

논문 2010-5-22

집적광학 센서 응용에 적합한 실리콘 비공진 반사형 광도파로 최적화에 관한 연구

A Study on the Optimization of Silicon Antiresonant Reflecting Optical Waveguides (ARROW) for Integrated Optical Sensor Applications

정홍식

Hongsik Jung

요 약 집적광학 바이오센서 구조에 적합한 비공진 반사 광도파로(ARROW: Antiresonant Reflecting Optical Waveguides)의 Si(기판)/SiO₂(클래딩)/Si₃N₄(비공진 클래딩)/SiO₂(코어)/air 다층박막 립 광도파로에 대한 최적화를 BPM 전산해석 방법을 이용해서 수행하였다. 전송손실을 최소화하기에 적합한 비 공진 클래딩의 두께를 유도하였으며, 소산파와 깊은 관련이 있는 손실모드에 대해서 이론적으로 검토하였다. 전산해석을 통해서 전송손실을 최소화하기 위한 립 광도파로의 깊이, 폭, 굴절률과 클래딩의 두께를 각각 2.3 μ m, 5 μ m, 1.488, 그리고 0.11 μ m로 계산되었다. 최적화된 제 원으로 비공진 반사 광도파로의 2차원, 3차원 전송특성을 확인하였다.

Abstract We optimized the Si(substrate)/SiO₂(cladding)/Si₃N₄(antiresonant cladding)/SiO₂(core)/air multi-layers rib-optical waveguides of antiresonant reflecting optical waveguide (ARROW) for integrated optical biosensor structure utilizing beam propagation method (BPM). Thickness of anti-resonant cladding was derived to minimize the propagation loss and leaky field mode deeply related with evanescent mode was theoretically derived. Depth, width, refractive index and cladding thickness of anti-resonant cladding were numerically calculated into 2.3 μ m, 5 μ m, 1.488, and 0.11 μ m respectively to minimize propagation loss using the BPM simulation tool. Finally one- and two-dimensional propagation characteristics of ARROW was confirmed.

Key Words : 실리콘 포토닉스, 비공진 반사 광도파로, 집적광학 센서 트랜스듀서, 빔 전송방법(BPM), 광센서 네트워크,

1. 서 론

집적광학 포토닉 바이오센서는 기존의 전자기술 기반의 센서와 비교해서 센싱 감도가 매우 좋고, 전자파의 영향을 받지 않으며, 대량생산이 용이하고, 광섬유와의 접속이 용이해서 원격측정 및 제어가 가능하여 인화, 폭발성 환경 하에서 측정이 가능하다. 그리고 또한 여러 물질

들을 동시에 측정 가능하다는 장점들을 보유하고 있다. 바이오센서의 또 다른 장점은 측정하고자 하는 시료와 반응하여 신속 정확하게 물질을 분석할 수 있다는 것이다. 즉 측정의 단순성, 신속성 및 민감성 등이 장점이라고 할 수 있다.^[1]

특히 소산파(evanescent wave)를 이용하는 집적광학 바이오센서는 그림 1과 같이 광도파로 표면에서 다양한 바이오 물질들과 반응해서 나타나는 굴절률 변화가 채널 광도파로를 통해 진행하는 광파의 유효굴절률(effective

*정희원, 홍익대학교 전자전기공학과 교수
접수일자 2010.8.3 수정일자 2010.9.18
게재확정일자 2010.10.15

refractive index)이 변화된다는 특성을 활용하는 것으로, 광도파로의 두께가 작고, 굴절률의 차이가 클수록 검출 감도(sensitivity)가 커진다. 이러한 큰 굴절률 차이는 SOI(semiconductor on insulator) 구조를 이용함으로써 얻을 수 있다. 따라서 비교적 공정 기술이 잘 정립되어 있는 실리콘 반도체 기술을 이용하면, 높은 굴절률 차로 고감도 센서 구현이 가능하다. 집적광학 포토닉 바이오 센서의 구체적인 특징 및 장점들은 아래와 같다.^{[2]-[4]}

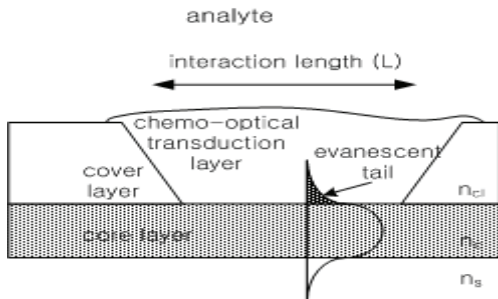


그림 1. 집적광학 광도파로와 소산파를 이용하는 바이오센서의 구조단면
 Fig. 1. Cross-section of biosensor structure utilizing integrated optical waveguide and evanescent field.

- 센싱 감도가 높다. (high sensitivity)
- 응답속도가 빠르다. (fast response time)
- 실시간으로 측정이 가능하다. (real-time measurement)
- 경박단소하게 구현 가능하다. (miniaturization, robustness, small-size)
- 표식인자가 없어도 된다. (label-free sensing)
- 전자파의 영향을 받지 않는다. (immunity to electromagnetic interference)
- 신뢰성이 높다. (high reliability)
- 저비용으로 대량생산이 가능하다.
- 파워 소모가 적다. (low energy consumption)
- 주변 광학부품과의 배열이 수월하다.

따라서 본 연구에서는 소산파를 이용하는 비공진 반사형 광도파로(ARROW: Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide) 구조의 동작원리를 검토한 다음, BPM(beam propagation method)을 이용해서 ARROW 구조의 제원이 전파손실에 미치는 영향을 검토하고, 이로부터 1.55 μm 파장 대역에서 전파손실을 최소화하면서,

센싱 감도를 극대화할 수 있는 최적화된 광도파로 구조를 도출하였다.

II. ARROW의 동작원리

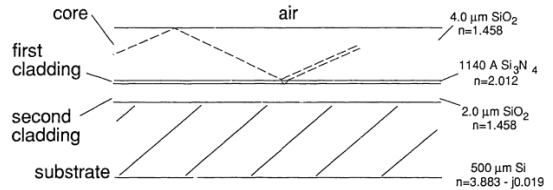


그림 2. ARROW 구조의 단면 및 제원
 Fig. 2. Cross-section of ARROW structure and dimension

그림 2는 전형적인 ARROW 구조이다. 코어(core)와 위 클래딩(공기 또는 박막)은 전반사(TIR)에 의해서 광파가 구속되며, 아래쪽 클래딩에서는 이중 박막구조 형태로 99.98% 정도의 높은 반사율을 나타내며, Fabry-Perot 공진효과에 의해서 광파를 구속하게 된다. 일반적으로 아래쪽 클래딩 영역에서는 고차모드들은 간섭 손실에 의해 상쇄되어서 궁극적으로 단일모드 특성을 갖게 된다. ARROW 구조의 특징 중의 하나는 기본모드에 대해서는 저 손실이고, TE-모드 보다는 TM-모드에서 더 큰 손실을 나타내는 것이 일반적인 특성이다. 입사 광파가 아래와 같은 위상정합 조건을 만족할 때 모드 형태로 도파되게 된다.^[5]

$$2K_o n_c d_c \sin \theta_v + \Phi_1 + \Phi_{2v} = 2v\pi \quad (1)$$

여기서 Φ_1 과 Φ_{2v} 는 코어/공기(위쪽 클래딩), 코어/이중박막(아래쪽 클래딩)에서 겪게 되는 각각의 위상전이(phase shift)이며, k_o 는 자유공간에서 파수(wave number)이며, n_c , d_c 는 코어의 굴절률과 두께를 나타낸다. 그리고 θ_v 는 광파의 입사각이다. 전파상수와 전파손실은 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\beta_v = K_o n_c \cos \theta_v \quad (2)$$

$$L_v = -5 \tan \theta_v \log(R_v) / d_{ce} \quad (\text{dB/cm}) \quad (3)$$

여기서 R_v 는 v 차 모드에 대한 이중 클래딩의 파워 반사율(power reflectivity)이며, TE 모드에 대한 코어의 유효두께, d_{ce} 는 다음과 같다.^[6]

$$d_{ce} = d_c + \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_c^2 - n_o^2}} \quad (4)$$

빛살광학(ray-optics) 관점에서 그림 2에 나타난 모드들이 아래, 위 코어-클래딩 인터페이스에 부딪혀서 진행할 경우 전송손실이 발생되며, 고차 모드일수록 전송손실이 증가하는 것을 알 수 있다.

ARROW에서 기본(fundamental) 모드가 광섬유와의 결합 시, 모드의 유효 굴절률과 파워 분포들이 잘 정합될 수 있도록 ARROW 코어 단면의 유효 크기를 설계하는 것이 중요하다. 이를 결정하기 위해서는 광섬유 코어의 유효 단면의 크기, 박막 두께에 따른 공정비용, 그리고 전파손실들을 고려하는 것이 필요하다. 광섬유 직경의 1/e (즉 광파의 전기장 세기가 1/e 만큼 떨어짐) 정도가 되도록 ARROW의 코어의 유효 두께를 설정하면, 광섬유와의 결합효율을 높일 수가 있게 되며, 전파손실도 줄일 수 있게 된다. 상용화된 광섬유 경우 1/e에 해당되는 광파모드의 유효 폭은 아래와 같은 근사식에 의해서 계산될 수 있다.

$$w \approx d \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (5)$$

여기서 V 는 $V = 2\pi(a/\lambda_o)NA$ 이며, a 는 NA 는 개구수(numerical aperture)이다. 광섬유 직경 $d=4\mu\text{m}$, $V=2$ 인 경우에 모드의 유효 폭은 약 $5.07\mu\text{m}$ 로 계산된다. 기본 모드의 손실을 최소화시키기 위한 아래 두 클래딩의 두께 d_1 , d_2 는 아래와 같이 유도된다.

$$d_1 \approx \frac{\lambda}{4n_1} \left\{ 1 - \left(\frac{n_c}{n_1} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{4n_1 d_{ce}} \right)^2 \right\} (2N+1) \quad N=0, 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$d_2 \approx \frac{d_{ce}}{2} (2M+1) \quad M=0, 1, 2, \dots$$

$4\mu\text{m}$ 코어 두께에 대해서 위 공식을 적용할 경우 첫 번째 클래딩인 Si_3N_4 경우에는 $d_1=1140\text{\AA}$, 두 번째 클래딩

의 SiO_2 는 $d_2=2.0\mu\text{m}$ 로 계산되었으며, 이 조건에서 이중 박막 클래딩의 반사율은 0.9997, 손실은 0.09dB/cm로 계산된다.

III. ARROW 구조에서 손실모드 (leak mode)의 이론적 고찰

ARROW 구조에서 코어와 위쪽 클래딩 간에는 존재하는 손실모드에 의해서 광도파로 위에 물질간의 결합을 광파로부터 감지할 수 있다. 손실모드에 대한 정확한 이론적 해석이 광도파로 바이오센서를 설계하는데 매우 중요하다. 따라서 본 절에서는 정규화 요소 분석(normalization factor analysis) 방법을 적용해서 손실모드를 해석하였다.^[7-18]

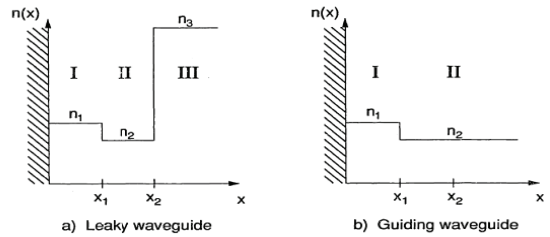


그림 3. 손실 광도파로와 무 손실 광도파로의 굴절률 분포
Fig. 3. Refractive-index distribution of lossy and lossless optical waveguides

그림 3(a)는 3층 박막 구조로서 손실모드가 존재하는 광도파로의 굴절률 분포이며, 영역 I은 SiO_2 의 코어, 영역 II와 영역 III는 임의의 간격(gap)과 클래딩 물질을 나타내며, 각각의 굴절률 n_2 , n_3 로 굴절률 분포를 나타내었다. 한편 그림 3(b)는 무 손실 광도파로의 굴절률 분포를 나타내며, 그림 3(a) II 영역과 같은 간격 영역이 존재하지 않는다. 그림 3(a)의 손실구조를 만족하는 TE 모드를 유도하기 위해서는, 모드 $\Psi(x) = E_y(x)$ 는 아래와 같은 파동방정식을 만족해야 된다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k_0^2 n^2(x) \psi = 0 \quad (7)$$

$n(x)$ 는 그림 3(a)와 같은 굴절률 분포를 가정한다. $n_2 < n_{eff} = \beta/k_o < n_{1,3}$ 범위의 유효굴절률을 갖

는 TE 모드들은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}\psi_I(x) &= A\sin(\alpha_1 x) \\ \psi_{II}(x) &= B\exp(\gamma(x-x_1)) + C\exp(-\gamma(x-x_1)) \\ \psi_{III}(x) &= D_+ \exp(i\alpha_2(x-x_2)) + D_- \exp(-i\alpha_2(x-x_2))\end{aligned}\quad (8)$$

여기서 β 는 전파상수이며, $\alpha_1, \gamma, \alpha_2$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\alpha_1^2 &= k_0^2 n_1^2 - \beta^2 \\ \gamma^2 &= \beta^2 - k_0^2 n_2^2 \\ \alpha_2^2 &= k_0^2 n_3^2 - \beta^2\end{aligned}\quad (9)$$

한편 $x=x_1, x=x_2$ 에서 Ψ 와 $d\Psi/dx$ 의 연속 경계조건 (continuous boundary-condition)을 적용해서 B, C, D, D-를 아래와 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}B &= \frac{1}{2}A \left(\sin(\alpha_1 x_1) + \frac{\alpha_1}{\gamma} \cos(\alpha_1 x_1) \right) \\ C &= \frac{1}{2}A \left(\sin(\alpha_1 x_1) - \frac{\alpha_1}{\gamma} \cos(\alpha_1 x_1) \right) \\ D_{\pm} &= \frac{1}{2} \left[B e^{\gamma(x_2-x_1)} + C e^{-\gamma(x_2-x_1)} \pm \frac{\gamma}{i\alpha_2} (B e^{r(x_2-x_1)} - C e^{-r(x_2-x_1)}) \right]\end{aligned}\quad (10)$$

한편 그림 9(b)의 도파모드는 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\psi_{I,g}(x) &= A_g \sin(\alpha_g x) \\ \psi_{II,g}(x) &= A_g \sin(\alpha_g x_1) e^{-\gamma(x-x_1)}\end{aligned}\quad (11)$$

정규화 상수 A_g 는 아래와 같다.

$$A_g = \sqrt{\frac{2\gamma}{1 + \gamma x_1}}\quad (12)$$

식(10)에서 B=0를 적용할 경우 손실모드는 영역 III에서 작은 파동이 존재하는 것을 제외하고는 유사한 것을 알 수 있다. 이 작은 파동을 준 모드 (quasi modes)라 일

컸는다.

ARROW에서 손실은 다음과 같이 계산할 수 있다. 광도파로에 대한 입사광파는 상호직교 모드의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi(x, 0) = \psi_g(x) = \int \Phi(\beta) \psi_{\beta}(x) d\beta \quad (13)$$

여기서 $\Psi_{\beta}(x)$ 는 정규화된 방사(radiation) 모드이며, $\Phi(\beta)$ 는 각 모드에 대한 적당한 가중치 부여하는 요소이다. $z>0$ 부분에 대해서 위 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi(x, z) = \int d\beta \Phi(\beta) \psi_{\beta}(x) e^{i\beta z} \quad (14)$$

진행방향으로 임의의 z 위치에서 코어 안에 남아있는 파위는 중복 적분방법에 의해서 다음과 같이 주어지게 된다.

$$W(z) = \left| \int_0^{\infty} \psi^*(x, 0) \psi(x, z) dz \right|^2 \quad (15)$$

위식을 β 에 대한 적분형태로 나타내면 아래와 같다.

$$W(z) = \left| \int |\Phi(\beta)|^2 e^{i\beta z} d\beta \right|^2 \quad (16)$$

위식에서 $\beta=\beta_g$ 조건에서 x_2-x_1 이 매우 클 경우 정규화 방사(radiation) 모드는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_{\beta}(x) \approx \left(\frac{A}{A_g} \right) \psi_g(x) \quad (17)$$

식 (17)에서 $\Psi_g(x)$ 는 대응되는 도파모드에 대한 해에 해당된다. 앞서 언급된 가정은 그림 3(a)의 영역 I, II에서의 손실모드 형태가 도파모드의 형태와 유사하며, 영역 III의 효과는 거의 없다는 추측에 근거하고 있다. 따라서 x_2 가 x_1 에 근접할 경우 이 모델을 이용하면 정확하게 손실모드를 예측할 수 없다. 이미 식(12)에서 A_g 를 유도하였기 때문에 A를 유도하기에 앞서 $\beta=\beta_g$ 가까이에서 B, C를 먼저 결정하면 다음과 같다.

$$B \approx \frac{1}{2} A \frac{\beta_g \delta_1}{\gamma^2 \alpha_1} (1 + \gamma_g x_1) (\beta - \beta_g) \quad (18)$$

$$C \approx \frac{A}{\delta_1} \alpha_1$$

여기서 $\delta_i^2 = \gamma^2 + \alpha_i^2$ ($i = 1, 2$)로 정의 된다. 이 결과들을 활용할 경우 D, D-를 A로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$|D_{\pm}| \approx \frac{1}{4} |A| \frac{\delta_{1\beta}}{\gamma^2 \alpha_1} (1 + \gamma x_1) \left| 1 + \frac{\gamma}{i\alpha_2} \right| e^{r(x_2 - x_1)} \\ * \left| (\beta - \beta_g) + \frac{2\gamma^2 \alpha_1^2}{\beta^2 \delta_1^2 (1 + \gamma x_1)} \frac{1 - (\gamma/i\alpha_2)}{1 + (\gamma/i\alpha_2)} e^{-2\gamma(x_2 - x_1)} \right| \quad (19)$$

위식에서 모드들 간에 orthonormality 조건을 적용하면 아래와 같게 된다.

$$|D_{\pm}| = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi\alpha_2}} \quad (20)$$

따라서 $|A|^2$ 에 대한 해를 구하면 다음과 같게 된다.

$$|A|^2 = \frac{\beta}{2\pi\alpha_2} \frac{16\alpha_1^2 \gamma^4}{\beta^2 \delta_1^2} \frac{1}{(1 + \gamma x_1)^2} \frac{\alpha_2^2}{\alpha_2^2 + \gamma^3} e^{-2\gamma(x_2 - x_1)} \\ \frac{1}{((\beta - \beta'_g)^2 + \Gamma^2)} \quad (22)$$

식 (12)와 (22)를 (17)에 대입할 경우 $|\Phi(\beta)|^2$ 은 아래와 같이 유도 된다.

$$|\Phi(\beta)|^2 = \left| \frac{A}{A_g} \right|^2 \approx \frac{\Gamma}{\pi} \frac{1}{(\beta - \beta'_g)^2 + \Gamma^2} \quad (23)$$

여기서 Γ 와 β'_g 는 아래와 같다.

$$\Gamma = \frac{4\alpha_1^2 \gamma^3 \alpha_2}{\beta \delta_1^2 \delta_2^2} \left(\frac{1}{1 + \gamma x_1} \right) e^{-2\gamma(x_2 - x_1)} \quad (24)$$

$$\beta'_g = \beta_g + \frac{\Gamma(\alpha_2^2 - \gamma^2)}{2\alpha_2 \gamma} \quad (25)$$

식 (23)을 식(16)에 치환할 경우 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$W(z) \approx \left| \frac{\Gamma}{\pi} \int \frac{e^{i\beta z} d\beta}{(\beta - \beta'_g)^2 + \Gamma^2} \right|^2 \quad (26)$$

복소수 해석을 이용해서 파워를 해석하면 아래와 같은 결과를 얻게 된다.

$$W(z) \approx \left| \frac{\Gamma}{\pi} 2\pi i \frac{e^{-\gamma z}}{2i\Gamma} \right|^2 = e^{-2\Gamma z} \quad (27)$$

따라서 dB/cm 단위로 파워손실을 나타내면 궁극적으로 아래와 같이 표현된다.

$$L = -10 \log \frac{W(z=1cm)}{W(z=0)} \approx 87000 \Gamma \quad (dB/cm) \quad (28)$$

ARROW 광도파로의 기본모드에 대한 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$L = 92 e^{-21(x_2 - x_1)} \quad (29)$$

그림 3(a)에서 간격에 따른 손실을 그림 4에 나타내었다. 예상한대로 간격이 넓어질수록 손실이 지수 함수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이 모델을 유도하는 데에 있어서 간격이 어느 정도 있다는 가정 하에서 시작하였기 때문에 간격이 없는 광도파로에 이 모델을 적용하여 손실을 예측할 경우 결과는 정확하지 않을 수 있다.

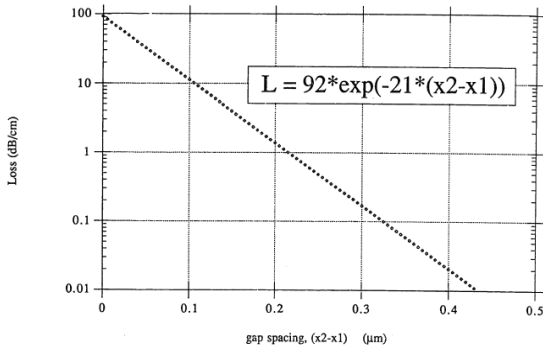


그림 4. 간격에 따른 예상되는 손실
Fig. 4. The theoretical loss versus gap spacing

IV. ARROW 구조의 최적화를 위한 전산모델링

본 연구에서는 그림 5와 같은 굴절률 분포를 갖는 ARROW 구조의 제원에 대해서 BPM(Beam Propagation Method) 전산해석을 시도하였다. 아래쪽 클래딩에는 비반사(antireflecting) 공진을 형성하기 위해서 $\text{Si}_3\text{N}_4(2.00)/\text{SiO}_2(1.488)$ 와 같이 이중클래딩 구조를 적용하였다. ARROW 구조에서 릿(rib) 광도파로의 제원 및 굴절률 그리고 클래딩의 두께에 대해서 집중적으로 검토하였다.^[9]

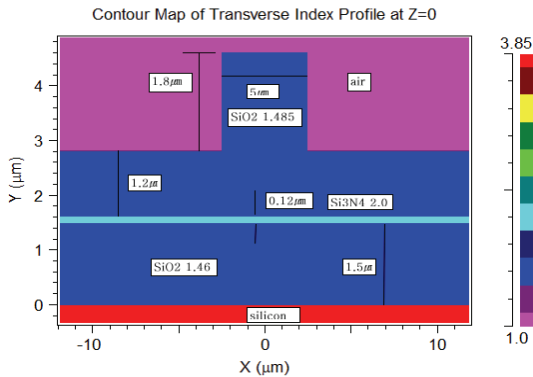


그림 5. 전산해석에 적용된 ARROW 구조의 물질, 제원 및 굴절률 분포
Fig. 5. Materials, dimensions, and refractive-index distribution of ARROW structure for computer simulation

(1) 릿 광도파로 깊이에 따른 전산해석

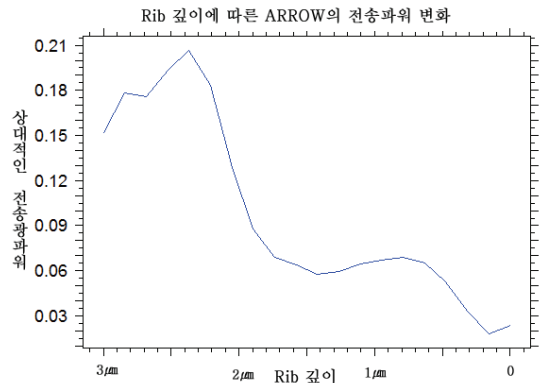


그림 6. ARROW의 릿 광도파로 깊이에 따른 도파모드의 전송파워
Fig. 6. Transmitted power of guided-mode versus the depth of rib-waveguide of ARROW

그림 6은 릿 깊이에 따른 전산해석 결과이며, 릿 깊이가 약 $2.3\mu\text{m}$ 정도에서 도파모드의 전송파워가 최대가 되었으며, 상대적으로 손실이 최소인 것으로 나타났다. 일반적으로 전산해석에 많은 시간이 소요되어 릿 깊이를 세밀하게 측정하지 못했지만, 추후 세밀한 전산해석을 통해서 최적화된 릿 깊이를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 릿 광도파로 폭에 따른 전산해석

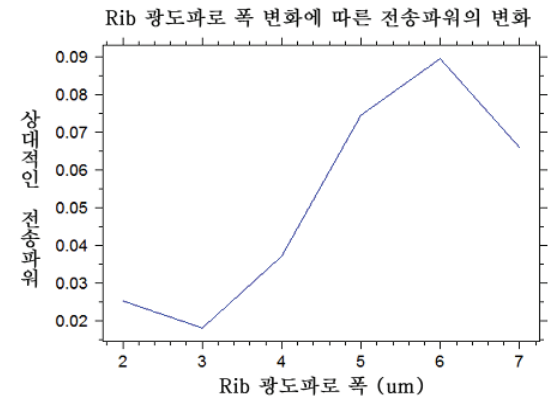


그림 7. ARROW의 릿 광도파로 폭에 따른 도파모드의 광 전송파워
Fig. 7. Transmitted power of guided-mode versus the width of rib-waveguide of ARROW

BPM 전산해석에서 도파 모드가 릿 광도파로 폭이 $6\mu\text{m}$ 일 때 그림 7과 같이 최대 전송파워를 나타냈으나, 바

이오 집적광학 센서에서는 단일모드 도파 특성을 갖는 것이 중요하며, $6\mu\text{m}$ 폭은 멀티모드를 특성을 나타낼 수 있기 때문에 본 연구에서는 $5\mu\text{m}$ 폭으로 설정하였다.

(3) 립 광도파로의 굴절률에 따른 최적화 전산해석

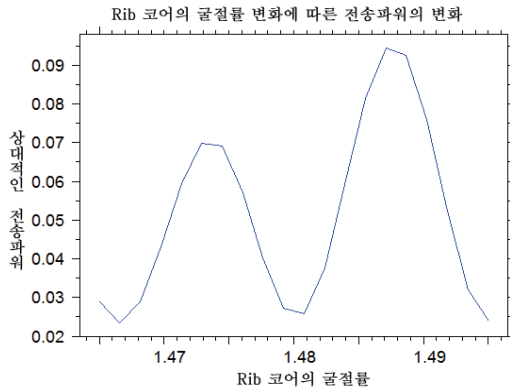


그림 8. ARROW의 rib 광도파로 굴절률에 따른 도파모드의 광 전송파워
 Fig. 8. Transmitted power of guided-mode versus the refractive-index of rib-waveguide of ARROW

그림 8에서 알 수 있듯이 립 광도파로의 굴절률 변화에 따라 전송파워가 주기적으로 변하고 있지만, 1.487~1.488 범위에서 비교적 높은 전송파워를 나타내고 있기 때문에 본 연구에서는 립 광도파로 코어의 굴절률을 1.488로 정하였다.

(4) 비 공진 클래딩 두께에 따른 최적화 전산해석

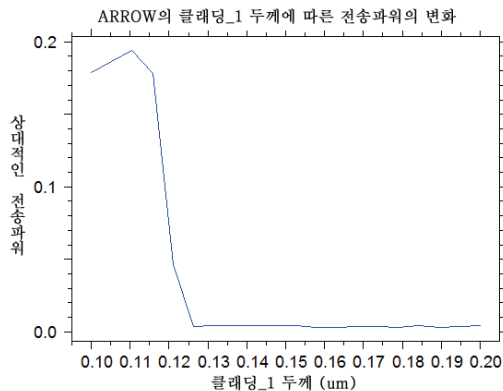


그림 9. ARROW 구조에서 비 공진 클래딩 두께에 따른 도파모드의 광 전송파워
 Fig. 9. Transmitted power of guided-mode versus the anti-resonant cladding thickness of rib-waveguide of ARROW

비 공진 클래딩의 첫 번째 클래딩 박막의 두께를 변화시켜 가면서 전송파워를 검토하였다. 그림 9와 같이 두께가 $0.125\mu\text{m}$ 가 될 때 까지는 전송파워가 감소하다가 그 이후에는 포화되는 현상이 관찰되었으며, 본 연구에서는 $0.11\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

(5) 최적화된 ARROW 모드의 2차원, 3차원 전송 전산해석

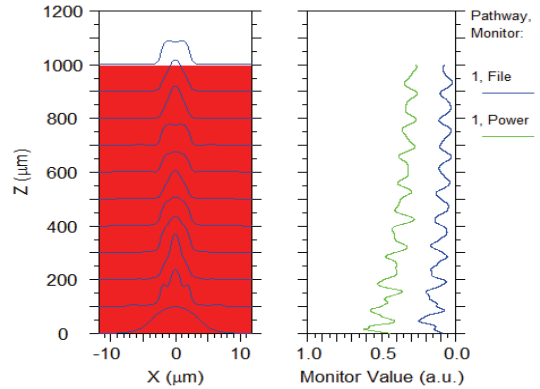


그림 10. ARROW 광도파로에 대한 도파 모드의 2차원 전송 특성
 Fig. 10. Two-dimensional transmitted characteristics of guided-mode of ARROW waveguide

그림 10, 11은 BPM 전산해석을 통해서 그림 5와 같은 ARROW 구조의 TE 모드에 대한 도파 특성을 2, 3차원으로 해석된 결과이다. 립 광도파로의 길이, 폭 그리고 굴절률을 각각 $2.3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, 1.488, 비 공진 클래딩의 두께를 $0.11\mu\text{m}$ 로 설정하여 전산해석을 하였다. 예상한대로 2차원, 3차원 전송특성이 매우 양호한 것으로 관찰되었다.

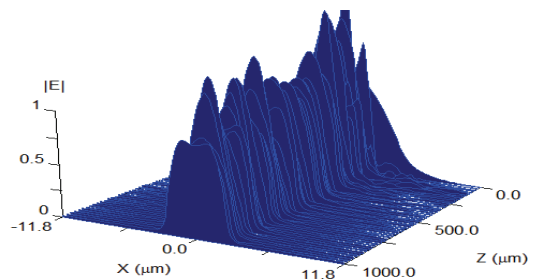


그림 11. ARROW 광도파로에 대한 도파 모드의 3차원 전송 특성 및 세기분포
 Fig. 11. Three-dimensional transmitted characteristics and intensity-profile of guided-mode of ARROW waveguide

V. 결론

집적광학 바이오센서 트랜스듀서 구조에 적합한 비공진 반사 광도파로(ARROW: Antiresonant Reflecting Optical Waveguides)의 Si(기판)/SiO₂(클래딩)/Si₃N₄(비공진 클래딩)/SiO₂(코어)/air 다층박막 링 광도파로에 대한 최적화를 BPM 전산해석 방법을 이용해서 수행하였다. 전송손실을 최소화하기에 적합한 비공진 클래딩의 두께를 유도하였다. 소산과 밀접한 연관이 있는 손실 모드에 대해서 이론적으로 해석하였다. 전산해석을 통해서 전송손실을 최소화하기 위한 링 광도파로의 깊이, 폭, 굴절률과 클래딩의 두께를 각각 2.3 μ m, 5 μ m, 1.488, 그리고 0.11 μ m로 계산되었다. 최적화된 제원으로 비공진 반사 광도파로의 2차원, 3차원 전송특성을 확인하였다. 이로부터 손실을 최소화 시킬 수 있는 비공진 클래딩의 두께를 유도하였다.

참고 문헌

- [1] R.G. Heidman and P.V. Lambeck, "Remote opto-chemical sensing with extreme sensitivity: design, fabrication and performance of a pigtailed integrated optical phase-modulated Mach-Zehnder interferometer system," Sensors and Actuators B 61, pp. 100-127, 1999.
- [2] F Prieto, et al, "An integrated optical interferometric nanodevice based on silicon technology for biosensor applications," Nanotechnology 14, pp. 907-912, 2003.
- [3] F Prieto, et al, "Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications," Sensors and Actuators B 92, pp. 151-158, 2003.
- [4] B Sepulveda, et al, "Optical biosensor microsystems based on the integration of highly sensitive Mach-Zehnder interferometer devices," J. Optics A, pp. 561-566, Aug. 2006.

- [5] P.K. Tien, "Light waves in thin films and integrated optics," Applied Optics, Vol. 10, No. 11, pp. 2395-2413, Nov. 1971.
- [6] Albert Min-Hsien Young, "Microfabricated pressure transducers based on anti-resonant reflecting optical waveguides," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [7] J. L. Archambault, et al, "Loss calculations for antiresonant waveguides," J. Lightwave Tech., Vol. 11, No. 3, pp. 416-423, Mar. 1993.
- [8] T. Baba and Y. Kokubun, "Scattering loss of antiresonant reflecting optical waveguides," J. Lightwave Tech., Vol. 9, No. 5, pp. 590-597, May 1991.
- [9] Katsunari Okamoto, Fundamentals of Optical Waveguides, second edition, Academic Press, pp. 329-397, 2006.

저자 소개

정 홍 식(정회원)



- 1982년 : 서강대학교 전자공학과 학사 졸업
 - 1984년 : 서강대학교 대학원 전자공학과 석사 졸업
 - 1988년 : Texas A&M University 전기공학과 박사 학위
 - 1989년 : 일본 신기술사업단(ERATO) 연구원
 - 1990년-현재: 홍익대학교, 과학기술대학, 교수
 - 1998년 : Texas A&M University, CEMDAS, 연구교수
- <주관심분야: LiNbO₃ 광집적소자, 광전자 재료 및 부품, 광통신시스템>

※ 이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(2009-0070978)