

웨이퍼 직접 접합법을 이용하여 제작된 다중 모드 간섭 영역을 가진 집적 광 도파로 아이솔레이터

노종욱 · 양정수** · 이우영 · 옥성해* · 우덕하* · 변영태* · 전영민* · 이 석*

연세대학교 금속시스템공학과

*한국과학기술연구원 광기술연구센터

**연세대학교 나노과학기술연구소

An Integrated Multimode Interference Optical Waveguide Isolator Fabricated by Wafer Direct Bonding Technology

J. W. Roh, J. S. Yang**, W. Y. Lee, S. H. Ok*, D. H. Woo*, Y. T. Byun*, Y. M. Jhon* and S. Lee*

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

*Photonic Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

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

Abstract : An integrated optical isolator based on multimode interference (MMI) has been studied. Wafer direct bonding technology was used in order to make an integrated optical isolator. Prior to making a direct bonding between Ce : YIG(CeY₂Fe₅O₁₂) thin film cladding layer and InGaAsP guiding layer, wafer direct bonding between (100)-oriented InP and (111)-oriented GGG(Gd₃Ga₅O₁₂) was investigated. We found that wafer direct bonding between (100)-oriented InP and (111)-oriented GGG was successfully achieved and effective for the integration of a waveguide optical isolator. In order to accomplish direct bonding between Ce : YIG thin film cladding layer and InGaAsP guiding layer for fabrication of an integrated optical waveguide isolator, the same process has been adopted. The isolation ratio in our device was found to be 2.9 dB at the wavelength of 1.55 μm .

(Received August 4, 2005)

Key words : Optical isolator, Wafer direct bonding, Magneto-optic, Mutimode interference, Garnet

1. 서 론

광통신 시스템에 있어서 원하지 않는 반사광으로부터 능동 소자를 보호하고 광신호 처리의 안정성을 높이기 위하여 광 아이솔레이터는 필수적인 구성요소이다. 특히 광학 기술의 폭 넓은 응용을 위해서 집적 광 도파로 아이솔레이터의 개발은 필수적이라 할 수 있으며, 소자 크기의 소형화와 획기적인 비용절감을 이룰 수 있다는 장점으로 인하여 그 연구가 빠르게 진행되고 있다 [1].

자기상 맷힘(self imaging) 이론에 근거한 다중 모드 간섭 효과(multimode interference)의 응용은 소자의 소형화와 제작 공정상의 용이함을 가진 광소자의 구현을 가능하게 하며, 광 도파로 아이솔레이터에서 비가역적 위상 변위(nonreciprocal phase shift)의 이용은 모드 전환을 이용하는 광 아이솔레이터와 달리 서로 직교 편극된 모드 사이의 위상 맞춤과 복잡한 자화(magnetization)의 조절이 필요 없다는 장점을 가지고 있다 [2-4]. 특히, Ce : YIG(CeY₂Fe₅O₁₂)와 같은 가넷 자성 박막은 1.30 μm 부터 1.55 μm 의 파장의 빛에서 광학적 손실이 작은 동시에 비가역적 위상 변위를 일으키는 주된 요인인 패러데이 회전이 매우 크다는 장점을 가지고 있어 집적

광 아이솔레이터의 구현에 있어 적합한 물질이라고 할 수 있다 [5]. 단일 칩 기반의 집적 광 도파로 아이솔레이터는 InGaAsP/InP 층 구조의 반도체 광 도파로와 자기 광학적 특성을 일으키는 가넷 자성 박막의 접합을 통해 구현되나, 반도체 광 도파로 층과 가넷 자성 박막사이의 성장 조건 및 결정 구조의 상이성으로 인하여 에피택시한 성장이 어렵다는 소자 제작상의 한계를 가지고 있으며, 그에 따라 웨이퍼 직접 접합법이 집적 광 도파로 아이솔레이터 제작에 있어 유일한 대안으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 O₂ 플라즈마를 통한 표면 활성화를 이용하여 다중 모드 간섭 영역을 포함하는 InGaAsP 반도체 가이드 층과 Ce : YIG 박막 클래딩 층의 웨이퍼 직접 접합에 대해 연구하였으며, 그 실험 결과를 바탕으로 두 기관 사이에 공극(air gap)이 없는 집적 광 도파로 아이솔레이터를 구현하였다.

2. 이론적 배경

그림 1은 반도체 가이드 층과 자기 광학 클래딩 층으로 이루어진 광 도파로 구조의 비가역적 위상 변위기의 기본적인 구조를 보여준다. 비가역적 위상 변위를 이용한 집적 광 도파로 아이솔레이터를 구현하기 위하여 외부 자기장은 빛의

Corresponding authors :¹⁾W. Y. Lee, ²⁾S. Lee

[¹⁾Tel.: 82-2-2123-2834, E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr]

[²⁾Tel.: 82-2-958-5707, E-mail: slee@kist.re.kr]

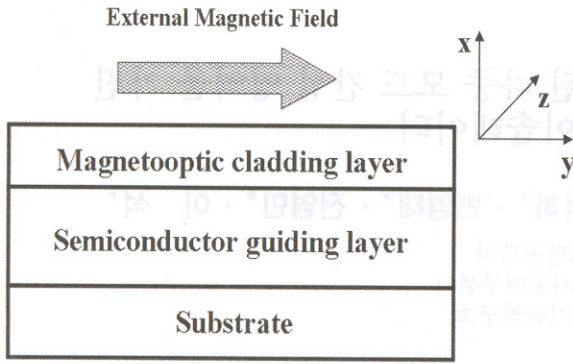


Fig. 1. A schematic diagram of the triple-layered slab optical waveguide with a magneto-optic cladding layer.

진행방향인 z 축 방향의 횡축에 수직으로 인가되어야 한다. 광도파로를 구성한 물질의 광 진행 손실이 없다고 가정할 경우, 자기 광학 클래딩 층에 대한 자이로트로픽 상태 유전율 텐서 $[\kappa]$ 는 식(1)로 나타내어진다.

$$[\kappa] = \begin{pmatrix} \kappa_0 & 0 & i\xi \\ 0 & \kappa_0 & 0 \\ -i\xi & 0 & \kappa_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

비대각선 구성 요소 $\xi = 2\sqrt{\kappa_0}\Theta_F/k_0$ 로 표현되며, κ_0 , Θ_F , k_0 는 각각 유전 상수, 패러데이 회전, 진공중의 파수이다. 이러한 자기 광학적 배치에서 빛의 진행 방향에 따른 영향을 받지 않는 TE(Transverse Electric field) 모드들의 진행상수와는 달리 TM(Transverse Magnetic field) 모드들의 진행상수들은 빛의 진행 방향에 따라 다른 진행상수들을 가지게 된다 [6]. 이에 따라, 광도파로를 진행하는 TM 모드만이 패러데이 회전에 의한 비가역적 위상 변위(non reciprocal phase shift)를 하게 된다. 그림 2는 위와 같은 이론을 바탕으로 본 실험에서 제작된 집적 광 아이솔레이터의 개략도를 보여준다. 다중 모드 간섭 영역의 폭은 $30\ \mu\text{m}$ 이며, 길이는 $1967\ \mu\text{m}$ 이다. 입력 도파로와 출력 도파로의 폭은 $4\ \mu\text{m}$ 이며 InGaAsP(1.25Q) 가이드 층의 높이는 $0.44\ \mu\text{m}$ 로 포토리소그래피 공정을 이용하여 제작되었다. 제작되어진 집적 광 도파로 아이솔레이터의

다중 모드 간섭 영역은 Ce : YIG/InGaAsP(1.25Q)/InP의 층 구조를 가지고 있으며, 그 위의 입력 도파로와 출력 도파로의 층 구조는 air/InGaAsP(1.25Q)/InP의 층 구조를 가지고 있다

3. 실험 방법

자기 광학 클래딩 층으로 사용될 Ce : YIG 박막 층은 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 (111)-oriented NOG[(Ca, Mg, Zr)-doped $\text{Gd}_3\text{O}_5\text{O}_{12}$] 기판 위에 증착하였다. 이때 RF power는 50W였으며, 스퍼터링 가스는 Ar과 O_2 혼합 가스를 사용하였다. 혼합 가스 압력은 2.0×10^{-2} Torr 이었다. 증착된 Ce:YIG 박막의 패러데이 회전은 $1.55\ \mu\text{m}$ 의 파장을 가지는 빛에서 $4500\ \text{deg/cm}$ 로 측정되었다. Ce:YIG 박막 클래딩 층과 InGaAsP 가이드 층간 접합을 위하여 웨이퍼 직접 접합법을 이용하였다. Ce:YIG 박막 클래딩 층과 InGaAsP 가이드 층의 직접 접합에 앞서 화학적 표면 활성화 방법과 O_2 플라즈마를 이용한 표면 활성화 방법이 각각 Ce:YIG 박막의 미세 표면 거칠기에 미치는 영향을 조사하였다 [7,8]. 이를 위해, H_3PO_4 용액에서 5분간 화학적 처리를 한 Ce:YIG 박막과 100W RF power, 0.3 Torr 의 O_2 플라즈마를 사용하여 30 초간 플라즈마 처리한 Ce:YIG 박막의 미세 표면 거칠기를 AFM(Atomic Force Microscopy)을 통하여 서로 비교하였다. O_2 플라즈마를 이용한 표면 활성화의 적절한 조건을 조사하기 위하여 Ce:YIG 박막 클래딩층과 InGaAsP 가이드 층간 직접 접합 실험 전, 자기 광학 효과를 나타내는 가넷 박막층과 광도파로층으로 사용된 InGaAsP 층을 증착시키기 위한 기판으로 흔히 사용되는 (111)-oriented GGG 기판과 (100)-oriented InP 기판간 직접 접합 실험을 수행하였다. (111)-oriented GGG 기판과 (100)-oriented InP 기판간 직접 접합 실험은 웨이퍼 직접 접합에 있어 가장 큰 영향을 미치는 기판의 결정 구조 및 격자 상수 그리고 열 팽창 계수가 Ce:YIG 박막 클래딩층과 InGaAsP 가이드 층과 각각 유사하다는 점에서 그 의의를 가진다. (111)-oriented GGG 기판과 (100)-oriented InP 기판을 각각 trichloroethylene-acetone-methanol 순으로 일반적인 기판

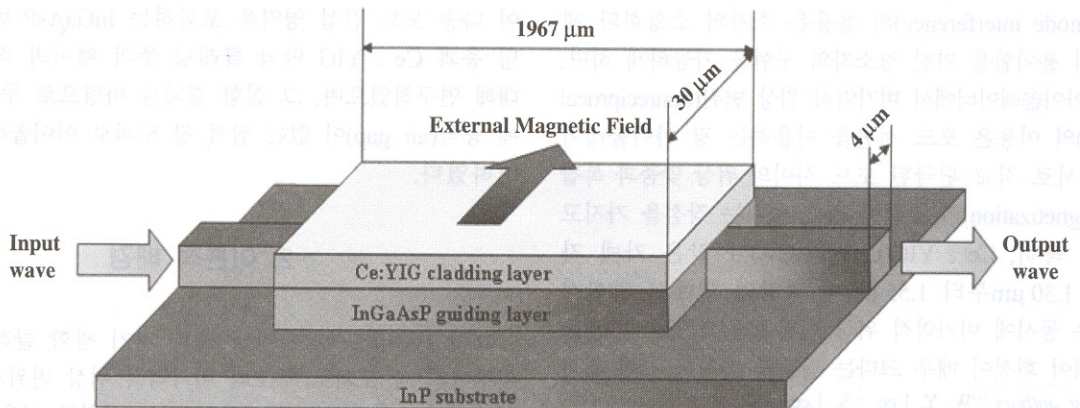


Fig. 2. A schematic diagram of an optical isolator with a multimode interference(MMI) section.

처리를 행한 후 100W RF power, 0.3 Torr에서 O₂ 플라즈마에 30 초간 노출시켜 표면을 활성화시켰다. 표면이 활성화된 GGG 기판과 InP 기판을 deionized water에 담구어 기판 표면에 hydroxyl 기를 형성하였으며, hydroxyl기가 형성된 두 표면을 접촉시켜 초기 접합을 형성시켰다. 초기 접합된 시편을 시편 전체에 220 MPa의 압력을 가하며 220 °C의 Ar 분위기에서 2 시간동안 열처리를 통해 두 기판 간 접합력을 강화시켰다. 직접 접합된 GGG/InP 기판의 단면을 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 공극의 존재 여부를 관찰하였다. (111)-oriented GGG 기판과 (100)-oriented InP 기판의 직접 접합 조건은 단일 칩 기반의 집적 광 도파로 아이솔레이터의 제작을 위한 InGaAsP/InP 층 구조를 가진 반도체 광도파로 층과 Ce:YIG 박막 클래딩 층의 직접 접합에 응용되어졌다.

4. 결과 및 고찰

가넷 자성 박막과 반도체 기판간의 웨이퍼 직접 접합

자기 광학 효과가 일어나는 가넷 자성 클래딩 층과 반도체 기판간의 직접 접합에 있어 두 층사이의 공극은 집적 광 도파로 아이솔레이터의 효율을 급격히 감소시키는 직접적인 원인이 된다 [9]. 따라서 제작된 아이솔레이터의 효율을 높이고 기계적 안정성을 향상시키기 위하여 다중 모드 간섭 영역 전체에 걸쳐 공극이 없는 직접 접합이 요구되어진다. 접합하고자 하는 기판의 미세 표면 거칠기의 RMS(root mean square) 값은 직접 접합을 위한 기판 상태를 나타내는 대표적인 변수이며, Si 기판의 경우 미세 표면 거칠기의 RMS 값이 5 Å미만일 때가 실온에서 웨이퍼 표면 원자간 공유결합을 통한 직접 접합에 적합한 것으로 보고 된 바 있다 [10]. 본 연구에서 AFM을 이용하여 Ce:YIG 박막의 미세 표면 거칠기를 측정된 결과, H₃PO₄ 용액에서 5 분간 화학적 처리를 한 Ce:YIG 박막의 미세 표면 거칠기 RMS 값은 53.78 Å이었으며, 100W RF power, 0.3 Torr의 O₂ 플라즈마를 사용하여 30 초간 표면 처리한 Ce:YIG 박막의 미세 표면 거칠기 RMS 값은 4.05 Å으로 측정되었다. 이 결과로부터 화학적 처리를 통한 표면 활성화 방법보다 O₂ 플라즈마를 이용한 표면 활성화 방법이 기판의 미세 표면 거칠기를 줄일 수 있음을 알 수 있었으며, 그로 인해 두 기판 사이에 공극이 없는 두 기판간 직접 접합에 있어 O₂ 플라즈마를 이용한 표면 처리가 더욱 효과적임을 알 수 있다. 그림 3은 O₂ 플라즈마 표면 처리를 통해 웨이퍼 직접 접합이 이루어진 GGG/InP 기판의 단면을 SEM을 이용하여 관찰한 이미지로써, 두 기판 사이에 공극 없이 직접 접합이 형성되었음을 보여준다. 위와 같은 (111)-oriented GGG 기판과 (100)-oriented InP 기판의 직접 접합 실험은 단일 칩 기반의 집적 광 도파로 아이솔레이터의 제작을 위한 InGaAsP/InP 층 구조를 가진 반도체 광도파로 층과 Ce:YIG 박막 클래딩 층의 직접 접합에 성공적으로 응용되어졌다. 그림 4는 O₂ 플라즈마를 이용하여 GGG/

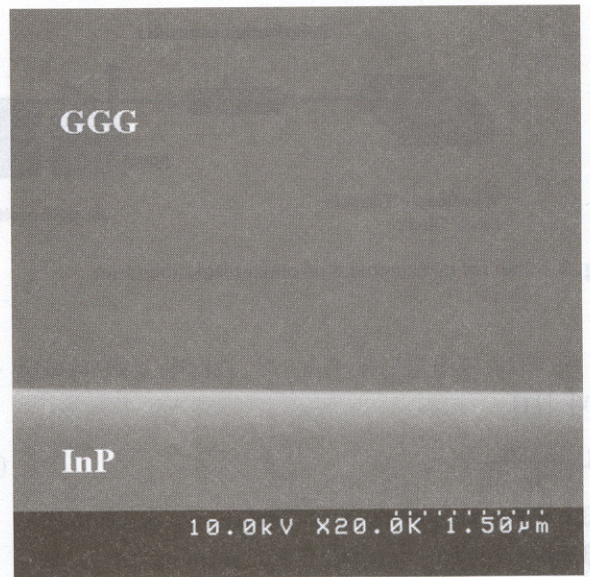


Fig. 3. A cross sectional SEM image of bonded sample between InP and GGG(Gd₃Ga₅O₁₂).

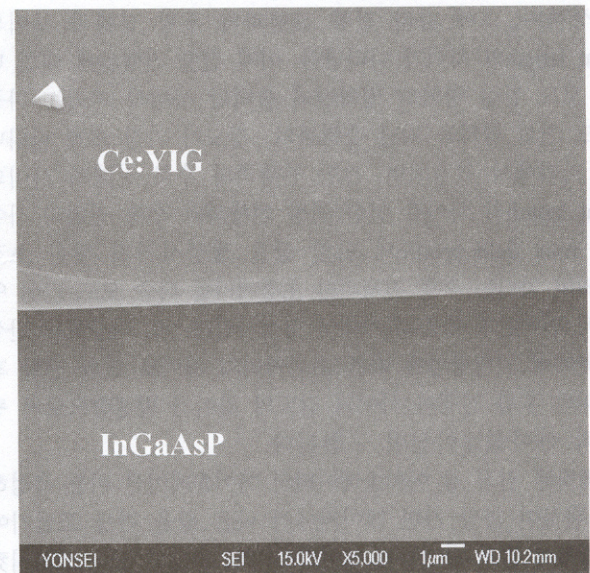


Fig 4. A cross sectional SEM image of bonded sample between InGaAsP and Ce:YIG(CeY₂Fe₃O₁₂).

InP 기판간의 직접 접합과 동일한 조건에서 직접 접합된 Ce:YIG 박막 클래딩 층과 InGaAsP 광 도파로 층 사이를 SEM을 이용하여 관찰한 이미지이며, Ce:YIG/InGaAsP 기판의 단면 역시 GGG/InP 기판과 같이 두 기판사이에 공극 없이 직접 접합된 것을 알 수 있다.

광학적 아이솔레이션 측정 결과

다중 모드 간섭 효과는 전자기파의 진행 방향에 따라 다중 모드 간섭 도파로 내에서 입력파와 같은 상이 주기적으로 하나 이상 형성되는 자기상 멧힘에 기반을 두고 있다. 입사파의 자기상 멧힘을 구현하기 위한 다중 간섭 영역의 길이는 가장 낮은 차수의 모드로부터 얻어진 beat length

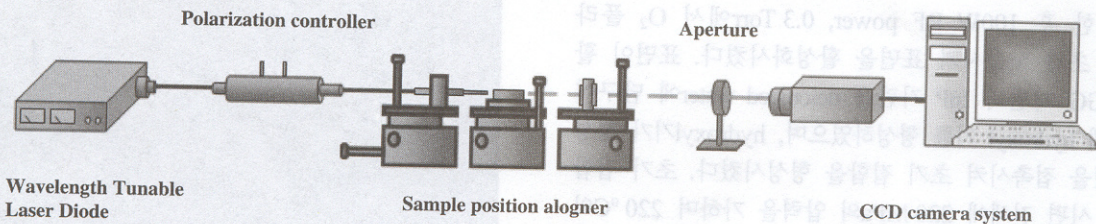


Fig. 5. Setup for measurement of optical isolation ratio.

L_π 에 의해 결정되는데 L_π 는 식. (2)와 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (2)$$

β_0 : propagation constant of fundamental mode

β_1 : propagation constant of first order mode

외부 자기장하에서 비가역적 위상변위는 자기 광학 클래딩 층을 가지는 다중 모드 간섭 영역을 지나가는 TM 모드에서 발생하며, 그에 따라 전향 진행파와 후향 진행파 사이의 beat length의 차이가 나타난다. 이때 전향 진행파에 대한 다중 모드 간섭 영역의 입력단과 출력단 사이의 거리는 다중 모드 산란 영역을 지난 출력파의 강도가 가장 크게 나타나는 거리에서 결정되며, 전향 진행파와 후향 진행파 사이의 beat length의 차이로 인한 전향 진행파와 후향 진행파 사이의 input field profile의 단일 상을 생성시키기 위한 초점 거리의 차이는 후향 진행파의 초점거리를 다중 모드 간섭 영역의 입력단과 다른 위치에서 형성시킨다. 즉, 다중모드 간섭 영역에서 진행방향에 따른 초점거리의 차이로 인한 전향 진행파와 후향 진행파 사이의 강도의 차이가 발생함으로써 광학적 아이솔레이션이 구현된다.

제작된 집적 광 아이솔레이터의 아이솔레이션 비를 측정하기 위하여 파장 가변 레이저에서 나온 광을 편광 조절기에 연결하여 집적 광 아이솔레이터에 TM 모드의 광을 입사시켰으며 집적 광 아이솔레이터의 통과한 출력광은 대물렌즈와 CCD카메라를 통해 TV 모니터로 관찰하였다. 출력 광 세기의 정밀한 측정을 위하여 집적 광 아이솔레이터와 CCD 카메라 사이에 산란된 빛의 제거를 위한 조리개를 설치하였다. 출력광의 세기는 광 검출기를 이용하여 측정되었으며, 집적 광 아이솔레이터를 측정을 위한 실험 구성도가 그림 5에 나타나 있다. Ce:YIG 박막 클래딩 층에 단일 방향의 외부 자기장을 인가해주기 위하여 영구 자석이 사용되었으며, 전향 진행하는 빛과 후향 진행하는 빛의 아이솔레이션 비의 측정은 빛의 진행 방향의 변화 없이 외부 자기장의 방향을 역으로 인가해줌으로써 측정하였다. $1.55 \mu\text{m}$ 의 파장에서 검출된 전향 진행파의 세기는 -37.8 dBm 로 측정되었으며, 후향 진행파의 세기는 -40.7 dBm 로 측정되었다. 이때 아이솔레이션 비는 2.9 dB 이며 그림 6은 광 아이솔레이터를 통과한 전향 방향 빛과 후향 방향 빛 사이의 출력 세기와 근시야상을 보여준다.

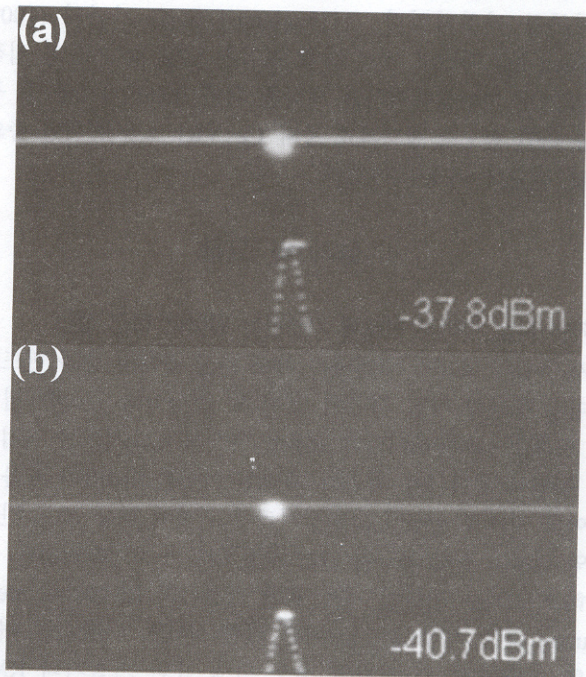


Fig. 6. Near field pattern and intensity of output from an optical isolator for (a) a forward direction and (b) a backward direction.

5. 결 론

본 연구에서 반도체 기이딩 층과 자기 광학 클래딩 층의 웨이퍼 직접 접합을 이용하여 다중 모드 간섭 영역을 지나는 집적 광 도파로 아이솔레이터를 구현하였다. 두 층간 공극없는 직접 접합을 이루기 위하여 O_2 플라즈마를 이용한 (100)-oriented InP 기판과 (111)-oriented GGG 기판사이의 웨이퍼 직접 접합이 조사되어졌으며, 두 기판 간 직접 접합은 집적 광 아이솔레이터 제작에 응용되어졌다. O_2 플라즈마를 이용한 웨이퍼 직접 접합법을 이용하여 제작된 집적 광 도파로 아이솔레이터의 광학적 아이솔레이션 비는 2.9 dB 였으며, 이는 다중 모드 간섭 영역 설계의 최적화와 웨이퍼 직접 접합의 개선 및 다중 모드 간섭 영역 전체에 대한 균일한 외부 자기장의 인가를 통해 보다 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 KIST 비전 21 사업과 Cavendish-KAIST 공동 연구협력센터를 통한 과기부의 지원 하에 이루어졌습니다.

REFERENCES

1. M. Levy, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, **8**, 1300 (2002).
2. F. Auracher and H. H. Witte, *Opt. Commun.*, **13**, 435 (1975).
3. Y. Okamura, T. Negami, and S. Yamamoto, *Appl. Opt.*, **23**, 1886 (1984).
4. M. Levy, R. M. Osgood, H. Hedge, F. J. Cadieu, R. Wolfe, and V. J. Fratello, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 903, (1996).
5. M. Gomi, H. Furuyama, M. Abe, *J. Appl. Phys.* **70**, 7065 (1991).
6. J. S Yang, Y. Shoji, H. Yokoi, M. Ono and T. Mizumoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 7045 (2004).
7. H. Yokoi, T. Mizumoto, M. Shimizu, N. Futakuchi, N. Kai, Y. Nakano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 195 (1999).
8. T. Suni, K. Henttinen, I. Suni, J. Mäkinen, *Jour. Electrochem. Soc.*, **149**, G348 (2002).
9. H. Yokoi, T. Mizumoto, et al, *IEE Proc.-optoelectron.*, **146**, 105 (1999).
10. Q.-Y. Tong and U. M. Gösele, "Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology", p 47, *John Wiley & Sons, Inc*, New York (1999).
11. L. B. Soldano, E. C. M. Pennings, *J. Lightwave Technol.*, **13**, 615 (1995).