

표면 플라즈몬 광섬유 편광기 설계 및 제작

이준옥 · 김철호 · 김광택*

호남대학교 광전자 공학과

Ⓢ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1번지

권광희 · 송재원

경북대학교 전자전기컴퓨터공학부

Ⓢ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지

(2002년 11월 21일 받음, 2003년 2월 27일 수정본 받음)

본 논문은 금속박막과 결합된 측면 연마 단일 모드 광섬유를 이용한 편광기에 관하여 이론 및 실험 연구 결과를 보고한다. 금속 박막의 두께와 상부 유전체의 굴절률이 소자특성에 미치는 영향을 직교 모드이론으로 분석하였다. 이론적 예측을 토대로 광통신파장에서 편광 소멸비가 40 dB, 그리고 삽입 손실이 0.5 dB를 가지는 편광기를 구현하였다.

주제어 : metal film, polarizer, side-polished fiber.

I. 서 론

광섬유 편광기는 간접계 구조의 광센서나 광통신 시스템에서 신호의 페이딩에 의한 오류를 줄이기 위해 꼭 필요한 소자이다. 광섬유를 이용하여 편광기를 구현하는 방법으로 광섬유의 한쪽 측면을 코어 가까이 연마로 제거하고 연마된 광섬유 표면 위에 큰 복굴절 크리스탈,^[1] 액정크리스탈,^[2] 혹은 금속 박막을 결합시키는 방식이 잘 알려져 있다.

본 논문은 측면 연마된 광섬유와 금속박막을 이용한 편광기의 전달 특성을 직교 모드이론(normal mode theory)^[3]으로 해석하는 방법을 제안하고 높은 성능을 얻을 수 있는 소자 설계 기법을 제안하였다. 제안된 편광기 구조에서 TE 편광과 TM 편광성분이 전송되는 과정을 도식적으로 보였고 이로부터 TM 편광이 소멸되는 원리를 설명하였다. 금속두께와 그 위에 놓인 유전체의 굴절률이 소자의 성능에 미치는 영향을 이론과 실험으로 분석하였다. 실험 결과는 이론적 예측과 일치함을 보였다. 이론 및 실험 결과를 토대로 1.31 μm 와 1.55 μm 파장에서 40 dB 이상의 편광 소멸비를 가지는 리셉타클(receptacle)형 편광기를 구현하였다.

II. 소자 해석

2.1 소자 구조의 모델링

그림 1에 측면 연마 단일모드 광섬유를 이용한 편광기의 구조가 제시되어 있다. 쿼츠 속에 형성된 홈에 광섬유를 고정시키고 연마로 클래딩을 제거한다. 금속 박막의 두께는 광학적으로 유한하며 따라서 소자의 특성은 금속 박막 위에 놓인 상부층의 굴절률에 영향을 받는다. 편광기 구조에서 광섬유모드

의 TE 편광성분(금속면에 전기장이 수평인 성분)은 금속내부에서 갈수록 급속히 그 세기가 감소한다. 따라서 TE 편광 성분은 거의 흡수 손실을 겪지 않고 광섬유 코어에 잘 갇혀 진행된다. 반면 TM 편광성분(자기장이 금속면이 수평인 성분)은 금속을 깊게 침투하며 금속에 의한 흡수 손실을 가진다. 이러한 효과는 TM 편광성분이 상대적으로 큰 손실을 가지기 때문에 TE통과 편광기로 작용한다. 소자의 출력단에서 TM 편광성분을 효과적으로 제거하기 위해서는 광섬유 모드와 금속과 유전체 경계를 따라 진행되는 표면 플라즈몬 모드(surface plasmon mode)와 효과적인 결합을 유도하는 것이다.^[3] 광섬유 모드와 표면 플라즈몬 모드사이에 위상정합 조건을 만족할 때 TM 편광성분은 금속층을 따라가면서 소멸된다. 표면 플라즈몬 모드의 유효굴절률은 금속박막의 두께와 상부층(overlay)의 굴절률의 함수이다.

소자의 광학적 전달 특성을 해석하기 위하여 광섬유를 등가적인 평판도파로로 바꾸어 해석하는 기법^[6]을 도입하였다. 그림 2에 실제 편광기의 소자 구조와 등가화된 편광기의 단면 구조가 나타나 있다. 등가화된 편광기는 금속 층이 포함된 다층 평판 구조가 된다. 광섬유를 평판 도파로로 등가화 시키는 과정은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$n_2^2 = n_{co}^2 - \frac{(U^2 - P^2)}{(k_0 a)^2} \quad (1)$$

$$n_3^2 = n_1^2 = n_{cl}^2 - \frac{P^2 \sec^2(P\sigma)}{(k_0 a)^2} \quad (2)$$

여기서, $U = a\sqrt{k_0^2 n_{co}^2 - \beta^2}$, β 는 광섬유 모드의 전파상수이다. a 는 광섬유 코어의 반지름, n_{co} 및 n_{cl} 는 각각 광섬유 코어 및 클래딩의 굴절률을 나타낸다. 식 (2)의 나머지 변수들의 정의는 다음과 같다.

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

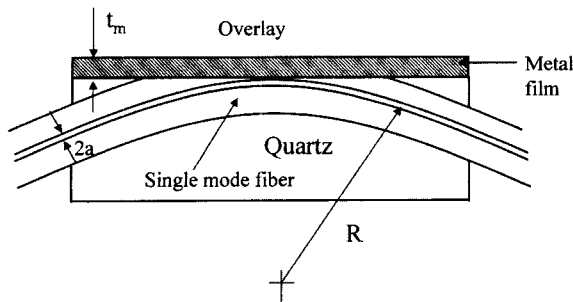


그림 1. 플라즈몬 광섬유 편광기 구조.

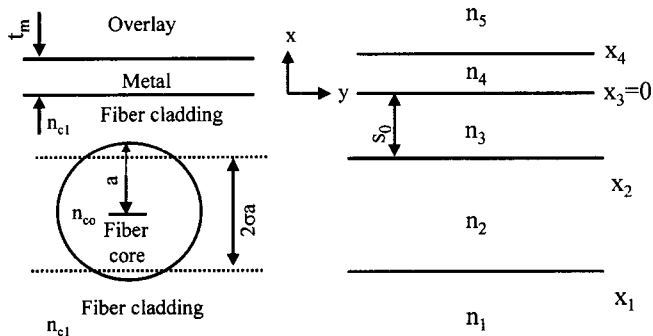


그림 2. 편광기 단면구조와 등가적인 다층 평면도파로 구조.

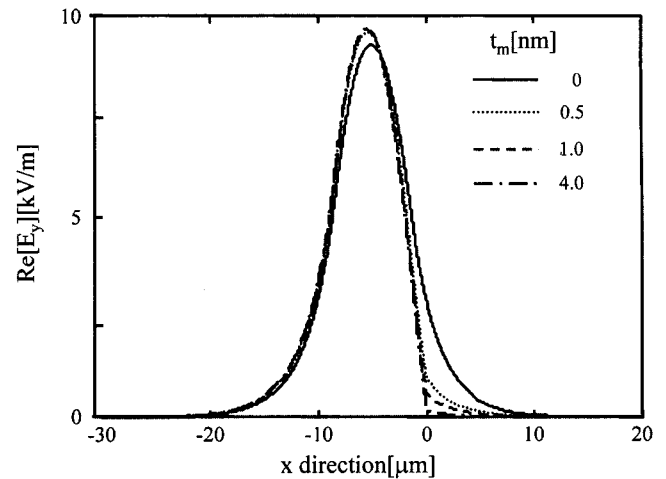
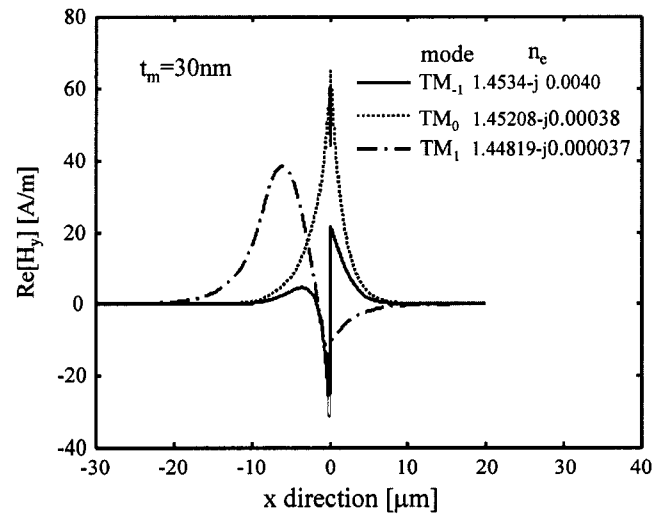
$$P_3 = -1.3528 + 1.6880V - 0.1894V^2 \quad (3)$$

$$\sigma = 0.8404 + 0.0251V - 0.0046V^2 \quad (4)$$

여기서 $V = k_0 a \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)}$, 그리고 σ 는 등가적인 평면도파로의 두께를 결정하는 상수이다. 소자해석에서 광섬유 코어의 반경(a)이 $4.0 \mu\text{m}$, 코어의 굴절률(n_{co}) = 1.451, 클래딩의 굴절률(n_{cl})이 1.447인 것으로 설정하였다. 이 경우 파장 1310 nm에서 등가화된 평면도파로 상수는 $n_1 = 1.44647$, $n_2 = 1.44990$, 이며 σ 는 0.872이다. 이론적 해석에서 파장은 1310 nm로 설정하였다.

2.2 금속층이 포함된 다층구조에서 모드해

금속층이 포함된 다층구조에서 모드의 해를 구하는 방법은 다소 복잡하다. 금속의 굴절률이 복소수로 주어지며 고유치 방정식 또한 복소함수이다. 금속층이 포함된 다층구조의 모드해를 구하는 여러 방법이 보고되었다.^[7-10] 다층구조에서 금속층이 포함되어 있을 경우 매우 큰 구조적 복잡성이 발생한다. TE 모드는 그림 3과 같이 금속박막의 두께가 점점 증가함에 따라 금속내부에서 모드의 세기가 급속히 감소하여 상부층으로 소산장(evanescent field)이 침투할 수 없음을 알 수 있다. 반면 TM 모드는 그림 4에 보이듯 금속층이 충분히 두꺼운 경우 광섬유 코어에 간혀 진행하는 모드뿐만 아니라 금속층을 따라 진행하는 모드들이 존재함을 알 수 있다. 여기서 금속은 알루미늄으로 가정하였고 굴절률은 1310 nm에서 $1.2 - j12$ 이다.^[11] 금속층을 따라 진행하는 모드를 표면 플라즈몬 모드(surface plasmon mode)로 부른다. 표면 플라즈몬 모드는 대칭모드(TM₀ 모드) 및 비대칭 모드(TM₁ 모드) 형태로 존재하며 매우 큰 손실을 가진다. 그림 4에서 표시되었듯 플라즈몬 모드는 그

그림 3. 정규화된 TE 모드의 생김새, $n_5 = n_1$, $s_0 = 1 \mu\text{m}$.그림 4. 정규화된 TM 모드의 생김새, $n_5 = n_1$, $s_0 = 1 \mu\text{m}$.

유효굴절률(n_e)의 실수부가 광섬유 코어의 굴절률 보다 더 크고 허수부의 크기도 매우 큰 것이 특징이다.

III. 편광기의 전달 특성

광섬유가 진행 방향으로 구부러져 있기 때문에 소자 해석을 위해 광섬유를 그림 5와 같이 다수의 직선화 된 구조로 나누어 해석하였다. 소자해석에서 포함된 길이는 5 mm로 설정하고 결합 영역을 800개의 직선화된 영역으로 나누어 해석하였다. 곡률 반경은 25 cm로 가정하였다.

광섬유에 입력된 광은 편광기 영역에서 다층구조 도파로가 가지는 직교모드들(normal modes)을 여기 시킨다. 첫 번째 결합영역 시작점에서 장의 분포는 입력광(ψ_a)으로부터 여기된 각 직교모드들이 가지는 장(field)의 선형 조합으로 표시된다. TE 편광의 경우 기본 모드만 존재하지만 TM 편광의 경우 금속층을 따라 진행하는 표면 플라즈몬 모드가 존재하기 때문에 최대 3개의 모드가 존재할 수 있다. 단 이때 상부층의 굴절률은 광섬유의 유효굴절률보다 작을 때이다. 만일 금속층이 두

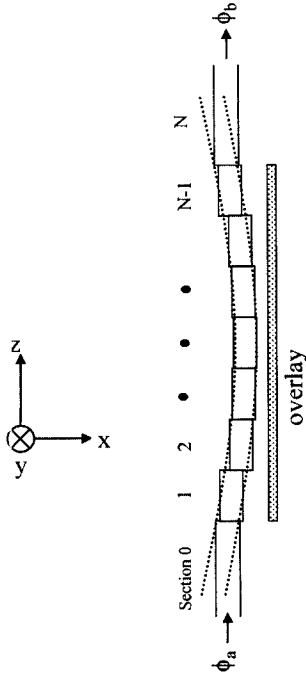


그림 5. 소자 해석을 위한 등가 모델링.

계가 광학적으로 매우 얇고 상부층의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률 보다 더 큰 경우 TM 편광성분은 금속을 투과한 후 누설모드와 결합하게 된다. 직교모드들은 각각의 위상 속도를 가지고 첫 번째 결합 영역 끝단까지 진행하며 이는 다시 두 번째 결합영역의 직교모드들에게 에너지를 전달한다. n번째 결합영역의 시작점에서 장의 분포(ψ_n^i)와 끝점에서의 장의 분포(ψ_n^f)는 다음과 같이 표시된다.

$$\psi_n^i = \sum_{m=0, -1}^M C_n^m \psi_n^m$$

$$\psi_n^f = \sum_{m=0, -1}^M C_n^m \psi_n^m \exp(-j\beta_n^m \Delta L) \quad (5)$$

여기서, M은 결합 영역에서 최고차 직교모드의 차수이다. β_n^m 는 n번째 결합영역에서 m차 직교모드의 복소 전파상수를 의미한다. C_n^m 는 n-1번째 결합영역의 끝단에서 총장(total field)이 n번째 결합영역의 m차 직교모드로 전달되는 비율을 의미한다. 직교모드이론에 의하면 C_n^m 는 다음과 같이 벡터 연산으로 표현된다.^[5]

$$C_n^m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (E_{n-1} \times H_n^m + E_n^m \times H_{n-1}) \cdot z dx}{2 \int_{-\infty}^{\infty} (E_n^m \times H_n^m) \cdot z dx} \quad (6)$$

여기서 E_{n-1} 와 H_{n-1} 은 n-1번째 결합 영역의 끝단에서 전기장(electric field)과 자기장(magnetic field) 분포를 의미한다. E_n^m 와 H_n^m 은 n번째 결합 영역의 m차 직교 모드의 전기장과 자기장의 분포를 의미한다. TM 모드의 경우 전기장은 자기장의 세기를 먼저 구한 후 맥스웰 방정식으로 계산할 수 있다. TE 모드의 경우 이와 반대로 계산하면 된다. z는 방향 단위 벡터이다.

이와 같은 과정으로 입력단 영역(section 0)에서 하나의 광섬유로부터 ψ_a 가 인가되었을 때 결합 영역에서 광의 전송 과정을 구할 수 있다. N-1번째 영역끝단에서 전달된 출력단(section N)의 장의 분포 ψ_b 는 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_b = C^b \psi_a \quad (7)$$

여기서, C^b 는 결합영역 끝단(section N-1)에서의 장이 광섬유 모드로 전달되는 비율을 의미한다.

$$C^b = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (E_{N-1} \times H_b + E_b \times H_{N-1}) \cdot z dx}{2 \int_{-\infty}^{\infty} (E_b \times H_b) \cdot z dx} \quad (8)$$

여기서 E_b , H_b 는 광섬유 끝단에서 정규화된 광섬유 모드의 전기장과 자기장의 분포를 나타낸다. 식 (7)과 (8)을 이용하여 입력단으로부터 출력단 사이의 광전력 전달비(optical power transfer ratio)를 구할 수 있다. 따라서 분리된 두 광섬유로 전달되는 광전력의 비율은 다음과 같이 정의 된다.

$$P_b/P_a = |\psi_b/\psi_a|^2 = |C^b|^2 \quad (9)$$

지금까지의 이론을 바탕으로 금속박막층을 가지는 측면 연마 광섬유에서 광의 전송 과정을 구하였다. 그림 6는 편광기 영역에서 TE 모드 전송과정을 구한 결과이다. 광섬유 코어와 금속층이 점점 가까워짐에 따라 모드 진화(mode evolution) 현상 때문에 모드 패턴이 바뀌는 현상을 볼 수 있다. TE 모드는 금속내부로 갈수록 급속히 그 세기가 감소하기 때문에 금속에 의한 흡수 손실이 이론적으로 0.1 dB 이하로 매우 작게 나타났다.

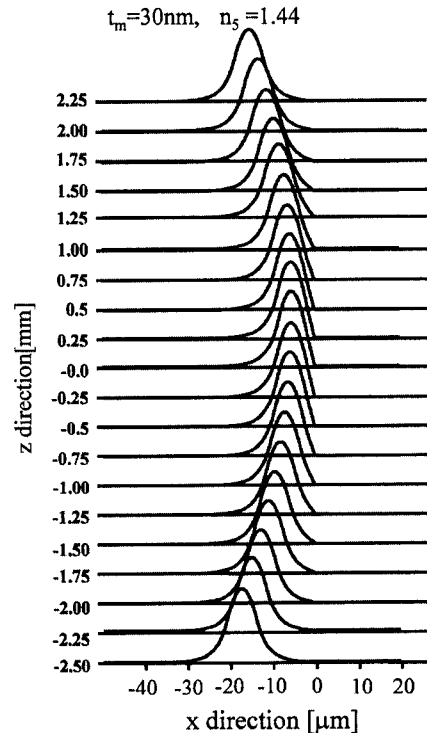


그림 6. 편광기에서 TE 모드의 전송과정, $t_m = 30$ nm, $n_s = 1.44$, $s_0 = 1$ μ m.

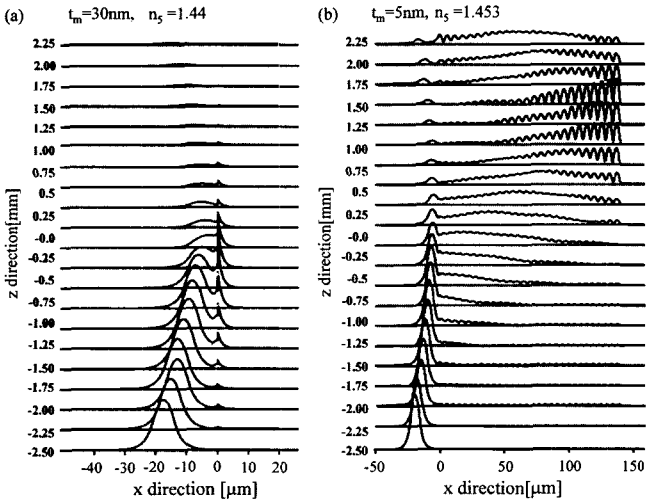


그림 7. 편광기에서 TM 모드의 전송과정, $s_0 = 1 \mu\text{m}$. (a) $t_m = 30 \text{ nm}$, $n_s = 1.44$, (b) $t_m = 5 \text{ nm}$, $n_s = 1.453$.

그림 7는 편광기 영역에서 TM 모드의 전송과정이다. 상부 유전체의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 더 작은 경우는 그림 7(a)에, 더 큰 경우는 그림 7(b)에 나타나 있다. 그림 7(a)의 경우 광섬유 모드가 금속 박막층으로 진행하는 표면 플라즈몬 모드와 결합이 발생한다. TM 모드들은 금속에 의해 큰 흡수가 발생한다. 그림 7(b)의 경우 금속이 다소 얇고 상부 유전체의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률 보다 크기 때문에 상부층으로 광에너지가 누설되는 현상을 보이고 있다. 이 경우 실제 소자의 전달 특성을 구하기 위해 상부층의 두께를 유한하게 하지만 매우 두껍게 설정하였다. 여기서는 $140 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 편광기 구조에서 TM 편광성분을 효과적으로 제거하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있다. 금속층이 두꺼운 경우 광섬유 모드를 표면 플라즈몬 모드와 효과적으로 결합시키는 방법과 금속층이 얇은 경우 광섬유 모드를 상부층으로 누설시키는 방법이 존재함을 알 수 있다.

금속 두께와 상부 유전체의 굴절률에 따른 TM 편광의 소멸비를 계산할 때 계산 시간을 줄이기 위해 등가적인 결합 길이^[12]

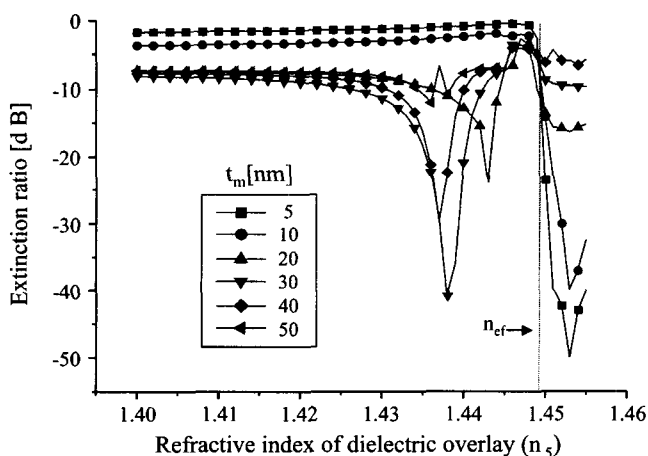


그림 8. 금속 두께와 상부 유전체의 굴절률에 따른 TM 편광의 소멸비(이론적 결과), n_{ef} 는 광섬유의 유효굴절률을 나타냄.

내에서는 광섬유를 직선으로 간주하고 결합 영역외에서는 전혀 결합이 발생하지 않는 것으로 가정하여 해석하였다. 여기서 계산된 등가적인 결합길이는 2.32 mm 였다. 이러한 방법으로 상부층의 굴절률과 금속층의 두께에 따른 TM 편광성분의 손실을 구한 결과가 그림 8에 제시되어 있다. 그림 8으로 부터 TM 편광 성분을 효과적으로 제거하기 위한 설계 기법을 찾을 수 있다. 금속의 두께가 증가 할 수록 상대적으로 상부 유전체의 굴절률이 낮은 쪽에서 큰 소멸비를 보임을 알 수 있다.

IV. 실험 및 분석

쿼츠 블록($2.5 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$)에 25 cm 의 곡률 반경과 $140 \mu\text{m}$ 폭을 가지는 홈을 형성하였다. 광섬유의 코팅을 일부 탈피시킨 후 에폭시로 광섬유를 쿼츠홈 속에 고정시키고 #3000과 #8000 알루미나 연마 가루를 이용하여 광섬유의 클래딩을 연마로 제거하였다. 연마로 클래딩을 제거하고 연마된 표면을 세척한 후 그 위에 알루미늄을 진공 열 증착하였다. 상부 유전체로 사용하기 위해 물과 글리세린을 혼합하여 다양한 굴절률을 가지는 용액을 준비하였다. 준비된 물과 글리세린의 혼합비에 따른 굴절률을 프리즘 결합장치(새론)로 22°C 에서 630 nm 파장과 1550 nm 레이저 광으로 측정한 결과가 그림 9에 나타나 있다.

그림 10에 제작된 편광기의 편광 소멸비를 측정된 결과가 제시되어 있다. 금속의 두께가 증가할수록 이론적 예측과 마찬가지로 상부 유전체층의 굴절률이 낮은 영역에서 큰 편광 소멸비를 보인다. 상부 유전체의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률 보다 큰 영역에서는 금속막의 두께가 작을 수록 더 높은 편광 소멸비를 보인다. 상부 유전체가 광섬유의 유효굴절률 보다 큰 경우 금속막이 얇을 수록 편광소멸비가 큼을 알 수 있다. TM 편광성분은 금속층이 얇을 수록 더 효과적으로 상부층으로 누설되기 때문이다. 하지만 이때 금속박막이 얇을 수록 TE 편광성분의 손실이 증가하는 문제가 있다. 통상적으로 금속의 재료에 따라 다소 달라지지만 알루미늄의 경우 두께가 5 nm 이상 되어야 TE 편광이 금속층을 광학적으로 무한대로 본다.

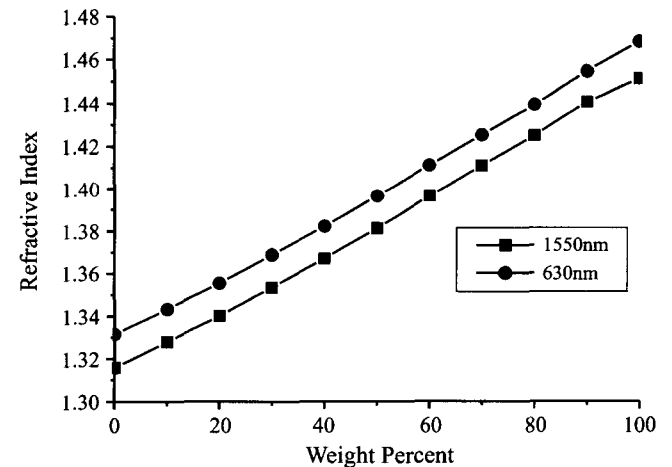


그림 9. 물과 글리세린 혼합액의 섞는 무게비에 따른 굴절률 변화, 100%는 순수 글리세린을 뜻함.

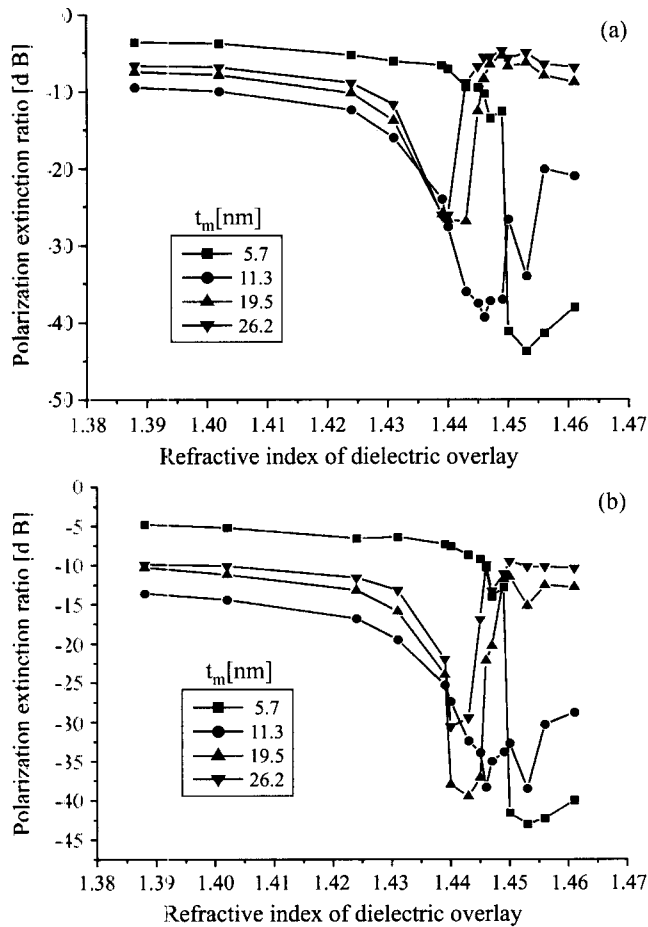


그림 10. 금속의 두께와 상부 유전체층의 굴절률에 따른 편광 소멸비(실험 결과), (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1550$ nm.

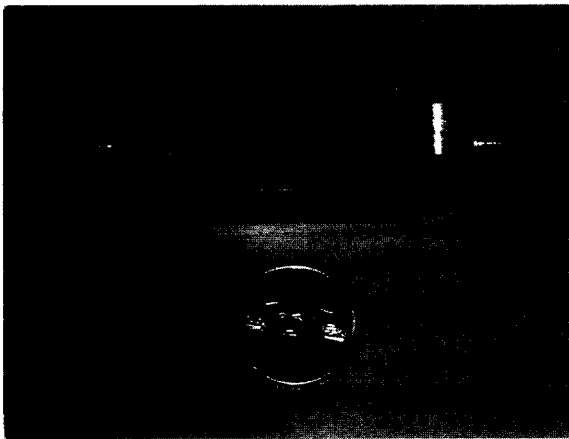


그림 11. 제작된 리셉타클형 편광기 사진.

그림 10(a)와 10(b)의 비교를 통해서 알 수 있듯이 상부 유전체의 굴절률과 금속막의 두께를 적절하게 선택하면 광통신에서 많이 이용되는 $1.31 \mu\text{m}$ 파장과 $1.55 \mu\text{m}$ 파장 모두에서 40 dB 이상의 편광 소멸비를 실험적으로 얻을 수 있었다.

제작된 편광기의 금속박막에 의한 TE 편광의 흡수손실은 0.5 dB 정도였다. 실험 결과를 바탕으로 리셉타클형 편광기를

구현하였다. 그림 11은 연마된 광섬유 블록을 알루미늄 케이스에 내장 후 리셉터클(receptacle) 구조로 완성한 소자 사진이다.

젠포토닉스사의 폴리머인 ZPU12와 ZPU13을 혼합하여 상부유전체로 사용하였다. 이 두 물질의 섞는 비율을 조절하여 원하는 굴절률을 가지는 상부 유전체를 얻는다. 소자 길이가 짧기 때문에 소자 끝단의 편광상태는 케이스 뚜껑과 평행하다고 볼 수 있다.

V. 결 론

측면 연마된 광섬유 위에 금속막과 유전체층이 형성된 플라즈몬 편광기의 특성을 이론과 실험으로 분석하였다. 금속층이 포함된 다층 평판도파로의 모드의 해를 정확하게 구하는 과정을 상세하게 기술하였다. 광섬유를 등가적인 평판도파로로 대체시키고 직교모드이론으로 높은 편광 소멸비를 가지는 편광기 구조를 예측하였다. 특히 금속 위에 올려지는 상부 유전체층의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률 보다 더 큰 경우에도 소자 해석이 가능한 방법을 제시하였다. 이론적 예측을 바탕으로 광통신용 단일모드 광섬유를 이용하여 편광기를 제작하였다. 실험 결과 높은 편광 소멸비를 가지는 소자의 구조 조건은 이론적 예측과 잘 일치하였다. 연마된 광섬유 위에 올려지는 금속막의 두께와 그 위에 올려지는 유전체의 굴절률을 조절하여 파장 $1.31 \mu\text{m}$ 와 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 동시에 40 dB 이상의 편광 소멸비를 얻을 수 있음을 실험으로 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대학교 광소재부품연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] R. A. Bergh, M. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "Single-mode fiber-optic polarizer," *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 479-481, 1980.
- [2] S. P. Ma and S. M. Tseng, "High-performance side-polished fibers and applications as liquid crystal clad fiber polarizer," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 15, No. 8, pp. 1554-1558, 1997.
- [3] W. Jhohnstone, G. Stewart, T. Hart and B. Culshaw, "Surface Plasmon polaritons in the metal films and their role in fiber optic polarizing devices," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 8, no. 4, pp. 538-543, 1990.
- [4] S. M. Tseng, K. Y. Hsu, H. C. Wei and K. F. Chen, "Analysis and experiment of thin metal-clad fiber polarizer with index overlay," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 628-629, 1997.
- [5] C. H. Chen and Likarn Wang, "Maximization of extinction ratios of thin-metal optical waveguide polarizer with proper dielectric cover-layer thickness," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 39, no. 7A, pp. 4130-4137, 2000.
- [6] A. Sharma, J. Kompella, and P. K. Mishra, "Analysis of fiber

- directional couplers and coupler half blocks using a new simple model for single mode fiber," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 8, no.2, pp. 143-151, 1990.
- [7] Enakshi K. Sharma and Mukesh P. Singh, "Multilayer waveguide devices with absorbing layers: an exact analysis," *J. of Optical Comm.*, vol. 14, no. 5, pp. 134-137, 1993.
- [8] S. X. She, "Propagation loss in metal-clad waveguide and weakly absorptive waveguides by a perturbation method," *Optics Lett.*, vol. 15, no. 16, pp. 900-902, 1990.
- [9] 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," *Optics. Comm.*, vol. 180, pp. 37-42, 2000.
- [10] K. T. Kim and J. W. Song, "Investigation of thermo-optically tunable fiber-to-planar waveguide coupler," *Optics Comm.* vol. 205, pp. 113-121, 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] Real Valle and Gang He "Coupling between an optical fiber and a planar waveguide," *Optics Comm.* vol. 126. pp 293-307, 1996.

Design and fabrication of the surface plasmon fiber polarizer

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

Department of Optoelectronics, Honam Univ., Gwangju, 506-714, KOREA

Kwang Hee Kwon and Jae Won Song

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

[†]E-mail: ktkim@honam.ac.kr

(Received November 21, 2002, Revised manuscript February 27, 2003)

We report theoretical and experimental investigation of a polarizer made of single mode side-polished fiber covered with a metal film. The influence of the metal film thickness and the refractive index of overlay on the device performance has been analyzed in terms of the normal mode theory. Based on the theoretical prediction, a polarizer with 40 dB of polarization extinction ratio and 0.5 dB insertion loss at optical communication wavelength has been realized.

OCIS Code : 060.234.