

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 535.8

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОКОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Я. В. АЛЕКСАКИНА¹, А. Г. ЗАКОЯН², Г. С. ВОРОНКОВ³, В. В. ИВАНОВ⁴, Р. В. КУТЛЮАРОВ⁵

¹aleksakina.yv@ugatu.su, ²zakoyan.ag@ugatu.su, ³voronkov.gs@ugatu.su, ⁴ivanov.vv@ugatu.su,

⁵kutluyarov.rv@ugatu.su

¹⁻⁵ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В статье исследовалось влияние точности изготовления микрокольцевых резонаторов (МКР) на характеристики сенсорных систем, а именно – влияние девиации ширины волноводов. Оценивалось отклонение в 8 нм в сторону увеличения или уменьшения ширины. В качестве датчиков использовались микрокольцевые резонаторы на платформах кремний-на-изоляторе (КНИ) и нитрид кремния (SiN). Полученные результаты говорят о том, что неточности в ширине волноводов приводят к резонансному сдвигу, но на различающую способность они не влияют.

Ключевые слова: Микрокольцевые резонаторы, нитрид кремния, кремний-на-изоляторе, оптический датчик.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические сенсорные системы на основе микрокольцевых резонаторов (МКР) являются наиболее часто используемыми структурами для реализации датчиков на ФИС (фотонная интегральная схема). Одной из главных проблем, связанных с изготовлением устройств на основе ФИС, является возникающая неточность в размерах элементов микросхем. Основной тип погрешности изготовления связан с девиациями ширины волноводов, что может повлиять на производительность системы, поскольку девиация влияет на эффективный и групповой показатели преломления (ПП) волноводов и коэффициент связи в области каплинга у МКР. Стандартное отклонение ширины волновода на платформе кремний-на-изоляторе (КНИ) может достигать 3 нм в пределах одной пластины MPW (англ. Multi-Project Wafer) [1]. Однако для разных MPW-подложек стандартное отклонение ширины волновода может достигать 6,4 нм [2]. Для гарантированного учета погрешностей доступных платформ была проанализирована возможность сохранения работоспособности системы при отклонениях в ширине волновода до 8 нм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Влияние девиаций изучалось на примере двух микрокольцевых резонаторов (МКР). Один из них имеет структуру all-pass и выполнен на платформе КНИ, другой обладает add-drop структурой и выполнен на платформе нитрид кремния (SiN). Моделирование проводилось в ПО Ansys Lumerical с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD, англ. Finite-Difference Time-Domain method), пакетов MODE и INTERCONNECT. Схемы моделей представлены на рис. 1, а их геометрические параметры – в табл. 1.

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНИТ (код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2023-119) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

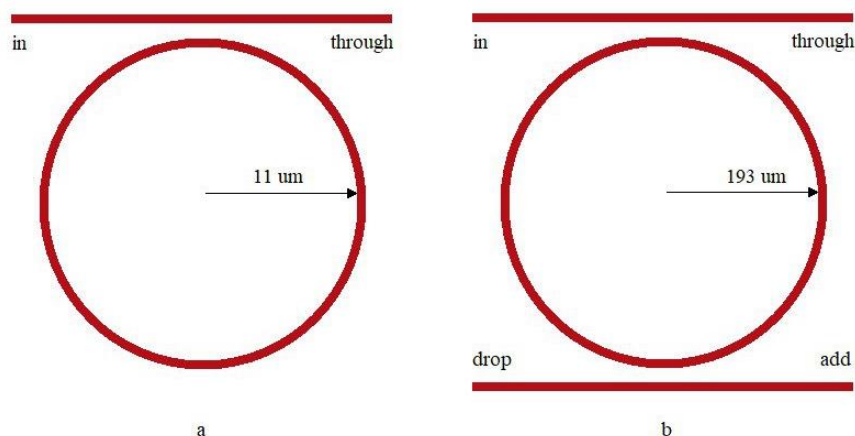


Рис. 1. а – микрокольцевой резонатор структуры all-pass на платформе SOI; б – микрокольцевой резонатор структуры add-drop на платформе SiN

Таблица 1

Геометрические параметры МКР

Параметр	Величина	
	Платформа КНИ	Платформа SiN
Внешний радиус	11 мкм	193 мкм
Высота волновода	0,22 мкм	438.5 нм
Ширина волновода	0,14 мкм	1 мкм
Толщина зазора (гэпа)	0,16 мкм	0.35 мкм
Материал волновода	Si ($n=3,4955$ [3])	Si_3N_4 ($n=1.9964$ [4])
Внешняя среда	Вакуум ($n=1,0$)	

Как видно из рис. 2 – 3, при изменении ширины волноводов происходит сдвиг резонансной длины волны, что необходимо учитывать при проектировании датчиков. Однако нужно также выяснить, как эта девиация влияет на различающую способность сенсора. Поэтому в качестве параметров окружающей среды, которые необходимо детектировать, были использованы показатели преломления вакуума ($n=1,0$), водорода ($n=1,000132$) [5] и воздуха ($n=1,000273$) [6].

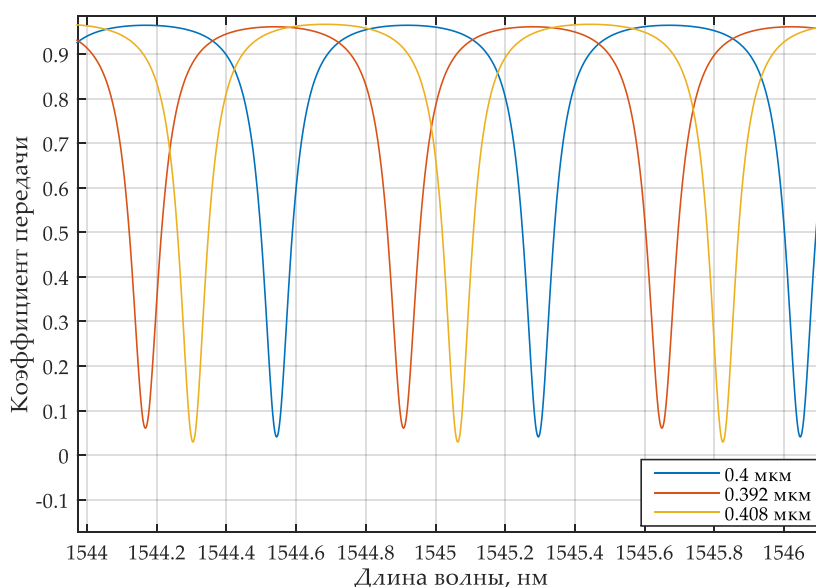


Рис. 2. Влияние девиации ширины волноводов на сдвиг резонансной длины волны для кольца структуры all-pass на платформе КНИ

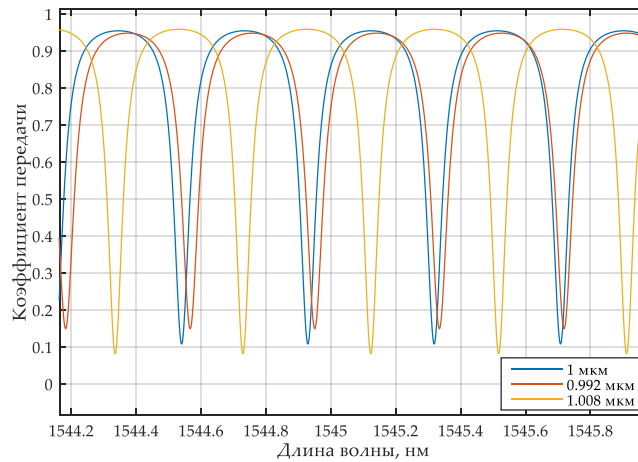


Рис. 3. Влияние девиации ширины волноводов на сдвиг резонансной длины волны для кольца структуры add-drop на платформе SiN

Рис. 4 и табл. 2 демонстрируют, что при изменении ширины волновода меняется лишь резонансная длина волны, в то время как различающая способность остается неизменной.

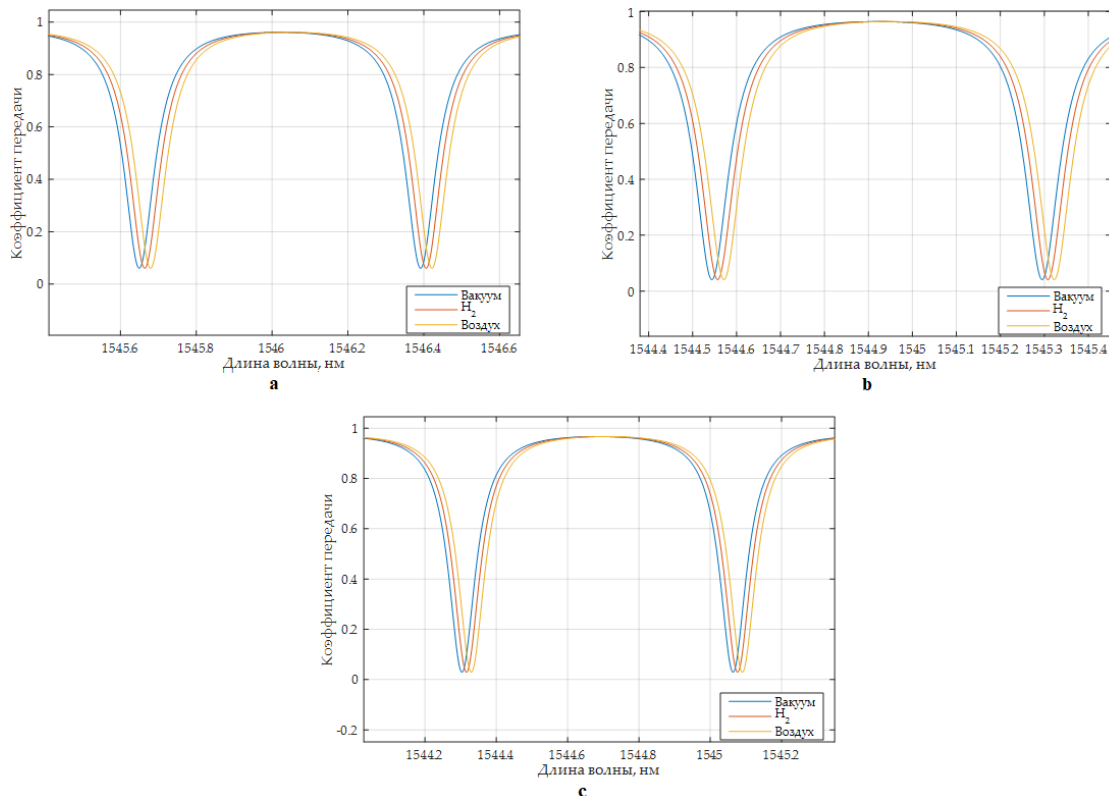


Рис. 4. Влияние девиации ширины волноводов на сдвиг резонансной длины волны для кольца структуры all-pass на платформе КНИ: а – при отсутствии отклонений; б – при отклонении ширины волновода на 8 нм в сторону уменьшения; с – при отклонении ширины волновода на 8 нм в сторону увеличения

Таблица 2

Влияние девиации ширины волновода на резонансную длину волны МКР на SOI

Газ	Показатель преломления	Резонансная длина волны, мкм		
		Ширина волновода		
		0,4 мкм	0,392 мкм	0,408 мкм
Вакуум	1,0	1545,29	1545,65	1545,82
Водород (H ₂)	1,000132	1545,3	1545,66	1545,83
Воздух	1,000273	1545,32	1545,68	1545,85

Для микрокольцевого сенсора на платформе SiN ввиду его низкой чувствительности использовались показатели преломления воздуха ($n=1,000273$), сероводорода ($n=1,000641$) [7] и бензола ($n=1,000788$) [7]. Так же, как и для МКР на платформе КНИ, здесь смещается резонансная длина волны при неизменной различающей способности, что видно из рис. 5 и табл. 3.

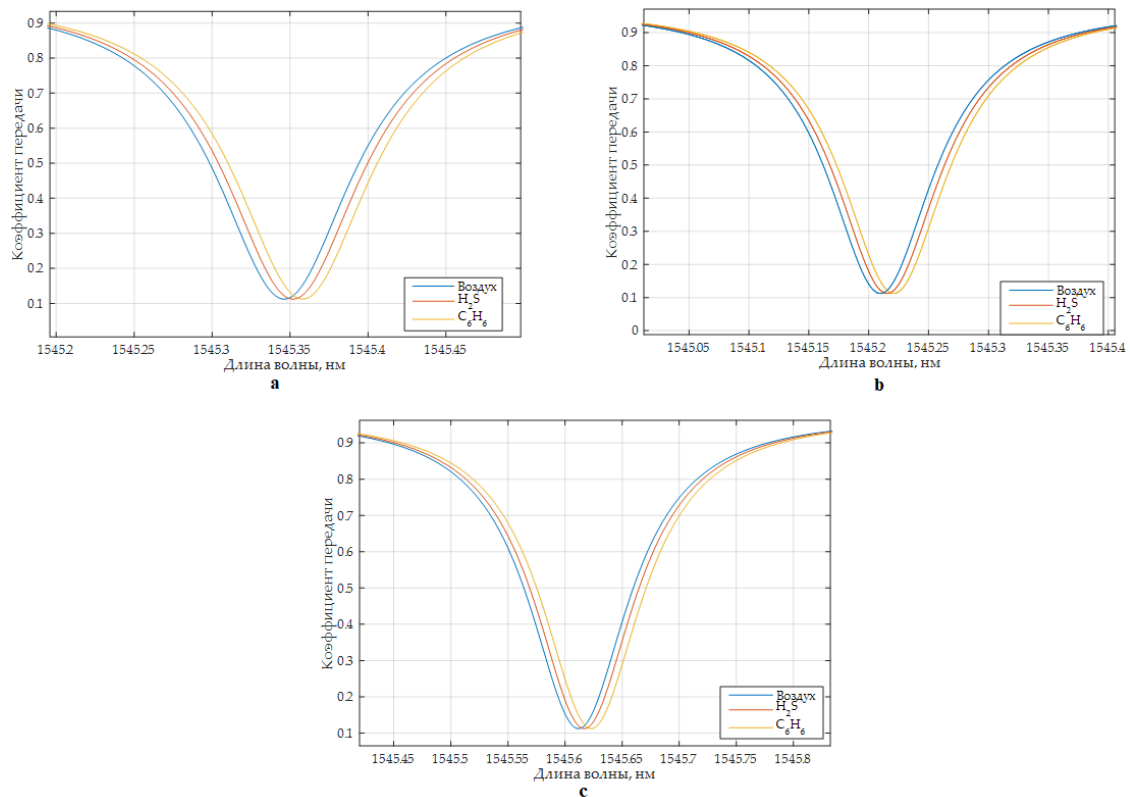


Рис. 5. Влияние девиации ширины волноводов на сдвиг резонансной длины волны для кольца структуры add-drop на SiN: а – при отсутствии отклонений; б – при отклонении ширины волновода в -8 нм; с – при отклонении ширины волновода в $+8$ нм

Таблица 3

Влияние девиации ширины волновода на резонансную длину волны МКР на платформе SiN

Газ	Показатель преломления	Резонансная длина волны, мкм		
		Ширина волновода		
		1 мкм	0,992 мкм	1,008 мкм
Воздух	1,000273	1545,2	1545,34	1545,61
Сероводород (H_2S)	1,000641	1545,21	1545,35	1545,62
Бензол (C_6H_6)	1,000788	1545,22	1545,36	1545,63

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование девиаций ширины волновода показало, что при варьировании величины ширины волновода в пределах 8 нм в сторону увеличения или уменьшения происходит резонансный сдвиг, однако изменения в полной ширине на уровне половины высоты (FWHM, англ. Full Width at Half Maximum) и добротности пренебрежимо малы, поэтому чувствительность всей системы не изменится. Таким образом, при проектировании сенсоров нужно учитывать только калибровку источника излучения с учетом возможного сдвига резонансной длины волны сенсора вследствие технологических погрешностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Noh J.-S., Lee J.M., Lee W. Low-Dimensional Palladium Nanostructures for Fast and Reliable Hydrogen Gas Detection// Sensors. 2011. 11. 825–851.
2. Lu Z. et al. Performance prediction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability //Optics express. 2017. T. 25. №. 9. С. 9712–9733.

3. Salzberg C.D., Villa J.J. Infrared Refractive Indexes of Silicon Germanium and Modified Selenium Glass*// J. Opt. Soc. Am. 1957. 47. 244.
4. Kevin Luke, Yoshitomo Okawachi, Michael R. E. Lamont, Alexander L. Gaeta, and Michal Lipson. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ microresonator// Opt. Lett. 2015. 40. 4823-4826.
5. Peck E.R., Huang S. Refractivity and Dispersion of Hydrogen in the Visible and near Infrared// J. Opt. Soc. Am. 1977. 67. 1550.
6. Ciddor P.E. Refractive Index of Air: New Equations for the Visible and near Infrared// Appl. Opt. 1996. 35. 1566
7. Moutzouris K., Papamichael M., Betsis S.C., Stavrakas I., Hloupis G., Triantis D. Refractive, Dispersive and Thermo-Optic Properties of Twelve Organic Solvents in the Visible and near-Infrared// Appl. Phys. B. 2014. 116. 617–622.

ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСАКИНА Яна Витальевна, асп. каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2022).

ЗАКОЯН Аида Гайковна, магистрант каф. ТС. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2021).

ВОРОНКОВ Григорий Сергеевич, доцент каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2007). Кандидат техн. наук в телекоммуникационных системах, сетях и устройствах (УГАТУ, 2017). Иссл. в лаборатории «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

ИВАНОВ Влад Викторович, асп. каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2017).

КУТЛУЯРОВ Руслан Владимирович, доцент каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2008). Кандидат техн. наук в телекоммуникационных системах, сетях и устройствах (УГАТУ, 2017). Иссл. в лаборатории «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

METADATA

Title: Influence of MRR Manufacturing Accuracy on the Characteristics of Sensor Systems.

Authors: Y. V. Aleksakina¹, A. G. Zakoyan², G. S. Voronkov³, V. V. Ivanov⁴, R. V. Kutluyarov⁵

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹aleksakina.yv@ugatu.su, ²zakoyan.ag@ugatu.su, ³voronkov.gs@ugatu.su, ⁴ivanov.vv@ugatu.su, ⁵kutluyarov.rv@ugatu.su.

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 30-34, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: In this article, the influence of the accuracy of manufacturing MRRs on the characteristics of sensor systems, namely, the influence of the deviation of the waveguide width, was studied. The article estimated a deviation of 8 nm in both directions. Microring resonators on silicon-on-insulator and silicon-on-nitride platforms were used as sensors. The results obtained indicate that inaccuracies in the width of the waveguides lead to a resonant shift, but they do not affect the distinguishing ability.

Key words: microring resonator; silicon-on-insulator; silicon nitride; optical sensor.

About authors:

ALEKSAKINA, Yana Vitalievna, Postgrad. (PhD) Student, Dipl. engineer (USATU, 2022). Dept. of Telecommunication Systems (UUST).

ZAKOYAN, Aida Gaykovna, graduate student at the Ufa University of Science and Technology, bachelor's degree (USATU, 2021). Dept. of Telecommunication Systems (UUST).

VORONKOV, Grigory Sergeevich, ass. Prof. of the Dept. of Telecommunication Systems (UUST). Dipl. engineer (USATU, 2007). Cand. of Tech. Sc. in telecom. systems, networks and devices (USATU, 2017), research laboratory "Sensor systems based on integrated photonics devices".

IVANOV, Vlad Viktorovich, Postgrad. (PhD) Student, Dipl. engineer (USATU, 2017). Dept. of Telecommunication Systems (UUST).

KUTLUYAROV, Ruslan Vladimirovich, ass. Prof. of the Dept. of Telecommunication Systems (UUST). Dipl. engineer (USATU, 2008). Cand. of Tech. Sc. in telecom. systems, networks and devices (USATU, 2017), research laboratory "Sensor systems based on integrated photonics devices".