

자기 광학적 특성을 이용한 다중 모드 간섭에 기반한 집적 광 도파로 아이솔레이터

양정수*

연세대학교 나노과학기술연구소

(2005년 2월 22일 받음, 2005년 3월 25일 최종수정본 받음)

1.55 μm 파장에서 동작하는 자기 광학적 가이드층(magneto-optic guiding layer)을 갖는 도파로형 아이솔레이터를 제작하기 위하여 신 개념의 간섭계형 아이솔레이터가 제안되고 디자인 되었다. 이 소자는 다중모드 간섭 결합기(multimode interference coupler)로 구성되어 있으며 간섭계의 두 도파로가 서로 다른 적층 구조를 가지고 있다. 간섭계의 적층 구조는 각각 $\text{HfO}_2/\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{NOG}$ 와 $\text{SiO}_2/\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{NOG}$ 이다. 이러한 비대칭 적층 구조(asymmetric layer structure)로 인해 단일 방향의 자기장하에서 간섭계의 두 도파로가 서로 다른 비가역적 위상변위(nonreciprocal phase shift)를 갖게 함으로서 아이솔레이터로서의 동작을 가능하게 한다. 최적화된 아이솔레이터의 구조는 3D 광전송 방법(Beam Propagation Method)을 이용하여 결정되었다.

주제어 : 광 아이솔레이터, 비가역적 위상 변위, 다중모드 간섭 결합기, 가넷

I. 서 론

현재 광소자 기술은 소형화, 집적화, 지능화 단계의 기술 개발을 추구하고 있으나 광의 편광 조절에 어려움을 겪고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 시도로서 자성체를 이용한 광 특성 조절을 통하여 광 집적화를 구현하기 위한 시도가 이루어지고 있으며, 자기 광학적 특성을 이용한 광 아이솔레이터(Isolator), 서큘레이터(Circulator) 등이 제안되어지고 있다[1, 5]. 광 아이솔레이터는 단일 방향으로만 광의 전송을 가능하게 만드는 소자로서 원하지 않는 반사되는 광으로부터 광 신호처리 능동 소자들을 보호하는 역할을 하며, 광 통신 시스템에서 그 중요성이 증대되고 있다. 그러나, 현존하는 상업용 광 아이솔레이터는 벌크(bulk)형태의 구조를 가지고 있어 고도의 집적화를 구현하기에 어렵다는 단점을 가지고 있다. 그러므로, 광 집적 회로 구현을 위한 집적화된 광 아이솔레이터의 개발 필요성이 강하게 대두 되고 있으며, 그 구현은 광 소자 제작의 경비 절감 및 소자의 소형화를 가능하게 할 것이다. 특히 자기상 맺힘 원리(self-imaging principle)에 기반한 다중 모드 간섭(multimode interference) 효과의 광 소자 적용은 작은 소자의 크기와 제작의 용이성과 같은 뛰어난 장점을 가지고 있다[6]. 자기적 가넷 물질(magnetic garnet material)은 1.3 μm 와 1.55 μm 에서 작은 광학적 손실과 큰 패러데이 회전(Faraday rotation)값을 갖는 물질로 알려져 있으며, 패러데이 회전은 비가역 위상변위(nonreciprocal phase shift)를 일으키는 주된 요인이다. 그러므로 가넷 물질은 비가역 위상변위를 이용한 광 집적 도파로 아이솔레이터를 구현

하기 위한 적절한 물질이다.

본 연구에서는 다중 모드 간섭 마하젠더 간섭계(Multimode Interference Mach Zehnder Interferometer)를 이용한 집적 광 아이솔레이터가 제안되고 설계되었다. 단일 자장 방향하에서 아이솔레이터로 동작하기 위하여 간섭계의 두 도파로의 클래딩 층(cladding layer)에 각각 서로 다른 물질을 사용하였고, 이러한 비대칭 적층 구조에 따른 아이솔레이션 동작을 연구 하였다.

II. 이 론

Fig. 1은 세 층의 슬랩 광 도파로(slab optical waveguide)로 이루어진 기본 구조를 보이고 있다. 가이드층(guiding layer)으로 이용되는 자기 광학적 박막의 두께는 d 이다. 광은 z 축 방향으로 진행한다. 외부 자장은 y 축 방향으로 인가되며, 광의 진행방향에 횡축방향으로 수직하고, 자성 박막 평면에 평행하다. 광 손실이 없는 물질로 광 도파로가 이루어졌다고 가정하면 자기 광학적 효과를 포함한 상대 유전율 텐서(relative permittivity tensor)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$[\kappa] = \begin{pmatrix} \kappa_o(x) & 0 & i\xi(x) \\ 0 & \kappa_o(x) & 0 \\ -i\xi(x) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\kappa_o(x) = \begin{cases} \kappa_c & x > d \\ \kappa_g & 0 < x < d \\ \kappa_z & x < 0 \end{cases} \quad \xi(x) = \begin{cases} \xi & 0 < x < d \\ 0 & x < 0, x > d \end{cases} \quad (2)$$

E-mail: jsuyang@yonsei.ac.kr

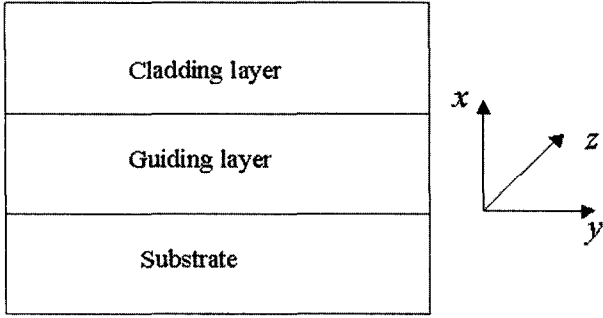


Fig. 1. Basic structure of triple-layered slab optical waveguide.

여기에서, κ_c , κ_g , κ_s 는 각각 클래딩 층(cladding layer), 가이드 층과 기판(substrate)의 유전율(dielectric constant)을 나타낸다. 자기 광학적 효과의 영향을 받는 비대각선 요소(off-diagonal component) ξ 는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{2\sqrt{\kappa_g}\Theta_F}{k_o} \quad (3)$$

Θ_F 는 패러데이 회전(Faraday rotation)을 나타내며, k_o 는 진공 중에서의 파수(wave number)이다. 이 도파로 구조에서 가이드 층만이 자기 광학적 효과의 영향을 받게 되어 $\xi \neq 0$ 이고, $\xi(x)$ 는 x 축 방향으로 상수 값을 갖는다고 가정하였다.

슬랩 도파로에서 TE(Transverse Electric Field) 모드와 TM(Tranverse Magnetic Field) 모드의 전자기장(electromagnetic field)들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{TM 모드: } H = \hat{y}H_y(x)e^{j(\omega t - \beta_{TM}z)} \quad (4)$$

$$\text{TE 모드: } E = \hat{y}E_y(x)e^{j(\omega t - \beta_{TE}z)} \quad (5)$$

TM 모드에 대한 식(4)를 맥스웰 방정식(Maxwell equation)에 대입하여 계산하면 식(6)의 헬름홀츠 파동 방정식(Helmholtz wave equation)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \left(\frac{\kappa_o^2 - \xi^2}{\kappa_o} k_o^2 - \beta_{TM}^2 \right) H_y = 0 \quad (6)$$

$x=0$ 와 $x=d$ 에서 H_y 와 E_z 의 경계조건을 이용한 TM 모드에 대한 고유 방정식(eigenvalue equation)은 식(7)로 표현된다.

$$\tan(k_x d) = \frac{\frac{k_x}{\kappa_g} \left(\frac{\eta_s}{\kappa_s} + \frac{\eta_c}{\kappa_c} \right)}{\left(\frac{k_x}{\kappa_g} \right)^2 - \frac{\eta_c}{\kappa_c} \frac{\eta_s}{\kappa_s} \left(\frac{\eta_s}{\kappa_s} - \frac{\eta_c}{\kappa_c} \right) \cdot \frac{\xi}{\kappa_g} \frac{\beta_{TM}}{\kappa_g} + \left(\frac{\xi}{\kappa_g} \cdot \frac{\beta_{TM}}{\kappa_g} \right)^2} \quad (7)$$

여기서, $\beta_{TM}^2 = \eta_c^2 + \kappa_c^2 k_o^2 = \overline{\kappa_g} k_o^2 - k_x^2 = \eta_s^2 + \kappa_s^2 k_o^2$, $\overline{\kappa_g} = (\kappa_o^2 - \xi^2)/\kappa_o$ 이다. 계산된 고유 방정식은 TM 모드의 진행 상수(propagation

constant) β_{TM} 에 대하여 선형 항을 가지고 있으므로 전향 진행(forward propagation)하는 광과 후향 진행(backward propagation)하는 광에 대하여 비가역적 위상변위 $|\Delta\beta_{TM}| = |\beta_{f, TM} - \beta_{b, TM}|$ 을 갖게 된다. 여기서 $\beta_{f, TM}$, $\beta_{b, TM}$ 은 각각 전향 진행하는 광과 후향 진행하는 광의 진행 상수를 나타낸다. 같은 방법으로 TE 모드에 대한 고유 방정식을 계산할 수 있으며, 그 결과를 식(8)에 나타내었다.

$$\tan(k_x d) = \frac{k_x(\eta_c - \eta_s)}{k_x^2 - \eta_c \eta_s} \quad (8)$$

$\beta_{TM}^2 = \eta_c^2 + \kappa_c^2 k_o^2 = \kappa_g k_o^2 - k_x^2 = \eta_s^2 + \kappa_s^2 k_o^2$ 이다. TE 모드의 진행 상수에 대하여 선형 항을 가지고 있지 않으므로 비가역적 위상변위는 존재하지 않는다. 그러므로, TE 모드의 진행 상수는 진행 방향에 무관하게 된다.

III. 아이솔레이터의 디자인

3.1. 동작 원리

Fig. 2는 비가역적 위상변위를 이용해 제안된 광 도파로 아이솔레이터의 개략적인 구조를 보이고 있다. 일반적인 MZI(Mach Zehnder Interferometer) 구조의 Y-접합 분기(Y-junction branch)들이 1×2 3-dB MMI 결합기(multimode interference coupler)로 대체 되었으며, MMI-MZI의 암(arm) 1과 암 2는 서로 다른 적층 구조를 갖는다. 자기 광 도파로를 진행하는 TM 모드의 비가역적 위상 변위는 인가 자장의 방향이 광의 진행 방향과 횡축 방향으로 수직하고 박막과 평행할 때 발생한다. 광 도파로의 가이드 층은 NOG((Ca, Mg, Zr)-doped $Gd_3Ga_5O_{12}$) 기판위에 성장된 Ce:YIG($CeY_2Fe_5O_{12}$)가 사용된다. 암 2의 적층구조는 high-k 유전체/Ce:YIG/NOG이며 그 외의 부분은 SiO_2 /Ce:YIG/NOG 구조를 갖는다. SiO_2 층은 가이드 층으로 사용되는 Ce:YIG를 자화 사키기 위하여 도파로에 증착될 자성 박막에 의한 광 흡수를 방지하기 위한

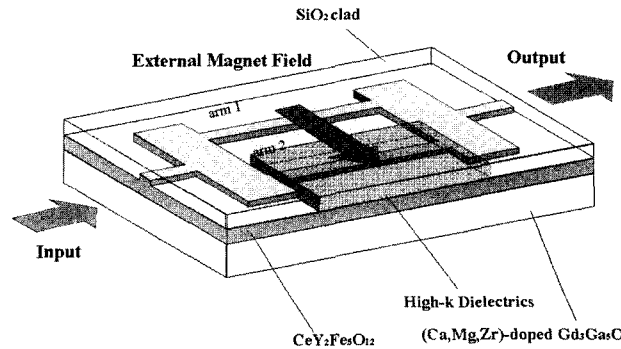


Fig. 2. A schematic diagram of MMI-MZI optical isolator with different layer structure.

목적으로 고안되었다. 이러한 구조를 진행하는 TM 모드들은 서로 다른 적층 구조로 인한 다른 비가역적 위상 변위를 갖게 된다. 최적화된 Ce:YIG 가이드층의 두께를 구하기 위하여 각 적층 구조에서 전향 진행하는 광과 후향 진행하는 광의 진행상수를 구하여야 한다. 그리고 단일 자장 방향하에서 아이솔레이터로 동작하기 위한 식(9)과 (10)을 만족하는 광이 진행하는 거리 L 을 결정 하여야 한다.

$$(\beta_{n1} - \beta_{n2})L = 2m\pi \quad (9)$$

$$(\beta_{b1} - \beta_{b2})L = (2n+1)\pi \quad (10)$$

여기서 β_{n1} , β_{b1} 는 암 1에서의 전향 진행하는 광과 후향 진행하는 광의 진행 상수 값이고 β_{n2} , β_{b2} 는 암 2의 전향 진행하는 광과 후향 진행 하는 광의 진행 상수 값이다. m 과 n 은 정수이다. 위의 언급 조건하에서 전향 진행하는 광은 입력 MMI 결합기를 통과한 후 동일한 광 세기를 갖고 암 1과 암 2로 분기 되어 진행하고 출력 MMI 결합기에 동일한 위상으로 결합하여 단일 모드(single-mode) 출력 도파로로 진행한다. 그러나 반사되는 후향 진행하는 광은 입력 도파로에 연결된 MMI 결합기에 180°의 위상차를 갖고 진행하게 되어 입력 도파로로 진행하지 못하게 된다. 그러므로, 이 소자는 단일 방향의 자장하에서 광 아이솔레이터로 동작하게 된다.

3.2. 광 아이솔레이터의 디자인과 동작특성

광 아이솔레이터에는 Ce:YIG가 가이드층으로 사용되고 있으며, 자화 방향은 박막 표면에 평행하다. RF 스퍼터링(RF sputtering) 방법을 이용하여 (111) 방향의 NOG 기판위에 Ce:YIG를 증착하였다. Fig. 3은 인가 자장이 박막의 평면 방향일 때 VSM(vibrating sample magnetometer)을 이용하여

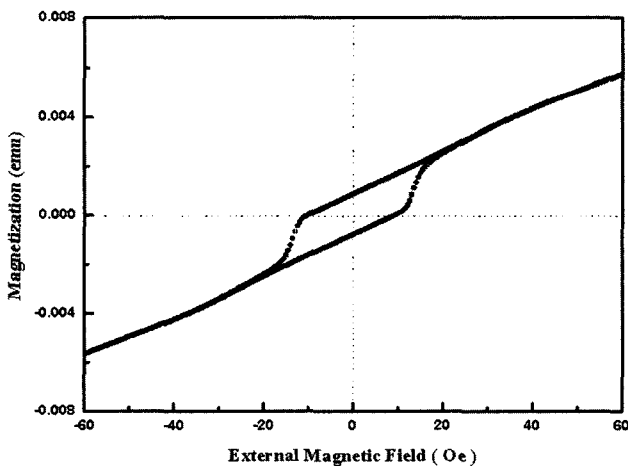


Fig. 3. Hysteresis loop of the CeY₂Fe₅O₁₂ measured on film plane and parallel to external magnetic field at room temperature.

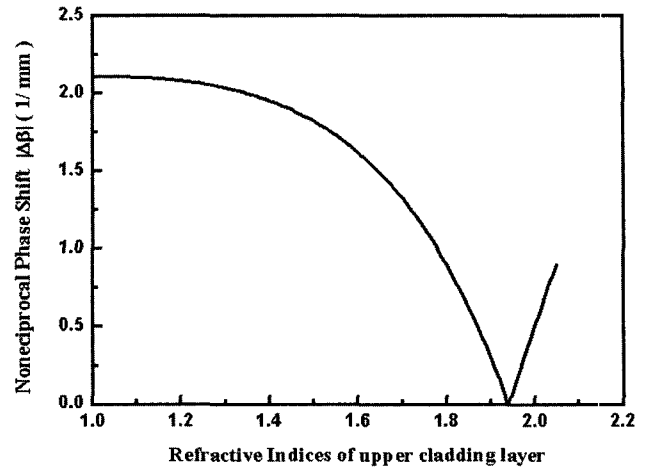


Fig. 4. Calculated nonreciprocal phase shift depending on refractive indices of upper cladding layer.

상온에서 측정된 시료의 자기 이력 곡선(hysteresis loop)이다. 포화 자장 값은 20 Oe이며, 측정된 패러데이 회전값은 1.55 μm에서 4,500°/cm이다. 간섭계의 두 도파로들의 비가역적 위상변위가 최소가 될 때 식(9)와 식(10)을 만족하는 진행거리는 최소가 된다. 클래딩 층을 구성하는 물질의 굴절율에 따른 비가역적 위상 변위를 계산하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과로부터 클래딩 층의 굴절율이 기판의 굴절율과의 차이가 작을 때 비가역적 위상 변위가 작아짐을 알 수 있으며, 전자 소자에 이용되는 high-k 유전체인 HfO₂는 이러한 조건을 만족 시킬 수 있을 것이다[7, 8]. RF 스퍼터링 방법으로 SiO₂ 기판위에 0.5 μm 두께의 HfO₂를 증착하였으며, 1.55 μm에서 측정된 굴절율은 1.98이었다.

최적화된 Ce:YIG 자성 박막의 두께를 결정하기 위하여 1.55 μm 파장에서 TMO 모드에 대한 비가역적 위상 변위를

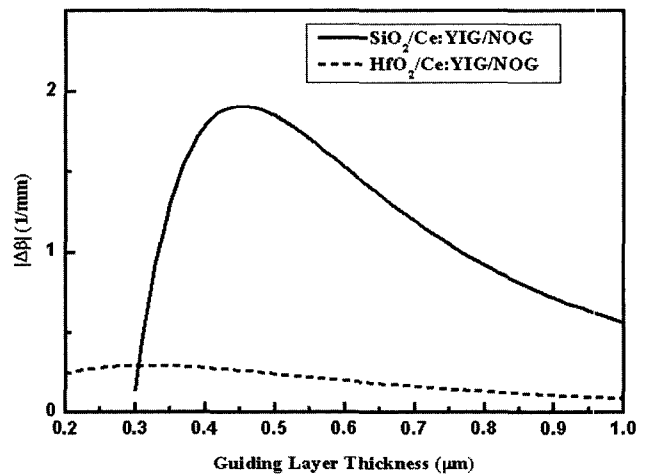


Fig. 5. Calculated nonreciprocal phase shift $|\Delta\beta|=|\beta_n-\beta_b|$ of TMO mode at a wavelength 1.55 μm.

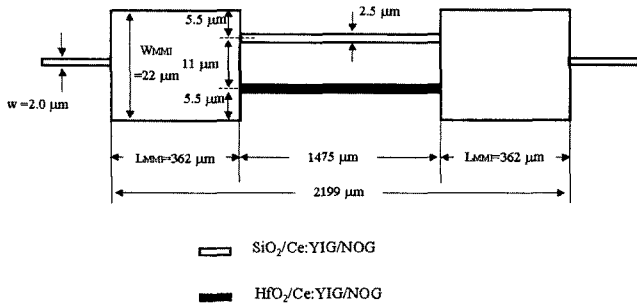


Fig. 6. Schematic layout of MMI-MZI optical isolator.

계산하였다. 계산에 사용된 슬랩 도파로 구조는 각각 SiO₂/CeYIG/NOG, HfO₂/Ce:YIG/NOG이다. Fig. 5에 결과를 나타내었다. 계산에 이용된 굴절율은 SiO₂, CeYIG, NOG 대하여 1.44, 2.21, 1.95를 사용하였다. 두 도파로 사이의 비가역적 위상 변위의 차는 Ce:YIG 가이딩 층이 0.45 μm일 때 최대가 되므로, 아이솔레이터로 동작하기 위한 비가역적 위상변위기(nonreciprocal phase shifter)의 길이가 최소가 된다.

가이딩 층의 두께를 결정한 후 3D 광전송 방법(Beam Propagation Method)을 이용하여 MMI-MZI 구조를 최적화하였다.

광진행 손실과 결합 손실을 고려한 소자의 구조는 다음과 같다. TM 모드에 대하여 단일 모드 도파로가 되도록 하기 위한 입력과 출력 도파로의 폭은 2 μm이고, 간섭계의 두 도파로의 폭은 2.5 μm이다. 도파로들의 식각 깊이는 0.08 μm이다. MMI 결합기는 1×2 3-dB 결합기의 역할을 하고 간섭계의 두 도파로들 사이의 광 결합현상이 일어나지 않도록 고안되었다. MMI 결합기의 폭과 길이는 각각 W_{MMI}=22 μm, L_{MMI}=362 μm이다. 아이솔레이터의 동작 특성을 만족시키기 위해 간섭계 도파로의 길이를 유효 굴절율 방법(effective

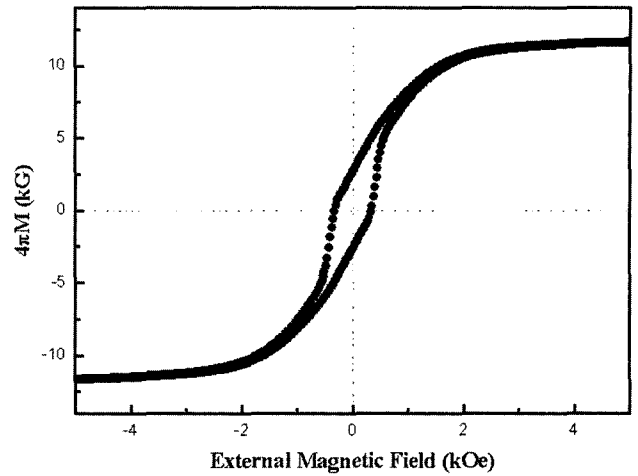


Fig. 8. Hysteresis loop for an as-deposited magnetic film onto a SiO₂ substrate measured at room temperature.

refractive index)을 이용하여 계산하였고, 1,475 μm를 얻었다. 소자의 개략적인 구조를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 디자인된 아이솔레이터의 1.55 μm에서의 전향 손실(forward loss)과 후향 손실(backward loss)에 대한 전산 모사 결과를 보이고 있으며, 계산된 값은 각각 0.5 dB, 32.0 dB이다.

간섭계의 두 도파로들의 자기 광학적 가이딩 층만을 선택적으로 자화시키길 목적으로 Sm₁₈Co₈₂ 물질을 SiO₂ 기판위에 2 μm 두께로 증착하였다. Fig. 8은 상온에서 측정된 자성 박막의 자기 이력 곡선(hysteresis loop)이다. 잔류 자화의 크기는 3 kG이고, 고유 보자력(intrinsic coercivity)은 330 Oe이다. 균일하게 자화된 자성 박막에 의해 만들어지는 자기장의 세기는 정자기 퍼텐셜(magnetostatic potential)로부터 구할 수 있으며[9], 자성 박막의 자화가 균일하고, 박막의 길이에 비해 폭이 아주 작다는 가정 하에[10] 광의 진행 방향에 수직

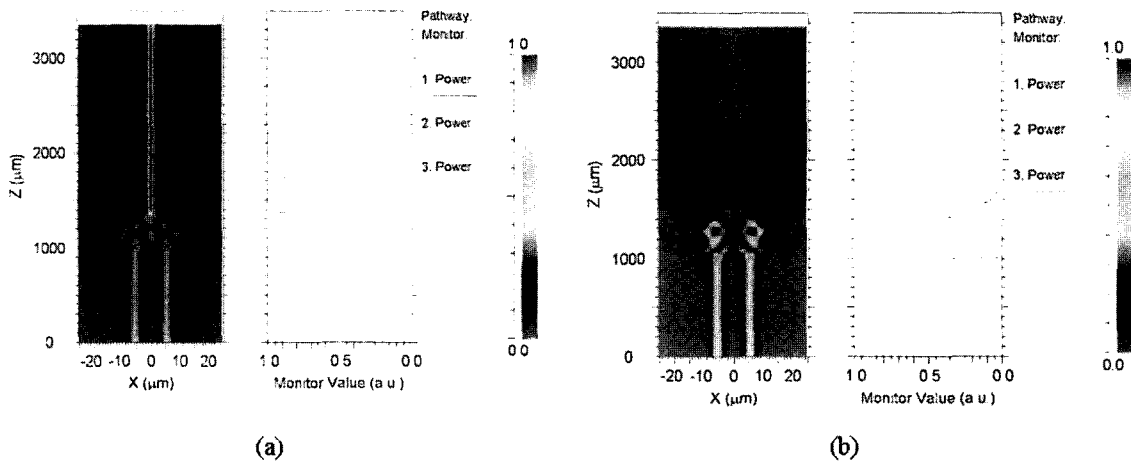


Fig. 7. Simulation results for forward- and backward-propagation using 3D-BPM at a wavelength of 1.55 μm. a) forward direction b) backward direction.

인 횡축 방향의 자기장의 크기를 계산하였다. 계산된 자기장의 크기는 자성 박막에서 1 μm 거리에서의 크기이다. 자성 박막의 폭이 100 μm, 150 μm, 200 μm인 경우 박막의 중앙에서 계산된 자장의 세기는 각각 38 Oe, 26 Oe, 19 Oe이다. 그러므로 디자인된 소자의 클래딩 층의 두께가 0.5 μm 인 경우 Ce:YIG 가이드층을 포화 자화시키기 위해서는 자성 박막의 폭이 200 μm보다 작아야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

자기 광학적 물질인 Ce:YIG 가 가이드층으로 이용된 집적 광 아이솔레이터를 다중 모드 간섭을 이용하여 제안하고 디자인 하였다. 단일 방향의 인가 자장을 이용하여 자기 광학적 물질을 자화 시켜 소자의 아이솔레이션 동작을 얻기 위해 비대칭 적층 구조를 갖는 MMI-MZI 구조를 이용하였다. 비대칭 적층 구조는 각각 HfO₂/CeY₂Fe₅O₁₂/NOG와 SiO₂/CeY₂Fe₅O₁₂/NOG이다. 최적화된 가이드층의 두께는 0.45 μm이고, 비가역적 위상 변위기의 길이는 1,475 μm이다. MMI 결합기의 폭과 길이는 간섭계의 두 도파로들 사이의 광 결합 현상이 없고, 1×2 3-dB 결합기가 될 수 있도록 결정하였다. Ce:YIG 가이드층을 포화 자화시키기 위하여 자성 박막을 이용하였고, 가이드층을 자화시키기 위해서는 200 μm 미만의 폭을 갖는 박막이 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] T. Mizumoto, H. Chihara, N. Tokui, and Y. Naito, *Electron. Lett.*, **26**, 199(1990).
- [2] J. Fujita, M. Levy, R. M. Osgood, Jr., L. Wilkens, and H. Dotsch, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2158(2000).
- [3] A. F. Popkov, M. Fehndrich, M. Lohmeyer, and H. Dtsch, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 250(1998).
- [4] N. Bahlmann, V. Chandrasekhara, A. Erdmann, R. Gerhardt, P. Hertel, R. Lehmann, D. Salz, F. Schrteler, M. Wallenhorst, and H. Dtsch, *J. Lightwave Technol.*, **16**, 818(1998).
- [5] H. Yokoi, and T. Mizumoto: *Electron. Lett.*, **33**, 1787(1997).
- [6] L. B. Soldano, and E. C. M. Penning, *J. Lightwave Technol.*, **13**, 615(1995).
- [7] M. Gilo, and N. Croitoru, *Thin Solid Films.*, **350**, 203(1999).
- [8] M. Alvisi, S. Scaglione, S. Martelli, A. Rizzo, and L. Vasanelli, *Thin Solid Films.*, **354**, 19(1999).
- [9] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. New York, Wiley, p. 192.
- [10] M. Levy, R. Scarmozzino, R. M. Osgood, Jr., R. Wolfe, F. J. Cadieu, H. Hedge, C. J. Gutierrez, and G. A. Prinz, *J. Appl. Phys.*, **75**, 6286(1994).

Integrated Optical Waveguide Isolator Based Multimode Interference Using Magneto-optic Characteristics

Jeong Su Yang*

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 22 February 2005, in final form 25 March 2005)

A novel interferometric isolator has been proposed and designed to fabricate waveguide magneto-optic isolator operating at a wavelength of 1.55 μm. The device consists of MMI (multimode interference) couplers and has a magneto-optic guiding layer with different layer structure in arms of the interferometer. The layer structures in the arms of interferometer are HfO₂/CeY₂Fe₅O₁₂/NOG and SiO₂/CeY₂Fe₅O₁₂/NOG, respectively. This configuration give rise to different nonreciprocal phase shift. In consequence, the isolator operates under a unidirectional magnetic field. The optimized structure of the isolator was determined by a 3D beam propagation method.

Key words : optical isolator, nonreciprocal phase shift, multimode interference coupler, garnet