

측면 연마 광섬유와 금속 박막이 포함된 평면 도파로 사이의 광 결합

김광택* · 황중호 · 이준욱

호남대학교 전자공학과

☎ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

김상우

경북대학교 센서공학과

☎ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

강신원 · 서동일 · 송재원

경북대학교 전자전기공학부

☎ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

(2001년 5월 2일 받음, 2001년 8월 29일 수정본 받음)

측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유 위에 금속박막이 포함된 평면 도파로가 올려진 광섬유-평면도파로의 파장 및 편광 선택성에 관하여 이론 및 실험 결과를 보고한다. 금속 박막이 포함된 평면도파로의 특성을 구하기 위한 간단하지만 정확한 해석기법을 기술하였다. 소자를 1차원으로 등가화 시켜 결합모드 이론으로 소자의 거동을 분석하였다. 금속막의 두께와 최상부층 물질의 굴절률이 동작 특성에 미치는 영향을 측정하였고 그 결과는 설명하였다.

분류코드 : FO.010, FO.030, OE.010, OM.020.

I. 서 론

광섬유-평면도파로 결합기는 한쪽 클래딩이 코어 가까이 연마된 광섬유와 그 위에 형성된 평면도파로 사이의 소산장 결합(evanescent field coupling)을 이용하는 소자로서 광섬유를 절단하지 않고 다양한 광학적 기능을 구현할 수 있어 많은 주목을 받아왔다. 이 소자는 광변조기/스위치,^[1,2] 광필터,^[3,4] 편광기,^[5] 굴절계^[6]로 이용될 수 있음이 검증되었다. 이들 소자들은 삽입손실이 매우 작고 기계적 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 평면도파로의 재료로 이용되는 물질의 굴절률에 제한 받지 않는 특성 때문에 반도체, 폴리머, 크리스탈, 액정크리스탈 같은 다양한 물질이 이용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

광섬유-평면도파로 결합기의 가장 중요한 특성은 파장 및 편광 선택성이다. 결합 모드이론에 의하면 광섬유 모드와 평면도파로 모드사이의 위상 정합조건이 만족할 때 효과적인 광결합이 발생한다.^[7] 광섬유와 평면도파로는 서로 다른 도파로 분산을 가지며 위상 정합조건은 특정한 파장에서 만족하게 된다. 광섬유-평면도파로 결합기의 편광선택성은 연마된 광섬유 위에 올려지는 평면도파로의 구조적 복굴절이나 물질고유 복굴절에 의해서 발생한다.

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 위에 금속박막이 포함된 평면도파로가 올려진 소자의 특성을 이론과 실험으로 분석하였다. 금속 막이 포함된 다층 평면도파로가 가지는 모드의 해

를 구하는 기법을 소개하였다. 소자 해석을 단순화 시키기 위하여 광섬유를 등가 적인 평면도파로로 대체시켜 2차원 단면 구조를 1차원으로 바꾸어 결합모드이론(coupled mode theory)으로 광섬유 모드와 평면도파로 모드사이의 결합 특성을 분석하였다. 이러한 해석기법은 평면도파로가 측 방향으로 광을 국한하지 못하기 때문에 발생하는 회절손실이 고려되지 않기 때문에 엄밀한 해석 기법은 아니지만 평면도파로의 구조에 따른 소자의 파장 및 편광 선택성에 미치는 영향을 근사적으로 구하기 위하여 유용하다.^[8] 이러한 해석 기법을 사용하여 금속막의 두께와 금속막 위에 올려진 유전체의 굴절률이 소자의 특성에 미치는 영향을 분석하는데 초점을 맞추었다. 본 논문의 연구결과는 금속막이 포함된 다층 도파로 소자를 설계하거나 분석하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

II. 이 론

2.1. 소자 구조의 단순화

본 논문에서는 그림 1에서 제시된 바와 같이 측면 연마된 단일모드 광섬유 위에 금속박막과 유전체 층으로 이루어진 다층 도파로가 형성된 소자의 특성을 분석한다. 특히 상부평면도파로 위에 올려진 금속 박막의 두께와 금속박막 위에 올려진 최상부층(superstrate)의 굴절률에 따른 소자의 파장 및 편광 특성 변화를 구하는데 초점을 두었다.

그림 1의 소자 구조를 단순화시켜 결합모드이론으로 소자를 해석하였다. 광섬유를 유효굴절률이 일치하는 평면도파로로 바

*E-mail: ktkim@honam.ac.kr

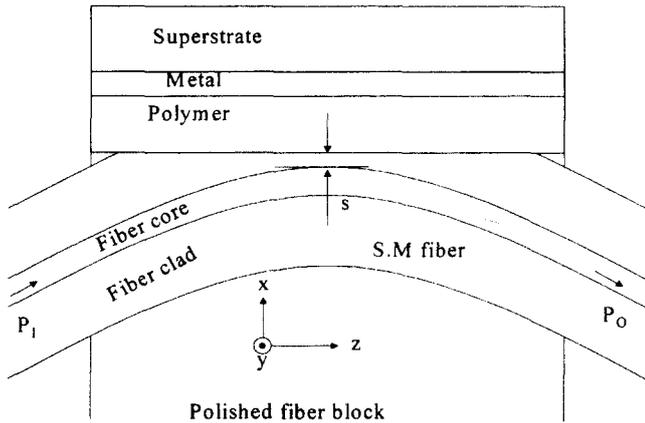


그림 1. 측면 연마된 광섬유와 금속 박막이 포함된 평면도파로 사이의 광결합 구조.

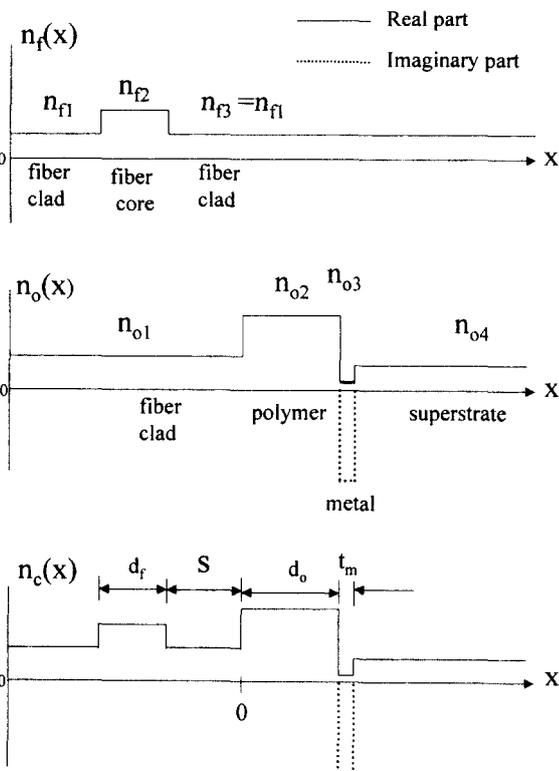


그림 2. 1차원으로 등가화된 소자의 굴절률 분포.

꾸어 해석하는 방법^[8]이 유용하게 된다. 광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률차이가 매우 작아서 편광이나 파장에 따른 유효굴절률 변화가 매우 작지만 그 위에 올려진 평면도파로는 구조에 따라 매우 큰 분산과 복굴절을 가질 수 있다. 1차원으로 등가화된 소자의 단면구조는 그림 2에 나타나 있다. $n_f(x)$ 는 평면도파로로 등가화된 광섬유의 굴절률 분포, $n_o(x)$ 는 측면 연마된 광섬유 위에 올려진 평면 도파로 굴절률 분포를 나타낸다. 평면도파로의 하부 클래딩(cladding)은 광섬유 클래딩과 동일하다. $n_c(x)$ 는 두 도파로가 소산장(evanescent field) 결합 구조를 가질 때의 전체적인 굴절률 분포를 나타낸다.

일반 광통신용 광섬유 코어의 지름은 약 $8.0\mu\text{m}$, 코어 굴절

률은 파장 $1.3\mu\text{m}$ 에서 1.452, 그리고 코어와 클래딩의 굴절률 차이는 0.005 정도이다. 이를 등가적인 1차원 구조로 변경하기 위한 구조 변수 d_f, n_1, n_2 는 파장에 따라서 미소하게 바뀌지만^[8] 소자의 중요특성이 상부 평면도파로의 구조에 주로 의존하기 때문에 여기서는 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 에서 d_f 는 $7\mu\text{m}$, $n_1 = n_2 = 1.446$, $n_3 = 1.451$ 으로 각각 결정하였다. 광섬유의 모드의 해는 간단하게 구할 수 있지만 금속박이 포함된 다층도파로의 모드의 해(유효굴절률과 모드 생김새)는 복소평면에서 해를 구해야 하기 때문에 다소 복잡한 과정이 필요하다.

2.2. 금속박막이 포함된 평면도파로 해석

금속의 굴절률은 복소수로 주어지며 유효굴절률을 구하는 고유치 방정식도 복소함수로 주어진다. 여기서 금속층을 포함하여 총 N개의 층과 N-1개의 경계를 가지는 평면도파로의 모드 해를 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.

$$\begin{aligned} \psi(x) &= A_1 \exp(\gamma_1 x) & -\infty < x < x_1 = 0 \\ \psi(x) &= A_2 \cos[\gamma_2(x-x_1)] + B_2 \sin[\gamma_2(x-x_1)] & x_1 \leq x \leq x_2 \\ & \vdots \\ \psi(x) &= A_N \cos[\gamma_N(x-x_{N-1})] + B_N \sin[\gamma_N(x-x_{N-1})] & x_{N-1} < x < \infty \end{aligned} \quad (1)$$

각층의 경계의 위치는 x_m , 굴절률은 n_m 으로 표시한다. x 방향 전파상수는 $m=1$ 일 때 $\gamma_1 = k_0(n_e^2 - n_1^2)^{1/2}$, $m>1$ 이면 $\gamma_m = k_0(n_m^2 - n_e^2)^{1/2}$ 으로 주어진다. n_e 는 모드의 유효굴절률을 나타낸다. 각 층의 경계에서 TE 모드의 경우 ψ 와 $\partial\psi/\partial x$ 가 연속이며, TM의 경우 ψ 와 $1/n_m^2 \partial\psi/\partial x$ 연속인 경계조건을 이용하여 다음과 같은 순환 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_2 &= A_1, \quad B_2 = G_1 A_1 \\ A_{m+1} &= A_m \cos(\gamma_m d_m) + B_m \sin(\gamma_m d_m) \\ B_{m+1} &= G_m [-A_m \sin(\gamma_m d_m) + B_m \cos(\gamma_m d_m)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 G_m 은 편광에 의존하는 상수로서 TE 모드에 대해선 $G_m = r_m/r_{m+1}$, TM 모드의 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. 최 상부 층에서 x 가 증가함에 따라서 모드의 세기가 지수 함수적으로 감소하며, $x = \infty$ 일 때 $\psi(x) = 0$ 으로 수렴하기 위해서는 다음과 같은 고유치 방정식이 주어진다.

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

$\text{Im}[\gamma_N]$ 이 양의 값을 가질 때는 (+) 부호, 음일 때는 (-) 부호를 취한다. 금속층이 포함된 다층 평면도파로의 정확한 유효굴절률은 다음과 같은 Newton-Raphson 방법^[9]으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_e^{(1)} &= n_e^{(0)} - F(n_e^{(0)})/F'(n_e^{(0)}) \\ n_e^{(p)} &= n_e^{(p-1)} - F(n_e^{(p-1)})/F'(n_e^{(p-1)}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $n_e^{(0)}$ 은 유효굴절률의 초기 근사값이며 $n_e^{(1)}$ 과 $n_e^{(p)}$ 유효

굴절률의 1 및 p차 근사 해이다.

p값이 커질 때 수렴하는 해를 구하기 위해서는 유효굴절률의 초기 값을 비교적 정확하게 구하는 것이 매우 중요하다. 유효굴절률은 $n_e = n_{er} + in_{ei}$ 와 같이 실수부와 허수부로 나누지진다. 따라서 유효굴절률의 초기 근사값은 $n_e^{(0)} = n_{er}^{(0)} + in_{ei}^{(0)}$ 의 형태로 주어진다. 실제로 금, 은, 동, 알루미늄과 같은 양도체에서 상대 유전률(n^2)의 실수부의 크기가 허수부의 크기보다 훨씬 크기 때문에 n^2 대신에 $Re[n^2]$ 를 고유치 방정식에 대입하여 $n_{er}^{(0)}$ 구할 수 있다.¹⁾

본 논문에서는 $n_{er}^{(0)}$ 를 결정하면 고유치 방정식은 n_{ei} 만의 함수가 되는 것에 기초하여 식 (3)에서 $1/|F(n_e)|$ 가 최대가 되는 n_{ei} 를 구하여 그 값을 $n_{ei}^{(0)}$ 로 결정하였다.

고유치 방정식을 만족하는 유효굴절률은 여러개가 존재할 수 있다. 유효굴절률의 실수부가 가장 큰 것이 최 저차 모드의 것이고 가장 작은 것이 최 고차 모드의 것이다. Newton-Raphson 방법으로 모드의 해, 즉 모드의 생김새와 유효굴절률을 구하기 위한 고유치 방정식의 유효 굴절률(n_e)에 대한 미분은 $F' = A_N' \pm iB_N'$ 은 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_1' &= 0, A_2' = 0, \\
 B_2' &= n_e k_0^2 B_2 (1/\gamma_1^2 + 1/\gamma_2^2) \\
 A_{m+1}' &= A_m' \cos(\gamma_m d_m) + B_m' \sin(\gamma_m d_m) \\
 &\quad - B_{m+1} n_e k_0^2 d_m / (\gamma_m G_m) \\
 B_{m+1}' &= n_e k_0^2 [A_{m+1} G_m d_m' \gamma_m + B_{m+1} (1/\gamma_{m+1}^2 - 1/\gamma_m^2)] \\
 &\quad + G_m [B_m' \cos(\gamma_m d_m) - A_m' \sin(\gamma_m d_m)].
 \end{aligned} \tag{5}$$

지금까지의 이론적 결과를 이용하여 그림 2에서 제시된 금속막이 포함된 4층으로 구성된 상부 평면도파로의 파장에 따른 유효굴절률을 구한 결과가 그림 3에 제시되어 있다. 폴리머의 두께(d_0)는 6 μm , 금속 층의 두께(t_m)는 20 nm으로 가정하였다. 각 층의 굴절률은 파장 1.2~1.6 μm 범위에서 $n_{o1} = 1.446$, $n_{o2} = 1.6$, $n_{o3} = 0.4 - i8.25$, $n_{o4} = 1.0$ 이다. 금속의 재료는 금으로 가정하였다. 금의 표피두께는 파장 1.3 μm 에서 25 nm이다.

TM₀ 모드는 표면 플라즈몬 모드(surface plasmon mode)로서 그림 3(a)로부터 유효굴절률의 실수부(n_{er})가 상부 평면도파로의 코어층(폴리머)의 굴절률 보다 더 큰 값을 가짐을 알 수 있고 금속과 유전체 경계에 광전력이 강하게 국한되기 때문에 손실도 그림 3(b)로부터 알 수 있듯이 다른 모드보다 한 차수 더 크게 나타나는 특징이 있다. 하지만 평면도파로의 최고차 모드만 광섬유 모드와 위상정합을 만족할 수 있음을 보이고 있다. 특정한 파장에서 광섬유 모드와 평면도파로의 최고차 모드 사이의 위상정합 조건을 만족하게 되며 이때 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이에 가장 큰 광결합이 발생하게 된다. 각 도파로 경계에서 TE모드와 TM 모드의 경계조건이 다르기 때문에 공진파장은 편광상태에 의존하게 된다. 특히 금속층이 포함될 때는 TE모드와 TM 모드의 공진 파장이 금속층이 없을 때 보다 더 크게 분리 될 수 있다. 그림 3(a)에서 금속층이 포함될 경우 일반적인 유전체 구조와 달리 같은 모드 차수에서 TM모드의 유효굴절률의 실수부(n_{er})가 TE 경우의 값 보다 크다는 사실이 흥미롭다. TM 모드는 TE 모드보다 금속 층에 더 많은 광전력을 분포시키기 때문에 그림 3(b)

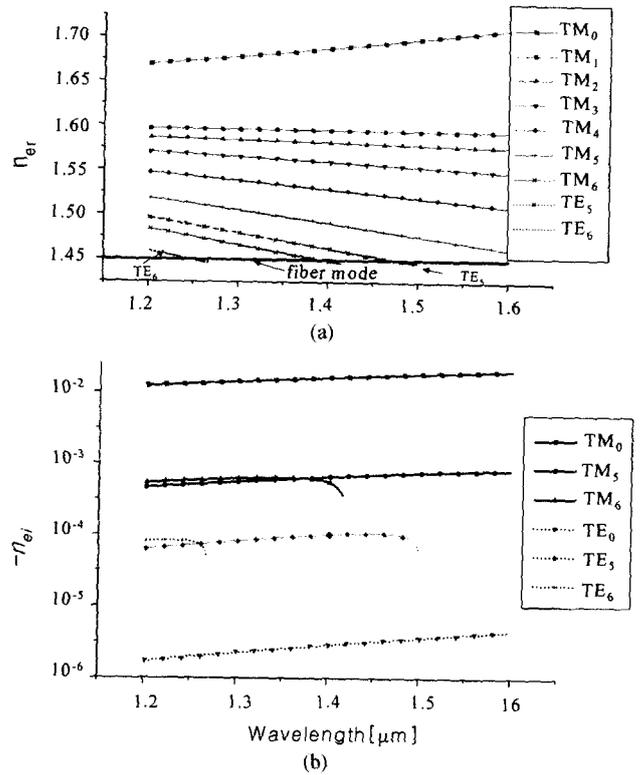


그림 3. 금속층이 포함된 평면도파로의 분산곡선 (a) n_{er} , (b) n_{ei} .

에 나타나 있듯이 유효굴절률의 허수부의 크기가 한 차수 더 크다.

2.3. 소자의 편광 및 파장 선택성 분석

측면 연마된 광섬유와 평면도파로 사이의 광 전력 교환은 결합 모드 이론으로 분석할 할 수 있다. 결합모드 이론에서 결합계수를 구하기 위해서 정규화(normalization)된 장의 분포를 구해야 된다. 정규화 조건은 TM 모드의 경우 $\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Re[H_y E_x^*] dx = 1$, TE 모드의 경우 $-\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Re[E_y H_x^*] dx = 1$ 로 주어진다. 그림 4는

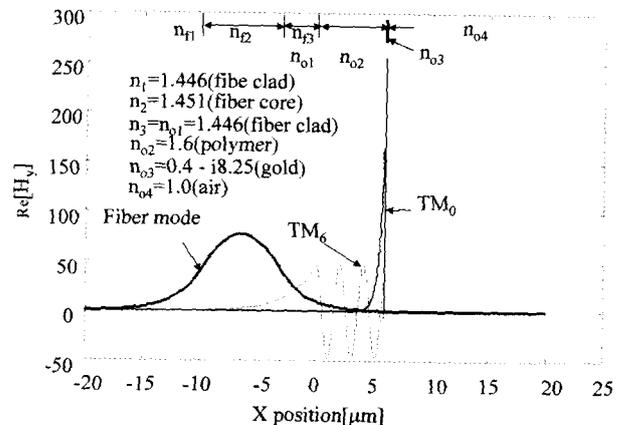


그림 4. 광섬유 모드와 금속층이 포함된 평면도파로의 TM 모드 생김새(profile).

파장 1.394 μm에서 상부 평면도파로의 TM 기본모드 및 최고차 모드, 그리고 광섬유 모드의 분포를 나타내고 있다. 금속층이 포함된 평면도파로의 모드의 세기는 복소수로 주어지며 그림 4는 모드분포의 실수부만 나타낸 것이다. 최고차 모드를 제외한 다른 모드들은 평면도파로의 코어 쪽에 광전력의 대부분이 국한되어 있고 또한 광섬유 모드와 위상정합 조건을 만족할 수 없기 때문에 이들과 광섬유 모드사이의 광전력 교환은 고려하지 않는다. 광섬유모드와 평면도파로의 최고차 모드가 위상정합에 가장 근접해 있지만 상부 평면도파로의 유효굴절률은 복소수이기 때문에 완전한 위상정합조건은 발생하지 않는다. 다만 평면도파로의 최고차 모드의 유효굴절률의 실수부와 광섬유의 유효굴절률이 일치하는 공진 파장 부근에서 광섬유로 인가된 광전력이 평면도파로로 이동할 수 있다.

광섬유 모드와 평면도파로의 최고차 모드 사이의 결합모드 방정식은 다음과 같다.¹¹⁰⁾

$$\begin{aligned} \frac{dA_f(z)}{dz} &= -ik_{fo}A_o(z)\exp(-i2\delta z) \\ \frac{dA_o(z)}{dz} &= -ik_{of}A_f(z)\exp(-i2\delta z) \\ k_{fo,of} &= \frac{\omega\epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x) - n_{o,f}^2(x)] E^f(x) E^o(x) dx \\ M_{f,o} &= \frac{\omega\epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x) - n_{f,o}^2(x)] [E^{f,o}(x)]^2 dx \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$A_f(z) = \exp(-\delta z) \left[\cos \sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}} z + i \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}}} \sin(\sqrt{\delta^2 + k_{fo}k_{of}} z) \right] \quad (7)$$

광섬유 출력단의 광전력은 $P_o(z) = |A_f(z)|^2$ 로 주어진다.

식 (7)을 이용하여 금속층의 두께에 따른 파장응답특성을 구하여 그림 5에 제시하였다. 금속층의 두께를 제외한 나머지 구조 변수는 앞서 언급한 바와 같다. 두 도파로 사이의 간격(s)은 3 μm 일정하며, 결합길이는 0.8 mm로 설정하였다. 그림 5로부터 금속의 두께가 늘어나면 두 도파로 사이의 위상정합을 만족하는 공진파장은 짧아지며 TM모드는 TE모드보다 두배 이상 크게 공진파장이 이동함을 알 수 있다. 이는 TM모드가 금속을 더 잘 침투하기 때문에 금속 두께에 따라서 평면도파로의 유효굴절률 변화가 크게 발생하기 때문이다.

공진파장에서의 여과깊이(소멸비)는 평면도파로의 유효굴절

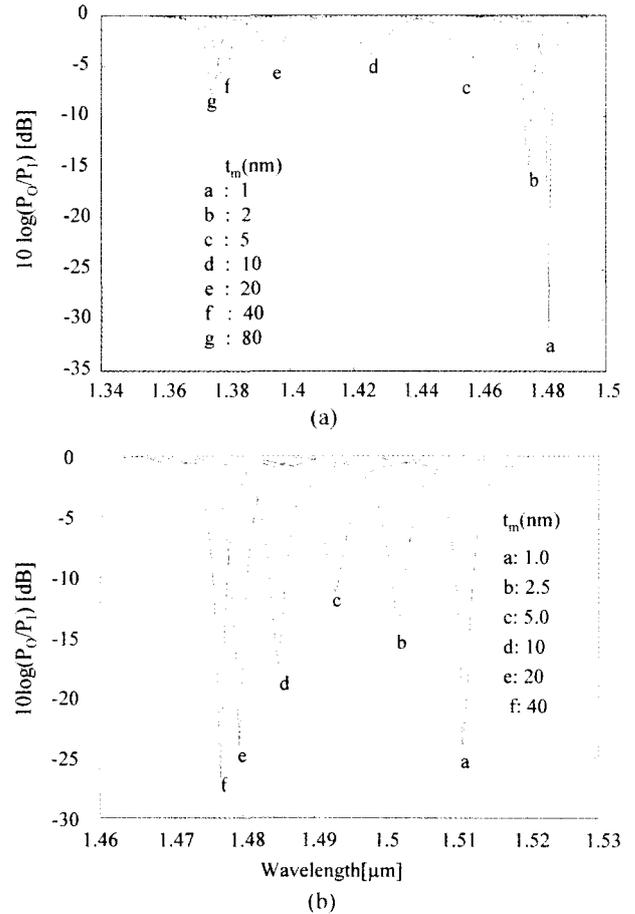


그림 5. 금속두께에 따른 공진파장의 변화 (a) TM, (b) TE.

률의 허수부(n_{ei})에 매우 의존하는 것으로 밝혀졌다. 그림 5(a)에서 금속 막의 두께가 10~20 nm 사이에서는 파장응답의 대역폭이 매우 넓고 공진파장에 소멸비가 상대적으로 작다. 이 현상은 평면도파로 최고차 모드의 유효굴절률의 허수부에 의한 위상 부정합이 크기 때문이다. 유효굴절률의 허수부 크기는 모드의 전파손실 비례하며 이는 금속 층에서 광의 전력이 클수록 손실은 증가한다. 금속이 매우 얇을 경우 금속층 내에서 자기장의 세기(H_y)는 x 방향에 대하여 급격하게 변할 수 있으며 이는 크기가 매우 큰 E_x 성분을 유도하게 된다.¹¹¹⁾ 다시 말하면 금속에 의한 광 흡수 손실은 금속내에서 H_y 크기 뿐만아니라 그 변화분($\partial H_y / \partial x$)의 크기에도 의존하게 된다.¹⁹⁾ 그림 5(a)에 제시된 TM모드의 각 공진파장에서 광의 진행거리에 따른 모드의 전력변화를 그림 6에 보여주고 있다. 유효굴절률의 허수부(n_{ei})의 크기가 클수록 광결합은 더 천천히 발생하며 평면도파로로 부터 광섬유로 다시 역 결합이 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 만약 금속층이 없다면 공진파장에서 두 도파로 사이의 광전력 교환은 이론적으로 100% 발생 할 수 있다.

최상부 물질의 굴절률의 변화에 따른 소자의 파장 및 편광 특성을 분석하였다. 그림 7(a)에 제시된 바와 같이 금속의 두께가 20 nm일 때는 TE 편광에서는 최상부 물질의 굴절률 변화에도 불구하고 거의 동일한 특성을 보이고 있다. 반면 TM

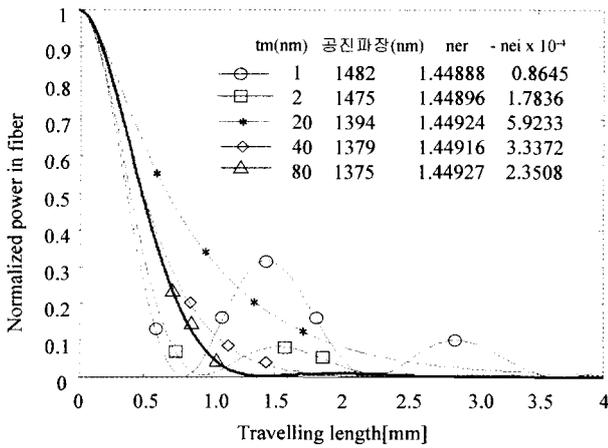


그림 6. 금속박막의 두께와 결합길이 변화에 따른 광전송 특성.

편광에서는 공진파장이 최상부 물질의 굴절률에 매우 민감함을 보이고 있다. 이는 TM 모드는 금속층을 투과하여 광 전력에 최상부 물질까지 전달되는 반면에 TE모드는 금속층을 투과하지 못하여 최상부 층의 굴절률의 변화가 모드의 특성에 영향을 주지 못하기 때문이다. TM 모드의 대역폭 또한 최상부 물질의 굴절률에 매우 민감하게 변함을 알 수 있다. 이는 평면도파로 최고차 모드의 손실이 최상부 물질의 굴절률에 매우 의존하는 현상 때문이다. 금속층이 얇을 경우 금속 층에서의 광전력은 최상부 물질의 굴절률에 의존한다. 즉 최상부 물질의 굴절률에 따라서 $\partial H_y / \partial x$ 가 민감하게 변한다. 최상부 물질의 굴절률이 1.44일 때 광섬유 클래딩과 굴절률 차이가 작기 때문에 금속층 내에서 $\partial H_y / \partial x$ 의 크기가 작고 유효굴절률의 허수부의 크기도 작다. 그 결과로 최상부 물질의 굴절률이 1.44일 때 높은 파장 선택성을 가지게 된다. 그림 7(b)로 부터 금속의 두께가 증가할수록 최상부층의 굴절률 변화에 따른 TM모드의 공진파장의 변화는 점점 감소하며 금속 두께가 80 nm일 때는 거의 공진파장이 변하지 않는 것을 알 수 있다. 즉 금속막의 두께가 표피깊이의 수배 이상 될 때는 평면도파로 모드는 금속층의 두께를 무한대로 보게 되는 것이다.

III. 실험 및 분석

광섬유 모드와 평면도파로 모드사이의 소산장 결합을 발생시키기 위하여 광섬유의 한쪽 측면이 코어 가까이 연마된 광섬유 블록을 제작하였다. 길이 2.5 cm, 폭 1 cm, 높이 0.5 cm 를 가진 쿼츠블록 위에 폭 150 μ m, 곡률반경 25 cm을 가진 홈을 내어 그 속에 광섬유의 피복을 일정부분 벗기고 에폭시 로 고정시킨 후 광섬유를 연마 하였다. 홈의 깊이는 쿼츠의 중간부분에서 80 μ m정도가 되면 적당하다. 연마과정에서 #3000과 #8000 알루미나 연마가루를 이용하였고 최종 연마단계에서는 부드러운 가죽 천으로 마무리하였다. Liquid drop 방법^[11]으로 남은 클래딩의 두께를 측정하여 이 수치가 4~5 μ m 될 때 연마를 마무리 하였다. 연마된 광섬유 표면에 폴리머 (AZ4562) 도파로 막을 스펀코팅으로 형성시킨 후 열증착 기법으로 금속막을 올렸다. 금속의 재료는 0.5 mm 지름을 가지

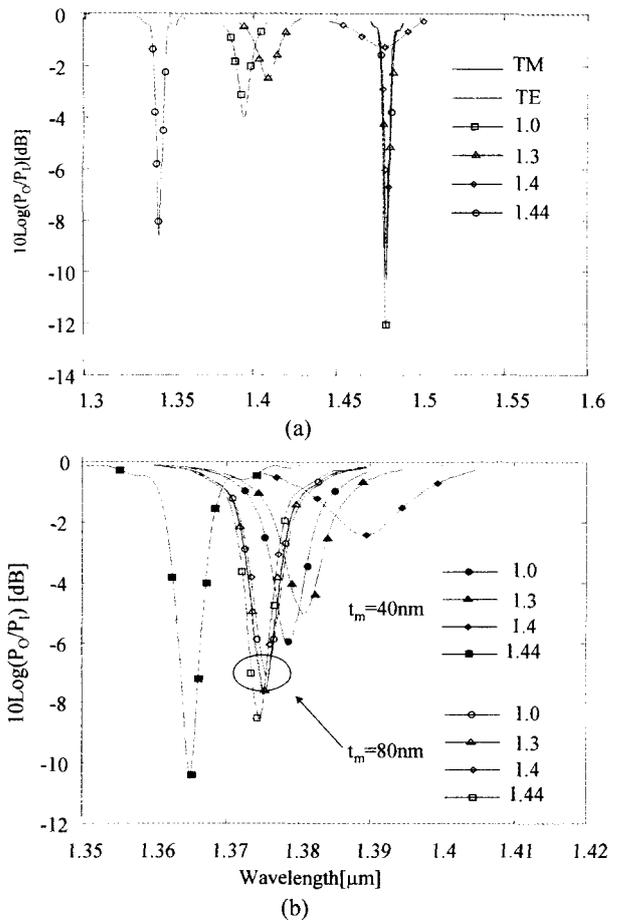


그림 7. 최상부 물질의 굴절률(n_{o4})에 따른 소자의 특성 변화.

는 금선(gold wire)을 이용하였고 증착되는 금속막의 두께는 열증착시 텅스텐 보트에 공급하는 금의 양으로 제어하였다. 진공 챔버내에서 텅스텐 보트와 시편사이의 거리를 가능한 멀게 유지하여 금속막이 폴리머도파로 위에 고르게 증착되도록 장치를 설치하였다. 금속막을 증착 후 그 특성을 광 스펙트럼 분석기로 측정하고 다시 금속 막을 올려 측정을 반복하는 방법으로 금속두께에 따른 소자의 특성변화를 측정하였다. 광섬유 내에서 편광상태는 여러 요인으로 변하기 쉽기 때문에 입력 쪽의 광섬유 길이를 20 cm 이하로 절단하고 가능한 곧게 유지해야 정확한 편광의존성을 측정할 수 있다.

그림 8에 폴리머 도파로 위에 올려진 금박막(gold film)의 두께변화에 따른 소자의 파장 및 편광응답을 제시하였다. 폴리머막의 두께는 공진파장과 공진파장 사이의 간격으로 추정 가능하며^[12] 약 11.1 μ m로 계산되었다. 실제 연마된 광섬유 표면 위에 올려진 폴리머막의 두께를 폴리머 막을 손상시키지 않고 측정 할 수가 없기 때문에 폴리머 코팅시 같은 조건으로 다른 기관에 폴리머 막을 올려 a-step profile 메타로 측정된 두께와 이론적 예측치 사이의 오차는 $\pm 3\%$ 정도로 측정되었다. 평면도파로의 최고차 모드의 차수는 파장에 따라 달라진다. 파장이 짧을수록 최고차 모드의 차수는 한 단계씩 증가한다. 실험 결과는 이런 현상 때문에 파장 1.2~1.6 μ m 사이에

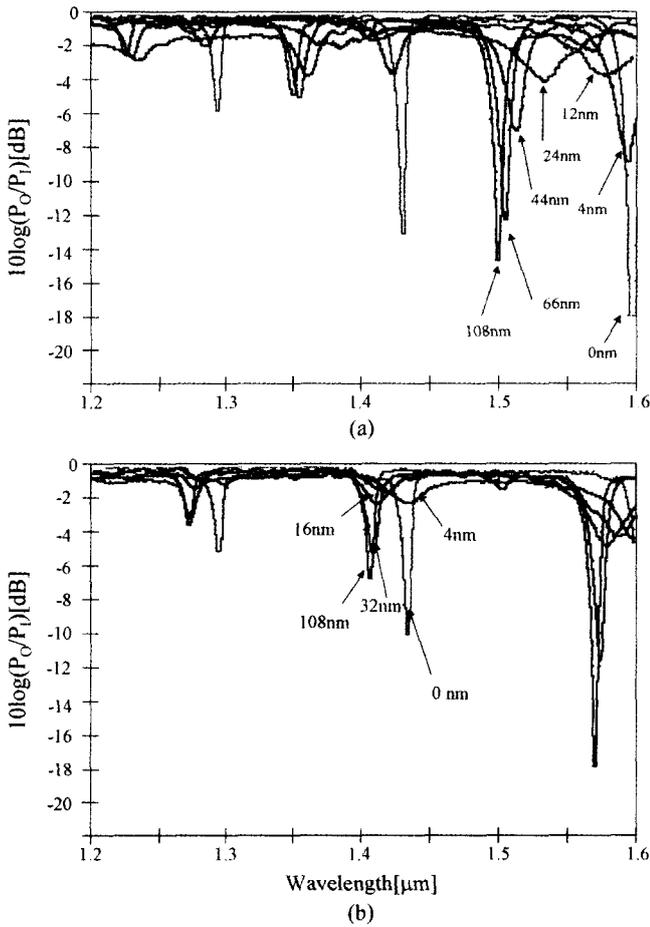


그림 8. 금속막의 두께에 따른 소자의 파장응답(실험결과), (a) TM, (b) TE.

여러 개의 공진현상이 나타나는 것이다. 공진 파장은 금박막의 두께가 증가함에 따라 이론적 예측과 마찬가지로 TM과 TE 편광 입력 모두 점점 짧아졌고 그 변화의 폭은 TM이 TE보다 3배 정도 크게 나타났다. TE 편광입력의 경우가 훨씬 빨리 금속막의 두께 변화에 대해서 공진파장이 수렴하게 됨을 알 수 있다. 그리고 TM 편광의 경우 금속막 아주 얇을 때와 금속막이 표피두께 보다 훨씬 두꺼울 때는 반치폭(full width half maximum)이 10 nm 부근의 좁은 여과특성을 보였다. 금속막이 충분히 두꺼워지면 TM과 TE의 여과(filtering) 파장영역이 완전히 분리됨을 보이고 두 직교하는 편광의 공진파장의 차이는 금속층의 두께를 무한대로 가정하고 예측한 기존의 연구결과와 잘 일치하였다.^[13] 그림 9는 그림 8의 제작조건을 결합모드 방정식의 해에 적용한 TM 편광의 파장응답을 이론적으로 예측한 것이다. 본 논문의 해석방법이 금속막의 두께에 따른 공진 파장의 이동현상과 대역폭이 변하는 현상을 예측하는데 유효함을 알 수 있었다. 그러나 절대적인 공진파장의 위치나 대역폭의 이론적 예측 결과는 실험결과와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 소자해석에서 각 물질의 색분산, 평면도파로의 측방향 회절에 의한 손실 등을 고려하지 못한 결과에서 오는 것으로 예측된다. 이러한 평면도파로에서 회절에 의한 손

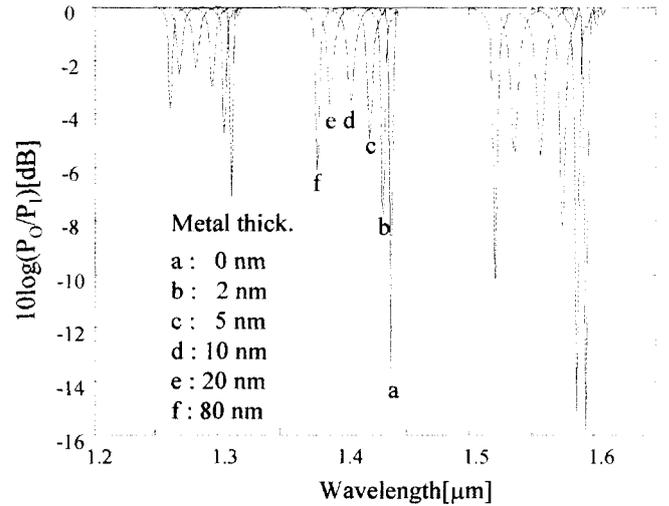


그림 9. 금속 막의 두께에 따른 TM 편광의 파장 응답 예측, $d_0 = 11.1 \mu\text{m}$.

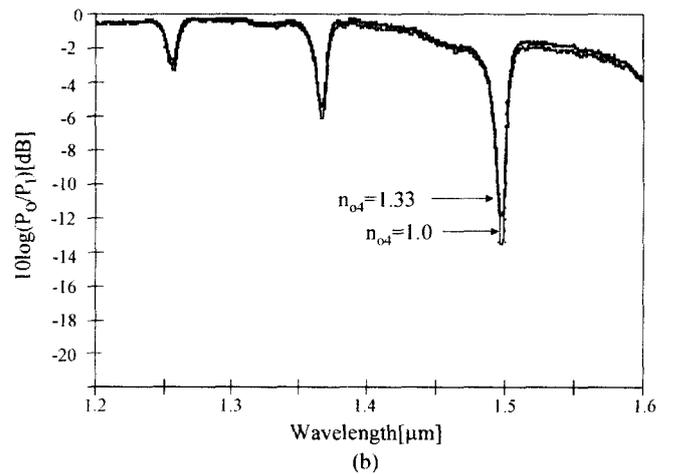
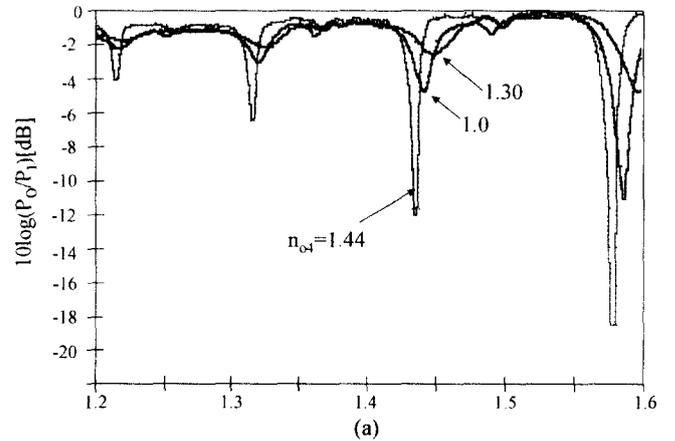


그림 10. 최상부 물질(superstrate)의 굴절률에 따른 소자의 파장응답(실험결과), (a) TM, (b) TE.

실로 인하여 측정되는 결합기의 대역폭은 이론적 예측보다 더 넓은 결과를 가져옴을 알 수 있다.

그림 10는 금속 박막 위에 올려진 최상부 물질의 굴절률의

변화에 따른 소자의 응답특성을 나타내고 있다. 금속박막의 두께는 약 30 nm이다. 이론적 예측과 마찬가지로 TE 편광보다 TM 편광의 여과 특성이 최상부 물질의 굴절률에 더 민감하게 변함을 알 수 있다. 최상부 물질의 굴절률이 1.44 부근에서는 금속내부에서 광전력이 최소가 되어 상대적으로 더 작은 손실을 가지게 된다. 이는 결과적으로 평면도파로의 허수부에 의한 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이의 위상 부정합이 줄어들어 여과 깊이가 증가하고 대역폭이 감소하는 결과를 가져온다.

이상의 실험 결과로 볼 때 금속막이 충분히 두꺼워지면 금속에 의한 광의 흡수 손실에도 불구하고 소자는 공진파장 밖에서 1 dB 이하의 낮은 삽입손실과 10 nm의 반치폭을 가지는 좁은 여과 특성을 보였다. 또한 TE 모드와 TM 모드의 공진파장이 잘 분리 되기 때문에 이 소자를 원하는 파장에서 특정한 편광성분을 제거하기 위한 편광기로 이용 가능하다. 측정된 실험 결과로 부터 금속 박막의 두께에 따라서 소자의 필터링 특성이 매우 민감하게 변하는 특성을 이용하면 금속 박막의 두께를 측정하기 위한 센서로 이용 가능성을 알 수 있다. TE 편광의 공진파장이 고정되어 있고 TM 편광의 공진파장만 가변 시킬 수 있는 특성을 이용하면, 금속막 아래에 버퍼층을 삽입하여 금속의 두께나 최상부층의 굴절률을 조정하여 두 직교하는 편광의 공진 파장을 일치시키는 방법으로 편광 무의존 광스위치나 변조기를 구현이 가능 할 수 있다. 이때 금속막은 전극으로 이용된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유와 금속 박막이 포함된 평면도파로 사이의 광결합 특성을 이론과 실험으로 분석하였다. 소자해석을 위하여 금속박막이 포함된 다층 평면도파로의 모드 특성을 간단하지만 정확하게 구할 수 있는 기법을 기술하였다. 광섬유를 평면도파로로 등가화 시키고 결합모드 이론으로 소자를 해석하였다. 금속층의 두께가 증가함에 따라서 소자의 공진파장은 점점 짧아지는 특성을 보였고 특히 TM 편광은 TE 편광보다 공진 파장이 크게 변하는 이론 및 실험결과를 보였다. 소자의 여과깊이는 공진 파장에서 평면도파로 모드의 손실, 즉 유효굴절률의 허수부에 의해서 결정되며 금속막의 두께와 그 위에 올린 최상부 물질의 굴절률에 민감하게 변함을 알 수 있었다. 금속막의 두께가 표피두께에 비해 매우 두꺼울 때는 금속에 의한 흡수손실에도 불구하고 소자는 공진파장 밖의 영역에서 1 dB 이하의 삽입손실과 반치폭이 10 nm 정도되는 좁은 여과 특성을 보였다.

표피 두께(skin depth) 정도의 금속막 위에 올려진 최상부층의 굴절률이 소자의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 금속막의 두께가 표피두께 이하에서도 TE 편광의 경우 소자의 특성이 최상부 물질의 굴절률에 거의 영향을 받지 않음을 보였지만 TM의 경우 소자의 공진파장과 여과 깊이가 매우 크게 의존함을 보였다. TM 편광은 금속막을 TE 보다 더 잘 통과하기 때문이다. 특정한 최상부 굴절률에서는 TM 편광도 매우 예리한 여과특성을 보임을 이론 및 실험으로 규명하였다.

TE 편광의 공진 파장은 고정시키고 TM 편광만 공진파장을 가변시킬 수 있는 특성을 이용하여 편광 무의존 광스위치나 변조기를 구현 할 수 있다.

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유와 금속막이 포함된 평면도파로 사이의 광결합특성을 이용하면 금속막의 두께를 측정하거나 금속의 광학적 특성을 분석하기 위한 광센서로 이용 가능 할 것으로 보인다. 또한 금속과 광 사이의 상호 작용을 이용하는 다양한 광학 소자의 특성을 분석하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] S. A. Hamilton, 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, 1998.
- [2] 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.
- [3] C. Millar, M. Brierey, and S. 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*, no. 1. 330, pp. 150-156, 1998.
- [5] S. G. Lee, J. P. Sokoloff, B. P. McGinnis, and H. Sasabe, "Fabrication of a side-polished fiber polarizer with a birefringent polymer overlay," *Optics Lett.* vol. 22, no. 9, pp. 606-608, 1997.
- [6] 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," *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 141, no. 5, pp. 229-302, October, 1994.
- [7] A. Yariv, "Coupled-mode theory for guide-wave optics," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. QE-9, no. 9, pp. 919-933, 1973.
- [8] B. P. Pal, G. Raizada, and R. K. Varshney, "Modelling a fiber half-block with multimode overlay waveguide," *J. Opt. Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 179-183, 1996.
- [9] 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.
- [10] A. Yariv, *Optical Electronics* (Holt-Saunders International Editions, Japan, 3rd ed., 1985), Chapter 13.
- [11] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Side-polished fibers," *Appl. Optics*, vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.
- [12] 김광택, 이소영, 손경락, 이종훈, 송재원, 이상재, 김시홍, 강신원, "광섬유-평면도파로 광 결합기를 이용한 광필터 제작과 특성 측정," 한국광학회지, 10권 5호, pp. 419-423, 1999.
- [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 multi-

mode metal-clad waveguide," *Opt. Comm.* vol. 180, pp. 37-42, 2000.

Optical coupling between a side polished fiber and planar waveguide including a thin metal film

Kwang Taek Kim[†], Jung Ho Hwang, and Jun Ock Lee

Department of Electronics Engineering, Honam Univ., Gwangju 506-714, KOREA

[†]E-mail: *ktkim@honam.ac.kr*

Sang Woo Kim

Department of Sensor Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, KOREA

Shin Won Kang, Dong Il Seo, and Jae Won Song

School of Electronics And Electric Engineering, Kyungpook National Univ, Daegu 702-701, KOREA

(Received May 2, 2001 ; revised manuscript received August 29, 2001)

We report theoretical and experimental results for the wavelength and polarization selectivity of a fiber-to-planar waveguide coupler made of a side polished single mode fiber covered with a planar waveguide incorporating a thin metal film. A simple but exact approach to obtain the modal properties of multilayer planar waveguide with a thin metal film is described. The device was modeled into equivalent 1 dimensional structure and its behaviour was analyzed based on coupled mode theory. The effects of metal film thickness and refractive index of superstrate on the device properties were measured and explained.

Classification codes : FO.010, FO.030, OE.010, OM.020.