

집적광학 바이오케미컬 센서에 적합한 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 슬롯 및 릿지-슬롯 광 도파로 제원 최적화 및 감지도 해석

장재식^{1,+} · 정홍식¹

Specification optimization and sensitivity analysis of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ slot and ridge-slot optical waveguides for integrated-optical biochemical sensors

Jaesik Jang^{1,+} and Hongsik Jung¹

Abstract

Numerical analysis was performed using FIMMWAVE to optimize the specifications of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ slot and ridge-slot optical waveguides based on confinement factor and effective mode area. The optimized specifications were confirmed based on sensitivity in terms of the refractive index of the analyte. The specifications of the slot optical waveguide, i.e., the width of the slot and the width and height of the rails, were optimized to 0.2 μm , 0.46 μm , and 0.5 μm , respectively. When the wavelength was 1.55 μm and the refractive index of the slot was 1.3, the confinement factor and effective mode area of 0.2024 and 2.04 μm^2 , respectively, were obtained based on the optimized specifications. The thickness of the ridge and the refractive index of the slot were set to 0.04 μm and 1.1, respectively, to optimize the ridge-slot optical waveguide, and the confinement factor and effective mode area were calculated as 0.1393 and 2.90 μm^2 , respectively. When the confinement coefficient and detection degree of the two structures were compared in the range of 1 to 1.3 of the analyte index, it was observed that the confinement coefficient and sensitivity were higher in the ridge-slot optical waveguide in the region with a refractive index less than 1.133, but the reverse situation occurred in the other region. Therefore, in the implementation of the integrated optical biochemical sensor, it is possible to propose a selection criterion for the two parameters depending on the value of the refractive index of the analyte.

Keywords : Slot waveguide, Ridge-slot waveguide, Integrated-optical sensor, Confinement factor, Effective mode area, Sensitivity

1. 서 론

집적광학 센서는 지난 20여년동안 지속적인 연구를 통하여 많은 발전을 해왔다. 기존의 다른 센서와 비교하였을 때, 집적 광학 센서는 전자장의 간섭을 적게 받으며, 높은 감지도(sensitivity)와 고 집적률 그리고 저렴한 비용 등의 장점들을 가지고 있다 [1,2]. 이러한 장점으로 인하여 집적광학 센서는 가스 센서 [3], pH 센서 [4], 바이오 센서 [5] 등 다양한 응용분야에서 활용하려

는 시도들이 꾸준히 보고되고 있다. 현재 많이 연구되고 있는 집적광학 바이오 센서들은 방향성 결합기 [6], 링 공진기 [7], 브래그(Bragg) 격자 [8], 그리고 다중모드 결합기 등 다양한 구조들을 적용하여 구현되어 왔다. 바이오 센서가 분석물질을 감지하는 방법은 크게 2가지가 있는데, 첫 번째 방법은 homogenous 센싱으로, 이는 분석물질의 굴절률의 변화에 따른 유효 굴절률의 변화를 이용하여 감지하는 방법이다 [9]. 두 번째는 표면(surface) 센싱이며 도파로의 표면에 항체 층을 만들고, 이 층은 항원과 반응 시 두께의 변화가 발생되는데, 두께의 변화에 따라 유효 굴절률의 변화를 감지하는 방식이다 [10]. 집적 광학센서에서 분석물을 감지하는 방법 중 소산파(evanescent wave)를 사용하는 집적 광학 센서는 이전에 릿지(ridge) 또는 릿(rib) 광 도파로를 적용해서 구현하였다. 그러나 릿지 와 릿 광 도파로는 코어(core)내에 많은 광파가 집중되어 클래딩(cladding)에 존재하는 소산파가 상대적으로 작아, 높은 감지도를 얻지 못하였다. 이에 대안으로 집적 광학 바이오센서에 슬롯 광 도파로(slot waveguide)의 활용 가능성에 대한 지속적인 관심이 보고되고 있

¹ 홍익대학교 대학원 전자전산공학과 (Dept. of Electronics and Computer Engineering, Graduate School, Hongik University)
 2639 Sejong-ro, Sejong-si, 30016, Korea

⁺Corresponding author: wotr38@naver.com

(Received : Apr. 21, 2021, Revised : Apr. 26, 2021, Accepted : May. 11, 2021)

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.

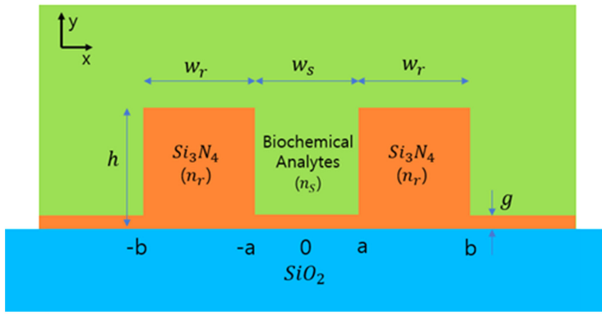


Fig. 1. Ridge-slot waveguide structure.

는 상황이다.

슬롯 광 도파로는 2004년 Almeida등이 처음 제안한 구조로 굴절률이 높은 두 개의 레일(nr) 사이에 굴절률이 낮은 슬롯(ns)이 위치한 Fig. 1과 같은 구조이다 [11,12]. 슬롯 광 도파로는 레일 보다 슬롯에 모드필드가 더 많이 분포되어서 진행하는 특징을 보인다. 이러한 특징의 원리는 굴절률 차이가 큰 두 물질의 경계 면에서 전계의 불연속에 의해 발생한다. 슬롯 광 도파로는 릿지 또는 릿지 광 도파로보다 많은 양의 모드가 슬롯 영역 내에 분포해서 분석물질과 직접적인 상호작용을 통하여 더 높은 감지도를 기대할 수 있다.

초기에 슬롯 광 도파로는 SOI(Silicon on Insulator: Si/SiO2) 물질 체계로 제안 되었고, 현재까지 지속적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 SOI는 1.55 μm 파장 대역에서 실리콘이 광을 흡수하기 때문에 Si3N4/SiO2 물질 체계가 해당 파장대역에서 대체 물질로 제안되었고 연구가 진행되고 있다. 또한 Si3N4/SiO2 구조는 표면의 불규칙성 때문에 발생하는 산란손실이 적고, 제작 과정에서 발생하는 크기의 오차 허용범위가 높다는 장점이 있다 [13,14].

한편, 릿지-슬롯(ridge-slot) 광 도파로는 슬롯 광 도파로의 구조에서 완전히 식각(etching) 되지 않은 구조로 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 릿지-슬롯 광 도파로는 분석물질의 굴절률이 낮은 조건에서 기존의 슬롯 광 도파로보다 구속 계수(Confinement factor, Γ)가 높고, 이는 특히 가스 감지센서에 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 릿지-슬롯 광 도파로는 전기광학 변조기와 Kerr 효과를 사용하는 비선형 광학 응용분야에서도 활용할 수 있는 이점이 있다 [15].

본 논문에서는 Si3N4/SiO2 물질 체계와 1.55 μm 파장 중심으로 진행하였다. 2장에서는 Maxwell 파동 식과 경계조건을 이용해서 TM, TE 기본모드의 필드 분포를 검토하였다 [16,17]. 3장에서는 구속 계수와 유효면적을 기반으로 슬롯 및 릿지-슬롯 광 도파로 제원에 대한 최적화를 수행하였다. 이어서 최적화된 릿지-슬롯, 슬롯 광 도파로의 감지도를 계산하여 굴절률의 범위에 따라 어떤 광 도파로가 유용한지 4장에서 확인하였다. 본 연구에서는 “Photon Design”의 FIMMWAVE를 사용하여 전산해석을 수행하였다.

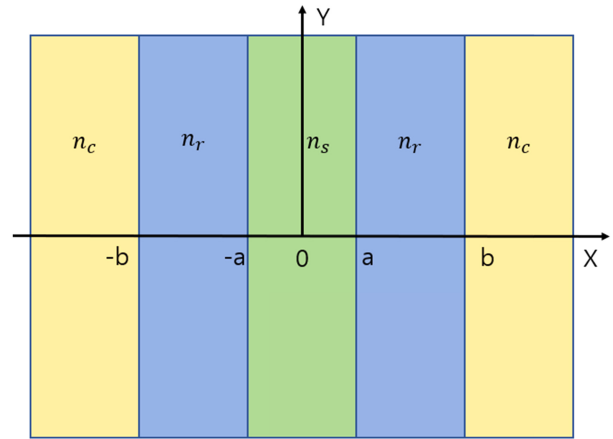


Fig. 2. Planar slot waveguide structure.

2. 슬롯 광 도파로의 모드 해석

2.1 평면 슬롯 광 도파로의 모드 해석

Fig. 2는 평면 슬롯 광 도파로에 대한 구조로 y축 대칭이다. 슬롯 광 도파로의 최적화 구조를 해석하기 이전에 기본적인 평면 슬롯 광 도파로의 TM, TE모드의 전계 분포 및 특성 방정식을 통하여 슬롯내의 전계 분포를 검토하였다. 각 모드의 전계는 식 (1)에서 정의된 Helmholtz 파동식과 경계조건을 이용해서 해석하였다 [16,17].

$$\frac{d^2 E_{x,i}(x)}{dx^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) E_{x,i}(x) = 0 \tag{1-1}$$

$$\frac{d^2 E_{y,i}(x)}{dx^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) E_{y,i}(x) = 0 \tag{1-2}$$

식 (1-1)과 식 (1-2)는 각각 TM과 TE모드에서 Ex(x)와 Ey(x)의 Helmholtz방정식이다. 식 (1)에서 i=s, r, c로 각각 슬롯, 레일, 클래딩을 의미하고, k0는 진공에서의 파수(wave number), k0 = 2π/λ0로 정의되며, β는 전파상수(propagation constant), β = 2π/λ0 n_eff로 정의된다. 또한 |x|=a, |x|=b는 각각 레일과 슬롯, 슬롯과 클래딩의 경계이다.

2.1.1 TM모드 전계 및 특성 방정식

TM모드의 전계는 Ex(x)가 주된 성분이며, 레일과 슬롯의 경계에서 경계 조건은 식 (2)와 같다.

$$n_s^2 E_x(a) = E_x(a) n_r^2 \quad |x|=a \tag{2-1}$$

$$n_r^2 E_x(b) = E_x(b) n_c^2 \quad |x|=b \tag{2-2}$$

식 (1)에 경계조건 식 (2)를 적용해서 $E_x(x)$ 을 정리하면 아래 식(3)과 같이 $E_x(x)$ 의 필드분포를 나타낼 수 있다 [16].

$$E_x(x) = A \begin{cases} \frac{1}{n_s^2} \cosh(r_s x) & \text{if } |x| < a \\ \frac{1}{n_h^2} \cosh(r_s a) \cos(r_r(|x| - a)) + \frac{r_s}{r_r n_s^2} \sinh(r_s a) \sin(r_r(|x| - a)) & \text{if } a < |x| < b \\ \frac{1}{n_c^2} \left\{ \begin{aligned} &\cosh(r_s a) \cos(r_r(|b| - a)) \\ &+ \frac{r_s n_r^2}{r_r n_s^2} \sinh(r_s a) \sin(r_r(|b| - a)) \end{aligned} \right\} * e^{-r_c(|x| - b)} & \text{if } b < |x| < a \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 A는 임의의 상수 값이고, 각 영역에서 전파상수는 아래와 같이 정의된다.

$$r_s = \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_s)^2}, \quad (4-1)$$

$$r_c = \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_c)^2}, \quad (4-2)$$

$$r_r = \sqrt{(k_0 n_r)^2 - \beta^2} \quad (4-3)$$

또한 TM모드의 m차 특성방정식은 아래 식 (5)와 같이 정리된다 [16]. 식 (5)에서 w_r 는 레일의 폭으로, $w_r = b - a$ 이다.

$$\arctan\left(\frac{n_r^2 r_c}{n_c^2 r_r}\right) + \arctan\left\{\frac{n_r^2 r_s}{n_s^2 r_r} \tanh(r_s a)\right\} + m\pi = r_r(b - a) = r_r w_r \quad (5)$$

2.1.2 TE모드 전개 및 특성 방정식

TE모드는 $E_y(x)$ 가 주된 성분이며, 물질의 경계면에서 전계의 경계조건은 아래 식 (6)과 같다.

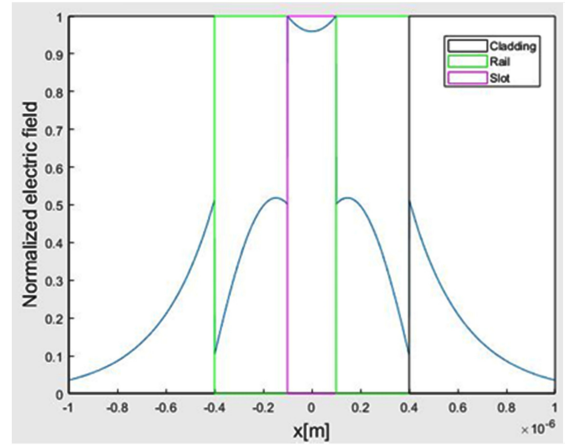
$$E_y(a) = E_y(a) \quad |x| = a \quad (6-1)$$

$$E_y(b) = E_y(b) \quad |x| = b \quad (6-2)$$

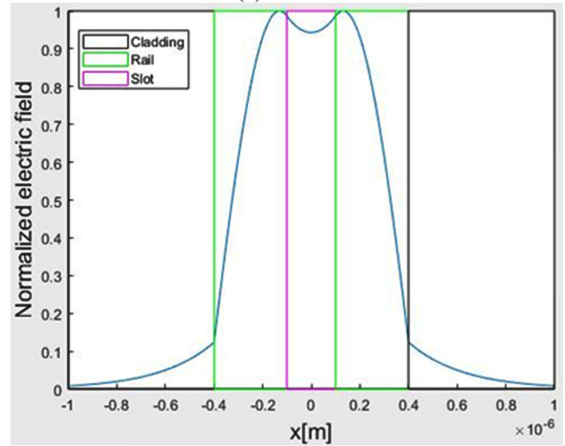
Helmholtz과동식과 TE모드의 경계조건을 이용해서 $E_y(x)$ 의 전개 분포와 특성방정식은 각각 식 (7)과 식 (8)로 정리된다 [17].

$$E_y(x) = A \begin{cases} \cosh(r_s x) & \text{if } |x| < a \\ \frac{r_s}{r_r} \sinh(r_s a) \sin(r_r(|x| - a)) & \text{if } a < |x| < b \\ \left\{ \cosh(r_s a) \cos(r_r(|b| - a)) + \frac{r_s}{r_r} \sinh(r_s a) \sin(r_r(|b| - a)) \right\} e^{-r_c(|x| - b)} & \text{if } b < |x| < a \end{cases} \quad (7)$$

$$\arctan\left(\frac{r_c}{r_r}\right) + \arctan\left\{\frac{r_s}{r_r} \tanh(r_s a)\right\} + m\pi = r_r(b - a) = r_r w_H \quad (8)$$



(a) TM mode



(b) TE mode

Fig. 3. Electric field distribution of hyperbolic cosine function in slot waveguide with $n_r = 2$, $n_c = 1.3$, $n_s = 1$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (a) TM mode, (b) TE mode.

식 (7)에서 A는 상수이며, r_s , r_r , r_c 는 식 (4)에서 정의된 수식과 동일하다.

식 (3)과 식 (7)에 $n_r = 2$, $n_c = 1.3$, $n_s = 1$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 를 적용 후, matlab을 이용해서 도출한 필드분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 TM모드의 필드 분포를 나타낸 그래프로 물질간 경계 면에서 전계의 불연속적인 특성이 잘 보여준다. 또한 슬롯내의 전계의 세기가 레일의 전계의 세기보다 크다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 TE모드의 필드 분포를 나타낸 그래프로 TM모드와는 다르게 물질 간의 경계에서 전계의 불연속적인 특성이 나타나지 않으며, 슬롯내 전계의 세기가 레일의 전계와 비슷함을 확인할 수 있다 [17].

지금까지 굴절률의 범위가 $n_r > n_c \geq n_s$, 슬롯 내 전계의 함수가 \cosh 인 경우에 대하여 간략하게 검토하였다. 그 외의 조건에서 슬롯 광 도파로의 필드 분포는 참고문헌 [16,17]에 자세히 유도되어 있다.

2.2 구속 계수 및 유효 모드 넓이

2.2.1 구속 계수

구속 계수는 슬롯 내에 분포된 모드의 광의 세기를 전체 광파 모드의 세기로 나눈 값이다. 구속 계수가 높으면 슬롯 내에 광의 세기가 많이 집중되어 있다는 의미이다.

$$\Gamma = \frac{\iint_{slot} s_z dx dy}{\iint_{total} s_z dx dy} \quad (9)$$

슬롯 광 도파로를 이용하는 집적광학 센서의 경우, 분석물질과 상호작용하는 슬롯의 구속 계수가 클수록 보다 많은 양의 광파와 분석물질 간에 상호결합이 많아져 높은 감지도를 기대할 수 있다.

2.2.2 유효 모드 넓이

유효 모드 넓이(Effective mode area, A_{eff})는 광의 세기가 최대값의 $1/e^2$ 이 되는 영역의 넓이다 [18]. 유효 모드 넓이가 작을수록 광파의 밀도가 높고, 이는 분석물질과 광파가 상호작용 시, 반응하는 광파의 양이 많아져 높은 감지도를 기대할 수 있다.

$$A_{eff} = \frac{(\iint |E|^2 dA)^2}{\iint |E|^4 dA} \quad (10)$$

3. 슬롯 및 릿지-슬롯 광 도파로 최적화

Fig. 1의 릿지-슬롯 광 도파로에서 w_s, w_r, h, n_s, n_r, g 는 각각 레일의 폭, 슬롯의 폭, 레일의 높이, 레일의 굴절률, 슬롯의 굴절률 그리고 릿지 두께이다. 슬롯 광 도파로는 릿지 두께가 0 즉, $g=0$ 인 경우이다. 본 연구에서는, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 파장 대역에서 슬롯 광 도파로의 제원을 구속 계수와 유효 모드 넓이의 관점에서 최적화를 진행하였다. 그 후, 최적화된 제원을 적용하여 릿지 두께가 구속 계수와 유효 모드 넓이에 미치는 영향을 전산해석 후, 릿지 두께에 대한 최적화를 quasi-TE모드 중심으로 해석하였다.

3.1 슬롯 광 도파로 제원 최적화

먼저 슬롯 광 도파로의 제원 최적화를 위해 레일의 폭 및 높이가 그리고 슬롯의 폭 변화에 따른 구속 계수와 유효 모드 넓이에 미치는 영향을 분석하기 위해서 전산해석을 수행하였다. 레일, 슬롯, 클래딩의 굴절률을 $n_r=2.00, n_s=n_c=1.3$ 로 각각 설정하였다. 첫 번째로, 레일의 폭 변화가 구속 계수와 유효 모드 넓이에 미치는 영향을 전산해석 하였다. Fig. 4는 슬롯 폭과 레일 높이를 200 nm, 400 nm로 설정하고, 레일의 폭을 0.2–0.5 μm 로 변화시켰을 때, 구속 계수와 유효 모드 넓이를 전산해석 한 결과이다.

Fig. 4에서 레일의 폭이 증가하면 구속 계수는 증가하는 경향

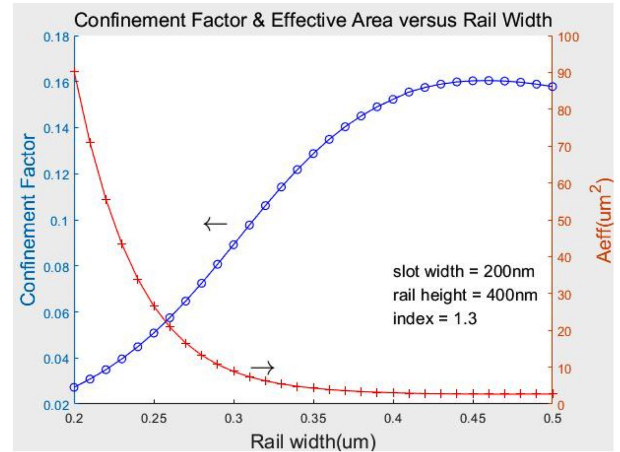


Fig. 4. Confinement factor and effective mode area versus rail width in slot region with $w_s=0.2 \mu\text{m}$, $n_s=1.3$, $n_r=2$, $h=0.4 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

을 보인다. 레일의 폭이 0.46 μm 에서 구속 계수는 최대값을 보이며, 레일의 폭이 더 커질 경우 구속 계수는 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 이때, 구속 계수의 최대값은 0.1605이다. 반면, 유효 모드 넓이는 레일의 폭이 증가하면서 처음에는 급격하게 감소하는 경향을 보이다가 0.35 μm 이상에서 유효 모드 넓이가 2.6852 μm^2 으로 수렴하고, 레일의 폭이 0.47 μm 에서 유효 모드 넓이는 최소값이 된다. 그 후에 유효 모드 넓이는 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 유효 모드 넓이의 최소값과 구속 계수의 최대값을 만족하는 레일의 폭은 서로 다르지만 매우 근사한 값을 보인다. 본 연구에서는 유효 모드 넓이 보다 구속 계수에 초점을 좀 더 맞추어서 구속 계수의 값이 최대가 되는 0.46 μm 를 최적화된 레일의 폭으로 결정하였다.

레일 폭이 증가함에 따라 구속 계수가 증가하다가 감소하는 경향을 보이는 이유를 레일 폭의 증가에 따른 기본 모드(fundamental mode)의 유효 굴절률의 변화를 이용하여 유추해 보았다. 즉 Fig. 5는 레일의 폭 증가에 따른 기본 모드의 유효 굴절률의 변화를 전산해석한 결과이며, 레일의 폭이 증가하면 유효 굴절률은 계속 증가됨을 보이고 있다. 이는 슬롯 내에 구속되어 진행하던 광파들이 레일 폭이 넓어짐에 따라 레일이 또 다른 독립적인 광도파로 역할을 수행하게 되고, 따라서 굴절률이 높은 레일을 따라 모드가 진행하게 되면서 모드의 유효굴절률이 높아지는 것으로 해석된다.

Fig. 6은 레일의 폭이 0.8 μm 일 때, 필드 분포를 나타내었다. $E_x(x, y)$ 의 이차원 필드 분포와 $E_x(0, y)$, $E_x(x, 1.4)$ 의 일차원 필드 분포이다. $E_x(x, 1.4)$ 의 필드 분포를 확인하면, 모드의 분포는 슬롯에 가장 많이 분포되어 있지만, 레일에도 슬롯과 마찬가지로 많은 양의 전계가 분포 되어있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 레일이 독자적인 광 도파로 역할을 수행한다는 것을 알 수 있다. 반면에 $E_x(0, y)$ 필드 분포는 슬롯에 많은 양의 전계가

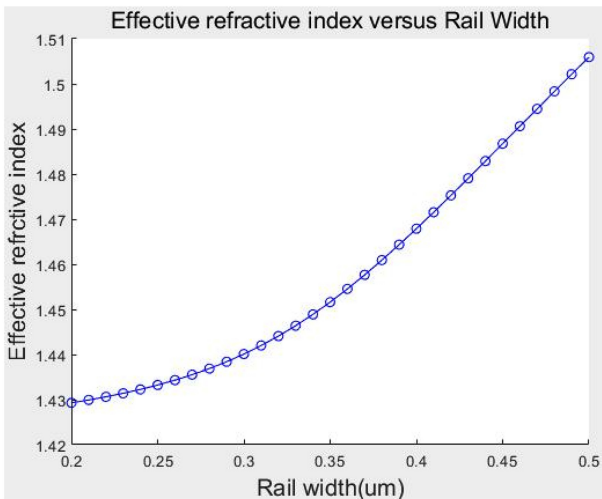


Fig. 5. Effective refractive index versus rail width with $w_s = 0.2 \mu\text{m}$, $n_s = 1.3$, $n_r = 2$, $h = 0.4 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

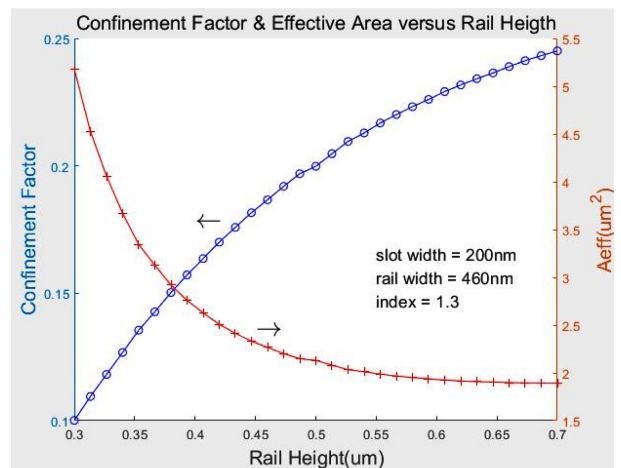


Fig. 7. Confinement factor and effective mode area versus rail height with $w_s = 0.2 \mu\text{m}$, $n_s = 1.3$, $w_r = 0.46 \mu\text{m}$.

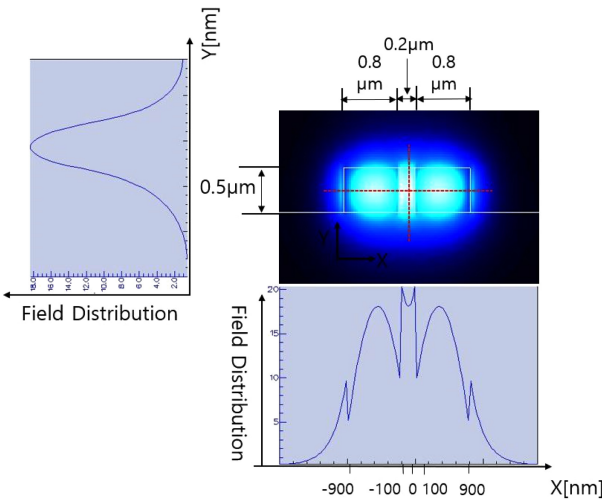


Fig. 6. Two dimensional mode profile in slot waveguide with $w_s = 0.2 \mu\text{m}$, $w_r = 0.8 \mu\text{m}$, $h = 0.4 \mu\text{m}$, $n_s = n_c = 1.3$, $n_r = 2$.

분포되어 있고, 그 외 영역에는 전계가 0으로 수렴한다. 이때 슬롯의 구속 계수는 0.104, 유효 모드 넓이는 $6.12 \mu\text{m}^2$ 이며, 이를 통하여 슬롯 내의 광파는 집중되지 못하고 넓은 영역에 분포하며, 레일은 또 다른 광 도파로 역할을 할 수 있음 알 수 있다.

제원 최적화를 위한 두 번째로, 레일 높이 변화에 따른 구속 계수와 유효 모드 넓이에 미치는 영향을 Fig. 7과 같이 전산해석 하였다. 레일 폭은 앞서 최적화한 제원인 $0.46 \mu\text{m}$ 를 적용하였다. 레일의 높이가 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 범위에서 이전의 레일의 폭 변화와는 달리 구속 계수가 증가하는 경향을 보이고, 유효 모드 넓이는 감소하는 경향을 보이며, $1.89 \mu\text{m}^2$ 으로 수렴한다. Fig. 7을 보면 레일 높이가 증가할수록 구속 계수도 증가하기 때문에 레일 높이가 높을수록 합리적으로 보일 수 있다. 그러나 구속

계수의 증가에만 초점을 맞춰 높은 레일 높이를 설정하면 집적 광학 센서의 장점 중 하나인 고 집적화에 부합하지 않기 때문에 레일의 높이는 구속 계수와 유효 모드 넓이 사이에서 적절한 타협으로 정해야 한다. 따라서 최적화된 레일 높이로 $0.5 \mu\text{m}$ 설정하였다. 해당 높이로 설정을 한 이유는 유효 모드 넓이의 값은 $2.13 \mu\text{m}^2$ 로 최소값인 $1.89 \mu\text{m}^2$ 와 비교하여도 큰 차이를 보이지 않으며, 더군다나 구속 계수도 약 0.2로 충분히 높은 값을 보이며, 또한 최적화한 레일의 폭과 비슷한 크기로 레일의 높이는 충분히 합리적이다.

다음으로 슬롯 폭 변화에 따른 구속 계수와 유효 굴절률의 변화를 전산해석 하여 Fig. 8에 나타내었다. 제원 최적화뿐만 아니라 슬롯 폭 변화가 슬롯 광 도파로 구조에 미치는 영향을 확인하기 위해 유효 굴절률을 측정하였다. 또한 레일 폭과 높이는 앞서 최적화한 값인 $0.46 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ 를 사용하였다. 슬롯 폭이 증가하면 구속 계수는 증가하다가 $0.2 \mu\text{m}$ 에서 구속 계수는 0.2024

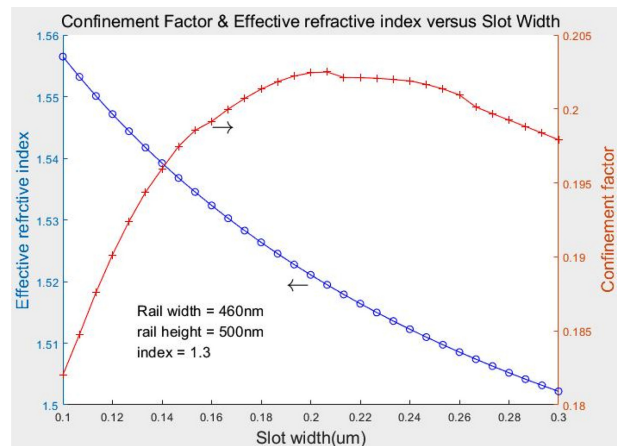


Fig. 8. Confinement factor & effective mode area versus slot width in slot region with $w_r = 0.46 \mu\text{m}$, $n_s = 1.33$, $h = 0.5 \mu\text{m}$.

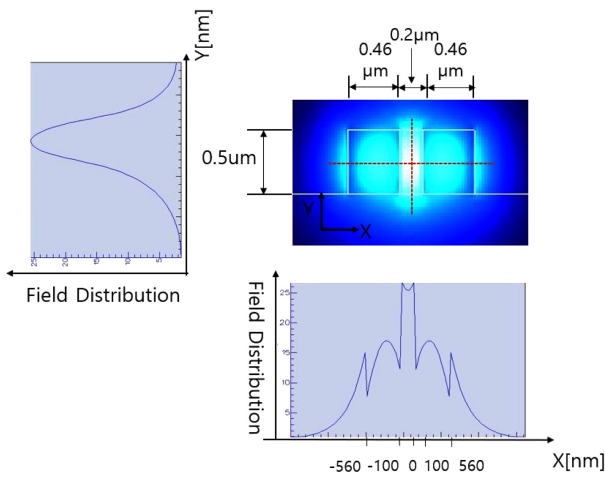


Fig. 9. Optimized two dimensional mode profile with x and y field component of quasi-TE mode in slot waveguide.

로 최대값이 되고 그 이후로, 구속 계수는 감소한다. 따라서 슬롯 폭은 0.2 μm로 설정하였다. 한편 유효 굴절률은 슬롯 폭이 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 이는 슬롯 내에 구속 되어 진행하던 광파들이 슬롯 내에 넓게 분포하게 되고, 따라서 굴절률이 낮은 슬롯을 따라 모드가 진행하게 되면서 유효굴절률이 낮아지게 되는 것으로 해석된다.

지금까지 레일 폭, 높이 그리고 슬롯 폭에 대하여 0.46 μm, 0.5 μm, 0.2 μm제원으로 각각 최적화를 했다. 최적화된 슬롯 광도파로의 $E_x(x, y)$ 의 이차원 필드 분포와 $E_x(x, 1.4)$, $E_x(0, y)$ 의 일차원 모드 분포는 Fig. 9와 같다. $E_x(0, y)$ 는 슬롯 내에 많은 전계가 분포되며, 그 외 부분에는 0으로 수렴한다. 또한 $E_x(x, 1.4)$ 의 경우, 전계는 슬롯 내에 가장 많이 분포한다. 최적화된 제원에서 구속 계수는 0.2024, 유효 모드 넓이는 2.047 μm²이다.

3.2 릿지-슬롯 광 도파로 제원 최적화

Fig. 1과 같은 릿지-슬롯 광 도파로의 제원 최적화를 위하여 릿지 두께를 제외한 제원은 이전에 슬롯 광 도파로에서 최적화한 제원을 사용하였다. 릿지-슬롯 광 도파로에서 $E_x(x)$ 는 슬롯 광 도파로와 동일하지만, $E_y(x)$ 는 릿지 두께와 슬롯의 굴절률에 따라 슬롯 내의 구속 계수 값이 달라진다. 이번 해석에서는 슬롯의 굴절률이 1, 1.1, 1.2인 세 경우에 릿지 두께 변화가 슬롯 내 구속 계수와 유효 모드 넓이에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 10(a)는 슬롯의 굴절률이 1인 경우로 릿지 두께에 따라 구속 계수는 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 유효 모드 넓이는 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 10(b)는 슬롯의 굴절률이 1.1인 경우로 릿지 두께가 증가하면 구속 계수는 증가하다가 릿지 두께가 0.04 μm에서 구속 계수는 0.1393로 최대가 되며, 이후로는 점차 감소한다. 유효 모드 넓이는 구속 계수와 달리 릿지 두께가 증가하면 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 반면

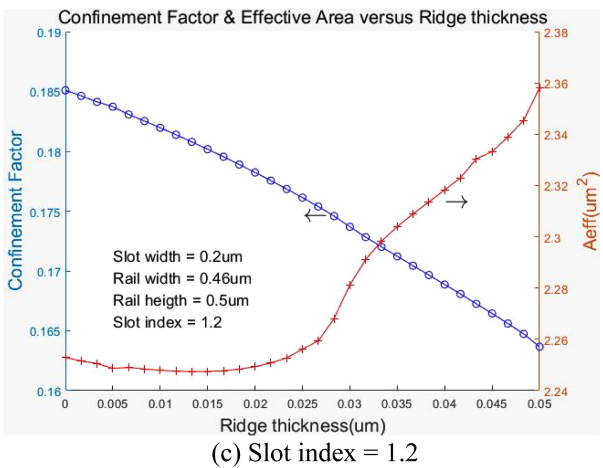
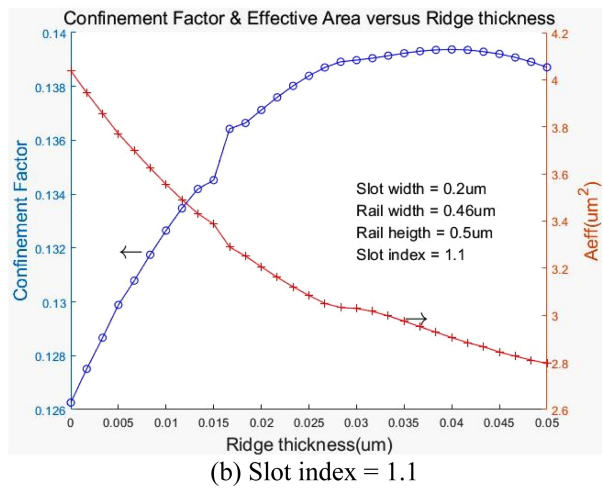
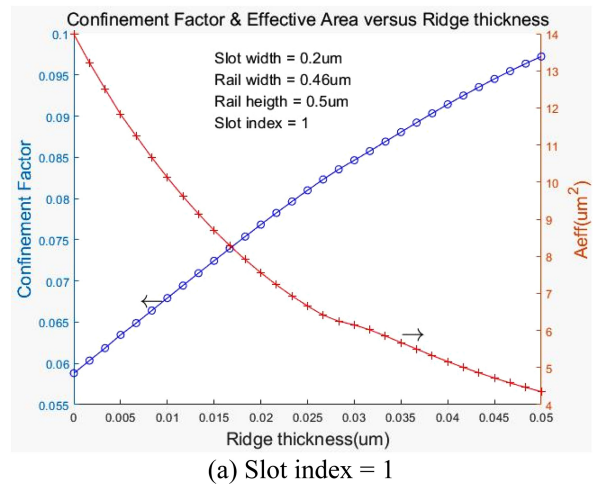


Fig. 10. Confinement factor & effective mode area versus rib width at slot region in ridge-slot waveguide for (a) slot index = 1, (b) slot index = 1.1 (c) slot index =1.2.

에 슬롯의 굴절률이 1.2인 Fig. 10(c)에서는 릿지 두께가 증가하면 구속 계수의 값은 감소하는 경향을 보이며, 유효 모드 넓이는 증가하는 경향을 보인다. Fig. 10에서 구속 계수는 슬롯 굴절률에 따라 다른 경향을 보였다. 따라서 릿지 두께의 최적화를

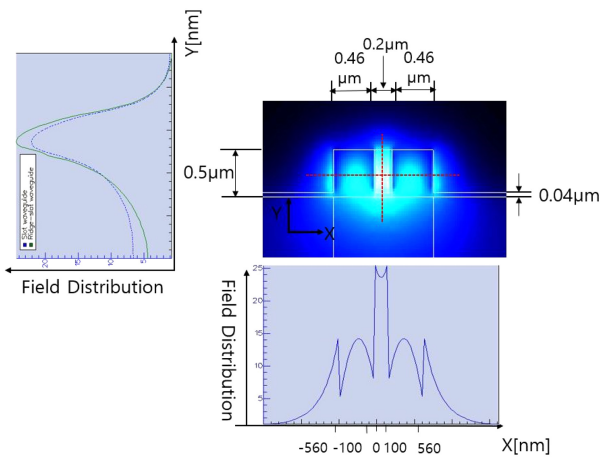


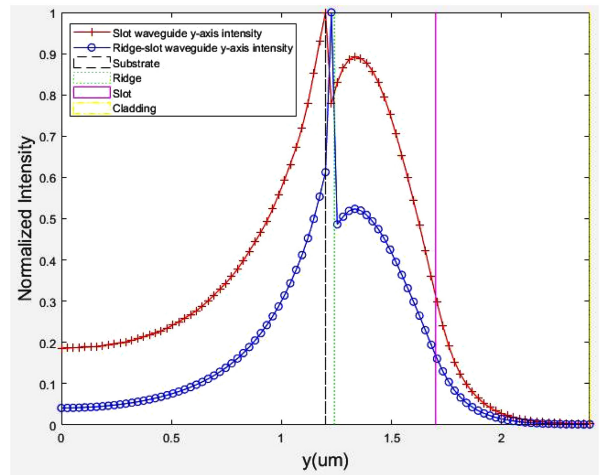
Fig. 11. Optimized two dimensional mode profile with x and y field component of quasi-TE mode in ridge-slot waveguide.

위한 슬롯 굴절률을 정해야 한다. 슬롯의 굴절률이 1.2인 경우, 릿지 두께가 증가 시, 구속 계수는 계속 감소하여 제원 최적화 하기에 부적합하다. 또한 슬롯의 굴절률이 1인 경우에는 릿지 두께가 증가 시, 구속 계수가 증가하지만 실질적으로 센싱 물질의 굴절률은 1보다 크므로, 해당 굴절률에서 제원을 최적화 하는 것은 무의미하다. 반면에 굴절률이 1.1인 경우에는 특정 릿지 두께에서 구속 계수는 최대값을 가지고 그 이후에는 감소하기 때문에 제원을 최적화 하는데 적절하다. 따라서 릿지 두께의 제원 최적화는 굴절률이 1.1인 경우에 대하여 진행하였고, 최적화된 제원은 0.04 μm로 설정하였다.

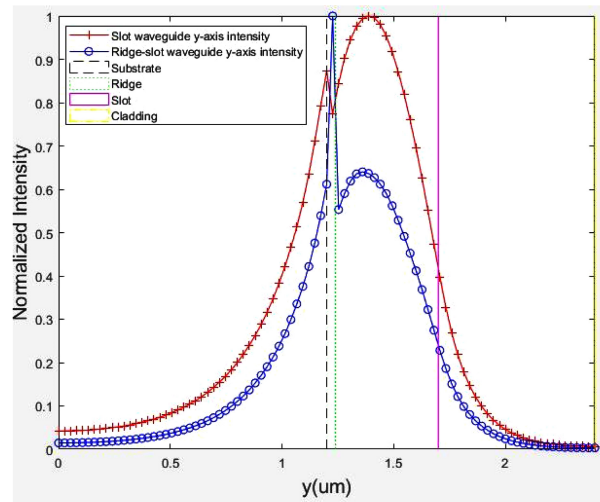
Fig. 11은 최적화된 릿지 두께, $g = 0.04 \mu\text{m}$ 로 릿지-슬롯 광 도파로의 필드 분포, $E_x(x,y)$, $E_x(0,y)$ 그리고 $E_x(x,1.4)$ 를 보여주고 있다.

슬롯의 굴절률은 1.1을 적용하였다. $E_x(x, 1.4)$ 를 보면 기존의 슬롯 광 도파로와 마찬가지로 슬롯 내에 많은 양의 전계가 분포한다. 반면 $E_x(0,y)$ 는 해당 굴절률에 따라 슬롯 광 도파로와 릿지-슬롯 광 도파로의 필드 분포를 비교하였다. 녹색의 그래프는 릿지-슬롯 광 도파로의 전계를 나타내며, 파란색 점선은 슬롯 광 도파로의 전계를 나타낸다. 슬롯 내에 전계는 릿지-슬롯 광 도파로가 기존의 슬롯 도파로보다 더 많은 양의 전계가 분포하며, SiO₂ 기판으로 방사되는 전계는 릿지-슬롯 광 도파로가 슬롯 도파로 보다 손실이 적다. 최적화된 제원에서 릿지-슬롯 광 도파로의 구속 계수는 0.1394, 유효 모드 넓이는 2.90 μm²이다.

이번에는 굴절률에 따른 슬롯과 릿지-슬롯 광 도파로에 대해서 y축 광파 세기를 비교하였다. Fig. 12(a), (b)는 슬롯의 굴절률이 각각 1.1, 1.2인 경우에 y축 방향의 광파의 세기를 정규화한 그래프이다. '+' 그래프는 슬롯 광 도파로, 원형 그래프는 릿지-슬롯 광 도파로를 각각 나타낸다. y축이 0-1.2 μm 범위는 SiO₂기판, 1.2-1.24 μm는 릿지 영역, 1.24-1.7 μm는 슬롯 영역이며, 그 외 부분은 클래딩이다. Fig. 12(a)의 슬롯 광 도파로는



(a) Slot index = 1.1



(b) Slot index = 1.2

Fig. 12. Normalized intensity in slot waveguide and ridge-slot waveguide for (a) slot index = 1.1, (b) slot index = 1.2.

SiO₂로 방사되는 광파가 더 많으며, 릿지-슬롯 광 도파로는 비록 릿지에 많은 양의 광파가 존재하지만 방사되는 광파는 적다. 그로 인해 릿지-슬롯 광 도파로가 더 높은 구속 계수를 보이며 해당 굴절률에서 슬롯 광 도파로와 릿지-슬롯 광 도파로의 구속 계수는 각각 0.12, 0.149이다.

Fig. 12(b)를 보면, SiO₂로 방사되는 광파는 슬롯 광 도파로와 릿지-슬롯 광 도파로 모두 매우 작은 값이다. 릿지-슬롯 광 도파로의 광파의 분포는 여전히 슬롯 보다 릿지에 많이 분포하고 있다. 반면에 슬롯 광 도파로의 경우, 굴절률이 1.1일때 기판과 슬롯의 경계에서 가장 많은 광파가 분포한 경우와 달리 굴절률이 1.2에서는 슬롯 내에 전계가 가장 많이 분포되어 있다. 해당 굴절률에서 구속 계수는 슬롯 광 도파로가 0.185, 릿지-슬롯 광 도파로는 0.169이며, 슬롯 광 도파로에서 높은 구속 계수를 보이는 이유는 슬롯 내 전계가 많이 분포한 경우에 릿지가 위치하면, 릿지와 슬롯의 경계에서 굴절률 차이로 인하여 릿지에 많

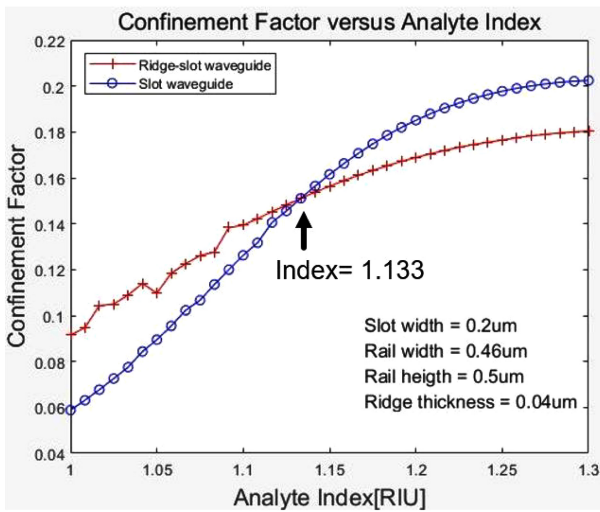


Fig. 13. Confinement factor versus Analyte index in slot waveguide and ridge-slot waveguide with $w_r = 0.46 \mu\text{m}$, $w_s = 0.2 \mu\text{m}$, $h = 0.5 \mu\text{m}$.

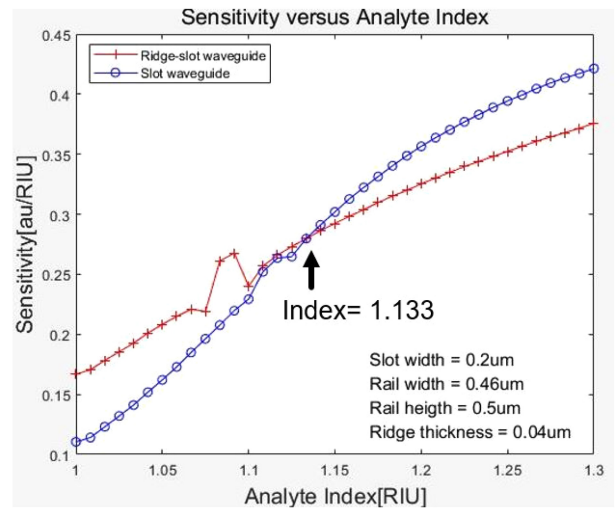


Fig. 14. Sensitivity versus Analyte index in slot waveguide and ridge-slot waveguide with $w_r = 0.46 \mu\text{m}$, $w_s = 0.2 \mu\text{m}$, $h = 0.5 \mu\text{m}$.

은 양의 전계가 분포한다. 따라서 슬롯의 구속 계수는 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 13은 굴절률 변화에 따른 두 구조의 구속 계수의 변화를 나타내었으며, 슬롯의 굴절률이 1-1.133일 경우, 릿지-슬롯 광 도파로의 구속 계수는 슬롯 광 도파로보다 높고, 1.133에서는 두 구속 계수의 값이 동일하다. 그러나 분석 물질의 굴절률이 1.133보다 커지게 되면 슬롯 광 도파로의 구속 계수가 릿지-슬롯 광 도파로보다 더 높아지는 것을 알 수 있다.

4. 감지도

감지도는 집적광학 센서에서 성능을 판단하는데 매우 중요하다. 측정방법은 센서의 종류에 따라 다르며, homogeneous 센싱에 해당되는 감지도 측정방법을 본 논문에서 적용하였다. 해당 센서의 감지도는 유효 굴절률의 변화량을 분석물질 굴절률의 변화량으로 나눈 값으로 아래 식 (12)로 정의된다.

$$S_h = \frac{dn_{eff}}{dn_s} \quad (12)$$

슬롯의 굴절률에 따라 슬롯 광 도파로와 릿지-슬롯 광 도파로의 유용성을 확인하기 위하여 슬롯의 굴절률이 1-1.3의 범위에서 감지도에 대한 전산 해석한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 분석물질의 굴절률이 1-1.133범위의 물질에서는 릿지-슬롯 광 도파로의 감지도가 슬롯 광 도파로의 감지도보다 높은 감지도를 보였다. 반면에 그 이외의 경우에는 슬롯 광 도파로가 릿지-슬롯 광 도파로의 감지도보다 높은 값을 보인다. 따라서 최적화한 구조에서 릿지-슬롯 광 도파로가 슬롯 광 도파로보다 분석 물질

의 굴절률이 1-1.133 범위 내에 존재하는 가스(CO, CO₂, NO, N₂O, H₂S등)를 감지하는데 있어서 보다 유용하게 활용할 수 있다.

5. 결 론

FIMMWAVE를 활용해서 구속 계수와 유효 모드 넓이를 기반으로 Si₃N₄/SiO₂구조의 슬롯 및 릿지-슬롯 광 도파로에 대한 제원 최적화를 수행하였으며, 제원 최적화의 타당성은 분석물질의 굴절률에 따른 감지도로 확인하였다. 슬롯 광 도파로의 제원 즉 슬롯 폭은 0.2 μm, 레일 폭과 높이는 0.46 μm, 0.5 μm로 각각 최적화하였다. 파장이 1.55 μm, 슬롯의 굴절률이 1.3인 경우에 최적화된 제원에서 구속 계수와 유효 모드 넓이는 0.2024, 2.04 μm²로 각각 도출되었다. 한편 슬롯의 굴절률 1.1에서 릿지-슬롯 광 도파로의 릿지 두께는 0.04 μm로 최적화 하였으며, 구속 계수와 유효 모드 넓이는 각각 0.1393, 2.90 μm²로 계산되었다. 분석물질의 굴절률이 1-1.3범위에서 두 구조의 구속 계수와 감지도를 비교했을 경우, 굴절률이 1.133이하의 영역에서는 구속 계수와 감지도는 릿지-슬롯 광 도파로가 더 높았으며, 그 외의 영역에서는 슬롯 광 도파로가 더 높았다. 따라서 집적광학 바이오케미컬 센서 구현에 있어서 분석물질의 굴절률 크기에 따라서 두 구조에 대한 선택 기준을 제시할 수 있었다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] P. Lambeck, "Integrated optical sensors for the chemical domain", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 8, pp. 93-116, 2006.
- [2] P. Damborsky, J. Svitel, and J. Katrlík, "Optical biosensor", *Essays Biochem.*, Vol. 60, No. 1, pp. 91-100, 2016.
- [3] J. Hodgkinson and R. P. Tatam, "Optical gas sensing : a review", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-59, 2013.
- [4] A. P. Timbo, P. V. F. Pinto, H. A. Pinho, L. P. de Moura, J. B. Chretien, F. W. Viana, and G. de Freitas Guimarães, "pH optical sensor based on thin films of sol-gel with bromocresol purple", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 223, No. C, pp. 406-410, 2016.
- [5] C. A. Barrios, K. B. Gylfason, B. Sánchez, A. Griol, H. Sohlström, M. Holgado, and R. Casquel, "Slot-waveguide biochemical sensor", *Opt. Lett.*, Vol. 32, No. 21, pp. 3080-3082, 2007.
- [6] T. Fujisawa and M. Koshiba, "Polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides," *Opt. Lett.*, Vol. 31, No. 1, pp. 56-58, 2006.
- [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] X. Wang, S. Grist, J. Flueckiger, N. A. G. Jaeger, and L. Chrostowski, "Silicon photonic slot waveguide bragg gratings and resonators", *Opt. Express*, Vol. 21, pp. 19029-19039, 2013.
- [9] A. Kargar and C. Y. Chao, "Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensor", *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image. Sci. Vis.*, Vol. 28, No. 4, pp. 596-603, 2011.
- [10] T. Dar, J. Homola, B. M. A. Rahman, and M. Rajarajan, "Label-free slot-waveguide biosensor for the detection of DNA hybridization", *Appl. Opt.*, Vol. 51, No. 34, pp. 8195-8202, 2012.
- [11] 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.
- [12] Q. Xu, V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson, "Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material," *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 14, pp. 1626-1628, 2004.
- [13] Y. Fang, C. Bao, Z. Wang, Y. Liu, L. Zhang, H. Huang, Y. Ren, Z. Pan, and Y. Yue, "Polarization beam splitter based on Si₃N₄/SiO₂ horizontal slot waveguides for On-chip high-power applications", *Sensors*, Vol. 20, No. 10, pp. 1-13, 2020.
- [14] 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.
- [15] H. Zengzhi, Y. Zhang, C. Zeng, D. Li, M. S. Nisar, J. Yu, and J. Xia, "High confinement Factor ridge slot waveguide for optical sensing", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 27, No. 22, pp. 2395-2398, 2015.
- [16] M. Kong, Y. Liu, Y. Jiang, C. Liu, and Y. Wang, "Transverse magnetic modes in planar slot waveguides", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 32, No. 10, pp. 2052-2060, 2015.
- [17] M. Kong, Y. Liu, and Y. Jiang, "Transverse electric modes in planar slot waveguides", *J. Mod. Opt.*, Vol. 65, No. 1, pp. 111-118, 2017.
- [18] https://www.rp-photonics.com/effective_mode_area (retrived on Mar. 6, 2006)