

УДК 621.372.8.029.7 : 681.586.36

## ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Гончаренко И.А., д.ф.-м.н, доцент, Киреенко В.П., к.ф.-м.н, доцент,  
Конойко А.И.\*, к.ф.-м.н, доцент

\*Институт физики НАН Беларуси, г. Минск

*В статье рассмотрены структурная схема и принцип работы интегрально-оптического датчика концентрации на основе щелевых волноводных микрорезонаторов. Использование оптического излучения позволяет применять такие датчики для измерения концентрации легковоспламеняющихся жидкостей и газов. Благодаря использованию щелевых волноводов чувствительность датчика к изменению показателя преломления может достигать  $10^{-6}$ – $10^{-7}$ . Быстродействие устройства определяется временем установления стационарного режима в кольцевом микрорезонаторе и составляет десятки пикосекунд. Таким образом, с помощью данного устройства можно измерять концентрацию как покоящихся, так и текущих с большой скоростью жидкостей и газов. Датчик может иметь большое число чувствительных элементов, что позволяет одновременно контролировать концентрацию в различных точках объема вещества.*

(Поступила в редакцию 25 марта 2009 г.)

### Введение

Потребность в датчиках стремительно растет в связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам. Датчики являются также важными элементами систем противопожарной сигнализации и аварийной защиты. Помимо хороших метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации. Эти требования в полной мере относятся и к датчикам концентрации веществ, которые могут использоваться в качестве чувствительных элементов аварийной сигнализации опасных концентраций взрывоопасных и легковоспламеняющихся жидкостей и газов.

Одним из наиболее распространенных традиционных промышленных методов определения концентрации технологических растворов является кондуктометрия, то есть измерение электрической проводимости технологических сред контактным или бесконтактным (индукционным, высокочастотным и др.) способом [1] и автоматическое вычисление на основе результата измерений концентрации раствора, поскольку концентрация и удельная электрическая проводимость среды связаны определенной функциональной зависимостью. Этот метод отличают относительная простота реализации, высокая техническая и метрологическая надежность аппаратуры, простота интерпретации получаемых результатов и достаточная для решения практических задач точность.

Однако такие устройства требуют подведения к измеряемой среде электрического тока, поэтому их использование для контроля концентрации легковоспламеняющихся жидкостей и газов, а также для работы во взрывоопасных средах чаще всего неприемлемо или же требует значительного усложнения конструкции. Для измерения параметров легковоспламеняющихся сред можно использовать волоконно-оптические и интегрально-оптические датчики [2–4]. Подобные устройства обладают абсолютной взрывобезопасностью; имеют высокую механическую прочность, малые габариты, простую конструкцию и, соответственно, высокую надежность; химически инертны; изготавливаются из диэлектрических материалов, чем обеспечивается отсутствие путей прохождения через них электрического тока; имеют высокую стойкость к повышенным температурам, механическим ударам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды.

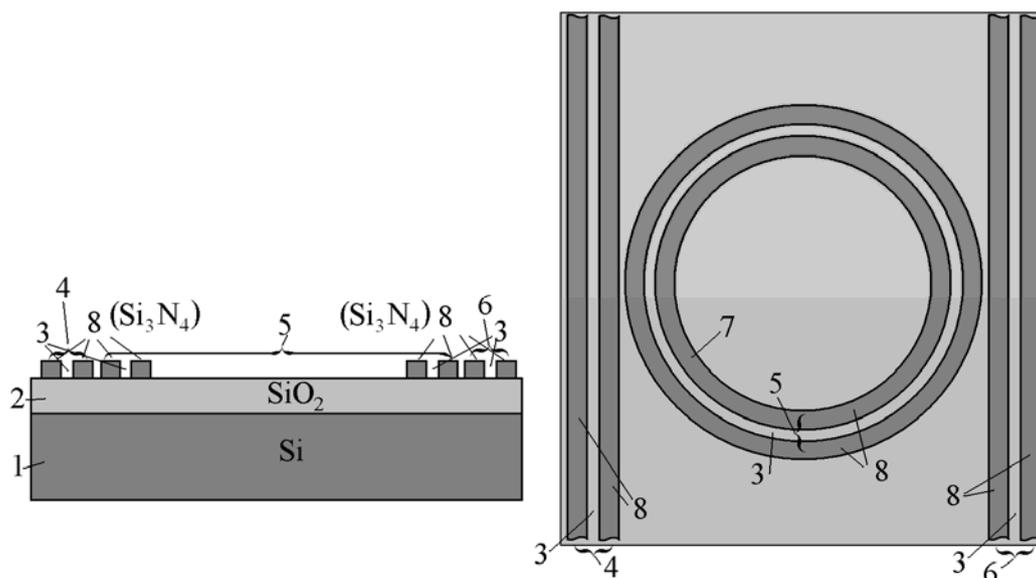
Интегральные оптические устройства имеют важные преимущества в качестве биохимических сенсоров, так как обладают высокой чувствительностью, малыми размерами и высокой степенью интеграции [4]. В частности, планарные волноводные устройства позволяют измерять небольшие изменения показателя преломления веществ. Такие интегрально-оптические датчики могут быть созданы на основе интерферометров Маха-Цендера [5], направленных ответвителей [6], микрокольцевых [7, 8] и дисковых [9] резонаторов и фотонных кристаллов [10, 11].

В последнее время предложен новый тип волноводных устройств – так называемые щелевые волноводы [12]. Щелевой волновод состоит из двух полосок материала с высоким показателем преломления, разделенных областью с низким показателем преломления (щелью), размеры которой меньше длины волны. Поскольку электрические поля неразрывны на границе раздела материалов с разными показателями преломления, в щелевой области можно достичь больших оптических интенсивностей [13]. Это свойство делает щелевые волноводы весьма перспективными для применения в качестве сенсоров [14, 15].

В данной работе рассматриваются методы построения и принцип работы интегрально-оптического датчика концентрации жидкостей и газов на основе щелевых волноводных кольцевых микрорезонаторов.

### Структурная схема и принцип работы датчика

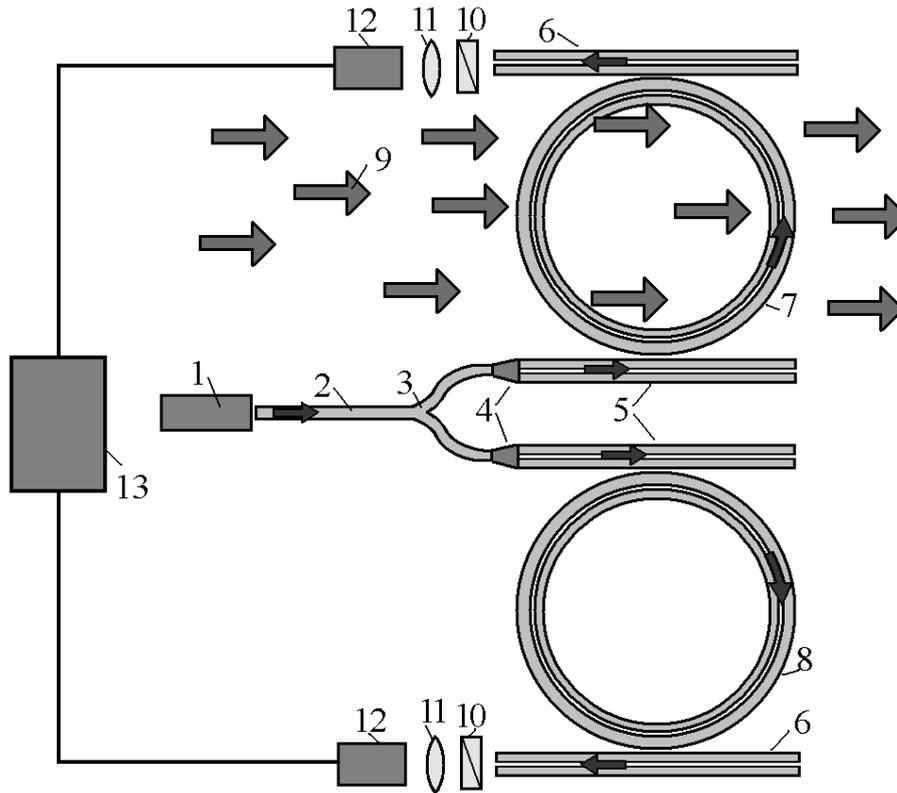
Волноводный кольцевой микрорезонатор представляет собой замкнутый оптический волновод с радиусом изгиба порядка десятка микрометров. Ввод и вывод оптических сигналов в микрорезонатор осуществляются с помощью прямых оптических волноводов, которые связаны с кольцевым волноводом через спадающие поля и расположены на той же подложке. Микрорезонатор обладает набором резонансных длин волн. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, переходит в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, на выходной волновод переходит излучение в узких спектральных диапазонах, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора. Поперечное сечение и вид сверху кольцевого микрорезонатора на щелевых волноводах показаны на рисунке 1.



1 – подложка из Si; 2 – слой SiO<sub>2</sub>; 3 – щели; 4 – подводящий щелевой волновод; 5 – щелевой волновод кольцевого микрорезонатора; 6 – выходной щелевой волновод; 7 – кольцо микрорезонатора; 8 – полоски щелевых волноводов из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

**Рисунок 1 – Структурная схема кольцевого микрорезонатора на основе щелевого волновода**

Структурная схема датчика представлена на рисунке 2. Устройство состоит из двух кольцевых микрорезонаторов на основе щелевых волноводов, подводящих щелевых и полосковых волноводов, выходных щелевых волноводов, разветвителя, источника излучения, преобразователей мод, поляризаторов, фотодетекторов и устройства сравнения сигналов. Преобразователи мод служат для согласования мод полосковых и щелевых волноводов. Вещество (жидкость или газ), концентрация которого измеряется, проходит через чип с одним из микрорезонаторов. На второй микрорезонатор вещество не подается, и он предназначен для компенсации изменения температуры и флуктуаций излучения источника.



1 – источник излучения; 2 – полосковый волновод; 3 – разветвитель; 4 – преобразователи мод; 5 – подводящие щелевые волноводы; 6 – выходные щелевые волноводы; 7 – первый (измерительный) кольцевой микрорезонатор на основе щелевого волновода; 8 – второй кольцевой микрорезонатор на основе щелевого волновода (микрорезонатор сравнения); 9 – измеряемое вещество; 10 – поляризаторы; 11 – объективы; 12 – фотодетекторы; 13 – устройство сравнения сигналов.

**Рисунок 2 – Блок схема датчика измерения концентрации жидкостей и газов**

Принцип работы датчика основан на изменении волноводных свойств щелевого волновода и, как следствие, резонансных условий микрорезонатора в зависимости от показателя преломления измеряемого вещества. Поскольку показатель преломления жидкостей и газов зависит от их концентрации, то таким образом можно определять и концентрацию веществ. Оптическое излучение с длиной волны  $\lambda_0$  от источника вводится в полосковый волновод (для этого можно использовать оптическое волокно с линзой на конце). Из полоскового волновода через разветвитель излучение попадает в подводящие щелевые волноводы. Если длина волны света  $\lambda_0$  соответствует резонансной длине волны  $\lambda_{рез}$  кольцевого микрорезонатора, то излучение будет ответвляться из подводящих щелевых волноводов в щелевые волноводы двух кольцевых волноводных микрорезонаторов и проходить через них на выходные щелевые волноводы. В результате на выходе микрорезонаторов появляется излучение, интенсивность которого зависит от различия  $\lambda_0$  и  $\lambda_{рез}$ . Выходной свет коллимируется объективами, фильтруется поляризаторами и собирается фотодетекторами. Устройство сравнения сигналов сравнивает сигналы от двух фотодетекторов и выдает разностный сигнал.

Измеряемое вещество подается на щелевой волновод одного из волноводных кольцевых микрорезонаторов (измерительный микрорезонатор) и заполняет щель волновода микрорезонатора и окружающее его пространство. Поскольку показатель преломления вещества зависит от концентрации, это приводит к изменению направляющих свойств (изменению волноводного показателя преломления) щелевого волновода. Резонансная длина волны кольцевого резонатора зависит от волноводного показателя преломления  $n_{эф}$  как:

$$\lambda_{рез} = L n_{эф}/m, \quad (1)$$

где  $L$  – длина волновода резонатора;

$m$  – порядок резонаторной моды ( $m = 1, 2, \dots$ ).

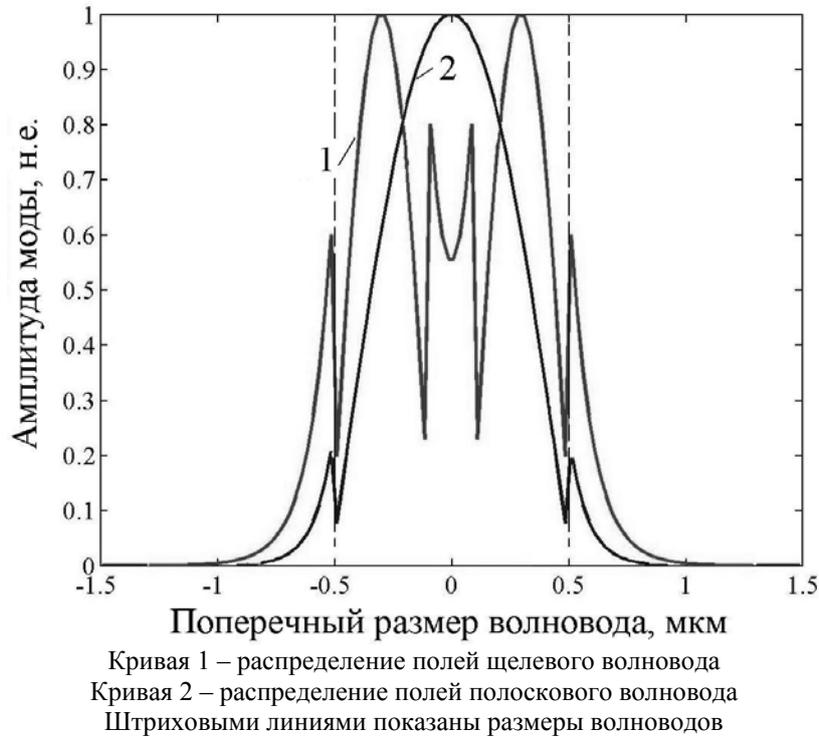
В результате вариаций  $n_{эф}$  меняются резонансные условия и резонансная длина волны  $\lambda_{рез}$  кольцевого волноводного микрорезонатора. Это приводит к изменению интенсивности сигнала на длине волны  $\lambda_0$  на выходе микрорезонатора. Таким образом, будет меняться и выходной сигнал фотодетектора. На второй кольцевой микрорезонатор (микрорезонатор сравнения) измеряемое вещество не подается, поэтому интенсивность на выходе этого микрорезонатора не меняется, но разностный сигнал на выходе устройства сравнения сигналов будет изменяться. Причем изменение этого разностного сигнала пропорционально показателю преломления измеряемого вещества, т. е. его концентрации.

Для повышения достоверности измерений и компенсации временных флуктуаций интенсивности и частоты излучения источника, а также вариаций температуры используется опорный сигнал, в качестве которого используется излучение с выхода второго микрорезонатора. Изменение температуры также приводит к изменению резонансных условий кольцевых микрорезонаторов. В результате интенсивность сигнала на длине волны  $\lambda_0$  на выходе кольцевых резонаторов будет уменьшаться. Поскольку оба кольцевых волноводных микрорезонатора находятся в одинаковых температурных условиях, то выходные сигналы обоих микрорезонаторов будут изменяться на одну и ту же величину, и разностный выходной сигнал не меняется.

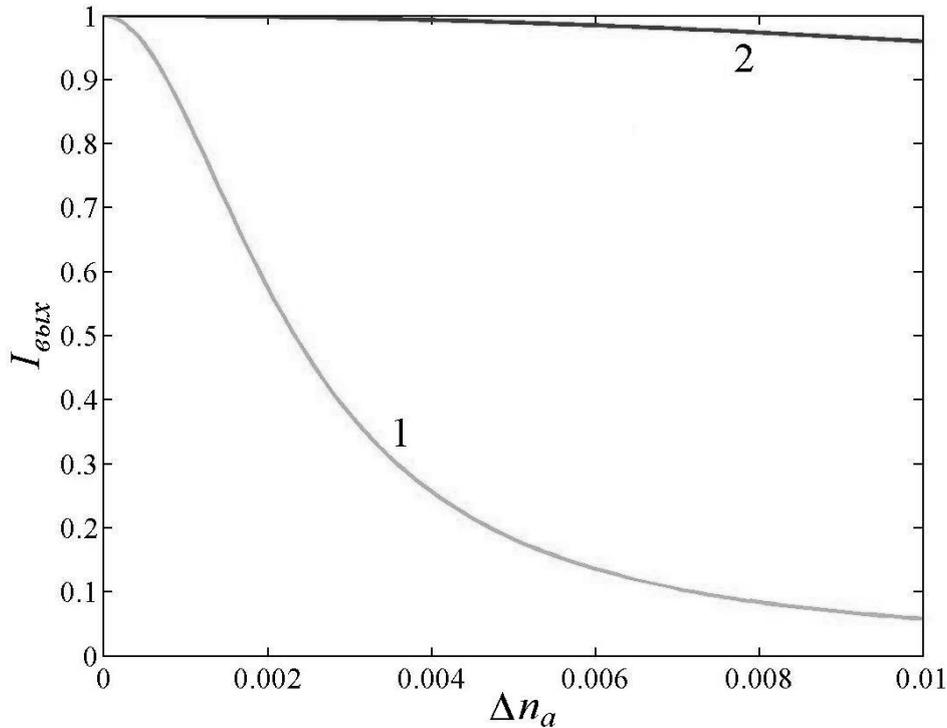
На рисунке 3 показано распределение полей направляемых мод полоскового волновода и щелевого волновода по их поперечному сечению, рассчитанное с помощью метода линий [16, 17]. Расчет проводился для волноводов из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , нанесенных на слой  $\text{SiO}_2$ , расположенный на кремниевой подложке (см. рис. 1). Использование  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для изготовления полосок щелевого волновода позволяет увеличить размеры щели и, в результате, упростить ее заполнение жидкостью [14]. Ширина полоскового волновода составляла 1000 нм. Ширина полосок в подводящем и выходном щелевых волноводах бралась 400 нм, в щелевом волноводе кольцевого микрорезонатора ширина внутренней полоски – 400 нм, внешней – 500 нм [13, 14]. Полоски разделены щелью шириной 200 нм. Высота полосок составляла 300 нм. Длина волны оптического излучения – 1550 нм. Размеры волноводов показаны на рисунке штриховыми линиями. Как видно из рисунка, преимущество щелевого волновода перед обычным полосковым состоит в том, что в щелевом волноводе поле моды имеет достаточно большое значение в области щели. Таким образом, изменение показателя преломления в области щели оказывает резкое влияние на волноводные свойства такого волновода. В полосковом же волноводе измеряемое вещество расположено только на окружности волновода. В областях, окружающих волновод, поля направляемых волноводом мод, как видно из рисунка 3, резко спадают и имеют незначительную величину.

На рисунке 4 показано изменение интенсивности излучения на выходе кольцевого микрорезонатора на основе щелевого и полоскового волноводов в зависимости от изменения показателя преломления (концентрации) измеряемого вещества. Расчет проводился для кольцевого микрорезонатора с радиусом 32 мкм и коэффициентами связи между подводящими и кольцевым волноводами 0,5. Время установления стационарного режима в микрорезонаторе с такими параметрами – порядка 50 пс [18]. Показатель преломления измеряемого вещества брался в диапазоне 1,34÷1,35, что соответствует водным растворам

этанола с различной концентрацией. Для сравнения на этом же рисунке представлено изменение интенсивности излучения на выходе микрорезонатора на основе полоскового волновода. Как видно из рисунка, чувствительность кольцевого микрорезонатора на основе щелевого волновода к изменению показателя преломления окружающей среды на несколько порядков превышает чувствительность датчика на полосковых волноводах.



**Рисунок 3 – Поперечное распределение полей направляемых мод щелевого и полоскового волноводов**



**Рисунок 4 – Изменение интенсивности излучения на выходе кольцевых микрорезонаторов на основе щелевого (кривая 1) и полоскового (кривая 2) волноводов в зависимости от изменения показателя преломления измеряемого вещества**

Динамический диапазон современных фотоприемников видимого излучения достигает 30÷40 дБ. В результате чувствительность датчика на основе щелевого волновода на изменение показателя преломления может достигать  $10^{-6}$ ÷ $10^{-7}$ .

### Заключение

В данной работе рассмотрена структурная схема и принцип работы интегрально-оптического датчика концентрации веществ. Датчик основан на использовании оптического излучения, что позволяет применять его для измерения концентрации легковоспламеняющихся жидкостей и газов. Использование микрорезонаторов на основе щелевых волноводов позволяет на несколько порядков повысить чувствительность датчика. Быстродействие устройства определяется временем установления стационарного режима в кольцевом микрорезонаторе и составляет десятки пикосекунд. Таким образом, данное устройство позволяет измерять концентрацию как покоящихся, так и текущих с большой скоростью жидкостей или газов. Датчик может иметь большое число чувствительных элементов, что позволяет одновременно контролировать концентрацию в различных точках потока или объема вещества. Датчик имеет микронные размеры и может быть изготовлен по хорошо отработанной интегральной технологии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жарковский, Б.И. Приборы автоматического контроля и регулирования / Б.И. Жарковский. – М. : Высшая школа, 1989. – 336 с.
2. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // Фотон-Экспресс – Наука. – 2005. – № 6. – С. 128–140.
3. Гуляев, Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев [и др.] // Радиотехника. – 2005. – № 8. – С. 9–18.
4. Passaro, V.M.N. Guided-wave optical biosensors / V.M.N. Passaro [et al.] // Sensors. – 2007. – Vol. 7. – P. 508–536.
5. Heideman, R.G. Performance of a highly sensitive optical waveguide Mach-Zehnder interferometer immunosensor / R.G. Heideman, R.P.H. Kooyman, J. Greve // Sensors and Actuators B. – 1993. – Vol. 10, No. 3. – P. 209–217.
6. Luff, B.J. Integrated-optical directional coupler biosensor / B.J. Luff [et al.] // Optics Letters. – 1996. – Vol. 21, No. 8. – P. 618–620.
7. Yalçın, A. Optical sensing of biomolecules using microring resonators / A. Yalçın [et al.] // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2006. – Vol. 12, No. 1. – P. 148–155.
8. De Vos, K. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing / K. De Vos [et al.] // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, No. 12. – P. 7610–7615.
9. Schweinsberg, A. An environmental sensor based on an integrated optical whispering gallery mode disk resonator / A. Schweinsberg [et al.] // Sensors and Actuators B. – 2007. – Vol. 123, No. 2. – P. 727–732.
10. Chow, E. Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity / E. Chow [et al.] // Optics Letters. – 2004. – Vol. 28, No. 10. – P. 1093–1095.
11. Skivesen, N. Photonic-crystal waveguide biosensor / N. Skivesen [et al.] // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, No. 6. – P. 3169–3176.
12. Almeida, V.R. Guiding and confining light in void nanostructure / V.R. Almeida [et al.] // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, No. 11. – P. 1209–1211.
13. Xu, Q. Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material / Q. Xu [et al.] // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, No. 14. – P. 1626–1628.
14. Barrios, C.A. Slot-waveguide biochemical sensor / C.A. Barrios [et al.] // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32, No. 21. – P. 3080–3082.

15. Dell'Olio, F. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides / F. Dell'Olio, V.M. Passaro // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, No. 8, – P. 4977–4993.
16. Helfert, S.F. The method of lines: a versatile tool for the analysis of waveguide structures / S.F. Helfert, R. Pregla // *Electromagnetics*. – 2002. – Vol. 22. – P. 615–637.
17. Goncharenko, I.A. Analysis of propagation of orthogonally polarized supermode in straight and curved multicore microstructured fibres / I.A. Goncharenko, M. Marciniak // *J. Telecommunications and Information Technology*. – 2007. – No. 4. – P. 63–69.
18. Goncharenko, I.A. Optical broadband analog-digital conversion on the base of microring resonator / I.A. Goncharenko [et al.] // *Optics Communications*. – 2006. – Vol. 257, No. 1. – P. 54–61.