

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

И. Д. Шитоев, А. Б. Волынцев

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Идеальный метод мониторинга и обнаружения биологических элементов должен быть простым, быстрым и прямым, обладающим высокой чувствительностью и избирательностью, позволяя проводить одновременные многократные обнаружения неквалифицированным персоналом при достаточно низкой стоимости анализа. В этом смысле биосенсоры на основе ФИС имеют большой потенциал для создания такого рода устройств. В ходе работы было путем анализа полученных результатов было установлено, что КР с одномерным ФК может детектировать в 4 раза более низкую концентрацию раствора спирта, а значит нанесение на резонаторную полость одномерного ФК повышает чувствительность и предел обнаружения КР в несколько раз. Также была математически получена зависимость сдвига резонансного пика от концентрации спирта в растворе.

Ключевые слова: фотонная интегральная схема (ФИС); кольцевой резонатор (КР); фотонный кристалл (ФК)

HIGH-SENSITIVITY CONCENTRATION SENSOR

I. D. Shitoev, A. B. Volyntsev

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

An ideal detection method should be simple, fast and direct (without labelling), with high sensitivity and selectivity, and allow to carry out multiple simultaneous detection activities by non-skilled personnel at a low cost. In this sense, biosensors based on PIC have a great potential for creating such devices. Here, it has been found out that the RR with a one-dimensional PC can detect a 4-fold lower concentration of the alcohol solution, and therefore the application of a one-dimensional PC to the resonator cavity increases the sensitivity and the detection limit of the RR by several times. Also the dependence of the shift of the resonant peak on the alcohol concentration in the solution has been obtained mathematically.

Keywords: photonic integrated circuit (PIC); ring resonator (RR); photonic crystal (PC)

Необходимость быстрого и надежного мониторинга и обнаружения биологических элементов, связанных со здоровьем и состоянием окружающей среды, является одной из главных задач в XXI веке. Тесты, проводимые в настоящее время в лабораториях, являются медленными и достаточно дорогими. Идеальный метод детектирования должен быть простым, быстрым и прямым, обладающим высокой чувствительностью и избирательностью, позволяя проводить одновременные многократные обнаружения неквалифицированным персоналом при достаточно низкой стоимости анализа.

По определению, биосенсор представляет собой устройство, способное обнаруживать конкретный аналит путем преобразования определенного сигнала распознавания в электрический сигнал. Этот сигнал напрямую зависит от концентрации анализируемого вещества [1]. Оптические биосенсоры (именно о них пойдет речь в данной статье) обладают преимуществами по сравнению с другими, так как они имеют высокую чувствительность, позволяют получать данные в режиме реального времени, обходиться без дополнительных маркеров и дают возможность неоднократного проведения большого массива анализов [2, 3]. Круг применения таких биосенсоров обширен: от клинической диагностики, биомедицинских исследований до обнаружения лекарств или патогенов, а также токсинов в пищевых продуктах и воде.

Используя биосенсоры на КР, можно получить достаточно компактные устройства. Несмотря на то, что кремниевые КР были широко исследованы в качестве чувствительного элемента биосенсоров, повышение их чувствительности и предела обнаружения продолжает быть областью активных исследований. Наиболее перспективным методом увеличения точности и чувствительности биосенсоров и датчиков на основе КР является создание на резонаторной полости одномерного ФК, характеризующегося периодическим изменением показателя преломления в направлении распространения излучения. В работе [4] авторы добились повышения чувствительности биосенсора в 2 раза путем нанесения на резонаторную полость ФК.

Отдельно необходимо подчеркнуть отсутствие в современной науке и технике миниатюрных биосенсоров (в частности датчиков концентрации растворов), которые бы позволили проводить высокоточные измерения концентрации раствора спирта. Исходя из вышеизложенного, **целью работы** являлось экспериментальное исследование оптических характеристик высокочувствительного элемента на основе интегрально-оптического КР и одномерного ФК для применения его в качестве биосенсора (датчика концентрации растворов спирта).

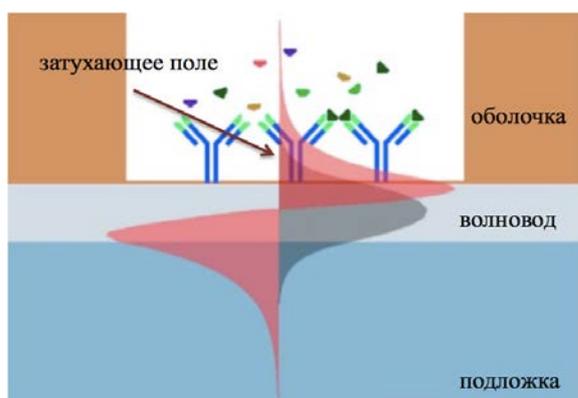


Рис. 1. Механизм затухающего поля

Принцип работы большинства оптических биосенсоров основан на обнаружении затухающего поля. Свет распространяется в волноводе в результате полного внутреннего отражения на границах раздела. При этом часть света все же выходит из волновода, создавая затухающую волну на границе (см. рис. 1). Если вытравить часть оболочки над волноводом, открывая доступ к поверхности, то любое возмущение на поверхности будет влиять на свойства

света, в частности, происходит изменение эффективного показателя преломления, через искажение затухающего поля. Далее это изменение можно соотнести концентрацией анализируемого вещества [5]. В результате этого получаем количественное значение взаимодействия. Наиболее значительными преимуществами механизма затухающих волн являются высокая чувствительность в режиме реального времени.

Тестирование чувствительного элемента на основе КР происходит по следующей схеме: излучение от источника попадает в прямой волновод, из которого часть излучения переходит в кольцевой резонатор через область связи. Далее в нем происходит вырезание резонансных пиков. При нанесении раствора этилового спирта определенной концентрации происходит изменение общего группового показателя преломления. Это влечёт за собой сдвиг резонансной длины волны. Что фиксируется спектроанализатором на выходе прямого волновода.

Был проведен сравнительный анализ КР без ФК и интегрированного одномерным ФК. Для этого была проведена серия экспериментов с последовательным изменением концентрации раствора этилового спирта на поверхности кольцевого резонатора с шагом 1,9 %. Затем для были определены минимумы каждого резонансного пика и его сдвиг в зависимости от концентрации этилового спирта на поверхности. Коэффициент уравнения линии тренда показывает на сколько сдвинется резонансный пик при изменении концентрации раствора спирта на 1%.

Как можно заметить из табл. 1 изменение концентрации раствора на 1% сдвигает пики КР без одномерного ФК на (80 ± 2) пм, тогда как у КР с одномерным ФК происходит сдвиг резонансных пиков на (277 ± 2) пм. Следовательно КР с одномерным ФК может детектировать в 4 раза более низкую концентрацию раствора спирта.

Табл. 1. Сдвиги резонансных пиков кольцевого резонатора интегрированного одномерным ФК и без при изменении концентрации на 1%

	без ФК	интегрированное ФК					
		№1	№2	№3	№4	№5	№6
среднее	0.080	0.278	0.277	0.276	0.279	0.278	0.276
погрешность	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002

Для того, чтобы проверить правильность гипотезы была проведена дополнительная серия экспериментов по определению концентрации раствора спирта на поверхности по формуле:

$$C(\%) = \frac{\lambda_{в\ p-ре} - \lambda_{в\ воде}}{0,277\ нм}$$

Как можно заметить из табл. 2 концентрация раствора спирта на поверхности КР с одномерным ФК определена с хорошей точностью.

Табл. 2. Сравнение заданной концентрации раствора с рассчитанной

заданная концентрация	0.18	0.79	1.19	1.90
среднее	0.17	0.85	1.19	2.01
Δ	0.01	0.06	0.00	0.11
δ, %	6.9	7.1	0.2	5.8

Для того, чтобы не измерять каждый раз спектр КР с нанесенной водой на его поверхности, можно ввести поправки на изменение этого спектра. Необходимо учесть влияние изменения условий окружающей среды. При этом сильно изменяющимся параметром окружающей среды является температура. Была проведена серия экспериментов для определения температурной зависимости КР как с одномерным ФК, так и без него. Для этого образцы были помещены в печь и с интервалом в 10°C были замерены спектры КР. Коэффициент уравнения линии тренда показывает сдвиг резонансного пика при изменении температуры на 1°C. (табл. 3).

Табл. 3. Коэффициент сдвига резонансного пика при изменении температуры на 1°C

	без ФК	с ФК	с ФК в 10%растворе
среднее	0.0321	0.0321	0.0322
погрешность	0.0004	0.0007	0.0016

По данным из табл. 1 можно вывести температурную поправку, взяв при этом какую-нибудь температуру за эталон, например 20°C:

$$\lambda(T) = \lambda(20^\circ\text{C}) + 0,032 \text{ нм} \times (T - 20^\circ\text{C}).$$

С учетом этой поправки можно вывести формулу, определяющую концентрацию раствора спирта при известной температуре окружающей среды. При условии, что заранее будет известен спектр КР с одномерным ФК с водой на поверхности при температуре 20°C:

$$C(\%) = \frac{\lambda_{\text{в п-ре}} - 0,032 \text{ нм} \times (T - 20^\circ\text{C}) - \lambda_{\text{в воде}}(20^\circ\text{C})}{0,277 \text{ нм}}.$$

В заключение хочется сказать, что чувствительный элемент на основе КР с одномерным ФК был протестирован в простой системе спирт-вода, но данный чувствительный элемент можно использовать и для определения концентрации более сложных химических и биологических веществ. Для этого необходима дополнительная калибровка устройства под конкретный анализ по схеме, описанной в этой работе.

Список литературы

1. Estevez M. C., Alvarez M., Lechuga L. M. Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications // Laser and Photonics Reviews. 2012. Vol. 6. N. 4. P. 463–487.

2. *Fan X., White I. M., Shopova S. I., Zhu H., Suter J. D., Sun Y.* Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review // *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 620. N. 1–2. P. 8–26.
3. *Fan X., White I. M.* Optofluidic Microsystems for Chemical and Biological Analysis // *Nature Photonics*. 2011. Vol. 5. P. 591–597.
4. *Flueckiger J., Schmidt S., Donzella V., Sherwali A., Ratner D. M., Chrostowski L., Cheung K. C.* Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor // *Optics Express*. 2016. Vol. 24. N. 14. P. 15672–15686.
5. *Luchansky M. S., Washburn A. L., Martin T. A., Iqbal M., Gunn L. C., Bailey R. C.* Characterization of the evanescent field profile and bound mass sensitivity of a label-free silicon photonic microring resonator biosensing platform // *Biosensors and Bioelectronics*. 2010. Vol. 26. N. 4. P. 1283–1291.