

표면 플라즈몬 광섬유 편광기의 제작 및 특성 조사*

김진하 · 김병윤

한국과학기술원 물리학과

(1994년 2월 22일 받음)

광섬유의 클래딩을 갈아내고 코어 가까이 알루미늄 박막을 증착하여, 표면 플라즈몬으로의 편광 선택적인 모드 결합 원리를 이용하는 광섬유 편광기를 제작하였다. 633 nm, 830 nm, 1.3 μm 의 단일 모드 광섬유를 사용하여 알루미늄 박막의 두께를 달리하며 소광률과 삽입손실을 측정할 결과 대부분의 샘플에서 30 dB 이상의 소광률을 얻을 수 있었으며 삽입손실은 0.2 dB에서 1.5 dB 사이였다.

I. 서 론

여러 광섬유 시스템, 주로 광섬유 센서의 특성은 광섬유 내의 빛의 편광 상태에 따라 크게 좌우된다. 경우에 따라서, 특히 광섬유 자이로스코프 등에서는 광섬유 내의 빛이 높은 편광도를 가져야 하며 이를 위하여 높은 소광률과 낮은 삽입손실을 갖는 광섬유 편광기가 반드시 필요하다. 광섬유의 클래딩을 갈아내고 금속을 증착하는 형태의 광섬유 편광기는 1980년 아이코프(Eickhoff)^[1]에 의하여 시도되었는데, 그 이전에도 집적광학에서 비슷한 형태의 편광기가 사용되어 왔다.^[2-4] 표면 플라즈몬이란 금속과 같이 유전상수가 음의 실수값을 갖는 매질과 유전상수가 양의 실수값을 갖는 보통의 유전체 사이의 경계면을 따라 진행하는 전자기장과 전자 밀도가 결합된 형태의 파동이다. 표면 플라즈몬은 경계 조건에 의하여 자기장이 경계면에 평행하고 진행 방향으로의 성분은 갖지 않는 TM-wave만이 존재함을 알 수 있다.^[5-8] 광섬유의 클래딩을 코어 가까이까지 갈아내고 금속 박막을 증착한 후 그 위에 적당한 굴절률의 유전체를 씌우면 광섬유를 통과하는 수직인 두개의 편광 성분중 유사 TM 모드만이 금속 박막의 표면 플라즈몬 모드로 결합되어 이것이 편광 선택성을 갖게 하는 원리가 된다. 그림 1 여기서 유사 TM 모드라 함은 HE_{11} 모드의 두 개의 수직인 편광 성분중 자기장이 금속면에 평행한 모드를 일컫는다. 이후로는 '유사'를 생략하고 그냥 TE, TM

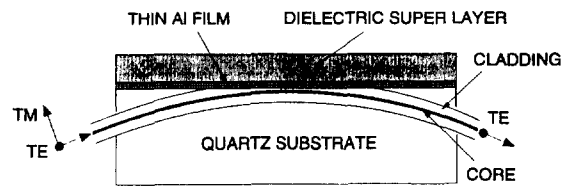


그림 1. 표면 플라즈몬 광섬유 편광기의 개략도. 화살표는 TE, TM 모드의 전기장의 방향.

모드라 칭한다. 이것을 광섬유의 실제 TE, TM 모드와 혼동하지 말아야 한다.

이러한 형태의 광섬유 편광기는 크게 두 종류로 나뉘는데 그 중 하나는 TE 모드를 컷오프(cut off) 시키고 TM 모드는 표면 플라즈몬으로 결합시켰다가 다시 광섬유의 모드로 역결합시켜서 통과시키는 타입이고, 다른 하나는 TM 모드를 표면 플라즈몬으로 결합시켜 감쇠시키고 TE 모드는 통과시키는 타입이다. 아이코프의 편광기는 파장 영역에 따라 두가지 메커니즘이 각각 나타나는 것을 보였으나 소광률이 낮고 손실이 큰 단점이 있었다. 그 후 1986년에 페스(Feth)^[9] 등이 200 Å 이하의 두께로 금속 박막을 증착하여 첫번째 타입의 광섬유 편광기로서 소광률 47 dB, 삽입손실 1 dB를 달성하였다. 그리고 1988년에는 존스톤(Johnstone)^[10,11] 등이 두번째 타입으로서 소광률 50 dB 이상, 삽입손실 0.5 dB 이하의 광섬유 편광기를 발표함으로써 이제 표면 플라즈몬 광섬유 편광기는 광섬유 편광기의 가장 각광받는 형태가 되었다. 표면 플라즈몬 광섬유 편광기는 높은 소광률과 낮은 삽입손실 외에도 작은 부피, 기계적 안정성, 비교적

* 본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구 (90-1-1)와 한국과학재단 목적기초연구 (91-01-00-02)의 연구비 지원으로 수행되었음.

저렴한 제작 비용 등의 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 두번째 타입의 광섬유 편광기의 최적 디자인 조건을 찾아내기 위하여 알루미늄 박막의 두께를 변화시키며 다양한 굴절률의 기름을 알루미늄 박막 위에 떨어뜨려서 소광률과 삽입손실의 변화를 측정하였다. 633 nm, 830 nm, 1.3 μm 단일 모드 광섬유에 대하여 실험을 반복한 결과 소광률이 최대가 되는 조건이 이론적으로 예측한 값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 한편 광섬유 편광기에 증착된 알루미늄 박막의 산화 특성도 조사하였다.

II. 이론적 배경

일반적으로 두 매질의 경계면을 따라 진행하는, 전자 기파(photon)와 표면 전기 쌍극자(혹은 자기 쌍극자)가 결합된 형태의 파동을 표면 플라리톤(Surface polariton)이라 한다. 이러한 쌍극자의 집단적 여기의 근원이 되는 elementary excitation의 이름을 따서 표면 플라리톤을 명명하는데 금속과 같이 자유 전자 기체가 그 근원이 될 때는 표면 플라즈몬 플라리톤(Surface Plasmon Polariton) 또는 표면 플라즈몬(Surface Plasmon)이라 한다. 빛을 이용하여 금속 박막에 표면 플라즈몬을 여기시키는 대표적인 방법으로는 감쇠전반사(Attenuated Total Reflection)법이 있다. 이것은 프리즘을 통하여 금속 박막에 빛을 입사시킬 때 임계각보다 큰 특정한 공명각에서 빛과 표면 플라즈몬의 파수벡터가 서로 같아지면 공명이 일어나서 반사율이 급격히 줄어드는 현상이다. 이러한 표면 플라즈몬 공명 현상은 오래전부터 다양한 분야에 응용되어 왔으며 국내에서도 이를 이용한 금속박막의 광학상수와 두께 측정, 유전체 박막의 광학상수와 형상 측정 등의 연구 결과가 발표된 바 있다.^[12,13]

본 연구의 목적은 광섬유의 갈린 옆면에 증착된 금속 박막의 표면 플라즈몬 모드와 광섬유의 모드 사이의 최적 공명 조건을 찾아내는 것이므로 이에 관하여 먼저 이론적으로 고찰해 보기로 한다. 금속과 유전체 사이의 경계면에서 표면 플라즈몬의 전자기장의 해를 구하면 경계면을 따라 파동과 같이 진행하면서 경계면에 수직인 방향으로 지수적으로 감소하는 구속 모드와 경계면에 수직인 방향으로 지수적으로 증가하는 방사 모드 두 가지를 얻을 수 있다. 그림 2(a)^[10,11,14] 후자는 단독으로는 물리적인 의미를 찾을 수 없으나 두 유전체 사이에 끼인 금속 박막과 같이 두 경계면이 존재하는 경우에는 각각의 경계면에 존재하는 모드들이 서로 결합되어 분산 특성이 다른 새로운 모드들이 생겨나고, 이 때는 방사 모드도

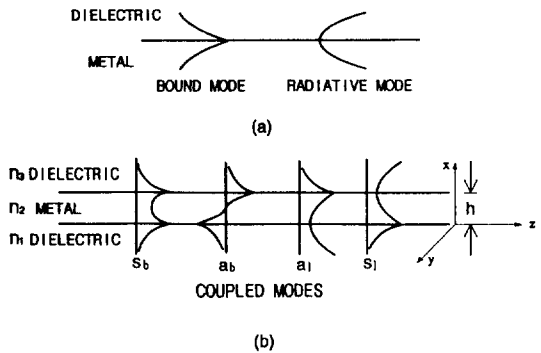


그림 2. (a) 단일 경계면에서의 표면 플라즈몬 모드의 전기장 분포, 구속 모드와 방사 모드가 있다. (b) 금속 박막의 표면 플라즈몬 모드. 각각의 경계면의 모드가 서로 결합하여 네가지의 새로운 모드를 만든다.

다른 쪽 경계면의 구속 모드와 결합하여 물리적 의미를 지니게 된다. 표면 플라즈몬 모드들은 경계 조건에 의하여 TM 모드만이 존재함을 알 수 있다.

그림 2(b)에서와 같은 두개의 경계면에서 진행되는 표면 플라즈몬 모드의 분산관계식은 맥스웰 방정식과 경계조건으로부터 다음과 같이 구하여진다.^[5,10,11,14]

$$\tanh(k_0 h \sqrt{n_e^2 - n_2^2}) = - \frac{n_2^2 \sqrt{n_e^2 - n_2^2} (n_1^2 \sqrt{n_e^2 - n_3^2} + n_3^2 \sqrt{n_e^2 - n_1^2})}{n_1^2 n_3^2 (n_e^2 - n_2^2) + n_2^4 \sqrt{n_e^2 - n_1^2} (n_e^2 - n_3^2)} \quad (1)$$

여기서 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 이고 n_e 는 표면 플라즈몬의 유효 굴절률이다. n_1, n_2, n_3 는 그림에서 보듯이 각각 유전체, 금속, 유전체층의 굴절률인데 표면 플라즈몬 광섬유 편광기에서 클래딩, 금속 박막, 유전체 덧층의 굴절률에 해당된다. 이 식에는 대칭, 비대칭 구속 모드(s_b, a_b 모드)와 대칭, 비대칭 누출 모드(s₁, a₁ 모드)의 네가지 해가 존재한다. 이 중 두개의 구속 모드는 양 경계면에서의 구속 모드가 각각 정위상, 반위상으로 결합된 것이고, 두개의 누출 모드는 한 경계면에서의 구속 모드가 다른쪽 경계면에서의 방사 모드와 결합된 것이다. 금속 박막 양쪽의 유전체가 서로 다른 유전 상수를 가지고 있을 경우, 낮은 굴절률 쪽의 경계면에 구속되어 있는 모드를 대칭 누출 모드(s₁), 높은 굴절률 쪽의 경계면에 구속되어 있는 모드를 비대칭 누출 모드(a₁)라 한다.

광섬유 편광기에서 광섬유의 모드와 표면 플라즈몬 모드 간에 에너지 전달이 가장 효과적으로 일어날 때는 두 모드의 유효 굴절률이 일치하였을 경우, 즉 공진이

표 1. 계산에 사용된 각 파장에서의 광섬유와 알루미늄의 굴절률, 그리고 계산된 편광기 제작 파라미터.

파 장	n_1	n_{ef}	n_2 (Al)	h_{co}	$n_3 @ 160 \text{ \AA}$
633 nm	1,457	1,459	6.92i	35 \text{ \AA}	1,443
830 nm	1,453	1,457	7.11i	68 \text{ \AA}	1,450
1.3 \mu m	1,445	1,450	12i	144 \text{ \AA}	1,450

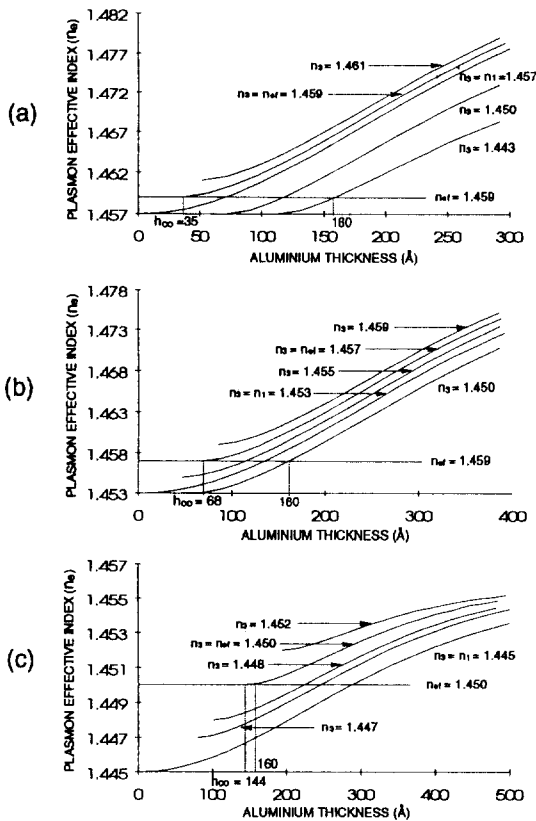


그림 3. 실험에 사용된 각 파장에 대한 광섬유와 알루미늄의 굴절률을 사용하여 계산한 대칭 구속 모드의 유효 굴절률. (a)는 633 nm, (b)는 830 nm, (c)는 1.3 μm. 각각의 컷오프 두께와 광섬유의 유효굴절률, 그리고 박막의 두께가 160 Å일 때 효과적인 모드 결합이 일어나는 유전체 덧층의 굴절률이 표시되어 있다.

일어난 경우이다. 표면 플라즈몬 모드의 유효 굴절률은 금속의 두께와 양쪽에 접하고 있는 유전체의 굴절률의 함수가 된다. 그런데 식 1의 네가지 해 중 비대칭 모드들은 언제나 광섬유의 유효 굴절률보다 큰 유효 굴절률을 갖기 때문에 광섬유의 모드로부터 에너지를 전달받을 수 없다. 따라서 편광기 작동을 일으킬 수 있는 것은 대칭

구속 모드(s_b)와 대칭 누출 모드(s_1)이다. 대칭 구속 모드의 유효 굴절률은 금속 박막의 두께가 얇아짐에 따라 작아지는 경향을 보이는데 만일 이것이 n_1 이나 n_3 보다 작아지게 되면 굴절률이 큰 쪽의 경계면에서 누출 모드로 바뀌어 빠져나가게 되므로 컷오프(cut off) 조건을 만나게 된다. 이 때의 두께를 컷오프 두께 h_c 라 하고 이것은 식 1에서 $n_e = n_i$ (n_i 는 n_1 과 n_3 중 큰 쪽)로 놓음으로써 구해진다. $n_3 > n_1$ 인 경우에 대하여

$$h_c = -\frac{1}{k_0 \sqrt{n_3^2 - n_2^2}} \tan^{-1} \left(\frac{n_2^2 \sqrt{n_3^2 - n_1^2}}{n_1^2 \sqrt{n_3^2 - n_2^2}} \right) \quad (2)$$

이다. 금속 박막의 두께가 컷오프 두께보다 얇은 경우에는 대칭 누출 모드가 존재하고 이 모드의 유효 굴절률은 대칭 구속 모드의 유효 굴절률보다 작다.

그림 3은 본 실험에서 사용한 광섬유들에 대하여 모드 결합 조건을 알아보기 위하여 계산한 대칭 구속 모드의 유효 굴절률이다. 그리고 표 1에는 계산에 사용한 수치와 중요한 결과값들을 나타내었다. 633 nm, 830 nm 광섬유의 n_1 값은 석영 유리의 굴절률이고 1.3 μm의 경우는 depressed cladding이기 때문에 석영 유리의 굴절률 1.447 보다 작다. n_{ef} 는 오일 드롭 실험을 통하여 측정된 값이다. 알루미늄의 굴절률은 허수 부분만을 사용하였다. 광섬유의 유효 굴절률은 그림에 n_{ef} 로 표시되어 있는 직선이다. $n_e = n_{ef}$ 가 되는 점들이 효과적인 모드 결합이 일어나는 점들이다. 우리는 여기서 n_3 와 두께 h 를 조합함으로써 광섬유 편광기에서 높은 소광률을 얻을 수 있다. 그런데 앞서 살펴보았듯이 대칭 구속 모드는 $n_e < n_1$ 일 때는 존재하지 않으므로 만일 n_3 가 n_{ef} 위에 있으면 모드 결합이 일어날 수 없게 된다. 따라서 대칭 구속 모드에 의한 편광기를 만들려면 n_3 는 n_{ef} 보다 작게 해야 하며, 두 굴절률이 같을 때의 금속 박막의 두께를 컷오프 두께 h_{co} 라 하면 금속 박막의 두께는 이보다는 두꺼워야만 한다. 한편 두께가 h_{co} 보다 작은 경우에는 대칭 누출 모드로의 결합에 의하여 편광기로 작동하는 지점이 존재한다. 각각의 파장에서 대칭 구속 모드로의 결합을 이용하여 광섬유 편광기를 제작하려면 계산된 h_{co} 값보다는 두껍게 알루미늄 박막을 증착하여야 한다. 계산에 의하면

160 Å로 알루미늄 박막을 증착하였을 때 대칭 구속 모드로의 모드 결합이 가장 효과적으로 일어나려면 유전체 덧층의 굴절률은 633 nm, 830 nm, 1.3 μm에서 각각 1.443, 1.450, 1.450이어야 한다. 이것은 실험적으로 확인되었다.

III. 제작 방법

표면 플라즈몬 광섬유 편광기를 제작하기 위한 첫번째 작업은 광섬유의 옆면을 코어에서 1~2 μm까지 갈아내는 것이다. 그림 1의 구조를 만들기 위해서 먼저 석영 유리 블럭을 준비한다. 석영유리 블럭의 크기는 25 mm(L)×10 mm(W)×5 mm(H)이다. 이 크기는 본 연구실에서 사용하는 방향성결합기 블럭의 표준 크기이다. 이렇게 크기를 맞춰 놓으면 제작된 표면 플라즈몬 광섬유 편광기를 후에 편광 분할 방향성 결합기로 응용하기가 용이해진다. 보통의 유리를 사용하지 않고 석영유리 블럭을 사용하는 이유는 이것이 광섬유의 재질과 같으므로 연마되는 속도가 같고, 열팽창 계수도 같으므로 나중에 광섬유에 스트레스를 주지 않기 때문이다. 석영유리 블럭이 준비되었으면 다이아몬드 톱을 이용하여 곡률 반경 25 cm의 홈을 낸다. 이 때 석영유리 블럭은 반경 25 cm의 회전판에 부착하여 원주형의 홈을 낼 수 있도록 한다. 회전판은 마이크로 트랜슬레이터에 장착되어 홈의 깊이를 조절할 수 있게 되어있다. 홈의 깊이는 연마를 빨리 하기 위하여 광섬유가 석영유리 블럭위로 조금 튀어나올 정도로 한다. 그러나 코어까지 석영유리 블럭위로 튀어나와서는 안되므로 주의하여야 한다. 예를 들어 광섬유의 클래딩의 직경이 125 μm, 코어의 직경이 8 μm일 때 홈의 깊이는 70 μm 정도면 적당하다. 홈을 낸 다음에는 현미경으로 깊이를 측정하여 연마시에 참고한다.

두번째로는 홈을 낸 석영유리 블럭에 광섬유를 심는다. 접착제로는 UV-curing 에폭시를 사용하였다. 이 때 광섬유를 지나치게 팽팽하게 당겨서 접착시키면 연마시 부러질 염려가 있다. 또 석영유리 블럭 끝에서 광섬유가 꺾이지 않도록 한다.

연마는 처음에는 입자크기가 5 μm인 연마패드 위에서 하거나 폴리우레탄 회전판 위에서 CeO₂ 연마제를 가지고 한다. 그러나 많이 갈아내야 할 필요가 있을 때는 금속 회전판 위에서 SiC 1200번 그라인딩 파우더를 가지고 한다. 이 때는 광섬유가 깨지기 쉬우므로 대단히 주의하여야 한다. 마지막 미세 연마는 CeO₂ 연마제로 하는데 이때는 피치판 위에서 손으로 연마한다.

광섬유를 연마할 때 연마 깊이를 알기 위한 방법이

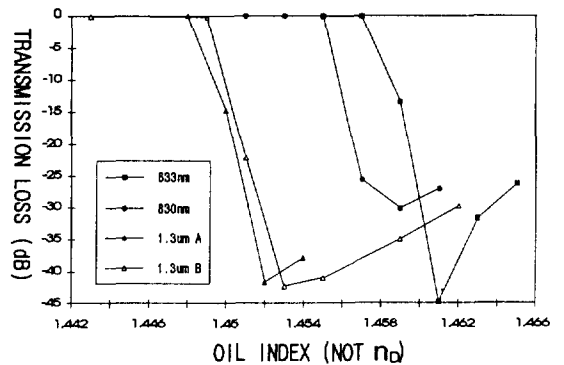


그림 4. 633 nm, 830 nm, 1.3 μm 단일 모드 광섬유의 편광기 블럭에 대한 오일 드롭 실험. 최소 손실이 생기는 지점이 광섬유의 유효 굴절률이다.

필요하다. 이러한 방법에는 블럭의 두께 변화를 디퍼런셜 마이크로미터로 직접 재는 방법, 타원형으로 갈린 광섬유의 옆면을 현미경으로 관찰하는 방법 등도 있지만 그리 정확하지 못하고 또 갈린 절대 깊이를 알아야 할 필요도 없으므로 잘 사용하지 않는 방법이다. 대신 연마중인 광섬유에 빛을 입사시키고 갈려나간 부위에서 산란되는 빛을 관찰한다. 광섬유내에서 진행하는 빛은 코어내에만 존재하는 것이 아니라 코어밖에도 evanescent field로서 존재하므로 코어 가까이까지 갈아내면 이 evanescent field가 산란된다. 그리고 마지막으로 정확한 측정을 위해서는 오일 드롭 실험을 한다.^[15,16] 갈려나간 옆면에 광섬유의 유효굴절률 이상의 굴절률을 가지는 기름을 떨어뜨리면 광섬유의 모드는 누출 모드로 바뀌어 빠져나가게 되는데 이때 빠져나가는 정도를 알면 갈린 깊이를 알 수 있다. 빛이 빠져나가는 정도, 즉 손실은 광섬유의 유효 굴절률 근처에서 최대치를 갖는데 대개 방향성 결합기 제작을 위해서는 15~20 dB 정도의 손실을 가지면 충분하다. 표면 플라즈몬 편광기를 위해서는 약 35 dB 내외면 적당하다.

실험에 사용한 세 종류의 광섬유에 대한 오일 드롭 실험 결과를 그림 4에 보였다. 이 실험 결과는 각각의 단일 모드 파장의 광원을 가지고 실험한 결과이다. 오일 드롭 실험은 광섬유의 유효 굴절률을 알아내는 한가지 방법도 될 수 있다. 실험에 사용한 광섬유의 체원을 정확히 알고 있지 못하므로 오일 드롭 실험은 대단히 유용한 도구가 된다. 측정 결과에 의하면 633 nm, 830 nm, 1.3 μm 단일 모드 광섬유의 유효 굴절률은 각각 1.459±0.001, 1.457±0.001, 1.450±0.001이다. 각 파장에서 굴

절물 기름의 굴절률은 제조회사(Cargille)에서 제공한 n_D , n_C , n_F 값을 가지고 코시 방정식(Cauchy's equation)의 계수를 계산하여 이 방정식에 파장을 대입하여 얻은 값이다.

연마가 끝난 광섬유 편광기 블럭은 세척 과정을 거친 후 DC 스퍼터링 방법으로 알루미늄 박막을 증착한다. 광섬유를 접착하는데 사용한 에폭시가 아세톤에 의하여 물러지는 경향이 있으므로 세척시 아세톤을 사용해서는 안된다. 증착 조건은 증착을 할 때마다 언제나 동일하게 유지시켜 주어야만 한다. 본 실험에서 기본 압력은 5×10^{-6} Torr 이하, Ar 압력 2 mTorr, power는 88 watt, 프리 스퍼터링 2분이다. 그리고 타겟과 광섬유 편광기 블럭과의 거리는 3 inch이다. 박막의 두께는 이러한 조건하에서 증착 시간에 의하여 결정된다. Calibration 된 증착률은 $405 \text{ \AA}/\text{min}$ 이다.

증착된 박막의 두께는 calibration된 값과는 오차를 보이게 마련이므로 두께를 측정할 필요가 있다. 두께 측정용의 시료는 광섬유 편광기에 증착을 할 때 바로 옆에 슬라이드글라스를 함께 놓고 증착하여 만든다. 증착하기 전에 슬라이드글라스에 유성 펜을 이용하여 직선을 그어 놓으면 이것이 마스크 역할을 하게되어 증착 후에 알콜로 닦아내면 이 부분에 증착된 알루미늄은 떨어져 나가게되고 계단 모양의 단면이 형성된다. 박막의 두께는 이 부분을 스타일러스로 스캔하여 측정한다. 측정 결과 증착된 박막은 동일한 증착 조건에 대해서도 증착할 때마다 두께가 다르고 동시에 증착한 시료라도 위치에 따라 두께에 오차가 발생함을 알 수 있었다. 대개 원하는 두께에서 $\pm 20 \text{ \AA}$ 정도의 오차는 감수해야 하였으며 표면의 굴곡도는 약 20 \AA 정도였다.

IV. 알루미늄 박막의 산화 특성

알루미늄 박막은 공기와 접촉하게 되면 표면이 급속도로 산화되어 알루미늄산화물(Al_2O_3) 층을 형성하게 된다. 일단 산화물층이 형성되면 더 이상 산소가 박막 안으로 침투해 들어가기 어려워지므로 산화 속도는 시간에 따라 지수적으로 감소하여 산화물층의 두께는 어떤 한계값에 도달하게 된다. 증착조건에 따라 다르기는 하지만 평균적으로 이 산화물층의 두께는 40 \AA 으로 알려져 있다.^[17] 금속 박막에서의 표면 플라즈몬의 분산은 박막의 두께에 관계하기 때문에 산화되지 않고 남아있는 알루미늄의 두께가 실제로 표면 플라즈몬의 위상속도를 결정짓게 될 것이다. 한편 산화물층 자체도 표면 플라즈몬의 분산에 영향을 미칠 가능성이 있어 보이지만, 이 경우 표면 플

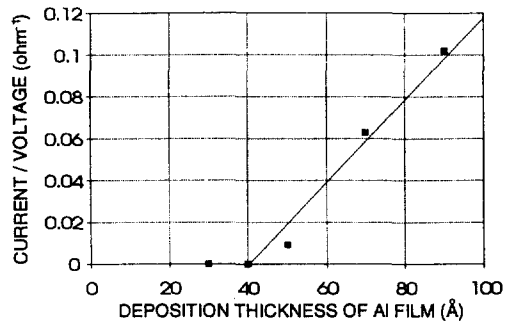


그림 5. 알루미늄 박막의 저항 측정 결과. 1/R대 증착 두께의 그래프, 산화막의 두께는 40 \AA 임을 알 수 있다.

라즈몬의 전자기장이 덧층 속으로 미치는 거리가 대략 빛의 파장정도인데 반해 산화물층의 두께는 이에 비해 대단히 작으므로 무시할 수 있다고 본다.

알루미늄 박막 표면의 산화막의 두께는 박막의 전기 저항을 측정하여 추정하였다. 표면이 산화된 알루미늄 박막에서 전기저항은 산화되지 않고 남아있는 알루미늄 층의 두께에 반비례할 것이다.

$$\frac{1}{R} \propto T_D - T_O \quad (3)$$

여기서 T_D 는 박막의 증착 두께, T_O 는 산화막의 두께. 그러므로 박막의 증착 두께를 변화시키면서 전기저항을 측정하여 직선 맞춤하면 직선이 T_D 축을 가로지르는 점이 산화막의 두께가 된다. 저항 측정은 4점법 방식을 사용하였다. 박막의 저항을 정확히 측정하려면 반드시 4점법 방식을 사용해서 접촉 저항 등에 의한 오차를 제거하여야 한다. 이렇게 하여 얻은 결과가 그림 5에 나와있다. 계산된 산화막의 두께는 40 \AA 이었으며 이것은 문헌에 알려진 값과 일치하는 결과이다. 측정은 박막 증착후 24 시간 이후에 실시하였다. 이 논문에 실려있는 알루미늄 박막의 두께는 모두 증착 두께에서 40 \AA 을 뺀 것이다.

V. 소광률과 삽입손실 측정방법

편광기의 소광률이란 편광기의 통과축과 차단축으로 같은 세기의 빛이 입사되었을 때 각 축에서 통과되어 나오는 빛의 세기의 비이다. 광섬유 편광기의 소광률을 측정할 때 완전히 편광되지 않은 빛을 입사시키고 반대편 끝에서 다른 편광기를 회전시키면서 최대, 최소 세기를 측정한다면 간편하겠으나 광섬유는 불규칙 복굴절을 가

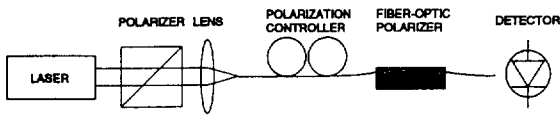


그림 6. 광섬유 편광기의 소광률 측정을 위한 실험 장치도.

지고 있기 때문에 이렇게 측정하는 것이 불가능하다. 그래서 제작된 광섬유 편광기의 소광률을 측정하기 위하여 높은 소광률(약 50 dB)을 가진 크리스탈 편광기를 통하여 편광된 빛을 광섬유에 입사시키고 광섬유 편광기와 사이에 편광 조절기를 넣어주는 방법을 사용하였다. 그림 6 편광 조절기는 두개의 원판에 광섬유를 감아서 원판의 각도를 조절함으로써 광섬유내의 빛의 편광 상태를 바꾸는 것인데 광섬유를 굽힘으로써 유발되는 복굴절을 이용하여 하나의 원판이 $\lambda/4$ -plate 역할을 하게 한 것이다. 편광조절기를 이용하면 임의의 편광 상태를 다른임의의 편광 상태로 바꾸어 줄 수 있다.^[18-20] 따라서 광섬유 편광기에 TE, TM 모드를 인가해 줄 수 있는 것이다. 이 때 광섬유 편광기에 입사되는 빛의 세기는 변화가 없으므로 편광 조절기를 미세하게 움직여서 광섬유 편광기를 통과하여 나오는 빛이 최대, 최소가 되게하여 그 비를 구하면 그것이 소광률이 되는 것이다. 그러나 편광 조절기를 이용하는 방법에서 편광 조절기의 두 원판이 각각 정확히 $\lambda/4$ -plate가 되지 않으면 원하는 편광 상태를 모두 만들 수가 없으므로 이것이 측정의 정확도를 제한한다. 실험 결과도 실제 소광률보다는 낮게 측정된 값이라고 보는 것이 타당하다.

실험은 광섬유 편광기의 알루미늄 박막위에 다양한 굴절률을 가지는 굴절률 기름을 떨어뜨려가면서 소광률을 측정하는 것이다. 이 때 굴절률 기름의 굴절률은 각 파장에서의 굴절률을 계산하여 사용하였으며 온도에 의한 보정도 해주었다. 기름의 굴절률을 변화시키에 따라 대칭 구속 모드와 대칭 누출 모우드에 의한 편광기 동작이 되는 것을 관측할 수 있다. 기름의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률보다 클 때 빠져나오는 빛을 편광기를 통하여 보면 TM으로 강하게 편광되어있음을 알 수 있다. 이것은 $1.3 \mu\text{m}$ 파장에서도 적외선 TV 카메라를 사용하여 관찰하였다.

광섬유 편광기의 손실은 cut back 방법으로 측정하였다. 광섬유 편광기에 TE 편광을 인가해 주어서 가장 통과가 잘 되었을 때의 빛의 세기를 광섬유 편광기의 앞쪽을 잘라내어 여기서 측정한 빛의 세기로 나누어 준 것이 삽입 손실이다. 측정시 주의해야 할 점은 광섬유의

끝을 깨끗이 잘라서 산란을 최소로 줄여야하고, 검출기로 빛이 가장 잘 입사되도록 조절하여야 하며, 광섬유를 자를 때 적어도 입사단에서 어느 정도 길이 이상을 남겨두고 잘라서 광섬유의 기본 모드가 아닌 방사 모드와 클래딩 모드가 모두 빠져나간 지점에서 측정하여야 한다는 것이다.

광섬유 편광기는 알루미늄 박막의 두께를 변화시키 가면서 소광률을 가장 크게 할 수 있는 조건을 찾아야 하는데 이 때 광섬유의 연마 깊이가 다른 편광기 블럭으로 비교를 할 수는 없다. 그러므로 하나의 편광기 블럭에 대하여 여러번 알루미늄 박막을 증착하기 위하여 한 차례 실험이 끝난 편광기 블럭은 알루미늄 박막을 에칭하였다. 에칭액은 인산 90%와 질산 10%의 비율로 만들었으며^[21] 에칭 속도를 조절하려면 물로 적당히 희석하면 된다. 한편 동일한 두께에 대하여 연마 깊이가 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 $1.3 \mu\text{m}$ 에 대하여는 연마 깊이가 다른 두개의 편광기 블럭을 사용하였다. 이 두개의 편광기는 증착시 옆에 나란히 두어 같은 증착 조건이 되도록 하였다.

VI. 실험 결과 및 검토

각 파장의 편광기 블럭에 대하여 알루미늄 박막의 두께를 바꾸어가며 반복실험을 하였는데, 633 nm , 830 nm 의 편광기 블럭에 대해서는 두께를 달리하여 두번 증착을 하였고, $1.3 \mu\text{m}$ 에서는 블럭을 두개 만들어 하나(블럭 a)는 두번, 나머지 하나(블럭 b)는 세번 증착하여 측정하였다. 알루미늄 박막위에 다양한 굴절률을 가지는 굴절률 기름을 떨어뜨려가며 소광률과 삽입 손실을 측정한 결과가 그림 7, 8, 9에 나와있다. 여기서 160 \AA 블럭은 28.15초, 90 \AA 블럭은 18.69초간 증착한 것이고 두께 측정 결과도 예상치에서 크게 벗어나지 않은 것이다. 그러나 그림에 sample X라고 표시되어 있는 것은 23.70초간 증착한 것인데, 이것은 증착 두께(산화막의 두께도 포함) 160 \AA 을 목표로 한 것이나 두께 측정 결과 230 \AA 으로 측정된 것이다.

각 파장의 편광기 블럭의 특성에 대하여 검토하여 보자. 먼저 $633 \mu\text{m}$ 파장에서는 160 \AA 으로 증착한 블럭이 1.438에서 최고 33 dB의 소광률을 나타내었고, sample X는 같은 굴절률에서 24 dB의 소광률을 보였다. 이것은 모두 대칭 구속 모드로의 결합에 의한 것인데 1.438과 1.450 사이의 굴절률을 가진 기름을 가지고 있지 않아서 이 구간의 측정 간격이 크다. 실제 최대 소광률은 그림으로 미루어 보건대 이 구간 사이의 어느 점이었던 것

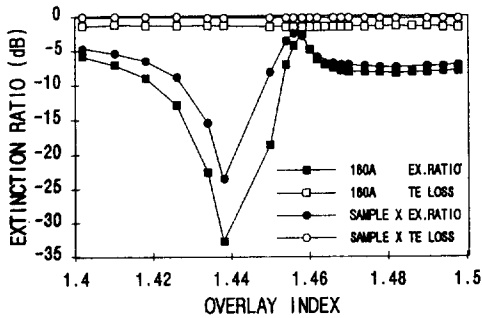


그림 7. 633 nm 편광기의 소광률과 삽입손실.

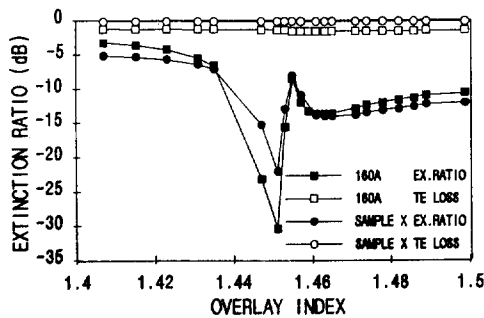
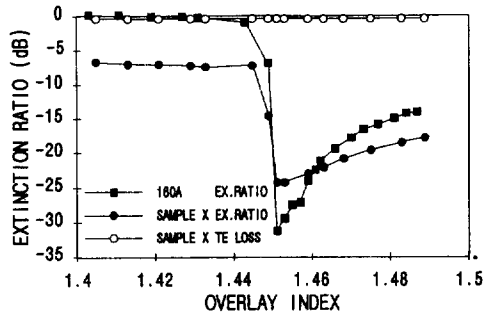
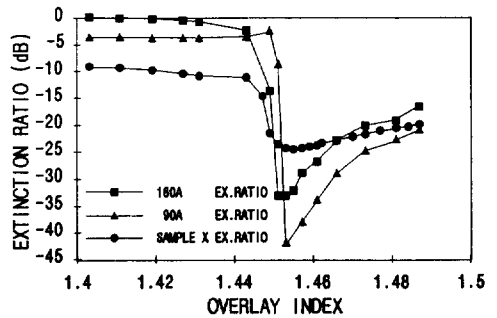


그림 8. 830 nm 편광기의 소광률과 삽입손실.



(a)



(b)

그림 9. 1.3 μm 편광기의 소광률과 삽입손실. (a) a 블록, 연마깊이-42 dB, (b) 블록, 연마 깊이가-50 dB.

이다. 이것은 이론에서 예측한 값 1.443과 거의 일치하는 결과이다. 삽입 손실은 160 Å 블록이 1.4 dB, sample X가 0.2 dB이다.

830 nm의 파장에서는 160 Å 블록이 1.451에서 30 dB, sample X가 같은 굴절률에서 22 dB의 소광률을 나타내었는데 이것도 이론에서 예측한 1.450과 거의 그대로 일치한다. 삽입 손실은 160 Å 블록이 1.5 dB, sample X가 0.2 dB를 나타내었다.

1.3 μm의 파장에서는 633 nm와 830 nm에서와는 현저하게 다른 모양이 나타나는데 마치 대칭 구속 모드로의 결합은 없고 대칭 방사 모드로의 결합만이 나타나는 것처럼 보인다. 이것은 아마도 이론에서 보았듯이 144 Å이 컷오프 두께이고 이 근처에서 표면 플라즈몬의 유효 굴절률이 매우 완만하게 변하는 것이 그 이유인 듯하다. 그래서 160 Å 블록의 경우 1.450 근방의 굴절률에서 대칭 구속 모드와 누출 모드로의 결합에 의한 효과가 구분되지 않는 것으로 보인다.

90 Å 블록은 컷오프 두께 미만이므로 기름의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률보다 큰 지점으로 피크가 이동하였음을 보여준다. 또 한가지 추측해 볼 수 있는 것은 이

파장 영역에서 금속 박막의 두께가 얇아짐에 따라 표면 플라즈몬이 대단히 긴 거리를 손실없이 이동하기 때문에^[14] 일단 표면 플라즈몬으로 결합되었던 에너지가 다시 광섬유로 역결합되어 돌아온 것이 아닌가 하는 점이다. 이것은 TE 컷오프 타입의 광섬유 편광기에서 TM 모드가 손실없이 통과되는 원리인데, 본 실험에서 제작한 편광기 블록이 TE 모드를 컷오프 시키지 않으면서 TM 모드도 역결합을 통하여 손실없이 통과시키는 조건으로 만들어졌을 가능성이 있다. 특히 160 Å 블록에서 다른 블록과는 전혀 다르게 공진 굴절률 아래쪽에서 소광률이 완전히 0이 되는 것은 이 추측을 가능하게 해준다. 그러나 이 원인을 명백히 규명하려면 알루미늄 박막의 두께를 컷오프 두께에 비하여 매우 두껍게 증착하여 측정해 본 다거나, 연마 깊이가 얇아서 모드 결합이 약하게 일어나는 편광기 블록을 제작하여 측정해 보아야만 할 것이다. 소광률은 b 블록이 1.451에서 최고 42 dB를 기록하였다. 삽입 손실은 a블록의 sample X에 대해서만 측정하였는데 0.3 dB이다.

VII. 결 론

본 연구에서는 표면 플라즈몬 광섬유 편광기의 이론적 배경을 설명하고 633 nm, 830 nm, 1.3 μm 의 파장에서 광섬유 편광기를 제작하여 그 특성을 측정하였다. 증착된 알루미늄 박막위에 다양한 굴절률을 가지는 굴절률 기층을 떨어뜨려가며 소광률과 삽입손실을 측정할 실험에서 측정 결과는 이론에서 예측한 바와 대단히 잘 일치하는 경향을 보였고, 특정한 조건에서는 매우 높은 소광률과 낮은 삽입손실을 얻을 수 있었다. 현재까지의 실험결과로는 소광률 42 dB, 삽입손실 1 dB 정도의 소자가 가능하였지만 알루미늄 박막의 두께를 계속 바꾸어 가며 좀 더 많은 실험 데이터를 얻는다면 더욱 뛰어난 성능을 발휘하는 최적의 편광기 디자인 조건을 구할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] W. Eickhoff, *Electron. Lett.*, **16**, 762(1980).
 [2] Y. Suematsu, M. Hakuta, K. Furuya, K. Chiba and R. Hasumi, *Appl. Phys. Lett.*, **21**, 291(1972).
 [3] Y. Yamamoto, T. Kamiya and H. Yanai, *IEEE J. Quantum Electron.*, **11**, 729(1975).
 [4] K. H. Rollke and W. Sohler, *IEEE J. Quantum Electron.*, **13**, 141(1977).
 [5] E. Burstein, A. Harstein, J. Schoenwald, A. A. Maradudin, D. L. Mills and R. F. Wallis, in *Polaritons, Proc. of the First Taormina Research Conference on the Structure of Matter, Taormina, 1972*, 89(1974).
 [6] D. N. Mirlin, in *Surface Polaritons, Electromagnetic Waves at Surface and Interfaces*, (North Holland

Pub. Co., 1982) p. 3.
 [7] J. Lagois and B. Fischer, in *Surface Polaritons, Electromagnetic Waves at Surface and Interfaces*, (North Holland Pub. Co., 1982) p. 69.
 [8] G. N. Zhizhin, M. A. Moskalova, E.V. Shomina and V. A. Yakovlev, in *Surface Polaritons, Electromagnetic Waves at Surface and Interfaces*, (North Holland Pub. Co., 1982) p. 93.
 [9] J. R. Feth and C. L. Chang, *Opt. Lett.*, **11**, 386 (1986).
 [10] W. Johnstone, G. Stewart, B. Culshaw and T. Hart, *Electron. Lett.*, **24**, 866(1988).
 [11] W. Johnstone, G. Stewart, T. Hart and B. Culshaw, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **8**, 538(1990).
 [12] 황보창권, 최철재, 최동철, *한국광학회지* **2**, 59(1991).
 [13] 황보창권, 김성화, 이규진, *한국광학회지* **3**, 205 (1992).
 [14] J. J. Burke, G. I. Stegeman and T. Tamir, *Phys. Rev.* **B33**, 5186(1986).
 [15] M. J. F. Digonnet, J. R. Feth, L. F. Stokes and H. J. Shaw, *Opt. Lett.*, **10**, 463(1985).
 [16] W. V. Sorin, *Evanescence Field Devices using Single-mode Optical Fibers*, Ph.D thesis, Stanford (1986).
 [17] G. Hass, R. Tousey, *J. Opt. Soc. of America*, **49**, 593(1959).
 [18] H. C. Lefevre, *Electron. Lett.*, **16**, 778(1980).
 [19] M. Johnson, *Appl. Opt.*, **18**, 1288(1979).
 [20] T. Okoshi, *IEEE J. Lightwave Tech.*, **3**, 1232 (1985).
 [21] M. N. Zervas and I. P. Giles, *Opt. Lett.*, **15**, 513 (1990)

Fabrication and Characterization of Surface Plasmon Fiber-Optic Polarizers

Jin Ha Kim and Byoung Yoon Kim

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology
 Taejon 305-701, Korea*

(Received: February 22, 1994)

We fabricated fiber-optic polarizers utilizing polarization selective mode coupling between the guided mode of a fiber and the surface plasmon mode supported by a thin aluminium film deposited on the polished side of a fiber. Al thin films with various thicknesses were coated onto the 633 nm, 830 nm, 1.3 μm single mode fibers. The maximum extinction ratio was higher than 30 dB for most of the samples and the best result was 42 dB at 90 Å film thickness, with 1.3 μm single mode fiber. The insertion loss ranged from 0.2 dB to 1.5 dB.