDTC 2-2 O», работающие совместно с держателем ЛД типа Wavelength «LDMOUNT-5A». Питание подсистемы излучения обеспечивал лабораторный источник питания Dazheng «PS-305D». ЧЭ состоял из ВОФАФ, МВС которого укладывались на плоскую поверхность с жестко закрепленной на ней упруго деформирующейся подложкой толщиной 3 мм. Для моделирования работы ЧЭ в грунте число подложек варьировалось от 1 до 10. На МВС

оказывалось единичное физическое воздействие различной массы в определенных местах. Реакция на физическое воздействие фиксировалась при помощи измерителя оптической мощности «KIWI-4350N» на соответствующей длине волны.

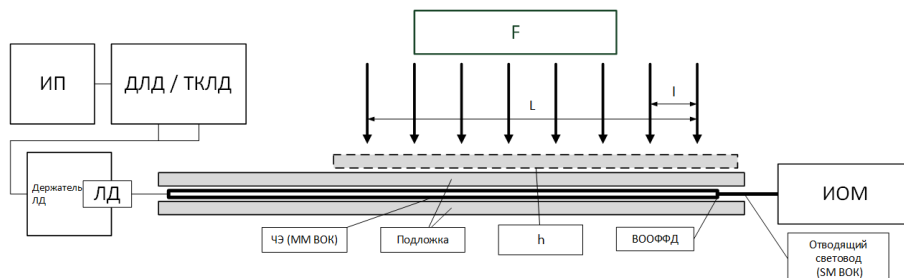


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: ИП – лабораторный источник питания; ЛД – лазерный диод; ДЛД – драйвер лазерного диода; ТКЛД – контроллер температуры ЛД; F – механическое воздействие на ЧЭ; ИОМ – измеритель оптической мощности; ЧЭ – чувствительный элемент; L – протяженность ЧЭ; l – расстояние между местами воздействия на ЧЭ; h – толщина подстиляющей поверхности

Лабораторные исследования проводились в сухом помещении при относительной влажности воздуха 25–30 % и температуре 22–25 °С. В результате проведенных экспериментов были определены динамические характеристики полученных ВОФАФ в зависимости от величины (массы груза от 2 до 30 кг) и точки воздействия (расстояния от фильтра 0,5–4 м), а также условий воздействий (количество подложек, уложенных на МВС, имитирующих глубину залегания ЧЭ).

На первом этапе были получены передаточные характеристики ЧЭ при различном физическом воздействии на МВС (рис. 3).

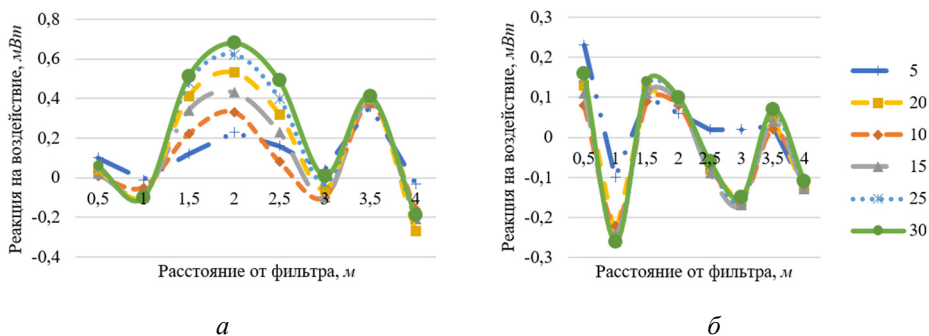


Рис. 3. Передаточная характеристика ЧЭ на основе ВОФАФ: «МВС G.651.1 (50/125) – ОВС G.657.A1 (9/125)» на длине волны 1550 нм: а – при использовании одной подложки; б – при использовании трех подложек

Полученные характеристики подтвердили предположение, что разные участки ЧЭ имеют разную чувствительность, так как на разных участках МВС внешнее воздействие приводит к разному составу модовых групп [3]. Кроме того, при увеличении физического воздействия на ЧЭ не на всех участках происходит увеличение реакции. Так, например, на расстоянии 0,5 м от фильтра максимальные значения достигаются при воздействии массой 5 кг, а на расстоянии 3 м – при воздействии массой 15 кг с одной подложкой и 20 кг с тремя подложками. По-видимому, это связано с перегибами функции возбуждения моды в ОВС [5].

Полученные изменения периодичности и амплитуды для разных мест и количества подложек в дальнейшем будут учтены при конструировании ЧЭ и разработке схем укладок на местности.

Из выбранных вариантов построения ВОФАФ на основе полученных результатов определен наиболее предпочтительный для построения ЧЭ фильтр на МВС с диаметром сердцевины 50 мкм (G.651.1), сваренный с ОВС (G.657.A1), работающий на длине волны 1550 нм. Из полученного рис. 4, а видно, что такой ЧЭ имеет лучший динамический диапазон при различной величине воздействия и наиболее стабильные характеристики (рис. 4, б).

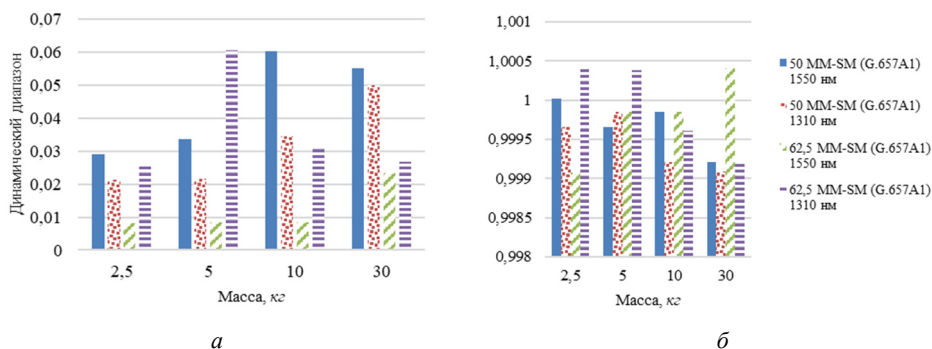


Рис. 4. Динамический диапазон чувствительности (а) и среднее отклонение от значения в состоянии покоя (б) для различных ВОФАФ в зависимости от внешних воздействий с учетом реакции на восстановление после воздействия

Все исследования, указанные выше, проводились при четырех различных способах сварки ВС: «Прямая» сварка, сварка «Бочка», сварка «Перетяжка»; сварка «Со смещением». На рис. 5 представлены результаты исследований динамических характеристик от типа сварки и количества подложек. Сварка «Перетяжка» хотя и показала больший

динамический диапазон, но оказалась технологически не воспроизводимой и ломкой. Поэтому наилучшей с точки зрения надежности и высокого динамического диапазона выбрана сварка первого типа «Прямая».

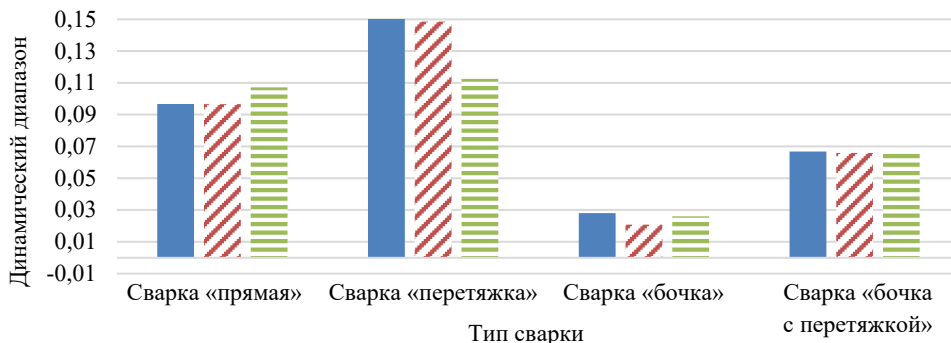


Рис. 5. Динамический диапазон коэффициента передачи от типа сварки и количества подложек: ■ 1 подложка; ▨ 2 подложки; ≡ 3 подложки

Выводы

Исходя из вышеизложенного, ЧЭ на основе ВОФАФ, в отличие от других схем, будет иметь достаточно простую и надежную конструкцию линейной части, которая позволяет применять стандартную телекоммуникационную аппаратуру. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что ключевую роль в формировании получаемого сигнала и увеличении чувствительности ЧЭ играет MFD отводящего ВС. При этом наибольшую чувствительность имеет тип сварки способом «Перетяжка». Теоретически он обладает высокой чувствительностью, изменяемым пространственным разрешением, произвольной конфигурацией укладки на местности, построен на доступном оборудовании и, соответственно, имеет низкую удельную стоимость единицы контролируемого участка.

Получаемый ЧЭ на основе ВОФАФ перспективен для построения различных технических средств контроля относительно протяженных объектов и мониторинга физических полей деформаций, сдвига и кручения. Вид укладки ЧЭ зависит от специфики решаемой задачи и требует дополнительных научных исследований.

Список литературы

1. Кульчин Ю.Н. Распределённые волоконно-оптические измерительные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
2. Denisov I.V., Rybalchenko N.A., Sedov V.A. Fiber-optical phase sensitive surface // *Laser Sensing, Imaging, and Information Technologies. Proc. SPIE*, 2006. – Vol. 6162. – P. 127–136.
3. Котов, И.О., Ликумович Л.Б., Хадеев И.И. Операторный метод расчета модового распределения мощности в многомодовом волокне с резкими неоднородностями // *НТ ведомости СПбГПУ*. – 2008. – № 6. – С. 191–197.
4. Бусурин В.И., Семенов А.С., Удалов Н.П. Оптические и волоконно-оптические датчики // *Квантовая электроника*. – 1985. – Т. 12, № 5. – С. 901–944.
5. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
6. Обоснование оптимальной конфигурации волоконно-оптического фазово-амплитудного протяженного чувствительного элемента / И.В. Денисов, Я.А. Ларин [и др.] // *Радиотехника*. – 2023. – Т. 87, № 2. – С. 53–59.
7. Денисов И.В., Лисовский Н.В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов // *Прикладная фотоника*. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 131–148.
8. Расчет параметров макроизгибного отвода оптического излучения из волоконных световодов / И.В. Денисов, Н.В. Лисовский [и др.] // *Радиотехника*. – 2021. – Т. 85, № 2. – С. 18–26.

References

1. Kulchin U.N. *Raspredelelnyye volokonno-opticheskie izmeritel'nye seti*. Moscow: Fizmatlit, 2001, 272 p.
2. Denisov I.V., Rybalchenko N.A., Sedov V.A. Fiber-optical phase sensitive surface. *International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2005: Laser Sensing, Imaging, and Information Technologies. Proc. SPIE*, 2006, vol. 6162, p. 61620F.
3. Kotov I.O., Liokumovich L.B., Khadeev I.I. Operatornyi metod rascheta modovogo raspredeleniia moshchnosti v mnogomodovom volokne s rezkimi neodnorodnostiami [Operator method for calculating mode power

distribution in multimode fiber with sharp inhomogeneities]. *Computing, Telecommunication and Control*, 2008, vol. 6, no. 69, pp. 191-197.

4. Busurin V.I., Semenov A.S., Udalov N.P. Opticheskie i volokonno-opticheskie datchiki [Optical and fiber optic sensors]. *Kvantovaya elektronika*, 1985, vol. 12, № 5, pp. 901-944.

5. Snaider A., Lav Dzh. Teoriia opticheskikh volnovodov. Moscow: Radio i sviaz', 1987, 656 p.

6. Denisov I.V., Larin Y.A. et al. Obosnovanie optimal'noi konfiguratsii volokonno-opticheskogo fazovo-amplitudnogo protiazhennogo chuvstvitel'nogo elementa [Justification of the optimal configuration of fiber-optical phase-amplitude distributed sensitive element]. *Radioengineering*, 2023, vol. 87, no. 2, pp. 53-59.

7. Denisov I.V., Lisovsky N.V. Sistematizatsiia chuvstvitel'nykh k izgibu volokonnykh svetovodov [The systematization of bending-sensitive fiber light guides]. *Applied Photonics*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 131-148.

8. Denisov I.V., Lisovsky N.V. et al. Raschet parametrov makroizgibnogo otvoda opticheskogo izlucheniia iz volokonnykh svetovodov [Calculation of the parameters of macrobending optical output from optical fibers]. *Radioengineering*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 18-26.

Сведения об авторах

ДЕНИСОВ И.В.

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Доктор технических наук, профессор, Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта

ЛАРИН Я.А.

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Аспирант Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта

About the authors

I.V. DENISOV

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University. I. Kant

Y.A. LARIN

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Aspirant of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University. I. Kant

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 26.09.2023

Одобрена: 30.09.2023

Принята к публикации: 01.10.2023

Financing. The study had no sponsorship.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 26/09/2023

Approved: 30/09/2023

Accepted for publication: 01/10/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Денисов, И.В. Выбор оптимальной конфигурации волоконно-оптического чувствительного элемента на многомодовом интерферометре / И.В. Денисов, Я.А. Ларин // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 7. – С. 5–17.

Please cite this article in English as: Denisov I.V., Larin Y.A. Optimal fiber-optical sensing element selection on multimode interferometer // Applied photonics, 2023, no. 7, pp. 5-17.