

이온빔보조증착에 의한 TiO_2 박막의 광학적, 기계적 특성 연구

성진원, 문여익
한국광학기술개발(주)
황보창권, 조현주
인하대학교 물리학과

간섭필터 제작시 고굴절률 박막으로 많이 사용되는 TiO_2 박막을 이온빔 보조증착 방법으로 제작하여 광학적, 기계적 특성을 연구하였다. 보조증착용 이온총으로는 End-Hall 형 이온총을 자체제작하여 사용하였다. 증착속도, 이온빔의 전류밀도, 산소 주입량 등을 주요 증착변수로 하여 TiO_2 박막의 광학상수와, 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 박막의 조밀도와 굴절률이 증가하여, 대기중에 노출시 파장이동이 없는 고품질의 간섭필터 제작에 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

I 서 론

제 1 절 이온 보조증착에 의한 금속 산화물 박막

일반적으로 가시광에서 근적외선 대역의 간섭필터를 제작하는데 필요한 유전체 박막의 종류는 금속산화물(metal oxide)이 대부분이다. 이러한 금속산화물 박막은 간섭필터의 설계시 2.0 이상의 고굴절률 또는 1.6 ~ 1.9 사이의 중굴절률 박막으로서 필요하다. 이러한 금속산화물 박막은 용융온도가 상당히 높기 때문에 전자총으로 용융하여 보통 250℃ 이상으로 가열된 기판위에 증착시키게 된다.

그러나 기존의 방법(conventional evaporation)으로는 전자총에 의한 용융시 산소와 분리된 금속 성분이 산소와 결합되지 못한 채 증착되어 박막의 원소조성비를 감소시키게 되고, 이를 보완하기 위하여 진공챔버 내에 산소 가스를 주입하여 재결합 반응을 촉진시키는 방법을 사용하게 된다. 그러나 이러한 방법도 챔버 내부의 기하학적 모양, 진공도, 펄핑 속도, 잔류 불순가스에 따라 최적 조건이 민감하게 변화하여 금속성분에 의한 흡수를 만족스러운 정도로 제거하기는 어렵다. 또 일반적으로 산소가스를 지나치게 많이 주입하면 흡수는 사라지나 굴절률이 감소하게 되어 고굴절률 박막의 경우, 최초의 설계보다 광투과 특성이 좋지 않게 된다.

이같은 기존의 금속산화물 박막 제조의 문제점을 보완하기 위하여 여러가지 증착기술이 연구되고 있으나, 이온빔에 의한 보조증착법이 가장 도입하기 용이하고 투자 대비 효과가 큰 방

법으로 생각된다. 이에 따라 본 연구개발에서는 이온빔 보조증착에 의한 금속산화물 박막의 광학적 특성의 개선에 주된 목표를 두었으며, 아울러 기계적 특성의 향상, 다층박막의 광학적 안정성도 연구하였다.

제 2 절 TiO_2 박막

이온빔 보조 증착법으로 가시광선 영역에서 고굴절률 물질로 많이 사용되는 TiO_2 박막을 제작하여 특성을 조사하였다. 또한 특성 연구가 완료된 자료를 바탕으로 SiO_2 와 짝을 이루어 다층 박막을 설계하고 이들의 특성을 보통 박막과 비교하였다.

TiO_2 를 이용한 광학 박막으로는 경계면에서 빛의 손실을 줄이는 무반사코팅, 입사하는 빛을 모두 반사시키는 고반사 코팅, 입사하는 빛의 세기를 적절한 비율로 두 방향으로 나누는 광속 분리기, 입사하는 빛을 편광 상태별로 분리하는 편광분리코팅 등 가시광선 영역부터 근적외선에 이르는 영역의 강한 외부 환경이 필요한 경우에 폭넓게 사용된다. 일반적으로 TiO_2 박막은 기판온도를 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 정도로 올려서 제작하고 있다. 그러나 기판의 온도를 올리는 경우 공정상의 시간이 많이 들어 경제적이지 못할 뿐만 아니라 기판이 유리가 아닌 변형 온도가 낮은 플라스틱 등에는 적용하기 곤란하다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하고 나아가 박막의 내구성이 강한 고품위 박막을 이온빔 보조 증착법으로 제작한 뒤 박막이 조밀해진 정도를 여러 가지 분석방법을 사용하여 조사하였다. 아울러 제작된 박막의 광학적 특성뿐만 아니라 외부의 환경이나 충격 등에 대응하는 기계적 성질이 어느 정도 향상 되었는지도 조사하였다.

II. 이온빔 보조 증착 TiO_2 박막

제 1 절 TiO_2 박막의 이온빔 보조 증착

그림 2-1에 본 실험에서 사용한 직경 70cm의 이온빔 보조 증착 장비의 개요도가 나타나 있다. 진공 펌프는 회전 펌프(Edwards, E2M-80)와 cryo 펌프(CTI, CRYO-TORR 10)를 사용했으며, 진공도는 convectron 게이지와 Bayard-Alpert형 이온 게이지(Granville-Phillips, 307)를 사용하여 측정하였다. 챔버의 하단에는 물질을 증발시키는 전자총(Innotec, EB-8)과 열 저항 장치가 있고, 그 옆에 이온빔 보조 증착을 위해 지난 연도에 제작한 이온총이 놓여 있다. 이온총으로부터 약 5 cm 떨어져 있는 shutter 위에 Faraday cup을 놓아 이온빔 전류밀도를 측정하여 이 값을 기판의 위치에서 보정 하여 사용하였다. 박막의 두께 및 증착률 조절은 챔버의 상단 중앙에 놓여 있는 수정자 두께 측정기(quartz-crystal thickness monitor, Leybold, XTC/2)와 반사형 광학적 두께 측정기(optical thickness monitor, Dyn-Optics, 590)를 병행하여 사용하였다. 증착시 기판의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 할로겐 램프를 기판 하단에 설치하였으며, 온도 조절은 기판과 같은 높이에 열전쌍(thermocouple)을 놓고 이를 자동 온도 조절 장치와 연결시켜 사용하였다.

그림 2-1의 장비를 이용하여 8×10^{-7} Torr 이하의 기본 진공에서 Ar 가스를 질량 유속 조절기(mass flow controller, MFC)로 적당량(27.5 sccm)을 조절하여 이온총 속으로 흐르게 하여 기판을 세척한 뒤, 기판온도 120 ± 20 °C 를 유지하면서 박막을 제작하였다. 박막 제작의 변수로 이온빔의 전류밀도, 산소의 부분 압력, 물질의 증착속도를 변화하며 TiO₂ 단층 박막을 전자총을 이용하여 두께가 약 450 nm가 되도록 증착하였다

제 2 절. 단층 박막의 특성

본 연구에서는 이온빔 보조 증착에 의하여 박막의 특성이 어떤 변화를 나타내는지 알아보기 위하여 분광광도계(spectrophotometer)로 박막의 투과율을 측정된 뒤 포락선 방법(envelope method)을 이용하여 박막의 굴절률 및 소멸계수를 550 nm에서 결정하였다. 박막이 이온빔의 충격에 의하여 조밀해진 정도를 측정하기 위하여 진공과 대기간의 투과 파장 이동량을 측정하였으며, 기둥구조의 변화는 주사형 전자 현미경으로 박막의 단면을 측정하여 알아보았다. 이온빔의 조사에 의하여 박막의 결정성 형성 유무와 결정방향의 변화를 X선 회절을 통하여 조사하였다. 또한 박막의 기계적 성능의 향상을 측정하기 위하여 염수분무 시험과 경도 시험을 수행하였다.

1. 분광광도계 및 포락선 방법

임의의 액체 또는 고체 시료의 파장에 따른 투과율과 반사율, 그리고 흡수계수를 측정할 수 있는 측정 장비가 분광광도계이다. 빛을 파장에 따라 분리하는 방법과 빛을 검출하는 방법에 따라 약간의 구성상의 차이는 있으나, 분광광도계로 박막 시료의 투과율을 측정하는 대표적인 장비의 개략도를 그림 2-2에 나타내었다. 광원으로부터 백색광이 나오면 단색화 장치(monochromator)를 이용하여 단파장의 빛을 만든 뒤 광속 분리기(beam splitter)를 통과하면서 빛이 두 갈래로 분리된다. 이중 한쪽 광경로에는 아무런 시료가 놓여 있지 않고, 다른 한쪽의 광경로에는 박막을 놓아 빛이 박막을 투과하여 지나가도록 한다. 시료가 놓여 있지 않은 쪽의 빛의 세기를 기준으로 하여 시료를 통과한 빛의 세기의 비를 측정함으로써 박막의 투과율을 측정할 수 있다. 단색화 장치로 연속적으로 광속 분리기에 입사하는 빛의 파장을 변화시킴으로써 가시광선 영역뿐만 아니라 자외선과 적외선 영역의 투과율도 측정할 수 있고, 이러한 측정 가능한 파장 영역은 광원, 단색화 장치, 광속 분리기, 그리고 광검출기의 성능에 따라 결정된다.

단층 박막의 투과율을 파장에 따라 측정하면 그림 2-3의 그래프와 같은 결과를 얻는다. 그림에서 투과율이 변하는 정도는 박막의 굴절률, 흡수계수, 그리고 두께에 의존한다. 따라서 박막의 투과율 그래프를 얻으면 이를 역으로 계산함으로써 박막의 굴절률 등의 광학상수를 구할 수 있다. 이러한 방법으로 박막의 광학상수를 구하는 방법을 포락선 방법이라 하며 이를 간략히 요약하면 다음과 같다.

2. TiO₂ 박막의 굴절률 측정 및 계산

이온빔 보조 증착 장비를 이용하여 이온빔의 전류밀도를 $0 \sim 660 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 사이를 변화해 가면서 박막을 제작한 뒤, 이를 분광광도계(Hitachi, U2000)로 박막의 투과율을 측정하여 박막의 굴절률을 계산하였다. 그림 2-4는 측정 결과의 그래프중 이온빔 보조 증착을 하지 않은 박막과

660 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 이온빔 보조 증착한 박막의 투과율을 측정된 결과를 나타낸다. 두 그림을 자세히 비교하여 보면 최대 투과율($\lambda/2$ 광학적 두께에 해당하는 파장에서의 투과율)과 최소 투과율($\lambda/4$ 광학적 두께에 해당하는 파장에서의 투과율)의 차이가 이온빔 보조 증착 박막이 더 크게 나타남을 볼 수 있는데 이는 박막의 굴절률이 증가했음을 의미한다. 또한 그래프로부터 증착을 하지 않은 박막과 TiO_2 가 증착된 박막의 $\lambda/2$ 에서의 투과율이 거의 차이가 없는데 이는 제작된 박막은 흡수가 무시할 정도로 작음을 의미한다.

그림 2-6에 제작된 TiO_2 박막의 굴절률을 포락선 방법으로 결정한 결과를 이온의 전류 밀도의 변화에 대하여 나타내었으며 그림 2-7은 같은 계산에서 구한 박막의 소멸계수를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 이온빔이 조사되지 않은 박막은 굴절률이 2.029인 반면 이온빔 보조 증착에 의하여 박막의 굴절률이 최고 2.341까지 증가하였고, 전반적으로 박막에 가하여진 이온빔의 전류밀도가 증가함에 따라 박막의 굴절률이 증가하는 경향을 나타내었다. 이때 박막의 소멸계수는 커다란 차이가 없이 모두 10^{-4} 대의 값을 가져 이온빔 보조 증착으로 제작된 TiO_2 박막은 광학 박막으로 사용하기에 적합하다. 이온빔의 전류밀도가 증가함에 따라 박막의 굴절률이 증가하는 이유는 약 100 eV 이상의 에너지를 갖은 아르곤 양이온이 박막에 충격을 주어 기둥구조가 무너지면서 박막의 빈 공간 부분이 감소함에 따라 박막의 미세구조가 조밀해지고 따라서 굴절률이 증가한다.

그림 2-8과 2-9는 0.3 nm/s, 430 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서 산소를 10, 20, 30 sccm 주입하여 제작한 박막의 굴절률과 소멸계수를 나타낸다. 산소 주입량이 10 sccm인 박막은 굴절률이 약 2.4로 대부분의 박막에 비해 높으나 소멸계수가 0.00083으로 다른 박막보다 크다. 반면 산소 주입량이 증가하면 굴절률이 감소하나 소멸계수는 산소 30 sccm 이상에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 전반적으로 산소 주입량이 증가할수록 박막의 굴절률이 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 증착입자와 이온총에서 나오는 이온들이 주입된 산소와 충돌에 의하여 에너지가 감소함에 따라 기판에서 증착 되는 입자의 이동도가 감소함으로써 발생하는 현상으로 여겨진다. 소멸계수가 감소하는 것은 Ti와 O가 의 반응이 산소 주입량에 따라 증가하여 원소 조성비가 1:2 로 접근하기 때문으로 판단된다.

그림 2-10과 2-11은 산소를 50 sccm 주입하여 550 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 이온빔으로 이온빔 보조 증착을 하면서 증착속도를 0.15 nm/s와 0.3 nm/s로 다르게 한 경우의 결과를 나타낸다. 그림에서 나타남과 같이 증착속도가 0.3 nm/s인 경우의 박막의 굴절률이 2.34인데 비해 0.15 nm/s 에서 제작된 박막의 굴절률은 2.28로 증착속도가 증가하면 박막의 굴절률도 증가하나, 소멸계수는 0.0003 정도로 거의 변화가 없다. 이는 증착속도가 증가하면서 원소 조성비의 변화에 의한 소멸계수의 변화는 일어나지 않고 기판에서 증착 입자의 이동도가 증가하였기 때문으로 판단된다.

3. 조밀도(packing density) 계산

진공 증착에 의하여 제작된 대부분의 박막은 기둥과 빈 공간으로 구성된 기둥구조를 가지고 있다. 기둥구조로 이루어진 박막의 조밀도는

$$\text{조밀도} = \frac{\text{기둥의부피}}{\text{기둥의부피} + \text{빈공간의부피}}$$

로 정의되는 박막의 조밀도가 덩어리(bulk)와는 달리 1보다 작은 값을 가지며, 빈 공간의 부피가 클수록 그 값은 더욱 작아진다. 박막의 굴절률과 조밀도와의 관계를 나타내는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 비교적 계산이 간편한 아래와 같은 선형근사식을 사용하였다.

$$n = p n_b + (1 - p) n_v$$

여기서 n_f 는 박막의 평균 굴절률, n_b 는 덩어리의 굴절률이고, n_v 는 빈 공간의 굴절률이다. 진공에서 빈 공간의 굴절률(n_{vac})은 진공의 굴절률인 1 이며, 대기에서 빈 공간의 굴절률은 수분이 빈 공간에 침투하므로 물의 굴절률(n_{air})인 1.33이 된다. 진공에서 박막의 굴절률을 n_{vac} , 대기에서 박막의 굴절률을 n_{air} , 진공에서의 m 번째 차수의 피크 파장을 λ_{vac} , 대기에서의 m 번째 차수의 피크 파장을 λ_{air} 라고 하면, 광학적 두께가 $\lambda/4$ 의 정수배일 경우

$$n_f d = m \frac{\lambda}{4}$$

이므로, n_f 에 빈 공간과 덩어리의 굴절률을 대입하여 진공과 대기에서 각각 계산하면

$$n_{vac} d = [p n_b + (1-p)] d = m \frac{\lambda_{vac}}{4}$$

$$n_{air} d = [p n_b + 1.33(1-p)] d = m \frac{\lambda_{air}}{4}$$

이 된다. 이로부터 진공과 대기 중에서 파장의 이동량 $\Delta\lambda$ 는

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_{air} - \lambda_{vac} \\ &= \frac{0.33\lambda}{n_{air}} (1-p) \end{aligned}$$

이 되고, 따라서 박막의 조밀도는

$$p \approx 1 - 3 \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{air}} n_{air}$$

가 된다. 그러므로 진공과 대기 중에서 파장의 이동량과 박막의 굴절률을 알면 박막의 조밀도를 구할 수 있다. 파장이 전혀 이동하지 않으면 $\Delta\lambda=0$ 이므로 박막의 조밀도는 덩어리와 같은 1 이다.

4. 진공과 대기간의 투과 파장 이동량 측정

진공에서 제작된 박막이 대기 중에 놓이게 되면 박막의 빈 공간 부분에 대기 중의 수분이 모세관 현상에 의하여 침투하게 된다. 이로 인하여 빈 공간의 굴절률이 대기의 수분의 굴절률로 바뀌어짐에 따라 박막의 굴절률이 증가하게 되고 따라서 박막의 두께가 증가하는 현상이 나타난다. 이러한 상대적 이동량을 측정하기 위하여 그림 2-12와 같은 장치를 구성하였다. 평행한 백색광을 진공 챔버 내의 박막에 수직으로 입사시키고, 박막을 투과한 빛을 광섬유로 단색화 장치(monochromator, Jovin Yvon, HR-320)에 들어가도록 하였으며 투과한 빛의 스펙트럼은 CCD

검출기를 이용한 광다중분석기(optical multi-channel analyzer, Princeton Instruments, SMC-100)로 측정하였다. 진공 중에서 박막의 스펙트럼과 챔버에 공기를 주입한 후 박막의 스펙트럼을 비교 분석하였다.

표 2-1에 이온빔의 전류밀도가 변함에 따라 박막의 조밀도가 변하는 관계를 진공과 대기 간의 투과 파장 이동량을 측정된 뒤, 계산한 결과를 요약하였다. 이온빔 보조 증착을 하지 않은 박막의 경우 진공에서 677 nm에서 나타나던 피크가 박막이 대기에 노출되자 703 nm로 이동하였다. 이를 앞에서 구한 조밀도에 관한 식에 대입하여 계산하면 조밀도가 0.688이었다. 반면 이온빔의 전류밀도가 $80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 인 박막은 조밀도가 0.8014로 증가하였고, $430 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 이온빔으로 보조 증착한 박막은 조밀도가 0.9065 이었으며, 이온빔의 전류밀도가 $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상이면 박막의 투과 파장이 진공과 대기 사이에서 전혀 움직이지 않았다. 이온빔의 전류가 증가함에 따라 진공과 대기 간의 상대적인 피크 파장 이동량($\Delta\lambda$)이 감소한 것은 이온빔에 의하여 조밀도가 증가하였기 때문이다. 이는 박막의 빈 공간 부분이 이온빔의 충격에 의하여 상당량 감소한 것이며 이온빔 보조 증착에 의하여 TiO_2 박막이 덩어리와 같은 정도로 조밀하여졌음을 확인할 수 있다. 그림에서 진공과 대기 간의 투과율이 조금씩 다르게 나타나는 이유는 측정장치의 광원이 안정되지 못하여 생기는 오차이고 본 측정에서는 매 측정시 마다 광원에서 직접 검출기로 들어오는 빛의 세기를 측정하여 이를 참고치로 활용하였다.

5. 경도 시험(hardness test)

박막의 경도를 측정하기 위하여 그림 2-23과 같은 한국 공업 규격 경도 측정기를 이용하여 하중을 증가시키면서 각각의 박막을 시험하였다. 손잡이를 돌리면 구동축과 체인으로 연결되어 있는 강침 부분과 시편을 올려놓는 이동대가 같이 움직이게 되어 있다. 강침은 텅스텐 강침으로 재질은 KS D 3753(합금 공구 강재)규정에 의한 S2 종이며, 지름 $3 \pm 0.05 \text{ mm}$, 길이 $23 \pm 1.0 \text{ mm}$, 선단 각도 $60 \pm 5^\circ$ 이다.

경도 시험기의 강침은 지름이 약 1 cm인 원을 그리며 나선형으로 박막 위를 약 5 cm 진행한다. 시험한 박막을 백열등을 분산시켜 나온 빛을 박막에 조사하여 CCD 카메라로 경도 강침 자국을 촬영하여 frame grabber를 통해 PC에 저장하였으며, 화면을 사진 촬영하였다.

그림 2-24는 하중 150 g 을 올려놓고 경도 실험을 한 결과이다. 보통 박막은 강침 자국이 기판 바닥까지 선명하게 생겼으나, 이온빔 보조 증착 박막은 강침 자국이 연속적이 아니라 부분적인 자국을 나타냈으며, 그 깊이도 보통 박막 만큼 깊지 않았다. 이로부터 이온빔 보조 증착 박막은 보통 박막에 비하여 경도가 증가하였음을 확인하였다.

6. 염수분무 시험

제작된 박막이 외부환경에 어느정도 강한지를 측정하기 위하여 염수분무 시험을 하였다. 상대습도 95~ 100 %의 조건에서 48시간 염수분무 시험을 시행한 결과 보통 박막과 이온빔 보조 증착 박막 모두 육안으로 확인할 수 있는 변화가 나타나지 않았다. 이는 보통 TiO_2 박막이 진공도가 10^{-5} Torr 영역에서 제작된 대부분의 보통 박막이 염수분무 시험에 통과하는 경우와 비교하면 당연한 결과이며, 이온빔 보조 증착 박막과 보통 박막의 차이를 발견하지 못하였다.

III. 결 론

지난 1년간의 연구결과 end Hall 이온총에 의한 이온빔 보조증착으로 TiO₂ 박막의 여러가지 특성이 개선되는 효과를 보였으며, 그 결과 이온빔 보조증착이 금속산화물 박막(metal oxide film)을 이용한 고품질의 간섭필터를 제작하는 기반기술이 될 수 있음을 확인하였다.

아래에 본 연구개발의 결론을 요약하였다.

1. TiO₂ 단층 박막을 이온빔 보조 증착법으로 제작하여 특성을 조사한 결과, 이온빔에 의하여 박막의 광학적 특성인 굴절률이 증가하고, 미세구조가 조밀해졌음을 알 수 있었다.
2. 이온빔 보조 증착 TiO₂ 단층 박막의 경도시험 및 염수분무 실험 결과 제작된 박막의 기계적 특성이 향상된 고품위 박막이 제작되었음을 확인하였다.
3. 이온빔 보조 증착으로 가시광선 영역에서 협대역 투과 필터를 제작하여 특성을 조사한 결과 광학적, 기계적 특성이 향상된 고품위 박막이 제작 되었음을 확인하였다.

Beam Current ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	λ_{air} (nm)	$\Delta \lambda$ (nm)	refractive index	packing density
0	703	26	2.029	0.6880
80	700	22	2.106	0.8014
220	650	13	2.210	0.8674
430	642	9	2.223	0.9065
550	645	0	2.341	1
660	625	0	2.287	1

표 2-1. 이온빔 전류밀도에 따른 조밀도

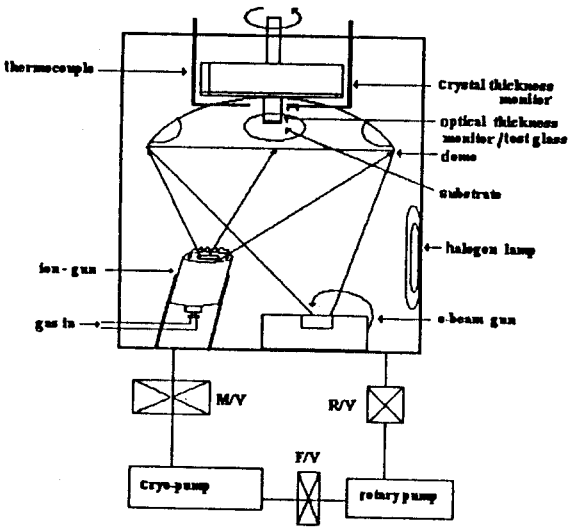


그림 2-1 이온빔 보조 증착 장비

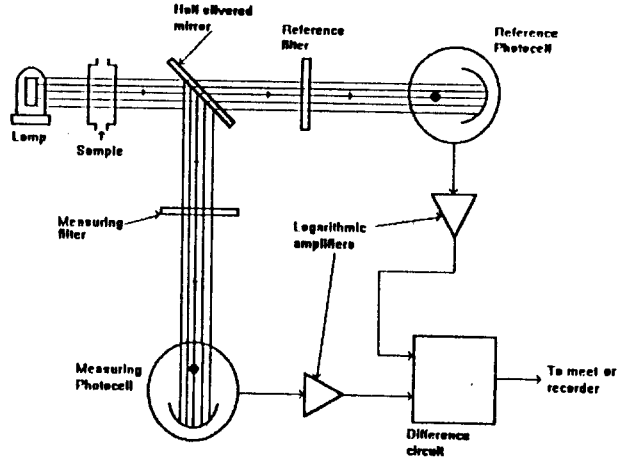


그림 2-2 분광광도계 구성도

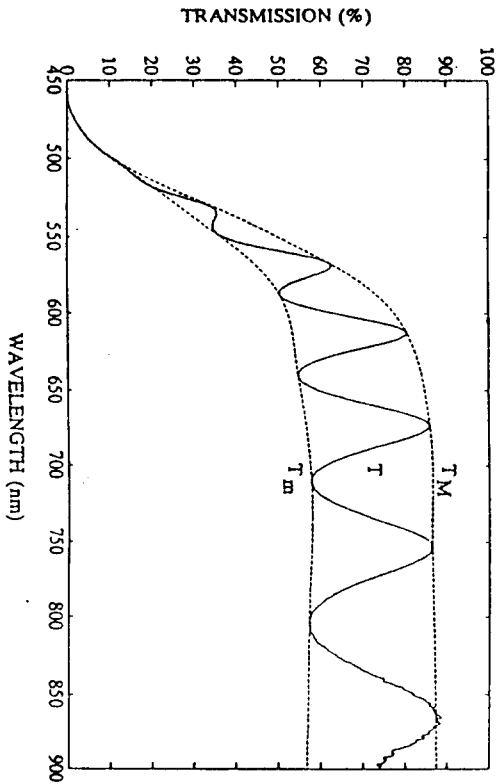


그림 2-3 포락선 그래프

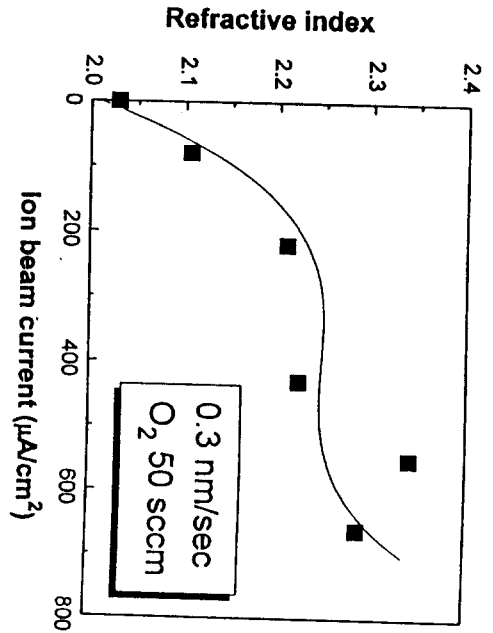


그림 2-6 이온빔 전류밀도의 변화에 따른 박막의 굴절률 변화 (0.3nm/s 50sccm)

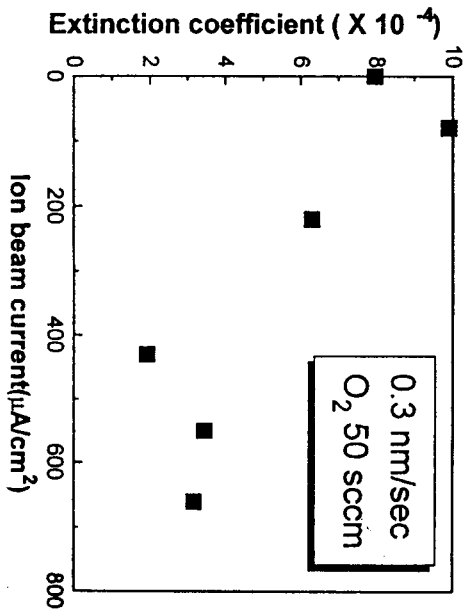


그림 2-7. 이온빔 전류밀도의 변화에 따른 박막의 소멸계수 변화 (0.3nm/s 50sccm)

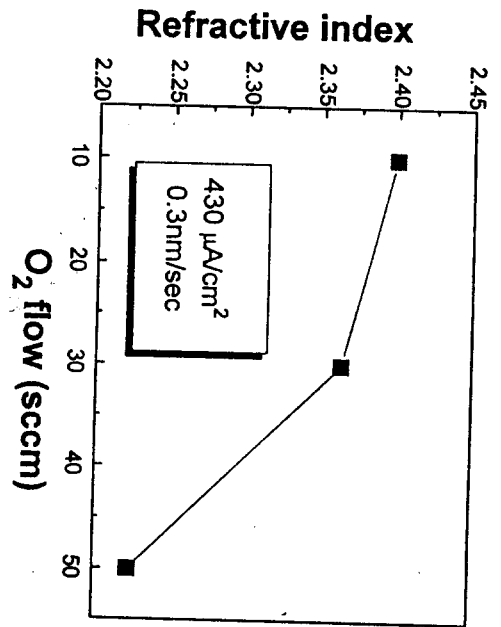


그림 2-8. 산소 주입량 변화에 따른 박막의 굴절률 변화 (0.3nm/s, 430 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

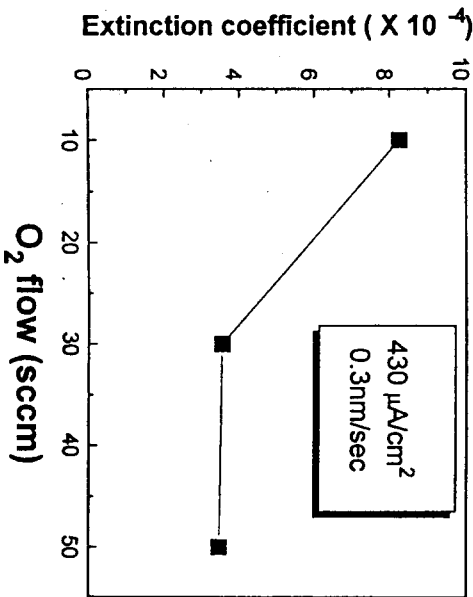


그림 2-9. 산소 주입량 변화에 따른 박막의 소멸계수 변화 (0.3nm/s, 430 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

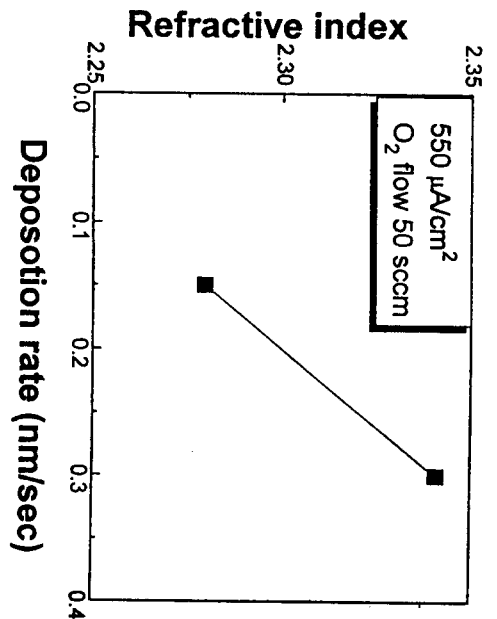


그림 2-10. 증착속도의 변화에 따른 박막의 굴절률 변화 (50sccm, 550 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

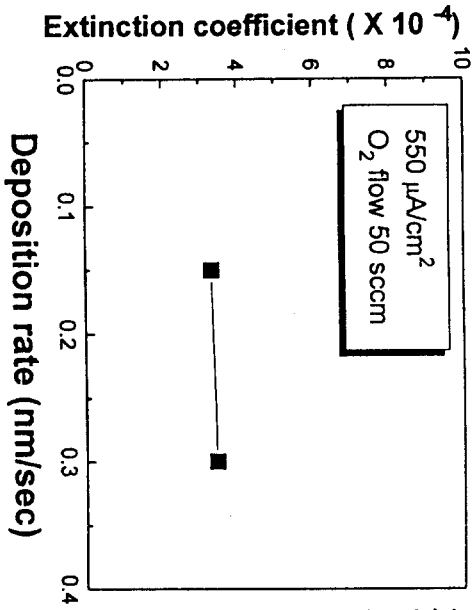


그림 2-11. 증착속도의 변화에 따른 박막의 소멸계수 변화(50sccm, 550 μ A/cm²)

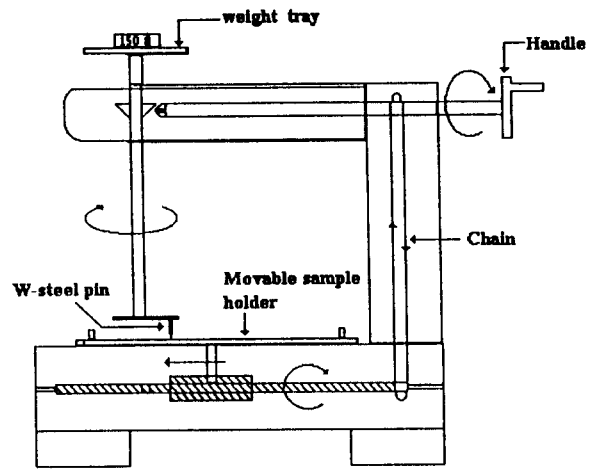
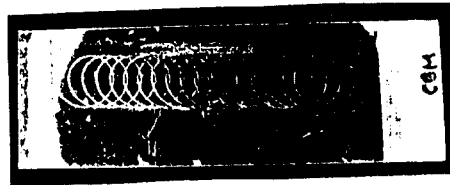
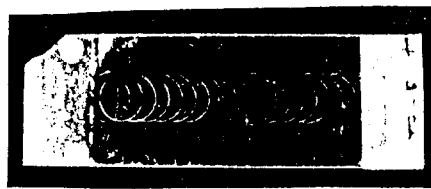


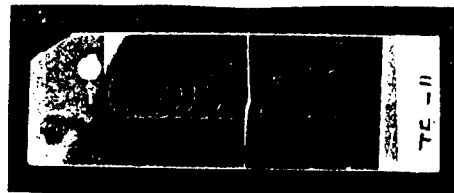
그림 2-23. 경도시험 장치 개요도.



(a)



(b)



(c)

그림 2-24. 경도시험결과 사진

(a) conventional (b) IBAD 430 μ A/cm² (c) IBAD 550 μ A/cm²