

반파장판을 이용한 광섬유-평면도파로 결합기의 편광 의존성 제거

이규호 · 김효겸 · 김광택[†]

호남대학교 광전자 공학과
☎ 506-714 광주 광산구 서봉동 59-1

(2005년 1월 19일 받음, 2005년 3월 30일 수정본 받음)

본 논문에서는 하나의 얇은 반파장판(half-wave plate)을 이용하여 광섬유-평면도파로 결합기(fiber-to-planar waveguide coupler)의 편광 의존성을 줄이기 위한 방법이 제안되었고 실험적으로 검증 되었다. 소자의 편광의존성 제거 원리를 설명하였고 제조과정을 기술 하였다. 실험 결과는 소자의 공진 파장이 입력광의 편광상태에 독립적임을 보였다.

주제어 : half-waveplate, fiber-to-planar waveguide coupler, polarization dependency, evanescent wave coupling.

I. 서 론

단일모드 광섬유를 측면 연마하는 기술을 이용하여 다양한 광통신 및 광센서 소자로 활용할 수 있음은 잘 알려져 있다. 특히 측면 연마 단일모드 광섬유와 평면 도파로가 소산장(evanescent field) 결합된 소자, 즉 광섬유-평면도파로 결합기는 매우 다양한 응용성 때문에 많은 주목을 받아 왔다. 이 소자는 비대칭적 결합에 의하여 특정한 파장에서 공진 결합이 발생한다. 평면도파로의 굴절률이나 두께로 공진 파장을 제어할 수 있기 때문에 광스위치/변조기나 파장 가변 필터로 활용할 수 있음이 보고 되었다.^[1-4]

하지만 광섬유-평면도파로 결합기는 피하기 어려운 편광 의존성을 가지고 있다. 이러한 편광의존성은 평면도파로의 구조적 비등방성 혹은 도파로 재료의 고유한 복굴절에 주로 기인한다. 특히 능동 소자에 활용되는 대부분의 평면도파로 물질은 큰 복굴절을 가지며, 결과적으로 소자의 공진파장이 입력광의 편광상태에 매우 의존하게 된다. 일반 단일 모드 광섬유의 편광 상태는 쉽게 외부 요인에 의해 바뀌기 때문에 단일모드 광섬유 소자는 편광에 무관하게 동작하는 특성이 요구된다. 측면 연마된 단일모드 광섬유 위에 올려지는 평면도파로 물질이 복굴절을 가지지 않고 동시에 대칭적 구조를 가지면 두 직교하는 편광의 공진 파장 차이는 최소가 된다. 평면도파로의 미소한 구조적 복굴절을 편광유지 광섬유의 복굴절로 서로 상쇄시켜 두 직교하는 공진파장을 일치시키는 방법이 보고 되었다.^[5] 하지만 평면도파로가 매우 큰 복굴절을 가지면 이러한 방법을 더 이상 적용할 수 없다. 일반적으로 평면 도파로 소자에 반파장판(half-wave plate)을 삽입하여 소자의 편광 의존성을 줄이기 위한 방법이 잘 알려져 있다.^[6,7] 이 방법은 반파장판을 소자의 중심에 도파로를 절단 후 삽입하는 기법이다.

본 논문에서는 이러한 기술을 활용하여 광섬유-평면도파로 결합기의 편광 의존성을 줄이기 위한 연구를 수행하였다. 광섬유-평면도파로 결합기를 능동 소자로 활용할 경우 평면도파로가 연속적 이어야 한다. 평면도파로 상에 전극을 형성해야 하기 때문이다. 본 논문에서는 반파장판이 측면 연마 광섬유 블록에만 있으며 평면도파로는 연속적인 광섬유-평면도파로 결합기를 제안하였다. 제안된 광섬유-평면도파로 결합기의 편광 의존성을 줄일 수 있음을 2장에서 설명하고 3장에서 소자의 제작과정과 제작된 특성 측정 결과를 보고한다.

II. 구조 및 동작 원리

제안된 소자의 구조는 그림 1과 같다. 측면 연마된 광섬유 위에 광섬유 코어의 굴절률 보다 더 큰 굴절률을 가지는 평면도파로막이 코팅되어있다. 평면도파로는 다중모드를 가질 수 있도록 충분히 두껍다. 광섬유 방향에 대하여 횡 방향으로 홈을 형성하고 그 속에 얇은 반파장판이 끼워져 있는 구조이다.

반파장판은 큰 복굴절을 가지며 이것의 기본 축(principal axis)은 연마된 표면과 45°로 기울어져 있다. 반파장판은 편광 변환기 역할을 한다. 즉 이것을 통과하는 동안 TE(transverse electric) 편광은 TM(transverse magnetic) 편광으로, 그

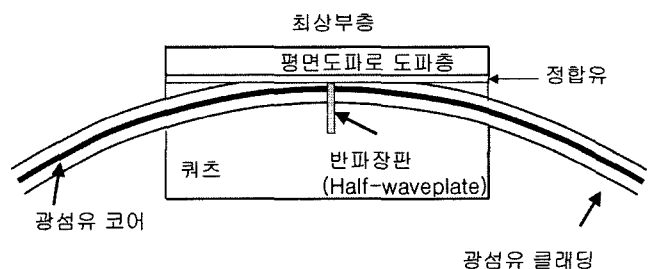


그림 1. 제안된 반파장판을 포함한 광섬유-평면도파로 결합기 구조.

[†]E-mail: ktkim@honam.ac.kr

리고 TM 편광은 TE 편광으로 바뀐다. 따라서 광파가 소자를 통과 하는 절반은 TE 편광으로 나머지 절반은 TM 편광으로 진행기 때문에 편광에 무관한 특성을 가진다. 제안된 소자 구조가 완전하게 편광 무의존성을 가지기 위해서는 광섬유 영역뿐만 아니라 평면도파로 영역에도 반파장판이 있어야 한다. 평면도파로는 측 방향(lateral direction)으로는 빛을 가두지 않기 때문에 큰 회절 손실이 발생하며 이것은 평면도파로에서 광섬유로 역 결합을 방해한다.^[8,9] 즉 평면도파로는 모드 흡수기(mode sink) 역할을 한다. 평면도파로에서 광파가 측 방향으로 회절되어 소멸된다면 굳이 편광을 바꿀 필요가 없다. 이러한 이유로 반파장판이 광섬유 영역에만 존재해도 편광의존성을 제거 할 수 있는 것이다.

광섬유와 평면도파로는 분산 특성이 다르기 때문에 두 도파로 사이에 효과적인 광결합은 특정한 파장에서 발생한다. 이 파장을 공진 파장으로 정의한다. 광섬유와 평면도파로의 고유치 방정식으로부터 평면도파로의 m 차 모드와 결합하는 공진 파장은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_m = \frac{2\pi d_0 (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \psi_1 + \psi_2} \quad (1)$$

여기서 d_0 는 평면도파로의 도파층 두께, n_o 는 평면도파로의 도파층의 굴절률, n_{ef} 는 광섬유의 유효굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 도파층과 상하부 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이로서 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{(n_o^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 ζ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해서는 $\zeta=1$, TM편광에 대해서는 $\zeta=n_o^2/n_i^2$ 을 대입하면 된다. n_1 은 평면도파로의 하부, n_2 는 평면도파로의 상부 클래딩의 굴절률이다. 만일 평면도파로의 상부 클래딩으로 금속이 사용될 경우, n_2^2 은 복소수를 가지며 식 (2)에서 이 값의 실수부만 취함으로써 공진파장을 근사적으로 계산할 수 있다.^[10] 광섬유와 평면도파로 사이에 위상정합조건이 존재하기 위해서는 평면도파로의 상부 클래딩의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 작아야 한다. 광섬유 및 평면도파로 재료들이 복굴절을 가지지 않는다면 평면도파로의 상하부 클래딩의 굴절률이 동일할 때 TE 편광과 TM 편광의 공진파장의 차이가 가장 작아짐을 식 (1)과 (2)는 설명하고 있다.

III. 실험 및 분석

통신용 단일모드 광섬유인 코닝사의 SMF28 모델을 실험에 사용하였다. 퀴츠 블록에 구부러진 홈을 형성하고 광섬유를 에폭시로 고정한다. 홈의 곡률 반경은 50 cm이다. 소자의 중심에 NTT-AT사에서 제공한 15 μm 두께를 가진 폴리이미드 반파장판을 끼우기 위해 대략 폭 20 μm , 깊이 500 μm 를 가진 홈을 광섬유 길이 방향에 수직되게 형성한다. 홈의 폭

은 소자의 삽입손실을 결정하는 중요한 요소이며 가능한 반파장판의 두께와 근접시키는 것이 회절손실을 최소화 할 수 있는 방법이다. 1mm \times 2mm 폴리이미드 반파장판을 홈속에 넣고 굴절률 정합 자외선 경화 에폭시로 고정한다. 이때 반파장판을 끼워서 생기는 추가적인 손실은 통상적으로 0.3 dB 이하로 나타났다. 이후 광섬유 클래딩과 반파장판은 동시에 연마된다. 연마과정이 끝난 후 확대된 표면의 사진이 그림 2에 제시되어 있다.

이 외에 통상적인 방법으로 반파장판을 포함하지 않는 측면 연마 블록을 준비하였다. 연마 후 최소 남은 클래딩의 두께가 약 1 μm 되도록 제작하였다. 평면도파로를 별도의 기판위에 준비한 다음, 이것을 측면연마 광섬유 블록과 물리적 접촉으로 결합시킨다. 두 가지 종류의 평면도파로를 준비하였다. 먼저 굴절률이 1.444인 실리콘 산화막 위에 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착한 실리콘 질화막(silicon nitride) 평면 도파로를 준비하였다. 평면도파로의 두께와 굴절률은 세론(주)에서 제공한 프리즘 결합기를 이용하여 측정하였다. 1550 nm 파장에서 실리콘 질화막(silicon nitrite)의 TE 및 TM 편광의 굴절률은 각각 1.7404와 1.7534이었고 도파로의 두께는 5.9 μm 로 측정되었다. TM 편광의 굴절률이 TE 편광의 굴절률보다 0.013 만큼 더 크다는 사실에 주목한다. 다른 준비된 하나의 도파로는 금속클래딩을 가지는 폴리머 평면도파로이다. 알루미늄을 충분히 두껍게 실리콘 기판위에 증착하고 폴리머를 스피코팅하였다. 폴리머의 굴절률은 1.59이며, TE 편광의 굴절률이 TM 편광의 굴절률 보다 0.001 만큼 더 크다.

소자의 파장 및 편광 특성을 측정하기 위한 측정 장치도가 그림 3에 나타나 있다. 중심 파장영역이 서로 다른 4개의 고휘도 LED를 결합한 장치를 광원으로 이용하였으며, 이 광원을 편광스크램블러로 완전히 무편광 상태로 바꾼다. 본 연구실에서 제조한 리셉타클 편광기를 이용하여 소자에 입력되는 광의 편광 상태를 제어한다. 편광기부터 소자의 결합영역까지 광이 진행할 때 편광 상태가 바뀌는 것을 최소화 하기

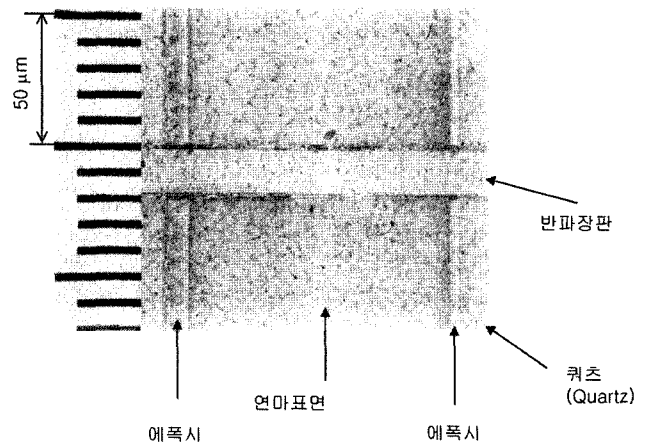


그림 2. 반파장판을 포함하는 측면 연마 광섬유 블록의 표면 확대 사진.

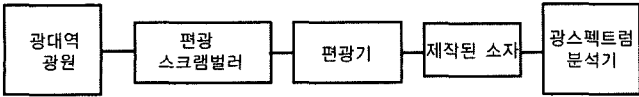


그림 3. 소자의 파장 및 편광 응답특성 측정 장치도.

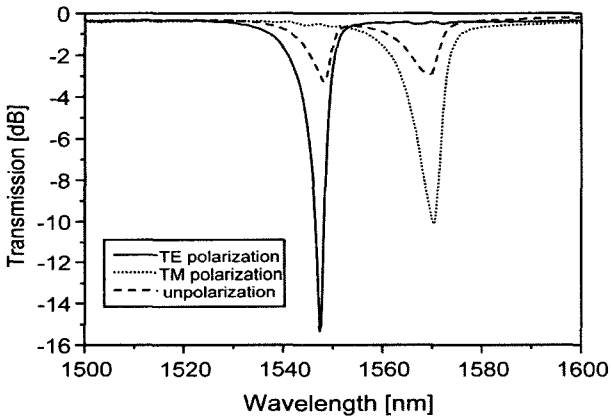
위해 광섬유 입력단의 길이를 5 cm로 정도 매우 짧고 곧게 제작하였다. 소자에 TE 편광, TM 편광 및 무 편광을 입력하여 소자의 파장응답특성을 스펙트럼 분석기로 기록하였다. 이때 파장응답을 1 nm 해상도로 기록하였다.

실리콘 질화막 평면도파로와 측면 연마 광섬유 블록을 결합한 후 측정한 파장응답이 그림 4(a)와 (b)에 제시 되어 있다. 광섬유 클래딩과 같은 굴절률을 가지는 정합유로 측면 연마 블록과 평면도파로 사이에 생기는 미소한 공기층을 제거하였다. 그림 4(a)는 반파장판이 없는 경우의 소자 특성이다. 소자의 삽입손실은 0.5 dB 이하이며, 반치폭은 7~10 nm로 나타났다. 일반적인 경우와 달리 TM 편광의 공진이 TE 보다 더 장파장에서 발생함을 주목한다. 만일 평면도파로의 복굴절이 없는 경우 TE 편광 성분이 더 장파장에 나타나지만 실험에 사용한 실리콘 질화막 평면도파로는 TE 편광의

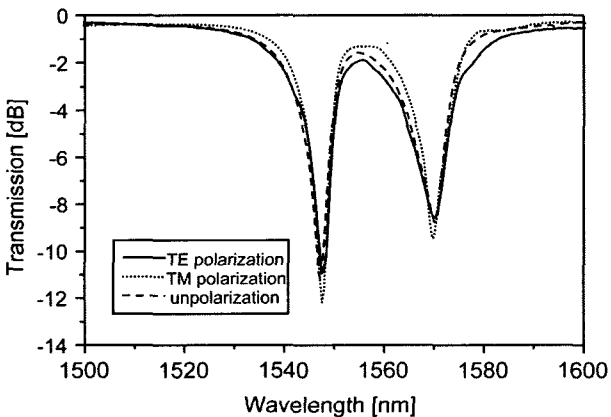
굴절률이 TM 보다 더 작다. 다소 큰 실리콘 질화막 평면도파로의 복굴절 때문에 약 23 nm의 공진파장의 차이가 발생한다. 무 편광 입력의 경우 공진 영역이 분리되었기 때문에 공진 파장에서 3 dB 이상 소멸비를 얻을 수 없다. 즉 TE 편광의 공진파장에서는 광전력의 절반을 차지하는 TM 편광 성분이 평면도파로에 영향을 받지 않고 출력단에 전달되기 때문이다. 그 반대의 경우도 마찬가지이다. 반파장판이 소자의 중간에 끼워진 측면 연마 광섬유 블록을 이용하여 동일한 실험을 한 결과가 그림 4(b)에 제시되어 있다. 소자의 공진은 편광상태에 관계 없이 앞서 실험에서 보였던 TE 및 TM 편광의 공진 파장에서 모두 발생함을 볼 수 있다. TE 및 TM 편광의 공진은 1570 nm 와 1547 nm 에서 각각 발생함을 볼 수 있다. 예를 들어 1547 nm 파장에서 TE 편광 성분이 입력되었을 경우 소자의 반파장판 앞쪽에서 결합이 발생하며 반파장 판을 통과 후에서 편광 상태가 TM으로 바뀌기 때문에 결합이 발생하지 않는다. 반대로 1547 nm 파장에서 TM 편광 성분이 입력되었을 경우 반파장판 앞쪽에서는 공진 결합이 발생하지 않지만 반파장판을 통과 후에는 TE 편광으로 바뀌기 때문에 공진 결합이 발생한다. 반파장판이 있는 소자는 입력광의 편광상태에 관계없이 소자의 TE 및 TM 편광의 공진파장에서 모두 결합이 발생한다. 또 다른 중요한 사실은 TE나 TM으로 편광된 광이 입력 되었을 때 공진결합은 반파장판 앞뒤 영역중 한 영역에서만 발생한다는 것이다.

그림 5(a)와 (b)는 상부 클래딩으로 금속(알루미늄)을 도입한 평면도파로를 측면 연마된 광섬유와 결합한 소자의 파장응답이다. 그림 5(a)는 반파장판이 없는 측면 연마 광섬유 블록을 이용한 소자의 파장응답이다. 금속은 복소 유전률을 가지며 유전률의 실수부가 음의 값을 가지기 때문에 큰 구조적 복굴절을 가진다.^[10] 이는 TE와 TM의 공진 영역을 완전히 분리시키는 결과를 가져옴을 그림5(a)는 보여 주고 있다. 무 편광 입력의 경우 공진파장에서 3 dB의 소멸비를 가짐을 볼 수 있다. TE 편광으로 입력시 TM 편광의 공진파장 영역에서 약간의 골이 생기는 이유는 결합영역에 정확하게 TE 편광으로 입력되지 못한 결과로 보인다. 그 반대의 경우도 마찬가지이다. 그림 5(b)는 반파장판이 있는 측면 연마 블록을 이용한 소자응답이다. 공진이 TE와 TM 편광 모두에서 발생하며 무 편광 입력에서도 큰 소멸비를 보임을 알 수 있다. 공진파장에서 소멸비는 편광에 따라 다소 차이가 있지만 공진 파장은 편광에 무관함을 보여주고 있다.

지금까지의 실험 결과를 볼 때 TE와 TM 편광에 대한 완전히 동일한 응답은 얻기 힘들었다. 이러한 결과는 여러 가지 요인에서 올수 있다. 첫째, 사용한 반파장판이 1550 nm에서는 18 dB 이상의 편광 변환효율을 가지지만 이 파장으로부터 멀어지면 편광변환 효율이 감소한다. 둘째, 반파장판의 기본 축(principal axis)이 소자의 연마 표면과 45°로 정렬되지 못한 경우 편광 변환 효율이 감소한다. 셋째, 반파장판이 놓이는 위치가 소자의 중심에 정확하게 놓이지 않으면 편광에 따른 결합세기의 차이가 발생하는 원인이 된다. 비록 공

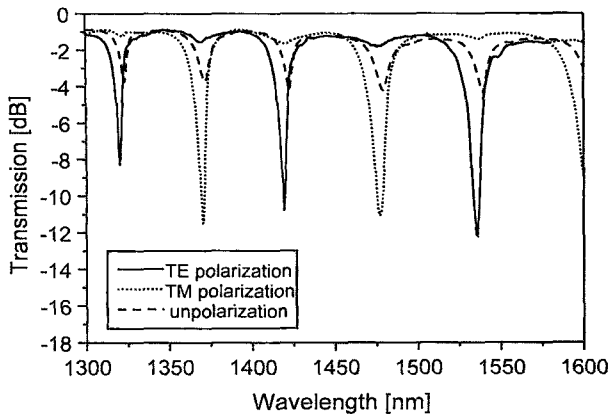


(a)

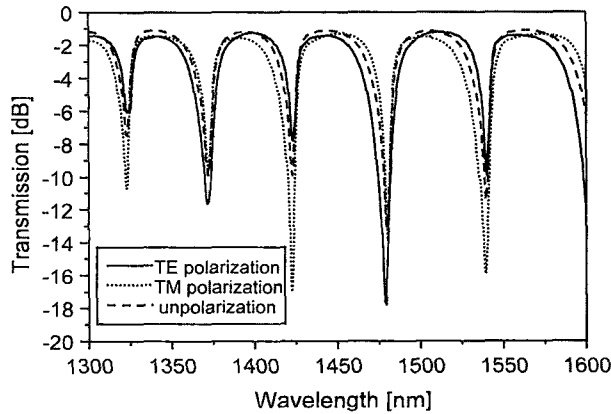


(b)

그림 4. 측면 연마 광섬유-실리콘 질화막 평면도파로 결합기의 파장응답 (a) 반파장판이 없는 경우, (b) 반파장판이 있는 경우.



(a)



(b)

그림 5. 측면 연마 광섬유-금속 클래딩 폴리머 평면도파로 도파로 결합기의 파장 응답 (a) 반파장판이 없는 경우, (b) 반파장판이 있는 경우.

진 파장에서 소멸비가 편광 상태에 따라 다소 차이가 있더라도 공진파장에서 소멸비가 충분히 크다면 이 소자를 디지털 광학소자로 활용할 때는 큰 문제 되지 않을 것으로 여겨진다.

IV. 결 론

본 논문에서는 반파장판을 이용한 광섬유-평면도파로 결합기의 편광의존성을 줄이기 위한 방법을 제안하였고 실험으로 검증하였다. 반파장판을 측면 연마광섬유에 도입함으로써 소자에 입력되는 광의 편광 상태에 관계없이 광 결합이 항상 일정한 공진 파장에서 발생함을 관측하였다. 반파장판에 의한 소자의 잉여손실은 0.3 dB 이하로 나타났다. 제안된 소자에서는 반파장판이 측면 연마광섬유 블록에만 존재하며 평면도파로는 절단되지 않고 연속이다. 이러한 특성 때문에 이 소자를 편광 무의존 광스위치 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 전남대학교 광소재부품연구센터(R12-2002-002)의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] S. Creaney, W. Johnstone, and K. McCallion, "Continuous-fiber modulator with high-bandwidth coplanar strip electrodes," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 355-357, 1996.
- [2] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Low voltage optical fiber switch," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 1A/B, pp. L42-L45, 1998.
- [3] G. Fawcett, W. Johnstone, I. Andonovic, D. J. Bone, T. G. Harvey, N. Carter and T. G. Ryan, "In - line fiber-optical intensity modulator using electro-optic polymer," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 985-986, 1992.
- [4] K. T. Kim, S. Hwang-bo, G. I. Kweon and S. R. Choi, "Widely tunable filter based on side-polished polarisation-maintaining fibre coupler with thermo-optic polymer overlay," *Electron. Lett.*, vol. 40., no. 21, pp. 1330-1332, 2004.
- [5] K. T. Kim, D. S. Yoon, and G. I. Kwoen, "Optical properties of side-polished polarization maintaining fiber coupled with a high index planar waveguide," *Opt. Commun.*, vol. 230, pp. 137-144, Jan. 2004.
- [6] Y. Inoue, H. Takahashi, S. Ando, T. Sawada, A. Himeno, and M. Kawachi, "Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 10, pp. 1947-1957, 1997.
- [7] T. Sawada, S. Ando, H. Miyazawa, H. Takenaka, and S. Sasaki "Ultrathin(5 mm) flexible refractive waveplate of fluoridated polyimide and elimination of polarization sensitivity in Tinanium-diffused Lithium niobate waveguide circuits," *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998, vol. 37, no. 12A, pp. 6408-6413, 1998.
- [8] D. Marcuse, "Investigation of coupling Between a fiber and an infinite slab," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 122-130, 1989.
- [9] R. Vallee, and Gang He, "Coupling between an optical fiber and a planar waveguide," *Opt. Commun.*, vol. 126, pp. 293-307, May, 1996.
- [10] K. T. Kim, H. W. Kwon, J. W. Song, S. Lee, W. G. Jung, and S. W. Kang, "Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side-polished fiber and multimode metal-clad planar waveguide," *Opt. Comm.*, vol. 180, pp. 37-42, 2000.

Elimination of polarization dependency of fiber-to-planar waveguide couplers using a half-waveplate

Kyu Hyo Lee, Hyo Kyeom Kim, and Kwang Taek Kim[†]

Department of Optoelectronics, Honam University, Gwangju, 506-714, Korea

[†]*E-mail: ktkim@honam.ac.kr*

(Received January 19, 2005, Revised manuscript March 30, 2005)

In this paper, a method to eliminate the polarization dependent properties of fiber-to-planar waveguide couplers using a thin half-waveplate is proposed and demonstrated. The operation principle of the device is explained and the fabrication technology is presented. It is experimentally shown that the resonance wavelengths of the device are independent of the polarization state of input light.

OCIS Codes : 060.1810, 060.2310, 060.2340, 060.2370.