

광섬유와 금속 박막이 포함된 평면 도파로 사이의 광결합

황 중 호, 이 준 옥, 황보 승, 김 철 호, 김 광 택  
 호남대학교 전기 전자 전파 공학부

Optical Coupling between Fiber and Planar Waveguide with Thin Metal Film

J. H. Hwang, J. O. Lee, H. Hwangbo, C. H. Kim, K. T. Kim  
 School of electric and electronic engineering, Honam University

**Abstract** - 단일 모드 광섬유의 클래딩을 코어 가까이 연마로 제거한 후 그 표면 위에 유전체와 금속 박막층이 형성된 소자의 광전달 특성을 이론과 실험으로 분석하였다.

1. 서 론

단일 모드 광섬유를 코어 가까이 연마한 후 그 위에 평면도파로를 증착시켜 다양한 응용소자로 이용하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이들 소자를 이용하면 광통신 소자(1)나 광센서 소자(2)로 이용 가능성이 보고되고 있다. 본 논문은 측면 연마된 광섬유 위에 유전체와 금속박막을 형성시킨 소자의 광전달을 이론과 실험으로 분석하기로 한다.

2. 본 론

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 위에 금속박막과 유전체로 이루어진 다층 평면 도파로가 형성된 소자의 특성을 이론과 실험으로 분석하였다. 특히 금속 박막의 두께와 그 위에 올려지는 유전체의 굴절률이 소자의 파장 및 편광 의존성에 미치는 영향을 분석하였다. 소자의 기본 구조는 [그림 1]과 같다. 소자 해석을 위해 구조를 등가화된 1차원 구조로 [그림 2]와 같이 바꾸었다.

금속의 굴절률은 복소수로 주어지며 유효굴절률을 구하는 고유치 방정식도 복소함수로 주어진다. 여기서 금속층을 포함하여 총 N개의 층과 N-1개의 경계를 가지는 평면도파로의 모드해를 구하는 과정을 소개한다. 다층도파로의 각층에서 장의 분포,  $\psi(x)$ 는 다음과 같이 주어진다.  $\psi(x)$ 는 TE 모드에 대해선  $E_y(x)$ , TM 모드에 대해선  $H_y(x)$ 에 해당된다.  $E_y$  와  $H_y$ 는 도파로 경계면과 수평인 전기장과 자기장의 분포를 의미한다.

$$\psi(x) = A_1 \exp(\gamma_1 x) \quad -\infty < x < x_1 = 0 \quad (1)$$

$$\psi(x) = A_N \cos[\gamma_N(x - x_{N-1})] + B_N \sin[\gamma_N(x - x_{N-1})]$$

각층의 경계의 위치는  $x_m$ , 굴절률은  $n_m$  으로 표시한다. x 방향 전파상수는  $m=1$ 일때  $\gamma_1 = k_0(n_c^2 - n_1^2)^{1/2}$ ,  $m > 1$  이면  $\gamma_m = k_0(n_m^2 - n_{m-1}^2)^{1/2}$ 으로 주어진다.  $n_c$ 는 모드의 유효굴절률을 나타낸다. 각 층의 경계에서 전기장과 자기장의 수평 성분이 연속인 조건을 대입하면 다음과 같은 방정식이 유도된다.

$$A_2 = A_1, \quad B_2 = G_1 A_1$$

$$A_{m+1} = A_m \cos(\gamma_m d_m) + B_m \sin(\gamma_m d_m) \quad (2)$$

$$B_{m+1} = G_m [-A_m \sin(\gamma_m d_m) + B_m \cos(\gamma_m d_m)].$$

여기서  $G_m$ 은 편광에 의존하는 상수로서 TE 모드에 대해선  $G_m = r_m / r_{m+1}$  TM모드의 경우,

$$G_m = [r_m / r_{m+1}] [n_{m+1}^2 / n_m^2]$$

이다.  $d_m = x_m - x_{m-1}$ . 이며 각 층의 두께를 나타낸다.

$x = \infty$  일 때  $\psi(x) = 0$ 으로 수렴하기 위해서는 다음과 같은 고유치 방정식이 주어진다.

$$F(n_e) = A_N \pm iB_N = 0 \quad (3)$$

$Im[\gamma_N]$  이 양의 값을 가질 때는 (+) 부호, 음일 때는 (-)부호를 취한다. 금속층이 포함된 다층 평면도파로의 정확한 유효굴절률은 다음 같은 Newton-Repson 방법으로 구할 수 있다[4].

$$n_e^{(1)} = n_e^{(0)} - F(n_e^{(0)}) / F'(n_e^{(0)})$$

$$n_e^{(p)} = n_e^{(p-1)} - F(n_e^{(p-1)}) / F'(n_e^{(p-1)}) \quad (4)$$

여기서  $n_e^{(0)}$ 은 유효굴절률의 초기값 이며  $n_e^{(1)}$ 과  $n_e^{(p)}$  유효굴절률의 1 및 p차 근사 해이다. p값이 커질 때 수렴하는 해를 구하기 위해서는 유효굴절률의 초기 값을 비교적 정확하게 구하는 것이 매우 중요하다.

측면 연마된 광섬유와 평면도파로 사이의 광 전력 교환은 결합 모드 이론으로 분석할 수 있다. 결합모드 이론에서 결합계수를 구하기 위해서 정규화(normalization)된 장의 분포를 구해야 된다. 정규화 조건은

$$TM \text{ 모드의 경우 } \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Re[H_y E_x^*] dx = 1, \quad TE \text{ 모드의}$$

경우  $-\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Re[E_y H_x^*] dx = 1$  로 주어진다. 금속층이 포함된 평면도파로의 모드의 세기는 복소수로 주어지며 광섬유모드와 평면도파로의 최고차 모드가 위상정합에 가장 근접해 있지만 상부 평면도파로의 유효굴절률은 복소수이기 때문에 완전한 위상정합조건은 발생하지 않는다.

광섬유 모드와 평면도파로의 최고차 모드 사이의 결합 모드 방정식은 다음과 같다[3].

$$\frac{dA_f(z)}{dz} = -ik_{fo} A_o(z) \exp(-i2\delta z)$$

$$\frac{dA_o(z)}{dz} = -ik_{of} A_f(z) \exp(i2\delta z) \quad (5)$$

$$k_{fo,of} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x) - n_{f,o}^2(x)] E^f(x) E^o(x) dx$$

$$M_{f,o} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x) - n_{f,o}^2(x)] (E^f(x))^2 dx$$

여기서는  $2\delta = (\beta_o + M_o) - (\beta_f - M_f)$ ,  $A_f$ 와  $A_o$ 는 광섬유모드와 평면도파로 최고차 모드의 크기(amplitude)를 나타낸다.  $\beta_o$  와  $\beta_f$ 는 두 도파로가 결합되기 전의 각 도파로 모드의 전파상수(propagation constant)이다.  $k_{fo}$  와  $k_{of}$  는 두 도파로 사이의 결합계수로서 광섬유 모드 분포의 전기장 분포  $E^f$  와 평면도파로 모드의 전기장 분포  $E^o$ 의 중첩 적분으로 구해진다. 결합계수는 두 도파로 사이의 간격에 매우 의존한다.

다.  $M_r$  와  $M_o$ 는 결합 후 각도파로 모드의 전파상수 변화분을 의미한다. 식(6)의 결합모드 방정식의 일반 해를 구한 다음 경계조건  $A_r(0)=1$ ,  $A_o(0)=0$ 을 적용하면 진행방향에 따른 광섬유 모드의 크기는 다음과 같이 주어진다.

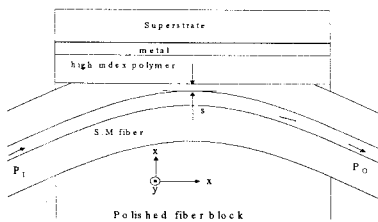
$$A_r(z) = \exp(-\delta z) \left[ \cos(\sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}} z) + i \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}}} \sin(\sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}} z) \right] \quad (6)$$

따라서 광섬유 출력단의 광전력은  $P_o(z) = |A_r(z)|^2$ 로 주어진다. 식(7)을 이용하여 소자의 전달 특성을 계산할 수 있다.

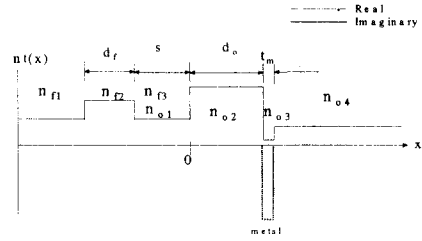
금속막의 두께 변화에 따른 TM 편광과 TE 편광의 파장응답을 측정하여 [그림 4]에 제시하였다. 그리고 실험과 같은 조건에서 파장응답 특성을 계산하여 그림 3에 제시하였다. 결합길이는 0.8mm로 가정하였다.  $n_{r1}=n_{r3}=n_{o1}=1.446$ ,  $n_{r2}=1.451$ ,  $n_{o2}=1.60$ ,  $n_{o3}=0.4-i8.25$ ,  $n_{o4}=1.0$ 으로 설정하였다. 그리고 평면도파로로 등가 시킨 광섬유 코어의 두께( $d_r$ )는  $7\mu m$ ,  $s=3\mu m$ , 폴리머 층의 두께( $d_o$ )는  $10.6\mu m$ 로 설정하였다. [그림 4]와 [그림 5]로부터 금속막의 두께가 증가하면 공진 현상은 단파장 쪽으로 이동하는 현상을 보였다. 이는 금속이 올라가면 평면도파로의 유효굴절률이 감소하기 때문이다. 또 다른 흥미로운 현상은 금속두께가 점점 증가함에 따라 공진파장에서 소멸비가 점점 감소하다가 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 평면도파로의 유효굴절률의 허수부가 금속막이 두께에 매우 의존함을 나타낸다 즉, 유효굴절률의 허수부에 의한 위상부정합이 증가하면 여과값이는 줄어들고 여과대역폭은 감소하게 된다. 이러한 특성을 이용하면 이소자를 금속 박막의 두께를 측정하기 위한 광센서로 활용 가능할 것으로 생각된다.

[그림 6]은 최상부층의 굴절률이 소자의 특성에 미치는 영향을 측정한 결과이다. TM 편광의 전달 특성은 상부층의 굴절률에 민감하게 변하는 반면에 TM 편광은 상부층의 굴절률에 거의 영향을 받지 않는다. TM 편광의 경우 공진 파장은 상부층의 굴절률이 증가하면 평면도파로의 유효굴절률이 증가하기 때문에 공진파장이 길어지는 효과가 나타난다. 하지만 상부층의 굴절률이 1.42 부근에서 갑자기 공진파장이 크게 짧아 지는 쪽으로 이동하는 현상이 이론과 실험으로 관측 되었다. 이는 최상부 경계에서 모드의 위상이 반전되기 때문으로 분석 되었다. 상부층의 굴절률이 1.44에서 매우 깊고 좁은 파장 응답 특성을 보였다. 즉 이때 평면도파로의 모드 손실이 최소가 됨을 의미한다.

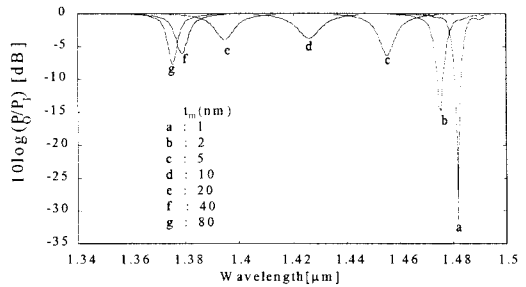
본 논문의 연구결과는 금속막과 광 모드사이 상호 작용을 분석하거나, 금속막의 두께나 광학적 특성을 측정하는데 유용할 것으로 기대한다.



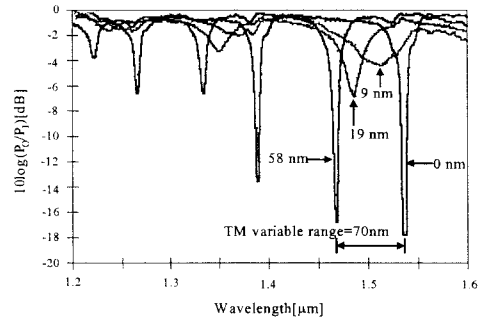
[그림 1] 광섬유-평면도파로 결합기 구조



[그림 2] 광섬유와 상부 평면도파로의 굴절률 분포

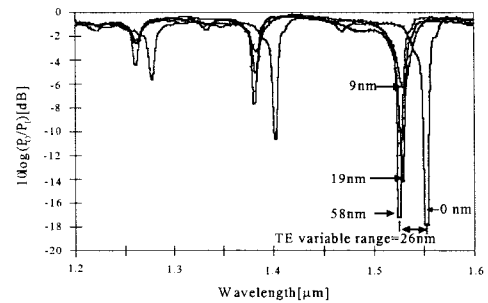


[그림 3] 금속막의 두께에 따른 결합기의 파장응답 변화 (이론적 결과)

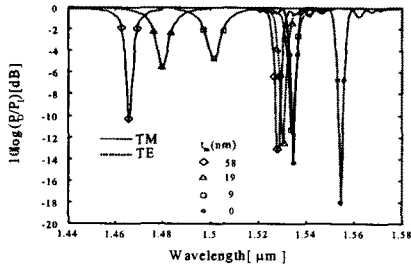


(a)

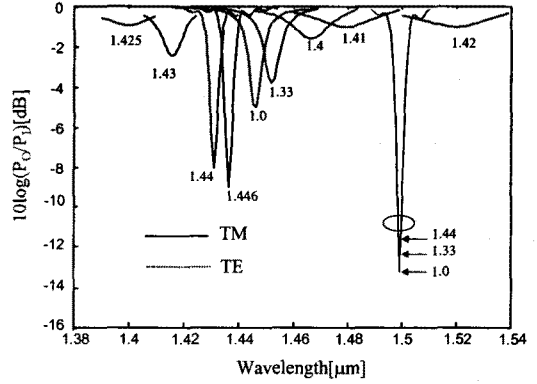
[그림 4] 편광의 금속 두께에 따른 파장 응답, 최상부층은 공기임, (a) TM, (b) TE



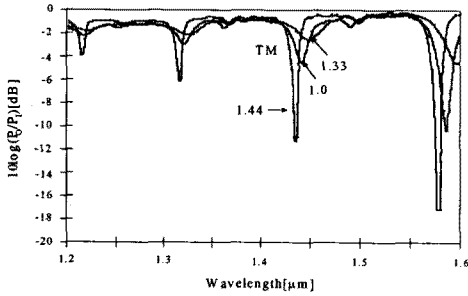
(b)



[그림 5] [그림 4]의 실험 조건으로 계산한 전달 특성

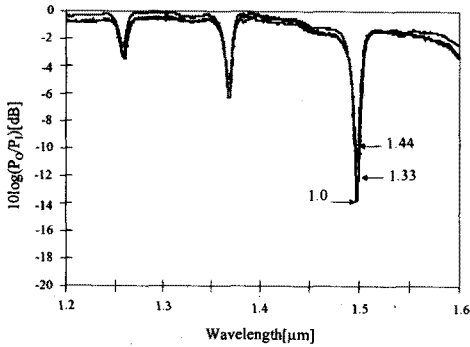


[그림 7] [그림 6]의 조건으로 계산한 파장응답



( a )

[그림 6] 상부층의 굴절률에 따른 파장응답,  
(a) TM, (b) TE



( b )

### 3. 결 론

광섬유의 클래딩을 코어 가까이 연마한 후 폴리머와 금속막을 증착시킨 후 이 소자의 특성을 측정하였다. 결합 모드이론으로 해석한 결과와 실험 결과는 잘 일치하였다. 제안된 소자는 광필터 기능과 편광기 기능을 가지고 있었다. 금속 두께에 따른 공진 파장의 이동 현상을 이용할 경우 금속막의 두께를 예측하기 위한 광센서로서 응용 가능성을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1]. K. T. Kim, H. W. Kwon, J. W. Song, S. Lee, W. G. Jung, 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.
- [2]. W. G. Jung, S. W. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, 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.11, No.13, 2001(to be published)
- [3]. Amnon Yariv, *Optical Electronics*, 3e, Holt-Saunders
- [4]. E. K. Sharma, M. P. Singh, *J. Opt. Commun.* 14, 134, 1993.