J. of the Korean Sensors Society
Vol. 13, No. 3 (2004) pp. 207 – 212

측면 연마 편광 유지 광섬유와 평면 도파로 사이의 소산장 결합을 이용한 광센서

김광택† · 황보승 · 강용철*

Optical Sensor Based on Evanescent Field Coupling Between Side-Polished Polarization Maintaining Fiber and Planar Waveguide Coupler

Kwang Taek Kim†, Sueng Hwangbo, and Yong Chul Kang*

Abstract

We have investigated the optical characteristics of a directional coupler made of a side-polished polarization maintaining fiber in contact with a multimode planar waveguide and its applications as sensors. A device structural condition to achieve the polarization insensitive wavelength response has been presented. The fabricated devices revealed a superior immunity to the bending and the deformation of PM fibers in the input section. It is experimentally shown that the proposed device is suitable for a remote fiber sensor.

Key Words : side-polishing, polarization maintaining fiber, fiber coupler, optical sensor

1. 서 론

측면 연마된 단일 모드 광섬유위에 높은 굴절률을 가지는 평면 도파로층이 형성된 소자는 비대칭 방향성 결합기로 간주되며 통상적으로 광섬유-평면도파로 결합기로 불려진다. 광섬유와 평면도파로의 서로 다른 분산 특성 때문에 두 광 경로 사이에 에너지 교환을 위한 위상 정합 조건은 특정한 파장에서 만족한다[1,2]. 위상 정합 조건을 만족 시키는 파장을 공진 파장으로 정의한다. 공진 파장은 측면 연마 광섬유위에 올려진 평면 도파로의 광학적 상수에 매우 민감하다. 이러한 특성을 이용하여 온도센서[3], 압력센서[4], 물검출 센서[5], 굴절률 센서[6], 금속의 광학상수 센서[7] 등의 다양한 센서 응용이 보고되었다. 일반적으로 광섬유 센서는 편광에 무관하게 동작하는 것이 요구되지만, 평면도파로의 비등방적 구조에 의한 복굴절 혹은 물질 고유의 복굴절 때문에 광섬유-평면도파로 결합기는 편광에 의존하는 특성을 가진다. 따라서 소자에 인가되는 입력광의 편광 상태가 흔들리면 출력광의 세기가 변하거나 공진 파장의 이동이 발생한다. 이러한 문제는 일반 단일모드 대신 편광유지 광섬유를 사용하고 입력광의 편광방향을 편광유지 광섬유의 복굴절 축과 일치시키면 해결된다. 일반 단일 모드 광섬유와 달리 편광 유지 광섬유를 이용하여 용융 결합기[8-10]나 측면 연마 결합기[11] 제작 시 두 직교하는 편광 모드 사이의 교차 결합을 피하기 위해 복굴절축(birefringence axis)을 정교하게 정렬하는 공정이 추가적으로 요구된다.

본 논문에서는 편광유지 광섬유를 측면 연마하고 그 상부에 다중모드 평면도파로가 결합된 비대칭 결합기의 동작 특성을 이론 및 실험으로 분석하였다. 실험에서 편광 유지 광섬유로 판다(PANDA : polarization maintaining and absorption reducing)형 광섬유를 이용하였다. 소자 구조변수를 조절하여 TE(transverse electric) 편광과 TM(transverse magnetic) 편광의 공진 파장을 일치시키는 것이 가능함을 실험으로 보였다. 제작된 소자는 입력단 광섬유의 구부림과 뒤틀림에 매우 안정하게 동작함을 보였다. 제안된 광결합기는 높은 정확도를 가지는 원거리 센서로 활용될 수 있음을 실험적으로 보였다.

호남대학교 광전자공학과(Department of Opto-electronics, Honam University)
*LabMAS
†Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr
(Received : November 4, 2003, Accepted : March 2, 2004)

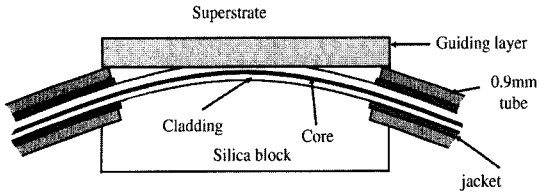
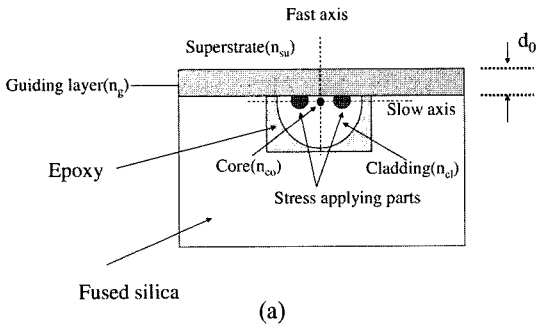
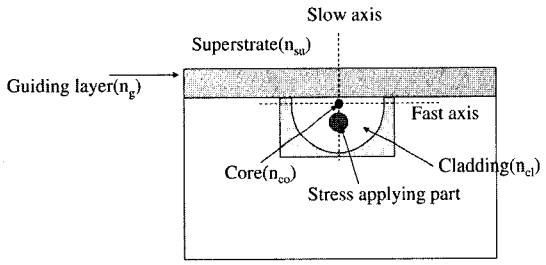


그림 1. 편광 유지 광섬유를 이용한 광섬유-평면도파로 결합기의 구조

Fig. 1. Structure of fiber-to-planar waveguide coupler incorporating a polarization maintain fiber.



(a)



(b)

그림 2. 소자의 중앙에서 단면구조; (a) 판다 광섬유의 느린 축이 평면도파로와 평행인 구조, (b) 빠른 축이 평면도파로와 평행인 구조

Fig. 2. Cross section view at center of device; (a) configuration of that slow axis is parallel with planar waveguide and (b) configuration of that fast axis parallel with planar waveguide.

2. 소자 구조 및 동작원리

판다(PANDA) 광섬유는 두개의 대칭적 응력 부여부가 있고 이로 인해 복굴절현상을 가진다, 두 개의 서로 직교하는 복굴절 축(birefringence axis)을 빠른 축(fast axis)과 느린 축(slow axis)으로 구분한다. 그림 1에 제안된 측면연마 편광유지 광섬유를 이용한 광섬유-평면도파로 결합기의 구조가 제시되어 있다. 소자의 종 방향 중심에서 단면 구조는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2(a)는 느린 축이 상부 평면도파로와 평행인 구조이며, 그림 2(b)는 빠른 축이 평면도파로와 평행한 구조이다. 그림 2(a)의 경우, 판다 광섬유의 두 직교 모드, 즉 느린 편광 모드는 평면도파로의 TE 모드와 결합하고 빠른 편광 모드는 평면도파로의 TM 모드와 결합한다. 그림 2(b)의 정렬 구조는 이와 반대이다. 여기서 느린 축, 혹은 빠른 축과 상부 평면도파로는 수평으로 정확하게 정렬된 것으로 간주한다. 만일 정교하게 정렬되지 않으면 공진 파장에서 높은 소멸비(공진 깊이)를 기대할 수 없다.

소자의 동작특성은 파장응답으로 분석할 수 있다. 여기서 n_{co}, n_{cl}, n_g, 그리고 n_{su}는 광섬유 코어, 광섬유 클래딩, 평면도파로 도파층, 그리고 최상부층의 굴절률을 각각 의미한다. 평면 도파로의 두께를 d_0,로 표시한다. 광섬유 모드와 m차 평면도파로의 모드 사이의 위상 정합 조건을 대입하면 m차 공진 파장이 다음과 같이 결정된다[12,13].

$$\lambda_m = \frac{2\pi d_0 (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \phi_{cl} + \phi_{su}} \tag{1}$$

여기서 n_{ef}는 광섬유의 유효굴절률로서 광섬유의 광학상수가 주어지면 광섬유의 고유치 방정식으로 쉽게 구할 수 있다[14]. ϕ_{cl}과 ϕ_{su} 평면도파로의 코어층과 클래드층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이 이다. 판다 광섬유는 복굴절성을 가지고 있기 때문에 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})는 느린 편광 모드와 빠른 편광 모드가 다르게 적용되어야 한다. 느린 편광 모드가 빠른 편광 모드 보다 $3\times10^{-4}\sim4\times10^{-4}$ 만큼 대체로 더 크다. 만일 평면도파로가 복굴절을 가질 경우 TE 편광 및 TM 편광에 대한 평면도파로층의 굴절률을 가각 적용해서 공진 파장을 구할 수 있다.

3. 실험 및 분석

편광유지 광섬유를 연마하기 위해 지지대로 실리카 블록(길이 : 25 mm 폭 : 10 mm, 높이 : 5 mm)을 이용하였다. 실리카 블록은 광섬유와 동일한 재질이기 때문에 연마 후 연마된 광섬유 클래딩 표면과 실리카 표면이 평탄하여 연마된 광섬유 클래딩위에 균질한 평면도파로막을 형성시킬 수 있다. 실리카 블록위에 곡률반경은 25 cm, 폭은 140 μm, 중앙부에서 깊이는 130 μm인 홈을 다이야몬드 휠로 형성시켰다. 편광 유지 광섬유로 후지쿠라사의 1550 nm 파장용 판다 광섬유를 사용하였다. 판다 광섬유의 응력부여부의 그림자 영상을[10] 이용하여 느린 축 혹은 빠른 축 방향을 찾는 방법을 도입하였다. 판다 광섬유를 정렬하기 위한 장치는 그림 3

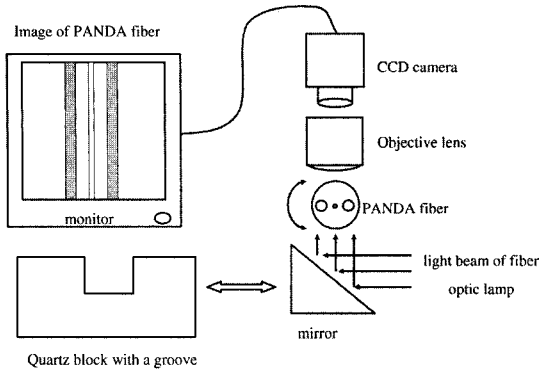


그림 3. 판다 광섬유 정렬하기 위한 장치도
Fig. 3. Optical set-up for alignment of the PANDA fiber.

과 같이 광섬유 램프, 거울, 광섬유회전체, 대물렌즈, CCD 카메라 및 모니터로 구성되어 있다. 판다 광섬유의 응력부여부의 그림자 영상을 관찰하여 느린 축 혹은 빠른 축이 실리카 블록의 표면과 평행이 되도록 조절 후 홈 속에 판다 광섬유를 삽입하고 자외선 경화 에폭시(NOA81)로 고정시켰다.

#3000의 알루미나 연마가루로 황동 연마기판에서 1차 연마 후 세륨옥사이드(CeO_2)로 마무리 연마하였다. 마무리 연마 기판으로 폴리우레탄이나 피치를 사용하였다. 지나친 연마를 막기 위해 남은 클래딩 두께를 리퀴드 드롭(liquid drop) 방법[14]으로 측정하였다. 1550 nm 파장에서 광섬유 코어와 굴절률이 같은 용액을 연마된 클래딩 표면위에 놓았을 때 누설 손실이 5~6 dB 정도가 되도록 연마를 조절하였다. 이때 최소 남은 클래딩 두께는 2.6~2.8 μm로 추정된다. 연마된 표면위에 원기를 올려놓고 두 물질 사이 있는 공기층에서 발생하는 간섭 패턴(Newton ring)으로 측면 연마 후 표면 상태를 확인하였다. 간섭 패턴이 없거나 한개 정도 나타나면 연마표면의 거칠기와 평탄도가 양호한 상태로 판정할 수 있다.

폴리머의 일종인 폴리스탈렌(polystyrene)을 용매(다이옥산)에 녹인 후 측면 연마 광섬유 블록위에 스핀 코팅하였다. 폴리머 재료의 굴절률을 프리즘 결합기(새론)로 측정한 결과, 1550 nm 파장에서 1.563 부근이였고, 복굴절은 $2\times10^{-4}\sim3\times10^{-4}$ 정도로 나타났다. 그림 2(a),(b)와 같은 두 가지 종류의 샘플을 준비하였다. 소자 양끝단의 판다 광섬유에 FC형 광섬유 컨넥터(connector)를 연결하였다. 소자의 특성을 측정할 때 판다광섬유의 복굴절축의 방향을 정확하게 알아야만 느린 편광모드 혹은 빠른 편광모드로 결합시킬 수 있다. 이를 위해 광섬유 끝단에 FC형 광 컨넥터를 연결할 때 두개

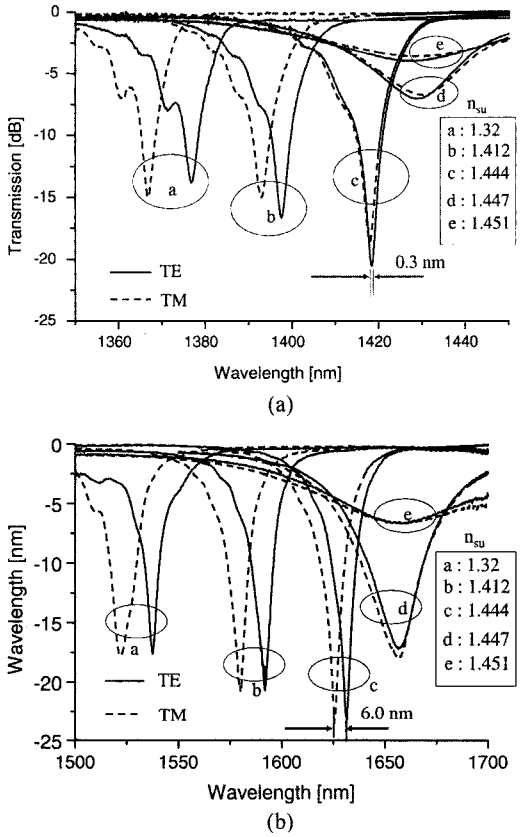


그림 4. n_{su}에 따른 제작된 소자의 파장 및 편광 응답의 변화; (a) 느린 축이 평면도파로와 평행한 구조, d_0=8.43 μm, 평면도파로의 모드차수(m)는 7차, (b) 빠른 축이 평면도파로와 평행인 구조, d_0=5.56 μm, 모드차수는 4차

Fig. 4. Variation of wavelength and polarization response in accordance with n_{su}; (a) configuration of that slow axis is parallel with planar waveguide, d_0= 8.43 μm, mode order of planar waveguide(m) is 7 and (b) configuration of that fast axis is parallel with planar waveguide, d_0=5.56 μm, mode order of planar waveguide is 4.

의 응력부여부와 FC 컨넥트의 키(key)가 일직선상이 되도록 하였다. 약간의 편광성을 가진 광대역 광원(에질런트사, 83437A)의 출력을 편광스크램블러(도남시스템, PS3200)를 이용하여 완전히 무편광 상태로 만들고 본 연구실에서 제작한 리셉터클 구조의 표면 플라즈몬(surface plasmon) 편광기[15]로 소자에 입력되는 광의 편광 방향이 판다 광섬유의 느린 축 혹은 빠른 축과 일치시켰다.

최상부층의 굴절률(n_{su})이 소자의 특성에 미치는 영향을 측정한 결과가 그림 4에 제시되어 있다. 물과 글

리세린의 혼합 비율을 조절하여 다양한 굴절률을 가지는 용액을 준비하였다. 용액의 굴절률은 프리즘 결합기로 1550 nm 파장에서 측정하였다. 대표적으로, 무게비로 글리세린이 92%를 차지 할 때 용액의 굴절률은 광섬유 클래딩의 굴절률(1.444)과 동일하였고 95%일 때는 광섬유 코어의 굴절률(1.4485)과 동일하였다. n_{su}가 점점 증가 할수록 TE 및 TM 편광의 공진이 장파장으로 이동하며, 동시에 두 편광의 공진파장 차이는 감소한다. n_{su}가 증가하면 평면도파로의 유효굴절률이 증가하며 위상 정합 조건이 더 장파장에서 만족하기 때문이다. 하지만 n_{su}가 광섬유의 유효 굴절률(1.4465) 보다 더 크면 광섬유와 평면도파로 사이의 위상 정합 조건은 존재하지 않으며, 따라서 공진이 급격히 약해지는 현상을 관측할 수 있다. 그림 4(a)는 약 420 nm/RIU, 그림 4(b)는 약 810 nm/RIU의 단위 굴절률에 대한 공진파장의 변화 감도를 보였다. 여기서 RIU(refractive index unit)로서 단위 굴절률을 의미한다. 두 소자의 감도가 다른 이유는 평면도파로의 두께가 두꺼워질수록 굴절률에 대한 공진파장의 변화량은 감소한다는 사실로부터 알수 있다. 식 (1)를 이용하여 최상부층의 굴절률에 따른 공진 파장 변화를 계산한 결과와 실험결과가 그림 5에 비교되어 있다. 느린 편광 모드는 빠른 편광모드 보다 3×10^{-4} 만큼 유효 굴절률이 더 큰 것으로 가정하였다. 이론적 결과와 실험 결과는 잘 일치함을 보이고 있다. 특히 느린 축이 평면도파와 수평일 때 TE와 TM 편광의 공진파장이 일치 할 수 있는 현상은 일반 단일 모드 광섬유를 이용할 경우 얻을 수 없는 특

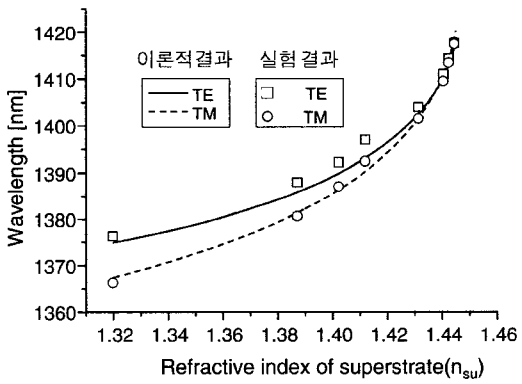


그림 5. n_{su}에 대응하는 공진파장의 이론 및 실험 결과, 느린 축이 평면도파로와 평행한 구조로 가정하였으며 d_0=8.43 μm, 평면도파로의 모드차수는 7차.

Fig. 5. Theoretical and experimental result on resonance wavelengths corresponding n_{su}. It is assumed taht d_0=8.43 μm, m=7 under configuration in which slow axis is parallel with planar waveguide.

징이다[6,12]. 용액의 굴절률과 공진 파장의 관계를 이용하면 광섬유-평면도파로 결합기를 용액의 굴절률을 측정하기 위한 광센서로 활용 할 수 있다.

판다 광섬유의 정렬 상태가 소자의 편광 특성에 미치는 영향은 광섬유 클래딩의 굴절률(1.444)과 같은 굴절률을 가진 용액을 최상부층으로 이용했을 때 두 소자의 공진 파장의 차이를 보고 알 수 있다. 평면도파로의 구조적 복굴절이 작아야만, 순수 판다 광섬유의 복굴절 영향을 쉽게 측정 할 수 있기 때문이다. 이때 평면도파로는 대칭구조를 가지며 TE와 TM 편광의 공진파장 차이는 최소가 된다. 그림 4(a)는 판다 광섬유의 느린 축이 평면도파로와 평행인 소자의 파장응답이다. 그 반대로 빠른 축이 평면도파로와 평행하게 정렬된 구조의 응답은 그림 4(b)에 나타나 있다.

두 편광의 공진파장의 차이는 판다 광섬유의 정렬 구조와 확실히 연광성이 있음을 알 수 있다. 평면 도파로가 판다 광섬유의 느린 축과 평행인 경우는 두 직교 편광의 공진 파장의 차이가 0.3 nm 이하였지만, 그 반대인 경우는 약 6.0 nm의 공진 파장의 차이를 보였다. 두 정렬 구조에 따른 특성의 차이는 판다 광섬의 복굴절에 기인하는 것으로 사려 된다. 이러한 현상은 그림 5에 제시한 판다광섬유와 폴리머 평면도파로의 분산 곡선으로 이해 할 수 있다. 편의상 폴리머의 재료 분산과 복굴절은 고려하지 않았다. 빠른 축 편광에 대한 광섬유 코어 및 클래딩의 굴절률을 1.4440과 1.4485으로 가정하고 느린 축 편광에 대한 코어 클래딩의 굴절률은 빠른 축 편광의 값보다 모드 복굴절(modal birefringence) 만큼 더 크게 설정하고 두 직교하는 편광모드의 유효굴절률을 구하였다. 여광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 매우 작아서 평면도파로에 비해 도파로 분산(파장에 대한 유효굴절률 변화)이 매우 작다. 그림 6에서 알 수 있듯이 느린 축이 평면도파로와 평행인 경우 느린 편광 모드는 평면 도파로의 TE 모드와 결합하고 빠른 편광 모드는 평면 도파로의 TM 모드와 결합한다. 그림 2(a)의 구조가 그림 2(b) 구조 보다 상대적으로 훨씬 작은 두 직교 편광의 공진 파장 차이를 가짐을 그림 6로부터 알 수 있었다. 편광에 민감하지 않는 파장응답은 판다 광섬유의 느린 축을 평면도파로와 일치 시키고 최 상부 유전체의 굴절률이 광섬유 클래딩 것과 같은 물질을 선택함으로서 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

그림 2(b)와 같은 형태로 정렬된 편광 유지 광섬유를 도입한 결합기의 입력단 광섬유의 구부림과 뒤틀림이 소자의 파장 응답 특성에 미치는 영향을 분석하였다. TE와 TM 편광의 공진파장 차이는 최상부층이 공기

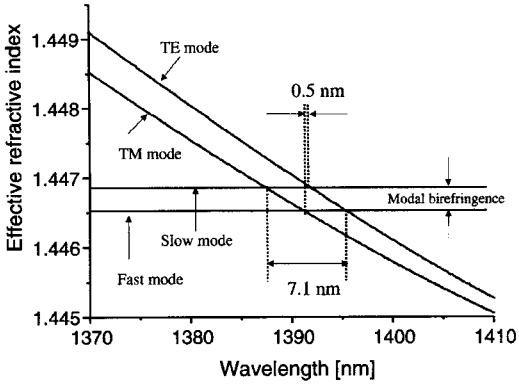


그림 6. 판다 광섬유와 평면도파로의 분산 곡선, d_0= 6.0 μm, n_{su}=1.444, n_g=1.563으로 가정함

Fig. 6. Dispersion curve of the PANDA fiber and planar waveguide. It is assumed that d_0=6.0 μm, n_{su}= 1.444, n_g=1.563.

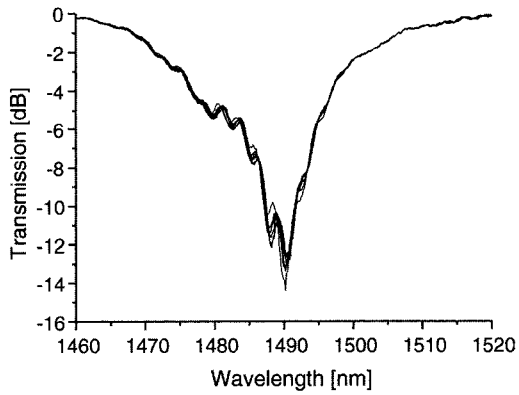


그림 7. 소자 입력단 쪽의 편광 유지 광섬유의 구부림과 뒤틀림 하에 파장응답

Fig. 7. Wavelength response in the presence of bending and deformation of input fiber section.

(n_{su}= 1.0)일 때 가장 크기 때문에, 폴리머층위에 다른 물질을 놓지 않고 실험하였다. 만일 구부림이나 뒤틀림이 입력광의 편광 상태에 영향을 주면 공진 파장의 흔들림 및 공진파형의 변형으로 나타난다. 3개의 루프(loop)를 가지는 인-라인 단일 모드용 편광 제어기를 편광유지 광섬유의 뒤틀림 및 구부림 도구로 이용하였다. 루프의 지름은 3 cm이고 각 루프당 판다 광섬유를 두 번 감았다. 입력단 판다 광섬유의 길이는 2 m이다. 인-라인 편광 제어기에 부착된 3개의 loop를 왼쪽 혹은 오른쪽으로 방향을 바꾸면서 파장응답을 측정하여 누적한 8가지 결과가 그림 7에 제시되어 있다.

일반 단일 모드 광섬유 소자와 달리, 입력단 광섬유의 매우 강한 기계적 구부림과 뒤틀림이 있어도 소자는 매우 안정적으로 동작하였으며 공진파장의 변화는 0.3 nm 이하였다. 단일 모드 광섬유를 이용할 경우 결합기의 바로 앞단에 편광기가 배치되어야만 정확한 TE 혹은 TM 편광의 파장응답을 측정 할 수 있다. 일반 단일 모드 광섬유 내에서는 편광상태가 쉽게 바뀌고 파장 마다 편광 상태가 바뀌는 정도가 다르기 때문이다. 판다 광섬유를 이용하면 입력단의 광섬유가 충분히 길어도 소자에 입력되는 편광 상태를 제어 할 수 있다. 제안된 소자를 원거리 광섬유 센서로 사용할 경우 TE 편광과 TM 편광에 대한 응답을 동시에 얻을 수 있는 장점을 가진다. 이러한 특성은 단일 모드 광섬유 소자와 대별되는 특성이다.

4. 결 론

편광 유지 광섬유와 다중 모드 평면도파로 사이의 소산장 결합을 이용한 비대칭 광결합기의 동작특성과 광센서로서의 응용을 연구하였다. 판다 광섬유의 복굴절 축과 평면도파로 사이의 정렬 상태에 따른 소자의 편광특성 차이를 관측하고 설명하였다. 편광유지 광섬유의 복굴절과 평면도파로의 구조를 적절하게 조절하면 TE 편광과 TM 편광의 공진 파장을 일치 시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. 이러한 특성을 편광에 민감하기 않는 온도나 압력센서에 응용할 수 있을 것으로 사료된다. 편광 유지 광섬유를 이용 할 경우 입력단 광섬유의 구부림과 뒤틀림에 소자는 매우 큰 면역성을 가짐을 확인하였다. 이러한 특성을 이용하면 원거리에서 TE 편광과 TM 편광의 파장을 동시에 얻을 수 있음을 의미한다. 실제로 제안된 소자를 용액의 굴절률을 측정하기 위한 센서 응용을 할 수 있음을 실험으로 보였다.

참고 문헌

[1] C. A. Millar, M. C. Brierley, and S. R. Mallinson, "Exposed-core single-mode fiber channel-dropping filter using a high-index overlay waveguide", *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 284-286, 1987.

[2] G. Fawcett, W. Johnstone, I. Andonovic, D. J. Bone, T. G. Harvey, N. Carter, and T. G. Ryan, "In-line fibre-optic intensity modulator using electro-optic polymer", *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 985-986, 1992.

[3] W. G. Jung, S. W. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, and S. W. Kang, "High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single mode fiber covered

with the polymer planar waveguide", *IEEE Phtonics Tech. Lett.*, vol. 13, no. 11, pp. 1209-1211, 2001.

[4] 윤종국, 정웅규, 김상우, 이승하, 강신원, "측면 연마된 단일모드 광섬유와 폴리머 평면도파로 결합기를 이용한 압력센서", *센서학회지*, 제10권, 제3호, pp. 9-14, 2001.

[5] K. R. Sohn, K. T. Kim, and J. W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide", *Sensors and Actuators A*, vol. 101, pp. 137-142, 2002.

[6] W. Johnstone, G. Fawcett, and L. W. K. Yim, "In-line fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fiber-to-planar polymer waveguide couplers", *IEE Proc.-Optoelectron*, vol. 141, no. 5, pp. 229-302, 1994.

[7] K. T. Kim, J. H. Hwang, J. O. Lee, J. P. Mah, C. H. Kim, and S. Hwangbo, "Investigation on the optical properties of side-polished fiber contacted with planar waveguide including a thin metal film", *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 3, pp. 675-681, 2003.

[8] I. Yakohama, K. Chida, and J. Nada, "Low excess loss conditions of polarization-maintaining fiber coupler", *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 23, pp. 4807-4813, 1988.

[9] S. Ocude, K. Nishide, D. Tanaka, R. Matsumoto, S. Okude, K. Nishide, and Akira Wada, "Low loss all-PANDA-fiber polarization beam splitter/combiner", *SPIE 14th International Conference on Optical fiber Sensors*, pp. 612-615, 2000.

[10] Y. W. Wong and K. L. Choy, "The manufacturing of optical fiber coupler by the fusion elongation method", *J. of Materials Processing Technology*, vol. 63, pp. 806-809, 1997.

[11] M. Piliarik, J. Homola, Z. Manikova, and J. Ctyroky, "Surface plasmon resonance sensor based on a single-mode polarization-maintaining optical fiber", *Sensors and Actuators B*, vol. 90, pp. 236-242, 2003.

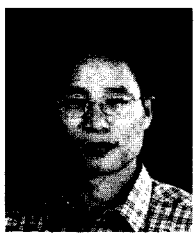
[12] D. G. Moodie and W. Johnstone, "Wavelength tunability of components based on the evanescent coupling from a side-polished fiber to a high-index-overlay waveguide", *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 1025-1027, 1993.

[13] 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 waveguide", *Opt. Comm.*, vol. 180, pp. 37-42, 2000.

[14] S. G. Lee, J. P. Sokoloff, B. P. McGinnis, and H. Sasabe, "Fabrication of a side-polished fiber polarizer with a birefringent polymer overlay", *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 606-608, 1997.

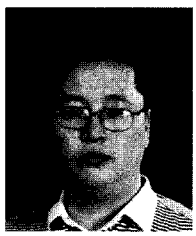
[15] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Side-polished fiber", *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.

[16] 이준옥, 김철호, 김광택, 권광희, 송재원, "표면플라즈몬 광섬유 편광기 설계 및 제작", *한국광학회지*, 제14권, 제2호, pp. 169-174, 2003.



김 광 택 (Kwang Taek Kim)

- 1989년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1991년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업
- 2000년 경북대학교 전자공학과 박사 졸업
- 현재 호남대 광전자 공학과 조교수



황 보 승 (Sueng Hwangbo)

- 1987년 서울대학교 전기공학과 학사 졸업
- 1989년 서울대학교 전기공학과 석사 졸업
- 1998년 서울대학교 전기공학과 박사 졸업
- 현재 호남대학교 광전자공학과 부교수

강 용 철 (Yong Chul Kang)

- 1988년 조선대학교 전기공학과 학사 졸업
- 1990년 조선대학교 전기공학과 석사 졸업
- 1995년 조선대학교 전기공학과 박사 졸업
- 현재 호남대학교 광전자공학과 겸임교수
- 현 LabMAS 대표