

## 금속 클래드 평면 도파로와 결합된 측면 연마 광섬유의 파장 및 편광 선택성

황중호 · 이준옥 · 김철호 · 황보승 · 김광택<sup>†</sup>

호남대학교 광전자공학과

Ⓣ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

마재평

호남대학교 전자공학과

Ⓣ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

손경락 · 송재원

경북대학교 전자전기컴퓨터공학부

Ⓣ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

(2001년 12월 27일 받음, 2002년 3월 5일 수정본 받음)

금속-클래드 평면 도파로와 결합된 측면 연마된 광섬유의 파장 및 편광 선택성에 관한 실험 결과를 보고한다. 금속의 두께와 최상부층의 굴절률을 포함한 평면 도파로의 구조가 소자의 광전송 특성에 미치는 영향을 측정하였고 그 결과를 설명하였다. 높은 파장 선택성과 편광 선택성을 가지는 조건을 예측하였고 실험으로 검증하였다.

주제어 : Metal-clad, Planar waveguide, Side-polished fiber.

### I. 서 론

측면 연마된 광섬유와 평면 도파로를 소산장 결합시켜 광통신소자<sup>[1-4]</sup> 및 광 센서<sup>[5-8]</sup>로 활용하기 위한 연구는 지난 10년간 꾸준히 진행되어 왔다. 이 소자는 삽입손실이 매우 작고 다양한 물질을 평면도파로의 재료로 이용할 수 있는 장점에 많은 주목을 받아 왔다. 최근에는 측면 연마된 광섬유 위에 금속 클래딩을 가지는 평면 도파로가 올려진 광결합기의 특성에 대한 연구가 보고되고 있다.<sup>[9-12]</sup> 금속은 광학적으로 클래딩 역할을 할 수 있을 뿐만 아니라 전기적으로 전극 역할도 할 수 때문에 금속박막의 광학적 효과를 이해하는 것은 능동 및 수동 광섬유 소자 설계에 꼭 필요하다.

본 논문에서는 금속이 평면 도파로의 클래딩 역할을 할 때 금속막의 재료, 금속막의 두께 그리고 금속막 위에 올려진 최상부층의 굴절률이 소자 특성에 미치는 영향을 실험으로 측정하고 그 결과를 설명한다. 이 소자는 광섬유와 평면도파로로 이루어진 비대칭적 구조를 가지는 방향성 결합기로 볼 수 있다. 비대칭적 결합기에서는 두 도파로 사이에 위상정합 조건이 특정한 파장에서 만족하기 때문에 파장 선택성을 가진다. 이 소자의 편광 선택성은 평면도파로 물질의 복굴절과 도파로 구조의 비등방성에서 발생하는 구조적 복굴절에 기인한다.

본 논문의 실험 결과 TM 편광의 경우 공진파장과 공진깊이(공진파장에서 소멸비)가 최상부층의 굴절률에 매우 민감하게 변하는 특성을 보였다. 소자의 공진파장은 평면도파로와 광섬

유 사이의 위상 정합 조건으로부터 구한 예측치와 잘 일치하였고, 공진 깊이는 금속 클래딩에 의한 평면도파로의 손실의 크기와 밀접한 관계가 있었다. 금속층의 두께가 충분히 두꺼울 때 제작된 소자는 TE와 TM 편광 모두에 대해서 높은 파장 선택성을 보였고 두 직교하는 편광의 공진파장영역은 완전히 분리되는 현상을 보였다. 금속층 두께가 표피깊이에 비해 충분히 두꺼울 경우 금속 아래 버퍼층 없이도 금속을 TE 편광이나 TM 편광의 공진 파장을 가변 시키기 위한 전극으로 사용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

### II. 소자의 동작 특성

일반적으로 측면 연마된 광섬유 위에 유전체 막이 형성된 소자를 광섬유-평면도파로 결합기라 일컫는다. 이 소자의 가장 큰 특징은 파장 및 편광 선택성이다. 결합 모드이론에 의하면 두 개의 도파로가 소산장 결합이 되었을 때 두 광도파로 사이의 위상정합 조건이 만족할 때 효과적인 광에너지 교환이 발생한다. 광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 작아서 파장에 따른 유효굴절률 변화가 매우 작지만 평면 도파로는 코어와 클래딩의 굴절률 차이를 크게 줄 수 있다. 따라서 특정한 파장에서 두 도파로의 유효굴절률이 일치하는 현상이 이 소자의 파장선택성의 근원이다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 측면 연마된 광섬유와 금속 클래딩을 가지는 평면 도파로가 결합되었을 때 금속의 재료 및 두께, 그리고 최상부층의 굴절률( $n_{sm}$ )이 소자의 특성에 미치는 영향을 측정하고 그 결과를 분석한다. 금속과 유전체 경

<sup>†</sup>E-mail: ktkim@honam.ac.kr

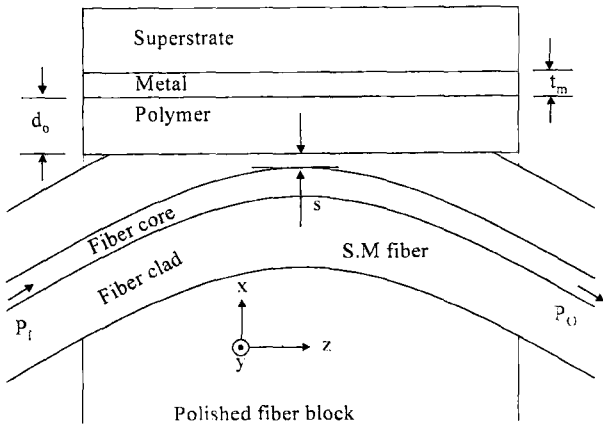


그림 1. 금속 클래딩을 가지는 평면도파로와 결합된 측면 연마 광섬유 구조.

계에서 TE 모드는 전기장이 연속이지만 TM 모드는 전기장이 연속이 아니기 때문에 평면도파로는 매우 큰 구조적 불균질성을 가지며 이러한 결과로 이 결합기 소자는 매우 높은 편광 선택성을 가진다. 우선 금속-금속층의 두께가 광학적으로 무한대인 경우 평면도파로는 3층 구조를 가지며 다음과 같은 고유치 방정식을 가진다.<sup>15)</sup>

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

여기서  $m$ 은 모드의 차수를 나타내는 정수,  $\lambda$ 는 광의 파장,  $d_0$ 는 평면도파로의 코어층 두께,  $n_o$ 는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고  $n_{eo}$ 는  $m$ 번째 고차모드의 유효 굴절률이다.  $\psi_1$ 과  $\psi_2$ 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이로서 다음과 같이 주어진다.

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

여기서  $\zeta$ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해서는  $\zeta=1$ , TM편광에 대해서는  $\zeta=n_o^2/n_i^2$ 을 대입하면 된다.  $n_i$ 는 평면도파로 상하부 클래딩의 굴절률이다. 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이에 위상 정합 조건을 대입하면 공진 파장을 구할 수 있다.

만일 평면도파로에 매우 얇은 금속층이 포함되면 평면 도파로는 4층 구조로 간주한다. 금속층이 포함된 평면 도파로의 근사적인 유효굴절률을 구하는 방법은 몇 가지가 알려져 있다.<sup>11-13)</sup> 평면 도파로의 근사적인 유효굴절률을 구한 후 보다 정확한 유효굴절률은 뉴튼-랩슨 방법으로 구할 수 있다. 광섬유를 등가적인 평면 도파로로 대치한 후 이 소자를 결합 모드 이론으로 해석하는 방법<sup>12)</sup>을 도입하여 소자의 파장 및 편광 선택성을 분석하였다. 소자 해석시 광섬유 코어의 반지름은 4.1  $\mu\text{m}$ , 광섬유 코어의 굴절률은 1.451, 클래딩의 굴절률은 1.446로 가정 하였다. 실제 소자에서는 광섬유와 평면도파로 사이의 간격이 광의 진행 방향에 따라 연속 적으로 바뀌지만 본 논문에서는 소자의 해석 시간을 줄이기 위하여 등가적인 결합 길이<sup>14)</sup>

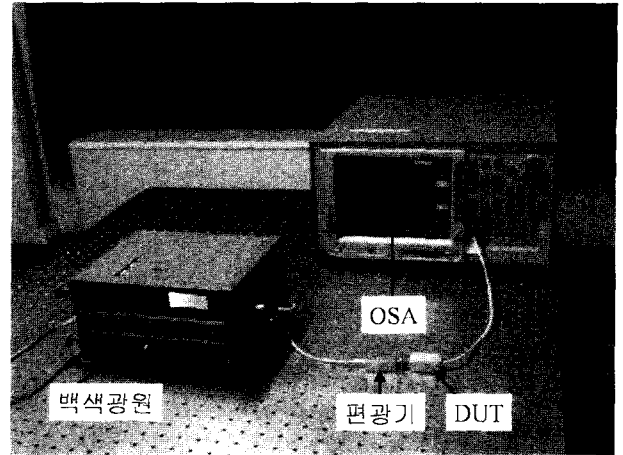


그림 2. 소자의 특성을 측정하기 위한 장치.

내에서는 결합 간격이 일정한 한 것으로 간주하였다. 광섬유와 평면 도파로 사이의 간격은 3  $\mu\text{m}$ , 결합 길이는 0.9 mm로 가정하였다. 또한 물질의 불균질과 분산은 고려하지 않았다.

### III. 실험 및 분석

광섬유 클래딩의 측면을 연마하여 일부분을 제거하기 위해 퀴츠 블록에 곡률 반경이 25 cm인 구부러진 홈을 파고 그 속에 일반 통신용 단일모드 광섬유를 에폭시 접착제로 고정한다. 클래딩을 3~4  $\mu\text{m}$  남기고 연마로 제거한 후 폴리머를 스펀코팅 한다. 폴리머의 굴절률은 파장 1300 nm에서 1.60인 포토레지스터(AZ4562)를 이용하였다. 폴리머를 140°C에서 20분간 경화 후 열 증착기로 알루미늄 박막을 폴리머 위에 형성시킨다. 금속 박막의 두께는 엘립소메터(Ellipso-meter)로 측정하였다. TE 편광과 TM 편광에 대한 특성을 분석하기 위하여 표면 플라즈몬 효과를 이용한 편광기를 제작하였다. 그림 2는 제작된 소자의 특성을 측정하기 위한 실험 장치도 이다. 이러한 실험장치는 모든 실험이 광섬유 상에서 이루어지기 때문에 복잡한 정렬이 필요하지 않는다.

우선 폴리머 위에 유전체, 또는 금속이 놓인 경우 TE 편광과 TM 편광에 대해 파장 응답 특성을 측정하여 그림 3에 제시하였다. 금속의 두께는 광학적으로 무한대로 간주할 수 있을 정도로 100 nm이상 두껍게 증착하였다. 그림 4는 식(1)을 이용하여 주어진 소자 구조에서 평면 도파로의 분산 그래프이다. 금속 클래딩인 경우 유효굴절률의 실수부만 나타낸 것이다. 광섬유 모드의 유효굴절률과 평면 도파로의 최고차모드의 유효굴절률이 일치하는 파장에서 공진 결합이 발생한다. 유전체의 굴절률이 1.0에서 1.446으로 바뀌면 평면 도파로 최고차모드의 유효 굴절률이 증가하여 공진파장이 장파장 쪽으로 이동하는 현상을 보였다. 평면 도파로가 대칭적 구조를 지닐 때 TE와 TM 편광의 공진파장 간격이 최소화될 수 있다. 반면 금속을 클래딩으로 사용하면 TE 편광의 공진 위치는 유전체 클래딩 보다 더 단 파장으로 이동한다. 반면 TM 편광의 공진 위치는  $n_{eo}=1$  공기 일 때보다는 단파장으로  $n_{eo}=1.446$

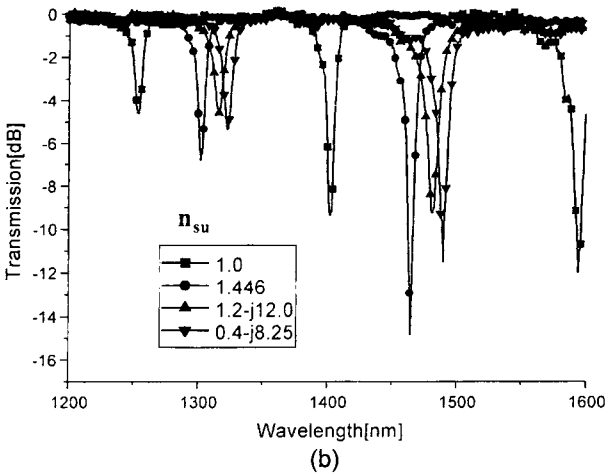
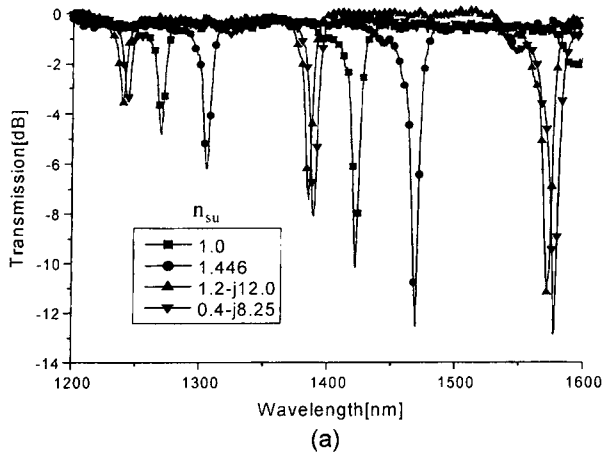


그림 3. 최상부층의 매질에 따른 소자의 파장 및 편광 응답, (a) TE 편광, (b) TM 편광,  $n_{su}$ 는 최상부층의 굴절률을 의미함.

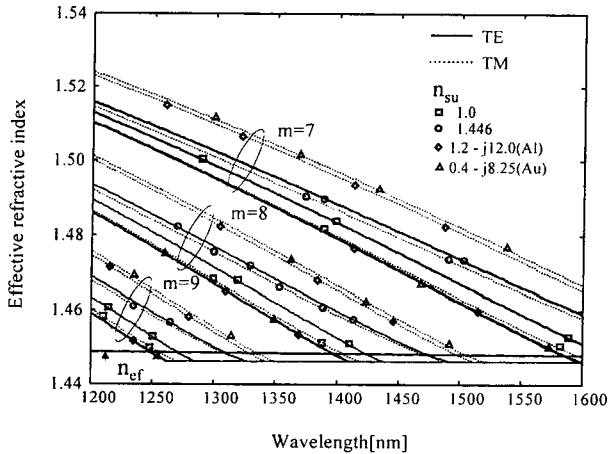


그림 4. 최상부층 매질의 종류에 따른 평면도파로의 분산 곡선  $d_o = 8.75 \mu\text{m}$ .

인 경우 보다는 장파장으로 이동하였다. 금속을 평면 도파로의 클래딩으로 사용하면 TE 편광과 TM 편광의 공진파장 영역이 완전히 분리됨을 알 수 있다. 클래딩으로 알루미늄을 사용했을 때 공진 파장이 금(Au)일 때 보다 더 짧고 공진 길이

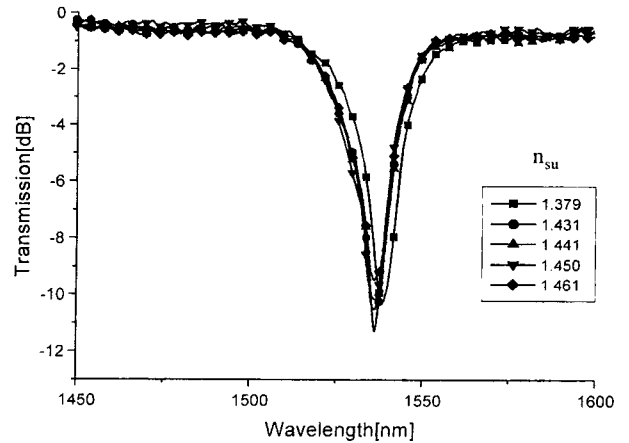


그림 5. 금속의 두께가 유한할 때 TE 편광에 대한 소자의 파장 응답 특성(실험 결과),  $d_o = 11.7 \mu\text{m}$ ,  $t_m = 12 \text{ nm}$ .

도 더 얇음을 알 수 있다. 특히 TM 편광일 때 더 확연하게 이 현상이 보인다. 이 현상은 금속의 비유전률(relative permittivity)로 설명 할 수 있다. 비유전률의 실수부는 공진 파장의 위치를 결정하며 허수부는 공진 깊이에 관계된다. 비유전률의 실수부는 알루미늄이 더 작다. 이는 결과적으로 평면도파로의 최고차모드의 유효 굴절률의 실수부가 알루미늄이 더 작고 공진 파장도 더 짧다. 비유전률의 허수부의 크기가 클수록 금속에 의한 흡수손실이 더 크게 나타난다. 상대적으로 비유전률의 허수부의 크기가 작은 금일 때 공진시 유효굴절률의 허수부에 의한 위상 부정합이 작게 발생하여 공진이 깊게 나타난다.

금속층의 두께가 유한 할 때 금속층 위에 놓인 유전체의 굴절률이 소자의 전달특성에 영향을 미친다.<sup>[12]</sup> 이러한 현상을 실험하기 위해 다양한 굴절률을 가지는 용액이 필요하다. 글리세린과 물을 적절히 희석하여 다양한 굴절률을 가지는 용액을 준비하였다. 금속(알루미늄)의 두께와 용액의 굴절률에 따른 소자의 전달특성을 측정하였다. 그림 5는 TE 편광의 파장 응답이고 그림 6은 TM 편광의 파장응답이다. TE 편광의 파장 응답특성은 이와 같은 소자 구조 조건에서 측정된 TM 편광의 파장 응답보다 최상부의 굴절률의 영향을 상대적으로 훨씬 적게 받는 것을 보이고 있다. TE 모드는 금속 내부에서 급속히 장의 세기가 감소하기 때문이다.

반면 TM 편광의 경우 최상부층의 굴절률에 전달특성이 매우 민감한 현상이 그림 6에 나타나 있다. 금속과 유전체 사이의 경계조건을 적용하면 TM 편광성분은 상대적으로 TE 편광보다 금속층을 더 잘 투과하기 때문에 최상부층의 굴절률에 매우 민감하게 소자의 전달특성이 변한다. 금속층의 두께가 금속박막의 표피깊이(파장  $1.3 \mu\text{m}$ 에서  $17 \text{ nm}$ )보다 훨씬 두꺼운 경우 금속의 두께는 광학적으로 무한대로 볼 수 있기 때문에 소자의 전달 특성은 최상부층의 굴절률과 무관하게 된다. 그림 6에서 나타나 있듯이 금속막의 두께가 증가함에 따라 최상부층의 굴절률 변화에 따른 공진파장의 이동 폭이 감소함을 알 수 있다. TM 편광의 경우 최상부층의 굴절률이 증가함에 따라 공진파장은 장파장 방향으로 증가하다가 갑자기 단파장

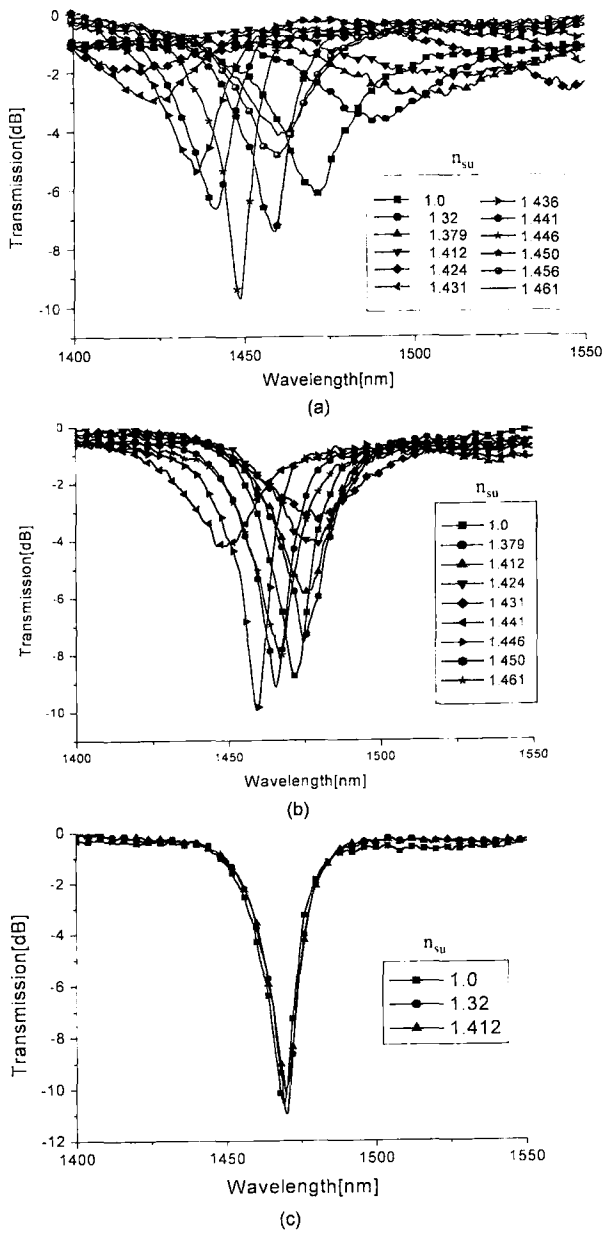


그림 6. 금속의 두께가 유한할 때 TM 편광에 대한 소자의 파장 응답 특성(실험 결과),  $d_o = 11.7 \mu\text{m}$ , (a)  $t_m = 12 \text{ nm}$ , (b)  $t_m = 24 \text{ nm}$ , (c)  $t_m = 48 \text{ nm}$ .

방향으로 크게 천이 함을 그림 6(a)와 6(b)를 통해 알 수 있다. 이론적 결과도 그림 7에 나타나 있듯 이와 동일한 현상을 보인다. 이는 평면도파로의 유효굴절률이 최상부층의 굴절률에 대해서 Tangent 함수이며 최상부층의 굴절률이 1.42~1.43 사이에서 유효굴절률이 갑자기 변하기 때문에 공진 파장이 갑자기 변하는 것이다. 즉 금속층과 최상부 유전체층 경계에서 발생하는 모드의 위상천이(Goods-Haenchen shift)량이 갑자기 변하기 때문으로 이해 될 수 있다. 최상부 층의 굴절률이 1.0에서 1.424까지 점점 증가 할 때 공진깊이가 점점 얕아 지는 현상을 관측할 수 있다. 즉 손실을 가지는 금속내부에 광을 잘 국한시키는 조건을 만족할 때 광손실이 매우 크다. 하지만

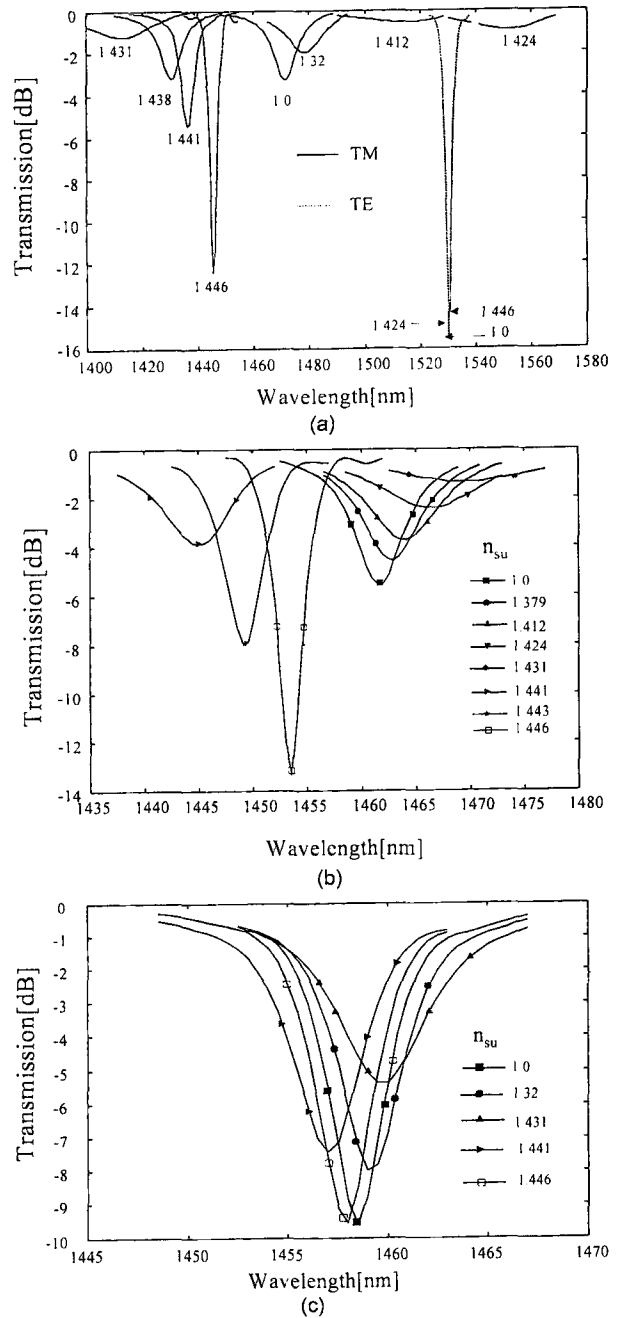


그림 7. 금속의 두께가 유한할 때 소자의 파장 응답 특성(이론적 결과),  $d_o = 11.7 \mu\text{m}$ , (a)  $t_m = 12 \text{ nm}$ , (b)  $t_m = 24 \text{ nm}$ , (c)  $t_m = 48 \text{ nm}$ .

최상부층의 굴절률이 광섬유의 클래드의 굴절률과 동일한 1.446으로 근접함에 따라 실험 및 이론 결과 모두 점점 공진이 깊어지고 공진의 폭은 좁아짐을 보인다. 이 경우는 최상부층의 굴절률이 증가함에 따라 최상부층 내에 광전력이 상대적으로 커지는 반면 금속내부의 광전력이 감소하며 그 결과 최고차모드의 손실이 줄어들어 위상 부정합이 감소하기 때문이다. 최상부층의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 더 큰 경우 광섬유 모드는 최상부층으로 누설이 발생하며, 광섬유와 평면도파로의 위상정합 조건이 존재할 수 없기 때문에 공진 깊

이가 감소함을 그림 6로 부터 알 수 있다. TM 편광의 경우, 금속의 두께가 점점 증가하는 상황에서 최상부층이 공기일 때는 공진 파장이 단파장으로 그리고 최상부층의 굴절률이 1.446일 때는 장파장 쪽으로 이동하며 금속의 두께가 표피 깊이의 수배 이상일 때는 최상부층의 굴절률이 소자의 특성에 영향을 주지 못한다.

이상의 실험 결과를 볼 때 금속층의 두께가 충분히 두꺼우면 TE 편광 뿐만 아니라 TM 편광 성분도 매우 높은 파장 선택성을 보임을 알 수 있었고 따라서 충분히 두꺼운 금속막을 TE 혹은 TM 편광의 공진 파장을 가변시키기 위한 전극으로 이용 가능함을 예측할 수 있다. 그리고 금속막의 두께가 유한할 때 TE 편광의 전달 특성은 최상부층의 굴절률에 거의 영향을 받지 않지만 TM 편광의 전달 특성은 매우 민감함을 알 수 있다. 따라서 두 직교하는 편광의 공진파장 차이를 이용하면 이 소자를 용액의 굴절률을 측정하기 위한 센서로 이용 가능함을 실험 결과로부터 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

측면 연마된 광섬유와 금속층을 클래딩으로 가지는 평면 도파로가 결합된 광섬유 소자의 파장 및 편광 선택성을 측정하였다. 금속층이 매우 두꺼울 때 이 소자는 매우 높은 파장 선택성과 편광 선택성을 보였다. 금속층이 충분히 두꺼울 때 금속을 전극으로 사용할 수 있음을 실험결과로 보였다. 금속층의 두께가 유한한 경우 TE 편광의 파장응답은 금속의 두께와 최상부층의 굴절률에 거의 영향을 받지 않았으나 TM 편광의 파장 응답은 소자의 구조에 매우 민감하게 반응하였다. TM 편광을 사용할 때 소자의 공진파장을 최상부층의 굴절률로서 조절 할 수 있는 특성은 광섬유-평면 도파로 결합기를 이용한 능동소자의 동작파장을 선택하는 것을 보다 자유롭게 만들어 줄 수 있음을 의미한다. 또한 TE 편광의 공진파장은 고정되어 있고 TM 편광의 공진파장이 최상부층의 굴절률에 의존하는 현상을 이용하면 이 소자를 용액의 굴절률을 측정하기 위한 광센서로 활용 할 수 있다. 금속을 평면 도파로의 클래딩으로 이용할 때 금속의 광학적 특성에 따라 공진 파장의 위치와 공진 깊이가 달라지는 현상을 이용하면 이 소자를 금속의 광학적 상수를 측정하기 위한 센서로 이용할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

[1] S. A. Hamilton, D. R. Yankelevich, A. Knoesen, R. T. Weverka, R. A. Hill, and G. C. Bjorklund, "Polymer in-line fiber modulators for broadband radio-frequency optical links," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 15, no. 2, pp. 740-750 1998.  
[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] 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.  
[4] 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. 150, pp. 150-156, 1998.  
[5] W. Johnstone, G. Fawcett, and L. W. K. Yim, "Inline fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fiber-to-planar polymer-waveguide couplers," *IEEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 141, no. 5, pp. 229-302, 1994.  
[6] A. A. Alvarez-Herrero, H. Guerrero, T. Belenguier, and D. Levy, "High-sensitivity temperature sensor based on overlay on side-polished fibers," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 1043-1045, 2000.  
[7] R. Slavik, J. Homola, and J. Ctyroky, "Miniaturization of fiber optic surface plasmon resonance sensors," *Sensors and Actuators B*, vol. 51, pp. 311-315, 1998.  
[8] 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 Photonics Tech. Lett.*, vol. 13, no. 11 pp. 1209-1211, 2001.  
[9] V. Kutsaenko, W. Johnstone, E. Lavreskii, and J. Rice, "Polarization properties of a fiber to planar waveguide coupler incorporating a thin metal layer," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 6, no. 11, pp. 1344-1346, 1994.  
[10] W. Johnstone, V. Kutsaenko, J. Rice, and G. Fawcett, "Polarisation referencing in refractometry using fiber to planar waveguide couplers incorporating thin metal layer," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 10 pp. 781-782, 1994.  
[11] 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 waveguide," *Opt. Comm.*, vol. 180, pp. 37-42, 2000.  
[12] 김광택, 황중호, 이준욱, 김상우, 강신원, 서동일, 송재원, "측면 연마된 광섬유와 금속박막이 포함된 평면도파로 사이의 광결합," *한국광학회지*, 12권 5호, pp. 406-413, 2001.  
[13] E. K. Sharma and M. P. Singh, "Multilayer waveguide devices with absorbing layers: an exact analysis," *J. of Optical Comm.*, vol. 14, no. 5, pp. 134-137, 1996.  
[14] R. Vallee and G. He, "Coupling between an optical fiber and a planar waveguide," *Opt. Comm.*, vol. 126, pp. 293-307, 1996.

**Wavelength and polarization selectivity of a side-polished fiber contacted with a metal-clad planar waveguide**

Jung Ho Hwang, Jun Ock Lee, Cheol Ho Kim, Seung Hwangbo, and Kwang Taek Kim<sup>†</sup>

*Division of Optoelectronics, Honam Univ., Gwangju 506-714, KOREA*

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

Jae Pyung Ma

*Division of Electronics, Honam Univ., Gwangju 506-714, KOREA*

Kyung-Rak Sohn and Jae-Won Song

*Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, KOREA*

(Received December 27, 2001 ; revised manuscript received March 5, 2002)

We report an experimental investigation of the wavelength and polarization selectivity of a side-polished fiber in contact with a metal-clad planar waveguide. The influences of the structural parameters of the planar waveguide, including refractive index of the superstrate and metal thickness, on the optical transmission characteristics of the device were measured and explained. The conditions for high wavelength and polarization selectivity were predicted and demonstrated experimentally.

*Classification code* : FO.010.