

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-222-228

УДК 681.7.068

Повышение чувствительности рефрактивного волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса и MMF-SMF-MMF структуры с помощью диэлектрических покрытий

Аделия Алексеевна Зыкина^{1✉}, Семён Алексеевич Плясцов², Игорь Аркадьевич Гладских³

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

¹ adelia.zykina@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

² s.plyastov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

³ 138020@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>

Аннотация

Введение. Представлены теоретические и экспериментальные исследования возможности повышения чувствительности рефрактивного волоконно-оптического датчика, принцип работы которого основан на эффекте поверхностного плазмонного резонанса. Конструкция чувствительного элемента состоит из последовательного соединения многомодового (MMF), одномодового (SMF) и многомодового волокна со структурой MMF-SMF-MMF. Для создания эффекта поверхностного плазмонного резонанса на одномодовый участок наносятся последовательно покрытия из металла (меди (Cu)) и диэлектрика (оксида алюминия (Al_2O_3), диоксида титана (TiO_2)), что позволяет получить более узкие резонансные пики. В результате упрощается процесс детектирования изменения длины волны и повышается чувствительность датчика. **Метод.** Математическое моделирование чувствительного элемента с многослойной поверхностной структурой выполнено с применением характеристических матриц. Матрицы составляются для каждого слоя чувствительного элемента в отдельности, после чего формируется характеристическая матрица всей структуры и рассчитывается коэффициент пропускания. По результатам моделирования выбираются варианты диэлектрического покрытия, определяются толщины слоев, позволяющие получить наименьшую ширину резонансного пика. **Основные результаты.** Для апробации результатов моделирования изготовлены образцы чувствительных элементов с диэлектрическим покрытием Al_2O_3 толщиной 60 и 100 нм и с покрытием TiO_2 толщиной 50 и 100 нм. Получены спектры пропускания чувствительных элементов на воздухе, в воде и спирте. Показано, что покрытие TiO_2 толщиной 50 нм позволяет повысить чувствительность волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса в три раза по сравнению с чувствительным элементом без диэлектрического покрытия. **Обсуждение.** Предложенный подход к усовершенствованию конструкции волоконно-оптического датчика дает возможность сместить получаемые резонансные максимумы в инфракрасную область спектра. Показана возможность применения более доступных волоконно-оптических элементов для работы с исследуемым датчиком.

Ключевые слова

поверхностный плазмонный резонанс, гетеросердцевидная структура, оптоволоконный датчик, повышение чувствительности волоконно-оптических датчиков, многослойные покрытия

Ссылка для цитирования: Зыкина А.А., Плясцов С.А., Гладских И.А. Повышение чувствительности рефрактивного волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса и MMF-SMF-MMF структуры с помощью диэлектрических покрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 222–228. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-222-228

Increasing the sensitivity of a refractive fiber-optic sensor based on surface plasmon resonance and MMF-SMF-MMF fiber using dielectric coatings

Adeliia A. Zykina¹✉, Semyon A. Plyastsov², Igor A. Gladskikh³

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

¹ adeliya.zykina@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

² s.plyastsov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

³ 138020@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>

Abstract

This paper presents theoretical and experimental research on improving the sensitivity of a refractive fiber-optic sensor operating on the principle of surface plasmon resonance (SPR). The sensitive element consists of a multimode-singlemode-multimode (MMF-SMF-MMF) fiber structure. To induce the SPR effect, the single-mode fiber section is sequentially coated with metal (Cu) and dielectric layers (Al_2O_3 , TiO_2), which results in narrower resonance peaks. This enhances wavelength shift detection and increases sensor sensitivity. Mathematical modeling of the sensitive element with a multilayer surface structure was conducted using characteristic matrices. Each layer of the sensitive element was individually characterized, followed by the formulation of the overall characteristic matrix to calculate the transmission coefficient. Based on the simulation results, optimal dielectric coatings and layer thicknesses were selected to achieve the narrowest resonance peak. To validate the simulation findings, sensitive element samples with dielectric coatings of Al_2O_3 (60 nm and 100 nm) and TiO_2 (50 nm and 100 nm) were fabricated. Transmission spectra were obtained in air, water, and ethanol. The results demonstrate that the proposed coating increases the sensitivity of the fiber-optic SPR sensor threefold compared to an uncoated sensitive element. The proposed approach not only enhances sensor sensitivity but also shifts the resonance peaks into the infrared spectral region. Additionally, the study highlights the feasibility of using more accessible fiber-optic components for the investigated sensor system.

Keywords

surface plasmon resonance, heterocore structure, fiber-optic sensor, increasing the sensitivity of fiber-optic sensors, multilayer coatings

For citation: Zykina A.A., Plyastsov S.A., Gladskikh I.A. Increasing the sensitivity of a refractive fiber-optic sensor based on surface plasmon resonance and MMF-SMF-MMF fiber using dielectric coatings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 222–228 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-222-228

Введение

В настоящее время волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) активно исследуются для различных применений в сфере медицины и фармакологии [1]. Например, с их помощью возможно измерение уровня концентрации в крови сывороточного белка Цистатин С, что необходимо для определения исходного функционального состояния почек и последующего его мониторинга [2]. Другим важным перспективным применением ВОД на основе ППР является количественное определение остатков антибактериальных препаратов в пищевой промышленности [3]. Такие ВОД отличаются высокой чувствительностью, селективностью, воспроизводимостью результатов и отсутствием необходимости предварительной обработки исследуемых образцов [1].

Для опроса чувствительного элемента (ЧЭ) в ППР-системах используются несколько вариантов подходов: фазовый метод опроса, опрос по интенсивности, измерение угла отражения излучения или длины волны пика поглощения ППР [4]. В первом случае получают синусоидальные спектральные интерференционные полосы с помощью детектирования фиксированной разности оптического пути между s - и p -поляризациями. Такой метод опроса наиболее чувствительный (10^{-8} – 10^{-9} RIU (Refractive Index Unit)), однако его существенным недостатком является значительная сложность и стоимость всей системы, так как для демодуляции фазы ППР требуется как минимум один электронный модуль, что также увеличивает вероятность зашумления сигнала

[5]. При применении метода опроса по интенсивности для достижения наибольшей чувствительности (10^{-5}) необходимо, чтобы угол падения и длина волны излучения были оптимизированы и строго зафиксированы [6]. В режиме углового опроса длина волны излучения фиксирована, и смещение провала ППР можно отслеживать путем непрерывного сканирования углов. По сравнению с режимом опроса по интенсивности, в режиме углового опроса можно устранить шум источника света, что приводит к относительно более высокой чувствительности [7]. При опросе по длине волны пика поглощения ППР угол отражения остается фиксированным, а сканирование происходит путем изменения длины волны излучения.

Существуют различные конструкции ВОД, основанные на эффекте ППР [8]. Один из вариантов — ЧЭ на основе гетеросердцевинной структуры, созданный путем сращивания оптических волокон разных типов. Такие датчики отличаются простотой изготовления и высокой механической прочностью. Наиболее распространенная структура — последовательная сварка MMF-SMF-MMF (Multi-Mode fiber, MMF, Single-Mode fiber, SMF), которая используется в различных сенсорах для измерения показателя преломления [9], уровня жидкости [10], температуры [11], акустических волн [12] и т. д.

Одним из наиболее перспективных вариантов повышения чувствительности ВОД на основе ППР является усовершенствование конструкции ЧЭ с помощью внедрения многослойного покрытия с чередующимся диэлектриком. В основе данной конструкции лежит

взаимодействие поверхностных плазмон поляритонов, которые образуются в металле, с волноводными модами и распространяются в дополнительном диэлектрическом покрытии. Таким образом, образуется «зеркальное» покрытие, которое усиливает ППП и значительно сужает результирующий спектр.

В качестве «зеркального» покрытия может выступать один слой диэлектрика, либо набор из нескольких слоев с большой разницей в показателе преломления каждого из материалов отдельного слоя. Это могут быть оксид магния (MgO), оксид цинка (ZnO), оксид алюминия (Al₂O₃), диоксид титана (TiO₂) и диоксид кремния (SiO₂) [13]. От толщины и количества диэлектрических слоев будет зависеть получаемый спектр ППП, поэтому данные параметры предварительно рассчитываются в зависимости от необходимого результата для конкретных применений.

С другой стороны, такая конструкция из диэлектрических слоев может не только уменьшить ширину резонансной кривой, но и сдвинуть ее в другую область спектра, например в инфракрасную [14]. Благодаря этому можно использовать перестраиваемый лазер с вертикально излучающим резонатором (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) для опроса с помощью изменения длины волны. Использование VCSEL позволит повысить чувствительность датчика, так как обладает достаточно узким спектром излучения. Однако рабочая длина волны излучения VCSEL лежит в инфракрасной области спектра, в то время как спектры ППП-металлов находятся в видимом диапазоне. Для решения данного несоответствия рабочих диапазонов длин волн предлагается сдвинуть спектр ППП в инфракрасную область путем нанесения на оптическое волокно дополнительного диэлектрического покрытия [15, 16].

Математическое моделирование конструкции чувствительного элемента

Для расчета параметров диэлектрического покрытия было выполнено математическое моделирование с помощью программного обеспечения Mathcad на основе характеристических матриц [17] и классической схемы Кретчманна. На рис. 1 приведена схема моделируемой части ЧЭ, коэффициент отражения которой рассчитывался. Полная схема ЧЭ была представлена и подробно описана в работе [18].

4	Исследуемая среда
3	Диэлектрическое покрытие 0–100 нм
2	Cu 50 нм
1	Cr 2 нм
0	Оптическое волокно

Рис. 1. Схема структуры слоев чувствительного элемента
Fig. 1. Scheme of the layers structure of the sensitive element

Слой под номером 0 обозначает оптическое волокно, которым была заменена призма из схемы Кретчманна, 1 — слой хрома (Cr), который наносится на оптическое волокно для лучшего нанесения металла, 2 — слой меди (Cu) толщиной 50 нм, 3 — слой диэлектрика, толщину и состав которого необходимо рассчитать, и 4 — исследуемая среда с известным показателем преломления, например воздух или вода. В качестве оптического волокна использовалось стандартное телекоммуникационное одномодовое волокно Corning SMF-28® Ultra с диаметром сердцевины 9 мкм и оболочки 125 мкм, со ступенчатым профилем показателя преломления и апертурой 0,14.

Для составления характеристической матрицы $\mathbf{M}_i$ для каждого слоя с номером i рассчитаем с помощью уравнений Селлмейера [19]:

— показатель преломления слоя n_i

$$n_i(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - b_1} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - b_2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - b_3}}, \quad (1)$$

— комплексную диэлектрическую проницаемость ε_i

$$\varepsilon_i(\lambda) = n_i^2(\lambda), \quad (2)$$

— коэффициент поглощения слоя q_i

$$q_i(\lambda, \theta) = \frac{\sqrt{\varepsilon_i(\lambda) - \varepsilon_{i-1}(\lambda) \sin^2 \theta}}{\varepsilon_i(\lambda)}, \quad (3)$$

— коэффициент нелинейного поглощения слоя β_i

$$\beta_i(\lambda, \theta) = \frac{2\pi d_i}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i(\lambda) - \varepsilon_{i-1}(\lambda) \sin^2 \theta}. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) подставим в уравнение:

$$\mathbf{M}_i(\lambda, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \frac{-i}{q_i} \sin \beta_i \\ -i q_i \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где λ — длина волны излучения; $a_{1,2,3}$ и $b_{1,2,3}$ — значения коэффициентов Селлмейера; θ — угол падения излучения; d_i — толщина слоя.

Ввиду того, что модель является упрощенной и направлена на прогнозирование диапазона длин волн ППП спектра, для расчета показателя преломления оптического волокна были взяты наборы коэффициентов Селлмейера для чистого кварца. Показатель преломления оболочки волокна отличается от сердцевины в третьем знаке после запятой, поэтому этой разницей в рамках данной модели можно пренебречь.

Далее была составлена характеристическая матрица $\mathbf{M}$ всей структуры ЧЭ и рассчитан ее коэффициент отражения r :

$$\mathbf{M}(\lambda, \theta) = \mathbf{M}_1(\lambda, \theta) \mathbf{M}_2(\lambda, \theta) \mathbf{M}_3(\lambda, \theta), \quad (6)$$

$$r(\lambda, \theta) = \frac{(\mathbf{M}(\lambda, \theta)_{0,0} + \mathbf{M}(\lambda, \theta)_{0,1} q_4(\lambda, \theta)) q_0(\lambda, \theta) - (\mathbf{M}(\lambda, \theta)_{1,0} + \mathbf{M}(\lambda, \theta)_{1,1} q_4(\lambda, \theta))}{(\mathbf{M}(\lambda, \theta)_{0,0} + \mathbf{M}(\lambda, \theta)_{0,1} q_4(\lambda, \theta)) q_0(\lambda, \theta) + (\mathbf{M}(\lambda, \theta)_{1,0} + \mathbf{M}(\lambda, \theta)_{1,1} q_4(\lambda, \theta))}, \quad (7)$$

где q_0 и q_4 — коэффициенты отражения слоев 0 и 4.

Используя приближения геометрической оптики, рассчитаем интенсивность отраженного излучения R

$$R(\lambda) = \frac{\int_{78}^{89} r(\lambda, \theta) d\theta}{\int_{78}^{89} 1 d\theta}, \quad (8)$$

где нижний предел был получен на основе числовой апертуры многомодового волокна (0,22), из которого излучение попадает в одномодовую часть, а верхний предел соответствует прямо проходящему лучу.

Моделирование проводилось для двух конструкций ЧЭ с различным составом слоя 3: Al_2O_3 толщиной 0–100 нм и TiO_2 толщиной 0–80 нм. В качестве исследуемой среды 4 использовалась вода.

Теоретически полученные спектры ППР (рис. 2) показали меньшую ширину на полувысоте и более резкий пик поглощения по сравнению с модельными спектрами без диэлектрического покрытия [18].

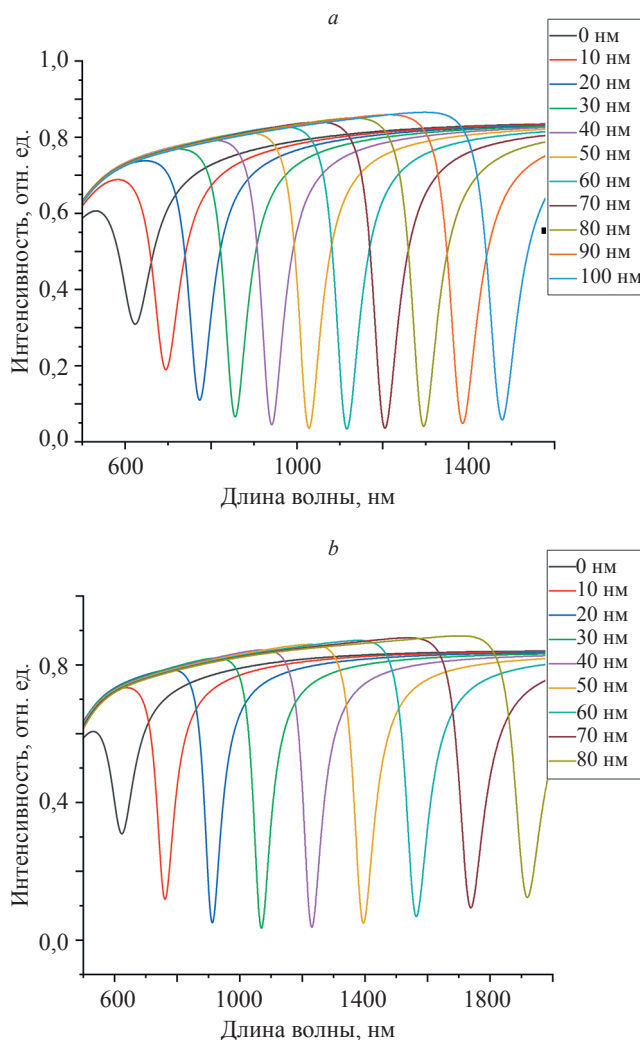


Рис. 2. Модельные спектры поверхностного плазмонного резонанса для разных толщин диэлектрического покрытия из Al_2O_3 (0–100 нм) (а) и TiO_2 (0–80 нм) (б) для воды

Fig. 2. Model SPR spectra for different thicknesses of dielectric coating made of Al_2O_3 (0–100 nm) (a) and TiO_2 (0–80 nm) (b) for water

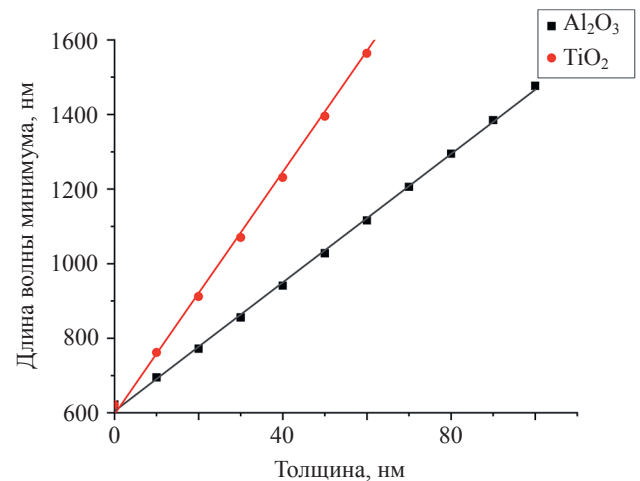


Рис. 3. Зависимость длины волны от толщины слоя Al_2O_3 и TiO_2

Fig. 3. Dependence of the wavelength vs. the thickness of the Al_2O_3 and TiO_2 layer

При увеличении толщины покрытия ППР сдвигается в длинноволновую область спектра (рис. 3). Для сдвига спектра до 1550 нм, что соответствует рабочей длине волны VCSEL, необходима толщина слоя покрытия Al_2O_3 — 100 нм, а TiO_2 — 60 нм.

Экспериментальная апробация результатов моделирования

Для апробации результатов моделирования были изготовлены четыре образца ЧЭ с различным составом и толщиной диэлектрического покрытия. Полная конструкция ЧЭ представляет собой структуру MMF-SMF-MMF, которая создается путем последовательной сварки одномодового участка (SMF) волокна длиной 15–17 мм между длинными участками многомодового волокна (MMF) [18]. Сварка производилась с помощью сварочного аппарата Fujikura FSM 100P. Сверху одномодового участка с помощью вакуумного напыления в установке Kurt J. Lesker PVD 75 были последовательно нанесены слои Cr толщиной 2 нм и Cu — 50 нм. Далее на первый образец нанесено покрытие из Al_2O_3 толщиной 60 нм, на второй — Al_2O_3 (100 нм), на третий — TiO_2 (50 нм) и на четвертый — TiO_2 (100 нм). Чистота напыляемых материалов была 99,99 %. Напыление производилось со скоростью до 0,1 нм/с при давлении остаточных паров не более $5 \cdot 10^{-6}$ Торр. Во время напыления образец вращался со скоростью 30 об/мин.

Эксперимент проводился следующим образом: ЧЭ через участок MMF волокна подключался к стабилизированному вольфрамово-галогенному источнику света Thorlabs с оптоволоконным выходом и широким диапазоном длин волн 360–2600 нм. Спектры пропускания измерялись с помощью оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370C. Экспериментальные измерения проводились в диапазоне длин волн 700–1700 нм, что соответствует диапазону спектроанализатора. В качестве исследуемой среды использовались: воздух, дистиллированная вода и этиловый спирт. Полученные спектры нормировались на спектр воздуха (рис. 4).

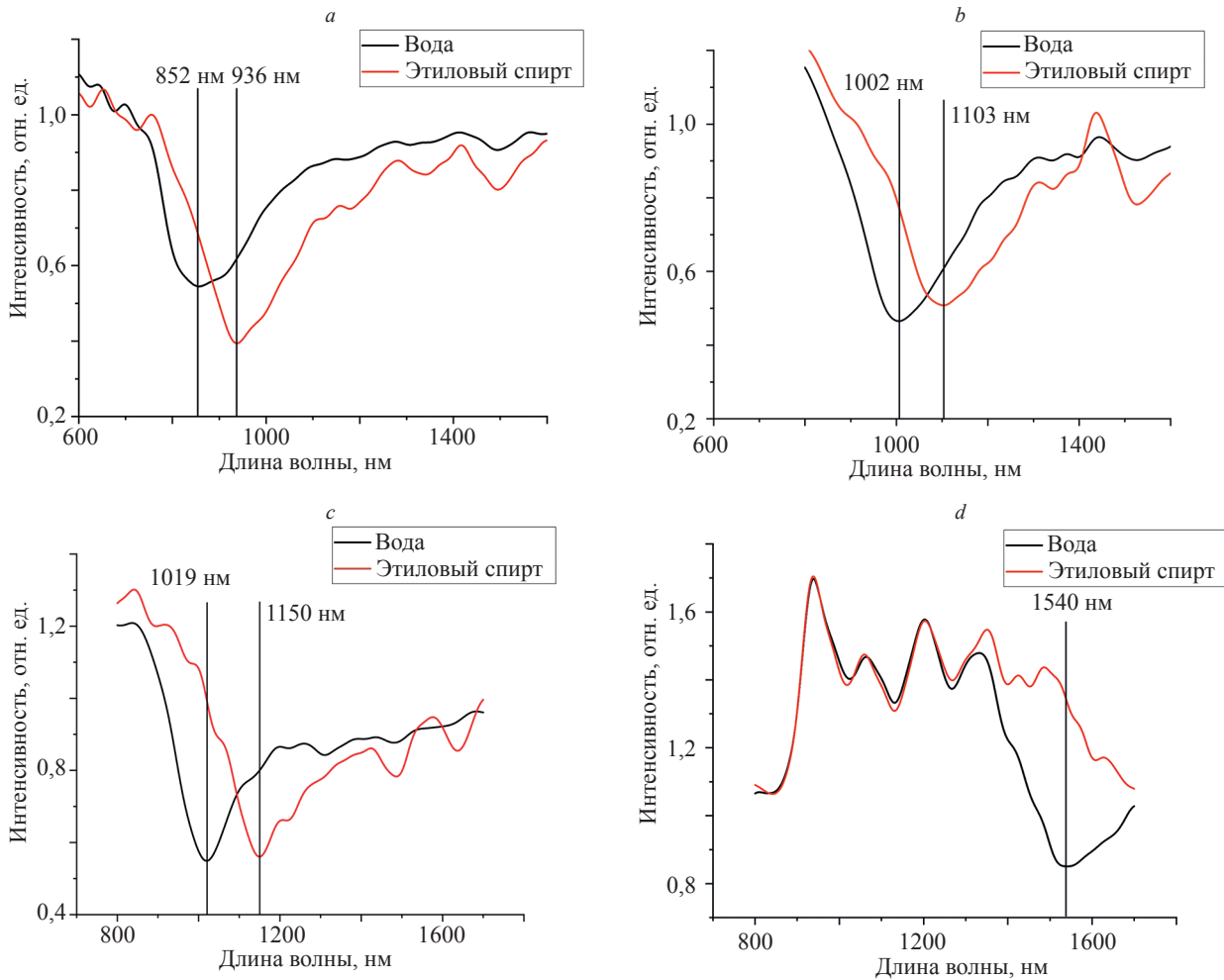


Рис. 4. Спектры поверхностного плазмонного резонанса, нормированные на спектр воздуха, при толщинах диэлектрических покрытий: из Al_2O_3 для 60 нм (a) и 100 нм (b); из TiO_2 для 50 нм (c) и 100 нм (d)

Fig. 4. Surface plasmon resonance spectra normalized to the air spectrum for the following dielectric coating thicknesses: Al_2O_3 for 60 nm (a) and 100 nm (b); TiO_2 for 50 nm (c) and 100 nm (d)

Экспериментальные результаты качественно отражают теоретические, однако, сдвиг ППР спектров в инфракрасный диапазон происходит на меньшую величину, чем теоретически рассчитано, с разницей в 300–400 нм. Первой причиной такого несоответствия может быть то, что теоретическая модель была рассчитана в достаточно упрощенном виде. Она не учитывает ни температуру, ни изгиб волоконного, ни потери излучения на сварках оптического волокна. Другим важным аспектом является отсутствие возможности точно контролировать толщину напыленных слоев, что также может влиять на результирующие экспериментальные спектры.

Для расчета коэффициента чувствительности S была использована следующая формула [20]:

$$S = \frac{\delta\lambda_{\text{ППР}}}{\delta n_s}, \quad (9)$$

где $\delta\lambda_{\text{ППР}}$ — сдвиг длины волны ППР; δn_s — соответствующее изменение показателя преломления исследуемой среды.

При анализе характеристик различных датчиков необходимо учитывать не только чувствительность, но также точность измерения длины волны.

В данном контексте удобно использовать показатель качества (Figure OF Merit, FOM) устройства, который определяется отношением коэффициента чувствительности к сдвигу длины волны и ширине линии ППР:

$$FOM = \frac{S}{FWHM}, \quad (10)$$

где $FWHM$ (Full Width at Half Maximum) — ширина на полувысоте. Учитывая, что определение местоположения узкого ППР проще, чем широкого, FOM позволяет более объективно оценить эффективность датчика [20].

В таблице приведены рассчитанные характеристики для всех экспериментальных образцов ЧЭ. Несмотря на меньший сдвиг спектров ППР в длинноволновую область, в отличие от теоретически рассчитанных значений, чувствительность датчика для всех образцов значительно повысилась по сравнению с ЧЭ без дополнительного диэлектрического покрытия с чувствитель-

Таблица. Характеристики экспериментальных образцов чувствительного элемента

Table. Characteristics of experimental designs of the sensing element

Материал диэлектрического слоя	Толщина слоя, нм	Коэффициент чувствительности S , нм/RIU	FWHM	Показатель качества FOM
Al_2O_3	60	2800	185	около 15
	100	3400	207	около 16
TiO_2	50	4400	117	около 37
	100	около 5600	около 303	около 18

ностью 1800 нм/RIU [18]. Сравнение показателя качества ЧЭ показал, что диэлектрическое покрытие из TiO_2 толщиной 50 нм является наилучшим, так как спектр плазмонного резонанса значительно уже, чем при других конструкциях. Однако большая чувствительность наблюдается у ЧЭ с толщиной TiO_2 100 нм, поэтому необходимы дальнейшие исследования оптимальной толщины диэлектрического покрытия.

Заключение

В работе представлен метод повышения чувствительности волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса с использованием диэлектрических покрытий. Предложена мате-

матическая модель на основе характеристических матриц для расчета толщины диэлектрического покрытия. Экспериментальная апробация продемонстрировала, что предложенный метод может быть успешно применен для повышения чувствительности волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса, однако указала на недостатки математического моделирования.

В дальнейших исследованиях при математическом моделировании необходимо учесть такие важные факторы, как влияние температуры, изгиба волоконного чувствительного элемента, потери на сварках различных типов оптического волокна. Также следует разработать метод контроля толщины напыляемых диэлектрических покрытий.

Литература

1. Yadav P.K., Srivastava R., Chaurasiya N. Optical fiber sensor: review and applications // *International Journal of Creative Research Thoughts*. 2018. V. 6. N 1. P. 1358–1362.
2. Simonsen O., Grubb A., Thysell H. The blood serum concentration of cystatin C (γ -trace) as a measure of the glomerular filtration rate // *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. 1985. V. 45. N 2. P. 97–101. <https://doi.org/10.3109/00365518509160980>
3. Алсовэйдн К.М., Караваева О.А., Гулий О.И. Методы и подходы для определения антибиотиков // *Антибиотики и химиотерапия*. 2022. Т. 67. № 1-2. С. 53–61. <https://doi.org/10.37489/0235-2990-2022-67-1-2-53-61>
4. Deng S., Wang P., Yu X. Phase-sensitive Surface Plasmon Resonance sensors: recent progress and future prospects // *Sensors*. 2017. V. 17. N 12. P. 2819. <https://doi.org/10.3390/s17122819>
5. Zeng Y., Wang X., Zhou J., Miyan R., Qu J., Ho H.P., Zhou K., Gao B., Shao Y. Phase interrogation SPR sensing based on white light polarized interference for wide dynamic detection range // *Optics Express*. 2020. V. 28. N 3. P. 3442–3450. <https://doi.org/10.1364/OE.382242>
6. Zeng Y., Hu R., Wang L., Gu D., He J., Wu S., Ho H.P., Li X., Qu J., Gao B.Z., Shao Y. Recent advances in surface plasmon resonance imaging: detection speed, sensitivity, and portability // *Nanophotonics*. 2017. V. 6. N 5. P. 1017–1030. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0022>
7. Huang Y.H., Ho H.P., Wu S.Y., Kong S.K. Detecting phase shifts in Surface Plasmon Resonance: a review // *Advances in Optical Technologies*. 2012. V. 2012. P. 471957. <https://doi.org/10.1155/2012/471957>
8. Caucheteur C., Guo T., Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015. V. 407. N 14. P. 3883–3897. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-8411-6>
9. 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>
10. 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>

References

1. Yadav P.K., Srivastava R., Chaurasiya N. Optical fiber sensor: review and applications. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 1358–1362.
2. Simonsen O., Grubb A., Thysell H. The blood serum concentration of cystatin C (γ -trace) as a measure of the glomerular filtration rate. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 1985, vol. 45, no. 2, pp. 97–101. <https://doi.org/10.3109/00365518509160980>
3. Alsowaidi A.K.M., Karavaeva O.A., Guliy O.I. Methods and approaches for antibiotics detection. *Antibiotiki i Khimioterapiya*, 2022, vol. 67, no. 1-2, pp. 53–61. (in Russian). <https://doi.org/10.37489/0235-2990-2022-67-1-2-53-61>
4. Deng S., Wang P., Yu X. Phase-sensitive Surface Plasmon Resonance sensors: recent progress and future prospects. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 12, pp. 2819. <https://doi.org/10.3390/s17122819>
5. Zeng Y., Wang X., Zhou J., Miyan R., Qu J., Ho H.P., Zhou K., Gao B., Shao Y. Phase interrogation SPR sensing based on white light polarized interference for wide dynamic detection range. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 3442–3450. <https://doi.org/10.1364/OE.382242>
6. Zeng Y., Hu R., Wang L., Gu D., He J., Wu S., Ho H.P., Li X., Qu J., Gao B.Z., Shao Y. Recent advances in surface plasmon resonance imaging: detection speed, sensitivity, and portability. *Nanophotonics*, 2017, vol. 6, no. 5, pp. 1017–1030. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0022>
7. Huang Y.H., Ho H.P., Wu S.Y., Kong S.K. Detecting phase shifts in Surface Plasmon Resonance: a review. *Advances in Optical Technologies*, 2012, vol. 2012, pp. 471957. <https://doi.org/10.1155/2012/471957>
8. Caucheteur C., Guo T., Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2015, vol. 407, no. 14, pp. 3883–3897. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-8411-6>
9. 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>
10. 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>

11. 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>
12. 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>
13. Sharma A.K., Jha R., Gupta B.D. Fiber-optic sensors based on Surface Plasmon Resonance: a comprehensive review // *IEEE Sensors Journal*. 2007. V. 7. N 8. P. 1118–1129. <https://doi.org/10.1109/jssen.2007.897946>
14. Bao S., Li H., Zheng G. Concentration sensor with multilayer thin film-coupled surface plasmon resonance // *Optoelectronics Letters*. 2021. V. 17. N 5. P. 289–293. <https://doi.org/10.1007/s11801-021-0088-4>
15. Ma Y., Liu F., Ren Q., Zhang A. FOM enhancement of a D-shaped SPR fiber sensor based on Al_2O_3 -graphene-platinum grating // *Journal of Optics*. 2024. V. 53. N 1. P. 197–205. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-01076-8>
16. Takagi K., Sasaki H., Seki A., Watanabe K. Surface plasmon resonances of a curved hetero-core optical fiber sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010. V. 161. N 1-2. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.03.009>
17. Виноградов С.В., Кононов М.А. Расчет параметров многослойной структуры при резонансном возбуждении поверхностных плазмонов // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 4. С. 343–348.
18. Ивойлов К.А., Гагаринова Д.О., Зыкина А.А., Мешковский И.К., Плясов 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. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454>
19. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // *Journal of the Optical Society of America*. 1965. V. 55. N 10. P. 1205–1209. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001205>
20. Vikas, Verma R.K. High figure of merit fiber optic surface plasmon resonance sensor with topological insulator (BSTS) // *Optical and Quantum Electronics*. 2022. V. 54. N 1. P. 55. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03435-4>
11. 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>
12. 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>
13. Sharma A.K., Jha R., Gupta B.D. Fiber-optic sensors based on Surface Plasmon Resonance: a comprehensive review. *IEEE Sensors Journal*, 2007, vol. 7, no. 8, pp. 1118–1129. <https://doi.org/10.1109/jssen.2007.897946>
14. Bao S., Li H., Zheng G. Concentration sensor with multilayer thin film-coupled surface plasmon resonance. *Optoelectronics Letters*. 2021, vol. 17, no. 5, pp. 289–293. <https://doi.org/10.1007/s11801-021-0088-4>
15. Ma Y., Liu F., Ren Q., Zhang A. FOM enhancement of a D-shaped SPR fiber sensor based on Al_2O_3 -graphene-platinum grating. *Journal of Optics*, 2024, vol. 53, no. 1, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-01076-8>
16. Takagi K., Sasaki H., Seki A., Watanabe K. Surface plasmon resonances of a curved hetero-core optical fiber sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol. 161, no. 1-2, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.03.009>
17. Vinogradov S.V., Kononov M.A. Calculation of parameters of a multilayered structure at the surface plasmon resonance. *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 343–348. (in Russian)
18. 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). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454>
19. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, vol. 55, no. 10, pp. 1205–1209. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001205>
20. Vikas, Verma R.K. High figure of merit fiber optic surface plasmon resonance sensor with topological insulator (BSTS). *Optical and Quantum Electronics*, 2022, vol. 54, no. 1, pp. 55. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03435-4>

Авторы

Зыкина Аделия Алексеевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58527719900](https://orcid.org/0000-0002-8021-0678), <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adeliya.zykina@gmail.com

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

Гладских Игорь Аркадьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56020051200](https://orcid.org/0000-0001-6389-1611), <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>, 138020@mail.ru

Authors

Adeliia A. Zykina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58527719900](https://orcid.org/0000-0002-8021-0678), <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adeliya.zykina@gmail.com

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

Igor A. Gladskikh — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56020051200](https://orcid.org/0000-0001-6389-1611), <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>, 138020@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.2024

Одобрена после рецензирования 13.02.2025

Принята к печати 21.03.2025

Received 05.02.2024

Approved after reviewing 13.02.2025

Accepted 21.03.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»