

비가역 위상 변위를 이용한 단일 방향 자기장에 의한

광 아이솔레이터

Optical Isolator with a Unidirectional Magnetic Field using Nonreciprocal Phase Shift

양정수, 오범환, 이일항

Optics and Photonics Elite Research Academy

집적형 광자기술 연구센터, 인하대학교 정보통신공학부

jsyang@inha.ac.kr

광통신 시스템에서 반도체 레이저와 같은 능동 소자들을 원하지 않는 반사되는 빛으로부터 보호하기 위해 단일 방향으로 광의 전송을 가능하게 할 수 있는 광 아이솔레이터(Optical Isolator), 써클레이터(Circulator)등의 사용은 필수적이라 할 수 있다. 그러나, 현존하는 상업적으로 사용되고 있는 광 아이솔레이터는 벌크(bulk) 형태의 구조를 가지고 있어 소형화, 집적화를 구현하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러므로, 현재의 광소자 기술이 추구하는 고도의 광 집적 회로를 구현하기 위해 집적형 광 아이솔레이터의 개발 필요성이 점증되고 있다. 최근 자기 광학 효과로 인한 비가역 위상 변위(nonreciprocal phase shift)를 적용한 아이솔레이터와 써클레이터의 개발에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 집적형 광 아이솔레이터의 개발을 위한 비가역 위상 변위의 이용은 일반적으로 사용되고 있는 모드 변환(mode conversion) 광 아이솔레이터에서 필요로 하는 복잡한 자화 방향 조절 방법과 수직 편극 모드(orthogonally polarized mode)들 사이의 위상 조화(phase matching)를 고려하지 않아도 되는 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 단일 방향으로 자기장이 인가 될 때 간섭계를 구성하고 있는 서로 다른 클래딩 층이 사용된 도파로의 비가역 위상 변위와 비대칭 적층 구조에 따른 아이솔레이션 동작을 연구하였다.

그림. 1은 세 층의 슬랩 광 도파로의 기본 구조이다. 광은 z축으로 진행하고, 외부 자기장은 y축 방향으로 인가되며, 가이드 층에 평행하다. 가이드 층은 1.3 μm 와 1.55 μm 에서 작은 광학적 손실과 비가역 위상 변위의 주된 요인이 되는 큰 패러데이 회전(Faraday rotation) 값을 갖는 Ce:YIG($\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)가 고려되었으며 두께는 0.45 μm 이다. 기판은 NOG((Ca, Mg, Zr)-doped $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)가 고려되었다. 도파로를 구성하고 있는 물질들이 손실이 없는 물질이라고 가정 할 때, 가이드 층의 상대 유전율 텐서(relative permittivity tensor) $[\kappa]$ 는 다음과 같이 표현되어 진다.

$$[\kappa] = \begin{pmatrix} \kappa_g(x) & 0 & i\xi(x) \\ 0 & \kappa_g(x) & 0 \\ -i\xi(x) & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

비대각선 요소 $\xi = 2\sqrt{\kappa_g}\Theta_F/k_o$ 이고, κ_g , Θ_F , k_o 는 각각 유전 상수, 고유 패러데이 회전, 진공에서의 파수를 나타낸다. 그림. 1의 슬랩 도파로 구조에서 맥스웰 방정식을 이용하여 계산된 TE(Transverse Electric Field) 모드와 TM(Transverse Magnetic Field) 모드의 고유 방정식(eigenvalue equation)은 TM

모드의 진행상수(propagation constant) β_{TM} 에 대하여 선형항을 갖게 되어 전향 진행(forward propagation)하는 광과 후향 진행(backward propagation)하는 광에 대하여 비가역 위상 변위를 갖게 되나. TE 모드의 진행상수 β_{TE} 에 대하여 선형 항을 갖게 되지 않아 비가역 위상 변위가 발생하지 않는다. 그림. 2는 광 도파로의 클래딩 층의 굴절율의 변화에 따른 계산된 비가역 위상 변위이며, 클래딩 층의 굴절율과 기판의 굴절율의 차이가 작을 때 비가역 위상 변위가 작아짐을 볼 수 있다. 계산에 사용된 굴절율은 Ce:YIG, NOG가 각각 2.21, 1.95이었고, Ce:YIG의 패러데이 회전은 $4,500^\circ/\text{cm}$ 이다. 단일 방향으로 자기장이 인가되는 경우 간섭계를 구성하는 두 도파로에 굴절율이 서로 다른 클래딩 층이 사용되면 도파로를 진행하는 TM 모드들이 각각 서로 다른 비가역 위상 변위를 갖게 되어 $(\beta_{f1} - \beta_{f2})L = 2m\pi$, $(\beta_{b1} - \beta_{b2})L = 2(n + 1)\pi$ 을 만족하는 진행 거리 L을 조정함으로써 아이솔레이션 동작을 얻을 수 있다. $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{b1}, \beta_{b2}$ 는 각 도파로를 진행하는 TM모드의 전향 진행상수와 후향 진행상수이며, m, n 은 정수이다. 그림. 3은 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 계산된 $\text{HfO}_2/\text{Ce:YIG}/\text{NOG}$, $\text{SiO}_2/\text{Ce:YIG}/\text{NOG}$ 도파로 구조를 진행하는 TMO 모드의 비가역 위상 변위이며, SiO_2 와 HfO_2 의 굴절율은 각각 1.44, 1.98이 이용되었다. 굴절율의 차가 큰 서로 다른 클래딩 층을 사용함으로써 아이솔레이션 동작을 얻을 수 있는 진행거리 L을 최소화 할 수 있다.

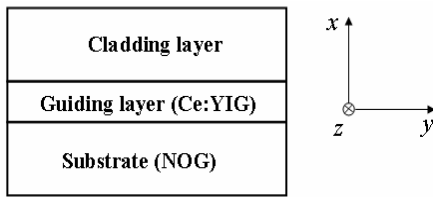


그림. 1 세 층의 슬랩 광 도파로 기본 구조

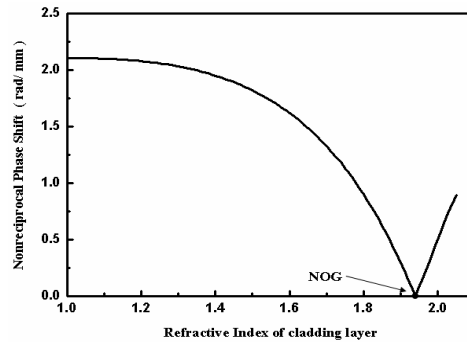


그림. 2 클래딩 층의 굴절율 변화에 따른 비가역 위상 변위

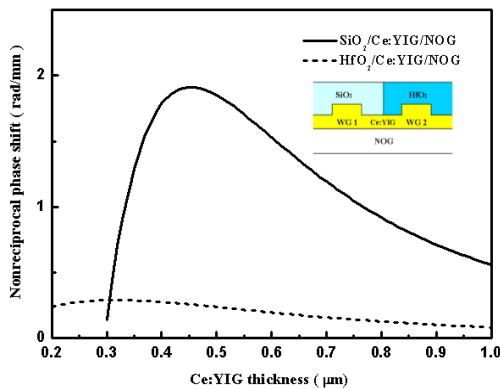


그림. 3 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 계산된 TMO 모드의 비가역 위상 변위

참고문헌

1. H. Yokoi, and T. Mizumoto, *Electron. Lett.* **33**, 1787 (1997)
2. J. Fujita, M. Levy, R. Osgood, L. Wilkens, and H. Dotsch, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2158 (2000)
3. H. Yokoi, T. Mizumoto, N. Shinjo, N. Futakuchi, and Y. Nakano, *Appl. Opt.*, **39**, 6158 (2000)