

## 얇은 금속 중간층이 포함된 광섬유-평면도파로 결합기

김광택<sup>†</sup> · 윤대성

호남대학교 광전자 공학과

☎ 506-714 광주 광산구 서봉동 59-1

손경락

구미기능대학 정보통신시스템학과

☎ 703-030 경북 구미시 공단동 112

(2003년 1월 21일 받음, 2003년 6월 25일 수정본 받음)

얇은 금속 중간층이 있는 광섬유-평면도파로 결합기의 편광 및 파장 선택적 결합특성에 관한 실험 결과를 보고한다. 금속 박막층의 두께와 최상부층의 굴절률이 소자의 특성에 미치는 영향을 측정하고 그 결과를 설명하였다. 제안된 소자는 편광기, 광변조기 및 광센서 등의 다양한 응용 가능성을 보였다.

주제어 : metal layer, fiber-to-planar waveguide coupler, polarizers, modulators, sensors.

### I. 서 론

측면 연마된 단일 모드 광섬유와 평면 도파로 사이에 소산장 결합(evanescent field coupling)을 이용한 소자는 매우 큰 파장 선택성과 편광 선택성을 가진다. 연마된 광섬유 클래딩 위에 결합되는 평면도파로의 굴절률에 대한 제한이 없기 때문에 반도체,<sup>[1]</sup> 크리스탈,<sup>[2]</sup> 액정크리스탈,<sup>[3]</sup> 폴리머<sup>[4]</sup> 등과 같은 물질이 광섬유-평면도파로 결합기에 적용가능하다. 측면 연마된 광섬유 위에 올려지는 평면도파로의 광학적 특성을 외부 섭동으로 제어하여 광변조기/광스위치,<sup>[5]</sup> 파장 가변 광필터<sup>[6]</sup> 등, 능동형 소자로 응용할 수 있음이 보고 되었다. 평면 도파로에 섭동을 인가하기 위해서는 전극이 필요하며 일반적으로 금속을 전극재료로 이용하는 경우가 많다. 평면도파로의 상부클래딩으로 금속이 사용될 경우 매우 큰 구조적 복굴절로 인하여 강한 편광 선택적 결합 특성을 가진다.<sup>[7]</sup> 이때 금속 박막의 두께가 광학적 표피 깊이(skin depth)에 비해 얇은 경우 TM(자기장이 금속층에 수평인 성분) 편광의 전달 특성은 금속 박막 위에 놓인 유전체의 굴절률에 매우 민감하지만 TE(전기장이 금속층에 수평인 성분) 편광성분의 전달 특성은 상부 유전체의 굴절률에 영향을 거의 받지 않음이 보고 되었다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서는 연마된 광섬유 클래딩과 평면도파로 사이에 금속 박막이 있는 광섬유-평면도파로 결합기의 전달 특성에 관한 실험 연구 결과를 보고한다. 특히 금속의 두께 및 최상부층 물질의 재료에 따른 TE 및 TM 편광 입력에 대한 파장 응답특성을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 평면도파로의 상하부 모두 금속층이 있는 결합기 구조의 특성도 측정하였다. 이 경우 두 금속층은 평면도파로에 전기장을 인가하기 위한

전극역할이 가능하다. 금속은 광 흡수가 발생하며 이러한 흡수손실이 소자의 삽입손실 및 파장선택성에 미치는 영향을 분석하는 것은 금속 전극이 포함된 능동형 광섬유-평면도파로 결합기를 개발하기 위한 중요한 과정으로 여겨진다.

### II. 이론적 고찰

본 논문에서 다루고자 하는 금속 중간층이 포함된 광섬유-평면도파로 결합기의 구조는 그림 1에 나타나 있다. 이 구조는 측면 연마된 단일모드 광섬유와 평면도파로 사이에 광학적으로 유한한 두께를 가지는 금속 박막이 있는 것이 특징이다. 금속 박막과 유전체 경계에서 TE 편광성분의 세기는 금속 내부로 갈수록 급속히 감소하는 반면 TM 편광 성분은 표면 플라즈몬 효과에 의해 금속과 유전체 경계에서 강한 소산장이 형성되며 금속을 쉽게 투과한다.<sup>[9]</sup> 이러한 특성 때문에 그림 1의 구조에서 적당한 금속두께를 가지면 TE 편광성분은 광섬유와 평면도파로 사이의 결합이 차단되고 TM 편광 성분은 두

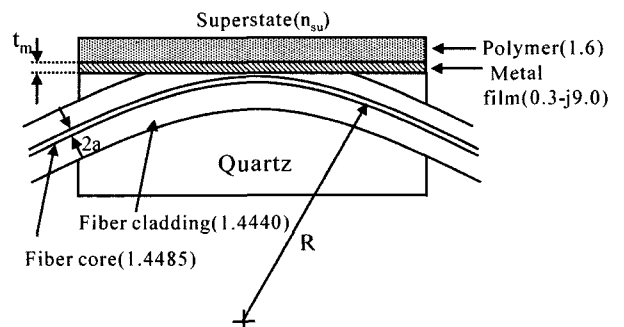


그림 1. 중간 금속층이 있는 광섬유-평면도파로 결합기의 구조.

<sup>†</sup>E-mail: ktkim@honam.ac.kr

도파로 사이에서 결합이 허용된다.

광섬유와 평면도파로는 서로 다른 분산 특성을 가지므로 특정한 파장에서만 두 도파로 사이에서 에너지 교환을 위한 위상 정합 조건을 만족한다. 따라서 이 소자는 TM 편광 성분에 한해 파장 선택적 결합 특성을 보일 것으로 예상되며 소자 구조를 적절하게 조절하면 TM 편광성분을 광섬유로부터 평면도파로로 제거 할 수 있다. 금속층이 광섬유-평면도파로 결합기에 존재하는 경우 광학적 흡수손실이 있다. 금속층에 의한 흡수 손실이 클수록 광섬유-평면도파로 결합기의 파장 선택성이 약해지는 현상을 가진다.<sup>11)</sup> 금속층이 있는 경우 평면도파로의 유효굴절률은 복소값을 가지며 유효굴절률의 허수부에

의한 위상 부정합을 피할 수 없기 때문이다.

### III. 실험 및 분석

본 실험을 위해 단일 모드 광섬유를 이용한 측면 연마된 광섬유 블록을 준비하였다. 그림 1에서 광섬유 코어의 반경( $a$ )은  $4.1 \mu\text{m}$ , 곡률반경( $R$ )은  $25 \text{ cm}$ ,  $1550 \text{ nm}$  파장에서 광섬유 코어의 굴절률은  $1.4485$  그리고 클래딩의 굴절률은  $1.444$ 이다. 연마 후 남은 광섬유 클래딩의 두께는  $2\sim 3 \mu\text{m}$  정도이다.

금속 층의 두께가 소자의 특성에 미치는 영향을 측정하였다. 여기서 금속(Ag)의 굴절률은 광통신  $1310 \text{ nm}$  파장에서  $0.3$

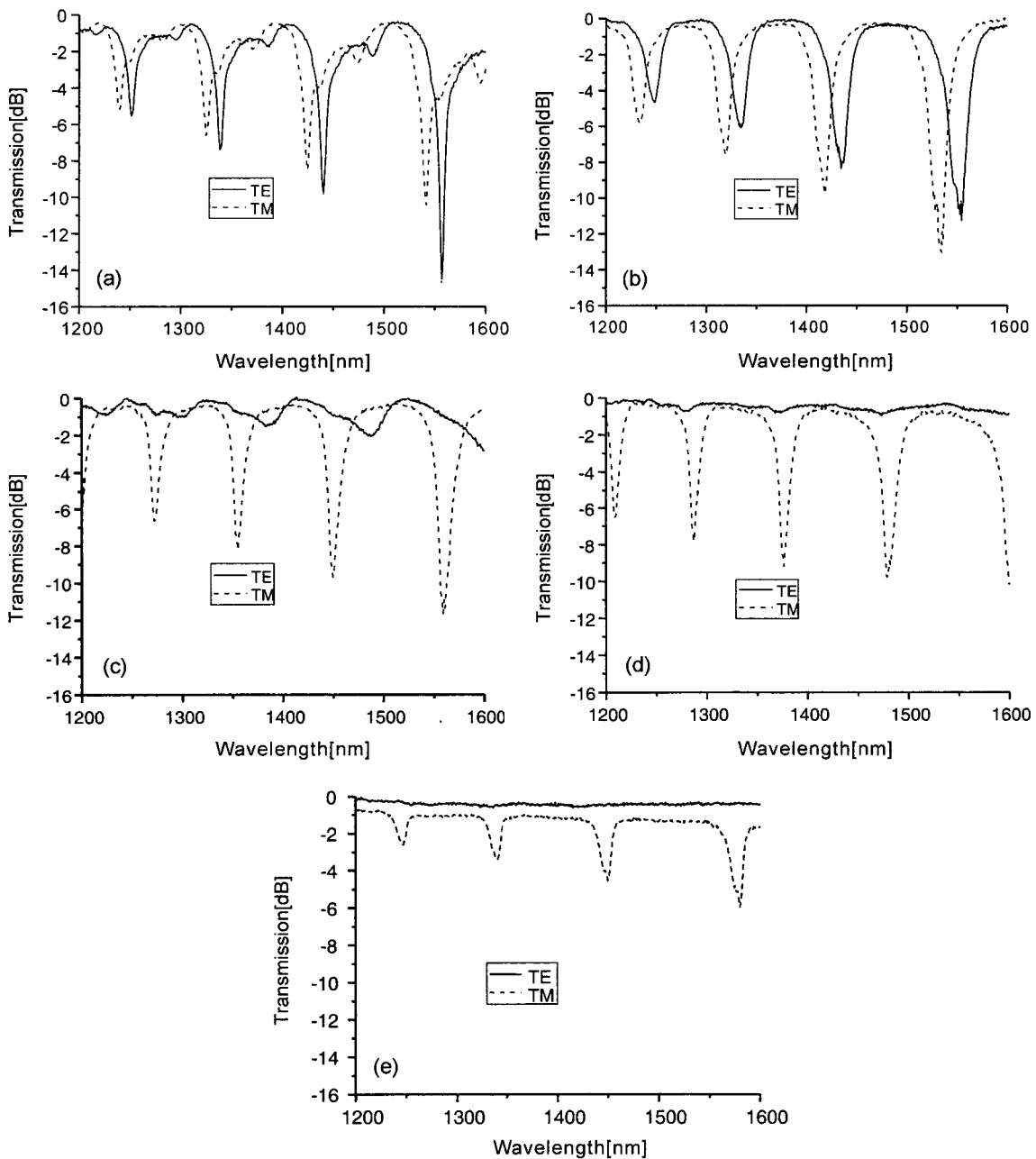


그림 2. 금속 중간층의 두께 변화에 따른 광섬유-평면도파로 결합기의 파장응답,  $n_{su} = 1.0$ , (a)  $t_m = 0 \text{ nm}$ , (b)  $t_m = 2 \text{ nm}$ , (c)  $t_m = 4 \text{ nm}$ , (d)  $t_m = 10 \text{ nm}$ . (e)  $t_m = 25 \text{ nm}$ .

9.0으로서 복소값을 가진다.<sup>[11]</sup> 은(Ag)의 광학적 표피깊이는 파장 1310 nm에서 약 23 nm이다. 측면 연마된 광섬유 클래딩 위에 금속(Ag)을 열 증착하고 그 위에 굴절률이 1.6인 폴리머를 스펀코팅 하였다. 폴리머층의 두께는 14 μm 부근에 있다. 금속 층의 두께를 바꾸어 가면서 특성 변화를 측정하기 위하여 앞서 코팅한 폴리머를 아세톤으로 제거하고 금속은 식각액으로 제거한 후 다시 금속과 폴리머 층을 연마된 광섬유 위에 형성하였다. 금속 층의 두께가 증가함에 따라 TE편광과 TM 편광의 공진 파장에서 소멸비가 변하는 현상을 그림 2로부터 알 수 있다. 금속 박막이 점점 증가함에 따라 TE 편광의 결합의 세기는 급속히 감소하지만 TM 편광은 여전히 높은 파장 선택적 결합특성을 유지함을 알 수 있다. 공진파장은 폴리머층과 금속층의 두께와 밀접한 연관이 있다. 각 실험마다 폴리머층의 두께를 동일하게 만들기가 어려워 금속층의 두께와 공진파장간의 관계를 규명하지는 못하였다. 다만 금속층이 두꺼워지면 광섬유 모드와 결합하는 평면 도파로층의 최고차 TM 모드의 유효 굴절률이 증가하여 공진 파장은 장파장으로 이동하는 것을 예상할 수 있다. 여기서 각 실험마다 폴리머층의 두께가 일정하다고 보기 힘들기 때문에 금속층의 두께는 금속박막의 광학적 투과도를 이용하여 추정하였다. 측정오차는 20% 내외였다. 금속의 두께가 10 nm일 때 TE 편광은 모든 파장에서 거의 손실 없이 결합영역을 통과하는 특성을 보였다. 따라서 금속의 두께가 10 nm 이상 될 경우 TE 편광의 전달 특성은 평면도파로의 구조에 무관하게 된다. TM 편광은 금속층 부근에서 에너지가 국한 되려는 성질에 의하여 광섬유 모드의 소산장은 금속을 투과하며 두 파도파로 사이에 결합이 허용된다. 따라서 TM 편광의 전달 특성은 평면도파로의 광학적 구조 및 파장에 매우 의존한다. 그림 2(e)와 같이 금속층의 두께가 금속의 표피깊이 정도에 도달하면 TM 편광 성분의 흡수 손실이 커지며 결과적으로 소자의 파장 선택성도 약해진다. 평면도파로 최고차 모드와 광섬유 모드가 위상 정합 조건을 만족할 때 가장 효과적인 광 결합이 발생하며 따라서 TM 편광은 매우 강한 파장선택성을 가진다. TM 편광은 금속층 내부로 일부 광에너지가 도파되기 때문에 TE 편광에 비해 광흡수 손실이 상대적으로 크다. 금속층의 두께가 표피 깊이에 비해 얇은 경우, 공진 파장 밖의 영역에서는 0.5~0.7 dB 사이의 금속에 의한 흡수 손실이 발생하였다.

다음은 평면도파로의 상부 클래딩 역할을 하는 최상부층의 굴절률( $n_{su}$ )의 변화에 따른 소자의 파장응답 특성이다. 물과 글리세린을 혼합하여 다양한 굴절률을 가지는 용액을 준비하였다. 이 경우 폴리머층의 두께는 일정하고 금속층의 두께는 10 nm이다. 최상부층의 굴절률이 증가하면 TM 편광의 공진 파장은 장파장 방향으로 이동하는 현상을 보였다. 이 현상은 최상부층의 굴절률이 증가하면 평면도파로의 유효굴절률이 증가하여 위상 정합을 만족하는 파장이 더 장파장 방향으로 이동하기 때문에 나타난다.<sup>[12]</sup> 금속층이 평면도파로의 상부층에 있는 경우는 공진파장에서 소멸비가  $n_{su}$ 에 매우 민감한데 비하여 제안된 소자의 경우 큰 변화는 보이지 않는다.<sup>[10]</sup> 이 현상은 제안된 소자의 경우 평면도파로모드의 손실이  $n_{su}$ 에 상대적으로 덜 민감함을 의미한다. 공진 파장의 위치가 민감하

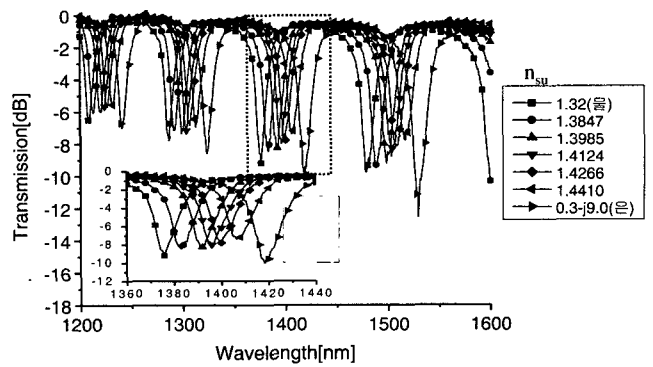


그림 3. 최상부층 물질의 굴절률 변화에 따른 TM 편광의 파장응답.

게 변할 수 있는 특성은 이 소자를 굴절계, 온도센서 등의 응용이 가능함을 보여준다. 상부 유전체의 굴절률에 의한 공진 파장의 가변 범위는 이웃한 두 공진 파장간격의 약 1/3정도 됨을 알 수 있다. 최상부층의 굴절률을 조절하여 원하는 파장에서 TM 편광성분을 제거하기 위한 편광기로 사용할 수 있다. 한편 최상부층의 물질이 금속인 경우의 파장응답도 측정하였다. 이때 상부층의 금속의 두께는 충분히 두껍게 증착시켰다. 이 경우는 폴리머 도파로 상부에 금속층이 존재하는 특별한 경우로 여전히 높은 파장 선택성을 보임을 알 수 있다. 삽입손실은 공진영역 밖의 파장에서는 1 dB 정도로 나타났다. 금속층이 평면도파로의 아래와 위에 존재하기 때문에 두 금속층을 평면도파로에 전기장을 인가하기 위한 전극으로 사용 가능하다.

얇은 중간 금속층은 광학적으로는 TE 편광과 TM 편광을 분리하기 위한 클래딩 역할을 할 수 있을 뿐만 아니라 전기적으로는 평면도파로에 전기장을 인가하기 위한 전극으로 응용할 수 있음을 실험 결과로 확인 하였다.

#### IV. 결 론

측면 연마된 광섬유와 평면도파로 사이에 얇은 금속층이 있는 광결합기의 특성을 측정하고 그 결과를 보고하였다. 금속층의 두께가 점점 증가함에 따라 TE 편광의 결합의 세기가 급속히 감소하였다. 반면 TM 편광은 금속층이 있는 경우에도 여전히 광결합이 발생하였고, 높은 파장선택성을 보였다. 최상부층의 굴절률을 조절하면 TM 편광의 공진 파장을 가변할 수 있음을 관측하였다. 이러한 특성을 이용하면 원하는 파장에서 TM 편광 성분을 제거할 수 있기 때문에 제안된 소자를 편광기로 이용 할 수 있다. 최상부층이 금속인 경우에 TM 편광의 삽입 손실은 1 dB 정도로 나타났고 높은 파장 선택성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 금속층의 배열은 전기광학 효과를 이용하여 평면도파로의 광학적 특성을 가변하기 위한 전극으로 응용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

[1] A. Andreev, Bl. Pantchev, Pantchev, P. Danesh, B. Zafirova,

- and E. Karakoleva, "a-Si:H film on side-polished fiber as optical polarizer and narrow-band filter," *Thin Solid Films*, vol. 330, pp. 150-156, 1998.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. A. Hanilton, D. R. Yankelevich, A. Knoesen, R. T. Weverka, R. A. Hill, and G. C. Bjorkund, "Polymer in-line fiber modulators for broadband radio-frequency optical links," *J. Opt. Soc. Am. B.* vol. 15, no. 2, pp. 741-751, 1998.
- [5] G. Fawcett, W. Johnstone, I. Andonovic, D. J. Bone, T. G. Harvey, N. Carter and T. G. Ryan, "In-line fiber-optic intensity modulator using electro-optic polymer," *Electron. Lett.* vol. 28, no. 11, pp. 985-986, 1992.
- [6] K. T. Kim, J. W. Song, "Investigation of thermo-optically tunable fiber-to-planar waveguide coupler," *Optics Comm.* vol. 205, pp. 113-122, 2002.
- [7] 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 multi-mode metal-clad planar waveguide," *Opt. Comm.* vol. 180, pp. 37-42, 2000.
- [8] K. T. Kim, J. H. Hwang, J. O. Lee, J. P. Mah, C. H. Kim, 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.
- [9] 김광택, 황보성, "금속층이 포함된 측면 연마광섬유 결합기의 편광 분리특성," 한국광학회지, 13권, 3호, pp. 228-234, 2002.
- [10] 황중호, 이준욱, 김철호, 황보승, 김광택, 마재평, 손경락, 송재원, "금속클래딩 평면도파로와 결합된 측면 연마광섬유의 파장 및 편광선택성," 한국광학회지, 13권, 2호, pp. 134-139, 2002.
- [11] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. W. Alexander Jr, and C. A. Ward, "Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and for infrared," *Appl. Optics*, vol. 22, no. 7, pp. 1099-1120, 1983.
- [12] K.-R. Sohn, J.-W. Song and H.-P. Kim "Polarization insensitive fiber-optic refractometer based on a side-polished fiber coupler with a thick glass waveguide" *J. of Optical Society of Korea*, vol. 6, no. 3, pp. 117-122, 2002.

### Fiber-to-planar waveguide coupler with a thin metal intermediate layer

Kwang Taek Kim<sup>†</sup> and Dae Sung Yoon

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

<sup>†</sup>E-mail : ktkim@honam.ac.kr

Kyung Rak Sohn

School of Information and Communication system, Gumi Polytechnic College, Kyungpook, 730-303, KOREA

(Received January 21, 2003, Revised manuscript June 25, 2003)

We report experimental results on the wavelength and polarization selective coupling properties of fiber-to-planar waveguide coupler having a thin metal intermediate layer. The influence of the metal layer thickness and the refractive index of the superstrate on the device properties has been measured and explained. The proposed device exhibited various application possibilities including polarizers, modulators, and sensors.

OCIS Codes : 060.1810 060.2310 060.2340 060.2370.