

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

УДК 515.321.9

Модель чувствительного элемента рефрактивного волоконно-оптического сенсора на основе MMF-SMF-MMF структуры с использованием поверхностного плазмонного резонанса

Кирилл Антонович Ивойлов¹✉, Диана Олеговна Гагаринова², Аделия Алексеевна Зыкина³, Игорь Касьянович Мешковский⁴, Семён Алексеевич Плясцов⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ kirivoilov@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>

² dogagarinova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>

³ adeliya.zykina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

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

⁵ plyastsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

Аннотация

Введение. Представлена математическая модель чувствительного элемента рефрактометрического волоконно-оптического датчика, принцип действия которого основан на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Конструкция чувствительного элемента представляет собой последовательное соединение многомодового (MMF), одномодового (SMF) и многомодового волокон, образующих MMF-SMF-MMF структуру. SMF-участок покрыт тонкой пленкой золота. **Метод.** Для моделирования элемента применен подход, используемый при расчете классической конфигурации Кречмана для объемных оптических структур. Показатель преломления волокна рассчитан на основе уравнения Селлмейера, а показатель преломления золота определен с использованием модели Друдэ. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментально полученными спектрами пропускания изготовленных образцов чувствительных элементов. **Основные результаты.** Для апробации модели изготовлены чувствительные элементы волоконно-оптических датчиков со следующими параметрами: диаметры сердцевин многомодового волокна 62,5 мкм, одномодового волокна — 9 мкм, покрытие SMF-участка пленкой из золота толщиной 50 нм. Получены спектры пропускания чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков в водных растворах глюкозы различной концентрации. Продемонстрировано, что предложенная модель хорошо описывает полученные в результате экспериментов спектры пропускания чувствительных элементов на основе MMF-SMF-MMF структур в области поверхностного плазмонного резонанса. **Обсуждение.** Разработанная модель может найти применение при оптимизации конструкции чувствительного элемента рефрактометрических волоконно-оптических датчиков с целью повышения чувствительности. Модель может быть использована при разработке алгоритма опроса чувствительных элементов на основе волоконных MMF-SMF-MMF структур.

Ключевые слова

поверхностный плазмонный резонанс, гетеросердцевинная структура, оптоволоконный датчик, измерение показателя преломления

Ссылка для цитирования: Ивойлов К.А., Гагаринова Д.О., Зыкина А.А., Мешковский И.К., Плясцов С.А. Модель чувствительного элемента рефрактивного волоконно-оптического сенсора на основе MMF-SMF-MMF структуры с использованием поверхностного плазмонного резонанса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 448–454. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

A model of a refractive fiber optic sensor sensing element based on MMF-SMF-MMF structure using surface plasmon resonance

Kirill A. Ivoilov¹, Diana O. Gagarinova², Adeliia A. Zykina³, Igor K. Meshkovskiy⁴, Semyon A. Plyastsov⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ kirivoilov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>

² dogagarinova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>

³ adeliya.zykina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

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

⁵ plyastsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

Abstract

This paper presents a mathematical model of the sensitive element of a refractometric fiber-optic sensor the principle of operation of which is based on the phenomenon of surface plasmon resonance. The sensing element design is a sequential connection of a multimode fiber (MMF), a single-mode fiber (SMF), and a multimode fiber forming an MMF-SMF-MMF structure. The SMF site is coated with a thin film of gold. To model the element, the approach used in calculating the classical Kretschmann configuration for volumetric optical structures was applied. The refractive index of the fiber is calculated based on the Sellmeyer equation, and the refractive index of the gold is determined using the Drude model. The simulation results are compared with experimentally obtained transmission spectra of fabricated samples of sensing elements. For approbation of the model, the sensing elements of fiber-optic sensors with the following parameters are made: core diameter of multimode fiber 62.5 μm , core diameter of singlemode fiber 9 μm , coating SMF-segment with 50 nm gold film. Transmission spectra of fiber-optic sensor sensing elements in aqueous glucose solutions of various concentrations were obtained. It is demonstrated that the proposed model describes well the experimentally obtained transmission spectra of sensitive elements based on MMF-SMF-MMF structures in the region of surface plasmon resonance. The proposed model can be used to optimize the design of the sensitive element of refractometric fiber-optic sensors in order to increase the sensitivity. The proposed model implies its use in the development of an algorithm for interrogation of sensing elements based on fiber MMF-SMF-MMF structures.

Keywords

surface plasmon resonance, heterocore structure, fiber optic sensor, refractive index measurement

For citation: Ivoilov K.A., Gagarinova D.O., Zykina A.A., Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. A model of a refractive fiber optic sensor sensing element based on MMF-SMF-MMF structure using surface plasmon resonance. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 448–454 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

Введение

На сегодняшний день существуют различные варианты конструкции датчиков, основывающихся на применении явления поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [1–4]. Одним из таких вариантов является устройство чувствительного элемента на основе гетеросердцевинной структуры, реализуемой путем сращивания нескольких оптических волокон различных типов. Данный вид датчика обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами, такими как простота изготовления и механическая прочность.

Одна из наиболее часто встречаемых структур — последовательная сварка MMF-SMF-MMF (Multi-Mode fiber, MMF, Single-Mode fiber, SMF) [5]. При изменении показателя преломления изменяется резонансная длина волны, что может отразиться на спектре пропускания ППР-датчика [6–8].

При проектировании конструкции промышленного датчика необходимо разработать алгоритм опроса датчика и теоретическую модель, позволяющую предварительно рассчитывать отклик датчика для заданной конфигурации чувствительного элемента. В настоящей работе представлена математическая модель чувствительного элемента рефрактометрического волоконно-оптического датчика, принцип действия которого основан на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Результаты моделирования сопоставлены с

экспериментальными данными, полученными на опытном образце.

Описание модели чувствительного элемента MMF-SMF-MMF конструкции

Схема MMF-SMF-MMF структуры показана на рис. 1. Свет, передаваемый по многомодовому волокну 1, проходит через одномодовое волокно 2, разделяясь на моды сердцевинки и оболочки. Пройдя через одномодовое волокно 2, свет направляется в многомодовое оптическое волокно 3. Для обеспечения условий существования плазмонного резонанса поверхность SMF-участка покрыта металлом, обычно золотом или серебром.

Спектральные характеристики структуры на рис. 1 в первую очередь зависят от длин участков MMF и SMF. В работе [9] сделан вывод, что показания датчика главным образом зависят от длины одномодового участка.

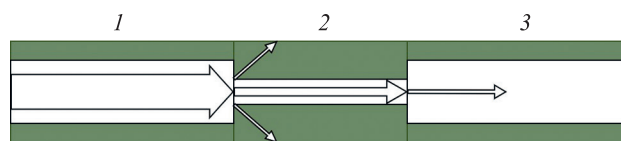


Рис. 1. Схема MMF-SMF-MMF структуры
Fig. 1. Schematic of the MMF-SMF-MMF structure

В зависимости от типа волоконного датчика длина SMF в среднем варьируется от 10 до 50 мм [10, 11]. В работе [12] представлена модель структуры MMF-SMF-MMF чувствительного элемента, основанная на электромагнитной модели распространении света. Авторами сделан вывод, что длина участка SMF не является решающей, и что его можно максимально сократить. В настоящей работе показано, что длина участка SMF влияет на ширину резонансного пика и его интенсивность, поэтому при разработке высокочувствительных датчиков следует подбирать данный параметр под условия конкретной задачи. В результате исследования не было обнаружено научных работ с описанием простых моделей, которые можно применить для разработки алгоритмов опроса волоконно-оптических датчиков, использующих поверхностный плазмонный резонанс.

Выполним расчет оптических процессов, происходящих в чувствительном элементе датчика, с помощью программного обеспечения Mathcad и формул поверхностного плазмонного резонанса для классической схемы Кречмана, выведенных в работе [13]. Определим показатель преломления волокна n_0 , изготовленного из плавленого кварца оптического качества (SiO_2), выраженный из уравнения Селлмейера [14, 15].

$$n_0(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0,8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9,896161)^2} + \frac{0,4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0,1162414)^2} + \frac{0,6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0,0684043)^2}},$$

где λ — длина волны; числа — значения коэффициентов Селлмейера для SiO_2 .

Вычислим комплексный показатель преломления золотой пленки. Для этого рассчитаем комплексную диэлектрическую проницаемость золота ϵ_1 в приближении Друдэ [16].

$$\epsilon_1(\lambda) = 1 - \frac{(\sqrt{f_0}\omega_p)^2}{\omega(\lambda)(\omega(\lambda) + i\Gamma_0)} + \frac{f_1\omega_p^2}{(\omega_1^2 - \omega(\lambda)^2) - i\omega(\lambda)\Gamma_1} + \dots + \frac{f_5\omega_p^2}{(\omega_5^2 - \omega(\lambda)^2) - i\omega(\lambda)\Gamma_5}, \quad (1)$$

где ω_p — плазменная частота; ω — угловая частота волны; f_0, f_1, \dots, f_5 — сила осциллятора; $\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_5$ — коэффициенты демпфирования. Величины для

подстановки в формулу (1) были получены из работы [17] и представлены в таблице.

Показатель преломления золота n_1 вычислен как действительная часть квадратного корня из диэлектрической проницаемости ϵ_1 , а коэффициент экстинкции k_1 — как мнимая часть квадратного корня из диэлектрической проницаемости ϵ_1 .

Для простоты рассмотрения возьмем приближение геометрической оптики.

Рассчитаем коэффициент отражения волокна, покрытого золотой пленкой на основе уравнений Френеля [13]. Для этого используем модель Кречмана, в которой слой с номером 0 обозначает подложку или призму, 1 — слой металла, 2 — среду, например воздух. Таким образом, преломление на границе подложка-металл и границе металл-воздух опишем в виде:

$$r_{01}(\lambda, \theta) = \frac{\frac{\cos\theta}{n_0(\lambda)} - \frac{\sqrt{\epsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_1(\lambda)}}{\frac{\cos\theta}{n_0(\lambda)} + \frac{\sqrt{\epsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_1(\lambda)}}$$

$$r_{12}(\lambda, \theta, n) = \frac{\frac{\sqrt{\epsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_1(\lambda)} - \frac{\sqrt{\epsilon_2(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_2(\lambda)}}{\frac{\sqrt{\epsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_1(\lambda)} + \frac{\sqrt{\epsilon_2(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\epsilon_2(\lambda)}}$$

где $\epsilon_2(\lambda)$ — диэлектрическая проницаемость среды как квадрат показателя преломления; n_0 — показатель преломления волокна; θ — угол падения.

Вычислим поляризуемость и коэффициент отражения всей трехслойной структуры [13].

$$\alpha(\lambda, \theta) = \frac{2i\omega(\lambda)}{c} d\sqrt{\epsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}; \quad (2)$$

$$r_{012}(\lambda, \theta, n) = \frac{r_{01}(\lambda, \theta) + r_{12}(\lambda, \theta, n)\exp(\alpha(\lambda, \theta))}{1 + r_{01}(\lambda, \theta)r_{12}(\lambda, \theta, n)\exp(\alpha(\lambda, \theta))}$$

где α — поляризуемость; c — скорость света; d — толщина пленки; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость золота.

Вследствие того, что в выражении (2) получены комплексные результаты, возьмем модуль рассчитанного коэффициента отражения:

Таблица. Коэффициенты для подстановки в формулу (1)

Table. Coefficients for substitution in formula (1)

Сила осциллятора	Плазменная частота, рад/с	Угловая частота волны, рад/с	Коэффициенты демпфирования, рад/с
$f_0 = 0,760$	$\omega_p = 1,369 \cdot 10^{16}$	—	$\Gamma_0 = 8,052 \cdot 10^{13}$
$f_1 = 0,024$		$\omega_1 = 6,305 \cdot 10^{14}$	$\Gamma_1 = 3,661 \cdot 10^{14}$
$f_2 = 0,010$		$\omega_2 = 1,261 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_2 = 5,241 \cdot 10^{14}$
$f_3 = 0,071$		$\omega_3 = 4,511 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_3 = 1,322 \cdot 10^{15}$
$f_4 = 0,601$		$\omega_4 = 6,539 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_4 = 3,789 \cdot 10^{15}$
$f_5 = 4,384$		$\omega_5 = 2,024 \cdot 10^{16}$	$\Gamma_5 = 3,364 \cdot 10^{15}$

$$r(\lambda, \theta, n) = r_{012}(\lambda, \theta, n)r_{012}(\lambda, \theta, n)^*$$

где знак «*» — комплексно-сопряженное выражение.

Чтобы получить резонансные кривые, рассчитаем интенсивность отраженного излучения [18]. Значение нижнего предела основано на величине числовой апертуры волокна.

$$R(\lambda, n) = \frac{\int_{82}^{88} r(\lambda, \theta, n) d\theta}{\int_{82}^{88} 1 d\theta}. \quad (3)$$

Пределы интегрирования в выражении (3) выберем во время расчета модели из критерия максимального соответствия спектров прохождения, рассчитанных при помощи рассматриваемой модели и экспериментальными данными. Распространение света внутри волокна возможно только при выполнении закона полного внутреннего отражения, что приводит к ограничению максимального входного и выходного угла падения света (на рис. 2 обозначен как θ_m). Данный фактор задает нижний предел интеграла. Часть излучения, движущаяся вдоль оси волокна, попадает из сердцевины MMF в SMF, не участвуя в ППР (на рис. 2 представлен стрелкой вдоль сердцевины волокон). Данный фактор задает верхний предел интеграла.

Сравнение разработанной модели с экспериментальными данными

Для апробации разработанной модели проведен ряд экспериментов. Создано четыре конструкции MMF-SMF-MMF с различными длинами SMF-участка: 3, 7, 10 и 15 мм. Изготовление образцов выполнено в несколько этапов: соединены в помощью сварки участки MMF и SMF; выполнено скалывание одномодового волокна до необходимой длины при помощи скалывателя Fujikura CT-30; осуществлена сварка второго отрезка многомодового волокна при помощи сварочного аппарата Fujikura FSM 100P. Выполнено нанесение золотой пленки толщиной 50 нм на участок одномодового волокна методом термического напыления в установке Kurt J. Lesker PVD 75. Для наблюдения поверхностного плазмонного резонанса применена экспериментальная установка (рис. 3).

Эксперимент проведен следующим образом: чувствительный элемент вместе с закрепленным зеркалом

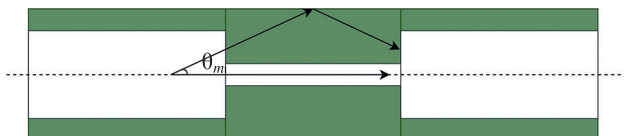


Рис. 2. Схема распространения лучей в MMF-SMF-MMF структуре

Fig. 2. Scheme of light ray propagation in the MMF-SMF-MMF structure

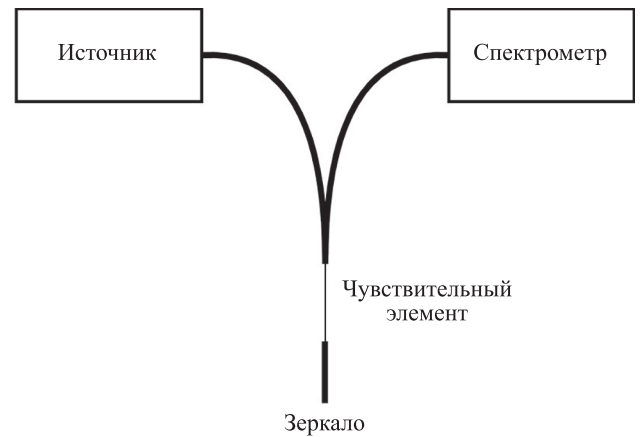


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки

Fig. 3. Optical scheme of the experimental setup

на конце многомодового участка волокна помещался в емкости с водными растворами глюкозы различной концентрации: 0, 4, 10, 20, 30, 40 и 50 %. Контроль процентного содержания глюкозы проводился при помощи весов Госметр ВЛТЭ-310. Излучение от широкополосного источника (галогеновая лампа AlphaBright с оптоволоконным выходом и со спектром 400–2100 нм) попадало в длинный участок многомодового волокна, затем проходило через конструкцию чувствительного элемента, отражалось от зеркала и детектировалось на спектрометре АВЕСТА ASP-150. Экспериментальные измерения и расчет моделей проведен в диапазоне длин волн 500–900 нм.

Для проверки результатов спектры пропускания, полученные из модели, объединим на одном графике с экспериментальными. На рис. 4 видно, что рассчитанный спектр вблизи резонансной длины волны близок к экспериментальным данным, однако при отдалении от нее спектры разработанной модели все сильнее отличаются от экспериментальных данных. По этой причине спектры были ограничены до диапазона 610–825 нм. При этом в диапазоне частот $\lambda_{рез.} \pm 25$ нм относительная погрешность не превышает 5,6 % для участка SMF длиной 15 мм. При уменьшении длины одномодового волокна относительная погрешность снижается. Так при длине SMF равной 3 мм относительная погрешность для того же диапазона частот не превышает 1,7 %. Изменение длины SMF-участка приводит к изменению формы резонансного пика и его интенсивности. При удлинении SMF с 3 мм до 15 мм резонансный пик уширяется, а интенсивность пропускаемого излучения уменьшается в среднем в 1,597 раз на резонансной длине волны.

Различия теоретических результатов и эксперимента можно объяснить тем, что в областях вне 450–850 нм интенсивность спектра источника излучения очень мала, что повышает погрешность измерений спектров. Данная модель может стать основой для разработки алгоритма опроса волоконно-оптического чувствительного на основе поверхностного плазмонного резонанса.

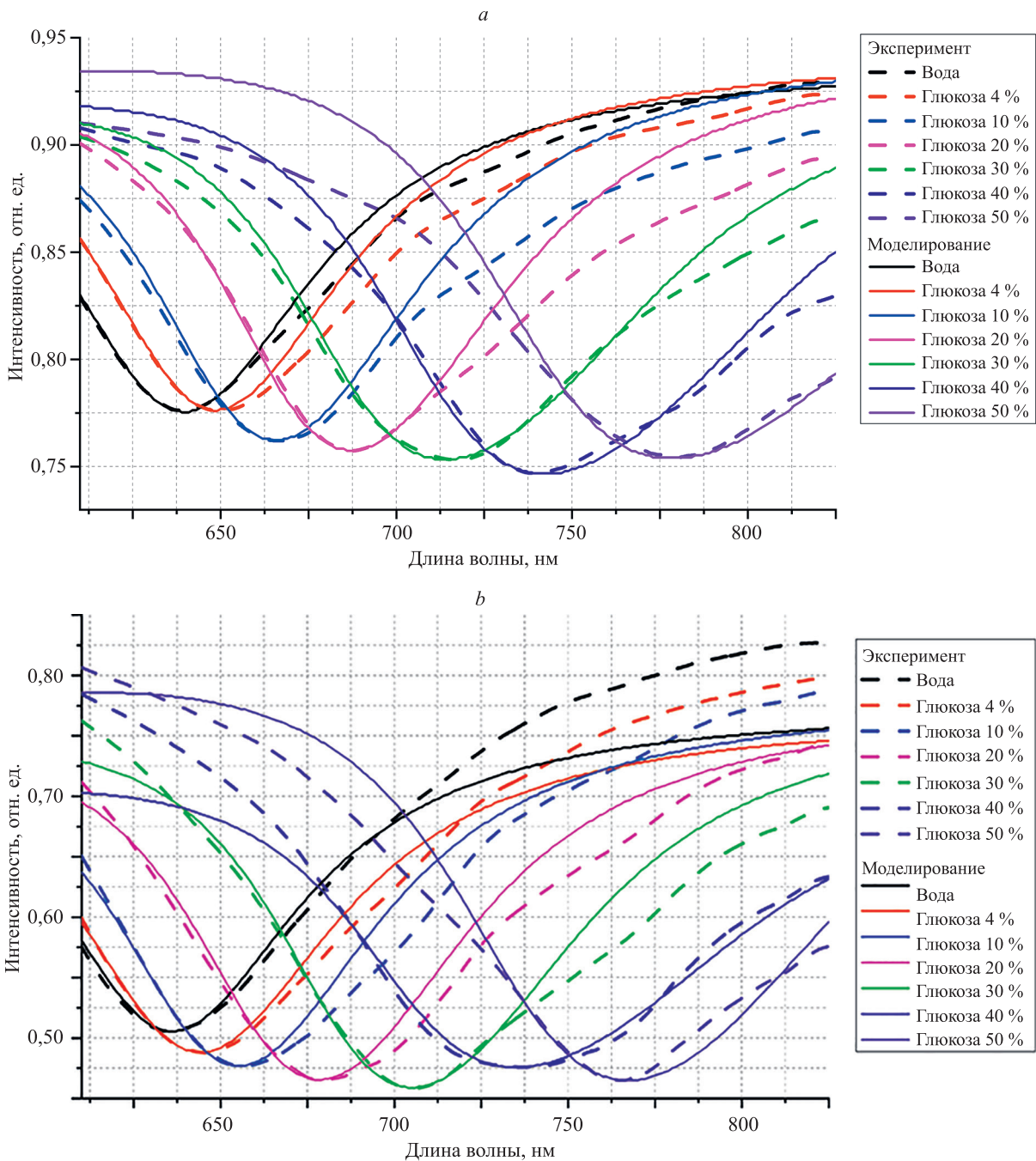


Рис. 4. Полученные спектры пропускания при помощи разработанной модели и экспериментальных данных для волокон с длинами SMF-участка: 3 мм (а) и 15 мм (б)

Fig. 4. Model-derived and experimental transmittance spectra for a structure with an SMF member length of 3 mm (a) and 15 mm (b)

Заключение

В работе представлена модель для расчетов спектров пропускания чувствительных элементов волоконно-оптических рефрактометрических датчиков на основе MMF-SMF-MMF структур. Экспериментально продемонстрировано, что предложенный подход на основе схемы Кречмана может быть успешно применен

для аппроксимации спектров пропускания волоконно-оптических чувствительных элементов.

Разработанную модель предполагается применить для расчета спектров пропускания в волоконно-оптических датчиках, оптимизации конструкции датчика, длины одномодового участка, количества слоев и толщин покрытий.

Литература

1. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species // *Chemical Reviews*. 2008. V. 108. N 2. P. 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
2. Miyazaki C.M., Shimizu F.M., Ferreira M. Surface plasmon resonance (SPR) for sensors and biosensors // *Nanocharacterization Techniques*. 2017. P. 183–200. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00006-0>
3. Wang X., Ma M., Wang X., Wang S. Surface plasmon resonance sensors for concentration and reaction kinetic detections // *Analytical Chemistry — Advancement, Perspectives and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92549>
4. Mrksich M., Sigal G.B., Whitesides G.M. Surface plasmon resonance permits in situ measurement of protein adsorption on self-assembled monolayers of alkanethiolates on gold // *Langmuir*. 1995. V. 11. N 11. P. 4383–4385. <https://doi.org/10.1021/la00011a034>
5. Nguyen L.V., Hwang D., Moon S., Moon D.S., Chung Y. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 15. P. 11369–11375. <https://doi.org/10.1364/OE.16.011369>
6. Xu F., Chen D., Peng B., Xu J., Wu G. All-fiber refractometer based on core mismatch structure // *Laser Physics*. 2012. V. 22. N 10. P. 1577–1580. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12100271>
7. 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. V. 32. N 9. P. 1734–1740. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2311579>
8. Marfu'ah, Amalia N.R., Hatta A.M., Pratama D.Y. Multimode-singlemode-multimode optical fiber sensor coated with novolac resin for detecting liquid phase alcohol // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1945. P. 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5030253>
9. Yin B., Li Y., Liu Z., Feng S., Bai Y., Xu Y., Jian S. Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure // *Optics & Laser Technology*. 2016. V. 80. P. 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.12.018>
10. Sun A., Wu Z., Wan C., Yang C. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure // *Optik*. 2012. V. 123. N 13. P. 1138–1139. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.07.040>
11. Sun T., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Jing Z., Peng W. All-fiber liquid-level sensor based on in-line MSM fiber structure // *Photonic Sensors*. 2021. V. 11. N 3. P. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s13320-020-0586-1>
12. Roy P., Chaudhuri P.R. Characteristics of cladding mode-based refractive index sensor using MMF-SMF-MMF configuration // *Journal of Optics*. 2023. V. 52. N 1. P. 296–306. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00885-1>
13. Yamamoto M. Surface plasmon resonance (SPR) theory: Tutorial // *Review of Polarography*. 2002. V. 48. N 3. P. 209–237. <https://doi.org/10.5189/revpolarography.48.209>
14. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals // *Physical Review B*. 1972. V. 6. N 12. P. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
15. Tan C.Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1998. V. 223. N 1-2. P. 158–163. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
16. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices // *Applied Optics*. 1998. V. 37. N 22. P. 5271–5283. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005271>
17. Hashemi M., Xiao S., Farzad M.H. Phase study of the generated surface plasmon waves in light transmission through a subwavelength aperture // *Journal of Nanophotonics*. 2014. V. 8. N 1. P. 083094. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.8.083094>
18. Poljak D., Cvetković M. Theoretical background: an outline of Computational Electromagnetics (CEM) // *Human Interaction with Electromagnetic Fields*. 2019. P. 21–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816443-3.00010-8>

References

1. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chemical Reviews*, 2008, vol. 108, no. 2, pp. 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
2. Miyazaki C.M., Shimizu F.M., Ferreira M. Surface plasmon resonance (SPR) for sensors and biosensors. *Nanocharacterization Techniques*, 2017, pp. 183–200. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00006-0>
3. Wang X., Ma M., Wang X., Wang S. Surface plasmon resonance sensors for concentration and reaction kinetic detections. *Analytical Chemistry — Advancement, Perspectives and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92549>
4. Mrksich M., Sigal G.B., Whitesides G.M. Surface plasmon resonance permits in situ measurement of protein adsorption on self-assembled monolayers of alkanethiolates on gold. *Langmuir*, 1995, vol. 11, no. 11, pp. 4383–4385. <https://doi.org/10.1021/la00011a034>
5. Nguyen L.V., Hwang D., Moon S., Moon D.S., Chung Y. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 15, pp. 11369–11375. <https://doi.org/10.1364/OE.16.011369>
6. Xu F., Chen D., Peng B., Xu J., Wu G. All-fiber refractometer based on core mismatch structure. *Laser Physics*, 2012, vol. 22, no. 10, pp. 1577–1580. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12100271>
7. 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. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2311579>
8. Marfu'ah, Amalia N.R., Hatta A.M., Pratama D.Y. Multimode-singlemode-multimode optical fiber sensor coated with novolac resin for detecting liquid phase alcohol. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1945, pp. 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5030253>
9. Yin B., Li Y., Liu Z., Feng S., Bai Y., Xu Y., Jian S. Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.12.018>
10. Sun A., Wu Z., Wan C., Yang C. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure. *Optik*, 2012, vol. 123, no. 13, pp. 1138–1139. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.07.040>
11. Sun T., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Jing Z., Peng W. All-fiber liquid-level sensor based on in-line MSM fiber structure. *Photonic Sensors*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s13320-020-0586-1>
12. Roy P., Chaudhuri P.R. Characteristics of cladding mode-based refractive index sensor using MMF-SMF-MMF configuration. *Journal of Optics*, 2023, vol. 52, no. 1, pp. 296–306. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00885-1>
13. Yamamoto M. Surface plasmon resonance (SPR) theory: Tutorial. *Review of Polarography*, 2002, vol. 48, no. 3, pp. 209–237. <https://doi.org/10.5189/revpolarography.48.209>
14. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 1972, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
15. Tan C.Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, vol. 223, no. 1-2, pp. 158–163. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
16. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, no. 22, pp. 5271–5283. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005271>
17. Hashemi M., Xiao S., Farzad M.H. Phase study of the generated surface plasmon waves in light transmission through a subwavelength aperture. *Journal of Nanophotonics*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 083094. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.8.083094>
18. Poljak D., Cvetković M. Theoretical background: an outline of Computational Electromagnetics (CEM). *Human Interaction with Electromagnetic Fields*, 2019, pp. 21–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816443-3.00010-8>

Авторы

Ивойлов Кирилл Антонович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>, kirivoilov@yandex.ru

Гагаринова Диана Олеговна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>, dogagarinova@itmo.ru

Зыкина Аделия Алексеевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adelia.zykina@gmail.com

Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, 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

Плясов Семён Алексеевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, plyastsov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 13.01.2023

Одобрена после рецензирования 26.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

Authors

Kirill A. Ivoilov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>, kirivoilov@yandex.ru

Diana O. Gagarinova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>, dogagarinova@itmo.ru

Adeliia A. Zykina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adelia.zykina@gmail.com

Igor K. Meshkovskiy — D.Sc., Full Professor, Chief Researcher, 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

Semyon A. Plyastsov — PhD, Head of Laboratory, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, plyastsov@itmo.ru

Received 13.01.2023

Approved after reviewing 26.04.2023

Accepted 29.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»