

Научная статья

УДК 535.3, 535-15, 535.417

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18415>

**ОТКЛИК МЕЖМОДОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА С SMSMS-СТРУКТУРОЙ
ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМ ОПРОСЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

**Л. Д. Завалишина¹, А. А. Маркварт¹✉, А. Э. Зарипов¹,
М. А. Бисярин², Л. Б. Лиокумович¹, Н. А. Ушаков¹**

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ markvart_aa@spbstu.ru

Аннотация. Исследовано функционирование межмодового волоконно-оптического интерферометра со структурой "Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode" (SMSMS) при его спектральном опросе в C -диапазоне длин волн. Таким интерферометром можно измерять показатель преломления n внешней среды путем создания интерференции между фундаментальной и оболочечными модами в этой структуре. Представлены теоретические выражения для расчета спектральной характеристики (СХ) интерферометра, рассчитаны моды этой структуры, проанализировано поведение интерференционных компонент СХ, относящихся к попарной интерференции фундаментальной и оболочечных мод одномодового волокна при изменении n . Проведена оценка методических погрешностей измерения n внешней среды, которая состояла из раствора глицерина в дистиллированной воде. Минимальная ошибка определения n составила $1,7 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне $n = 1,32 - 1,36$, что соответствует изменению концентрации глицерина в воде на 0,13% в диапазоне от 0 до 25%.

Ключевые слова: межмодовый волоконный интерферометр, SMSMS, датчик показателя преломления, дискретное преобразование Фурье

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095.

Для цитирования: Завалишина Л. Д., Маркварт А. А., Зарипов А. Э., Бисярин М. А., Лиокумович Л. Б., Ушаков Н. А. Отклик межмодового волоконно-оптического интерферометра с SMSMS-структурой при спектральном опросе на изменение показателя преломления внешней среды // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 206–220. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18415>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18415>

**THE RESPONSE OF AN INTERMODAL FIBER-OPTIC
INTERFEROMETER WITH SMSMS STRUCTURE
IN CASE OF SPECTRAL INTERROGATION TO CHANGES
IN THE REFRACTIVE INDEX OF THE EXTERNAL ENVIRONMENT**

**L. D. Zavalishina¹, A. A. Markvart¹✉, A. E. Zaripov¹,
M. A. Bisayrin², L. B. Liokumovich¹, N. A. Ushakov¹**

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

✉ markvart_aa@spbstu.ru



Abstract. The operation of an intermode fiber-optic interferometer with “Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode” (SMSMS) structure during its spectral interrogation in the C-wavelength range has been studied. The refractive index n of the external environment can be measured using this device by providing the interference between fundamental and cladding modes in this structure. The theoretical expressions for calculating the spectral characteristic (SC) of the interferometer were presented, the structures' modes were obtained, the behavior of the SC interference components related to the pairwise interference between the fundamental and cladding modes of a single-mode fiber when n changing was analyzed. The methodological errors of n measuring the external environment were estimated. The minimum error in n determining was $1.7 \cdot 10^{-4}$ in the n range from 1.32 to 1.36, which corresponds to a 0.13% change in the range of glycerol concentration from 0 to 25% in the water solution.

Keywords: intermode fiber optic interferometer, SMSMS, refractive index sensor, discrete Fourier transform

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 23-72-10095).

For citation: Zavalishina L. D., Markvart A. A., Zaripov A. E., Bisyarin M. A., Liokumovich L. B., Ushakov N. A., The response of an intermodal fiber-optic interferometer with SMSMS structure in case of spectral interrogation to changes in the refractive index of the external environment, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 206–220. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18415>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Измерение показателя преломления внешней среды является важной и актуальной задачей, имеющей широкое применение в самых разных областях промышленности, науки и других сферах человеческой деятельности. Это и нефтегазовая промышленность, и создание различных сооружений, и оптическое приборостроение, и медицина, а также многое другое.

Волоконно-оптические датчики показателя преломления — это наиболее привлекательный тип датчиков благодаря его высокой точности, компактным размерам, долговечности, гибкости, биосовместимости, электровзрывобезопасности, а также устойчивости к электромагнитным помехам, химической коррозии и радиации. Такие датчики показателя преломления могут быть построены на разных принципах. Непосредственное получение информации о показателе преломления на заданной длине волны реализуется путем измерения коэффициента отражения на границе торца оптоволоконного зонда и измеряемой жидкости [1, 2].

Однако в некоторых прикладных задачах не требуется определять сам показатель преломления жидкости, а необходимо лишь измерить концентрацию определенного вещества (аналита) в растворе либо ее изменение. В этом случае часто применяются спектральные методы опроса волоконно-оптических датчиков, построенных на основе поверхностного плазмонного резонанса [3 – 5], интерферометра Фабри – Перо [6], межмодовых интерферометров с одномодовым подключением [7 – 19]. Эти методы заключаются в измерении спектра отражения или пропускания волоконно-оптического датчика, т.е. зависимости от длины волны коэффициента отражения оптического излучения от датчика либо его прохождения через датчик. Такую зависимость для удобства изложения далее будем называть спектральной характеристикой (СХ) датчика.

При изменении концентрации аналита в растворе изменяется дисперсионная зависимость показателя преломления раствора, что приводит к изменению СХ датчика. В частности, в случае датчика на поверхностном плазмонном резонансе смещается длина волны резонанса; в случаях датчиков на интерферометре Фабри – Перо и межмодовом интерферометре изменяются разности фаз интерферирующих волн и, как следствие, изменяются частоты и начальные фазы квазигармонических компонент СХ. Следует отметить, что описанные устройства называют датчиками показателя преломления, несмотря

на необходимость калибровки таких датчиков под конкретный анализ в растворе. Разрешающая способность измерения концентрации анализа в веществе обычно приводится в пересчете на минимальное изменение показателя преломления раствора на одной из длин волн диапазона, которое можно достоверно зафиксировать. Типичные значения изменения указанного показателя преломления для волоконно-оптических датчиков составляет от 10^{-4} до 10^{-9} RIU (англ. Refractive Index Unit).

Среди перечисленных датчиков показателя преломления наиболее простым в изготовлении, но и наименее исследованным (тем не менее) можно считать датчик на основе межмодового интерферометра с одномодовым подключением. Эти интерферометры формируются путем сварки подводящих одномодовых оптических волокон с одной или несколькими секциями оптических волокон разных типов и/или волокон, обладающих разной геометрической конфигурацией [7 – 19]. Примерами таких оптоволоконных структур служат SNS-структура (Singlemode-No core-Single mode) [9 – 11], SMSMS-структура (Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode) [12 – 15], структура из подводящего одномодового волокна, приваренной одномодовой секции со сдвигом и второго подводящего одномодового волокна [16, 17] и др. Такие структуры имеют два подводящих одномодовых волокна, и их СХ измеряется «на проход». Благодаря зеркальной симметрии можно изготовить аналогичные по свойствам структуры с зеркалом, одним подводящим одномодовым волокном и измерением СХ «на отражение» [17, 18]. При этом вдвое уменьшается длина чувствительной секции.

Принцип измерения параметров внешней среды вышеперечисленными интерферометрами заключается в том, что фазовый набег мод, возбуждаемых в чувствительной секции интерферометра, зависит от показателя преломления внешней среды. В структуре SNS таковыми служат моды волокна без сердцевины, а в SMSMS-структуре – оболочечные моды стандартного одномодового волокна в центральной секции, возбуждаемые за счет коротких (несколько десятков микрометров) многомодовых вставок. При этом типичная длина чувствительной секции составляет от нескольких до десятков сантиметров. Таким образом, результирующий интерференционный сигнал зависит от показателя преломления внешней среды.

Несмотря на множество научных публикаций на тему применения таких интерферометров для измерения параметров внешней среды, большинство из них носит экспериментальный характер. В некоторых работах приводятся в дополнение к эксперименту и численные расчеты распространения света в интерферометрах, выполненные в таких программах, как “BeamProp” с помощью метода “Beam Propagation Method” [18, 19] и “Comsol Wave Optics Toolbox” с помощью метода “Beam Envelope” [11]. Однако такие расчеты не позволяют выявлять причины возникновения наблюдавших спектральных характеристик интерферометров и находить пути повышения чувствительности интерферометров к изменению параметров внешней среды.

Для проведения такого анализа необходимо выполнять расчет всех мод (или наиболее значимых), которые распространяются в каждой из секций интерферометра, что представляет собой довольно трудоемкую задачу ввиду большого количества таких мод. Например, на длине волны 1,55 мкм в стандартном одномодовом волокне SMF-28, при осесимметричном возбуждении, имеется 46 направляемых оболочечных мод. Кроме того, в большинстве известных авторам работах обработка спектральных характеристик интерферометров осуществляется путем отслеживания позиций экстремумов вдоль шкалы длин волн. Однако в общем случае их поведение при изменении параметров внешней среды может оказаться в значительной мере нелинейным. Причина заключается в том, что СХ состоит из множества синусоид, число которых равно числу попарных комбинаций мод. Например, в волокне SMF-28 на длине волны 1,55 мкм таких комбинаций аж 1081 и они сильно перекрывают друг друга по частоте осцилляций. Более того, поскольку разные моды по-разному чувствительны к изменению показателя преломления, частоты и начальные фазы этих синусоид изменяются по-разному.

Таким образом, результирующая СХ в общем случае очень сложна и трудно предсказуема. Этот факт делает разработку такого датчика необычайно головоломной задачей, даже при использовании более продвинутых алгоритмов обработки сигналов.



Настоящая работа посвящена проведению такого расчета интерферометра и анализу эффективности цифровой обработки его спектральной характеристики. В качестве примера мы исследовали межмодовый волоконный интерферометр с одномодовым подключением на основе отражательной SMSMS-структуры.

Первый раздел статьи включает два подраздела. В первом из них представлена схема интерферометра, во втором – теоретические выражения для расчета его спектральной характеристики в условиях изменения концентрации аналита в растворе. Во втором разделе поясняются особенности применения дискретного преобразования Фурье к обработке спектральной характеристики интерферометра. В третьем разделе приведены итоговые расчеты интерферометра.

Спектральная характеристика межмодового волоконно-оптического интерферометра на основе отражательной SMSMS-структурь

Схема интерферометра. Рассматриваемый в работе межмодовый волоконный интерферометр на основе указанной отражательной структуры состоит из подводящего (input) одномодового оптоволокна (Singlemode Fiber (SMF)), вставки длиной в несколько десятков микрометров из многомодового оптоволокна (MultiMode Fiber (MMF)) с большим, чем у одномодового, диаметром сердцевины, секции из одномодового волокна длиной в несколько десятков сантиметров, чувствительной к изменению показателя преломления внешней среды и зеркала на торце этой секции (рис. 1).

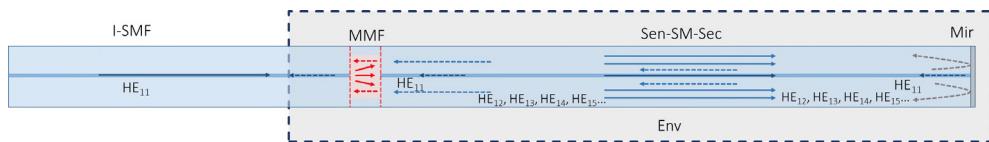


Рис. 1. Схема отражательной SMSMS-структурь:

I-SMF – подводящее одномодовое оптоволокно; MMF – многомодовое оптоволокно;
Sen-SM-Sec – чувствительная одномодовая секция; Mir – зеркало; Env – внешняя среда;
 HE_{ij} – обозначения мод; стрелки указывают направления распространения мод

Мода подводящего световода HE_{11} возбуждает несколько мод короткого многомодового световода (MMF), которые в свою очередь позволяют добиться расходимости светового пучка, что необходимо для возбуждения оболочечных мод в чувствительном одномодовом световоде (Sen-SM-Sec). Они распространяются до зеркала (Mir) на торце световода и возвращаются обратно к многомодовой вставке (MMF), в которой опять же возбуждают несколько мод, формирующих в сечении торца подводящего одномодового волокна (I-SMF) сложное распределение электрического поля, которое есть результат суперпозиции полей пришедших мод. Интенсивность возбуждаемой этим распределением фундаментальной моды HE_{11} подводящего одномодового волокна зависит от разности фаз мод, которые распространяются в интерферометре, и должна меняться при изменении показателя преломления n внешней среды (Env).

Измеренная зависимость интенсивности света, отраженного от интерферометра и нормированная на интенсивность входного излучения, от длины волны есть спектральная характеристика интерферометра, или, в данном случае, фактическая зависимость его коэффициента отражения от длины волны.

Расчетные теоретические выражения. Для расчета спектральной характеристики (СХ) интерферометра мы использовали матричный подход, который учитывает многомодовый характер распространения света в обеих секциях интерферометра.

Коэффициент отражения интерферометра равен квадрату модуля от последовательного произведения нескольких матриц. Произведение включает следующие сомножители:

матрицы, состоящие из коэффициентов возбуждения мод в началах секций;

матрица, отражающая распространение мод вдоль многомодовой секции и содержащая постоянные распространения этих мод;

матрица, отражающая распространение фундаментальной и оболочечных мод вдоль чувствительной одномодовой секции и содержащая постоянные распространения этих мод, а также фазовый сдвиг на π при отражении от зеркала.

В этом случае выражение для коэффициента отражения интерферометра будет иметь следующий вид:

$$R = \left| A_{11,1q}^{\text{SM,MM}} e^{-j\beta_{1q}^{\text{MM}} L_{\text{MM}}} A_{1q,1p}^{\text{MM,SM}} e^{-2j\beta_{1p}^{\text{SM}} L_{\text{Sen}} - j\pi} A_{1p,1q}^{\text{SM,MM}} e^{-j\beta_{1q}^{\text{MM}} L_{\text{MM}}} A_{1q,11}^{\text{MM,SM}} \right|^2, \quad (1)$$

где q – радиальный индекс осесимметричной HE_{1q} моды в MMF-световоде (см. рис. 1); p – радиальный индекс (номер) осесимметричной моды HE_{1q} в световоде I-SMF ($p = 1$ для фундаментальной моды, $p > 1$ для оболочечных мод HE_{1p}); λ – длина световой волны; L_{MM} , L_{Sen} – величины длины световодов MMF и Sen-SM-Sec, соответственно; $\beta_{1q}^{\text{MM}}, \beta_{1q}^{\text{SM}}$ – матрицы постоянных распространения мод HE_{1q} в световоде MMF и HE_{1q} в Sen-SM-Sec, соответственно; $A_{11,1q}^{\text{SM,MM}}$ – матрица коэффициентов возбуждения мод HE_{1q} MM световода MMF фундаментальной модой HE_{11} подводящего световода I-SMF; $A_{1q,1p}^{\text{MM,SM}}$ – матрица коэффициентов возбуждения фундаментальной моды HE_{11} и оболочечных мод HE_{1p} чувствительного световода Sen-SM-Sec модами HE_{1q} световода MMF; $A_{1p,1q}^{\text{SM,MM}}$ – матрица коэффициентов возбуждения мод HE_{1q} MMF фундаментальной модой HE_{11} и оболочечными модами HE_{1p} чувствительного световода Sen-SM-Sec; $A_{1q,11}^{\text{MM,SM}}$ – матрица коэффициентов возбуждения фундаментальной моды HE_{11} модами световода HE_{1q} световода MMF.

Матрицы постоянных распространения мод в световодах MMF и Sen-SM-Sec с обозначениями MM и SM имеют диагональный вид:

$$\beta_{1q}^{\text{MM}} = \begin{pmatrix} \beta_{11}^{\text{MM}} & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \beta_{1q}^{\text{MM}} \end{pmatrix}, \quad \beta_{1p}^{\text{SM}} = \begin{pmatrix} \beta_{11}^{\text{SM}} & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \beta_{1p}^{\text{SM}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Коэффициенты возбуждения мод находим путем вычисления интеграла перекрытия по следующей формуле:

$$a_{1p,1q}^{\text{SM,MM}} = \frac{\left| \int \mathbf{E}_{1p}^{\text{SM}*} \cdot \mathbf{E}_{1q}^{\text{MM}} dS \right|}{\sqrt{\int |\mathbf{E}_{1p}^{\text{SM}}|^2 dS \int |\mathbf{E}_{1q}^{\text{MM}}|^2 dS}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{E}_{1p}^{\text{SM}}, \mathbf{E}_{1q}^{\text{MM}}$ – векторные поперечные модовые функции (их комплексные амплитуды) возбуждающей моды HE_{1p} чувствительного одномодового волокна Sen-SM-Sec и возбуждаемой моды вставки многомодового волокна MMF (см. рис. 1); dS – элемент площадки торца оптического волокна; звездочкой помечен оператор комплексного сопряжения.

Матрицы коэффициентов возбуждения записываются следующим образом:

$$A_{1p,1q}^{\text{SM,MM}} = \begin{pmatrix} a_{11,11}^{\text{SM,MM}} & a_{11,12}^{\text{SM,MM}} & \dots & a_{11,1Q}^{\text{SM,MM}} \\ a_{12,11}^{\text{SM,MM}} & \ddots & & a_{12,1Q}^{\text{SM,MM}} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{1P,11}^{\text{SM,MM}} & a_{1P,12}^{\text{SM,MM}} & \dots & a_{1P,1Q}^{\text{SM,MM}} \end{pmatrix}, \quad A_{1q,1p}^{\text{MM,SM}} = \begin{pmatrix} a_{11,11}^{\text{MM,SM}} & a_{11,12}^{\text{MM,SM}} & \dots & a_{11,1P}^{\text{MM,SM}} \\ a_{12,11}^{\text{MM,SM}} & \ddots & & a_{12,1Q}^{\text{MM,SM}} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{1Q,11}^{\text{MM,SM}} & a_{1P,12}^{\text{MM,SM}} & \dots & a_{1Q,1P}^{\text{MM,SM}} \end{pmatrix} = A_{1p,1q}^{\text{SM,MMH}}, \quad (4)$$

$$A_{11,1q}^{\text{SM,MM}} = (a_{11,11}^{\text{SM,MM}} \ a_{11,12}^{\text{SM,MM}} \ \dots \ a_{11,1Q}^{\text{SM,MM}}), \quad A_{1q,11}^{\text{MM,SM}} = \begin{pmatrix} a_{11,11}^{\text{MM,SM}} \\ a_{12,11}^{\text{MM,SM}} \\ \vdots \\ a_{1Q,11}^{\text{MM,SM}} \end{pmatrix} = A_{11,1q}^{\text{SM,MMH}},$$

где P – количество рассматриваемых фундаментальной и оболочечных мод чувствительного одномодового волокна Sen-SM-Sec; Q – количество рассматриваемых мод вставки из многомодового волокна; верхним индексом H обозначена операция эрмитова сопряжения матрицы.

Применение дискретного преобразования Фурье к обработке спектральной характеристики интерферометра

Следует отметить, что многомодовая вставка имеет длину в несколько десятков микрометров (это на четыре порядка меньше длины чувствительной одномодовой секции), поэтому осциллирующую часть спектральной характеристики интерферометра можно приближенно записать следующим образом:

$$S(\lambda) \approx \bar{S}(\lambda) + \sum_{\eta=1}^P \sum_{\mu=p+1}^P s_{1\eta,1\mu}(\lambda) \cdot \cos[\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda)], \quad (5)$$

где η, μ – номера компонент осесимметричных интерферирующих мод $HE_{1\eta}$ и $HE_{1\mu}$ чувствительного одномодового волокна SMF.

Выражение (5) представляет собой сумму уровня $\bar{S}(\lambda)$, не зависимого от разности фаз, и косинусоидальных компонент с амплитудами $s_{1\eta,1\mu}(\lambda)$ и аргументами в виде разности фаз мод $HE_{1\eta}$ и $HE_{1\mu}$; эта разность фаз следует выражению

$$\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda) = 2L_{Sen}[\beta_{1\eta}(\lambda) - \beta_{1\mu}(\lambda)],$$

которое фактически равно волновому числу $k_0 = 2\pi/\lambda$, умноженному на разность оптических путей мод:

$$n_{1\eta}^{eff}(\lambda) \cdot 2L_{Sen} - n_{1\mu}^{eff}(\lambda) \cdot 2L_{Sen},$$

где $n_{1\eta}^{eff}, n_{1\mu}^{eff}$ – эффективные показатели преломления мод с номерами η и μ .

Число таких компонент равно количеству попарных комбинаций мод HE_{1p} , равному $(C_P)^2$.

Если зависимость $\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda)$ в используемом спектральном окне $\Delta\lambda$ близка к линейной, а амплитуды $s_{1\eta,1\mu}$ почти не зависят от длины волны, то косинусоидальные компоненты спектральной характеристики можно рассматривать как гармонические.

Тогда аргумент косинуса в формуле (5) можно описать следующим выражением:

$$\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda) \approx \Omega_{1\eta,1\mu} \cdot \lambda + \Theta_{1\eta,1\mu}, \quad (6)$$

и спектральную характеристику в данном спектральном окне можно рассматривать как сумму гармонических компонент с пространственными частотами $\Omega_{1\eta,1\mu}$ и начальными фазами $\Theta_{1\eta,1\mu}$. Тогда демодуляцию сигнала интерферометра можно свести к задаче оценки частот и фаз полигармонической спектральной характеристики.

При измерении СХ интерферометра система опроса регистрирует набор отсчетов S_i , причем i – номер отсчета, указывающий длину волны света в вакууме, т.е. $S_i = S(\lambda_i)$ в спектральном окне $\Delta\lambda$ с шагом $\Delta\lambda$ и центром диапазона сканирования длины волны λ_0 .

Пусть N – общее количество отсчетов, тогда законы изменения длины волны во втором случае можно записать в виде

$$\lambda_i = \lambda_0 + [i - (N - 1)/2] \cdot \Delta_\lambda,$$

где i меняется от 0 до $N - 1$, а интервал сканирования $\Delta\lambda = \Delta_\lambda \cdot (N - 1)$.

В этом случае задача демодуляции спектральной характеристики интерферометра сводится к задаче оценки частот и фаз гармонических компонент следующей числовой последовательности:

$$v(i) = w(i) \left\{ \bar{S}_i + \sum_{\eta=1}^P \sum_{\mu=p+1}^P s_{1\eta,1\mu} \cos[\omega_{1\eta,1\mu} \cdot i + \theta_{1\eta,1\mu}] \right\}, \quad (7)$$

где $w(i)$ – используемое весовое окно; $\omega_{1\eta,1\mu}$ – круговые частоты гармонических компонент числовой последовательности (измеряются в рад), $\theta_{1\eta,1\mu}$, рад, – начальные фазы.

Круговые частоты задаются следующими выражениями [20]:

$$\omega_{1\eta,1\mu} = \Delta_\lambda \Omega_{1\eta,1\mu}, \quad (8)$$

$$\theta_{1\eta,1\mu} = [\lambda_0 - \Delta\lambda / 2] \cdot \Omega_{1\eta,1\mu} + \Theta_{1\eta,1\mu}. \quad (9)$$

Частоты (8) можно находить путем определения позиций максимумов модуля Фурье-образа числовой последовательности $v(i)$, а приращения фаз $\Delta\theta_{1\eta,1\mu}$ – путем вычисления приращений аргументов Фурье-образа ровно в соответствующем максимуме либо путем такого вычисления Фурье-образа $\Delta\psi(\omega_i)$ на фиксированных частотах ω_i в области соответствующих максимумов.

При этом в случае использования симметричного весового окна $w(i)$ выражение для расчета $\Delta\psi(\omega_i)$ записывается в следующем виде:

$$\Delta\psi(\omega_i) = \lambda_0 \cdot \Delta\Omega_{1\eta,1\mu} + \Delta\Theta_{1\eta,1\mu}. \quad (10)$$

Непосредственно точки Фурье-образа числовой последовательности можно находить путем расчета дискретного преобразования Фурье (DFT). Для увеличения заполнения Фурье-образа точками перед использованием DFT последовательность $v(i)$ можно дополнить нулями [20]. Также для снижения ошибок в оценке частот и фаз целесообразно применять вместо прямоугольного окна специальные окна, например, окна Хана, Хэмминга, Блэкмана, Чебышева и др. [20].

Таким образом, при изменении показателя преломления внешней среды будут изменяться постоянные распространения интерферирующих мод, что приведет к изменению пространственных частот $\Omega_{1\eta,1\mu}$ и начальных фаз $\Theta_{1\eta,1\mu}$ СХ, что отразится в изменении положения соответствующих максимумов Фурье-образа регистрируемой СХ и в изменении аргументов Фурье-образа в областях этих максимумов.

Результаты расчета интерферометра и обработки его спектральных характеристик с помощью дискретного преобразования Фурье

Численное моделирование было проведено для следующих характеристик интерферометра (см. рис. 1):

диапазон значений длины световой волны $\lambda = 1,51 - 1,59$ мкм, шаг $\Delta\lambda = 0,16$ нм;

модель одномодового волокна SMF-28 включала сердцевину из кварца диаметром 8,2 мкм (кварц легирован 3,5% германия) и оболочку из кварца диаметром 125 мкм;

модель многомодового волокна Thorlabs GIF625 включала сердцевину из кварца диаметром 62,5 мкм (кварц легирован 8,5% германия в центре сечения сердцевины) и оболочку из кварца диаметром 125 мкм;

длина секции MMF $L_{MM} = 50$ мкм;

длина чувствительной секции Sen-SM-Sec $L_{Sen} = 27$ см;

внешняя среда состояла из раствора глицерина в дистиллированной воде в диапазоне массовых концентраций 0 – 25 % при температуре 23°C.

Для численного расчета световодов необходима информация о дисперсионных зависимостях показателей преломления сердцевины, оболочки и внешней среды (их зависимости от световой длины волны). Для расчета дисперсионных зависимостей кварца с примесями оксида германия при температуре 23°C были использованы подходы, предложенные в работах [21 – 23]. Для расчета дисперсионной зависимости воды при такой же температуре использовались данные из работ [24, 25], а глицерина – из работы [26]. Для расчета дисперсионной зависимости раствора глицерина в воде было использовано предположение о линейной зависимости его показателя преломления от массовой доли глицерина в растворе [27]. Соответствующие зависимости представлены на рис. 2.

Численное моделирование световодов интерферометра было проведено путем численного решения волнового уравнения методом конечных элементов для электрического поля в заданной частотной области. При этом на заданной частоте численно решалось уравнение Гельмгольца для электрического поля, а затем искалось решение в виде волны. Были рассчитаны распределения полей и эффективные показатели преломления

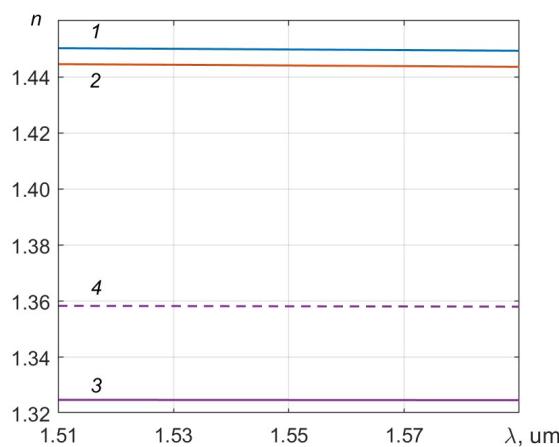


Рис. 2. Дисперсионные зависимости показателей преломления сред, входящих в рассматриваемую SMSMS-структуре: 1 – сердцевина волокна, 2 – его оболочка, 3 – водная внешняя среда, 4 – 25%-й водный раствор глицерина (также моделируемая внешняя среда)

на для описания поведения SMSMS-структуры, рассматриваемой в работе.

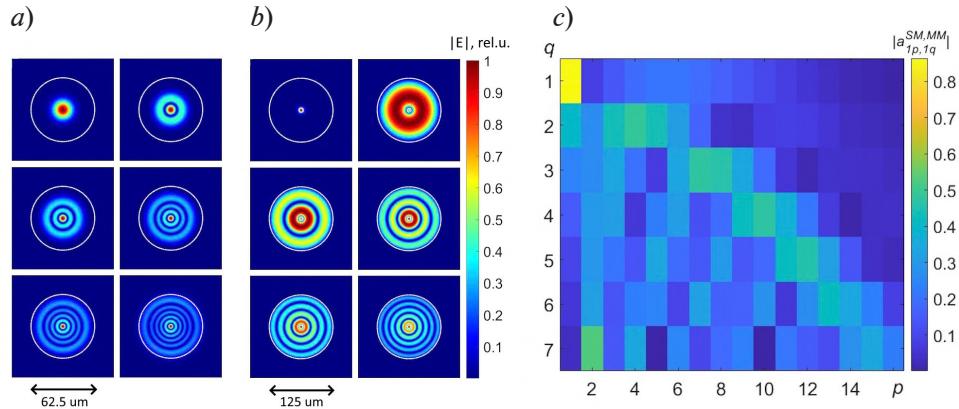


Рис. 3. Рассчитанные распределения напряженности электрических полей первых шести мод HE_{1q} световодов MMF (a) и Sen-SM-Sec (b), а также коэффициенты возбуждения $|a_{1p,1q}^{SM,MM}|$ мод HE_{1p} в световоде Sen-SM-Sec модами HE_{1q} световода MMF (c)

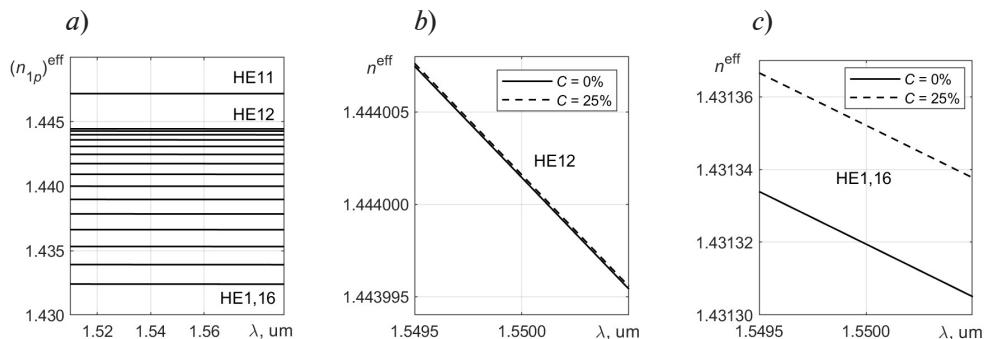


Рис. 4. Зависимости эффективного показателя преломления $(n_{1p})^{eff}$ набора мод HE_{1p} световода Sen-SM-Sec от световой длины волны (a), а также увеличенные фрагменты этих зависимостей (n^{eff}) для мод HE_{12} (b) и $HE_{1,16}$ (c), построенные для чистой воды ($C = 0 \%$) и водного раствора глицерина ($C = 25\%$)

На рис. 4, *a* представлены рассчитанные зависимости эффективного показателя преломления мод $HE_{1\mu}$ световода Sen-SM-Sec от длины световой волны. На рис. 4, *b* и *c* приведены эти зависимости для мод $HE_{1,2}$ и $HE_{1,16}$, соответственно для чистой воды и 25%-го водного раствора глицерина. Видно, что с увеличением номера моды возрастает ее чувствительность к изменению концентрации глицерина.

Как упоминалось выше, интерференционные компоненты спектральных характеристик определяются аргументами косинуса в выражении (5) $\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda)$. Установлено, что в рассматриваемой структуре наиболее значимы компоненты, относящиеся к интерференции фундаментальной моды с оболочечными ($\eta = 1, \mu = 2 - 16$). На рис. 5 даны эти зависимости для воды и 25%-го водного раствора глицерина. Видно, что некоторые из них довольно близки к линейным, а некоторые — заметно нелинейные; последнее приведет к тому, что такие интерференционные компоненты будут скорее всего входить в СХ как гармонические, с более глубокой частотной модуляцией.

Далее для каждой из компонент (несмотря на небольшую нелинейность некоторых из них) была проведена аппроксимация величины $\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}(\lambda)$ линейной функцией для нахождения частот $\Omega_{1\eta,1\mu}$ и начальных фаз $\Theta_{1\eta,1\mu}$ соответствующих гармонических компонент. После этого по формулам (8) и (9) были рассчитаны приращения частот ($\Delta\omega_{1\eta,1\mu}$) и фаз ($\Delta\theta_{1\eta,1\mu}$) гармонических компонент числовой последовательности $v(i)$ при изменении концентрации глицерина в воде. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Как и ожидалось, сигнал интерференции фундаментальной и оболочечной мод оказался все более чувствительным к изменению концентрации глицерина с увеличением номера оболочечной моды.

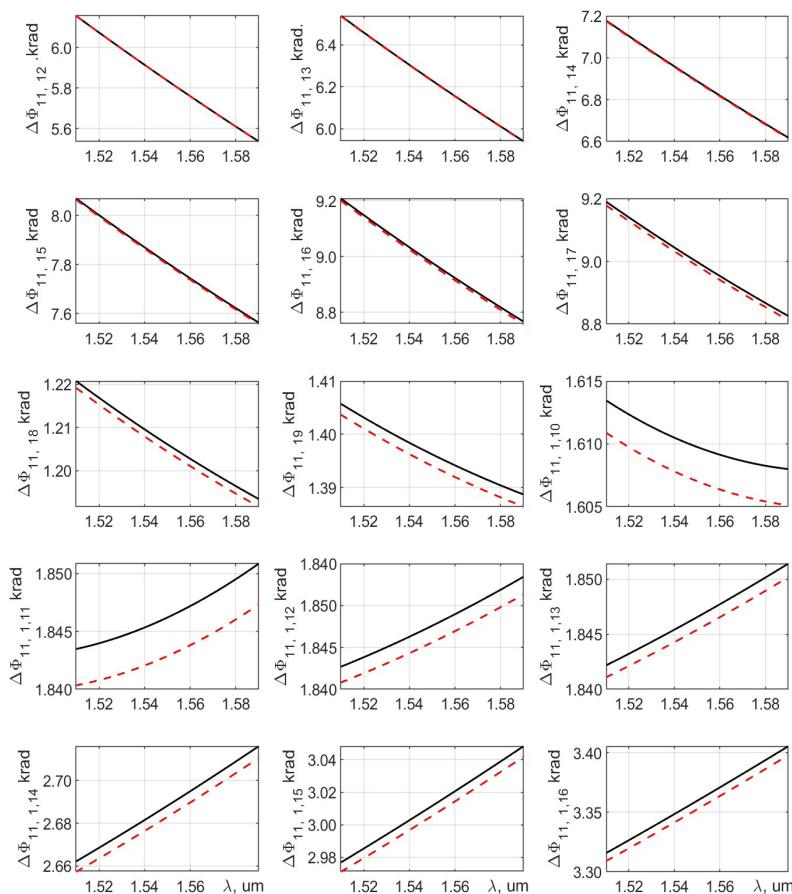


Рис. 5. Зависимости разности фаз $\Delta\Phi_{1\eta,1\mu}$ между модами HE_{11} от длины световой волны λ чувствительного волокна Sen-SM-Sec, построенные для чистой воды (сплошные линии) и 25%-го водного раствора глицерина (пунктиры)

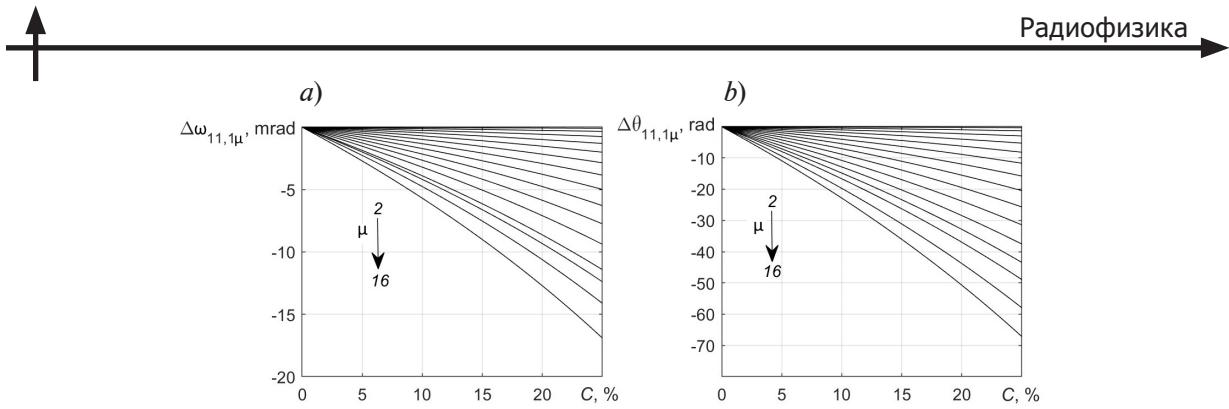


Рис. 6. Зависимости приращения частот $\Delta\omega_{11,1\mu}$ (а) и фаз $\Delta\theta_{11,1\mu}$ (б)
гармонических компонент числовой последовательности $v(i)$
от концентрации C глицерина в воде; стрелки указывают изменение μ

На заключительном этапе были рассчитаны спектральные характеристики интерферометра при различных концентрациях глицерина в водном растворе (рис. 7). Видно, что они имеют сложный осциллирующий характер. На рис. 8 приведены модули Фурье-образов спектральных характеристик, вычисленные с помощью DFT, с дополнением СХ нулями и применением окна Хана с указанием позиций частот $\omega_{11,1\mu}$ для 15 гармонических интерференционных компонент, соответствующих парам мод $HE_{11} - HE_{1\mu}$ ($\mu = 2 - 16$). Анализ данных на рис. 8 позволяет заключить, что компонентам с номерами $\mu = 5, 6, 8, 9, 12, 15, 16$ однозначно соответствуют максимумы Фурье-образа. Стоит отметить, что максимумы заметно уширены ввиду отклика зависимостей $\Delta\Phi_{11,1\mu}(\lambda)$ от линейных, что можно интерпретировать как наличие частотной модуляции гармонических компонент. Позиции пар компонент с $\mu = 2$ и $\mu = 3$, $\mu = 4$ и $\mu = 14$, $\mu = 7$ и $\mu = 13$, $\mu = 10$ и $\mu = 11$ расположены очень близко друг к другу, и, как видно на рисунке, их отклики в Фурье-образе накладываются друг на друга и интерфеcируют. Также искажение формы максимумов вызвано эффектом спектрального просачивания в DFT (взаимное влияние боковых лепестков компонент). Кроме того, на все перечисленные компоненты оказывают влияние компоненты от пар мод $HE_{1\eta} - HE_{1\mu}$ с номерами $\eta \neq 1$, но, как мы убедились, их амплитуда на порядок меньше, поэтому их влияние менее значительно. Все

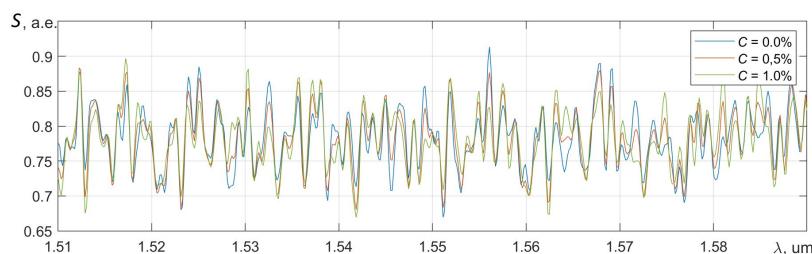


Рис. 7. Рассчитанные спектральные характеристики SMSMS-структурь
для трех значений концентрации C глицерина в водном растворе

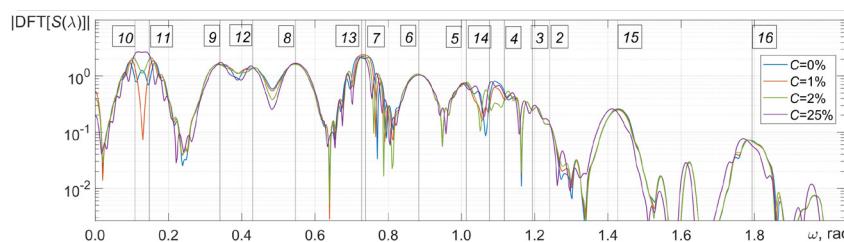


Рис. 8. Рассчитанные модули Фурье-образов числовых последовательностей $v(i)$ спектральных характеристик SMSMS-структурь для четырех значений концентрации C глицерина в водных растворах.

Положения $\omega_{11,1\mu}$ 15 гармонических интерференционных компонент, соответствующих парам мод $HE_{11} - HE_{1\mu}$, для μ от 2 до 16 указаны вертикальными тонкими линиями с номерами μ в квадратиках

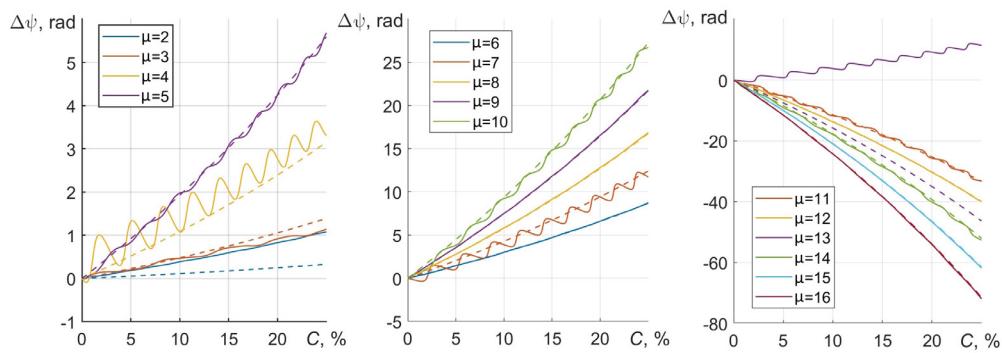


Рис. 9. Концентрационные зависимости приращения аргументов $\Delta\psi(\omega_i)$ DFT, полученные двумя способами: из рассчитанных спектральных характеристик для компонент $HE_{11}-HE_{1\mu}$ (сплошные линии) и по формуле (10) (пунктиры) (C – концентрация глицерина в водном растворе).

Для наглядности даны три графика для трех групп значений номера μ

указанные нежелательные эффекты ведут к появлению методической погрешности определения приращений начальных фаз гармонических компонент последовательности $v(i)$ спектральной характеристики, которые будут рассмотрены далее.

Таблица

Расчетные результаты для параметров чувствительности Фурье-образа интерферометра

μ	$\Delta\psi/\Delta C$, рад/%	$\Delta\psi/\Delta n$, рад/RIU	ΔC , %	$\Delta n, 10^{-3}$ RIU
2	0,013	9,8	57,0	76,0
3	0,056	41,6	4,80	6,40
4	0,130	94,4	6,60	8,80
5	0,220	167	0,67	0,90
6	0,350	260	0,13	0,18
7	0,500	371	2,13	2,85
8	0,670	501	0,16	0,22
9	0,870	650	0,14	0,19
10	1,100	816	0,69	0,92
11	-1,330	-998	0,57	0,76
12	-1,600	-1184	0,13	0,17
13	-1,850	-1386	31,0	42,0
14	-2,080	-1557	0,60	0,80
15	-2,460	-1840	0,13	0,18
16	-2,860	-2137	0,18	0,24

Обозначения: μ – номер интерференционной компоненты; $\Delta\psi/\Delta C$, $\Delta\psi/\Delta n$ – величины чувствительности аргумента Фурье-образа к концентрации глицерина в водном растворе и к показателю преломления на длине волны 1,55 мкм; ΔC , Δn – методические погрешности определения концентрации глицерина и показателя преломления оптоволокна.

На рис. 9 приведены результаты расчета приращений аргументов $\Delta\psi(\omega_i)$ DFT от рассчитанных СХ при изменении концентрации глицерина в воде от 0 до 25%. Также приведены результаты расчетов ожидаемых значений $\Delta\psi(\omega_i)$ (см. формулу (10)) для случая полного отсутствия каких-либо источников методической погрешности. Для компонент с номерами $\mu = 2 - 5$, 7 , 10 , 14 , 16 присутствуют заметные осциллирующие методические ошибки, типичные при применении DFT к оценке начальных фаз компонент полигармонического сигнала.

Необходимо отметить, что при обработке с помощью DFT, для компонент с $\mu = 1 - 10$, обладающих частотами $\omega_{11,1\mu} < 0$, выбирались их зеркальные аналоги также с $\omega_{11,1\mu} < 0$, поэтому соответствующие им приращения $\Delta\psi(\omega_i) > 0$ (в отличие от приращений фаз $\Delta\theta_{11,1\mu}$, представленных на рис. 6).

В таблице приведены итоговые расчетные результаты для всех рассматриваемых компонент: чувствительности аргументов Фурье-образа к концентрации $\Delta\psi/\Delta C$, рад/%, пересчитанные из них значения чувствительности аргументов Фурье-образа к показателю преломления раствора на длине волны 1,55 мкм $\Delta\psi/\Delta n$, рад/RIU, методические погрешности определения концентрации глицерина в растворе ΔC , %, и показателя преломления Δn . Наименьшие ошибки определения концентрации глицерина и показателя преломления составили значения примерно 0,13% и $1,7 \cdot 10^{-4}$ RIU, соответственно (выделены жирным шрифтом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu W., Huang X. G., Pan J. S. Simple fiber-optic refractive index sensor based on Fresnel reflection and optical switch // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 13. No. 5. Pp. 1571–1574.
2. Brientin A., Leduc D., Gaillard V., Girard M., Lupi C. Numerical and experimental study of a multimode optical fiber sensor based on Fresnel reflection at the fiber tip for refractive index measurement // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 143. November. P. 107315.
3. Гущин М. Г., Гагаринова Д. О., Плясцов С. А., Вартанян Т. А. Создание и определение чувствительности волоконно-оптического рефрактометра на основе поверхностного плазмонного резонанса // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 9. С. 1212–1216.
4. Казанский Н. Л., Бутт М. А., Дегтярев С. А., Хонина С. Н. Достижения в разработке плазмонных волноводных датчиков для измерения показателя преломления // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 3. С. 295–318.
5. Мамичев Д. А., Кузнецов И. А., Маслова Н. Е., Занавескин М. Л. Оптические сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса для высокочувствительного биохимического анализа // Молекулярная медицина. 2012. № 6. С. 19–27.
6. Pevec S., Donlagic D. Miniature fiber-optic Fabry–Perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5×10^{-9} RIU // Optics Express. 2018. Vol. 26. No. 18. Pp. 23868–23882.
7. Wang K., Dong X., Köhler M. H., Kienle P., Bian Q., Jakobi M., Koch A. W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): A review // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 21. No. 1. Pp. 132–142.
8. Chapalo I., Stylianou A., Mégret P., Theodosiou A. Advances in optical fiber speckle sensing: A comprehensive review // Photonics. 2024. Vol. 11. No. 4. P. 299.
9. Mar-Abundis N., Fuentes-Rubio Y. A., Domínguez-Cruz R. F., Guzmán-Sepúlveda J. R. Sugar detection in aqueous solution using an SMS fiber device // Sensors. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 6289.
10. Li Y., Liu Z., Jian S. Multimode interference refractive index sensor based on coreless fiber // Photonic Sensors. 2014. Vol. 4. March. Pp. 21–27.
11. Khanikar T., Karki D., Su Y. D., Naeem K., Ohodnicki P. Multimode interference-based fiber optic sensors using single mode/no-core/single mode (SNS) configuration // Proceedings of SPIE. Vol. 13044: Optical Waveguide and Laser Sensors III. Lieberman R. A., Sanders G. A., Buric M. P. (Eds.). 2024. 27 June. Pp. 114–122.
12. Ma Y., Qiao X., Guo T., Wang R., Zhang J., Weng Y., Rong Q., Hu M., Feng Zh. Mach – Zehnder interferometer based on a sandwich fiber structure for refractive index measurement // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 12. No. 6. Pp. 2081–2085.
13. Xiong R., Meng H., Yao Q., Huang B., Liu Y., Xue H., Tan Ch., Huang X. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on modal interference // IEEE Sensors Journal. 2014. Vol. 14. No. 8. Pp. 2524–2528.
14. Wo J., Sun Q., Li X., Zhang J., Liu D., Shum P. A compact all fiber refractive index sensor based on modal interference // Proceedings of IEEE Sensors. 2012. 1 October. Pp. 1–4.
15. Юсупова Л. И., Иванов О. В. Интерферометры на основе вставок оптических волокон с тонкой сердцевиной SM600 и SM450 // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 9. С. 74–78.
16. Duan D. W., Rao Y. J., Xu L. C., Zhu T., Wu D., Yao J. In-fiber Mach–Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity // Sensors and Actuators B: Chemical. 2011. Vol. 160. No. 1. Pp. 1198–1202.
17. Tian Z., Yam S. S., Loock H. P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. Vol. 20. No. 16. Pp. 1387–1389.
18. Zhang Y., Zhou A., Qin B., Deng H., Liu Z., Yang J., Yuan L. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers // Journal of Lightwave Technology. 2014. Vol. 32. No. 9. Pp. 1734–1740.
19. Wang P., Brambilla G., Ding M., Semenova Y., Wu Q., Farrell G. Investigation of single-mode–multimode–single-mode and single-mode–tapered-multiplex–single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing // Journal of the Optical Society of America B. 2011. Vol. 28. No. 5. Pp. 1180–1186.
20. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-time signal processing. Pearson New International Edition. London: Pearson Education Limited, 2014. 1047 p.

21. Tripathi S. M., Kumar A., Varshney R. K., Tripathi S. M., Kumar A., Varshney R. K., Kumar Y. B. P., Marin E., Meunier J. P. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode–multimode–single-mode structures // Journal of Lightwave Technology. 2009. Vol. 27. No. 13. Pp. 2348–2356.
22. Tripathi S. M., Kumar A., Kumar M., Bock W. J. Temperature-insensitive fiber-optic devices using multimode interference effect // Optics Letters. 2012. Vol. 37. No. 22. Pp. 4570–4572.
23. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // Journal of the Optical Society of America A. 2016. Vol. 33. No. 7. Pp. 1244–1256.
24. Kedenburg S., Vieweg M., Gissibl T., Giessen H. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region // Optical Materials Express. 2012. Vol. 2. No. 11. Pp. 1588–1611.
25. Abbate G., Bernini U., Ragozzino E., Somma F. The temperature dependence of the refractive index of water // Journal of Physics D: Applied Physics. 1978. Vol. 11. No. 8. P. 1167.
26. Nyakuchena M., Juntunen C., Shea P., Sung Y. Refractive index dispersion measurement in the short-wave infrared range using synthetic phase microscopy // Physical Chemistry Chemical Physics. 2023. Vol. 25. No. 34. Pp. 23141–23149.
27. Takamura K., Fischer H., Morrow N. R. Physical properties of aqueous glycerol solutions // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. Vol. 98–99. November. Pp. 50–60.

REFERENCES

1. Xu W., Huang X. G., Pan J. S., Simple fiber-optic refractive index sensor based on Fresnel reflection and optical switch, IEEE Sens. J. 13 (5) (2012) 1571–1574.
2. Briantin A., Leduc D., Gaillard V., et al., Numerical and experimental study of a multimode optical fiber sensor based on Fresnel reflection at the fiber tip for refractive index measurement, Opt. Laser Technol. 143 (Nov) (2021) 107315.
3. Gushchin M. G., Gagarinova D. O., Plyastsov S. A., Vartanyan T. A., Development and determination of sensitivity of a fiber-optic refractometer based on surface plasmon resonance, Optics and Spectroscopy. 129 (9) (2021) 1212–1216 (in Russian).
4. Kazanskiy N. L., Butt M. A., Degtyarev S. A., Khonina S. N., Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index, Computer Optics. 44 (3) (2020) 295–318 (in Russian).
5. Mamichev D. A., Kuznetsov I. A., Maslova N. E., Zanaveskin M. L., Optical sensors based on surface plasmon resonance for high-sensitive biochemical analysis, Molecular Medicine. (6) (2012) 19–27 (in Russian).
6. Pevec S., Donlagic D., Miniature fiber-optic Fabry-Perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5×10^{-9} RIU, Opt. Express. 26 (18) (2018) 23868–23882.
7. Wang K., Dong X., Köhler M. H., et al., Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): A review, IEEE Sens. J. 21 (1) (2020) 132–142.
8. Chapalo I., Stylianou A., Mégret P., Theodosiou A., Advances in optical fiber speckle sensing: A comprehensive review, Photonics. 11 (4) (2024) 299.
9. Mar-Abundis N., Fuentes-Rubio Y. A., Domínguez-Cruz R. F., Guzmán-Sepúlveda J. R., Sugar detection in aqueous solution using an SMS fiber device, Sensors. 23 (14) (2023) 6289.
10. Li Y., Liu Z., Jian S., Multimode interference refractive index sensor based on coreless fiber, Photon. Sens. 4 (March) (2014) 21–27.
11. Khanikar T., Karki D., Su Y. D., et al., Multimode interference-based fiber optic sensors using single mode/no-core/single mode (SNS) configuration, Proc. SPIE. Vol. 13044: Optical Waveguide and Laser Sensors III; Lieberman R. A., Sanders G. A., Buric M. P. (Eds.). 27 June (2024) 114–122.
12. Ma Y., Qiao X., Guo T., et al., Mach – Zehnder interferometer based on a sandwich fiber structure for refractive index measurement, IEEE Sens. J. 12 (6) (2012) 2081–2085.
13. Xiong R., Meng H., Yao Q., et al., Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on modal interference, IEEE Sens. J. 14 (8) (2014) 2524–2528.
14. Wo J., Sun Q., Li X., et al., A compact all fiber refractive index sensor based on modal interference, Proc. IEEE Sens. (1 Oct) (2012) 1–4.
15. Yusupova L. I., Ivanov O. V., Interferometers based on insertions of thin-core optical fibers SM600 and SM450, J. Radioengineering. 83 (9) (2019) 74–78 (in Russian).

16. Duan D. W., Rao Y. J., Xu L. C., et al., In-fiber Mach-Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity, *Sens. Actuators B-Chem.* 160 (1) (2011) 1198–1202.
17. Tian Z., Yam S. S., Loock H. P., Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20 (16) (2008) 1387–1389.
18. Zhang Y., Zhou A., Qin B., et al., Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers, *J. Light. Technol.* 32 (9) (2014) 1734–1740.
19. Wang P., Brambilla G., Ding M., et al., Investigation of single-mode–multimode–single-mode and single-mode–tapered-m multimode–single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing, *J. Opt. Soc. Am. B* 28 (5) (2011) 1180–1186.
20. Oppenheim A. V., Schafer R. W., *Discrete-time signal processing*. Pearson New Int. Ed., Pearson Education Limited, London, 2014.
21. Tripathi S. M., Kumar A., Varshney R. K., et al., Strain and temperature sensing characteristics of single-mode–multimode–single-mode structures, *J. Light. Technol.* 27 (13) (2009) 2348–2356.
22. Tripathi S. M., Kumar A., Kumar M., Bock W. J., Temperature-insensitive fiber-optic devices using multimode interference effect, *Opt. Lett.* 37 (22) (2012) 4570–4572.
23. Markel V. A., Introduction to the Maxwell Garnett approximation: Tutorial, *J. Opt. Soc. Am. A* 33 (7) (2016) 1244–1256.
24. Kedenburg S., Vieweg M., Gissibl T., Giessen H., Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region, *Opt. Mater. Express.* 2 (11) (2012) 1588–1611.
25. Abbate G., Bernini U., Ragozzino E., Somma F., The temperature dependence of the refractive index of water, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 11 (8) (1978) 1167.
26. Nyakuchena M., Juntunen C., Shea P., Sung Y., Refractive index dispersion measurement in the short-wave infrared range using synthetic phase microscopy, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 25 (34) (2023). 23141–23149.
27. Takamura K., Fischer H., Morrow N. R., Physical properties of aqueous glycerol solutions, *J. Pet. Sci. Eng.* 98–99 (Nov) (2012) 50–60.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАВАЛИШИНА Любовь Дмитриевна — стажер-исследователь научной лаборатории волоконной оптики Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

1.zavalishina9121@mail.ru

ORCID: 0009-0009-2008-7266

МАРКВАРТ Александр Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

markvart_aa@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-8080-0830

ЗАРИПОВ Артур Эдуардович — студент Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

artur-zaripov-2001@list.ru

БИСЯРИН Михаил Александрович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

bisyarin@spbu.ru

ORCID: 0000-0003-3891-1339

ЛИОКУМОВИЧ Леонид Борисович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

leonid@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5988-1429

УШАКОВ Николай Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

n.ushakoff@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-3480-2779

THE AUTHORS

ZAVALISHINA Liubov D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

l.zavalishina9121@mail.ru

ORCID: 0009-0009-2008-7266

MARKVART Aleksandr A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

markvart_aa@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-8080-0830

ZARIPOV Artur E.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

artur-zaripov-2001@list.ru

ORCID: 0009-0002-1689-6940

BISYARIN Mikhail A.

St. Petersburg State University

7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

m.bisyarin@spbu.ru

ORCID: 0000-0003-3891-1339

LIOKUMOVICH Leonid L. B.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

leonid@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5988-1429

USHAKOV Nikolai A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

n.ushakoff@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-3480-2779

Статья поступила в редакцию 07.05.2025. Одобрена после рецензирования 14.05.2025.
Принята 14.05.2025.

Received 07.05.2025. Approved after reviewing 14.05.2025. Accepted 14.05.2025.