

SOI 슬롯 광 도파로 기반 단일 및 삽입-분기 채널 링-공진형 바이오-케미컬 집적광학 센서의 제원에 대한 감도 해석

장재식¹ · 정흥식^{1,+}

Sensitivity Analysis for Specifications of Silicon-on-Insulator (SOI) Slot Optical Waveguide-based Single and Add-drop Channel Ring-resonant Biochemical Integrated Optical Sensors

Jaesik Jang¹ and Hongsik Jung^{1,+}

Abstract

The effects of ring radius and coupling spacing on the free spectral range (FSR), full width at half maximum (FWHM), quality factor, and sensitivity of single-channel and add-drop channel slot ring resonators were systematically investigated using FIMMPROP and PICWAVE numerical software. The single-channel ring resonator exhibited better characteristics, namely, a wider FSR and narrower FWHM compared with the add-drop structure; thus, it was evaluated to be more suitable for biochemical sensors. The FSR, FWHM, quality factor, and sensitivity for a single channel ring resonator with a radius of 59.4 μm and coupling gap of 0.5 μm were 2.4 nm, 0.087 nm, 17677, and 550 [nm/RIU], respectively.

Keywords: SOI slot optical waveguide, Integrated optic Biochemical sensor, Ring-resonator, Sensitivity

1. 서 론

광 도파로 기반 집적광학 센서는 전자파로부터 영향을 매우 적게 받으며, 높은 감도(sensitivity), 집적화 (integration) 그리고 원격 (remote) 및 실시간으로 측정치를 확인할 수 있는 장점들이 있기 때문에 이들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 가스센서[1,2], 바이오-케미컬 센서[3,4], 중 적외선 분광 센서[5,6] 분야들에 적용하기 위해서 많은 노력이 집중되고 있다. 현재 집적광학 센서에 적용되고 있는 플랫폼으로는 링-공진기 (ring-resonator)[7,8], 마하-젠더 간섭기 (MZI) [9], 두 모드 (two-mode) 및 다중모드 (multi-mode) 간섭기[10,11], Bragg 격자[12, 13] 등을 포함해서 다양한 구조들이 검토되고 있다.

소산파 (evanescent wave) 기반 집적광학 센서의 동작원리는 광 도파로의 클래딩 (cladding) 영역에 존재하는 소산파가 클래

딩 물질의 굴절률 또는 농도 (concentration) 변화에 반응해서 광 도파로를 따라 형성된 기본모드의 유효 굴절률이 변하는 현상을 이용하는 것이며, 이를 통해서 센서 플랫폼을 구성하는 소자들의 구조에 따라 출력되는 광파의 세기, 공진 파장, 편광 (polarization) 등과 같은 다양한 물리적 변수들을 모니터링 함으로써 클래딩 물질의 굴절률, 농도를 감지할 뿐 아니라 정량적 측정도 가능하게 된다.

소산파 기반 센싱에는 두 방법으로 구분되는데, Fig. 1(a)의 균일 (homogeneous) 센싱과 Fig. 1(b)의 표면 (surface)센싱이다. 전자인 균일 센싱은 위쪽 클래딩 물질의 굴절률 변화에 따른 광파의 유효 굴절률 변화를 이용하는 방법이며, 후자인 표면 센싱은 광 도파로 표면에 항체 또는 측정 물질과 선택적으로 결합되는 얇은 박막을 형성하고, 클래딩에 특정 물질을 주입하면, 박막이 특정 물질과 결합하여 두께의 변화가 일어나고 소산파에 영향을 미쳐서 광파모드의 유효 굴절률이 변화되는 원리에 기반된다. [14] 따라서 표면 센싱은 박막의 두께 변화에 따른 기본모드의 유효 굴절률 변화를 측정하는 방식이다.

집적광학 센서들은 소산파를 이용하기 때문에 클래딩에 존재하는 소산파의 크기에 따라서 감도에 많은 영향을 미친다. 집적광학 플랫폼 구성에 있어서 핵심 단위소자는 광 도파로이며, 릿 (rib) 또는 릿지 (ridge) 구조들을 주로 활용하였는데, 두 구조는 광 도파로 자체의 광파 구속 특성이 우수해서 손실 (loss)은 적

¹ 홍익대학교 대학원 전자전산공학과(Dept. of Electronic & Computer Engineering, Graduate School, Hongik University)
 Hongik University, 2639 Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 339-701, Korea
⁺ Corresponding author: hsjung@hongik.ac.kr
 (Received: Mar.13, 2022, Revised: Mar. 17, 2022, Accepted: Mar.18, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

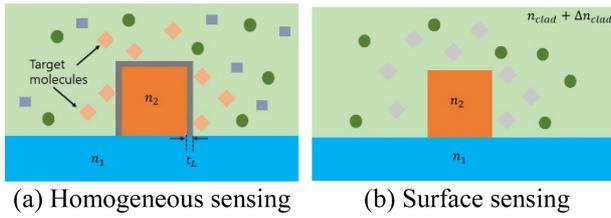


Fig. 1. Sensing methods: (a) homogeneous sensing and (b) Surface sensing

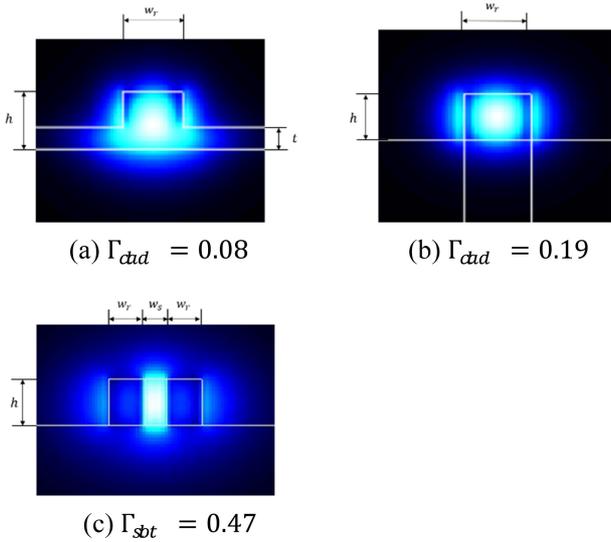


Fig. 2. Three waveguide mode profiles and confinement factor: (a) rib waveguide, $\Gamma_{clad} = 0.08$ (b) ridge waveguide, $\Gamma_{clad} = 0.19$ (c) slot waveguide, $\Gamma_{clad} = 0.47$

지만, 클래딩 영역에 존재하는 소산파의 세기가 미약해서 높은 감도의 센싱 소자 구현에는 한계가 있다. 따라서 대안으로 제안된 것이 슬롯 (slot) 광 도파로인데, 슬롯 광 도파로는 두 개의 레일 (rail) 사이에 슬롯이 위치한 구조로, 슬롯에 많은 양의 광파가 집중되기 때문에 앞서 언급된 두 구조에 비해서 높은 감도를 기대할 수 있다. [15, 16] Fig. 2는 릿, 릿지, 슬롯 광 도파로의 2차원 모드세기 분포와 클래딩과 슬롯에 분포되는 광파의 양을 수치화 시킨 구속계수 (confinement factor) 값을 제시하고 있으며, 수치해석에 적용된 각 광 도파로의 제원들은 Table 1에 정리하였다. 앞서 언급했듯이 릿과 릿지 구조는 광파 대부분이 광 도파로에 구속되기 때문에 상대적으로 클래딩 영역에서 소산파 구속 계수는 각각 0.08, 0.19로 매우 작은 값을 나타내고 있다. 한편 슬롯 광 도파로는 레일보다 슬롯에 많은 양의 광파가 분포해 있으며, 슬롯에 존재하는 광파의 구속계수는 0.47로 앞서 제시된 두 구조와 비교해서, 매우 큰 값을 보여주고 있다. 따라서 슬롯 광 도파로를 집적광학 센서 플랫폼에 적용할 경우 높은 감도를 기대할 수 있다.

집적광학 센서 플랫폼 구조 중에서 링-공진기는 높은 품질 인

Table 1. Specification of rib, ridge, slot optical waveguides

Waveguide	Slot width (w_s)	Rail width (w_r)	Rail height (h)	Rib thickness (t)
Slot	0.12 μm	0.2 μm	0.32 μm	-
Ridge	-	0.4 μm	0.32 μm	-
Rib	-	0.4 μm	0.32 μm	0.12 μm

자(Q-factor), 높은 감도, 작은 footprint등 여러 장점들을 가지고 있어서 많은 관심을 받고 있으며, 센서로의 활용뿐만 아니라 광 필터[17], 레이저[18, 19], 광 변조기[20] 등 다양한 분야에서도 유용한 구조로서 활용되고 있다. 단일 링-공진기의 기본적인 구조는 링-공진기와 결합된 채널 광 도파로의 개수에 따라 단일 채널 링-공진기와 삽입-분기 채널 링-공진기로 구분된다. 단일 채널 링-공진기는 링-공진기에 하나의 채널 광 도파로가 결합되어 있고, 삽입-분기 채널 링-공진기는 링-공진기에 2개의 채널 광 도파로가 결합되어 있는 구조이다. 슬롯 링-공진기는 기존의 링-공진기와 슬롯 광 도파로의 장점들을 모두 가지고 있어서 릿 [21], 릿지[22] 광 도파로 기반 링-공진기보다 균일 센싱에서 높은 감도를 갖는 것으로 평가되고 있다. [23]

본 논문에서는 SOI (Silicon On Insulator)물질 체계와 1.55 μm 파장 중심으로 슬롯 링-공진기의 최적화 구조 도출을 위하여 전산해석을 수행하였다. 2장에서는 링-공진기와 채널 광 도파로의 결합 부분에서 정의되는 행렬식을 이용하여 링-공진기의 포트에서 필드 세기 분포를 정량적으로 검토하였다. 3장에서는 슬롯 링-공진기의 제원이 감도에 미치는 영향을 단일 채널 슬롯 링-공진기와 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기의 FSR (Free Spectral Range), FWHM (Full Width at Half Maximum), 품질인자, 감도에 미치는 영향을 상호 비교하여 센서로서 어느 구조가 더 유용한지 확인하였다. Photon Design사의 FIMMPROP과 PICWAVE를 이용하여 전산해석을 수행하였으며, 4장에서 결론으로 마무리하였다.

2. 링-공진기의 도파 모드 해석 및 특징

2.1 링-공진기의 모드 해석

Fig. 3, 4는 단일 채널 링-공진기와 삽입-분기 채널 링-공진기의 구조이며, 각 구조에서 원형 점선으로 나타난 부분은 광 도파로와 링-공진기 간에 광 결합이 일어나는 영역이다. t_1, k_1, t_2, k_2 각각은 결합(coupling) 상수로 광 도파로와 링-공진기 간에 결합 시 광파의 세기 분포를 계산할 때 복소수 값 형태로 사용되며, 다음 식(1)과 같이 정의된다. 이때, 식(1-3), (1-4)는 광 결합 시 발생하는 손실은 0으로 가정하여 정의된 식이다.

$$t_1 = |t_1| e^{j\phi_1} \tag{1-1}$$

$$t_2 = |t_2|e^{j\theta_2} \quad (1-2)$$

$$|t_1|^2 + |k_1|^2 = 1 \quad (1-3)$$

$$|t_2|^2 + |k_2|^2 = 1 \quad (1-4)$$

ϕ_1, ϕ_2 는 광 결합 시 발생하는 위상의 변화이며, Fig. 3, 4에서 공통 변수 α , R 은 손실 계수와 링의 반경을 각각 의미한다. 출력 포트에서 광파의 세기 분포는 결합영역에서 정의되는 행렬식을 이용하여 계산되며, 관련된 자세한 수식 및 내용들은 참고문헌 [24]에서 확인된다.

2.1.1 단일 채널 링-공진기의 구조 해석

Fig. 3과 같은 단일 채널 링-공진기의 입-출력 포트에서 E_{i1} , E_{t1} 는 입-출력 광파이며, E_{a1} , E_{a2} 는 광 결합 시 링-공진기의 입-출력 광파로서, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{a2} = \alpha e^{j\theta_1} E_{a1} = \alpha e^{j2\pi R\beta_r} E_{a1} \quad (2-1)$$

$$\theta_1 = 2\pi R\beta_r = R \frac{(2\pi)^2}{\lambda} n_{r,eff} \quad (2-2)$$

식(2)에서 β_r , $n_{r,eff}$ 는 링-공진기에서 광파의 전파상수, 유효 굴절률이며, θ_1 은 광파가 링을 한 바퀴 회전하는 동안 발생하는 위상 변화이다. 광 결합 후, 링-공진기 내의 광파와 출력 포트에서의 광파 세기에 대한 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & k_1 \\ -k^*_1 & t_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ E_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & k_1 \\ -k^*_1 & t_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ \alpha e^{j\theta_1} E_{a1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

행렬 식(3)을 풀어서 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{t1} = t_1 E_{i1} + k_1 \alpha e^{j\theta_1} E_{a1} \quad (4-1)$$

$$E_{a1} = -k^*_1 E_{i1} + t^*_1 \alpha e^{j\theta_1} E_{a1} \quad (4-2)$$

식(4-2)의 E_{a1} 을 입력 포트의 광파인 E_{i1} 에 대하여 정리 후, 식(4-1)의 E_{a1} 에 대입하여, E_{t1} 을 E_{i1} 에 대한 식으로 정리하면 식(5)가 유도된다.

$$E_{t1} = \frac{t_1 - \alpha e^{j\theta_1}}{1 - t^*_1 \alpha e^{j\theta_1}} E_{i1} \quad (5)$$

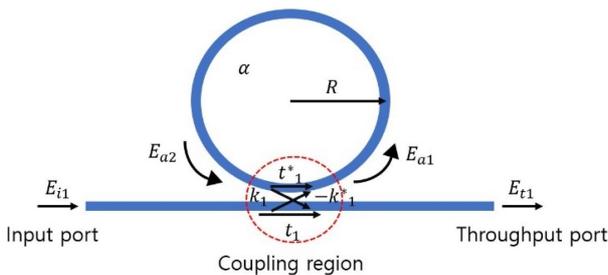


Fig. 3. Model of the single ring-resonator with a single channel waveguide

식 (5)에서 $E_{t1} = 1$ 로 설정하고, 식(1-1)을 이용하여 출력 포트에서 광파의 출력, P_{t1} 을 유도하면 아래와 같이 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{\alpha^2 + |t_1|^2 - 2\alpha|t_1|\cos(\theta_1 - \phi_1)}{1 + \alpha^2 + |t_1|^2 - 2\alpha|t_1|\cos(\theta_1 - \phi_1)} \quad (6)$$

식 (6)에서 $\theta_1 - \phi_1 = 2m\pi$ (m =정수)를 만족하면 공진이 발생하고, 이때의 파장을 공진파장 (resonant frequency)이라 일컫는다. 이 경우에 $\alpha = |t_1|$ 을 만족하면 공진 파장에서 P_{t1} 은 0이 된다.

2.1.2 삼입-분기 채널 링-공진기의 구조 해석

Fig. 4는 삼입-분기 채널 링-공진기의 구조이고, 링-공진기와 광 도파로 간에 총 2번의 광 결합이 발생하며, 입-출력 삼입-분기 포트가 구성되어, 총 4개의 포트가 존재한다. 각각의 포트와 링-공진기에서의 광파 세기는 다음과 같은 행렬 형태로 정의가 된다.

$$\begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & k_1 \\ -k^*_1 & t_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ \alpha' e^{j\theta'} E_{b2} \end{pmatrix} \quad (7-1)$$

$$\begin{pmatrix} E_{t2} \\ E_{b2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & k_2 \\ -k^*_2 & t_2^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i2} \\ \alpha' e^{j\theta'} E_{a1} \end{pmatrix} \quad (7-2)$$

식(7)에서 α' , θ' 는 광파가 링을 반 바퀴 이동하였을 때의 손실계수와 위상 변화이며, $(\alpha')^2 = \alpha$, $2\theta' = \theta$ 관계가 성립된다. 식(7)의 두 행렬식과 식(1)을 이용하여 E_{t1} , E_{t2} 에 대하여 정리하면, 다음과 같이 식(8)로 유도되며, 이때, $E_{i1} = 1$, $E_{i2} = 0$ 으로 설정해서 유도하였다.

$$E_{t1} = \frac{t_1 - t^*_2 e^{j\theta} \alpha}{1 - t^*_1 t^*_2 e^{j\theta} \alpha} \quad (8-1)$$

$$E_{t2} = \frac{-k^*_1 k_2 e^{j\theta'} \alpha'}{1 - t^*_1 t^*_2 e^{j\theta} \alpha} \quad (8-2)$$

식(8)과 식(1)을 이용하여 출력-분기 포트에서의 광파의 출력을 계산하면 식(9)와 같이 도출된다.

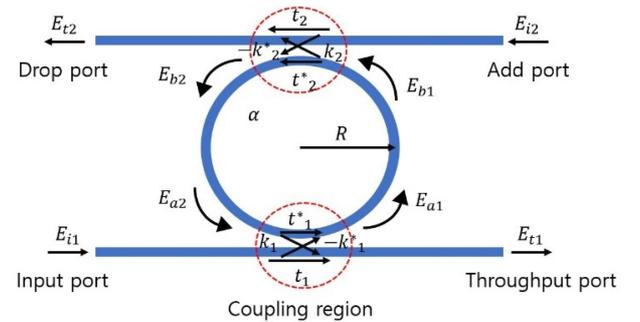


Fig. 4. Model of the single ring-resonator with two channel waveguides including add-drop ports.

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{|t_1|^2 + \alpha^2 |t_2|^2 - 2\alpha |t_1 t_2| \cos(\theta - \phi_1 - \phi_2)}{1 + |t_1 t_2|^2 \alpha^2 - 2\alpha |t_1 t_2| \cos(\theta - \phi_1 - \phi_2)} \quad (9-1)$$

$$P_{t2} = |E_{t2}|^2 = \frac{\alpha(1-|t_1|)^2(1-|t_2|)^2}{1 + |t_1 t_2|^2 \alpha^2 - 2\alpha |t_1 t_2| \cos(\theta - \phi_1 - \phi_2)} \quad (9-2)$$

위 식에서, $\theta - \phi_1 - \phi_2 = 2m\pi$ (m =정수)를 만족하면 공진이 발생하며, 식(10)은 공진이 발생하였을 때 출력·분기 포트에서의 광파의 출력이다.

$$P_{t1,res} = |E_{t1}|^2 = \frac{(|t_1| - \alpha |t_2|)^2}{(1 - \alpha |t_1 t_2|)^2} \quad (10-1)$$

$$P_{t2,res} = |E_{t2}|^2 = \frac{\alpha(1-|t_1|)^2(1-|t_2|)^2}{(1 - \alpha |t_1 t_2|)^2} \quad (10-2)$$

이때, 식(10-1)에서 식(11)을 만족하면 공진이 발생시 P_{t1} 은 0이 된다.

$$\alpha = \left| \frac{t_1}{t_2} \right| \quad (11)$$

2.2 링-공진기의 특성 파라미터

2.2.1 FSR

링-공진기의 공진 파장은 주어진 제원에서 광파가 링을 이동할 때 발생하는 위상의 변화와 광 결합 시 발생하는 위상의 변화의 합이 2π 의 정수 배 일 때, Fig. 5와 같이 반복적으로 나타나고 일정한 주기를 가지며, 이러한 주기를 FSR로 정의한다.

$$FSR = -\frac{2\pi}{L} \times \left(\frac{\delta\beta}{\delta\lambda} \right)^{-1} = \frac{2\pi}{L} \times \left(-\frac{\lambda_{res}^2}{2\pi n_g} \right) = \frac{\lambda_{res}^2}{Ln_g} \quad (12)$$

위 식에서 L , n_g , λ_{res} 는 링의 길이, 광파의 군-굴절률, 공진 파장을 각각 의미한다. FSR의 값이 크면 링-공진기를 필터 또는 센서로 활용 시 더 많은 파장과 굴절률을 가변 할 수 있게 되며, 따라서 FSR이 클수록 센서로 활용 시 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

2.2.2 FWHM와 Q-factor

FWHM 또는 3dB 대역폭 (bandwidth)는 링-공진기의 또 다른 중요한 특성을 나타내는 파라미터들 중의 하나로, Fig. 5와 같이 공진파장을 중심으로 최대값의 절반이 되는 파장 간의 폭을 의미한다. 식(9-2)와 식(10-2)를 이용하여 삽입-분기 채널 링-공진기의 3dB대역폭인 $2\delta\lambda$ 즉, FWHM을 계산하면 식(13)과 같이 정의된다.

$$FWHM = 2\delta\lambda = \frac{\lambda_{res}^2}{\pi Ln_{eff}} \times \frac{1-t}{t} \quad (13)$$

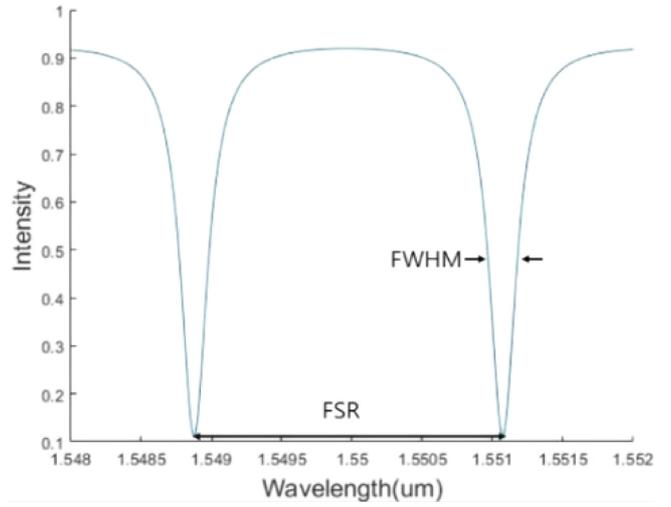


Fig. 5. FSR and FWHM at the single ring-resonator with one channel waveguide

동일한 방법으로 식(5)와 식(6)을 이용하여, 단일 채널 링-공진기의 FWHM을 계산하면 식(14)가 도출된다.

$$FWHM = 2\delta\lambda = \frac{\lambda_{res}^2}{\pi Ln_{eff}} \times \frac{1-t}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

FWHM이 작으면, 스펙트럼에서 공진출력 폭이 좁아지며, 이는 변수의 변화에 따른 분해능(resolution)이 높아 미세한 값을 센싱(추출)할 수 있다. 따라서 링-공진기를 센서로 이용 시, FWHM이 좁은 것이 유용하다.

링-공진기의 품질인자(Q-factor)는 손실된 전력당 링 한 바퀴 이동할 때, 저장된 에너지로 정의되며, 공진파장과 FWHM의 비율로 계산된다. [25] 품질인자가 높을수록 공진파장에서 에너지가 링에 많이 집중되어 있다는 것을 의미한다.

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} = \frac{\lambda_{res}}{2\delta\lambda} \quad (15)$$

3. 슬롯 링-공진기의 해석 및 최적화

Fig. 6(a), (b)는 전산해석에 적용된 슬롯 링-공진기의 구조이며, 두 구조 각각은 단일 채널 슬롯 링-공진기와 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기에 해당된다. 두 구조에서 클래딩 굴절률 변화를 감지하는 영역은 링-공진기와 채널 광 도파로의 일부분을 점선 사각형으로 지정하였으며, 그 외 영역의 클래딩은 SiO_2 로 구성하였고, R은 링의 반경을 의미한다. Fig. 6(c)는 링-공진기와 채널 광 도파로 간에 결합이 발생하는 부분(A-A')의 단면이며, w_r , w_s , h , d 는 광 도파로의 폭, 슬롯의 폭, 광 도파로의 높이, 그리고 링-공진기와 채널 광 도파로 간의 결합 간격을 각각 의미하며, 참고문헌 [26]에 제시된 SOI 슬롯 광 도파로의

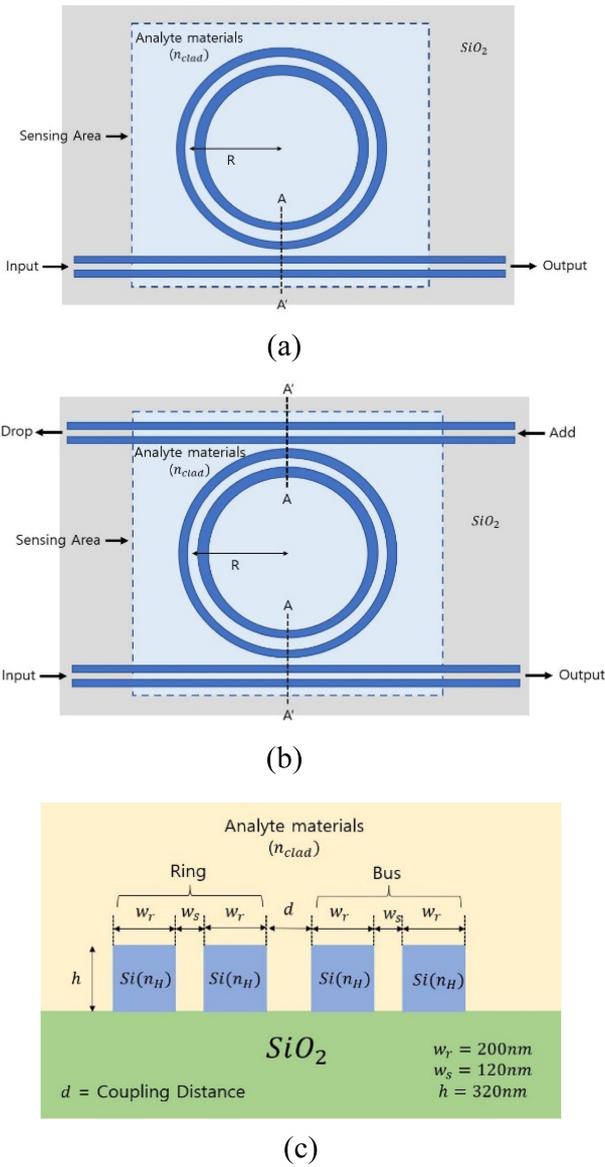


Fig. 6. Schematics of (a) the ring-resonator with one channel waveguide and (b) the ring-resonator with add-drop channel waveguide, and (c) the cross-section view along $A-A'$ of the slot waveguide-based optical ring-resonator

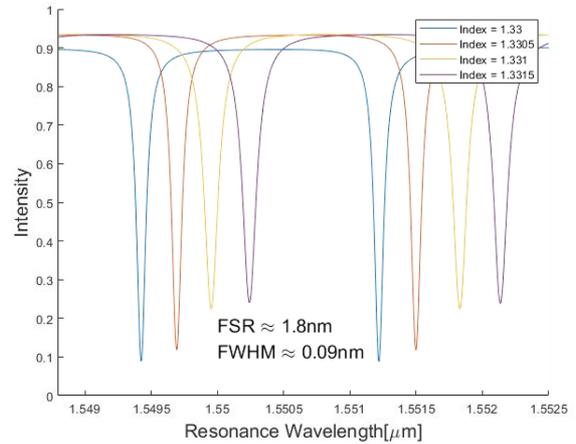
최적화된 제원을 참고해서 w_r , w_s , h 를 각각 200 nm, 120 nm, 320 nm로 결정하였다. 링의 반경(R)과 결합 간격(d)이 링-공진기의 성능에 미치는 영향을 비교하기 위하여 Table 2에 제시된 세가지 조건으로 전산해석을 진행하였으며, Si, SiO₂ 굴절률 값으로 3.4757, 1.444를 각각 사용하였다.

3.1 단일 채널 슬롯 링-공진기 분석

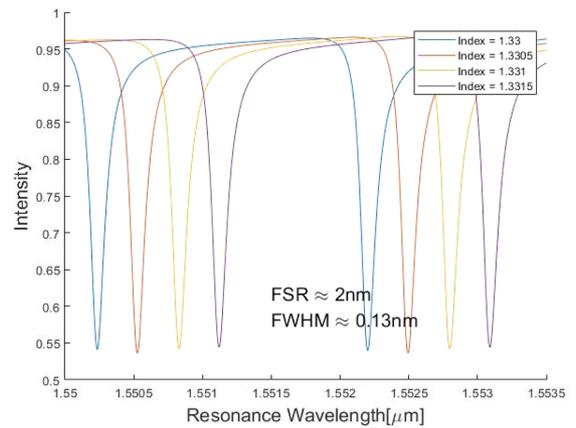
Fig. 7은 Table 2의 세가지 조건에 따라 단일 채널 슬롯 링-공진기의 광파 세기와 대응되는 공진파장에 대해서 전산 해석한 그래프이다. 클래딩 물질의 굴절률을 1.33, 1.3305, 1.331, 1.3315

Table 2. Conditions according to ring radius and coupling distance

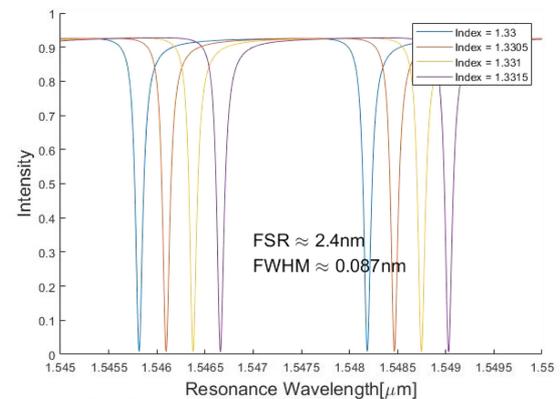
Condition	Ring radius (R)	Coupling gap (d)
Condition 1	77.6 μm	0.2 μm
Condition 2	77.6 μm	0.5 μm
Condition 3	59.4 μm	0.5 μm



(a) Condition 1 ($R = 77.6 \mu\text{m}$, $d = 0.2 \mu\text{m}$)



(b) Condition 2 ($R = 77.6 \mu\text{m}$, $d = 0.5 \mu\text{m}$)



(c) Condition 3 ($R = 59.4 \mu\text{m}$, $d = 0.5 \mu\text{m}$)

Fig. 7. Intensity responses of the slot ring-resonator with one channel waveguide for different cladding index at (a) condition 1, (b) condition 2, and (c) condition 3

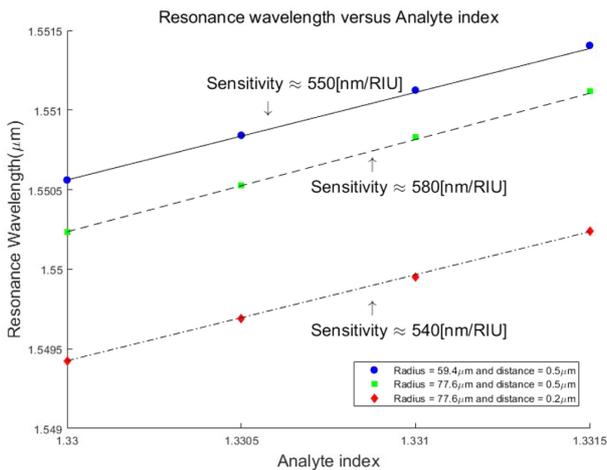


Fig. 8. Sensitivity of slot ring-resonator with a single channel waveguide versus analyte refractive index at specifications of Table 2

로 가변 하면서 전산해석을 수행하였다. 링의 반경 R이 FSR과 FWHM에 많은 영향을 미치는 것을 Fig. 7에서 확인되었다. 조건 1, 2, 3에 대해서 FSR과 FWHM은 (1.8 nm, 0.09 nm), (2.0 nm, 0.13 nm) 그리고 (2.4 nm, 0.087 nm) 로 각각 계산되었다.

R = 77.6 μm의 FSR은 R = 59.4 μm의 FSR보다 약 0.4~0.6 nm 작게 계산이 된다. 식(12)에서 FSR은 공진파장의 제곱에 비례하고 균-굴절률과 링의 길이에 반비례하는데, 조건에 따라 공진 파장과 균-굴절률의 차이는 크지 않지만 링의 반경은 약 1.3배 정도 차이를 보여 링의 반경이 FSR에 큰 영향을 미치면서, R = 59.4 μm의 FSR이 더 크게 계산된 것으로 해석된다. 조건 2는 조건1, 3에 비하여 상대적으로 높은 FWHM과 공진조건에서 출력 광파의 세기가 높게 계산이 되었는데, 이는 해당 제원에서 공진기와 채널 광 도파로 사이의 광 결합이 상대적으로 약하게 일어나서 나타난 것으로 해석된다.

Fig. 8은 클래딩 굴절률 변화에 따른 공진파장의 변화를 이용하여 감도를 계산한 결과이다. 링-공진기의 감도는 클래딩 굴절률의 변화에 따른 공진파장의 변화로 아래와 같이 정의된다.

$$S_{res} = \frac{d\lambda_{res}}{dn_{clad}} [nm/RIU] \tag{16}$$

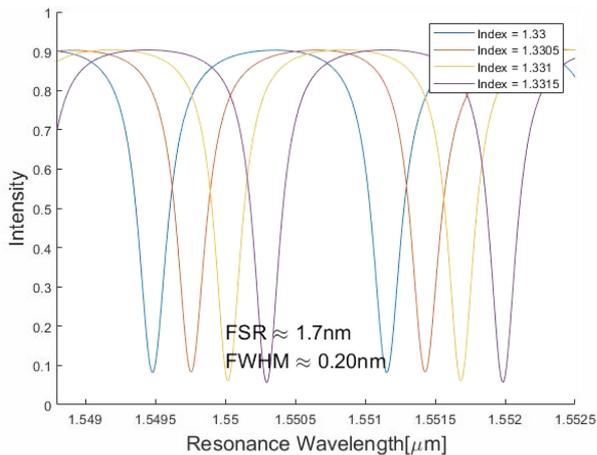
조건1, 2, 3에서 감도는 각각 540, 580, 550 [nm/RIU]로 계산이 되었다. 동일한 결합 간격을 가진 조건2, 3의 감도를 비교해보면 링의 반경이 클수록 감도가 높다는 것을 확인할 수 있다. 조건1, 3의 감도는 약 10 [nm/RIU]의 차이를 보이며, 감도를 기준으로 센서에 적합한 제원을 선정할 때, 두 제원은 감도의 차이가 크지 않아 동일한 감도를 가지는 구조로 고려될 수 있다. 마지막으로 조건1, 2, 3의 품질인자는 각각 17149, 11399, 17677로 계산되었으며, 조건3의 품질인자가 가장 큰 값으로 확인되었다. 조건2의 품질인자는 조건1, 3에 비하여 상당히 작은 값으로

계산이 되었는데 이는 조건2의 FWHM이 다른 두 조건에 비하여 상당히 크기 때문이다. 따라서 FSR, FWHM, 감도, 품질인자를 종합적으로 고려할 경우, 단일 채널 슬롯 링-공진기 센서로 가장 적합한 제원은 조건 3이며, 그 이유로는 넓은 FSR, 좁은 FWHM, 높은 품질인자 그리고 높은 감도를 보여주고 있기 때문이다.

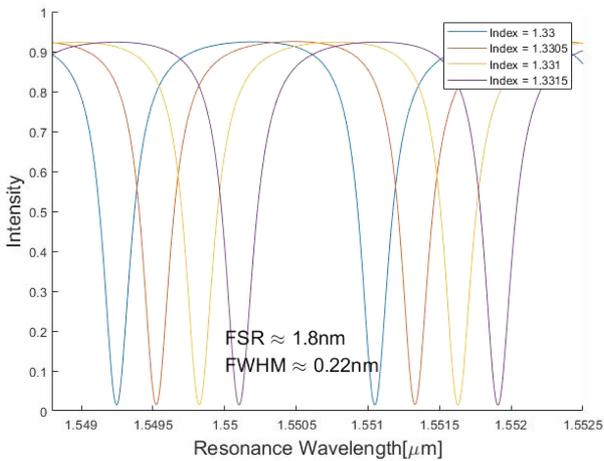
3.2 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기 분석

Table 2의 세가지 조건을 적용해서 Fig. 6(b)의 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기에 대해서 전산해석을 수행하였다. Fig. 9는 클래딩 굴절률을 1.33, 1.3305, 1.331, 1.3315로 가변 하면서 전산해석 한 출력 광파의 세기와 공진파장이다. 조건1, 2, 3에서 FSR과 FWHM은 (1.7 nm, 0.2 nm), (1.8 nm, 0.22 nm) 그리고 (2.2 nm, 0.12 nm)으로 각각 계산되었다. 단일 및 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기의 FSR과 FWHM을 비교를 해보면 제원의 변화에 대한 FSR과 FWHM은 비슷한 경향을 보이지만, 각 조건에서 FSR은 전반적으로 좁아졌고, FWHM은 전반적으로 넓어졌음을 알 수 있다. 식(13), (14)에서 FWHM은 여러 변수들에 영향을 받는데, 각 조건에서 두 구조의 결합 상수는 동일한 값을 가지며, 다른 변수들은 큰 차이를 보이지 않아 결합상수가 FWHM에 큰 영향을 미치게 된다. 동일한 결합상수에서 삽입-분기 구조의 FWHM은 단일 구조의 FWHM보다 크게 계산이 되기 때문에, 삽입-분기 구조의 FWHM이 전반적으로 넓어지는 것으로 해석된다. Fig. 9의 결과를 Fig. 7의 결과와 비교해보면, 가장 두드러진 변화를 보이는 현상은 공진조건에서 조건2의 출력 광파의 세기 변화인데, 이러한 이유는 삽입-분기 채널 구조에서 광 결합이 2번 발생을 하면서, 단일 채널 구조에서 1번 발생할 때보다 광 결합이 강하게 일어나서 공진조건에서 출력의 세기가 0에 수렴하는 것으로 해석되었다.

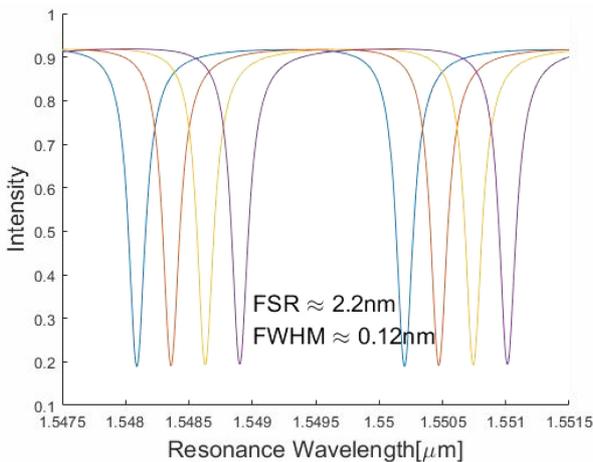
Fig. 10은 식 (16)을 이용해서 계산된 감도 특성이다. 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기의 감도는 조건1, 2, 3에서 550, 580, 550 [nm/RIU]으로 각각 계산되었고, 이를 단일 채널 슬롯 링-공진기에서의 감도와 비교를 해보면, 조건1은 10 [nm/RIU] 정도 높은 감도를 보이지만 나머지 조건에서는 동일한 감도를 보이며, 두 구조의 차이로 인한 감도에는 변함이 없기 때문에 감도 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 해석된다. 품질 인자는 조건 1, 2, 3에 대해서 8452, 6779, 12677로 계산되었으며, 단일 채널 슬롯 링-공진기의 품질인자와 동일한 경향을 보이지만, 전체적으로 품질인자는 약 1.3~2배 낮은 값으로 계산되었다. 이는 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기의 FWHM이 단일 채널 링-공진기에 비하여 약 1.3~2배 정도 증가 하였기 때문에 삽입-분기 채널 슬롯 링-이는 조건3의 FWHM이 나머지 조건보다 약 0.5~0.8배 정도의 값을 보이기 때문이다. 따라서 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기 구조를 센서로서 활용 시, 가장 적합한 구조는 조건 3의 제원이다. 해당 제원의 감도는 다른 제원과 비교하였을 때 같거



(a) Condition 1 ($R = 77.6 \mu\text{m}, d = 0.2 \mu\text{m}$)



(b) Condition 2 ($R = 77.6 \mu\text{m}, d = 0.5 \mu\text{m}$)



(c) Condition 3 ($R = 59.4 \mu\text{m}, d = 0.5 \mu\text{m}$)

Fig. 9. Intensity responses of the slot ring-resonator with an add-drop channel waveguide for different cladding index at (a) condition 1, (b) condition 2, and (c) condition 3.

나 조금 작지만, 넓은 FSR, 좁은 FWHM, 높은 품질인자로 인하여 종합적으로 고려해보면 다른 제원들 보다 유용한 것으로

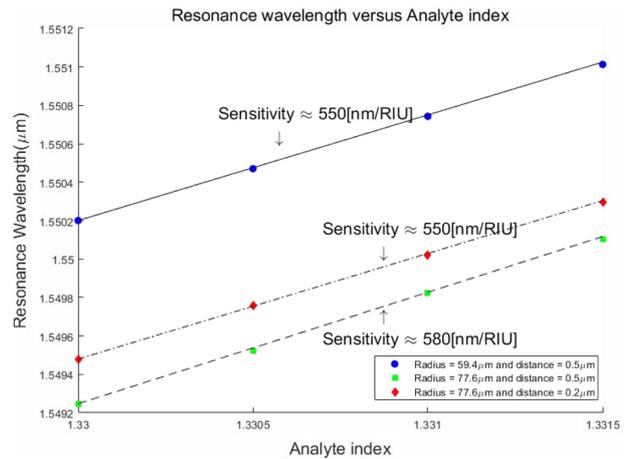


Fig. 10. Sensitivity of slot ring-resonator with an add-drop channel waveguide versus analyte index at specifications of Table 2

평가할 수 있다.

마지막으로 단일 채널 슬롯 링-공진기와 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기 중에서 센서로서 어느 것이 더 적합한지 평가해보면, 우선적으로 두 구조에서 가장 적합한 제원은 조건3으로 동일하며, 조건3에서 감도는 두 구조가 동일하게 계산이 되었지만, 그 외의 다양한 물리적 변수를 종합하여 고려하면, 단일 채널 슬롯 링-공진기가 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기보다 넓은 FSR, 좁은 FWHM 그리고 높은 품질인자라는 이점을 가진다. 이러한 이점들은 분석 가능한 물질의 범위 증가, 높은 분해능, 적은 에너지 손실을 의미하며, 결과적으로 센서로서 더 좋은 성능을 기대할 수 있다. 따라서 단일 채널 슬롯 링-공진기가 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기보다 센서로서 더 적합한 구조인 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

FIMMPROP과 PICWAVE 소프트웨어를 사용하여 Table 2에서 제시된 제원에 대해서 단일 채널 슬롯 링-공진기와 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기의 FSR, FWHM, 품질인자, 감도의 상호 비교를 통해서 각 제원이 바이오-케미컬 센서 성능에 미치는 영향을 검토하였으며, 이로부터 최적화된 구조를 도출하였다.

Table 2의 조건 3이 두 구조의 최적화된 제원으로 도출되었으며, 각 해당 제원에서 FSR, FWHM, 품질인자, 감도는 단일 및 삽입-분기 채널 슬롯 링-공진기 각각에서 (2.4 nm, 0.087 nm, 17677, 550 [nm/RIU]), (2.2 nm, 0.12 nm, 12677, 550 [nm/RIU])로 계산되었다. 조건 3의 제원에서 두 구조의 감도는 동일하였으나, FSR, FWHM과 품질인자가 삽입-분기 구조보다는 단일 채널 구조에서 더 좋은 성능을 보이고 있는 것으로 확인되었고, 이는 센서로서 활용 시 단일 채널 구조에서 더 많은 분석물질

을 분석할 수 있으며, 분석 물질에 대한 분해능이 높고, 에너지 손실이 적다는 것을 의미한다. 따라서 단일 채널 슬롯 링-공진기가 삼입-분기 채널 슬롯 링-공진기보다 센서로서의 활용도가 높다는 결론을 도출할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 이공학개인기초연구 (2018-R1D1A1B07049908) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] A. Elmanova, P. An, V. Kovalyuk, A. Golikov, I. Elmanov, and G. Goltsman, "Study of silicon nitride O-ring resonator for gas-sensing applications", *J. Phys.: Conf. ser.*, pp. 1-6, Saint Petersburgs, Russian, 2020.
- [2] B. Kumari, A. Barh, R. K. Varshney, and B.P. Pal, "Silicon-on-nitride slot waveguide: A promising platform as mid-IR trace gas sensor", *Sens. Actuators. B. Chem.*, Vol. 236, pp. 759-764, 2016.
- [3] C. A. Barrios, "Optical slot-waveguide Based Biochemical Sensors", *sensors*, Vol. 9, No. 6, pp. 4751-4765, 2009.
- [4] P. Sanati, S. S. Hashemi, M. Bahadoran, A. A. Babadi, and E. Akbari, "Detection of *Escherichia coli* K12 in Water Using Slot Waveguide in Cascaded Ring Resonator", *Silicon*, Vol. 14, No. 3, pp. 851-857, 2021.
- [5] Y. Zou, W. Chakravarty, C. J. Chung, X. Xu, and R. T. Chen, "Mid-infrared silicon photonic waveguides and devices[Invited]", *Photonics. Res.*, Vol. 6, No. 4, pp. 254-276, 2018.
- [6] Y. Ma, B. Dong, and C. Lee, "Progress of infrared guided-wave nanophotonic sensors and devices", *Nano. Converg.*, Vol. 7, No. 12, 2020.
- [7] C. A. Barrios, "Analysis and modeling of a silicon nitride slot-waveguide microring resonator biochemical sensor", *Proc. SPIE.*, Vol. 7356, Prague, Czech Republic, 2009.
- [8] A. Yalcin, K. C. Papat, J. C. Aldridge, T. A. Desai, J. Hryniewicz, N. Chbouki, B. E. Little, O. King, V. Van, S. Chu, D. Gill, M. A. Washburn, M. S. Ünli, and B. B. Goldberg, "Optical sensing of biomolecules using microring resonators", *IEEE. J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, Vol. 12, No. 1, pp. 148-155, 2006.
- [9] Q. Liu, X. Tu, K. W. Kim, J. S. Kee, Y. Shin, K. Han, Y. J. Yoon, G. Q. Lo, and M. K. Park, "Highly sensitive Mach-Zehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide", *Sens. Actuators. B. Chem.*, Vol. 188, pp. 681-688, 2013.
- [10] K. E. Zinoviev, A. B. Gonzalez-Guerrero, C. Dominguez, and L. M. Lechuga, "Integrated Bimodal Waveguide Interferometric Biosensor for Label-Free Analysis", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 29, No. 13, pp. 1926-1930, 2011.
- [11] T. Mazingue, R. K. Kribich, P. Etienne, and Y. Moreau. "Simulations of refractive index variation in a multimode interference coupler: Application to gas sensing", *Opt. Commun.*, Vol. 278, No. 2, pp. 312-316, 2007.
- [12] C. A. Barrios, B. Sanchez, K. B. Gylfason, A. Griol, H. Sohlstrom, M. Holgado, and R. Casquel, "Demonstration of slot-waveguide structures on silicon nitride/silicon oxide platform", *opt. Express.*, Vol. 15, No. 11, pp. 6846-6856, 2007.
- [13] X. Wang, S. Grist, J. Flueckiger, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, "Silicon photonics slot waveguide Bragg gratings and resonators", *opt. Express.*, Vol. 21, No. 16, pp. 19029-19039, 2013.
- [14] F. Prieto, A. Llobera, D. nez, C. niguez, A. Calle, and L. M. Lechuga, "Design and Analysis of Silicon Antiresonant Reflecting Optical Waveguide for Evanscent Field Sensor", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 18, No. 7, pp. 966-972, 2000.
- [15] V. R. Almeida, Q. Xu, C. A. Barrios, and M. Lipson, "Guiding and confining light in void nanostructure", *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1209-1211, 2004.
- [16] K. Y. You, *Emerging Waveguide Technology*, IntechOpen, London, pp. 187-207, 2018.
- [17] O. S. Ahmed, M. A. Swilam, M. H. Bakr, and X. Li, "Efficient Design Optimized of Ring Resonator-Based Optical Filters", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 29, No. 18, pp. 2812-2817, 2011.
- [18] B. Liu, A. Shakouri, and J. E. Bowers, "Passive microring-resonator-coupled lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 22, pp. 3561-3563, 2001.
- [19] S. Matsuo and T. Segawa, "Microring-Resonator-Based Widely Tunable Lasers", *IEEE. J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, Vol. 15, No. 3, pp. 545-554, 2009.
- [20] H. Tazawa and W.H. Steier, "Analysis of ring resonator-based traveling-wave modulators", *IEEE. Photonics. Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 1, pp. 211-213, 2006.
- [21] I. Kiyay, A. Aydinli, and N. Dagli, "High-Q silicon-in-insulator optical rib waveguide racetrack resonators", *Opt. Express.*, Vol. 13, No. 6, pp. 1900-1905, 2005.
- [22] K. D. Vos, I. Bartolozzi, E. Schacht, P. Beinstman, and R. Baets, "Silicon-om-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing", *Opt. Express.*, Vol. 15, No. 12, pp. 7610-7615, 2007.
- [23] V. Mere, H. Muthuganesan, Y. Kar, C. V. Kruijsdijk, and S. K. Selvaraja, "On-Chip Chemical Sensing Using Slot-Waveguide-Based Ring Resonator", *IEEE. Sens. J.*, Vol. 20, No. 11, pp. 5970-5975, 2020.
- [24] D. G. Rabus, *Integrated Ring Resonators The compendium.*, Springer, Heidelberg, pp.3-11, 2007.
- [25] R. D. Mansoor, H. Sasse, and A. P. Duffy, "Analysis of Optical Ring Resonator Add/Drop Filters", *IWCS.*, pp. 471-475, North Carolina, USA, 2013.
- [26] H. S. Jung, "Optimization of vertical SOI slot optical waveguide with confinement factor and sensitivity for integrated-optical biochemical sensors", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 3, pp. 131-138, 2021.