

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-878-885

УДК 535-45

Исследование влияния наведенного периодического механического напряжения на величину связи поляризационных мод в двулучепреломляющем оптическом волокне

Евгений Эдуардович Калугин¹✉, Владимир Евгеньевич Стригалева²,
Азамат Булатович Мухтубаева³, Игорь Касьянович Мешковский⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ znabyaklg@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>

² vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

³ mukhtubaev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>

⁴ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Аннотация

Введение. Одним из применений двулучепреломляющих оптических волокон является создание различных сенсоров, в том числе датчиков уровня и гидростатического давления. Внешнее механическое воздействие на двулучепреломляющее оптическое волокно приводит к перекачке части оптического излучения между ортогональными модами. В датчиках давления на микро- и макроизгибах затухание оптического сигнала растет при увеличении внешнего давления. Совмещение двух физических принципов в одном датчике позволяет создавать волоконно-оптические датчики высокой чувствительности для работы при давлении более 18 кПа. При этом существенно упрощается схема регистрации. **Метод.** В качестве опытного образца использовано оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4. В исследовании применен широкополосный источник излучения ThorLabs S5FC1005SXL с центральной длиной волны 1560 нм и полушириной спектра 45 нм. Рассмотрено влияние наведенного периодического механического напряжения на величину связи поляризационных мод в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой. Наведенное периодическое напряжение создавалось предложенной и специально изготовленной периодической структурой из отрезков оптического волокна, приклеенных к стеклянной подложке. Давление на опытный образец волокна изменялось грузами известной массы, а также путем поворота волокна вокруг своей оси с шагом 5°. Гидростатическое давление создавалось с помощью резервуара с водой, помещенного в барокамеру. Мощность излучения, перекачиваемая между поляризационными модами, регистрировалась при помощи двух фотоприемных устройств с использованием поляризационного делителя. **Основные результаты.** Показано, что наибольшая величина относительной перекачиваемой мощности достигнута при периоде механического воздействия, равного длине биений двулучепреломляющего оптического волокна. Для опытного образца датчика получена зависимость относительной перекаченной мощности от гидростатического давления. Обнаружено, что наибольшее значение относительной перекаченной мощности — при давлении 80 кПа, а пороговой чувствительности — 20 кПа. Снижение перекачиваемой мощности при давлении более 80 кПа объясняется наведенными оптическими потерями, а при давлении менее 20 кПа замечен гистерезис показателей до 0,006 отн. ед. **Обсуждение.** Получен образец датчика для измерения гидростатического давления до 80 кПа со среднеквадратичным отклонением результатов измерения до 7 %. Пороговая чувствительность ограничена величиной 20 кПа. Выполненное исследование может найти применение при разработке волоконно-оптических датчиков давления.

Ключевые слова

оптические двулучепреломляющие волокна, связь поляризационных мод, относительная перекачиваемая мощность, периодическая структура, гидростатическое давление

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2019-0923.

Ссылка для цитирования: Калугин Е.Э., Стригалева В.Е., Мухтубаева А.Б., Мешковский И.К. Исследование влияния наведенного периодического механического напряжения на величину связи поляризационных мод в двулучепреломляющем оптическом волокне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 5. С. 878–885. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-878-885

© Калугин Е.Э., Стригалева В.Е., Мухтубаева А.Б., Мешковский И.К., 2023

Cross-polarization coupling in polarization maintaining fiber induced by periodic mechanical stress

Evgeniy E. Kalugin¹, Vladimir E. Strigalev², Azamat B. Mukhtubaev³, Igor K. Meshkovskii⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ znabyaklg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>

² vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

³ mukhtubaev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>

⁴ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Abstract

One of the applications of polarization maintaining (PM) fibers is the creation of various sensors including level and hydrostatic pressure sensors. An external mechanical stress on a PM fiber causes cross-polarization coupling. In micro- and macro-bend pressure sensors, the attenuation of the optical signal increases with increasing external pressure. Combination of two physical principles in one sensor allows to create fiber-optic sensors of high sensitivity for operation at pressure more than 18 kPa. At the same time, the registration scheme is significantly simplified. An optical fiber with an elliptical ESC-4 stress cladding was used as a prototype. A superluminescent diode ThorLabs S5FC1005SXL with a center wavelength of 1560 nm and a spectrum half-width of 45 nm was used in the study. In this work, the effect of induced periodic mechanical stress on cross-polarization coupling magnitude in a PM fiber with an elliptical stress cladding was considered. The induced periodic stress was generated by a proposed and specially fabricated periodic structure of optical fiber sections bonded to a glass substrate. The pressure on the fiber prototype was changed by weights of known mass as well as by rotating the fiber around its axis with a step of 5°. Hydrostatic pressure was created by means of a water tank placed in the barocamera. The cross-polarization coupled power was recorded with two photodetectors using a polarization beam splitter. It is shown that the largest value of the relative coupled power is achieved at the period of mechanical stress equal to the beat length of PM fiber. The dependence of the relative coupled power on the hydrostatic pressure is obtained for the prototype sensor. It is shown that the highest value of the relative coupled power is achieved at a pressure of 80 kPa. The threshold sensitivity amounted to 20 kPa. The decrease in coupled power at pressures greater than 80 kPa is attributed to induced optical losses. At pressure less than 20 kPa, a hysteresis of indicators up to 0.006 relative units is noticeable. A sample sensor for measuring hydrostatic pressure up to 80 kPa with the standard deviation of measurement results up to 7 % was obtained. The threshold sensitivity is limited to 20 kPa. The performed research can be applied in the development of fiber-optic pressure sensors.

Keywords

polarization maintaining fiber, cross-polarization coupling, relative coupled power, periodic structure, hydrostatic pressure, polarization extinction ratio

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. 2019-0923.

For citation: Kalugin E.E., Strigalev V.E., Mukhtubaev A.B., Meshkovskii I.K. Cross-polarization coupling in polarization maintaining fiber induced by periodic mechanical stress. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 878–885 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-878-885

Введение

На сегодняшний день двулучепреломляющие (ДЛП) оптические волокна наиболее распространены в сфере волоконно-оптической сенсорики [1–5]. Такие волокна могут применяться для передачи световых сигналов, измененных по амплитуде, фазе или поляризации. ДЛП оптическое волокно может быть использовано в качестве чувствительного элемента благодаря восприимчивости оптического волокна к механическому напряжению, тепловому, электромагнитному и ряду других воздействий [3–5]. Существует множество датчиков на основе ДЛП оптических волокон: датчики давления, датчики уровня жидкости, датчики магнитного поля, датчики температуры, датчики положения и т. д. [3–5].

Наибольшее применение нашли два вида ДЛП оптических волокон [1, 6]. В первом двулучепреломление создается за счет геометрии сердцевинки — разных значений эффективных показателей преломлений для каждой из осей эллипса. Второй вид основан на эффекте фотоупругости. В таких волокнах константы распространения оптического излучения двух ортогональных

мод различаются. В ДЛП оптических волокнах выделяют две основные поперечные оси с различными показателями преломления: одна пересекает область с наведенными напряжениями («медленная» ось), а другая перпендикулярна первой («быстрая» ось) [1, 6].

Внешнее механическое воздействие на ДЛП оптическое волокно приводит к связи поляризационных мод и перекачке части оптической мощности из одной оси в ортогональную. Данный эффект описан в работах [7–12], где этот эффект рассмотрен как паразитный при работе поляризационных устройств. Однако эффект можно применить для измерения физических величин, например измерения давления [13] или уровня жидкости в резервуаре [14]. При измерении уровня жидкости использован метод широкополосной интерферометрии. Для этого была предложена конструкция чувствительного элемента, в котором давление жидкости передавалось через мембрану на площадку со стержнем, который, в свою очередь, давил на ДЛП оптическое волокно. Чувствительные элементы располагались на некотором удалении друг от друга вдоль погружаемого отрезка ДЛП оптического волокна. Регистрация измене-

ния оптического излучения осуществлена поляризационным сканирующим интерферометром Майкельсона. Такой формат поляризационного волоконно-оптического датчика позволил наблюдать различное давление для каждого чувствительного элемента — изменяющийся уровень жидкости внутри резервуара. Разработанная методика позволила детектировать давление до 18 кПа [14]. На больших давлениях такая конструкция чувствительного элемента показала себя гораздо хуже из-за ненадежности используемых промежуточных прокладок, в частности силикона.

Другим известным методом измерения давления с использованием многомодового или стандартного одномодового оптического волокна является датчик давления на микро- и макроизгибах, суть которого заключается в росте затухания оптического сигнала при увеличении прикладываемого давления [3, 4]. При установлении режима связи мод сердцевин и оболочки получено увеличение чувствительности оптического затухания от давления. Отметим, что из-за хрупкости оптического волокна данный метод ограничен в измерениях. Для решения данной проблемы добавляют защитные оболочки оптического волокна, увеличивая диапазон измерений и уменьшая чувствительность или используют волокно без защитных оболочек, обеспечивая высокую чувствительность в маленьком диапазоне измеряемого давления.

Совместив основы описанных датчиков, например, создание волоконно-оптического датчика на макроизгибах на ДЛП оптическом волокне, возможно получить датчик давления высокой чувствительности, способный работать на давлениях выше 18 кПа. При этом полученный датчик будет иметь меньшую стоимость за счет отсутствия необходимости использования дорогостоящего оборудования, такого как поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона.

Таким образом, расширение знаний о воздействии механических напряжений, в том числе и сложной формы, на ДЛП оптическое волокно позволит создавать большую номенклатуру оптических сенсоров. В настоящей работе выполнено сравнение воздействия структур с различным периодом воздействия и влияния гидростатического давления на связь поляризационных мод в ДЛП оптическом волокне.

Теоретический обзор

Внешнее механическое воздействие на ДЛП оптическое волокно приводит к связи поляризационных мод и к перекачке части мощности из линейно-поляризованной оси в ортогональную ось. Связь поляризационных мод опишем системой уравнений [8, 11]:

$$\begin{cases} dc_x(z)/dz = j\kappa(z)c_y(z)e^{j\beta z} \\ dc_y(z)/dz = j\kappa(z)c_x(z)e^{-j\beta z} \end{cases}$$

где $c_{x,y}$ — комплексные амплитуды излучения в поляризационных модах; κ — коэффициент связи; β — коэффициент ослабления.

Относительную перекаченную мощность между поляризационными модами выразим следующим образом [8, 11]:

$$\frac{P_y(z)}{P_x + P_y} = \frac{4\kappa^2}{4\kappa^2 + \beta^2} \sin^2\left(\frac{\sqrt{4\kappa^2 + \beta^2}}{2}\right),$$

где мощности оптического излучения: P_x и P_y — на входе в рабочую и в ортогональную поляризационные оси; $P_y(z)$ — на выходе из ортогональной поляризационной оси.

Максимум связи мод получим при прикладывании к оптическому волокну периодического механического напряжения [3]:

$$k - k' = \frac{2\pi}{T},$$

где k и k' — постоянные распространения мод; T — период макроизгибов.

Для ДЛП оптического волокна разность постоянных распространения поляризационных осей равна величине двулучепреломления $\Delta\beta$, которая выражена в виде [1]:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi}{\Lambda},$$

где λ — длина волны источника излучения; Δn — разность эффективных показателей преломлений поляризационных осей; Λ — длина биений ДЛП оптического волокна. Длина биений обозначает пространственный период, через который две ортогональные моды, приходят с разницей по фазе равной 2π [6]. Соответственно, для достижения максимума связи поляризационных мод ДЛП оптического волокна требуется, чтобы период воздействия T был равен длине биений ДЛП оптического волокна Λ .

Методика исследования

Для создания наведенного механического напряжения с определенным периодом разработана специальная оснастка (рис. 1). Воздействие произведено отрезками такого же волокна в акрилатной оболочке, расположенных на стеклянной подложке с некоторым периодом.

Опытный образец оптического ДЛП волокна закреплялся волоконными держателями без натяжения и провисания на расстоянии 30 см, обеспечивая тем самым отсутствие дополнительного вклада перекачки в области прикладываемого давления. Волоконные держатели позволяли вращать волокно вокруг своей оси на 360° , что изменяло вектор прикладываемой силы относительно поляризованных осей оптического волокна. Прикладываемая сила варьировалась при помощи грузов известной массы на платформе.

В качестве опытного образца использовано ДЛП оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4 [15]. Методом широкополосной интерферометрии [16] измерены характеристики волокна ESC-4: разница эффективных показателей преломления волокна $\Delta n = 6 \cdot 10^{-4}$; длина биений $\Lambda = 2,6$ мм на длине волны $\lambda = 1560$ нм. На рис. 2 представлена фотография поперечного сечения волокна ESC-4.

Для анализа изменения мощности перекачки из основной поляризационной моды в ортогональную при

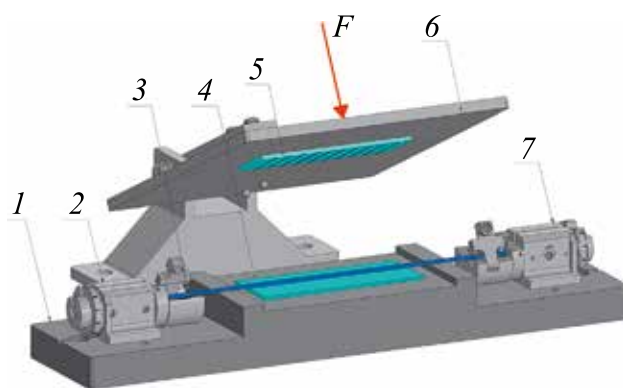


Рис. 1. Оснастка для создания механического напряжения: 1 — основание; 2, 7 — поворотные держатели оптического волокна; 3 — опытный образец двулучепреломляющего оптического волокна; 4 — стеклянная подложка; 5 — стеклянная подложка с периодической структурой; 6 — платформа; F — направление прикладываемой силы

Fig. 1. Equipment for inducing mechanical stress: 1 — base; 2, 7 — rotating fiber holders; 3 — polarization maintaining (PM) optical fiber sample; 4 — glass substrate; 5 — glass substrate with periodic structure; 6 — platform; F — force direction

механическом давлении с периодической структурой введено линейно поляризованное оптическое излучение в ДЛП оптическое волокно. При этом была возбуждена одна собственная мода, а зарегистрировано изменение мощности в ортогональной моде.

В схеме установки использован широкополосный источник излучения ThorLabs S5FC100SXXL с центральной длиной волны 1560 нм и полушириной спектра 45 нм. С помощью оснастки (рис. 1) создано механическое напряжение периодической структурой, которое привело к изменению величины перекачки мощности из основной поляризационной оси ДЛП оптического волокна в ортогональную.

Выполнено исследование влияния величины силы прикладываемого наведенного механического напряжения периодической структурой на изменение мощности перекачки оптического излучения из основной поляризационной моды ДЛП оптического волокна в ортогональную моду. Данное исследование происходило двумя этапами: воздействием грузами различной силы (F) от 0 до 67 Н с одним периодом периодической структуры и одним грузом с перебором периода структуры с поворотом волокна вокруг своей оси с шагом 5° . Опытным образцом ДЛП оптического волокна служило волокно с эллиптической напрягающей оболочкой. Длина биений Λ опытного образца равна 2,6 мм.

Результаты исследования

Для исследования влияния направления механического напряжения на изменение мощности перекачки оптического излучения из одной поляризационной моды ДЛП оптического волокна в ортогональную моду использованы подложки с периодом структуры от 2 мм до 5 мм с шагом 0,5 мм, с количеством стержней в периодической структуре $N = 20$ и грузы известной массы эквивалентной силе 21 Н. Каждая из структур была

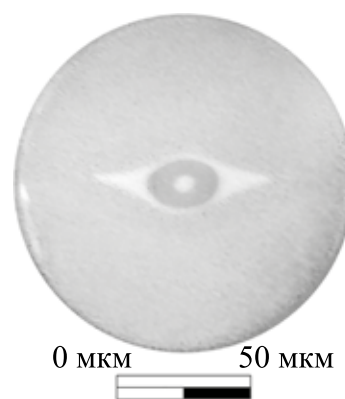


Рис. 2. Фотография поперечного сечения волокна ESC-4

Fig. 2. Picture of cross section of ESC-4 fiber

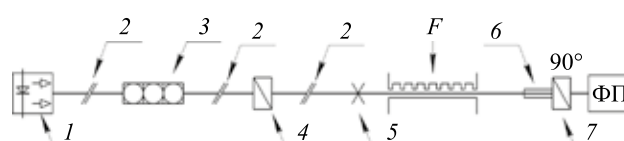


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с механическим напряжением:

1 — суперлюминесцентный диод; 2 — оптические розетки; 3 — контроллер поляризации; 4 — поляризатор; 5 — сварное соединение; 6 — адаптер оптического волокна; 7 — поляризатор, повернутый под 90° ; F — направление прикладываемой силы; ФП — фотоприемник

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup with mechanical stress: 1 — superluminescent diode; 2 — optical sockets; 3 — polarization controller; 4 — polarizer; 5 — splice; 6 — optical fiber adapter; 7 — oriented at 90° polarizer; F — force direction; ФП — photodetector

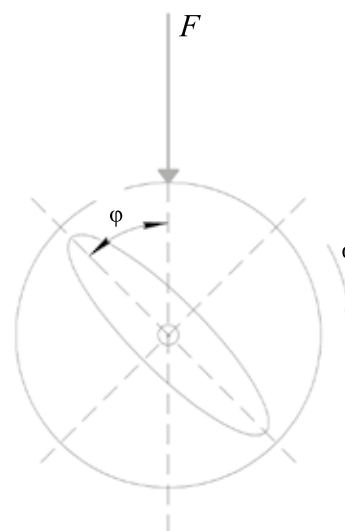


Рис. 4. Угол поворота опытного образца двулучепреломляющего оптического волокна.

α — угол поворота волокна вокруг своей оси; φ — угол между силой воздействия и поляризационными осями волокна

Fig. 4. Fiber rotation of the PM sample fiber.

α — fiber rotation angle; φ — angle between the force and polarization axes

сформирована при помощи отрезков такого же волокна в защитной акрилатной оболочке и клея на стеклянной подложке. Рядом с опытным образцом ДЛП оптического волокна укладывался отрезок поддерживающего волокна. На каждую точку воздействия приходилось

усилие 0,54 Н. Опытный образец вращался от 0° до 360° с шагом 5° при помощи поворотных держателей.

На рис. 5 представлены результаты измерений относительной перекачиваемой мощности с поворотом волокна, а также с изменением периода механического

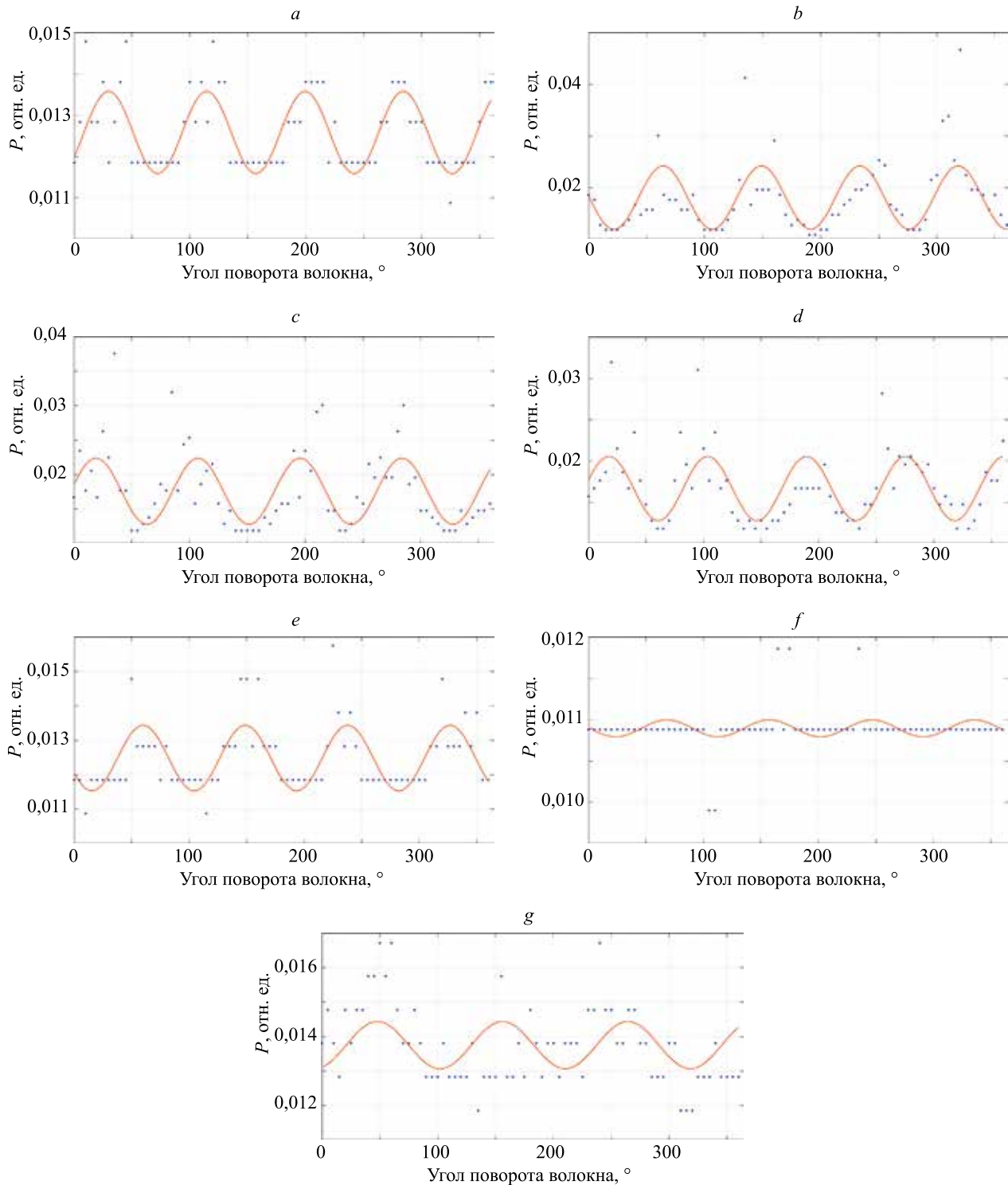


Рис. 5. Зависимость изменения относительной мощности (P) перекачки от угла поворота двулучепреломляющего оптического волокна ESC-4 с периодом структуры (синие точки) T : 2 мм (а); 2,5 мм (б); 3 мм (в); 3,5 мм (д); 4 мм (е); 4,5 мм (ф); 5 мм (г). Аппроксимация Фурье 1-го порядка (красная кривая)

Fig. 5. Dependence of coupling power (P) on PM rotation angle of ESC-4 optical fiber with structure period (blue dots) T : 2 mm (a); 2,5 mm (b); 3 mm (c); 3,5 mm (d); 4 mm (e); 4,5 mm (f); 5 mm (g); first order Fourier approximation (red line)

напряжения. Все измерения были аппроксимированы рядом Фурье 1-го порядка.

Для исследования зависимости перекаченной мощности от прикладываемой силы применена подложка с периодом структуры 2,5 мм, как наиболее близкого к длине биений $\Lambda = 2,6$ мм используемого ДЛП оптического волокна с общим количеством точек воздействия на волокно равным 20. Так как опытный образец был закреплен в волоконных держателях, то воздействие происходило в одни и те же точки опытного образца.

В ходе исследования выполнено три измерения на трех разных отрезках опытного ДЛП оптического волокна с эллиптической сердцевинной из одной партии. На рис. 6 представлены полученные результаты относительной перекаченной мощности от прикладываемой силы на одну точку и аппроксимация полиномом 2-го порядка по средним значениям.

Из полученных результатов (рис. 6) видно, что с повышением силы мощность перекачки растет. При этом сила в 0,2 Н не вносит достаточного возмущения для изменения мощности перекачки. На графике заметно, что от измерения к измерению мощность перекачки может отличаться на 0,02 при одной силе. Это связано с тем, что величина перекаченной мощности сильно зависит от угла прикладываемой силы, а в данном эксперименте опытные образцы волокна закреплялись произвольно — без контроля поляризационных осей.

Из графиков на рис. 5 видно, что при одинаковых условиях наибольшая чувствительность перекачки мощности наблюдается при давлении структурой с $T = 2,5$ мм, что соответствует предположению, сделанном в разделе «Теоретический обзор», что наибольшая чувствительность достигается при периоде структуры равном длине биений ($\Lambda = 2,6$ мм) ДЛП оптического волокна.

Разработка прототипа датчика давления

На основании полученных результатов в разделе «Результаты исследования» разработан чувствительный элемент датчика гидростатического давления.

Для создания гидростатического давления собран стенд измерений с барокамерой, которая состоит из: гермобокса, ресивера объемом 30 л, позволяющего

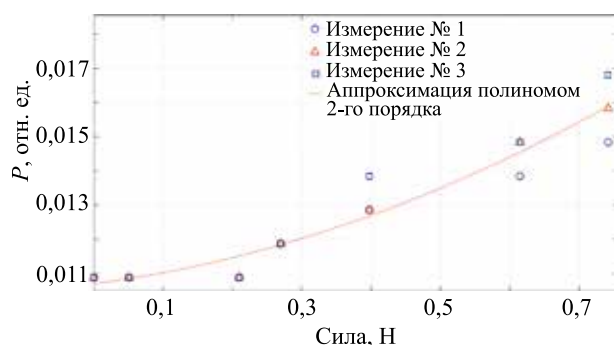


Рис. 6. График зависимости относительной мощности перекачки от силы воздействия периодической структурой
Fig. 6. Dependence of coupling power vs. the force induced by the periodic structure

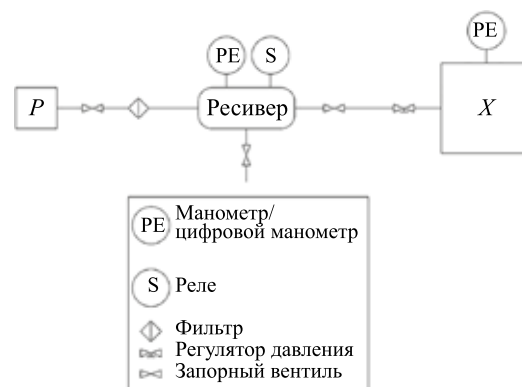


Рис. 7. Схема барокамеры избыточного давления: P — компрессор; X — гермобокс
Fig. 7. Scheme of baroque chamber: P — compressor; X — hermetic box

поддерживать давление в гермобоксе, и компрессора Bambi BB15V (рис. 7). Чувствительный элемент, структура которого представлена на рис. 8, b, располагался в гермобоксе внутри емкости с водой (рис. 9).

Цилиндр служит каркасом для формирования периодической структуры и выполнен из нержавеющей стали. На его поверхности расположены стержни из проволоки нержавеющей стали. Стержни расположены на цилиндре каждые 5° , что образует длину дуги описываемой окружности между стержнями 2,61 мм. Вокруг стержней намотано ДЛП оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой в защитной акрилатной оболочке без перехлестов и натяжения длиной 90 см. Поверх волокна расположена мембрана из нержавеющей стали толщиной 0,02 мм. Мембрана герметично закреплена с помощью накладных гаек и си-

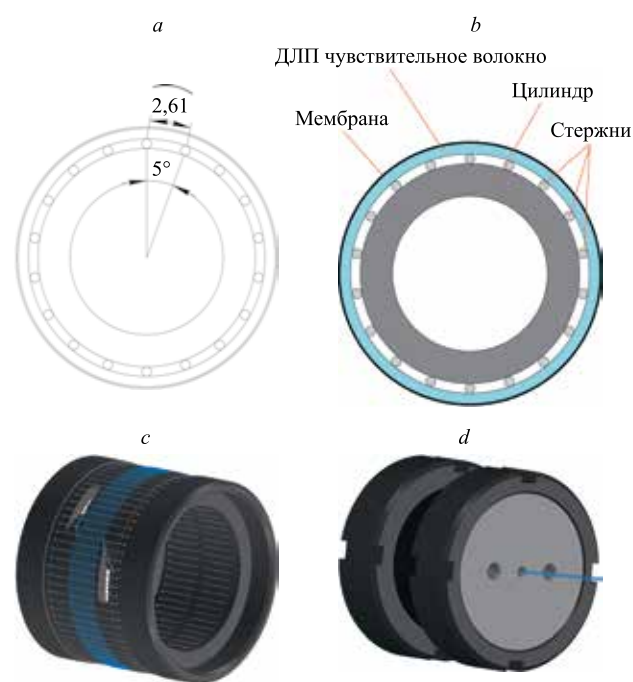


Рис. 8. Структура чувствительного элемента
Fig. 8. Sensing unit structure

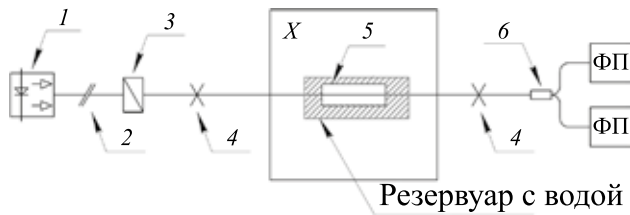


Рис. 9. Схема экспериментальной установки с гидростатическим давлением:

1 — суперлюминесцентный диод; 2 — разъемное соединение (розетка); 3 — волоконно-оптический поляризатор; 4 — неразъемные соединения (сварки); 5 — чувствительный элемент; 6 — делитель поляризации; ФП — фотоприемники; X — гермобокс с избыточным давлением

Fig. 9. Experimental setup with hydrostatic pressure:

1 — superluminescent diode; 2 — optical socket; 3 — polarizer; 4 — splices; 5 — sensing unit; 6 — polarization beam splitter; ФП — photodetectors; X — hermetic box

ликоновых уплотнителей. Увеличивающееся давление воды обжимает металлическую мембрану и прижимает ДЛП оптическое волокно к стержням, увеличивая тем самым связь поляризационных мод.

Измерение влияния наведенного механического напряжения, созданного гидростатическим давлением, на связь поляризационных мод производилось трижды на каждом значении давления при повышении от 0 до 120 кПа и обратном понижении до 0 кПа с шагом 20 кПа. Из-за медленной скорости подачи воздуха в гермобокс на каждом шаге давления система выдерживалась в состоянии покоя в течение 5 мин, по истечению которых выполнялся замер оптической мощности обеих поляризационных мод.

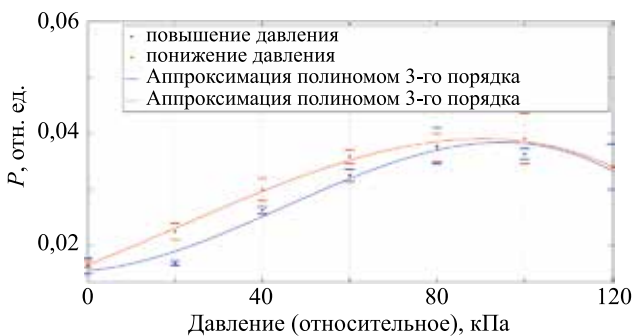


Рис. 10. Зависимости относительной перекачиваемой мощности от гидростатического давления: при повышении (синим цветом) и понижении (красным цветом) давления с аппроксимациями полиномом 3-го порядка для каждого из направлений

Fig. 10. Dependences of relative coupling power vs. hydrostatic pressure: at increasing (blue) and decreasing (red) pressure with approximations by 3rd order polynomial for each of the directions

На рис. 10 представлена зависимость относительной перекаченной мощности, усредненной по трем измерениям и с построенными доверительными интервалами (красные и синие пределы). А также приведены аппроксимации полиномом 3-го порядка для обоих направлений изменения давления. Рассчитаем относительную перекаченную мощность:

$$P_{\text{отн}} = \frac{P_y(z)}{P_x + P_y},$$

где P_y — мощность $P_y(z)$ без давления, т. е. при 0 кПа.

На рис. 10 видно, что наибольшее значение относительной перекаченной мощности достигается при 80 кПа, а пороговая чувствительность составила 20 кПа. После 80 кПа начинается падение перекачиваемой мощности, что объясняется наведенными оптическими потерями. При понижении давления замечен гистерезис, где наибольшее отклонение заметно на давлении 20 кПа и составило 0,006 отн. ед.

Заключение

В работе изучено влияние периодического механического воздействия на связь поляризационных мод в двулучепреломляющем оптическом волокне. Полученные результаты подтвердили, что механическое напряжение различной величины по-разному влияет на величину связи поляризационных мод. Выполненный эксперимент показал, что создание периодической структуры воздействия на двулучепреломляющее оптическое волокно позволило увеличить связь поляризационных мод — чем ближе период T к длине биений Λ двулучепреломляющего оптического волокна, тем острее заметна разница. Например, у волокна с $\Lambda = 2,6$ мм при периоде $T = 2$ мм и $T = 5$ мм максимально зарегистрированная относительная перекаченная оптическая мощность 0,017, а при $T = 3$ мм — 0,037 и при самом близком значении периода к длине биений $T = 2,5$ мм — 0,045.

Используя рассмотренный эффект, разработана конструкция чувствительного элемента для измерения гидростатического давления. Полученный образец способен измерять давление до 80 кПа, с пороговой чувствительностью 20 кПа и со среднеквадратичным отклонением не больше 7 %. Однако проверка пороговой чувствительности ограничена используемым регулятором давления, минимальный шаг которого составляет 20 кПа.

Полученные результаты имеют высокий потенциал при дальнейшей разработке датчика давления, поскольку на данный момент аналогов способа и чувствительного элемента для измерения гидростатического давления не известно. При проработке конструкции можно добиться увеличения диапазона работы датчика, благодаря высокой чувствительности эффекта связи поляризационных мод в описанном способе.

Литература

1. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers // *Applied Scientific Research*. 1984. V. 41. N 3-4. P. 257–270. <https://doi.org/10.1007/BF00382456>
2. Hui R. *Introducing to Fiber-Optic Communications*. Academic Press, 2020. 659 p.
3. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
4. Okoshi T., Okamoto K., Ocu M., Nisihara H., Kijima K., Hatatje K. Волоконно-оптические датчики: пер. с яп. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 255 с.
5. Fraden J. *Handbook of Modern Sensors* / 3rd ed. Springer New-York, 2006. 589 p.
6. Lefèvre H. *The Fiber-optic gyroscopes* / 2nd ed. Artech House Publ., 2014. P. 317–331.
7. Rashleigh S. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1983. V. 1. N 2. P. 312–331. <https://doi.org/10.1109/jlt.1983.1072121>
8. Skai J.I., Kimura T. Birefringence and polarization characteristics of single-mode fibers under elastic deformations // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1981. V. 17. N 6. P. 1041–1051. <https://doi.org/10.1109/jqe.1981.1071213>
9. Carrara S.L.A., Kim B.Y., Shaw H.J. Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber // *Optics Letters*. 1986. V. 11. N 7. P. 470–472. <https://doi.org/10.1364/ol.11.000470>
10. Chinone N., Ulrich R. Elasto-optic polarization measurement in optical fiber // *Optics Letters*. 1981. V. 6. N 1. P. 16–18. <https://doi.org/10.1364/ol.6.000016>
11. Ликумович Л.Б. Поляризационные эффекты в волоконных интерферометрах на основе двулучепреломляющих световодов: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / СПбПУ. СПб., 2008. 333 с.
12. Мухтубаев А.Б. Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Университет ИТМО. СПб., 2020. 199 с.
13. Yao X.S. Measurements of strain, stress and temperature by using 1-dimensional and 2-dimensional distributed fiber-optic sensors based on sensing by polarization maintaining fiber of distributed polarization crosstalk distribution. Patent US9476699. 2016.
14. He Z., Zhang Z., Feng T., Li Q., Yao X.S. Liquid pressure sensing system based on distributed polarization crosstalk analysis in polarization maintaining fiber // *Optoelectronic Letters*. 2022. V. 18. N 11. P. 651–657. <https://doi.org/10.1007/s11801-022-2072-z>
15. Буреев С.В., Дукельский К.В., Ероньян М.А. Способ изготовления одномодовых волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения. Патент RU2396580C1. Бюл. 2010. № 22.
16. Аксарин С.М. Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Университет ИТМО. СПб., 2014. 116 с.

Авторы

Калугин Евгений Эдуардович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>, znabyaklg@gmail.com

Стригалева Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Мухтубаев Азамат Булатович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195404386](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, mukhtubaev.ab@gmail.com

Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, директор НИЦ Световодной Фотоники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

References

1. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers. *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3-4, pp. 257–270. <https://doi.org/10.1007/BF00382456>
2. Hui R. *Introducing to Fiber-Optic Communications*. Academic Press, 2020. 659 p.
3. *Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. by E. Udd. Wiley, 2008, 520 p.
4. Okoshi T., Okamoto K., Ocu M., Nisihara H., Kijima K., Hatatje K. *Fiber Optic Sensors*. Leningrad, Jenergoatomizdat, 1991, 355 p. (in Russian)
5. Fraden J. *Handbook of Modern Sensors*. 3rd ed. Springer New-York, 2006, 589 p.
6. Lefèvre H. *The Fiber-optic gyroscopes*. 2nd ed. Artech House Publ., 2014, pp. 317–331.
7. Rashleigh S. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, vol. 1, no. 2, pp. 312–331. <https://doi.org/10.1109/jlt.1983.1072121>
8. Skai J.I., Kimura T. Birefringence and polarization characteristics of single-mode fibers under elastic deformations. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, vol. 17, no. 6, pp. 1041–1051. <https://doi.org/10.1109/jqe.1981.1071213>
9. Carrara S.L.A., Kim B.Y., Shaw H.J. Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber. *Optics Letters*, 1986, vol. 11, no. 7, pp. 470–472. <https://doi.org/10.1364/ol.11.000470>
10. Chinone N., Ulrich R. Elasto-optic polarization measurement in optical fiber. *Optics Letters*, 1981, vol. 6, no. 1, pp. 16–18. <https://doi.org/10.1364/ol.6.000016>
11. Liukumovich L.B. *Polarization effects in fiber interferometers based on birefringent optical fiber waveguides*. Dissertation for the degree of doctor of physical and mathematical sciences. St. Petersburg, SPbPU, 2008, 333 p. (in Russian)
12. Mukhtubaev A.B. *The polarization cross-coupling influence on the Sagnac phase shift in a fiber-optic gyroscope*. Academic dissertation candidate of engineering. St. Petersburg, ITMO University, 2020, 199 p. (in Russian)
13. Yao X.S. Measurements of strain, stress and temperature by using 1-dimensional and 2-dimensional distributed fiber-optic sensors based on sensing by polarization maintaining fiber of distributed polarization crosstalk distribution. Patent US9476699, 2016.
14. He Z., Zhang Z., Feng T., Li Q., Yao X.S. Liquid pressure sensing system based on distributed polarization crosstalk analysis in polarization maintaining fiber. *Optoelectronic Letters*, 2022, vol. 18, no. 11, pp. 651–657. <https://doi.org/10.1007/s11801-022-2072-z>
15. Bureev S.V., Dukel'skij K.V., Eron'jan M.A. Method of making single-mode fibre-optical waveguides which retain radiation polarization. Patent RU2396580C1, 2010. (in Russian)
16. Aksarin S.M. *Investigation of polarization methods and technologies for matching fiber-optic and integrated-optical waveguides*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2014, 116 p. (in Russian)

Authors

Evgeniy E. Kalugin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>, znabyaklg@gmail.com

Vladimir E. Strigalev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Azamat B. Mukhtubaev — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195404386](https://orcid.org/0000-0002-4848-0483), <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, mukhtubaev.ab@gmail.com

Igor K. Meshkovskii — D. Sc., Professor, Director of the Research Institute of Light-Guided Photonics, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru