

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.6.157>  
JIIBC 2023-6-23

## 격자 구조형 스트립 방향성 결합기에 기초한 광 바이오-센서의 고 민감도 분석

### High Sensitivity Analysis of Optical Bio-Sensor based on Grating-Assisted Strip Directional Coupler

호광춘\*

Kwang-Chun Ho\*

**요약** 격자 구조형 스트립 방향성 결합기를 기반으로 한 고 민감도 굴절률 bio-sensor를 제안하였다. 그 센서는 도파관 중 하나의 상단 층에 격자 구조가 구성된, 두 개의 비대칭 스트립 도파관을 사용하여 설계하였다. 위상정합 조건을 만족하는 공진 파장에서 한 도파관으로부터 다른 도파관으로 최대 광 결합이 발생하며, 도파관 표면 영역에 놓인 분석물질의 굴절률 변화에 따른 위상정합 조건의 변화가 민감도를 측정하는 척도로 사용될 수 있음을 보여주었다. 제안된 센서는 높은 굴절률 민감도를 가진 on-chip 장치로 설계될 수 있으며, 낮은 전파 손실을 제공하여 민감도가 향상되도록 센서를 구성되었다. 더욱이, 도파관 파라미터에 따른 민감도 변화가 센서의 설계 최적화를 위하여 분석되었다.

**Abstract** A highly sensitive refractive index bio-sensor based on grating-assisted strip directional coupler (GASDC) is proposed. The sensor is designed using two asymmetric strip waveguides with a top-loaded grating structure in one of the waveguides. Maximum light couples from one waveguide to the other at the resonance wavelength satisfying phase-matching condition (PMC), and it shows that the change in phase-matching condition with the change in refractive index of the analyte medium in the cover region can be used as a measure of the sensitivity. The proposed sensor will be an on-chip device with a high refractive index sensitivity, and the sensor configuration offers a low propagation loss, thereby enhancing the sensitivity. Furthermore, variation of the sensitivity with the waveguide parameters of sensor is evaluated to optimize the design.

**Key Words** : Optical Bio-Sensor, Grating-Assisted Directional Coupler, Modal Transmission-Line Theory

## 1. 서론

실리콘 포토닉스에 기반한 장치를 굴절률 bio-sensor로 사용하는 연구가 빠른 응답 시간, 소형화, on-chip 장치와의 높은 호환성, 높은 감도 및 안정성 때문에 상당한

관심을 끌어왔다. 이러한 실리콘 포토닉 센서 중 일부는 방향성 커플러, 슬롯 도파관 사이의 결합, 그리고 마이크로 링 공진기를 사용하여 설계하였다<sup>[1-3]</sup>. 또한, 이러한 굴절률 센서는 생체 감지 및 화학 감지를 위한 소저로 사용되어 왔다<sup>[4]</sup>.

\*중신회원, 한성대학교 전자트랙  
접수일자 2023년 10월 9일, 수정완료 2023년 11월 9일  
게재확정일자 2023년 12월 8일

Received: 9 October, 2023 / Revised: 9 November, 2023 /  
Accepted: 8 December, 2023

\*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr  
Electronics Track, Hansung University, Korea

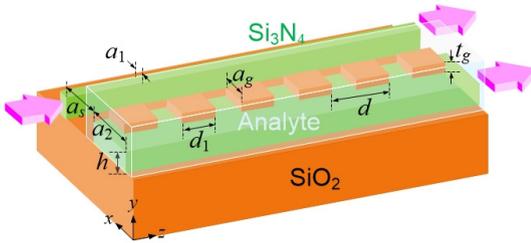


그림 1. 격자 구조형 스트립 방향성 결합기로 구성된 광 bio-sensor의 구성도.

Fig. 1. Schematic configuration of optical bio-sensor based on grating-assisted strip directional coupler (GASDC).

일반적으로, 감지에 사용되는 광학적 방법에는 라벨 기반 감지와 라벨 없는 감지와 같은 두 가지 방법이 있다. 라벨 기반 감지는 감지 전에 샘플 준비가 필요한 반면, 라벨 없는 감지의 경우에는 샘플 준비가 필요하지 않다. 라벨 없는 유도파 광학 센서는 광도파로의 피복에 존재하는 표면장 (Evanescent Field)과의 상호작용을 기반으로 한다. 감지 물질이 도파관의 클래딩에 영향을 받는 경우 (또는, 클래딩을 형성하는 경우), 도파관의 전파 특성은 감지 영역의 섭동에 직접적인 영향을 받는다. 이와 같은 무 라벨 방법을 사용하는 센서 중에는 굴절률 센서, 흡수 센서 그리고 온도 센서가 있으며, 감도를 높이기 위하여 실리콘 포토닉스의 슬롯, 스트립 그리고 리브 도파관과 같은 다양한 도파관 구조의 설계를 사용한다<sup>15, 6)</sup>. 현재까지도 슬롯 도파관 구조는 실리콘 포토닉스 기반 굴절률 센서에 광범위하게 사용되고 있다.

이에 같은 맥락으로, 격자 구조형 스트립 방향성 결합기 (GASDC)는 마이크로 링 공진기, 광 파장 필터 등과 같은 다양한 응용 분야에서 응용되어 왔으며, 격자 구조형 슬롯-스트립 도파관 구조는 센서 응용 분야에서 폭 넓게 연구되어왔다. 이들 센서의 감도는 위상정합 조건 (Phase-Matching Condition: PMC)에서 발생하는 전파 손실에 의해 영향을 받으며, 이는 결과적으로 센서의 감도를 감소시킨다. 이러한 손실은 일반적으로 격자 구조의 누출에 기인하는 것으로, 슬롯 도파관의 손실이 스트립 도파관의 것보다 높기 때문에, 스트립 도파관 기반 센서의 감도가 더 높게 발생한다.

본 논문에서는 격자 구조형 스트립 방향성 결합기 (GASDC)를 기반으로 한 고감도 굴절률 bio-sensor를 제안하였다. GASDC의 위상정합 조건을 해석하여 센서의 굴절률 민감도를 연구하였고, 제안된 설계가 높은 굴절률 민감도를 제공한다는 것을 발견하였다. 또한, 스트

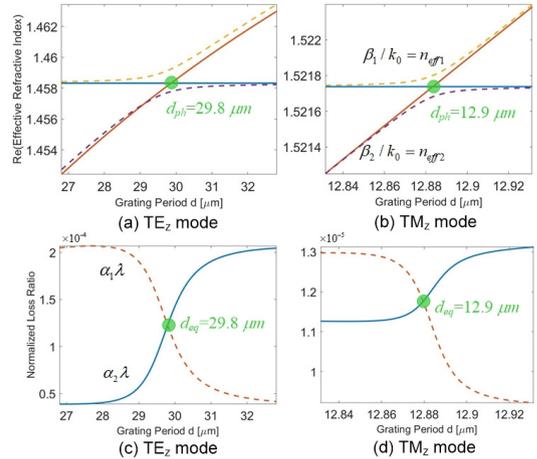


그림 2. GASDC의 누설파 (점선)와 표면파 (실선)에 대한 분산 곡선: (a) & (b), 그리고 정확한 모드들의 정규화된 손실비율. (c) & (d).

Fig. 2. Dispersion curves of rigorous leaky-wave (dashed-lines) and surface-wave (solid-lines) of GASDC: (a) & (b), and the normalized loss ratio of two rigorous modes: (c) & (d).

립 도파관의 전파 손실을 연구하여 낮은 전파 손실을 위한 최적화 조건을 제시하였다. 이를 위하여, II장에서는 제안된 센서의 구성과 고유치 문제에 기초한 모드 전송선로 이론 (EP-MTLT)<sup>7, 8)</sup>을 적용하여 그 작동 원리와 전파특성을 제시하였다. III장에서는 시뮬레이션 결과와 GASDC의 고 민감도 특성을 결합효율을 사용하여 설명하였다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론적인 내용을 요약하였다.

## II. GASDC의 전파특성

그림 1에서 보듯이, 제안된 GASDC 형태의 bio-sensor는 SiO<sub>2</sub> 기판 위에  $a_s$ 의 간격으로 분리되어 나란히 배치된, 폭의 크기가 다른 2개의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 스트립 도파관으로 구성하였다. 또한, GASDC의 도파관 중 하나의 상단에는 SiO<sub>2</sub>가 덮혀있는 굴절률 격자를 형성하였다. 격자에 의해 발생하는 위상 변이는 두 비동기 도파관 사이에 위상정합 조건을 제공하며, 이는 격자 주기를 분석하여 선택할 수 있다. 일반적으로, 평면형으로 구성된 두 도파관은 두 중첩모드의 유효 굴절률이 서로 다르므로 (즉, 위상이 비동기적으로 발생하기 때문에), 두 도파관 사이에 표면장 결합이 거의 일어나지 않는다. 따라서, 이 두 모드 간의 PMC인 위상 일치치를 달성하기 위하여 격자 구조가 사

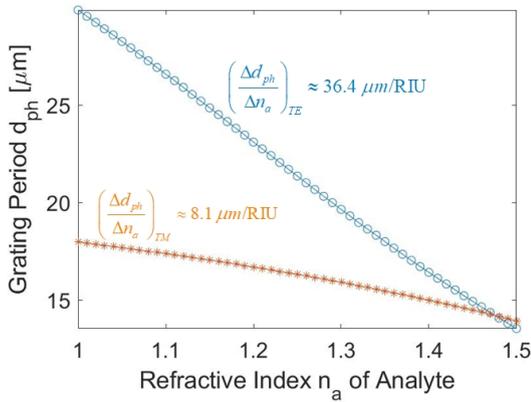


그림 3. 분석물질의 굴절률에 따른 격자주기의 위상정합조건에 대한 변화.  
 Fig. 3. (Color Online) Variation in phase-matching condition of grating period along with refractive index of analyte.

용되어야 한다. 공진 파장이라고 하는 파장  $\lambda_r$ 에서 격자주기  $d_{ph}$ 가 선택되면, 한 도파관에서 다른 도파관으로 최대 광 전력이 전달된다. 이 PMC는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$d_{ph} = \frac{\lambda_r}{n_{eff1} - n_{eff2}} \quad (1)$$

여기서  $n_{eff1}$ 과  $n_{eff2}$ 는 GASDC 구조의 두 정상 모드의 유효 굴절률이다. 식 (1)은 파장과 격자주기에 의존하여, GASDC의 그 전파특성이 발생함을 보여준다.

GASDC는 TE (Transverse Electric)과 TM (Transverse Magnetic) 편광 모드를 모두 지원하며, 본 논문에서는 센서 분석에서 두 편광을 모두 고려하였다. 이를 위하여, 센서 구성에 사용된 도파관 파라미터는 그림 1에서 보듯이, 굴절률 1.445인  $\text{SiO}_2$  기판 위에, 두께  $h = 0.4 \mu\text{m}$ 인  $\text{Si}_3\text{N}_4$  필름과 두께  $t_g = 0.2 \mu\text{m}$ 인  $\text{SiO}_2$  장방형 격자로 광 도파관을 설계하였다. 이때 사용한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  필름의 굴절률은 다음과 같은 Sellmeier 분산 방정식을 사용하였다.

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{3.0249\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1353406^2} + \frac{40314\lambda^2}{\lambda^2 - 1239.842^2} \quad (2)$$

추가적으로, 구성된 각 도파관의 폭은  $a_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 0.9 \mu\text{m}$ 으로 선정하였고, 격자구조의 폭과 중횡비는 각각  $a_g = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $d_1/d = 0.5$ 로 구성하였다. 그때, 두 도파관 사이의 간격은  $TE_z$  모드는  $a_s = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $TM_z$  모드는  $a_s = 0.1 \mu\text{m}$ 로 최대 결합력을 얻을 수 있

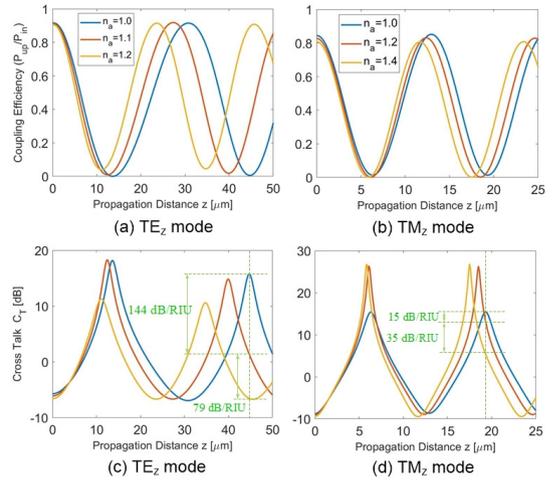


그림 4. GASDC의 결합 길이에 따른 결합효율의 변화: (a) & (b), 그리고 교차비율의 변화. (c) & (d).  
 Fig. 4. Variation of the coupling efficiency along propagation distance of GASDC: (a) & (b), and variation of the cross talk: (c) & (d).

도록 수치 해석하여 결정하였으며, 동작 파장은  $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 인 광 신호를 사용하였다.

이와 같이 설계된 GASDC 구조에 EP-MTLT의 횡방향 공진조건 (Transverse Resonance Condition)<sup>[8]</sup>

$$|\mathbf{Y}_{up}(k_{zn}) + \mathbf{Y}_{dn}(k_{zn})| = 0 \quad (3)$$

을 적용하면 광 도파관에서 전파하는 정확한 모드들의 고유 값인 전파상수  $k_{zn}$ 을 결정할 수 있다. 그 값은 다음과 같이 정의된다.

$$k_{zn} = k_{z0} + \frac{2n\pi}{d} = \beta + i\alpha + \frac{2n\pi}{d} \quad (4)$$

여기서,  $\beta$ 는 모드들의 위상상수 (Phase Constant)를 나타내며  $\alpha$ 는 누설 파의 누설특성을 나타내는 감쇄상수 (Attenuation Constant)이다.

식 (3)을 적용하여 수치 해석한  $k_{zn}$  값에 의존하는 정확한  $TE_z$ ,  $TM_z$  모드들의 그 분산특성을 분석하여, 최적의 센서를 설계하기 위한 PMC를 만족하는 격자주기를 평가하였다. 그림 2의 실선에서 보듯이, 격자 층이 평균 굴절률을 갖는 균일 층으로 대체된 경우 GASDC의 결합영역에서는 두 개의 표면파 모드 (Surface Wave)가 발생하며, 이 모드들은 위상정합 조건을 나타내는 임의의 한 점  $d_{ph}$ 에서 서로 일치하는 특성을 나타낸다. 본 논문에서 제안한 구조에서  $n_a = 1.0$ 인 경우, 위상정합 조건은  $TE_z$  모드의 경우 격자주기가  $d_{ph} = 29.8 \mu\text{m}$ 에서

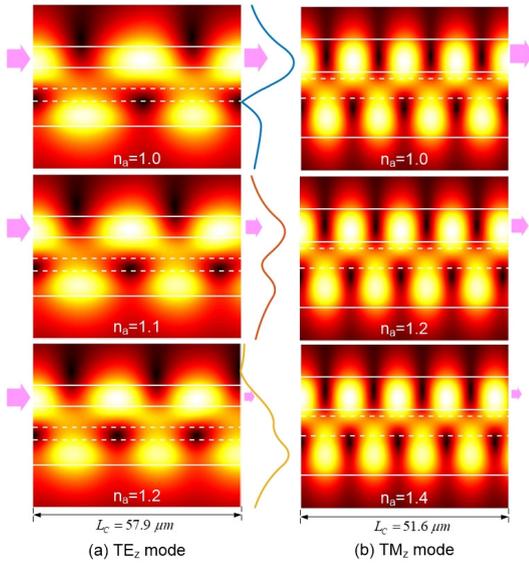


그림 5. GASDC에서  $\Delta n_a$ 의 효과를 보여주는 필드 분포도: (a)  $TE_z$  모드, (b)  $TM_z$  모드.

Fig. 5. (Color Online) Field distributions visualizing the effect of  $\Delta n_a$  in GASDC: (a)  $TE_z$  mode, and (b)  $TM_z$  mode.

발생하였으며,  $TM_z$  모드의 경우는  $d_{ph} = 12.9 \mu\text{m}$ 에서 이와 같은 현상이 나타났다. 이 조건은 광소자 특성해석에서 널리 사용되고 있는 결합모드 이론에서 광 방향성 결합기의 최적 전력전송을 위한 조건으로 지금까지 널리 사용되어 왔다.

이와 병행하여, 주기적인 격자 층으로 구성된 GASDC의 경우, 근사적인 두 개의 표면파 모드들은 전파상수  $\beta_1, \beta_2$ 인 정확한 누설파 모드 (Leaky Wave)들로 변환된다. 그림 2의 점선에서 보듯이, 두 모드들은 격자주기  $d_{ph}$ 에서 정확한 중첩모드들 사이의 간격이 최소가 되었으며 (즉, 가장 유사한 전파특성을 나타냈으며), 두 누설파 모드들의 삽입손실  $\alpha_1, \alpha_2$  또한 PMC를 만족하는 격자주기에서 일치하였다. 결론적으로, 본 논문에서 설계한 GASDC 구조는 격자주기  $d_{ph}$ 에서 최적의 민감도를 발휘할 수 있는 센서로 동작이 가능함을 보여주는 소자라 할 수 있다.

다음으로, bio-sensor로 설계된 GASDC의 중요한 전파특성인 PMC의 변화에 따른 분석물질의 위상정합 민감도 ( $\Delta d_{ph}/\Delta n_a$ )를 분석하였다. 두 도파관 사이의 간격을  $a_s = 0.5 \mu\text{m}$ 로 고정하고 수치 해석한 그림 3에서 보듯이, 분석물질의 굴절률  $n_a$ 가 변함에 따라서,

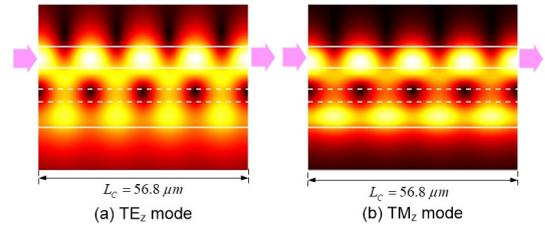


그림 6. GASDC에서  $n_a = 1.47$ 인 경우의 필드 분포도: (a)  $TE_z$  모드, (b)  $TM_z$  모드.

Fig. 6. (Color Online) Field distributions in the case of  $n_a = 1.47$  in GASDC: (a)  $TE_z$  mode, and (b)  $TM_z$  mode.

$TE_z$  모드는 근사적으로  $36.4 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 의 민감도를 나타내었으며,  $TM_z$  모드는  $TE_z$  보다 매우 작은 약  $8.1 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 로 평가되었다. 비록,  $TM_z$  모드의 위상정합 민감도가  $TE_z$  모드의 민감도 보다 작지만, 센서의 고 민감도를 분석하기 위하여 제시한 GASDC의 결합효율 분석에 미치는 영향은 거의 없다 할 수 있다. 왜냐하면, GASDC 내에서 전파하는  $TM_z$  모드의 결합길이를  $TE_z$  모드의 결합길이와 유사하게 확장하면, 두 모드에 기인한 센서의 고 민감도를 비슷하게 얻을 수 있기 때문이다. 더욱이, 분석물질의 굴절률  $n_a = 1.47$ 에서 두 모드의 PMC가  $d_{ph} = 14.2 \mu\text{m}$ 로 서로 같은 값을 나타내었다. 즉, 이 PMC 값에서 두 모드는 동등한 결합효율의 변화를 발생시킨다. 이 이에 대한 자세한 수치해석 결과를 3장에서 언급하였다.

### III. GASDC의 고 민감도특성

2장에서 언급한 전파특성을 갖는 GASDC로 구성된 bio-sensor의 최적 설계사양을 참고하여 그 감지성능을 자세하게 분석하였다. 기존의 bio-sensor 성능을 평가하기 위하여 널리 사용되어 왔던 파장 감도 (Wavelength Sensitivity)는 단일 모드를 전송하는 전송구조에서는 매우 유용한 매개변수이나, GASDC와 같은 격자구조의 누설파 특성에 의존하는 소자에서는 그 효율성이 거의 없다고 할 수 있다. 이를 위하여, 결합기의 설계 시에 그 특성을 분석하기 위하여 널리 사용하는 교차비율  $C_T$ 를 적용하여, 결합기들의 감지 성능을 수치 해석하였다. 정의된 교차비율은 다음과 같다.

$$C_T = 10 \log \left( \frac{P_c}{P_b} \right) \quad (5)$$

여기서,  $P_c$ 와  $P_b$ 는 각각 cross와 bar 도파관을 통하여 방출되는 광 신호들의 출력전력을 나타낸다. 그림 1에서 보듯이, cross는 상향 슬롯 도파관에서 입력된 광 신호가 하향 격자 구조형 도파관으로 출력되는 것을 의미하며, bar는 상향 슬롯 도파관에서 입력되고 동일한 도파관으로 출력되는 것을 의미한다. 이때, analyte의 굴절률  $n_a$ 에 의존하는 교차비율 감도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_C = \frac{dC_T}{dn_a} \quad (6)$$

먼저, 동작 파장  $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 GASDC에 기초한 bio-sensor의 결합효율과 교차비율을 수치 해석하였다. 그림 4(a)와 (b)에서 보듯이,  $TE_z$  모드의 경우, analyte의 굴절률이  $n_a = 1.0$ 에서 1.2로 변함에 따라 결합길이  $L_c = 45 \mu\text{m}$ 에서 하향 격자 구조형 도파관으로 출력되는 광 신호의 크기가 서로 많은 차이가 발생함을 보였다. 이에 반하여,  $TM_z$  모드의 경우, 굴절률을  $n_a = 1.0$ 에서 1.4로  $TE_z$  모드와 비교하여 크게 변화시켜도 그 출력신호는 결합길이  $L_c = 19.5 \mu\text{m}$ 에서 약간의 크기 차이만 보였다. 그러나,  $TM_z$  모드의 결합길이를  $TE_z$  모드와 유사하게 확장하면,  $TE_z$  모드의 결합효율과 비슷한 결과를 발생시키기 때문에 고 민감도 bio-sensor 설계에 또한 적용이 가능하다. 이와 병행하여, 각 모드들의 교차비율을 비교 분석하였다. 그림 4(c)와 (d)에서 보듯이,  $TE_z$  모드의 경우,  $n_a = 1.0 \sim 1.1$ 은 약 144 dB/RIU, 1.1~1.2 사이는 약 79 dB/RIU의 값이 측정되었으며,  $TM_z$  모드의 경우는  $n_a = 1.0 \sim 1.2$  사이는 약 15 dB/RIU, 1.2~1.4는 약 35 dB/RIU가 계산되었다. 이와 같은 결과들은 그림 3에서 분석된, 분석물질의 굴절률에 따른 위상정합조건의 변화율 내용과 잘 정합하는 것이다.

다음으로, 본 논문에서 설계한 GASDC형 bio-sensor의 고 민감도 특성을 명확하게 확인하기 위하여, 센서에서 전파하는 필드의 3D 분포도를 수치해석 하였다. 그림 5(a)에서 보듯이,  $TE_z$  모드는 상향 도파관의 결합길이  $L_c = 57.9 \mu\text{m}$ 에서 analyte의 굴절률이  $n_a = 1.0$ 인 경우, 입력 광 신호와 같은 크기가 출력되었으며, 1.1과 1.2인 경우에는 각각 입력 광 신호의 약 83%와 약 42%가 측정되었다. 이와 같은 해석 결과가 그림 5(a)의 출력

단에 도시된 광 신호의 2D 출력 필드에 잘 표현되어 있다. 또한, 그림 5(b)의  $TM_z$  모드의 경우, 결합길이를  $TE_z$  모드와 유사하게  $L_c = 51.6 \mu\text{m}$ 로 선정하였을 때 (즉, 결합길이의 주기를 4배로 확대하였을 때), 그 결합 효율 특성이  $TE_z$  모드와 비슷한 분석 결과가 발생하였다. 단지, analyte 굴절률의 변화에 따른 결합효율의 변화를 명확하게 파악하기 위하여  $TE_z$  모드에 비하여 약간 증가한 수치가 사용되었다.

마지막으로, 그림 3에서 분석한  $TE_z$  모드와  $TM_z$  모드의 PMC가 서로 같은 경우에 두 모드들의 결합효율에 어떠한 현상이 일어나는지 분석하였다. 분석물질의 굴절률이  $n_a = 1.47$ 인 경우, 두 모드들의 PMC가 서로 같은  $d_{ph} = 14.2 \mu\text{m}$ 에서 수치 해석된 GASDC의 결합길이는  $L_c = 56.8 \mu\text{m}$ 와 같이 계산되었다. 이 값에서 분석한 두 모드들의 3D 필드 분포도인 그림 6에서 보듯이, 두 모드의 출력 단에서 방사되는 패턴은 입력 단에서 입사된 광 전력과 같은 크기의 전력이 발생하고, 결합효율의 주기 패턴이 서로 같음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 특정한 분석물질의 굴절률에서는 두 모드의 편향에 상관없이 결합효율을 적용하여 그 민감도를 분석할 수 있는, 무 편향 민감도 특성을 얻을 수 있다는 것이다.

종합하면, 격자 구조형 스트립 방향성 결합기에 기초한 bio-sensor는 analyte의 굴절률 변화에 의존하여 고 민감도의 성능을 보여주었다. 이와 같은 결과는, 오직 2개의 중첩모드가 analyte의 굴절률  $n_a$ 에 영향을 받아 결합하며, 격자 구조의 표면에 증착된 analyte에 의하여 강한 간섭현상을 경험하여, 더욱 민감한 PMC의 변화와 교차비율 감도를 갖기 때문으로 분석된다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 격자 구조형 스트립 방향성 결합기 (GASDC)를 기반으로 한 굴절률 bio-sensor의 설계 및 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 고 민감도의 센서를 설계하기 위하여 도파관 매개변수들을 EP-MTLT를 사용하여 분석하고, 그 결과 값들을 적용하여 GASDC bio-sensor를 구성하였다. 센서는 두 개의 결합된 비대칭 스트립 도파관으로 구성하였으며, 하나의 도파관 상단 층에 설치된 격자 구조에 의하여 위상정합 조건 (PMC)을 달성하였다.

제안된 센서는  $TE_2$ 와  $TM_2$  모드에서 각각 약  $36.4 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 와  $8.1 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 의 감도로 매우 민감한 현상을 나타내었다. 계산된 PMC에 기초한, GASDC의 출력 단계에서의 결합효율은 analyte의 굴절률 변화에 의존하여 명확하게 변하는 것이 관찰되었다. 그러므로, GASDC를 기반으로 한 굴절률 bio-sensor는 on-chip이 가능하고, 다른 회절 특성의 플랫폼 보다 고 민감도 측정이 쉬운 중요한 센서 소자로 발전될 것으로 기대한다.

## References

- [1] P. Dumais, et al., "Silica-on-Silicon Optical Sensor Based on Integrated Waveguides and Micro-channels", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, pp. 441-443, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.839430>
- [2] S. Nacer and A. Aissat, "Optical sensing by silicon slot-based directional couplers", Optical and Quantum Electronics, Vol. 44, pp. 35-43, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9530-3>
- [3] K. De Vos, et al., "Silicon-on-insulator micro-ring resonator for sensitive and label-free biosensing", Optics Express, Vol. 15, pp. 7610-7615, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.15.007610>
- [4] J. Vorosa, et al., "Optical grating coupler biosensors", Biomaterials, Vol. 23, pp. 3699-3710, 2002.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00103-5)
- [5] C. A. Barrios, "Optical Slot-Waveguide Based Biochemical Sensors", sensors, Vol. 9, pp. 4751-4765, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/s90604751>
- [6] T. Baehr-Jones and M. Hochberg, "Optical modulation and detection in slotted Silicon waveguides", Optics Express, Vol. 13, pp. 5216-5216, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.005216>
- [7] K. C. Ho, "Diffraction Analysis of Multi-layered Grating Structures using Rigorous Equivalent Transmission-Line Theory", The J. of IIBC, Vol. 15, No. 1, pp. 261~267, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.261>
- [8] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides", IEICE Trans. Electronics, Vol. E88-C, No. 2, pp. 270~274, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1093/ietele/E88-C.2.270>

## 저 자 소 개

### 호 광 춘(중신회원)



- 1996 : NYU School of Engineering (Ph.D. in EE)
- 1998 ~ 1999 : 한국통신 연구개발본부 선임연구원
- 2000 ~ 현재 : 한성대학교 기계전자공학부 전자트랙 교수

• 주관심분야 : Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.