

10. Maslov O.N., Khalimov R.R., Dimov E.M., Troshin Yu.V. Dinamika razrabotki imitacionnoy modeli biznes-processa [Dynamics of development of a business process simulation model]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2013, no. 1, pp. 63-77

Received 10.01.2019

УДК 681.586.5

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕНСОРОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ СТУПЕНЧАТОГО ВОЛОКНА С ПЕРЕТЯЖКОЙ

Головкина М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: nauka77@yandex.ru

В работе рассматривается сенсор на основе ступенчатого оптического волокна, содержащего макроструктурный дефект типа «перетяжка». Такие сенсоры используются при проведении биологических исследований для точного определения показателя преломления биологического раствора. В работе исследуется случай, когда диаметр перетяжки настолько мал, что влиянием сердцевины оптического волокна на характеристики распространяющихся мод высших порядков можно пренебречь. Сигнал в виде основной моды подается на вход оптического сенсора, в перетяжке энергия основной моды преобразуется в энергию мод высших порядков, скорость распространения и постоянные распространения которых зависят от эффективного показателя преломления волокна и окружающей среды. При этом возникают интерференционные эффекты, которые становятся существенными при определенной длине волны. На выходе из сенсора измеряется интерференционный сигнал, величина которого зависит как от геометрических размеров сенсора, так и от показателя преломления окружающей среды. В работе рассматривается уравнение Максвелла для ступенчатого волокна и проводится его численное решение для случая малого диаметра перетяжки. На основе полученного численного решения рассматривается интерференционный сигнал на выходе из оптического сенсора с перетяжкой и учитывается влияние показателя преломления окружающей среды на его характеристики. Показано, что исследуемый сенсор при определенном выборе геометрических размеров перетяжки обладает достаточной чувствительностью для определения разницы показателя преломления, равной 0,0001.

Ключевые слова: оптический сенсор, перетяжка, уравнения Максвелла, моды, показатель преломления

Введение

В настоящее время внимание инженеров-конструкторов и исследователей обращено на создание высокоэффективных сенсоров на основе оптического волокна. Достоинством оптоволоконных сенсоров и датчиков является высокая чувствительность к изменению внешних параметров и малые размеры. Такие датчики могут использоваться для измерения температуры, давления, электрического тока, магнитного поля, вибрации, кручения, механического смещения, показателя преломления [1]. В основе конструкции таких оптических датчиков лежат различные физические явления: поглощение и отражение света, интерференция, явление двойного лучепреломления, эффект Фарадея, эффект Керра, флуоресценция, хемилюминесценция, вращение плоскости поляризации и другие [2].

Широкое распространение находят сенсоры на основе волоконных брэгговских решеток [3], различные интерферометрические схемы [4]. Волоконно-оптические датчики, работающие на

эффекте поверхностного плазмонного резонанса, находят все большее применение в биологических исследованиях и в медицине. В основе работы таких датчиков лежит эффект поверхностного плазмонного резонанса, возникающего на границе раздела двух сред, одна из которых обладает отрицательным показателем преломления. При этом в качестве среды с отрицательным показателем преломления может выступать как металл, так и различные композитные среды, содержащие нановключения различной формы [5-6]. Также для создания различных сенсоров применяются оптические волокна с нанесенными на них макроструктурными дефектами, например, волокна с перетяжкой [7].

Сенсоры на основе оптического волокна имеют следующие преимущества: простая конструкция, малый размер, удобство в применении. Такие волоконно-оптические сенсоры также находят широкое применение для детектирования биологических объектов или органических растворов в биомедицинских исследованиях, давая информацию в режиме реального времени. Малый раз-

мер таких сенсоров позволяет интегрировать их в различные медицинские приборы и использовать в труднодоступных местах. В данной работе рассматривается расчет параметров сенсора для определения показателя преломления внешней среды на основе оптического волокна с перетяжкой.

Геометрия задачи

Рассмотрим ступенчатое оптическое волокно с перетяжкой (см. рисунок 1). В сенсоре, который работает на основе такого волокна, сигнал поступает в основной моде HE_{11} на конец недеформированного волокна. В области перетяжки кроме фундаментальной моды возникают моды высших порядков, при этом эванесцентное поле этих мод при выполнении ряда условий может выходить за пределы волокна и влиять на поведение показателя преломления внешней среды. В конце перетяжки моды более высокого порядка преобразуются обратно в основную моду.

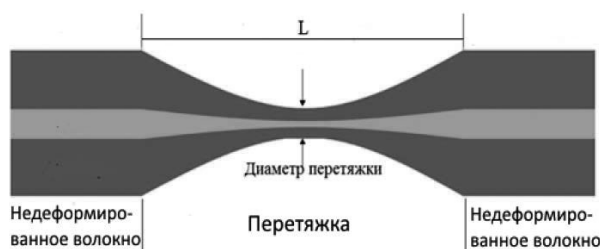


Рисунок 1. Схематическое изображение оптического волокна с перетяжкой

Моды высших порядков распространяются с разными скоростями из-за различий в эффективных показателях преломления. Причем эти моды испытывают интерференцию, которая может приводить как к усилению, так и к ослаблению результирующего сигнала на выходе. Поэтому полная интенсивность света, передаваемая на выходе волокна, в значительной степени определяется интерференцией между модами и их постоянными распространения.

Распространение света в оптическом волокне с перетяжкой описывается уравнениями Максвелла, решение которых хорошо известно. Уравнение Максвелла для ступенчатого оптического волокна описывает поведение гибридных мод HE и EH, для которых $E_z \neq 0$ и $H_z \neq 0$. Это же уравнение описывает поведение фундаментальной моды HE_{11} .

Для гибридных мод, являющихся решением уравнения Максвелла, можно выделить два случая в зависимости от соотношения показателей преломления сердцевины и оболочки. Первый случай

– это случай слабонаправляющих волокон, когда показатели преломления сердцевины n_1 и оболочки n_2 волокна близки по величине $n_1 \approx n_2$, что реализуется в обычном ступенчатом волокне. Второй случай – когда показатели преломления сердцевины n_1 и оболочки n_2 существенно отличаются друг от друга, для его практической реализации необходимо создать сенсор с очень малым диаметром перетяжки.

В области перетяжки возникают моды высших порядков, при этом оптическая мощность основной моды перераспределяется между модами высших порядков и оболочечными модами. При достаточно сильном уменьшении диаметра волокна в области перетяжки можно добиться режима, в котором энергия оптического излучения практически полностью сосредотачивается в энергии оболочечных мод. В таком случае диаметр сердцевины оптического волокна будет настолько мал, что можно рассматривать распространение мод на границе оболочка – внешняя среда, не учитывая параметров сердцевины. Тогда и наблюдается большая разница между показателем преломления оболочки оптического волокна и показателем преломления окружающей среды (например, $n = 1$ для воздуха, $n = 1,33$ для воды). При этом для расчетов параметров мод уже нельзя применять аппроксимацию слабонаправляющих волокон.

Именно второй случай рассматривается при использовании оптических волокон с перетяжкой в качестве биологических сенсоров, реагирующих на изменение показателя преломления внешней окружающей среды. В данной работе рассматривается второй случай с большой разницей между показателями преломления оболочки и окружающей среды. Далее для удобства будем применять следующие обозначения: n_c – показатель преломления сердцевины (в данном случае за показатель преломления сердцевины принимаем показатель преломления оболочки волокна, а влиянием сердцевины пренебрегаем), n_s – показатель преломления оболочки (в данном случае за показатель преломления оболочки принимаем показатель преломления окружающей среды, который нужно измерить). При дальнейших расчетах будем пренебрегать изменением диаметра перетяжки при переходе от области перетяжки к области недеформированного волокна.

Графическое решение волнового уравнения для ступенчатого оптического волокна

Запишем уравнение, описывающего поведение мод в перетяжке рассматриваемого ступенчатого оптического волокна [8]:

$$\frac{k_0^2 n_c^2 - k^2}{a^2} \left[\frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{k^2} \right] = \left[-\frac{J_2(ka)}{kJ_1(ka)} + \frac{1}{ak^2} - \frac{K_2(\gamma a)}{\gamma K_1(\gamma a)} + \frac{1}{a\gamma^2} \right] \cdot \left[-k_0^2 n_c^2 \frac{J_2(ka)}{kJ_1(ka)} + \frac{1}{ak^2} - k_0^2 n_c^2 \frac{K_2(\gamma a)}{\gamma K_1(\gamma a)} + \frac{1}{a\gamma^2} \right]. \quad (1)$$

Здесь a – радиус сердцевинки (следует помнить, что в данной модели это радиус перетяжки, так как влиянием сердцевинки мы пренебрегаем); $k_0 = \omega / c$, ω – циклическая частота передаваемого сигнала, c – скорость света в вакууме, J_ν – функция Бесселя первого рода, $k^2 = k_0^2 n^2 - \beta^2$ – поперечное волновое число для сердцевинки, β – продольное волновое число (постоянная распространения), K_ν – модифицированная функция Бесселя второго рода, $\lambda^2 = \beta^2 - k_0^2 n^2$.

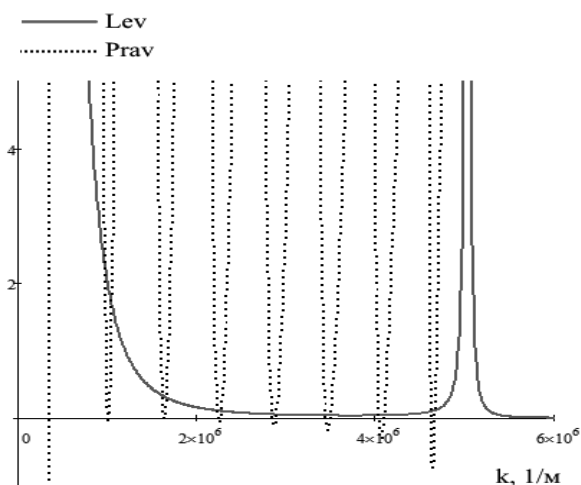


Рисунок 2. Графическое решение уравнения (1) для длины волны 1310 нм

Приведем решение уравнения (1) для случая ступенчатого оптического волокна с показателем преломления $n_c = 1,457$. Радиус волокна в перетяжке 5 мкм, длина перетяжки $L = 400$ мкм. Целью работы является исследование влияния показателя преломления окружающей среды на распространение электромагнитных волн в перетяжке.

Для решения поставленной задачи обозначим левую часть уравнения (1) как функцию Lev, правую часть уравнения (1) как функцию Prav [9]. Построим графики функции Lev и Prav в зависимости от поперечного волнового числа k . Результаты численного решения уравнения (1) графическим методом для длины волны 1310 нм изображены на рисунке 2.

Анализ численных результатов позволяет получить зависимость постоянной распространения β от длины волны применяемого излучения и учесть

влияние показателя преломления окружающей среды на величину постоянных распространения различных мод. Следует отметить, что при изменении показателя преломления внешней среды, в роли которого может выступать биологический раствор, меняется количество мод высших порядков, возникающих в перетяжке оптического сенсора.

На рисунке 3 представлены результаты численного решения уравнения (1) для оптического волокна с перетяжкой радиусом 5 мкм. Показатель преломления окружающей среды $n = 1,40$. В данном случае в перетяжке возникают три моды высших порядков, постоянные распространения которых уменьшаются с ростом длины волны. Для дальнейшего анализа необходимо исследовать поведение разности между постоянными распространения отдельных мод.

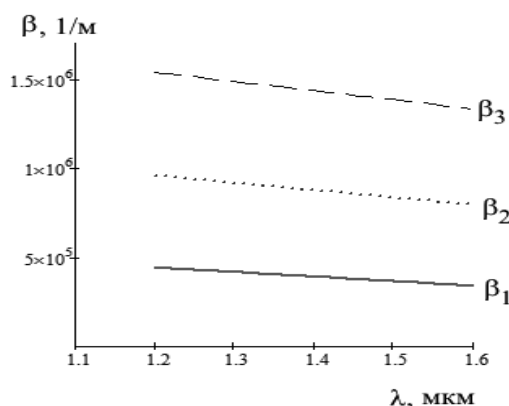


Рисунок 3. График зависимости постоянных распространения первых трех мод от длины волны для оптического сенсора с перетяжкой

Результаты расчета указанной разности, зависящей от длины волны, для оптического волокна с перетяжкой радиусом 5 мкм и показателем преломления окружающей среды $n = 1,40$ приведены на рисунке 4.

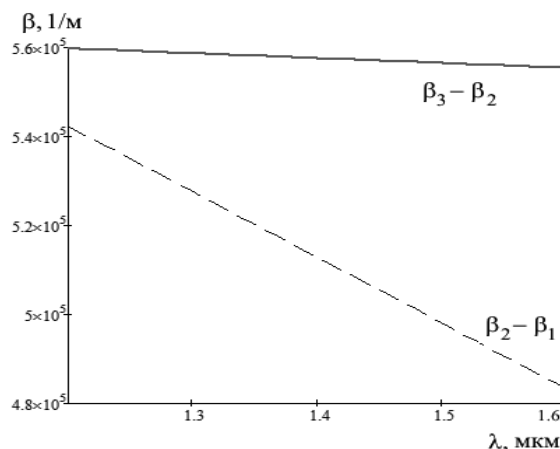


Рисунок 4. График зависимости разности постоянных распространения для первых трех мод от длины волны для оптического сенсора с перетяжкой

Наибольший интерес представляют моды, у которых разность между постоянными распространения претерпевает наиболее сильные изменения (это моды с наименьшими постоянными распространения). Особенностью рассматриваемого сенсора является также существенная зависимость постоянных распространения и разности между постоянными распространения отдельных мод от показателя преломления внешней среды.

Расчет параметров сенсора на основе оптического волокна с перетяжкой

Как было отмечено выше, значительное уменьшение диаметра волокна в области перетяжки приводит к тому, что энергия мод из области сердцевинки перераспределяется в энергию оболочечных мод. Из-за уменьшенного размера волокна в области перетяжки распространяющаяся электромагнитная волна имеет незатухающий компонент в окружающей среде за счет возникновения оболочечных мод. Пройдя через область перетяжки, электромагнитная волна соединяется обратно в одну моду одномодового волокна.

Вблизи области перетяжки эванесцентное поле мод высших порядков взаимодействует с материалами вблизи поверхности волокна, оказывая влияние на дальнейшее распространение сигнала в волокне. При этом интерференционный сигнал, который измеряется на выходе из оптического волокна с перетяжкой, существенным образом зависит даже от небольших изменений показателя преломления окружающей среды.

Итак, сигнал подается на один конец волокна с перетяжкой. Сигнал, измеренный на другом конце волокна, обусловлен разностью фаз между различными модами, которые являются затухающими в окружающей среде, роль которой играет воздух, вода или различные растворы, показатель преломления которых подлежит измерению. Интенсивность m -ой моды в области перетяжки выражается следующей формулой

$$I = \sum_n I_n + 2 \sum_{n>m} \sqrt{I_m I_n} \cos \Delta \varphi_{mn}, \quad (2)$$

где разность фаз между двумя различными модами определяется по формуле

$$\Delta \varphi_{nm} = (\beta_n - \beta_m)L, \quad (3)$$

L – длина перетяжки. Таким образом, интенсивность сигнала на выходе сенсора на основе оптического волокна с перетяжкой зависит от следующей функции

$$\cos[\Delta \varphi_{nm}] = \cos[(\beta_n - \beta_m)L]. \quad (4)$$

Задачей данного исследования является учет влияния изменения показателя преломления внешней среды на вид функции (4), а, соответственно, на интенсивность выходного сигнала (2). На рисунке 5 представлены результаты расчета зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для двух случаев: в первом случае окружающая среда представляет собой биологический раствор с показателем преломления $n_s = 1,40$, во втором случае – с показателем преломления $n_s = 1,41$.

Из рисунка 5 видно, что вследствие наличия зависимости постоянных распространения различных мод от показателя преломления окружающей среды даже небольшое изменение показателя преломления окружающей среды в $\Delta n = 0,01$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на выходе из волокна с перетяжкой. В абсолютном выражении изменение показателя преломления окружающей среды на $\Delta n = 10^{-2}$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на $\Delta \lambda = 17$ нм.

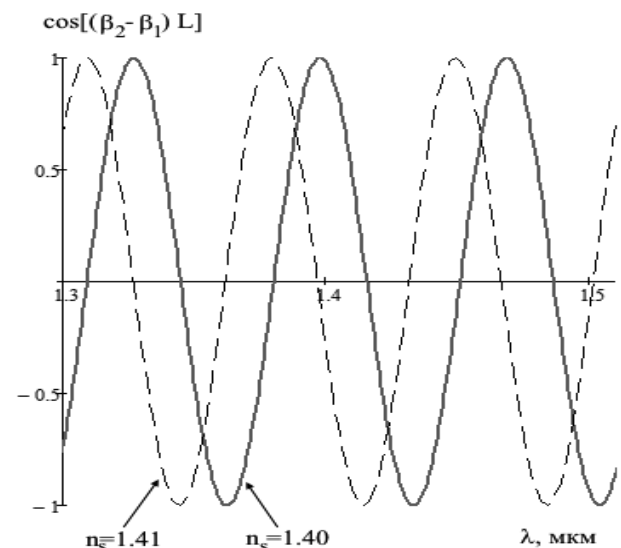


Рисунок 5. Графики зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для показателей преломления окружающей среды $n_s = 1,40$ и $n_s = 1,41$

На рисунке 6 представлены результаты расчета зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для двух случаев: окружающая среда в виде раствора с показателями преломления $n_s = 1,400$ и $1,401$. Результаты численного расчета показывают, что изменение показателя преломления окружающей среды на $\Delta n = 10^{-3}$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на $\Delta \lambda = 7$ нм.

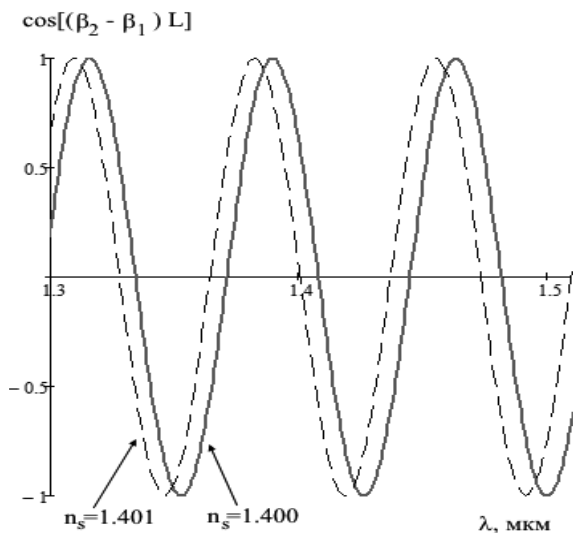


Рисунок 6. Графики зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для показателей преломления окружающей среды $n_s = 1,4$ и $1,401$

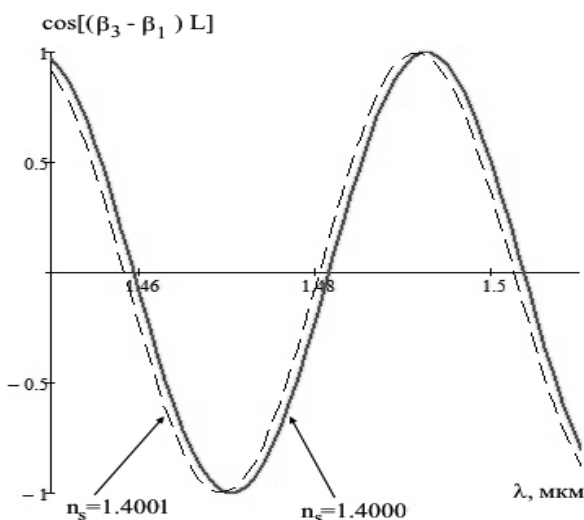


Рисунок 7. Графики зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для показателей преломления окружающей среды $n_s = 1,4$ и $1,4001$

На рисунке 7 представлены результаты расчета зависимости функции $\cos[(\beta_n - \beta_m)L]$ от длины волны для показателей преломления окружающего раствора, равных $n_s = 1,4000$ и $n_s = 1,4001$. Как видно из рисунка 7, изменение показателя преломления окружающей среды на $\Delta n = 10^{-4}$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на $\Delta \lambda = 1$ нм. Такой сдвиг спектральной характеристики говорит о достаточно высокой чувствительности рассматриваемого сенсора, полученной за счет подбора его параметров.

Сравним полученную чувствительность с чувствительностью сенсора на основе оптического волокна с перетяжкой, описанного в работе [9], для которого изменение показателя преломления

на $\Delta n = 0,0021$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на $\Delta \lambda = 3$ нм. Также сравним результаты для сенсора на основе волокна РММА с графеном при наличии перетяжки, предназначенного для измерения показателя преломления растворов разной концентрации [10]. Для такого сенсора изменение показателя преломления окружающей среды на $\Delta n = 0,0018$ приводит к сдвигу спектральной характеристики на $4,6$ нм [10]. Таким образом, рассмотренный в работе сенсор имеет высокую чувствительность и может применяться для измерения показателей преломления биологических растворов.

Заключение

В работе рассмотрен сенсор на основе оптического волокна с перетяжкой для определения показателя преломления биологических растворов. На основе численного решения уравнений Максвелла определены параметры сенсора, демонстрирующие наибольшую чувствительность к изменению показателя преломления исследуемых растворов.

Литература

1. Budinski V., Donlagic D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: A review // *Sensors (Basel)*. – 2017. – Vol.17. – No.3. – P. 443. DOI: 10.3390/s17030443.
2. Pu S., Dong S. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints // *IEEE Photonics Journal*. – 2014. – Vol.6. – N.4. – P. 5300206-1 – 5300206-7. DOI: 10.1088/2040-8986/aac68d.
3. Qi T., Xiao J., Yi L., Zhou Z., Bi M., Hu W. Cladding-mode backward-recoupling-based displacement sensor incorporating fiber up taper and bragg grating // *IEEE Photonics Journal*. – 2013. – Vol. 5. – No. 4. – P. 7100608-1 – 7100608-8. DOI: 10.1364/OL.37.004480.
4. Zhang S., Zhang W., Gao S., Geng P., Xue X. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper // *Optics letters*. – 2012. – Vol. 37. – No. 21. – P. 4480-4482. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2332476.
5. Golovkina M.V. Periodic semiconductor structures with metamaterials // *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009*. – 2009. – P. 133-137. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2274770.
6. Golovkina M.V. Electromagnetic wave propagation in a multilayered periodic structure containing negative index material // *IEEE*

- International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2007.–2007.–P.174-178. DOI: 10.1109/SIBCON.2009.5044843.
7. Correia R., James S., Lee S.-W., Morgan S. P., Korposh S. Biomedical application of optical fibre sensors // *Journal of Optics*. – 2018. – Vol. 20. – P. 073003-1-073003-25. DOI: 10.1109/SIBCON.2007.371320.
 8. Дифракционная оптика и нанофотоника. Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2014. – 608 с.
 9. Negari A.B.H., Jauregui D., Hernandez J.M.S. et al. Phase sensitive signal analysis for bi-tapered optical fibers // *Proceedings SPIE Biophysics, Biology, and Biophotonics: the Crossroads*. – 2016. – Vol. 9719. – P. 971907. DOI: 10.1117/12.2208934.
 10. Ri-Qing Lv, Qi Wang, Bo-Tao Wang, Yu Liu, Lingxin Kong. Polymer microfiber bridging Bi-tapered refractive index sensor based on evanescent field // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 414. – P. 134-139. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.12.063.

Получено 15.11.2018

Головкина Мария Вилевна, к.ф.-м.н., доцент Кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-37. E-mail: nauka77@yandex.ru

INTERFERENCE SIGNAL ANALYSIS FOR BI-TAPERED FIBER SENSOR

Golovkina M.V.

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: nauka77@yandex.ru

In this paper the characteristics of bi-tapered optical fibers for biomolecular sensing are considered. This highly sensitive fiber sensor can be used for the label-free detection of biomolecules and for refractive index sensing. The presence of bi-tapered region with small diameter leads to the transformation of the fundamental mode energy into the energy of higher-order modes. The availability of multiple modes creates an interference pattern in the output signal. The magnitude of the interference output signal depends on the geometric sizes of the sensor and on the refractive index of the surrounding medium. In this paper, Maxwell's equation for step-index fiber is considered and its numerical solution is performed. Based on the obtained numerical solution, the magnitude of the output signal is calculated depending on the refractive index of a biological solution. It is shown that the sensor studied has a high sensitivity to the change in the refractive index.

Keywords: tapered optical fibers, optical fiber sensor, modal analysis, refractive index measurements

DOI: 10.18469/ikt.2019.17.1.10

Golovkina Maria Vilevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of the Department of Physics, PhD in Physics and Mathematics. Tel. +78462280037. E-mail: nauka77@yandex.ru

References

1. Budinski V, Donlagic D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: A review. *Sensors (Basel)*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 443. DOI: 10.3390/s17030443.
2. Correia R., James S., Lee S.-W., Morgan S. P., Korposh S. Biomedical application of optical fibre sensors. *Journal of Optics*, 2018, vol. 20, pp. 073003-1-073003-25. DOI: 10.1088/2040-8986/aac68d.
3. Zhang S., Zhang W., Gao S., Geng P., Xue X. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper. *Optics letters*, 2012, vol. 37, is. 21, pp. 4480-4482. DOI: 10.1364/OL.37.004480.
4. Pu S., Dong S. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints. *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 5300206-1-5300206-7. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2332476.
5. Qi T., Xiao J., Yi L., Zhou Z., Bi M., Hu W. Cladding-mode backward-recoupling-based displacement sensor incorporating fiber up taper and bragg grating. *IEEE Photonics Journal*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 7100608-1-7100608-8. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2274770.

6. Golovkina M.V. Periodic semiconductor structures with metamaterials. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009*, 2009, pp. 133-137. DOI: 10.1109/SIBCON.2009.5044843.
7. Golovkina M.V. Electromagnetic wave propagation in a multilayered periodic structure containing negative index material. *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2007*, 2007, pp. 174-178. DOI: 10.1109/SIBCON.2007.371320.
8. Soyfer V.A. *Difrakzionnaya optika i nanofotonika*. [Diffractive optics and nanophotonics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 608 p.
9. Negari A.B.H., Jauregui D., Hernandez J.M.S., Mina D.G., King B. J., Idehenre I., Powers P.E., Hansen K.M., Haus J.W. Phase sensitive signal analysis for bi-tapered optical fibers. *Proceedings SPIE, Biophysics, Biology, and Biophotonics: the Crossroads*, 2016, vol. 9719, pp. 971907. DOI: 10.1117/12.2208934.
10. Ri-Qing Lv, Qi Wang, Bo-Tao Wang, Yu Liu, Lingxin Kong. Polymer microfiber bridging Bi-tapered refractive index sensor based on evanescent field. *Optics Communications*. 2018. V. 414. P. 134-139. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.12.063.

Received 15.11.2018

УДК 004.053: 004.054

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АРХИТЕКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ iOS ПРИЛОЖЕНИЯ «ГОСУСЛУГИ МОСКВЫ» ЧЕРЕЗ ТЕСТИРОВАНИЕ

Богомолова М.А., Клементьев С.А.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: bogomolova-ma@psuti.ru*

Представлена методика тестирования модулей мобильного приложения на платформе iOS «Госуслуги Москвы» через тестирование. Предложенная методика ориентирована на архитектуру приложения iOS «Госуслуги Москвы» и может применяться при разработке сцен приложения. На примере разработки сцены регистрации социальной карты москвича, используя разработанную методику, по техническому заданию поэтапно реализованы три архитектурных компонента View Controller, Interactor и Presenter: сцены в виде классов, а также реализованы тесты модулей для этих классов. Написанный код показывает особенности разработки и может использоваться в качестве примера для создания новых сцен. Использование методики модульного тестирования мобильного приложения iOS «Госуслуги Москвы» позволяет уменьшить количество дефектов в приложении, уменьшает стоимость исправления дефектов, способствует написанию более чистого кода и проектированию удобных интерфейсов классов.

Ключевые слова: *модульное тестирование, unit-тестирование, test-driven development, TDD, Clean Swift, mock-объект, spy-объект, объект-шпион*

Введение

В настоящее время осуществляется проект разработки мобильного приложения iOS «Госуслуги Москвы», объединяющего востребованные услуги Правительства Москвы. На данный момент проект содержит более чем 1500 файлов с исходным кодом. Кроме того, постепенно в приложение добавляется новая функциональность, вследствие чего увеличивается количество файлов и меняется исходный код, в нем с большой вероятностью появляются регрессионные ошибки (когда работающий функционал сломали неаккуратными изменениями). Действенным решением этой проблемы является модульное тестирование (unit-тестирование) – одна из ключевых практик методологии экстремального программирования. Здесь unit (модуль) – это малый по объему само-

достаточный участок кода, реализующий определенное поведение, который часто (но не всегда) является классом.

Модульное тестирование заключается в изолированной проверке на корректность и работоспособность каждого отдельного модуля исходного кода – тестирование с высокой гранулярностью. То есть идея состоит в том, чтобы создавать тесты для каждой нетривиальной функции или метода [1]. Это позволяет достаточно быстро проверить, не привело ли очередное изменение кода к регрессии, то есть к появлению ошибок в уже протестированных местах программы, а также облегчает их обнаружение и устранение.

В Unit-тестировании используется два подхода к созданию тестов:

– разработка через тестирование (test-driven development, TDD);