



## Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности

Г. С. Воронков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-8788-2696](https://orcid.org/0000-0002-8788-2696), [voronkov.gs@ugatu.su](mailto:voronkov.gs@ugatu.su)

А. Г. Закоян<sup>а</sup>, студент, [orcid.org/0000-0002-6362-0755](https://orcid.org/0000-0002-6362-0755)

В. В. Иванов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-4716-9466](https://orcid.org/0000-0002-4716-9466)

А. В. Воронкова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-7060-952X](https://orcid.org/0000-0002-7060-952X)

И. В. Степанов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0003-4677-5808](https://orcid.org/0000-0003-4677-5808)

Е. П. Грахова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, [orcid.org/0000-0003-2207-2702](https://orcid.org/0000-0003-2207-2702)

В. С. Любобытов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-1535-5341](https://orcid.org/0000-0003-1535-5341)

Р. В. Кутлуяров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-2724-6978](https://orcid.org/0000-0003-2724-6978)

<sup>а</sup>Уфимский университет науки и технологий, Заки Валиди ул., 32, Уфа, 450076, РФ

**Введение:** сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники являются важнейшим направлением развития встраиваемых информационно-управляющих систем различного назначения. Выходные характеристики сенсорной системы существенно определяются эффективностью устройства опроса датчика. считывающее устройство (интеррогатор) на основе микрокольцевого резонатора с применением метода интеррогации по интенсивности способно обеспечить высокую скорость опроса и чувствительность, соответствующую требованиям широкого спектра приложений. **Цель:** создать эффективную сенсорную систему для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости, включающую рефрактометрический датчик и устройство опроса, расположенные на одной фотонной интегральной схеме. **Методы:** проведено численное моделирование процессов распространения электромагнитного поля в направляющей системе (кремниевых волноводах в интегральном исполнении на подложке из оксида кремния) с использованием среды Ansys Lumerical и алгоритма FDTD. Параметры микрокольцевых резонаторов предварительно оптимизированы с целью получить коэффициенты связи между волноводами, обеспечивающие режим работы резонаторов, близкий к режиму критической связи. **Результаты:** предложена концепция полностью интегральной фотонной сенсорной системы на основе микрокольцевых add-drop-резонаторов. Разработан сенсор на основе микрокольцевых резонаторов, представляющий из себя два полукольца радиусом 18 мкм, соединенных участками прямых волноводов длиной 3 мкм. Разработано опрашивающее устройство в формате микрокольцевого резонатора радиусом 10 мкм. Согласно результатам моделирования с использованием широкополосного источника излучения чувствительность сенсора составила 110 нм (или 1350 дБ) на единицу изменения показателя преломления. Предложена методика выбора оптимальных характеристик сенсора и интеррогатора с точки зрения повышения эффективности работы системы в целом. **Практическая значимость:** сенсорные системы на основе фотонных интегральных схем способны удовлетворить существующий спрос на устройства, характеризующиеся низким энергопотреблением, компактностью, невосприимчивостью к электромагнитным помехам и малой стоимостью.

**Ключевые слова** – фотонные интегральные схемы, интеррогация по интенсивности, сенсор, сенсорная система, микрокольцевой резонатор.

**Для цитирования:** Воронков Г. С., Закоян А. Г., Иванов В. В., Воронкова А. В., Степанов И. В., Грахова Е. П., Любобытов В. С., Кутлуяров Р. В. Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

**For citation:** Voronkov G. S., Zakoyan A. G., Ivanov V. V., Voronkova A. V., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Lyubopytov V. S., Kutluyarov R. V. Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

### Введение

В настоящее время оптические сенсорные системы являются одним из наиболее динамично развивающихся элементов встраиваемых информационно-измерительных и управляющих систем. Благодаря высокой чувствительности, невосприимчивости к электромагнитным наводкам и другим преимуществам оптические датчики широко применяются в здравоохранении [1], охране окружающей среды [2, 3] и промышлен-

ности [4, 5]. В частности, анализаторы для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости играют значительную роль в медицине [6], экспериментальной биологии [7] и прикладной химии [8].

В общем случае структура оптической сенсорной системы включает датчик, источник света, детектор, а также схему опроса и контроля. Следуя современному вызову создания компактных и одновременно высокопроизводительных устройств, различные компоненты системы мо-

гут быть эффективно реализованы на основе технологии интегральной фотоники.

Среди подходов к реализации датчиков на фотонных интегральных схемах (ФИС) наиболее привлекательными с точки зрения технологичности представляются фазочувствительные схемы на основе волноводных брэгговских решеток [9–12], волноводных интерферометров Маха – Цендера [13–15], микрокольцевых или дисковых резонаторов [16–18]. Для изготовления интегральных сенсоров применяются платформы из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и кремний на стекляной или полимерной подложке (silicon-on-insulator, SOI). Нитрид кремния обеспечивает прозрачность для длин волн в видимом и ближайшем инфракрасном диапазоне. Это является важным преимуществом, так как для биосенсоров часто необходимо обеспечивать повышенную чувствительность именно в видимом спектре. Для работы в ближнем инфракрасном диапазоне чаще всего используют структуры SOI. При этом сенсоры на SOI имеют существенно меньшие размеры.

Среди известных решений наибольший потенциал для реализации безмаркерных детекторов демонстрируют датчики на основе микрокольцевых резонаторов (МКР) [19], так как они обладают значительной чувствительностью к обнаружению биомолекул в жидкостях и газах, являются быстродействующими и энергоэффективными [17, 18]. В основе принципа работы сенсора лежит зависимость резонансной длины волны кольца от показателя преломления (ПП) среды вблизи сенсора, значение которого определяется исследуемым параметром вещества.

В зависимости от вида волновода и выбранной рабочей моды значение чувствительности сенсора на МКР варьируется на данный момент от 70 до 490 нм/RIU [16] (RIU – refractive index unit, единица ПП). Для повышения этого показателя используют метод каскадирования колец [18, 20], субволновые решетчатые микрокольца [21, 22] или МКР на фазосдвигающей брэгговской решетке (phase-shifted Bragg grating microring) [23]. Без применения указанных методов чувствительность сенсоров на МКР составляет около 100 нм/RIU.

Наряду с характеристиками датчика показатели качества сенсорной системы в значительной степени определяются эффективностью системы опроса (интеррогации). Для оценки изменения оптического спектра применяются коммерческие интеррогаторы, которые используют оптические анализаторы спектра или перестраиваемые лазеры [24]. Недостатками этих методов являются высокая стоимость оборудования, низкая скорость опроса датчика и громоздкость системы.

Для расширения области практического применения были разработаны косвенные методы анализа спектра оптического излучения для высокоскоростной интеррогации с высоким разрешением [25]. Эти методы основаны на преобразовании сдвигов длины волны оптического сигнала в изменение параметров электрического сигнала и их оценке. В соответствии с регистрируемыми параметрами электрического сигнала выделяют три способа интеррогации: по интенсивности – при измерении мощности фототока [26], по частоте – при оценке частоты сигнала на выходе фотодетектора [27, 28] и по времени – при анализе формы огибающей выходного сигнала [29].

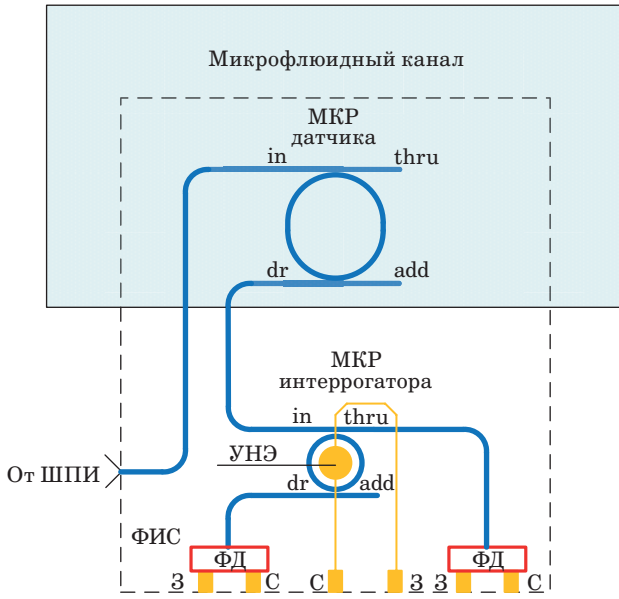
Несмотря на многообещающие перспективы, интеррогация по частоте и по форме требует использования быстродействующих аналого-цифровых преобразователей [30]. В свою очередь интеррогация по интенсивности является простым, но эффективным методом, обеспечивающим быстрый опрос датчиков с разрешением, достаточным для применения во многих областях [24]. Суть метода заключается в использовании оптического элемента, передаточная функция которого близка к линейной в диапазоне измеряемых длин волн (таким элементом может быть МКР [26]), для преобразования изменения длины волны излучения в изменение оптической интенсивности.

Таким образом, кремниевые оптические датчики стали перспективной площадкой для различных сенсорных приложений. Однако интеррогаторы для их опроса все еще остаются громоздкими и негибкими, что сводит на нет преимущества оптических сенсоров в интегральном исполнении. Следовательно, разработка полностью интегральной сенсорной системы, сочетающей в себе датчик и интеррогатор, реализованные на единой платформе, может стать следующим шагом на пути к технологическому совершенству в данной области.

В статье предложена концепция сенсорной системы на ФИС, реализованная на платформе SOI, для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости, включающая рефрактометрический датчик и устройство опроса. Предложена методика выбора оптимальных характеристик сенсора и интеррогатора с точки зрения повышения эффективности работы системы в целом.

### Архитектура и принцип действия предлагаемой сенсорной системы

Структура предлагаемой сенсорной системы приведена на рис. 1. На входной порт МКР, выполняющего функцию сенсора, поступает



■ **Рис. 1.** Структурная схема сенсорной системы: ШПИ – широкополосный источник; УНЭ – управляющий нагревательный элемент; ФД – фотодетекторы на through- и drop-портах; З – контакт точки общей шины («земля»); С – контакт сигнального проводника («сигнал»)

■ **Fig. 1.** Block scheme of the sensing system: ШПИ – broadband source; МКР датчика – MRR sensor; МКР интеррогатора – MRR interrogator; УНЭ – heater; ФД – photodetectors on through- and drop-ports; З – ground; С – signal

широкополосный сигнал от источника оптического излучения. Используются МКР с подводящим и отводящим волноводами, получившие в литературе название add-drop-резонаторов. Интенсивность и ширина полосы сигнала на выходе drop-порта сенсора определяется его резонансной характеристикой. Ширина полосы пропускания МКР по уровню половинной мощности (full width at half maximum, FWHM) при этом определяется по формуле [30]

$$FWHM = \frac{(1 - r_1 r_2 a) \lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}}, \quad (1)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – коэффициенты передачи каплевров на in-through- и add-drop-волноводы соответственно;  $a = \exp(\alpha L/2)$  – коэффициент передачи в кольце, измеренный в FDTD (Finite Difference Time Domain, метод конечных разностей во временной области),  $\alpha$  – коэффициент затухания в кольце;  $\lambda_{res}$  – резонансная длина волны МКР ( $\lambda_{res} = 2\pi n_{eff} R/m$ ),  $m$  – номер резонанса (натуральные числа, больше или равные 1);  $L = 2\pi R$  – длина окружности кольца,  $R$  – радиус кольца;  $n_g, n_{eff}$  – значения группового и эффективного ПП соответственно.

Коэффициенты передачи на выходе through- и drop-портов определяются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) МКР:

$$T_t = \frac{I_t}{I_{in}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + (r_1 r_2 a)^2}; \quad (2)$$

$$T_d = \frac{I_d}{I_{in}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + (r_1 r_2 a)^2}, \quad (3)$$

где  $I_t, I_d, I_{in}$  – интенсивности на through-, drop-, in-портах;  $\varphi$  – фазовый сдвиг, определяемый как  $\varphi = \beta L$  (коэффициент фазы  $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны).

Частота и интенсивность оптического излучения на выходе МКР определяются его конструкцией и ПП окружающей волноводы среды. Эти два свойства и используются в рассматриваемой сенсорной системе. Длина волны оптического излучения на выходе сенсора изменяется при изменении ПП анализируемой среды (аналита). Интенсивность оптического излучения на drop-порте интеррогатора изменяется в зависимости от длины волны излучения на его входном порте. Изменение какого-либо параметра (состава, концентрации, температуры) жидкости, протекающей по поверхности сенсора, приводит к изменению ее ПП. Это изменяет эффективный ПП  $n_{eff}$  датчика, и, следовательно, происходит изменение резонансной длины волны МКР. На рис. 2 показаны передаточные характеристики интеррогатора и сенсоров для различных значений ПП анализатора.

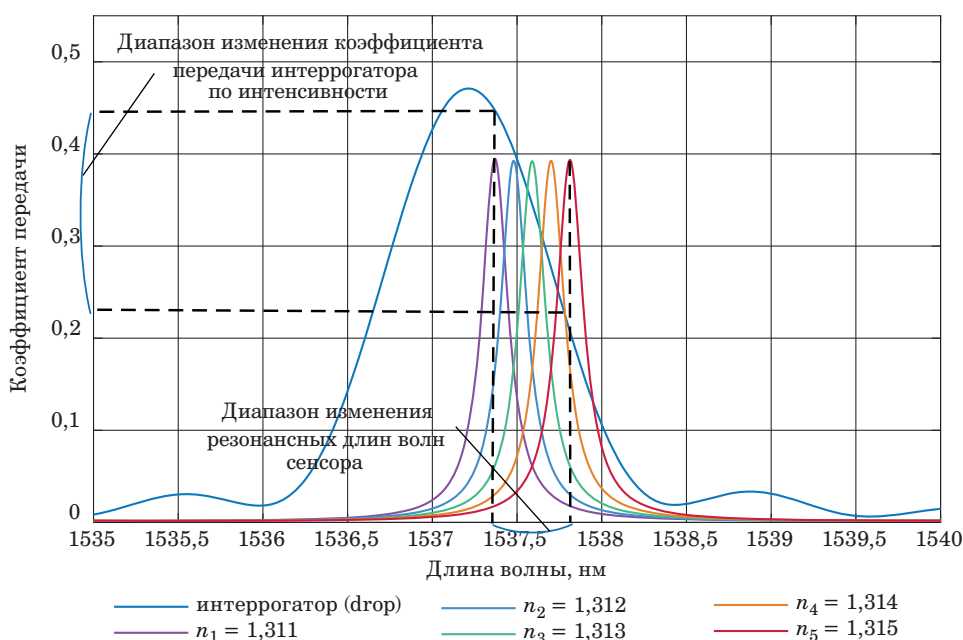
Анализ рис. 2 позволяет сформулировать некоторые важные требования к сенсорной системе, состоящей из двух кольцевых структур. Во-первых, представляется очевидным, что FWHM сенсора должен быть существенно меньше, чем FWHM интеррогатора, для обеспечения большей чувствительности интеррогатора. Следовательно, добротность  $Q$  для интеррогатора должна быть ниже, чем для сенсора:

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (4)$$

Реальное соотношение между FWHM сенсора и интеррогатора необходимо определять для конкретных сценариев применения и диапазона изменения резонансной длины волны сенсора.

Во-вторых, необходимо учитывать, что в МКР резонансы возникают периодически с шагом, определяемым параметром FSR (free spectral range):

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \approx \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (5)$$



■ **Рис. 2.** Передаточные характеристики drop-портов интеррогатора и сенсоров при различных значениях ПП аналита  
 ■ **Fig. 2.** Spectra of interrogator and sensors drop-ports at different refractive indices of analyte

Для повышения качества сенсорной системы необходимо обеспечить выполнение следующего условия: длины волн резонансных характеристик сенсора и интеррогатора совпадают (близки) в диапазоне длин волн, используемых для работы сенсорной системы, и существенно отличны в остальном частотном диапазоне ШПИ. На практике целесообразно подбирать (проектировать) ШПИ таким образом, чтобы ширина полосы его излучения незначительно превышала половину FWHM интеррогатора, а центральная длина волны соответствовала середине монотонного участка АЧХ интеррогатора, используемого для преобразования длины волны излучения в интенсивность.

Одним из основных недостатков системы интеррогации по интенсивности является ее зависимость от нестабильности мощности источника оптического излучения. Для того чтобы избавиться от этого недостатка, в качестве измерительного сигнала предлагается использовать относительную величину, определяемую как

$$P = 10 \lg \left( \frac{P_d}{P_d + P_t} \right), \quad (6)$$

где  $P_d = P_{in} T_d$  – мощность на drop-порте;  $P_t = P_{in} T_t$  – мощность на through-порте,  $P_{in0}$  – медианное значение мощности источника. С учетом того, что  $P_{in} = P_{in0} + \Delta P_{in}$  ( $\Delta P_{in}$  – отклонение выходной мощности):

$$P = 10 \lg \left( \frac{(P_{in0} + \Delta P_{in}) T_d}{(P_{in0} + \Delta P_{in}) T_d + (P_{in0} + \Delta P_{in}) T_t} \right).$$

Получаем

$$P = 10 \lg \left( \frac{T_d}{T_d + T_t} \right).$$

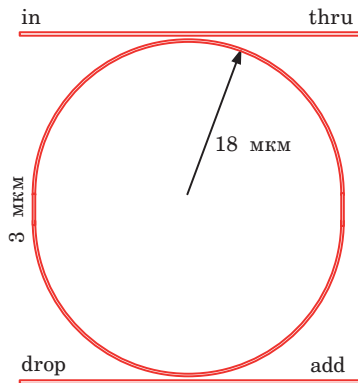
Таким образом, регистрируемая в системе относительная мощность не зависит от колебаний мощности источника излучения и определяется только передаточными характеристиками МКР.

### Моделирование датчика жидкости на основе МКР

Разработанная модель безмаркерного микрорезонансного сенсора для анализа жидкостей показана на рис. 3. Датчик представляет собой кремниевый МКР со вставками прямых участков волновода на кольце на слое SiO<sub>2</sub>. В англоязычной литературе такая конструкция получила название racetrack за схожесть формы с гоночным треком. Методом FDTD при использовании ПО Ansys Lumerical был рассчитан сенсор МКР, который имел следующие геометрические параметры (в микрометрах): внешний радиус – 18; длина прямого участка racetrack – 3; зазор (in-through) –

0,18; зазор (add-drop) – 0,25; высота волновода – 0,22; толщина волновода – 0,4. Расчет проводился для TE-моды.

Как можно заметить, значения зазора (расстояния между прямым волноводом и кольцом МКР, *англ.* gap) для in-through- и add-drop-волноводов различаются. Подбор значения зазора для in-through- волновода производился на основе критерия критической связи (*англ.* coupling) волноводов [30, 31]. С использованием FDTD был произведен расчет затухания в кольце МКР и коэффициентов связи. Наиболее близким к выполнению условия критической связи оказалось значение зазора для in-through-волновода, равное 0,18 мкм. Наличие add-drop-



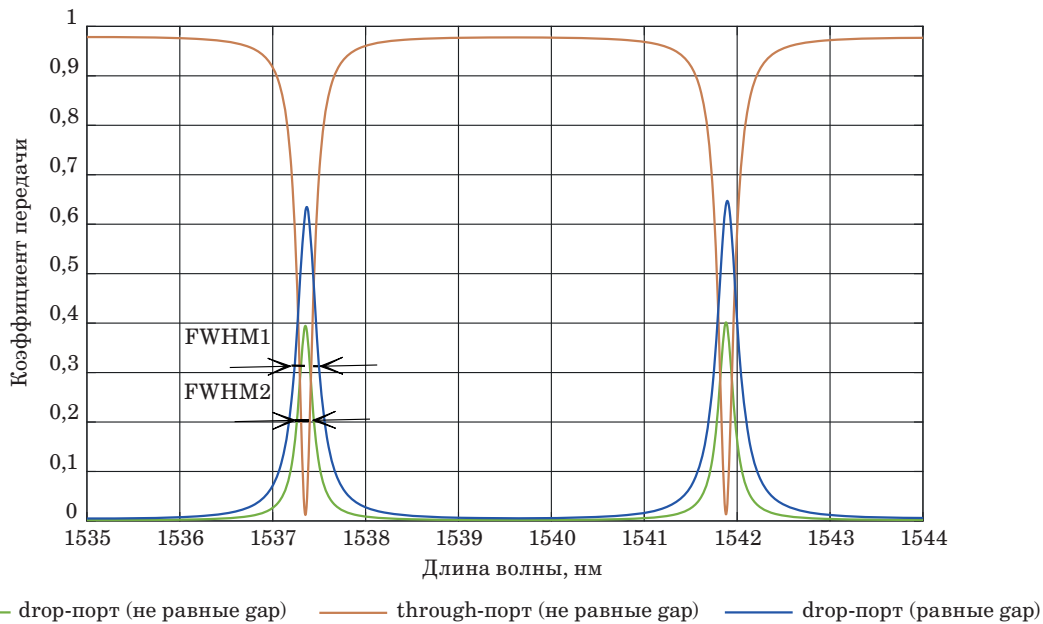
■ **Рис. 3.** Модель сенсора МКР формата racetrack  
 ■ **Fig. 3.** Racetrack MRR sensor scheme

волновода вносит в систему МКР дополнительное затухание, вызванное переходом энергии из кольца в drop-порт. Поэтому выбор значения зазора add-drop-волновода осуществлялся с учетом необходимости обеспечить высокую добротность в режиме, близком к критическому, позволяющем повысить чувствительность [30]. Резонансные свойства МКР оценивались по FWHM и добротности  $Q$  по формулам (1) и (4) с учетом того, что  $a = 0,971$ ;  $r_1 = 0,935$ ,  $r_2 = 0,961$ ;  $\lambda_{res} = 1537,36$  нм;  $L = 119,1$  мкм;  $n_g \sim 4,55$ ;  $n_{eff} \sim 2,21$ .

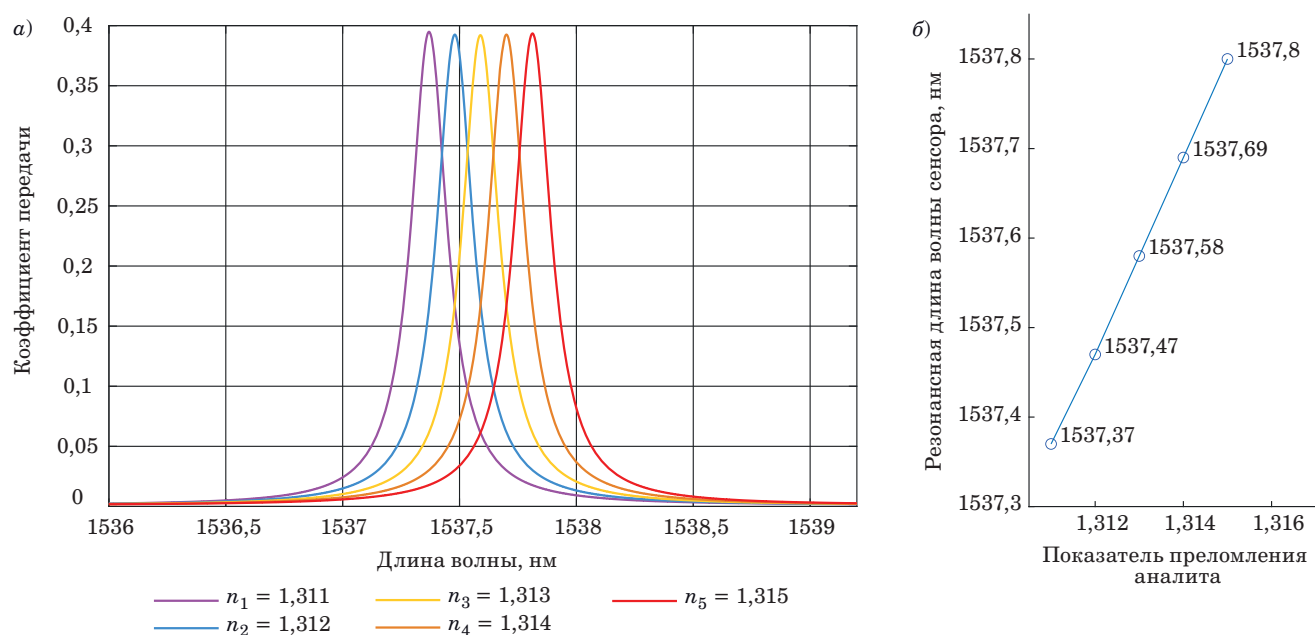
Как видно из спектров передачи на through- и drop-портах смоделированного сенсора (рис. 4), при равных значениях зазора (0,18 мкм) FWHM1 = 270 нм, а при отличающихся FWHM2 = 190 нм. Таким образом, увеличение зазора с add-drop-волноводом до 0,25 мкм снизило коэффициент связи и позволило уменьшить FWHM и обеспечить расчетную добротность  $Q \sim 8100$ . Дальнейшее увеличение зазора с add-drop-волноводом приводит к уменьшению мощности на drop-порте до значений, затрудняющих их регистрацию.

График (рис. 5, а) показывает смещение резонансной длины волны датчика на drop-порте при изменении ПП анализируемой жидкости (аналита)  $\Delta n_{ж}$ . При  $\Delta n_{ж} = 0,001$  значение  $\Delta\lambda$  между двумя соседними пиками составило 0,11 нм (рис. 5, б). Из полученных результатов было определено, что чувствительность сенсора

$$S = \Delta\lambda/\Delta n_{ж} = 110 \text{ нм/RIU}. \quad (7)$$



■ **Рис. 4.** АЧХ through- и drop-портов сенсора  
 ■ **Fig. 4.** Spectra of sensor's through- and drop-ports



■ **Рис. 5.** Зависимость спектра пропускания датчика МКР на drop-порте (а) и резонансной длины волны датчика (б) от ПП аналита

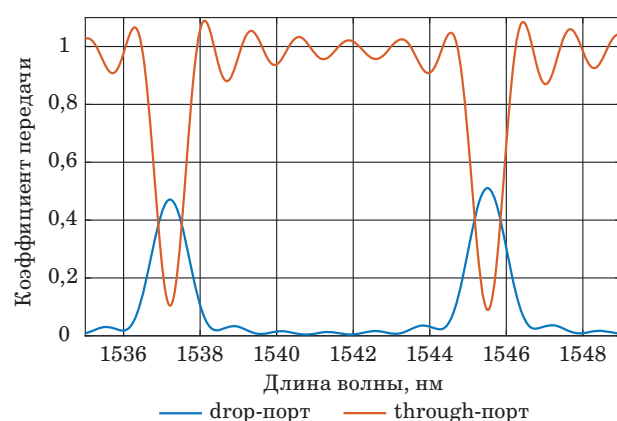
■ **Fig. 5.** The dependence of the sensor MRR transmission spectrum at the drop-port on the analyte RI (а) and resonant wavelength of the sensor on the analyte RI (б)

### Моделирование интеррогатора на основе МКР и результаты совместной схемы работы системы

Для отслеживания и фиксирования изменения резонансной длины волны датчика на ФИС предлагается интеррогация по амплитуде. Метод интеррогации по интенсивности заключается в интерпретации изменения резонансной длины волны в изменение мощности на выходе системы. В качестве интеррогатора была разработана модель микрокольцевого резонатора со следующими геометрическими параметрами (в микрометрах): внешний радиус – 10; зазор (in-through) – 0,1; зазор (add-drop) – 0,1; высота волновода – 0,22; толщина волновода – 0,4. АЧХ МКР представлена на рис. 6.

Исходя из критериев, приведенных в предыдущем разделе, были определены параметры МКР интеррогатора: добротность  $Q$  составила  $\sim 1700$ , а FWHM  $\sim 1,1$  нм. При сравнении АЧХ сенсора (см. рис. 4) и интеррогатора (см. рис. 6) получаем, что оба требования к сенсорной системе, приведенные в разделе «Архитектура и принцип действия предлагаемой сенсорной системы», выполняются.

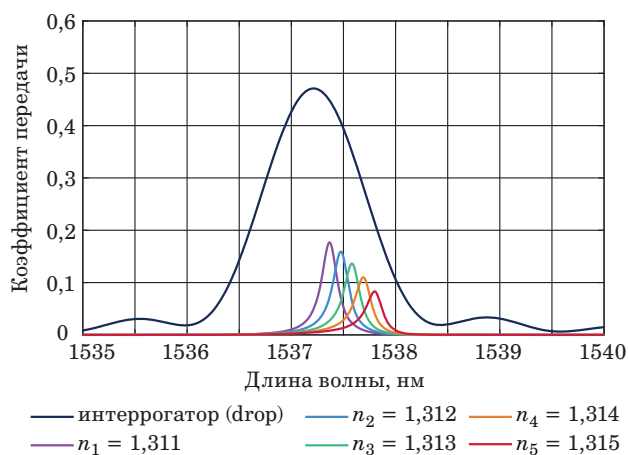
Моделирование совместной работы системы для отслеживания и фиксирования изменения резонансной длины волны проведено в соответствии со схемой (см. рис. 1) в среде Lumerical Interconnect. Показатель преломления анали-



■ **Рис. 6.** АЧХ through- и drop-портов интеррогатора

■ **Fig. 6.** Transmission spectrum of the through- and drop-ports of the interrogator

зируемого вещества изменялся от 1,311 до 1,315. Широкополосное излучение от источника мощностью 0 дБм, в качестве которого выступает ONA (optical network analyzer), поступает на in-порт сенсора, и при выполнении условия резонанса на его drop-порте появляется излучение. Диапазон длин волн излучения – от 1535 до 1550 нм. Это излучение попадает на in-порт интеррогатора. На рис. 7 показано, как изменяется интенсивность излучения на drop-порте интеррогатора при изменении  $n_{ж}$ . При совпадении резонансных длин волн у интеррогатора



■ **Рис. 7.** Спектр изменения коэффициента передачи сенсора в зависимости от разных ПП аналита

■ **Fig. 7.** Wavelength dependence of the sensor transmission coefficient for the different analyte RIs

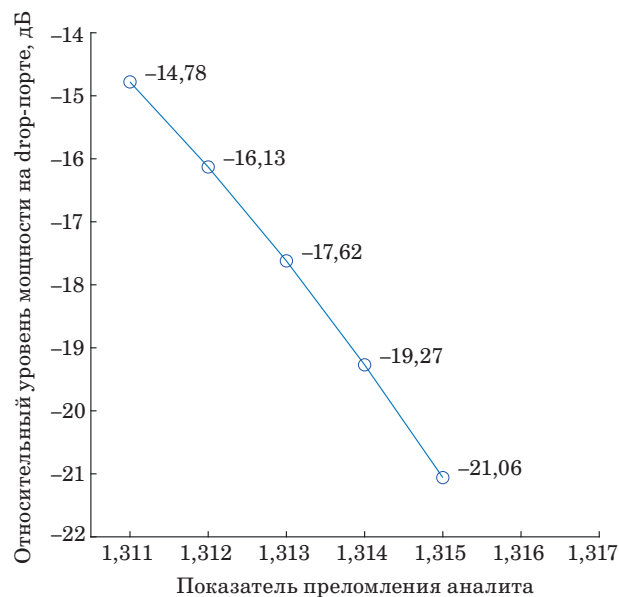
и сенсора на drop-порте интеррогатора будут максимальный коэффициент передачи и максимальная интенсивность оптического излучения, а при попадании резонанса сенсора на середину FSR интеррогатора коэффициент передачи будет минимальным, и все излучение пройдет на through-порт интеррогатора.

Для построения зависимости изменения относительной мощности на выходе схемы от  $n_{ж}$  сначала фиксировались интенсивности, поступающие на through- и drop-порты сенсора. Эти результаты для каждого порта отдельно были переведены в единицы электрической мощности с учетом чувствительности фотодетектора. Затем для каждого  $n_{ж}$  был рассчитан уровень относительной мощности на drop-порте по формуле (6). Результаты представлены на рис. 8.

Из графика видно, что изменение  $n_{ж}$  на 0,001 приводит к изменению регистрируемого параметра не менее чем на 1,35 дБ, что позволяет оценить чувствительность системы в целом по аналогии с формулой (7):

$$S = \Delta P / \Delta n_{ж} = 1350 \text{ дБ/RIU.}$$

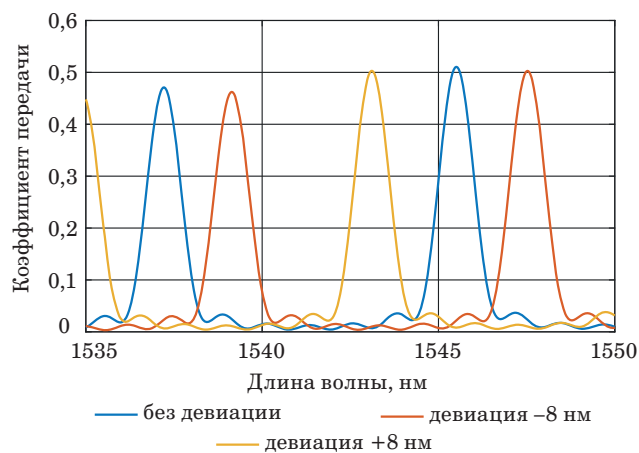
Необходимо отметить, что при изготовлении любой ФИС, в том числе сенсорной, могут возникать проблемы, связанные с девиацией ширины волновода. Эти погрешности воздействуют на производительность системы, поскольку девиация влияет на эффективный и групповой ПП волноводов и коэффициент связи в области каплинга у МКР. Согласно [32], стандартное отклонение ширины волновода на платформе SOI может достигать 3 нм в пределах одной пластины MPW (Multi-Project Wafer). Согласно [33], для разных пластин стандартное отклонение ширины



■ **Рис. 8.** Зависимость изменения относительной мощности на drop-порте от изменения ПП жидкости

■ **Fig. 8.** Dependence of the relative power at the interrogator drop-port on the analyte RI

волновода достигает 6,4 нм. Для максимального учета погрешностей доступных платформ были отдельно смоделированы МКР интеррогатора с девиацией габаритов волноводов +8 и -8 нм. Как видно из результатов моделирования (рис. 9), смещение пиков резонансов составило 2–2,5 нм, что значительно влияет на производительность системы, так как пики резонансов сенсора не попадут на нужный участок характеристики интеррогатора. Решить эту проблему можно подстройкой характеристики интерро-



■ **Рис. 9.** Спектральная характеристика МКР интеррогатора при девиации ширины волновода +/-8 нм

■ **Fig. 9.** Transmission spectrum of MRR interrogator at waveguide width deviation +/-8 nm

гатора с использованием УНЭ (см. рис. 1). С его помощью можно не только подстраивать характеристику интеррогатора под диапазон значений длин волн сенсоров, но и расширить границы измерения путем смещения спектральной характеристики опрашивающего МКР.

## Заключение

Предложена концепция совместной работы безмаркерного сенсора для анализа изменений ПП и интеррогатора для опроса указанного датчика. Выбор интеррогации по интенсивности обусловлен тем, что она проста в реализации, но при этом обеспечивает скорость опроса системы и разрешающую способность, достаточную для применения во многих областях, например в биомедицинских и промышленных приложениях. Для повышения чувствительности структуры приведены необходимые критерии калибровки двух МКР, благодаря которым

удалось достичь чувствительности системы 110 нм/RIU для датчика или 1350 дБ/RIU для системы в целом. Описанный способ измерения выходного сигнала дополнительно позволяет избавить сенсорную систему от негативного влияния флуктуаций выходной мощности широкополосного источника излучения, что даст возможность существенно снизить требования к таким источникам и, как следствие, сложность и стоимость сенсорной системы.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для ФГБОУ ВО «УГАТУ» (код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2021-014) в молодежной научно-исследовательской лаборатории НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

## Литература

1. **Tai H., Wang S., Duan Z., Jiang Y.** Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 318, 128104. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa\\_token=KtnazLoMakoAAAAA:rKxSJAoDrlzgkKmangrtE7Zqsc92dSRa1vJowHo96TZE-m-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa_token=KtnazLoMakoAAAAA:rKxSJAoDrlzgkKmangrtE7Zqsc92dSRa1vJowHo96TZE-m-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x) (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128104
2. **Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R.** UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109633. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa\\_token=G2v7GZw0qdQA-AAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZdfsyijdp-pvfLcUctZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882WG-Wn](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa_token=G2v7GZw0qdQA-AAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZdfsyijdp-pvfLcUctZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882WG-Wn) (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.petrol.2021.109633
3. **Arroyo P., Gómez-Suárez J., Herrero J. L., Lozano J.** Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 364, 131815. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2022.131815
4. **Zhang Q., Zhou Q., Lu Z., Wei Z., Xu L., Gui Y.** Recent advances of SnO<sub>2</sub>-based sensors for detecting fault characteristic gases extracted from power transformer oil. *Front. Chem.*, 2018, vol. 6, 364. Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00364/full> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3389/fchem.2018.00364
5. **Kondalkar V. V., Park J., Lee K.** MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 326, 128989. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520313368?via%3Dihu> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128989
6. **Luan E., Shoman H., Ratner D. M., Cheung K. C., Chrostowski L.** Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 2018, vol. 18, 3519. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3519> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s18103519
7. **Ciminelli C., Dell'Olio F., Conteduca D., Armenise M. N.** Silicon photonic biosensors. *IET Optoelectronics*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 48–54. doi:10.1049/iet-opt.2018.5082
8. **Chandrasekar R., Lapin Z. J., Nichols A. S., Braun R. M., Fountain A. W.** Photonic integrated circuits for department of defense-relevant chemical and biological sensing applications: State-of-the-art and future outlooks. *Opt. Eng.*, 2019, vol. 58, 1. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-58/issue-02/020901/Photonic-integrated-circuits-for-Department-of-Defense-relevant-chemical-and/10.1117/1.OE.58.2.020901.full?S-SO=1> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1117/1.OE.58.2.020901
9. **Morais E., Pontes M. J., Marques C., Leal-Junior A.** Liquid level sensor with two FBGs embedded in a PDMS diaphragm: Analysis of the linearity and sensi-



- tivity. *Sensors*, 2022, vol. 22, 1268. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1268> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s22031268
10. **Yang D., Liu Y., Wang Y., Zhang T., Shao M., Yu D., Fu H., Jia Z.** Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 126, 106112. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219313027?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.optlastec.2020.106112
  11. **Li H., An Z., Mao Q., Zuo S., Zhu W., Zhang S., Zhang C., Li E., Garcia J. D. P.** SOI waveguide bragg grating photonic sensor for human body temperature measurement based on photonic integrated interrogator. *Nanomaterials*, 2021, vol. 12, 29. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/1/29> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/nano12010029
  12. **Liu Y., Liu X., Zhang T., Zhang W.** Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 167–171. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.08.007
  13. **Vogelbacher F., Kothe T., Muellner P., Melnik E., Sagmeister M., Kraft J., Hainberger R.** Waveguide mach-zehnder biosensor with laser diode pumped integrated single-mode silicon nitride organic hybrid solid-state laser. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, vol. 197, 113816. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566321008538?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.bios.2021.113816
  14. **Sun X., Dai D., Thylén L., Wosinski L.** High-sensitivity liquid refractive-index sensor based on a mach-zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, pp. 25688–25699. doi:10.1364/OE.23.025688
  15. **Crespi A., Gu Y.** Three-dimensional Mach – Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free de-tection. *Lab Chip*, 2010, vol. 10, iss. 9, pp. 1167–1173. doi: 10.1039/B920062B
  16. **Wu S., Guo Y., Wang W., Zhou J., Zhang Q.** Label-free biosensing using a microring resonator integrated with poly-(dimethylsiloxane) microfluidic channels. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, 035004. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5074134> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1063/1.5074134
  17. **Gangwar R. K., Qin J., Wang X.** Porous silicon-based microring resonator for temperature and cancer cell detection. *Front. Phys.*, 2022, vol. 10, 929033. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.929033/full> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3389/fphy.2022.929033
  18. **Bahadoran M., Seyfari A. K., Sanati P., Chua L. S.** Label free identification of the different status of anemia disease using optimized double-slot cascaded microring resonator. *Sci Rep*, 2022, vol. 12, 5548. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-09504-2> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1038/s41598-022-09504-2
  19. **Zinoviev K., Carrascosa L. G., Sánchez del Río J., Sepúlveda B., Domínguez C., Lechuga L. M.** Silicon photonic biosensors for lab-on-a-chip applications. *Advances in Optical Technologies*, 2008, vol. 2008, 383927. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/aot/2008/383927/> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1155/2008/383927
  20. **Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R.** Silicon microring resonators. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, vol. 6, pp. 47–73. doi:10.1002/lpor.201100017
  21. **Huang L., Yan H., Xu X., Chakravarty S., Tang N., Tian H., Chen R. T.** Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 10527–10535. doi:10.1364/OE.25.010527
  22. **Wu N., Xia L.** Side-mode suppressed filter based on an angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design. *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, pp. 7174–7180. doi:10.1364/AO.58.007174
  23. **Zhao C. Y., Zhang L., Zhang C. M.** Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted bragg grating resonator for sensing. *Optics Communications*, 2018, vol. 414, pp. 212–216. doi:10.1016/j.optcom.2018.01.010
  24. **Słowikowski M., Kaźmierczak A., Stopiński S., Bieniek M., Szostak S., Matuk K., Augustin L., Piramidowicz R.** Photonic integrated interrogator for monitoring the patient condition during MRI diagnosis. *Sensors*, 2021, vol. 21, 4238. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4238>. (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s21124238
  25. **Yao J.** Microwave photonic sensors. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 3626–3637. doi:10.1109/JLT.2020.3047442
  26. **Tozzetti L., Bontempi F., Giacobbe A., Pasquale F. D., Faralli S.** Fast FBG interrogator on chip based on silicon on insulator ring resonator add/drop filters. *J. Lightwave Technol.*, 2022, vol. 40, pp. 5328–5336. doi:10.1109/JLT.2022.3174770
  27. **Chew S. X., Yi X., Yang W., Wu C., Li L., Nguyen L., Minasian R.** Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe. *IEEE Photonics J.*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1109/JPHOT.2017.2671461
  28. **Yao J.** Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing. *J. Lightwave Technol.*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3489–3497. doi:10.1109/JLT.2016.2586181
  29. **Yao J.** Photonic generation of microwave arbitrary waveforms. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, pp. 3723–3736. doi:10.1016/j.optcom.2011.02.069

30. Milvich J., Kohler D., Freude W., Koos C. Integrated phase-sensitive photonic sensors: A system design tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, 2021, vol. 13, pp. 584–642. doi:10.1364/AOP.413399

31. Cardenosa-Rubio M. C., Robison H. M., Bailey R. C. Recent advances in environmental and clinical analysis using microring resonator-based sensors. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, vol. 10, pp. 38–46. doi:10.1016/j.coesh.2019.09.001

32. Lu Z., Jhoja J., Klein J., Wang X., Liu A., Flueckiger J., Pond J., Chrostowski L. Performance pre-

diction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 9712–9733. doi:10.1364/OE.25.009712

33. Siew S. Y., Li B., Gao F., Zheng H. Y., Zhang W., Guo P., Xie S. W., Song A., Dong B., Luo L. W., Li C., Luo X., Lo G.-Q. Review of silicon photonics technology and platform development. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 4374–4389. doi:10.1109/JLT.2021.3066203

UDC 681.586.5

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30

EDN: VOWUUQ

### Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation

G. S. Voronkov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-8788-2696, voronkov.gs@ugatu.su

A. G. Zakoyan<sup>a</sup>, Student, orcid.org/0000-0002-6362-0755

V. V. Ivanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-4716-9466

A. V. Voronkova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-7060-952X

I. V. Stepanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0003-4677-5808

E. P. Grakhova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Acting Head of Labs, orcid.org/0000-0003-2207-2702

V. S. Lyubopytov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-1535-5341

R. V. Kutluyarov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-2724-6978

<sup>a</sup>Ufa University of Science and Technology, 32, Z. Validi St., Ufa, 450076, Russian Federation

**Introduction:** Today sensor systems based on integrated photonics devices are the most important branch of embedded information and control systems for various functions. The output characteristics of a sensor system are significantly determined by the efficiency of the interrogator. The intensity interrogator based on a microring resonator can provide a high scanning rate and sensitivity that meets the requirements of a wide range of applications. **Purpose:** To develop an effective sensor system composed of a refractometric sensor and an interrogator located on the same photonic integrated circuit for marker-free determination of the concentration of substances in liquids. **Methods:** We use the numerical simulation of electromagnetic field propagation in a waveguide system (integrated silicon waveguides on a silicon dioxide substrate) in the research. The simulation has been carried out using the Ansys Lumerical environment, the FDTD (Finite Difference Time Domain) solver. The parameters of the microring resonators were optimized to obtain the coupling coefficients between the waveguides, providing the operation in the critical coupling mode. **Results:** We propose the concept of a fully integrated photonic sensor system based on micro-ring add-drop resonators. A sensor based on microring resonators has been developed, which consists of two half-rings with a radius of 18  $\mu\text{m}$ , connected by sections of straight waveguides 3  $\mu\text{m}$  long. An interrogator represented by a microring resonator with a radius of 10  $\mu\text{m}$  has been developed. According to simulation results with a broadband source, the achieved sensor sensitivity was 110 nm (or 1350 dB) per refractive index change. We propose a technique for choosing the optimal characteristics of the sensor and interrogator targeted to improve the complete system efficiency. **Practical relevance:** Sensor systems based on photonic integrated circuits can meet the demand for devices characterized by low power consumption, small size, immunity to electromagnetic interference and low cost.

**Keywords** — photonic integrated circuits, intensity interrogation, sensor, sensor system, microring resonator.

**For citation:** Voronkov G. S., Zakoyan A. G., Ivanov V. V., Voronkova A. V., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Lyubopytov V. S., Kutluyarov R. V. Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

### Financial support

The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment for the FSBEI HE “USATU” (agreement No. 075-03-2021-014) and conducted in the research laboratory “Sensor systems based on integrated photonics devices” of the Eurasian Scientific and Educational Center.

### References

1. Tai H., Wang S., Duan Z., Jiang Y. Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 318, 128104. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa\\_token=KtnazLoMakoAAAAA:r-KxSJAoDrlzgzKkmangRtE7Zqsc92dSRa1vjow-Ho96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa_token=KtnazLoMakoAAAAA:r-KxSJAoDrlzgzKkmangRtE7Zqsc92dSRa1vjow-Ho96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x) (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128104
2. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. UAV-based remote sensing for the petroleum industry and envi-

- ronmental monitoring: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109633. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa\\_token=G-2v7GZw0qdQAAAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZd-fsyijdPpvfLclUCtZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882W-GWn](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa_token=G-2v7GZw0qdQAAAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZd-fsyijdPpvfLclUCtZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882W-GWn) (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.petrol.2021.109633
3. Arroyo P., Gómez-Suárez J., Herrero J. L., Lozano J. Electrochemical gas sensing module combined with unmanned

- aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 364, 131815. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2022.131815
4. Zhang Q., Zhou Q., Lu Z., Wei Z., Xu L., Gui Y. Recent advances of SnO<sub>2</sub>-based sensors for detecting fault characteristic gases extracted from power transformer oil. *Front. Chem.*, 2018, vol. 6, 364. Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00364/full> (accessed 28 August 2022). doi:10.3389/fchem.2018.00364
  5. Kondalkar V. V., Park J., Lee K. MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 326, 128989. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520313368?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128989
  6. Luan E., Shoman H., Ratner D. M., Cheung K. C., Chrostowski L. Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 2018, vol. 18, 3519. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3519> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s18103519
  7. Ciminelli C., Dell'Olio F., Contedua D., Armenise M. N. Silicon photonic biosensors. *IET Optoelectronics*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 48–54. doi:10.1049/iet-opt.2018.5082
  8. Chandrasekar R., Lapin Z. J., Nichols A. S., Braun R. M., Fountain A. W. Photonic integrated circuits for department of defense-relevant chemical and biological sensing applications: State-of-the-art and future outlooks. *Opt. Eng.*, 2019, vol. 58, 1. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-58/issue-02/020901/Photonic-integrated-circuits-for-Department-of-Defense-relevant-chemical-and/10.1117/1.OE.58.2.020901.full?S-SO=1> (accessed 28 August 2022). doi:10.1117/1.OE.58.2.020901
  9. Morais E., Pontes M. J., Marques C., Leal-Junior A. Liquid level sensor with two FBGs embedded in a PDMS diaphragm: Analysis of the linearity and sensitivity. *Sensors*, 2022, vol. 22, 1268. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1268> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s22031268
  10. Yang D., Liu Y., Wang Y., Zhang T., Shao M., Yu D., Fu H., Jia Z. Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 126, 106112. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219313027?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.optlastec.2020.106112
  11. Li H., An Z., Mao Q., Zuo S., Zhu W., Zhang S., Zhang C., Li E., García J. D. P. SOI waveguide bragg grating photonic sensor for human body temperature measurement based on photonic integrated interrogator. *Nanomaterials*, 2021, vol. 12, 29. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/1/29> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/nano12010029
  12. Liu Y., Liu X., Zhang T., Zhang W. Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 167–171. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.08.007
  13. Vogelbacher F., Kothe T., Muellner P., Melnik E., Sagmaister M., Kraft J., Hainberger R. Waveguide mach-zehnder biosensor with laser diode pumped integrated single-mode silicon nitride organic hybrid solid-state laser. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, vol. 197, 113816. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566321008538?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.bios.2021.113816
  14. Sun X., Dai D., Thylén L., Wosinski L. High-sensitivity liquid refractive-index sensor based on a mach-zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, pp. 25688–25699. doi:10.1364/OE.23.025688
  15. Crespi A., Gu Y. Three-dimensional Mach – Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free detection. *Lab Chip*, 2010, vol. 10, iss. 9, pp. 1167–1173. doi:10.1039/B920062B
  16. Wu S., Guo Y., Wang W., Zhou J., Zhang Q. Label-free biosensing using a microring resonator integrated with poly-(dimethylsiloxane) microfluidic channels. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, 035004. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5074134> (accessed 28 August 2022). doi:10.1063/1.5074134
  17. Gangwar R. K., Qin J., Wang X. Porous silicon-based microring resonator for temperature and cancer cell detection. *Front. Phys.*, 2022, vol. 10, 929033. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.929033/full> (accessed 28 August 2022). doi:10.3389/fphy.2022.929033
  18. Bahadoran M., Seyfari A. K., Sanati P., Chua L. S. Label free identification of the different status of anemia disease using optimized double-slot cascaded microring resonator. *Sci Rep*, 2022, vol. 12, 5548. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-09504-2> (accessed 28 August 2022). doi:10.1038/s41598-022-09504-2
  19. Zinoviev K., Carrascosa L. G., Sánchez del Río J., Sepúlveda B., Domínguez C., Lechuga L. M. Silicon photonic biosensors for lab-on-a-chip applications. *Advances in Optical Technologies*, 2008, vol. 2008, 383927. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/aot/2008/383927/> (accessed 28 August 2022). doi:10.1155/2008/383927
  20. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R. Silicon microring resonators. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, vol. 6, pp. 47–73. doi:10.1002/lpor.201100017
  21. Huang L., Yan H., Xu X., Chakravarty S., Tang N., Tian H., Chen R. T. Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 10527–10535. doi:10.1364/OE.25.010527
  22. Wu N., Xia L. Side-mode suppressed filter based on angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design. *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, pp. 7174–7180. doi:10.1364/AO.58.007174
  23. Zhao C. Y., Zhang L., Zhang C. M. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted bragg grating resonator for sensing. *Optics Communications*, 2018, vol. 414, pp. 212–216. doi:10.1016/j.optcom.2018.01.010
  24. Słowikowski M., Kaźmierczak A., Stopiński S., Bieniek M., Szostak S., Matuk K., Augustin L., Piramidowicz R. Photonically integrated interrogator for monitoring the patient condition during MRI diagnosis. *Sensors*, 2021, vol. 21, 4238. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4238> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s21124238
  25. Yao J. Microwave photonic sensors. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 3626–3637. doi:10.1109/JLT.2020.3047442
  26. Tozzetti L., Bontempi F., Giacobbe A., Pasquale F. D., Faralli S. Fast FBG interrogator on chip based on silicon on insulator ring resonator add/drop filters. *J. Lightwave Technol.*, 2022, vol. 40, pp. 5328–5336. doi:10.1109/JLT.2022.3174770
  27. Chew S. X., Yi X., Yang W., Wu C., Li L., Nguyen L., Minasian R. Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe. *IEEE Photonics J.*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1109/JPHOT.2017.2671461
  28. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing. *J. Lightwave Technol.*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3489–3497. doi:10.1109/JLT.2016.2586181
  29. Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, pp. 3723–3736. doi:10.1016/j.optcom.2011.02.069
  30. Milvich J., Kohler D., Freude W., Koos C. Integrated phase-sensitive photonic sensors: A system design tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, 2021, vol. 13, pp. 584–642. doi:10.1364/AOP.413399
  31. Cardenosa-Rubio M. C., Robison H. M., Bailey R. C. Recent advances in environmental and clinical analysis using microring resonator-based sensors. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, vol. 10, pp. 38–46. doi:10.1016/j.coesh.2019.09.001
  32. Lu Z., Jhoja J., Klein J., Wang X., Liu A., Flueckiger J., Pond J., Chrostowski L. Performance prediction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 9712–9733. doi:10.1364/OE.25.009712
  33. Siew S. Y., Li B., Gao F., Zheng H. Y., Zhang W., Guo P., Xie S. W., Song A., Dong B., Luo L. W., Li C., Luo X., Lo G.-Q. Review of silicon photonics technology and platform development. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 4374–4389. doi:10.1109/JLT.2021.3066203