

УДК 535.8  
PACS 07.07.Df

## Интегрально-оптический датчик давления

А. А. Козлов<sup>a</sup>, А. А. Кондаков<sup>b</sup>, У. О. Салгаева<sup>b</sup>, А. Б. Волынцев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: andreykozlov10031994@gmail.com

<sup>b</sup> ООО «МИП «Пермские нанотехнологии»  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: kondakow90@gmail.com  
email: ulyanasalgaeva@yandex.ru

Проведено исследование прототипа интегрально-оптического датчика давления на основе кольцевого резонатора. При помощи метода фотополимерной 3D печати было изготовлено основание с полостью эталонного давления, на которое монтировался исследуемый чувствительный элемент. В качестве чувствительного элемента использовался кремниевый чип с волноводами на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ . В работе представлена теоретическая модель интегрально-оптического датчика давления, на основе которой проведено численное моделирование и произведен расчет чувствительности интегрально-оптического датчика давления. Для исследования датчика давления использовалась гидравлическая установка сравнительной калибровки, которая позволяла контролируемо изменять давление. В ходе эксперимента был получен набор спектров исследуемого кольцевого резонатора при различных значениях давления. На основе полученных экспериментальных данных была вычислена чувствительность исследуемого датчика давления. Полученные при помощи численного моделирования значения чувствительности несколько отличаются от экспериментально полученных значений. Отличие в значении чувствительности может быть связано с тем, что в ходе численного моделирования не было учтено изменение эффективного показателя преломления волноводов. Также в ходе эксперимента не был учтен возможный сдвиг спектра из-за изменения температуры.

**Ключевые слова:** датчик давления; кольцевой резонатор; чувствительность

*Поступила в редакцию 13.04.2018; принята к опубликованию 22.05.2018*

## Integrated optical pressure sensor

А. А. Kozlov<sup>a</sup>, А. А. Kondakov<sup>b</sup>, U. O. Salgaeva<sup>b</sup>, A. B. Volyntsev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, Perm, 614990, Russian Federation, 15 Bukireva str.  
email: andreykozlov10031994@gmail.com

<sup>b</sup> LLC «Innovation Company «Perm Nanotechnologies», Perm, 614990, Russian Federation, 15 Bukireva str.  
email: kondakow90@gmail.com  
email: ulyanasalgaeva@yandex.ru

The study of a first prototype of an integrated optical pressure sensor based on a ring resonator was presented in the paper. A photopolymer 3D printing method was used for producing of submount (sensor constructive base). This submount has a cavity with reference pressure. We mounted the sensitive element on this submount. The silicon chip with waveguides based on  $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$  was used as a sensitive element. A theoretical model of an integrated optical pressure sensor was presented in this paper. Computer simulation model was built based on this theoretical model and a sensitivity of the integrated optical pressure sensor was calculated. A hydraulic comparative calibration system was used for investigation of the sensor properties. A pressure was changed step by step during the experiment and an optical output signal was fixed on every step. As a result a set of spectra was obtained. This set made it possible to calculate the sensitivity of the sensor. The exper-

imental sensitivity of the sensor is different from the calculated one. This may be because the calculation model didn't take into account the change of a refractive index of waveguides. In addition, this difference may be due to the temperature drift of an optical ring resonator spectrum.

**Keywords:** integrated optical pressure sensor; ring resonator;  $\text{Si}_3\text{N}_4$  /  $\text{SiO}_2$  waveguides

Received 13.04.2018; accepted 22.05.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-24-31

## 1. Введение

На сегодняшний день во многих областях промышленности (нефтегазовая, химическая, энергетическая) используются приборы, которые позволяют измерять давление. Такие приборы могут использоваться, например, как расходомеры, датчики уровня жидкости.

Датчик давления – это устройство, преобразующее измеряемое давление в детектируемый электрический или оптический сигнал.

Датчик давления как измерительная система представляет собой конструктивную совокупность одного или нескольких измерительных преобразователей (чувствительных элементов), размещаемых непосредственно у объекта измерений и преобразующих измеряемые (контролируемые) давления в величины удобные для передачи по каналам связи и дальнейшего преобразования [1].

По назначению датчики давления делят на датчики, измеряющие абсолютное давление, разность давлений (дифференциальные) и отношение двух давлений.

По методам измерения давления датчики давления можно разделить на следующие группы:

- механические (недистанционные), в том числе жидкостные, весовые и пружинные;
- электромеханические, в которых механический чувствительный элемент сочетается с электрической дистанционной передачей;
- электрические, в том числе электронные, газоразрядные, радиоактивные, тепловые, пьезорезисторные;
- оптические.

Оптические датчики давления являются наиболее перспективным классом приборов для измерения давления. Данные измерительные системы, в отличие от электрических, не восприимчивы к электромагнитным полям. Они востребованы в тех областях, в которых предъявляются высокие требования к взрыво- и пожаробезопасности [2]. Также данные приборы относятся к классу датчиков для дистанционного мониторинга давления с возможностью организации распределенной системы мониторинга давления. Например, измерение давления в трубопроводе в определенных точках вдоль него.

Оптические датчики давления делятся на три основных вида: волоконные, интегрально-оптические и оптоэлектронные датчики давления.

В настоящей работе предметом исследования являются интегрально-оптические датчики давления. Такие датчики представляют собой систему, чувствительным элементом которой является набор оптических волноводов, выполненных в приповерхностном слое полупроводникового чипа, который играет роль мембраны. Воздействие давления на мембрану приводит к изменению оптических характеристик волноводов, по которому можно судить о степени воздействия (давления) на чип.

Интегрально-оптический датчик давления может иметь различную топологию оптических волноводов, в соответствии с которой датчики могут иметь различные методики оценки степени воздействия давления.

Среди существующих вариантов можно выделить чувствительный элемент на основе кольцевого резонатора [3], интерферометра Маха-Цендера [4], прямых волноводов [5]. Чувствительный элемент на основе интерферометра Маха-Цендера имеет нелинейный выходной оптический сигнал, что является его существенным недостатком. Наибольший интерес представляет чувствительный элемент на основе оптического кольцевого резонатора из-за его линейного выходного сигнала.

## 2. Принцип работы кольцевого резонатора

Предметом исследования в данной работе является датчик давления с чувствительным элементом на основе оптического кольцевого резонатора.

Кольцевой резонатор обычно состоит из замкнутого волновода и входных/выходных волноводов, как показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Пример топологии оптического кольцевого резонатора

Оптическое излучение вводится во входной волновод. В области оптической связи происходит перекачка оптического излучения из прямого вол-

новода в замкнутый. В замкнутом волноводе распространяются только те длины волн  $\lambda_m$  излучения, которые удовлетворяет резонансному условию

$$\lambda_m m = 2\pi R n_{eff}. \quad (1)$$

Здесь  $R$  – радиус кольцевого резонатора,  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления для длины волны  $\lambda_m$  при температуре 20 °С,  $m$  – порядок резонанса. Эффективный показатель преломления волновода рассчитывается на основе модели эффективного показателя преломления [6], которая берет в расчет показатели преломления сердцевинны и оболочки волновода и его геометрические параметры.

На рис. 2 показан спектр кольцевого резонатора на прохождение, снятый из выходного оптического волновода. Ширина спектральных линий кольцевого резонатора напрямую зависит от коэффициента связи прямого подводящего и кольцевого волноводов.

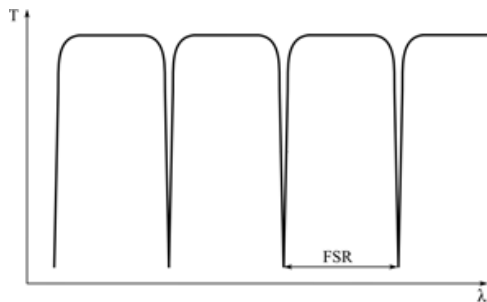


Рис. 2. Спектр кольцевого резонатора

FSR – это свободный спектральный диапазон резонатора, который представляет собой разницу между двумя смежными резонансными длинами волн. При воздействии давления на чип изменяются геометрические размеры замкнутого волновода, что, в свою очередь, согласно статье [7], ведет к изменению FSR, а изменение FSR обуславливает сдвиг положения  $\lambda_m$  пика.

### 3. Описание исследуемого прототипа

Модель исследуемого датчика давления (в разрезе) приведена на рис. 3.

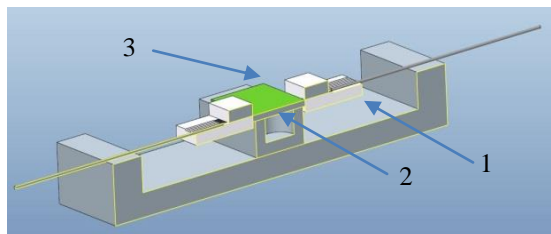


Рис. 3. Модель исследуемого датчика давления

Датчик давления состоит из основания 1, в котором имеется полость постоянного объема 2, и чипа-мембраны 3 с чувствительным элементом.

Общий план основания исследуемого датчика представлен на рис. 4.

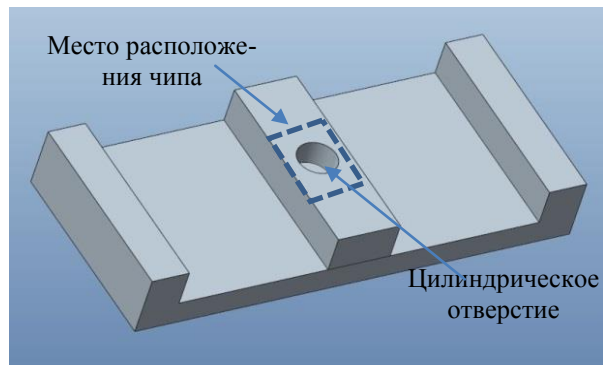


Рис. 4. Общий план основания исследуемого датчика давления

Основание для исследуемого датчика было выполнено методом фотополимерной 3D печати. В центральной части основания имеется цилиндрическое отверстие, которое напрямую связано с полостью постоянного объема. Над данным отверстием крепится поверх чип-мембрана.

Чувствительный элемент представляет оптический кольцевой резонатор, выполненный на чипе из полупроводникового материала размером 5×11 мм. Исследуемый чувствительный элемент выделен на рис. 5 белой рамкой [7].

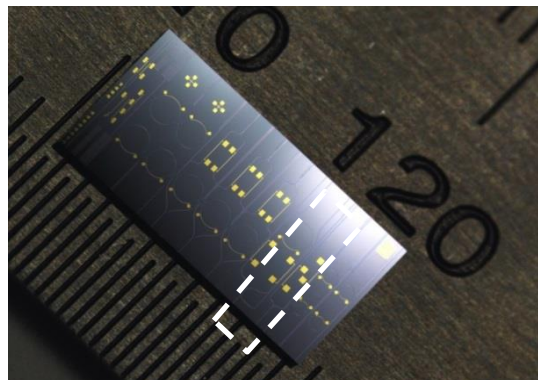


Рис. 5. Чип с чувствительным элементом

Поперечное сечение волнопроводов, которые лежат в основе чувствительного элемента, изображено на рис. 6.

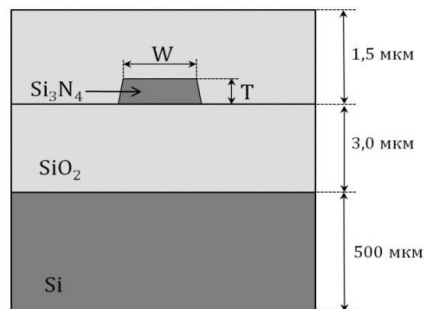


Рис. 6. Поперечное сечение оптических волнопроводов чувствительного элемента

Физические параметры материалов, из которых состоит чувствительный элемент, приведены в таблице.

Физические параметры материалов

Материал	Показатель преломления	Е, ГПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$
Si (<111>)	–	169	2330	0.182
SiO <sub>2</sub>	1.4440	40	2650	0.175
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.9963	300	3440	0.270

Механические параметры взяты при нормальных условиях. Показатель преломления кремния не указан, так как он не оказывает влияния на распространение оптического излучения в волноводах.

Для данной ориентации монокристалла кремния модуль Юнга и коэффициент Пуассона изотропны [8].

Чувствительный элемент монтируется таким образом, что кольцевой резонатор располагается над отверстием. Диаметр кольцевого резонатора равен 1 мм. Диаметр отверстия в основании равен 3 мм. Общая толщина чипа составляет 504.5 мкм. Монтаж кристалла и герметизация производятся при помощи УФ отверждаемого полимерного клея. Полость содержит воздух при нормальных условиях. Таким образом, данный датчик давления является относительным датчиком.

Ввод и вывод оптического излучения в волноводе кольцевого резонатора осуществляются посредством волоконно-оптических соединителей с одномодовым оптическим волокном Corning SMF-28 e+.

Исследуемый прототип интегрально-оптического датчика давления изображен на рис. 7.

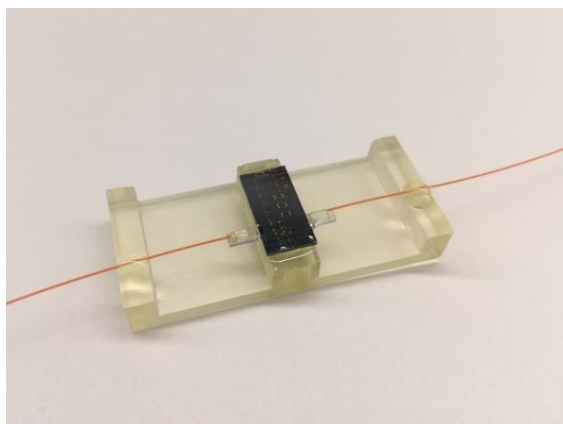


Рис.7. Прототип датчика давления

#### 4. Теоретическая модель интегрально-оптического датчика давления

В основе функционирования исследуемого датчика давления лежит сдвиг спектральной характеристики оптического кольцевого резонатора как чувствительного элемента из-за изменения геометрических размеров замкнутого волновода.

Для исследования влияния приложенного давления на сдвиг спектра кольцевого резонатора рассмотрим упрощенную теоретическую модель исследуемого датчика давления.

Из уравнения (1) следует, что в самом общем случае на сдвиг резонансных длин волн в спектре кольцевого резонатора влияет изменение не только радиуса кольцевого резонатора, но и изменение эффективного показателя преломления вследствие упругооптического эффекта.

Интегрально-оптические волноводы данного чипа обладают поляризующим эффектом, поэтому в кольцевом резонаторе распространяется только ТЕ мода. Влияние прикладываемого давления на изменение эффективного показателя ТЕ моды в исследуемом диапазоне давлений является пренебрежимо малым по сравнению с вкладом от изменения радиуса кольцевого резонатора [3].

Ввиду особенностей используемой конструкции основания и особенностей монтажа чувствительного элемента рассматривается только та часть чипа, которая расположена непосредственно над отверстием. Прикладываемое к чипу давление распределяется равномерно по поверхности.

Согласно [9], конструкция называется тонкой пластинкой, если она удовлетворяет условию:

$$\frac{1}{80} \leq \frac{h}{d} \leq \frac{1}{5}, \quad (2)$$

где  $h$  – это толщина,  $d$  – размер основания. При этом деформации не должны превышать четверти толщины. Для рассматриваемой части чипа данное отношение равно 1/6.

Соответственно, мы можем представить деформацию рассматриваемой части чипа как деформацию круглой тонкой равномерно нагруженной пластинки.

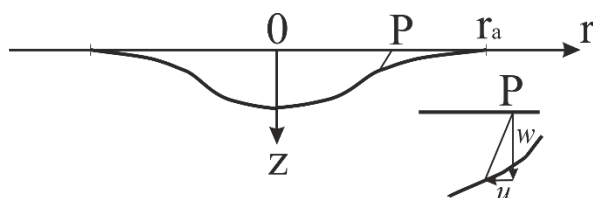


Рис. 8. Схематическое изображение деформации тонкой равномерно нагруженной пластинки [10]



Будем считать, что центр кольцевого резонатора совпадает с центром полости. Рассмотрение ведется в цилиндрических координатах. Все деформации считаем осесимметричными. Поэтому достаточно рассмотреть только одно диаметральное сечение пластинки.

На рис. 8 схематически изображена деформация тонкой круглой пластинки вследствие приложения давления.

Пусть  $r_a$  – это расстояние от центра, на котором происходит фиксация пластинки,  $P$  – некоторая рассматриваемая точка пластины. Очевидно, что каждая точка в процессе деформации испытывает два типа смещений:  $w$  – вертикальное смещение и  $u$  – радиальное смещение. В изменение радиуса кольцевого резонатора вносит вклад только радиальное смещение точек пластинки. Фактически изменение радиуса кольцевого резонатора  $\Delta R = u(R)$ .

Согласно т. 7 теоретической физики Ландау–Лифшица [11] уравнение равновесия пластинки, изгибаемой действующими на нее внешними силами, имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} w(r) \right) = \frac{p}{D}, \quad (3)$$

где  $p$  – внешняя сила, отнесенная к единице площади ее поверхности,  $D$  – изгибная жесткость.

Края пластинки жестко фиксированы, поэтому они не испытывают вертикального смещения.

Таким образом, вертикальная деформация  $w(r)$  выражается следующим образом:

$$w(r) = \frac{pa^4}{64D} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2, \quad (4)$$

где  $a$  – это расстояние от центра до точек фиксации пластинки (в сущности есть радиус отверстия, над которым расположен резонатор).

Исходя из [12] радиальная деформация круглой равномерно нагруженной пластинки имеет вид

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = -\frac{3(3r^2 - a^2 + \nu^2 a^2 - 3r^2 \nu^2)p}{8h^2 E}, \quad (5)$$

где  $h$  – толщина пластины,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Как было указано выше, механические параметры пластинки изотропны.

Тогда радиальное смещение точек кольцевого резонатора получается путем интегрирования радиальной деформации:

$$\Delta R = u(R) = \int_0^R \varepsilon_r dr, \quad (6)$$

где  $R$  – это радиус кольцевого резонатора.

В результате получаем изменение положения резонансной длины волны в зависимости от прикладываемого давления:

$$\Delta \lambda_m = -\frac{6\pi n_{\text{eff}} P}{8mh^2 E} (R^3 - a^2 R + a^2 \nu^2 R - R^3 \nu^2). \quad (7)$$

Подставим в полученное выражение исходные геометрические данные. Толщина кремниевого слоя на несколько порядков больше, чем толщина остальных слоев, поэтому для упрощения модуль Юнга и коэффициент Пуассона всей пластинки примем равным соответствующим параметрам для кремния. Пусть давление равно 5 бар. Эффективный показатель преломления исходного волновода равен 1.58. Резонансной длине волны 1.5506 мкм соответствует порядок  $m = 3200$ . Тогда  $\Delta \lambda_{3200} = 15$  пм при давлении 5 бар. Таким образом, теоретическая чувствительность получилась 3 пм/бар.

## 5. Численная модель

На основе построенной теоретической модели было выполнено поэтапное численное моделирование. На первом этапе проведено моделирование механики чипа-мембраны в среде Comsol Multiphysics. Данный программный пакет позволяет осуществлять численный расчет модели методом конечных элементов. В ходе моделирования выполнялся расчет прогиба мембраны в осесимметричной 2D постановке.

Сечение модели, расчет которой производился, приведено на рис. 9.

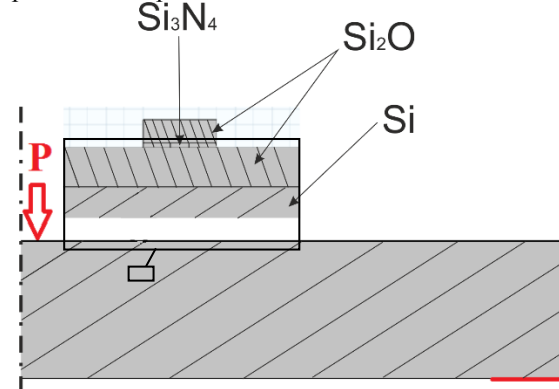


Рис. 9. Сечение исследуемой модели чувствительного элемента из Comsol Multiphysics

На рис. 9 приведена только правая часть сечения. Красной сплошной линией отображено место фиксации чувствительного элемента. Красной стрелкой отображено направление приложения давления. Черной стрелкой показана выноска с увеличенным изображением волновода кольцевого резонатора (моделируемое сечение волновода повторяет реальный волновод, изображенный на рис. 6). Давление прикладывается равномерно к верхней поверхности чувствительного элемента.

Геометрические параметры расчетной модели, соответствующие геометрии прототипа, указаны в п. 3. В отличие от теоретической модели численная модель учитывает механические параметры

каждого слоя. В расчетной модели прикладывалось давление равное 5 бар. Расчет прогиба мембраны позволяет определить зависимость радиального смещения всех точек расчетной модели в зависимости от прикладываемого давления. Величина радиального смещения центра волновода принимается как величина изменения радиуса кольцевого резонатора.

На втором этапе при помощи программного продукта OptiWave производился расчет спектров кольцевого резонатора на основе теории согласованных мод. Для расчета был взят исходный кольцевой резонатор (без воздействия давления), параметры которого совпадали с параметрами прототипа. Также был взят кольцевой резонатор, радиус которого отличается от радиуса исходного на  $\Delta R$ . В ходе моделирования проводилось сравнение спектров пропускания этих кольцевых резонаторов. Это эквивалентно сравнению спектров при давлении 0 и 5 бар.

## 6. Описание экспериментальной установки и методика эксперимента

Исследование прототипа интегрально-оптического датчика давления проводилось при помощи гидравлической установки сравнительной калибровки (ГУСК). Данная установка изображена на рис. 10.



Рис. 10. Конструкция ГУСК

Основными частями экспериментальной установки являются: гидравлическая система для создания давления, манометры и испытательный стакан (рис. 11).

ГУСК позволяет производить контролируемое изменение давления в стакане, который при помощи специальных фитингов крепится к гидравлической системе.

Прототип исследуемого датчика давления помещался в испытательный стакан. В качестве рабочей жидкости внутри стакана заливался этиленгликоль. Герметизация оптических волоконных выводов осуществлялась при помощи специальных гермовыводов. Испытательный стакан присо-

единялся к гидравлической системе ГУСК при помощи специальных герметичных фитингов.



Рис. 11. Испытательный стакан ГУСК

В ходе эксперимента производилось плавное увеличение давления от 0 до 5 бар с шагом в 1 бар.

На каждом шаге фиксировались спектр кольцевого резонатора и соответствующее ему давление.

Изменение спектральной характеристики кольцевого резонатора регистрировалось с использованием оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370D и источника оптического излучения УСЭм-120.

## 7. Результаты исследований

В ходе численного моделирования механики чувствительного элемента была получена картина деформаций чипа. Результат моделирования изображен на рис. 12.

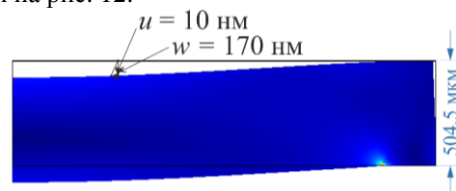


Рис. 12. Картина деформации чувствительного элемента

Черной сплошной линией изображена форма мембраны до приложения давления. Закрашенная область представляет собой форму мембраны после приложения давления.

В пакете Comsol Multiphysics в ходе постобработки есть возможность узнать величину радиальной компоненты деформации всех точек расчетной модели. Таким образом, можно узнать радиальное смещение центра волновода кольцевого резонатора.

Расчетная модель показывает, что радиальное смещение точки центра волновода кольцевого резонатора  $u$  относительно положения ненагруженного состояния составило 10 нм. Таким образом,

расчетное изменение радиуса кольцевого резонатора  $\Delta R$  составляет  $-10$  нм ( $R_2 = 499.99$  мкм).

В результате моделирования спектров пропускания кольцевых резонаторов были получены спектры, приведенные на рис. 13.

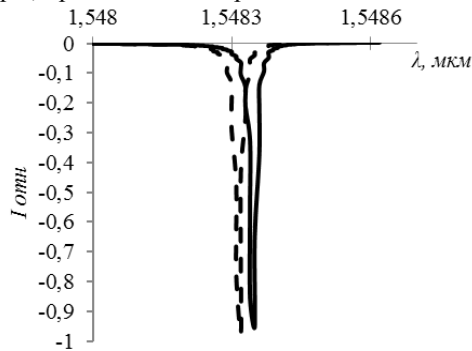


Рис. 13. Спектры кольцевых резонаторов с радиусами  $R_1$  и  $R_2=R_1+\Delta R$

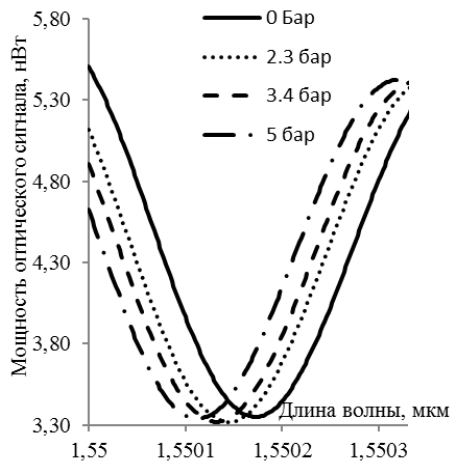


Рис. 14. Спектральная характеристика исследуемого образца при различных значениях прикладываемого давления (одна из резонансных длин волн)

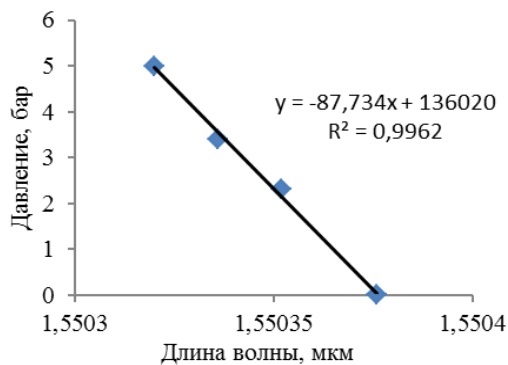


Рис. 15. Зависимость длины волны одного из резонансных пиков от давления

Из моделирования вытекает, что для резонатора с радиусом  $500$  мкм одна из резонансных длин волн  $\lambda_n = 1548.35$  нм. Для резонатора с радиусом, отличающимся от исходного на  $10$  нм, тот же резонансный пик имел длину волны  $\lambda_n = 1548.32$  нм.

Таким образом, произошло смещение резонансного пика на  $30$  пм.

Данное смещение пика эквивалентно приложению давления в  $5$  бар. Расчеты показывают, что исследуемая модель имеет чувствительность  $6$  пм/бар.

В ходе натурального эксперимента при увеличении давления в испытательном стакане наблюдался плавный сдвиг спектральной характеристики кольцевого резонатора. Спектральная характеристика кольцевого резонатора при различных прикладываемых давлениях изображена на рис. 14. Чувствительность спектрального анализатора составляет  $2$  пм.

Если проследить за сдвигом пика, который соответствует одной из резонансных длин волн кольцевого резонатора, то можно построить зависимость длины волны от прикладываемого давления (рис. 15).

При увеличении давления до  $5$  бар спектральная характеристика сместилась на  $56$  пм. Обратный угловой коэффициент аппроксимирующей прямой – это чувствительность. Таким образом, экспериментальная чувствительность датчика давления составила примерно  $12$  пм/бар. В области малых давлений наблюдается линейная зависимость сдвига резонансной длины волны от давления, что хорошо согласуется с теоретической зависимостью (7). Однако при значительном повышении давления вклад фотоупругого эффекта в изменение эффективного показателя преломления нельзя считать тривиальным, поскольку будет наблюдаться отклонение вышеприведенной характеристики от линейной.

## 8. Заключение

В рамках исследования интегрально-оптического датчика давления на основе кольцевого резонатора была построена теоретическая модель чувствительного элемента. В результате теоретического расчета чувствительность составила  $3$  пм/бар. Было произведено численное моделирование чувствительности датчика давления предложенной конфигурации с учетом упрощений, заложенных в теоретической модели. На основании численного моделирования чувствительность датчика давления составила  $6$  пм/бар. В ходе реального эксперимента чувствительность прототипа составила  $12$  пм/бар.

Расхождение чувствительности прототипа с чувствительностями теоретической и численной моделей может быть связано с несколькими факторами. Во-первых, численная и теоретическая модели основываются на том, что в волноводах распространяется только ТЕ мода. Поэтому не учитывается изменение эффективного показателя преломления. В реальности нужно учитывать наличие ТМ моды, связанной с тем, что волноводы не идеально поляризуют световую волну. В этом

случае изменением эффективного показателя преломления нельзя пренебречь. Во-вторых, необходимо учитывать влияние температуры на сдвиг спектральной характеристики. В ходе эксперимента возможно изменение температуры чипа из-за изменения температуры окружающей среды. Как было показано в статье [7], кольцевые резонаторы являются хорошими датчиками температуры с чувствительностью более 20 пм/°С.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Пермского края (С-26/004.02), а также при поддержке Пермского фонда развития предпринимательства.

### Список литературы

1. Белоусов В. А. Комплексы контроля параметров газотурбинных двигателей: лекции по авиационным приборам // УГАТУ. 2005. С. 105–117.
2. Ripka P., Tipek A. *Modern sensors handbook* // London, UK: ISTE, 2007, 20 p.
3. Zhao X., Tsai J. M. A nano-opto-mechanical pressure sensor via ring resonator // *Optics Express*. 2012. Vol. 20. N. 8. P. 8535–8542.
4. de Brabander G., Beheim G. Integrated optical micromachined pressure sensor // *Applied optics*. 1998. Vol. 37. N. 15. P. 3264–3267.
5. Endo Y., Ohkawa M., Sekine S., Sato T. Guided-wave optical pressure sensor responding only to changing pressure // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5728. P. 309–316.
6. Тамир Т. Интегральная оптика. М.: Мир, 1978. 344 с.
7. Салгаева У. О., Хасанишина А. Р., Козлов А. А., Кондаков А. А., Волынец А. Б., Моисеева Е. В. Чувствительный элемент на основе интегрально-оптического кольцевого резонатора и одномерного фотонного кристалла для датчиков физических величин // *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20. Вып. 6. С. 340–350.
8. Kim J., Cho D. Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS? / In: Obermeier E. (Ed.) *Transducers '01 Eurosensors XV*. Berlin: Springer, 2001. P. 662–665.
9. Львов Г. И. Основы теории пластин и оболочек. Харьков: Изд-во Харьковского гос. ун-та, 2014. 145 с.
10. Dudaicevs H., Kandler M. Surface micromachined pressure sensors with integrated CMOS read-out electronics // *Sensors and Actuators A*. 1994. Vol. 43. P. 157–163.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
12. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.

### References

1. Belousov V. A. *Kompleksy kontrolya parametrov gazoturbinnnykh dvigateley* (Control kits for gas turbine engine). In: *Leksii po aviatsionnym priboram* (Lectures on aviation devices). UGATU. 2005. P. 105–117 (In Russian).
2. Ripka P., Tipek A. *Modern sensors handbook*. London, UK: ISTE, 2007. 20 p.
3. Zhao X., Tsai J. M. A nano-opto-mechanical pressure sensor via ring resonator. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 8, pp. 8535–8542.
4. de Brabander G., Beheim G. Integrated optical micromachined pressure sensor. *Applied optics*, 1998, vol. 37, no. 15, pp. 3264–3267.
5. Endo Y., Ohkawa M., Sekine S., Sato T. Guided-wave optical pressure sensor responding only to changing pressure. *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5728, pp. 309–316.
6. Tamir T. *Integrated optics*. Berlin: Springer, 1975. 318 p.
7. Salgaeva U. O., Hasanshina A. R., Kozlov A. A., Kondakov A. A., Volynceev A. B., Moiseeva E. V. Sensitive element based on the integrated optical ring resonator and one-dimensional photonic crystal for the sensors of the physical values. *Nano-and microsystems technology*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 340–350 (In Russian).
8. Kim J., Cho D. Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS? In: Obermeier E. (Ed.) *Transducers '01 Eurosensors XV*. Berlin: Springer, 2001. P. 662–665.
9. Lvov G. I. *Fundamentals of the theory of plates and shells*. Kharkov: Kharkov State University, 2014. 145 p (In Russian).
10. Dudaicevs H., Kandler M. Surface micromachined pressure sensors with integrated CMOS read-out electronics. *Sensors and Actuators A*, 1994, vol. 43, pp. 157–163.
11. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Theoretical Physics Vol. 7. Theory of elasticity*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1986. 195 p.
12. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. New-York: McGraw-Hill, 1959. 580 pp.

### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Козлов А. А., Кондаков А. А., Салгаева У. О., Волынец А. Б. Интегрально-оптический датчик давления // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 3 (41). С. 24–31. doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-24-31

### Please cite this article in English as:

Kozlov A. A., Kondakov A. A., Salgaeva U. O., Volynceev A. B. Integrated optical pressure sensor. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 3 (41), pp. 24–31. doi: 10.17072/1994-3598-2018-3-24-31