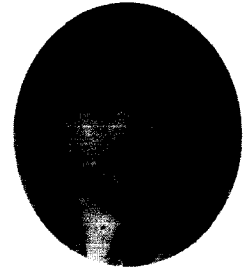


광학박막의 최근 설계, 제작 기술 및 응용



황보 창 권

인하대학교 물리학과

1. 여는 말

광학 박막(optical thin films)은 광학 부품의 광학적 특성(파장에 따른 빛의 반사율, 투과율, 흡수율, 편광, 위상 등)을 주어진 목적에 맞게 변화시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 광학 박막이 빛의 간섭 효과를 이용한 박막이므로, 광학박막의 두께는 사용하는 빛의 파장 정도 혹은 파장보다 작은 얇은 막이다. 예를 들면, 반사율을 줄이기 위해 카메라와 안경 렌즈에 이용되는 무반사 코팅, 레이저 공명기의 고반사 거울, 장(단)파장 영역은 투과시키고 단(장)파장 영역은 반사시키는 장(단)파장 투과 필터, 특정 파장만 투과시키는 간섭 필터, 금속 박막의 보호 코팅 및 반사율 증가 코팅, 편광 된 빛을 편광 방향에 따라 분리시키는 편광 분리기 등이 전통적 광학소자로 사용되고 있다.

최근 광학, 레이저 및 광자기술이 빠르게 발전함에 따라 중요 광학 부품으로 사용되는 광학 박막의 규격도 높아지고 있으며 이에 따른 광학 박막의 과학적 설계와 새로운 증착 기술이 연구 개발되고 있다. 고부가가치의 광학 박막으로는 빛의 손실이 10 ppm 이하인 고반사율 레이저 자이로 거울, 중력과 측정 간섭계용 고반사 거울, 단원자 레이저용 고반사율 거울, 펄스 레이저 공진기 거울, 수십 GHz 초고속통신에 사용되는 다중파장분할기, 선풍이 1 nm 이하인 간섭필터가 여러 개 포함된 다중 간섭필터, 디스플레이용 무반사 무정전 코팅, 전압에 의해 투과율을 변화시키는 electrochromic 코팅, 얇은 플라스틱 필름 위의 광학코팅, 온도의 변화가 매우 심한 인공위성 카메라에서 사용되는 특수 적외선 필터, 고출력 레이저의 개발로 레이저 상해 문턱이 높은 광학 박막, 천체 망원경의 대물경과 같이 구경이 매우 큰 거울의 반사 코팅, 화학적 환경에 강하고 내구성이 높은 자외선 레이저용 거울 코팅, 약 X-선을 반사시킬 수 있는 금속 다층 박막 등 여러 종류가 있다.

대부분 광학박막이 거친 외부 환경에서 장시간 사용해야 하

기 때문에 덩어리와 같은 광학적, 기계적 특성을 갖는 광학박막의 제작 방법이 필요하며, 특성 조사 방법에 관한 기초 및 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 고품질 광학박막의 광학적 성능 및 특성에 관한 규격은 기존의 전자빔 혹은 열저항을 이용한 진공 증착 방법으로는 도저히 제작할 수 없는 단계에까지 이르고 있다. 새로운 광학박막의 설계 및 증착 방법이 선진국에서는 첨단 기술로 활발히 연구 개발되고 있으며, 첨단 증착 장비 및 설비를 비롯하여 생산된 광학박막이 고가로 판매되고 있다. 기술 경쟁이 치열해짐에 따라 특수 광학 박막 증착 방법은 학술대회나 논문을 통하여 발표되지 않거나 개발이 완료된 이후 발표되기도 한다. 본 논문에서는 변화하는 광학 박막의 설계 및 제작 방법에 관한 최근의 동향을 소개하고자 한다.

2. 광학박막의 설계

2.1 균일 굴절률 광학 박막

일반적으로 광학박막 설계는 주어진 반사율을 얻기 위하여 이미 알고 있는 설계 혹은 1/4파장과 1/2파장 광학두께로 이루어진 초기 설계로부터 시작한다^[1]. 그림 1(a)과 같은 균일(homogeneous)한 굴절률 n , 두께 d 인 광학 박막은 수직입사의 경우

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \frac{\sin \delta}{n} \\ in \sin \delta & n \end{bmatrix} \quad (1)$$

과 같은 2X2 행렬로 나타낼 수 있으며, $\delta = (2\pi nd/\lambda)$ 이다. 총 m 층으로 이루어진 초기 설계에서 j 번째 층의 굴절률과 두께가 n_j, d_j ($j=1, \dots, m$)일 때 각각의 행렬을 구하고 이들을 기판의 어드미턴스 벡터에 차례대로 곱하여 입사매질 계면에서의 어드

미터스 Y 를 구한다. 이 때 박막의 반사율 R 은

$$R = \left| \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right|^2 \quad (2)$$

로 표현되며, n_0 는 입사매질의 굴절률이다. 각 층의 두께와 파장 구간을 각각 $X=[d_1, d_2, \dots, d_m]$, $\lambda=[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p]$ 의 벡터로 표현하자. 초기 설계로 계산한 반사율 $R(X, \lambda)$ 은 설계하고자 하는 목표(target) 함수 $R(X, \lambda)$ 와 차이가 날 수가 있다. 이 경우 목표를 달성하기 위하여 초기 설계를 최적화 하기 위하여 $R(X, \lambda)$ 와 $R(X, \lambda)$ 과의 차이를 나타내는 평가(merit) 함수를 사용한다. 많이 사용되는 평가 함수는

$$F(X) = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{q=1}^p \left[\frac{R_i(X, \lambda_q) - R(X, \lambda_q)}{\Delta R_q} \right]^2} \quad (3)$$

와 같이 표현되며, ΔR_q 는 허용 오차이다. 감쇄 최소 자승법 (Levenberg-Marquardt법), gradient 방법 등 여러 종류의 최적화 방법은 평가 함수가 최소이도록 각 층의 두께를 변화시킨다. 평가 함수 값이 최소가 되어 최적화가 끝나더라도 이 최소값이 국지적일 수 있다는 단점이 있다. 광학 박막의 최적화는 초기 설계가 좋으면 최적화 결과도 좋다. 최근 새로운 규격이 요구되는 설계가 증가함에 따라 좋은 초기 설계가 존재하지 않는 경우도 많다.

2.2 불균일 굴절률 광학박막

그림 1(b)와 같이 박막의 두께가 증가함에 따라 굴절률이 연속적으로 변화하는 불균일(inhomogeneous) 광학박막에서는 새로운 광학적 특성이 나타나고 있다. 불균일 박막은 굴절률이 연속적으로 변하여 전체 박막이 한 층이고 계면이 없으므로 불연속 굴절률 계면에서 나타나는, 계면 거칠기, 물질의 확산, 계면에서의 결합, 빛의 손실 및 산란, 계면에서의 강한 전기장 등이 없을 것으로 보인다. 또한 고굴절률과 저굴절률의 두 물질을 반복하여 설계하는 불연속층 설계 방법에 비해, 설계 시간이 빠르며, 두께, 층, 물질 등에 대한 제한이 없어 설계 방법의 다양성을 증가시키고 설계 범위를 넓혀주고 있다. 불균일 광학 박막으로는 고반사율 거울, 무반사 코팅, 대역 투과필터, 무편광 광속분리기 등의 기존의 불연속층 설계 방법으로 할 수 있는 코팅 뿐만 아니라 반사영역이 좁고 고차 반사가 없는 rugate 필터 등을 설계할 수 있다.

주어진 불균일 박막의 반사율 계산은 연속으로 변화하는 굴절률 박막을 단순히 여러 개의 불연속 굴절률 박막으로 나누는

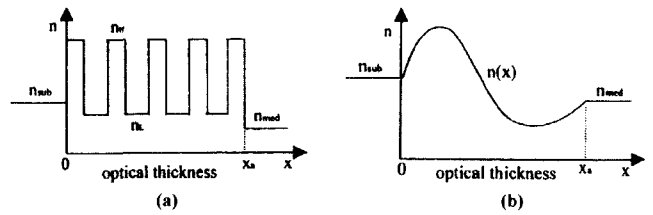


그림 1. (a) 균일 박막과, (b) 불균일 박막.

것으로부터 시작할 수 있다. 나누는 층수가 충분히 많아지면 2X2 행렬을 이용하여 계산한 반사율이 층수를 계속 증가시키더라도 더 이상 변하지 않으면 연속 굴절률에 의한 반사율과 같아진다. 층수가 많더라도 개인 전산기의 속도가 빠르므로 반사율 계산을 쉽게 할 수 있다.

이와 반대로 주어진 파장 구간에서 반사율 혹은 투과율을 알고 있을 때 굴절률 분포를 알고 싶은 것이 대부분의 광학박막 사용자들이 원하는 바이다. 초기설계로부터 출발하여 최적화 과정을 거쳐 최종설계를 얻는 최적화 방법과는 달리 초기설계에 관한 정보가 전혀 없이 임의의 단층 혹은 여러 층으로부터 출발하여 굴절률, 두께 및 층수를 변경시키며 최종설계를 얻으므로 이를 수치합성이라 부른다. 평가 함수 값이 국지적 최소가 아니고 포괄적 최소 혹은 그에 가까운 값을 얻을 수 있는 수치합성 방법 중 Fourier 변환법, flip-flop법, needle 최적화 방법에 관하여 설명하겠다.

2.3 Fourier 변환법

Fourier 변환을 이용하면 주어진 반사율 혹은 투과율(목표 스펙트럼)로부터 주어진 파장 영역에서 직접 불균일 박막의 연속 굴절률 분포를 계산할 수 있다^[2,3]. 임의의 형태로 주어진 목표 스펙트럼에 맞는 연속 굴절률 분포는 아래와 같은 Fourier 변환을 이용하여 계산할 수 있으며, rugate 필터, AR 코팅 등 모든 광학박막 설계를 할 수 있다.

$$n(x) = n_0 \exp \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin[kx - \Phi(k)] dk \right] \quad (4)$$

여기서 $Q(k)$ 는 반사율 혹은 투과율에 의해서 결정된 함수이며 $\Phi(k)$ 는 위상이다. Q 함수는

$$Q = \sqrt{R}$$

$$Q = \sqrt{\frac{R}{T}}$$

$$Q_1(k) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{T(k)} - T(k) \right]}$$

$$Q_2(k) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{R(k)}}{1 - \sqrt{R(k)}} \quad (5)$$

등과 같이 여러 종류가 있으므로 목표 스펙트럼을 가장 잘 만족시키는 것을 선택할 수 있으며, ϕ 는 임의의 값을 가질 수 있어 조절이 가능하다.

주어진 파장 영역에서 반사율 혹은 투과율이 목표 함수로 주어질 때 Fourier 변환법을 이용한 불균일 굴절률 박막의 설계는 아래와 같은 방법을 이용한다.

(가) 목표 함수로부터 식 (5)의 중의 하나를 이용하여 Q 함수를 계산한다.

(나) 식 (4)의 Fourier 변환(실제로는 적분을 수행한다)을 이용하여 굴절률 함수 $n(x)$ 를 계산한다.

(다) 굴절률이 1.0 근처이므로 증착 가능한 물질로 조정한다.

(라) 불균일 굴절률 박막을 많은 층수의 균일 굴절률 박막으로 나누고, 2X2 행렬을 이용하여 반사율과 투과율을 계산한다. 층 수는 더 이상 나누어도 반사율에 변화가 없을 때까지 증가시킨다.

(마) 평가 함수를 계산한다. 평가함수가 최소값을 만족하면 멈춘다. 최소값이 아니면 Q 함수를 $Q_{new} = Q_{old} + \Delta Q$ 로 보정하고 (가)로 돌아가 반복 계산을 한다.

목표 함수가 미국 국회 의사당 모양(그림 2(a))일 때 푸리에 변환법을 이용하여 설계한 불균일 굴절률 분포가 그림 2(b)이다. 불균일 굴절률 박막을 제작하기에 어려울 경우 최적화 과정을 통하여 불연속 굴절률을 여러 개 사용하거나(그림 2(c)), 고굴절률과 저굴절률의 두 물질로 설계로 근사할 수 있다(그림 2(d)). Fourier 방법은 근사식을 이용하므로 반사율이 1에 가까울 때 정확도가 떨어진다.

2.4 Flip-flop 방법

Southwell에 의해 개발된 flip-flop 방법은 두께 T가 매우 얇으며 굴절률 N인 박막을 굴절률을 알고 있는 두 개의 얇은 박막으로 대체할 수 있다는 근사식에 기본 원리를 두고 있다(혹은 두께가 매우 얇고 굴절률이 다른 두 박막은 한 개의 등가박막으로 대체할 수 있다)^[4]. 두 박막의 굴절률이 n_1 과 n_2 일 때 각 박막의 두께 t_1, t_2 는

$$t_1 = \frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} T$$

$$t_2 = \frac{n_1^2 - N^2}{n_1^2 - n_2^2} T \quad (6)$$

과 같이 근사할 수 있다.

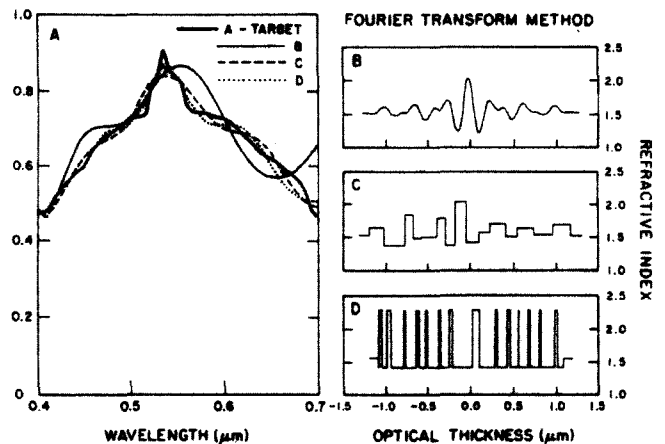


그림 2. (a) 미국 국회 의사당의 모양의 반사율을 Fourier 변환법으로 설계한 굴절률 분포. (b) 연속 굴절률 (c) 여러 개의 불연속 물질을 사용한 굴절률 (d) 두 물질을 사용한 굴절률

주어진 파장 영역에서 반사율 혹은 투과율이 목표 함수로 주어질 때 flip-flop 방법은 다음과 같이 사용한다.

(가) 총 물리적 두께를 결정하고 이를 많은 수의 얇은 두께 층으로 나눈다.

(나) 각 층에 고굴절률 혹은 저굴절률을 지정한다. 모든 층을 고굴절률 혹은 저굴절률로 선택하여도 가능하다.

(다) 전 파장 영역에 걸쳐 평가 함수를 계산한다.

(라) 각층의 굴절률을 한 번에 하나씩 차례로 바꾼다. 고굴절률은 저굴절률로 바꾸고 저굴절률은 고굴절률로 바꾼다. 바뀌었을 때 평가 함수를 다시 계산한다. 평가 함수가 바뀌기 전보다 작아지면 바꾼 굴절률을 사용하고, 커지면 바꾸기 전의 것을 다시 사용한다. 이와 같은 과정을 모든 층에 대하여 반복한다. 차례는 입사매질부터 기판 방향, 기판부터 입사매질방향, 중간부터 양 쪽으로 진행시킬 수 있다.

(마) 처음부터 끝까지 한번 진행한 후 평가 함수가 개선되면 다시 (라)로 돌아가 다시 진행시킨다. 평가 함수값이 개선되지 않으면 여기서 멈춘다.

그림 3은 이와 같은 방법으로 1층 고굴절률 박막을 100개로 나누어 시작하여 4번 반복 후 얻은 무반사 코팅용 디지털 박막 설계이다.

2.5 바늘 최적화 방법

Tikhonravov에 의해 개발된 바늘(needle) 최적화 방법은 최적 제어 이론을 광학박막 설계에 적용한 것으로 가장 강력한 광학박막 합성 설계법 중의 하나이다^[5]. 초기설계가 중요하지 않아 초기에 한 층으로부터 합성을 시작할 수 있다. 또한 주어진 목표에 도달할 수 있을 것으로 예상되는 알고 있는 초기설

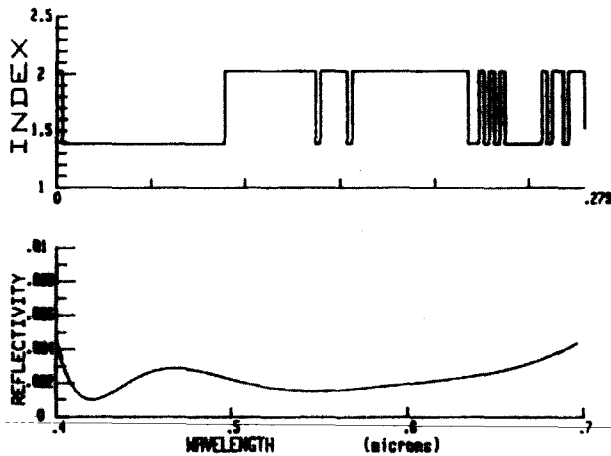


그림 3. 1층 고굴절률 박막을 100층으로 나누어 flip-flop을 이용하여 4번 반복 후 얻은 무반사 코팅 디지털 박막 설계.

계에도 적용할 수 있다. 빛이 수직으로 입사 하지 않는 경우 뿐만 아니라, 모든 편광 상태, 유전체 박막, 금속 박막에 다 적용할 수 있다.

일반적으로 최적화가 다 되었으나 목표에 도달하지 못했을 경우, 그 위에 층수를 증가시키면 변수들의 수가 증가하므로 평가 함수의 값을 감소시킬 수 있다. 물론 층두께가 증가하는 것을 감수해야 한다. 이와 유사하게 바늘 최적화법은 두께가 매우 얇은 바늘 층들을 박막계 내부의 최적 위치에 삽입하여 변수를 증가시켜 평가 함수의 값을 최소화시키는 방법이다. 두 물질만을 이용하여도 포괄적 최소 혹은 그에 가까운 평가 함수 값을 얻을 수 있으며, 합성과 최적화 속도가 빠르고 정확도가 높다.

주어진 파장 영역에서 반사율, 투과율, 위상, 편광 상태 등이 주어질 때 바늘 최적화 방법은 다음과 같이 사용한다.

(가) 총 물리두께를 결정한다. 총두께가 두꺼울 수록 층 수가 많아지고 평가 함수값이 작아진다.

(나) 두꺼운 단층 고굴절률 박막 혹은 이미 알고 있는 초기설계로부터 출발한다.

(다) 평가 함수를 계산한다.

(라) 두께가 매우 얇은 바늘층을 박막계 내부에 삽입한다. 바늘층의 두께가 매우 얇아 스펙트럼에는 거의 영향을 주지 않는다. 바늘층의 위치는 평가 함수를 감소시킬 수 있는 곳이어야 하며 바늘층의 굴절률은 대상 층과 달라야 한다. 바늘층을 넣어야 할 최적 위치는 박막내 위치에 대한 평가 함수의 변화가 0이 되는 곳을 계산하여 구하거나 전산기에서 수치 해석적으로 찾을 수 있다. 고굴절률 박막에는 저굴절률 바늘층을 넣고, 저굴절률 박막에는 고굴절률 바늘층을 넣는다.

(마) 한 번에 바늘층을 한 개씩 넣을 수도 있고 여러 개를 한

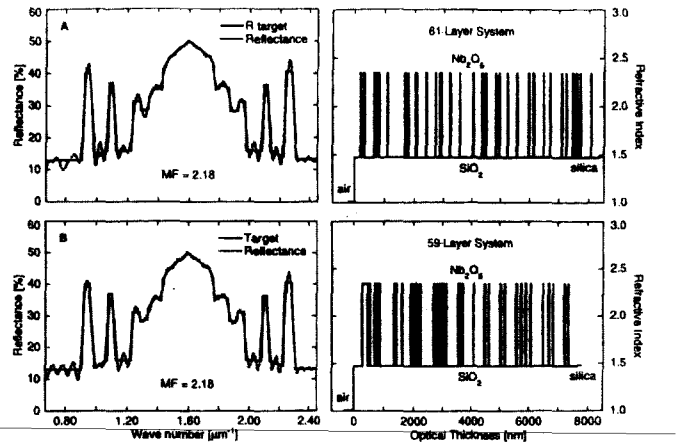


그림 4. 바늘 최적화법을 이용하여 Taj Mahal의 모양과 같은 스펙트럼을 설계한 굴절률 분포.

꺼번에 넣을 수도 있다. 한 개씩 넣으면 시간이 더 오래 걸리나 평가 함수 값은 더 작은 값을 얻을 수 있다.

(바) 기존의 최적화 방법을 사용하여 바늘층의 두께를 변화시키며 최적화시킨다. 물론 바늘층이 아닌 다른 층들의 두께도 함께 변화한다.

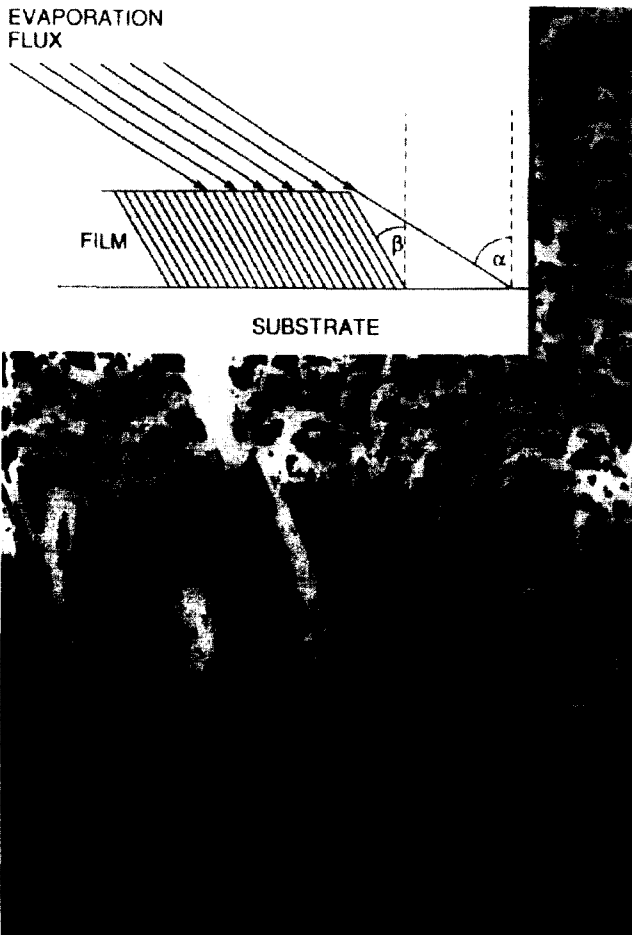
(사) (라)로 돌아가 위의 과정을 반복한다. 평가 함수값이 최소가 될 때까지 반복한다.

그림 4는 바늘 최적화법을 이용하여 Taj Mahal의 모양과 같은 반사율을 설계한 것으로 목표와 설계가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 바늘 최적화 방법에서는 바늘같이 얇은 두께로부터 출발하므로 두께가 $\lambda/16$ 보다 얇은 박막이 설계될 수 있다. 이 정도의 두께는 실제 제작 상 어려움이 있으므로 최적화된 최종 설계 스펙트럼이 목표에서 크게 멀어지지 않으면 얇은 박막을 버린다.

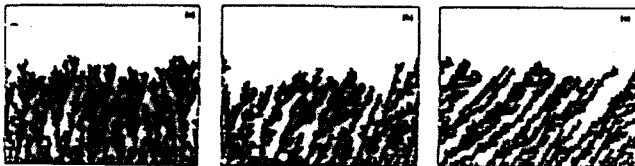
3. 광학 박막의 특성 및 구조

3.1 광학박막의 성장 및 기둥 구조

일반적으로 광학 박막은 진공 챔버에서 증착하고자 하는 물질을 열저항 혹은 전자빔으로 녹여, 증발된 입자가 진공 중을 날아가 기판에서 비평형 상태로 응집하여 자란다. 열저항 혹은 전자빔에 의하여 기판에 도착하는 증착 입자들의 에너지는 약 0.1 eV 정도로 낮으며, 기판의 온도는 이보다 더욱 낮아 증착 입자는 기판 위에서 자유롭게 이동을 하지 못한다. 도착한 증착 입자들은 기판 위에 국지적 섬을 만들며, 후에 도착하는 입자들은 이 위에 계속 쌓이게 되어, 박막 기둥(column)이 기판 바닥부터 박막의 두께만큼 자라게 된다. 기둥과 기둥 사이의 빈공간(void)은 기둥에 의해 가리워지므로, 후에 날아 오는 증



(a)

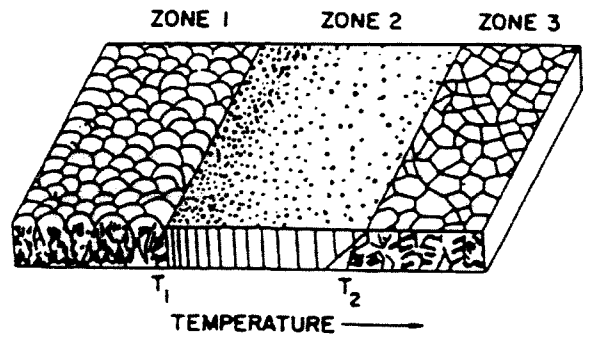


(b)

그림 5. (a) 투과전자현미경으로 측정된 Al 박막의 단면과 (b) 전산모의에 의한 박막의 성장(수직입사, 40°, 60°).

착 입자들에 의해 빈공간이 채워질 확률은 작다. 이러한 광학 박막의 미세 기둥 구조는 그림 5(a)와 같이 투과전자 현미경으로 상세히 측정하고 있다.

그림 5(b)는 전산모의로 박막의 성장을 계산한 것으로, 증착 입자가 기판에 대해 수직 입사, 40°와 60° 입사할 때 기둥 모양의 미세 구조와 그 성장을 보여 주고 있다⁶⁾. 수직 입사시 증착 입자들은 기판으로부터 박막 기둥을 이루며 수직에 가깝게 자라나 기둥과 기둥 사이에 증착 물질이 채워지지 않고 있다. 기판에 대해 60°로 입사할 때의 기둥은 증착 입자의 방향과 같이 기울어지며, 후에 날아오는 입자는 기울어진 기둥에 가리워 지므로 빈공간이 기둥과 거의 평행하게 자라며, 수직입사



	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3
METALS	<0.3 T _m	0.3 - 0.45 T _m	>0.45 T _m
OXIDES	<0.26 T _m	0.26 - 0.45 T _m	>0.45 T _m
	T ₁ [K]	T ₂ [K]	T _m [K]
ZrO ₂	648	1273	2973
Al ₂ O ₃	623	1173	2323

그림 6. 지역구조 모델.

때보다 빈공간이 증가한다. 증착 입자의 입사각에 따른 기둥의 기울기는

$$\tan(\text{기둥기울기}) = 0.5 \tan(\text{입사각})$$

을 따르며 이를 탄젠트 법칙이라 부른다⁷⁾. 기둥의 직경은 표 1에서와 같이 약 10~50 nm이며 금속 박막의 기둥이 유전체 박막보다 크며, 증착 물질, 기판 온도, 박막의 두께 등에 따라 다르다.

그림 6과 같은 지역 구조 모델(structural zone model)에 따르면 박막의 구조는 기판 온도(T_s)에 따라 변한다. T_s가 물질 용융 온도(T_m)의 0.3 배보다 작은 제 I 지역에서는 기판에 도착한 증착 입자의 이동도가 매우 낮아, 박막이 원추형 기둥구조로 구성되어 있으며 기둥 사이에는 빈공간이 형성되어 조밀하지 못한 박막으로 성장하게 된다. 또한 기둥의 높이가 달라 표면이 거칠게 된다. 증착입자가 기판에 대해 경사져서 입사하거나 기판의 표면이 거친 경우에도 이러한 구조의 박막이 더 쉽게 형성된다.

광학 박막의 기판은 유리 혹은 플라스틱류이므로 기판온도가 낮으며 대부분 광학박막은 이 지역에 해당된다⁸⁾. 따라서 진공 증착에 의해 제작된 광학 박막의 미세 구조는 설계시 가정한 균일하고 등방인 박막과 다르며, 광학 박막의 광학적 및 기계적 성능은 대응되는 덩어리(bulk)보다 떨어진다. 기판 온도를 더 증가시킨 제 II 지역에서 기둥의 모양은 원추형에서 원통형으로 바뀌게 되어 조밀하고 표면이 고운 박막이 형성된다. T_s가 0.45 T_m보다 큰 제 III 지역에서는 높은 에너지에 의한 증착 입자의 확산이 활발하여 유사한 크기의 낱알이 생성되고 낱알경계(grain boundary)가 선명한 구조가 형성된다.

기둥미세구조는 광학 박막계에서 겪는 여러 가지 문제점들

을 잘 설명해 주고 있다. 간섭 필터의 최고 파장이 진공 중에서 보다 공기 중에서 혹은 습기가 증가할 수록 장파장으로 이동하는 것은 공기 중의 습기가 모세관 현상에 의해 기둥을 따라 들어가 빈공간을 채우므로 박막의 광학적 두께가 증가하기 때문에 나타나는 현상으로, 가장 시급히 해결해야 할 여러 문제 중의 하나이다.

3.2 조밀도

기둥 구조때문에 박막의 밀도는 덩어리보다 작다. 광학 박막계에서는 박막 내의 기둥의 양을 조밀도(packing density; p)로 나타내는데, 조밀도는 박막의 총부피(기둥+빈공간)에 대한 기둥 부피의 비이며, 즉

$$p = \frac{\text{기둥의 부피}}{\text{박막(기둥 + 빈공간)의 부피}}$$

로 정의된다. 광학 박막의 조밀도는 표 1에서와 같이 덩어리의 조밀도인 1.0 보다 작다. 금속 박막의 조밀도는 실온의 기판 온도에서 유전체 박막보다 크며, 유전체 박막의 조밀도는 기판 온도와 매우 밀접한 관계에 있다. MgF₂ 박막의 조밀도는 기판 온도가 T_s=30°C에서 T_s=300°C로 증가함에 따라 0.72부터 0.98까지 증가한다. SiO₂ 박막도 기판 온도를 T_s=300°C로 증가하면 조밀도가 0.98로 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3 광학박막의 특성

박막의 조밀도가 덩어리보다 작으므로, 유전체 박막의 굴절률은 대응되는 덩어리의 굴절률보다 작다. 유전체 박막의 굴절률(n)과 조밀도(p)와의 관계는 주인물질의 모델에 따라 다르나, 저굴절률 광학 박막에 대해 잘 맞는 가장 간단한 선형 모델은

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

이다^[3]. 여기서 n_b는 덩어리의 굴절률이고, n_v는 빈공간의 굴절

률이다. 진공 중에서는 빈공간의 굴절률이 1.0이나 공기 중에서는 공기 중의 습기에 의해 물로 차므로 굴절률이 1.33이 되어 박막의 유효 굴절률이 증가하게 된다. 간섭필터의 최고 투과율 파장이 공기 중에서 장시간 사용할 경우 장파장으로 이동하는 것은 바로 이러한 이유 때문이다. 이 간섭필터를 온도가 높은 곳에서 사용하면 최고 투과율 파장이 단파장으로 이동하는데 이는 빈공간에 들어 있던 수분이 증발되어 유효 굴절률이 다시 낮아지기 때문이다.

빈공간에 의해 둘러 싸인 기둥은 기계적 응력을 받게되며, 습기가 차면 이 응력은 접착력의 감소 혹은 박막의 파괴로 풀리게 된다^[9]. 또한 도착하는 증착 물질과 기판의 열팽창 계수의 차이와 온도차에 의해 생긴 열응력은 기판과의 접착력을 줄인다.

유전체 물질(특히 금속 산화 박막)은 증발하는 동안 열에 의해 원소가 금속과 산소로 분리되어 금속은 기판에 도착하고 산소의 일부는 도착하지 못하고 진공펌프에 의해 밖으로 나가게 된다. 따라서 형성된 박막의 원소 조성비는 증착 물질보다 작다. 원소 조성비를 높이기 위해 증착율을 줄이거나, 기판 온도를 높이거나, 산소 반응 가스를 주입하여 화학적 반응을 증가시키는 반응 진공 증착이 사용되고 있다. 저원소 조성비의 박막은 빛의 흡수, 특히 단파장에서 많은 흡수를 초래한다. 단층 박막의 경우는 큰 문제가 없으나, 다층 박막으로 제작된 고출력 레이저용 반사 거울의 경우 여러 층에 의한 빛의 흡수는 반사율을 줄일 뿐 아니라 레이저 상해 문턱을 낮추어 수명을 단축시키게 된다.

위와 같은 광학 박막의 특성 및 문제점들은 박막의 여러 제작 조건 - 진공도, 기판 온도, 증착율, 반응 가스 압력, 증착기 내부의 기하학적 모양, 증착 물질 등-에 따라 다르므로, 박막에 관한 미시적이며 정량적인 분석이 필요하며 이를 기본으로 한 새로운 제작 방법 및 특성 분석 기술이 요구된다.

4. 광학 박막 증착 기술

덩어리에 가까우며 내구성이 높고 외부 환경의 변화에 강한

표 1. 광학 박막의 기둥의 크기 및 조밀도^[3]

Film material	Ag	MgF ₂	ZnS	TiO ₂	SiO ₂	ZrO ₂
Thickness(nm)	52	115	70	68		
Column diameter(nm)	28-35	13-20	24-28	15-20		
(Normal incidence)	(T _s =30°C)	(T _s =30°C)	(T _s =30°C)	(T _s =350°C)		
Packing density	0.95	0.72	0.94		0.90	0.67
	(T _s =30°C)	(T _s =30°C)	(T _s =35°C)		(T _s =30°C)	(T _s =30°C)
		0.98			0.98	0.82
		(T _s =300°C)	(T _s =35°C)		(T _s =150°C)	(T _s =250°C)

고품질의 광학 박막을 제작하기 위해 여러 가지 이온빔 기술이 사용되고 있다. 광학 박막의 개발 혹은 제조에 널리 사용 중인 이온빔 기술로는 기존의 진공 증착 방법으로 성장하고 있는 박막에 불활성 이온빔의 에너지와 운동량을 전달해 주어 증착 입자의 이동을 증가시키는 이온보조 증착, 산소나 질소 같은 반응성 이온빔으로 박막의 화학적 반응을 촉진시키기는 반응 이온보조 증착, 플라즈마를 발생시켜 이온빔이 성장하고 있는 박막을 조밀하게 만드는 플라즈마 보조 증착, 높은 에너지의 이온빔으로 타겟을 때려 주어 튀어 나온 높은 에너지의 입자로 증착하는 이온빔 스퍼터링, 여러 종류의 스퍼터링(DC, RF, 마그네트론), 스퍼터링 후 이온보조 증착하는 혼합형, 스퍼터링에 의해 증착 중 이온보조 증착을 하는 이온보조 스퍼터링, 저전압 반응 이온 플레이팅 등 여러 종류가 사용 중에 있다.

이와 같이 조밀한 광학박막을 제작하기 위한 기술경쟁이 치열해짐에 따라 다양한 증착 방법이 연구 개발되었거나 개발 중에 있다. 기존의 증착법보다 발전되었으므로 제작된 광학박막은 고가로 판매되고 있으며, 개발된 증착기를 비롯하여 증착 방법까지 노우하우로 판매하는 고부가치의 연구 개발을 하고 있다.

4.1 이온 보조 증착(Ion-assisted deposition)

그림 7와 같은 이온보조 증착의 핵심은 박막의 형성기부터 이온빔으로 기둥 구조를 없애(빈공간을 증착 물질로 채움) 조밀도를 덩어리에 가깝게 증가시키며, 반응 이온빔으로는 조밀도 증가 및 화학 반응 촉진에 의한 원소 조성비의 증가로 흡수가 적은 박막을 제작하고자 하는 것이다.

이온 보조 증착에서는 Kaufman과 end-Hall 이온총이 많이 사용되고 있다. Kaufman 이온총의 에너지는 약 150~2000 eV로 넓게 변화시킬 수 있으나 사용하는 그리드의 간격 때문에 전류 밀도의 증가에 제약을 받는다. End-Hall 이온총은 65~170 eV로 이온빔 에너지가 낮으며 이온빔 전류를 크게 증가시킬 수 있다. 이온빔이 박막의 표면에 상해를 주거나 자라는 박막을 스퍼터링하여 증착율이 낮은 경우에는 end-Hall 이온총이 사용되고 있다. End-Hall 이온총은 이온을 가속 및 평행하게 만드는 그리드가 없어, 이온빔이 넓게 퍼지므로 기판의 면적이 크거나 양산에 적당하다.

이온보조 증착에서는 이온빔의 에너지와 전류 밀도를 각각 독립적으로 변화시킬 수 있으므로 기존의 진공 증착의 공정 변수에 박막의 미세 구조를 변화시킬 수 있는 이온빔 변수를 추가시켰다. 이온빔을 이용한 박막 증착 기술은 내구성이 높은 고품질의 광학 박막 제작뿐 아니라 각종 이온과 박막 표면 사

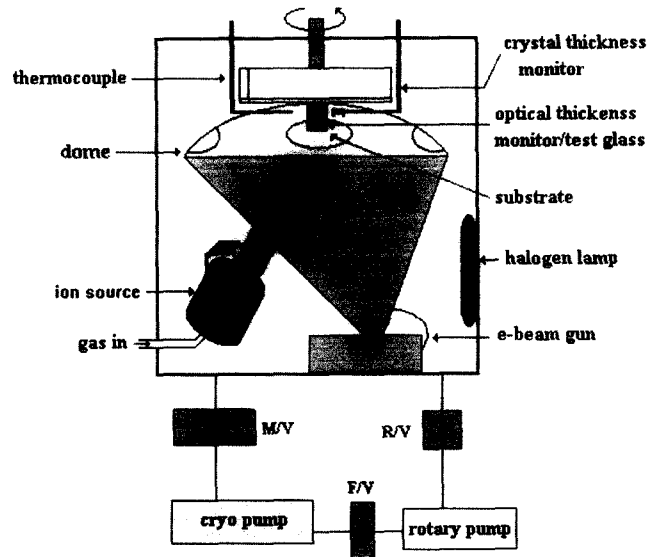


그림 7. 이온보조 증착의 구조.

이의 상호 작용, 이온을 이용한 새로운 박막 제조 기술의 연구 및 개발 등에 영향을 미치고 있다. 또한 이온총은 보조 증착 및 스퍼터링 이외에 에칭, 기판 청소, 유리 표면 연마, 이온 밀링 등에 응용할 수 있다.

이온보조 증착에 의하여 박막이 조밀해지는 과정은 이온에 의한 열스파이크 모델과 연쇄 충돌 모델로 설명할 수 있다. 열스파이크 모델은^[10] 국지적 이온 열처리론으로 국지적으로 이온빔 에너지가 열로 바뀌어 박막의 원자를 열처리하여 박막 응력이 감소한다는 것이다. 연쇄 충돌 모델은^[11] 증착 원자보다 큰 에너지의 이온빔이 기판에 이미 도착한 원자와 충돌하여 에너지와 운동량을 전달해 주므로, 증착 원자는 이동도가 증가되거나 앞으로 산란되어 빈공간을 채우거나, 다른 원자와 연쇄적으로 충돌하여 충돌된 원자가 빈공간을 채우는 전방 산란 이론이다.

이온보조 증착으로 진행된 여러 연구 중 가장 큰 성과를 거두고 있는 것은 유전체 박막이다^[12,13]. Ar 혹은 (Ar+O₂) 이온빔을 사용하는 금속 산화 박막의 경우 굴절률이 증가하고 진공-공기 분광 이동이 거의 없는 조밀한 미세 구조의 박막과 원소 조성비 증가로 흡수가 감소한 박막이 제작되었다. 또한 증착 전 이온빔으로 기판을 청소하므로 접착력을 증가시키며, 기둥 미세 구조의 감소로 표면 거칠기가 줄어들었다.

4.1.1 유전체 박막

4.1.1.1 금속 산화 박막

기계적 내구성이 높고 고굴절률이며 투과 영역이 약 0.4~3 μm인 TiO₂는 증착 방법, 증발 물질(TiO, TiO₂, Ti₂O₃), 반응 가스 압력, 기판 온도, 증착율 등에 따라 굴절률이 약 1.9부터

2.6까지 크게 변하며, 결정 구조도 변하여, 증착시 많은 주의가 필요한 물질이다(또한 많은 연구가 진행되는 주 원인이다). 실온의 기판 온도에서 Ar, 산소 혹은 (Ar+산소) 이온보조 증착을 한 TiO₂ 박막이 이온 보조 증착을 하지 않은 보통 박막보다 굴절률은 증가하고 소멸 계수는 감소하였다. 이는 300°C 기판 온도에서 제작된 보통 박막과 비슷하여, 이온빔 충격이 증착 물질의 이동도를 증가시키고 빈공간을 증착 물질로 채워 조밀도가 증가된 것이다^[14]. 실온의 기판 온도에서 이온 보조로 증착된 TiO₂ 박막은 비정질이다.

ZrO₂는 약 0.34~12 μm의 넓은 파장 영역에서 투과하는 내구성이 강한 고굴절률의 물질이다. 굴절률이 제작 조건에 따라 크게 변하며, 공기-박막 계면의 굴절률이 박막-기판 계면의 굴절률보다 작아 음의 불균일 굴절률 박막을 형성한다. 그림 8에서와 같이 이온 보조 증착을 하지 않은 보통 간섭 필터는 진공-공기 간 스펙트럼 이동 측정($\Delta\lambda/\lambda$)에서 약 3.8% 이동하나, 이온보조로 증착된 간섭 필터는 거의 이동하지 않아, 이온 보조 증착이 다층 박막의 조밀도를 증가시켰다^[15]. 이온빔 충격 조건에 따라 공기-박막 굴절률이 더 큰 양의 불균일 굴절률 박막을 형성하기도 하였다.

SiO₂는 약 0.2~9 μm에서 투과하며 다층 박막 필터의 저굴절률 박막, 금속 박막의 보호 박막 등으로 이용되고 있다. SiO₂ 박막은 증착 조건에 따라 굴절률이 550 nm에서 1.46부터 1.50의 변화가 있으며, 증착 방법과 무관한 것으로 알려져 있다. 산소 이온 보조 증착으로 Si과 O의 반응을 촉진시켜 굴절률이 다소 감소하고, 1060 nm에서 흡수가 줄어들었다^[14]. 이온 보조 증착으로 흡수가 줄어 들고 기계적 특성이 개선되었다. 증착 물질로는 Si, SiO, SiO₂가 연구되었으며, SiO₂를 증발시킬 경우 산소 분위기 속에서 Ar 이온빔으로 보조 증착하는 것이 흡수를 줄일 수 있는 방법이다.

약 2~23 μm의 넓은 적외선 영역에서 투과하며 내구성이 높으며 고굴절률(2 μm에서 약 4.0)인 Ge 박막은 Ar 이온 충격에 의해 고유 응력이 감소하고 기판 접착력이 보통 박막보다 증가하였다. 이온 보조 증착한 Ge 박막의 빈공간이 줄어들어 드는 것은 분광타원해석계에서도 관측하였으며^[16], 이온 보조 증착한 Ge과 ThF₄을 한 짝으로 Ge 기판에 무반사 코팅한 박막의 내구성과 레이저 상해 문턱이 증가하였다^[17].

온도 변화에 따른 스펙트럼의 이동은 장(단)파장 투과필터, 1550 nm 근처의 광통신에 사용되는 다중파장분할기(dense wavelength division multiplexer)와 같은 간섭필터의 경우 매우 중요하다. 이온보조 증착 (TiO₂/SiO₂), (Ta₂O₅/SiO₂) 협대역 간섭필터의 경우 최고 투과 파장의 온도 안정도가 +0.018~-0.005 nm/°C로 매우 작게 제작할 수 있었으며, 기판이 온도 안정에

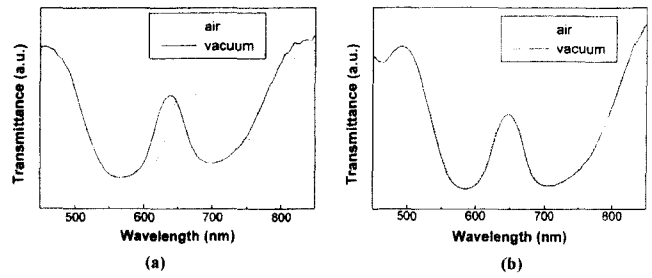


그림 8. (a) 보통 투과필터의 진공과 대기 중에서 투과파장 이동 ($\Delta\lambda/\lambda=3.8\%$), (b) 이온보조증착 투과필터의 진공과 대기 중에서 투과파장 이동($\Delta\lambda/\lambda=0.0\%$).

중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다^[18,19].

또한 End-Hall 이온총의 양극전압을 65~170 V에서 75~250 V로 증가시키고 양극전류의 최대 전류를 5A에서 13A로 크게 증가시켜, 조밀한 박막을 증착시키며 TiO₂와 SiO₂의 증착율을 높여 생산성을 높이기도 하였다. 이 경우 양극 전류를 13A까지 증가시키므로 양극이 녹는 것을 방지하기 위하여 양극을 냉각시켜야 한다^[20].

4.1.1.2 금속 불화 박막

MgF₂는 가시 광선 영역에서 저굴절률 물질로 무반사 코팅과 보호 박막으로 널리 이용된다. 밴드갭이 약 110 nm이어서 진공자외선 영역에서도 사용되고 있으며, 약 4 μm까지 투과한다. 상온의 기판 온도에서는 조밀도가 0.72로 낮고 습기에 약하여, 일반적으로 300°C의 기판 온도에서 증착되는데 이 때의 조밀도는 0.98로 매우 높으며 외부 환경에 강하다^[3]. 또한 인장 응력을 가져, 두께가 1 μm 이상되면 박막이 쉽게 깨진다. 상온의 기판 온도에서 굴절률은 1.34, 밀도는 2.70 g/cm³으로 가장 작으나, 300°C 기판 온도에서는 굴절률은 1.38, 밀도는 3.00 g/cm³으로 증가한다. 상온에서 이온보조 증착한 박막의 굴절률은 1.37로 약간 감소하나, 밀도는 3.13 g/cm³로 증가하였다. 300°C 기판 온도에서 이온보조 증착한 박막은 굴절률이 1.42로 가장 크며, 밀도는 3.15 g/cm³로 가장 조밀하다. 이온충격으로 기둥구조가 줄어들어 박막은 조밀해지나, 이온빔에 의해 선택적 스퍼터링(preferential sputtering)된 F를 산소가 대체하므로 자외선 영역에서 흡수가 증가한다. F의 부족을 보충하기 위해 freon을 이온 가스로 사용하였으나, 불순물인 탄소가 박막에서 발견되어 큰 성과를 못 얻고 있다. 한편 상온에서 플라스틱 기판에 Ar 이온으로 보조 증착한 MgF₂ 박막의 접착력은 증가하고 응력은 감소하였다^[21].

MgF₂는 가시 광선 영역에서 저굴절률 물질로 무반사 코팅과 보호 박막으로 널리 이용된다. 밴드갭이 약 110 nm이어서 진공자외선 영역에서도 사용되고 있으며, 약 4 μm까지 투과한다. 상온의 기판 온도에서는 조밀도가 0.72로 낮고 습기에 약

하여, 일반적으로 300°C의 기판 온도에서 증착되는데 이 때의 조밀도는 0.98로 매우 높으며 외부 환경에 강하다^[3]. 또한 인장 응력을 가져, 두께가 1 μm 이상되면 박막이 쉽게 깨진다. 상온의 기판 온도에서 굴절률은 1.34, 밀도는 2.70 g/cm³으로 가장 작으나, 300°C 기판 온도에서는 굴절률은 1.38, 밀도는 3.00 g/cm³으로 증가한다. 상온에서 이온 보조 증착한 박막의 굴절률은 1.37로 약간 감소하나, 밀도는 3.13 g/cm³로 증가하였다. 300°C 기판 온도에서 이온보조 증착한 박막은 굴절률이 1.42로 가장 크며, 밀도는 3.15 g/cm³로 가장 조밀하다. 이온충격으로 기둥구조가 줄어들어 박막은 조밀해지나, 이온빔에 의해 선택적 스퍼터링(preferential sputtering)된 F를 산소가 대체하므로 자외선 영역에서 흡수가 증가한다. F의 부족을 보충하기 위해 freon을 이온 가스로 사용하였으나, 불순물인 탄소가 박막에서 발견되어 큰 성과를 못 얻고 있다. 한편 상온에서 플라스틱 기판에 Ar 이온으로 보조 증착한 MgF₂ 박막의 접착력은 증가하고 응력은 감소하였다^[21].

End-Hall 이온총으로 Ar 이온보조 증착한 MgF₂ 박막은 흡수가 증가하나 Xe 이온빔으로 보조 증착한 MgF₂ 박막의 흡수는 300°C 기판온도에서 제작한 박막과 유사하게 흡수가 작았으며 기계적 특성도 비슷하였다. 이는 Xe 이온빔에 의한 F의 선택적 스퍼터링이 Ar 이온빔에 의한 것보다 작았기 때문으로 보인다^[22].

4.1.1.3 금속 박막

Au 박막을 유리 기판에는 산소 이온 보조 증착, 구리 기판에는 Ar 이온 보조 증착하여 접착력을 개선하였으며, Ag 박막의 경우도 유리 기판과 구리 기판에 산소와 Ar 이온 보조 증착으로 접착력이 증가되고 습기에 보통 박막보다 강한 것으로 보고되었다. Al 박막도 유리 기판에 Ar과 산소 이온 보조 증착으로 접착력이 증가하였다. 이온보조 증착에 의해 접착력이 개선되는 원인으로는 -첫째, 물질이 증착되기 전에 기판을 이온으로 세척하므로 기판의 불순물이 제거된다. 둘째, 이온으로 박막을 때려주므로 증착 물질이 기판에 기계적으로 잘 접촉될 뿐 아니라, 증착 물질이 기판 표면으로 확산된다. 세째, 반응 이온을 사용할 경우 박막과 기판 사이에 화학적으로 결합된 얇은 화학 박막이 형성될 수 있다- 등이 있다.

광학 박막의 기둥 미세 구조는 기계적 특성에도 영향을 미친다. 즉 박막의 고유 응력은 기둥 미세 구조가 자라는 동안 형성되며, 기판과 박막의 다른 열팽창 계수때문에 생기는 외부 응력이 박막의 응력을 더욱 증가시킨다. 박막에 틈이 생기거나, 박막이 벗겨지는 것은 이 응력이 풀리는 현상인 것이다. 따라서 이온으로 금속 박막을 때려줄 때 변화되는 박막의 응력에 관한 연구는 가장 많은 관심을 받고 있는 분야 중의 하나이다.

이온 충격으로 박막의 응력이 완화되거나, 인장 응력에서 압축 응력으로 반전되는 것이 많이 보고되고 있다^[23]. 박막의 기둥 미세 구조를 이온 충격에 의해 응력을 완화시켜 주는 방향으로 변화시키는 물리적 변수로는 이온 에너지, 이온수와 증착 원자 수의 비, 이온의 운동량, 기판 온도 등이 있으며, 조사된 박막과 실험에 따라 주원인이 다르게 나타나고 있어, 더 많은 연구가 요구된다.

이온 보조 증착은 금속 박막의 반사율을 감소시키는 것으로 보고되고 있다^[24]. 표면 플라즈몬 공명을 이용하여 Ag, Cu, Al 박막의 광학 상수 변화를 이온의 에너지 혹은 운동량을 변수로 조사한 보고에 의하면, 이온의 에너지 혹은 운동량을 증가시키면, 굴절률은 증가하고, 소멸 계수는 감소하였다. 이러한 변화는 금속 박막의 광학적 및 전기적 특성의 저하를 초래한다.

4.1.1.3 화합물 박막

Al과 Si은 질소 분자를 화학적으로 흡착하지 않기 때문에 일반 진공 증착기에서 질화 박막 제작은 쉽지 않으나, 이온총에서 질소 분자를 이온화하고 높은 에너지로 가속시켜, 증착된 금속과의 화학 반응을 높게 함으로써 화합 박막을 제작할 수 있다. 예를 들면, 고굴절률이고 내구성이 높아 반도체 박막과 자기 광학 박막의 보호막으로 많이 이용되는 AlN와 Si₃N₄ 박막, 원소 조성비의 조정으로 굴절률을 산화박막으로부터 질화 박막까지 변화시킬 수 있는 AlO_xN_y와 SiO_xN_y, Au와 유사한 색과 특성을 나타내는 TiN 박막 등이 반응 이온보조 증착에 의해 제작되고 있다.

특히 oxynitride 박막의 경우 원소조성비를 연속적으로 변화시키면 굴절률이 연속적으로 변화하는 불균일 굴절률 박막을 이용하여 rugate 필터를 제작할 수 있다^[50]. SiO_xN_y 박막의 굴절률은 가시광선 영역에서는 SiO₂(n=1.46)부터 Si₃N₄(n=2.0)까지, 적외선 영역에서는 Si까지 변화시킬 수 있다. Oxyfluoride 박막으로는 굴절률을 ZrF₄(n=1.6)부터 ZrO₂(n=2.1)까지 변화시킬 수 있는 ZrO_xF_y, 굴절률을 SiO₂(n=1.46) 보다 작게 변화시킬 수 있는 SiO_xF_y 박막들이 연구되었다^[25].

4.2 플라즈마 이온 보조 증착(Plasma Ion-Assisted Deposition)

이온총 대신에 플라즈마총을 사용하는 플라즈마 이온보조 증착은 플라즈마가 기판이 놓여 있는 지지대를 채울 수 있으므로 넓은 면적의 코팅에 적합하다. 그림 9와 같이 기존의 진공 증착 챔버 중앙에 플라즈마총을 설치한다. Leybold 에서 개발한 플라즈마총은 Advanced Plasma Source라 불리며 방전 챔버에서 발생한 플라즈마가 플라즈마총 바로 위로 공급되는 반응 가스를 이온화시킨다^[39]. 방전 챔버 주위의 강력한 솔레노

이드 자석은 방전 챔버 내에서 자기장 주위의 전자 회전운동이 축방향(기판 지지대 방향)으로 급격히 증가시켜, 플라즈마를 플라즈마총 밖으로 나오게 한다. 따라서 플라즈마와 반응가스 이온이 기판 지지대까지 채우게 된다. 기판 지지대의 전압이 플라즈마에 대해 -전압으로 바이어스 되어 있으므로 플라즈마 이온빔이 가속되어 증착되는 박막에 운동량을 전달해 주게 되고 이온빔 충격과 화학적 반응에 의해 조밀한 박막을 증착할 수 있다.

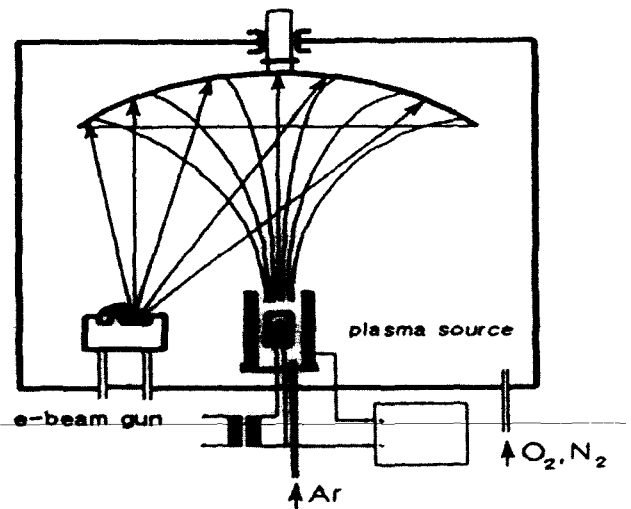
플라즈마 이온보조증착에 의해 증착된 박막들은 조밀하며 압축 응력을 나타내고 있다. 무반사 코팅, 장(단)파장 투과 필터, 플라스틱 코팅 등에서 진공-공기간과 온도 변화에 따른 스펙트럼 이동이 거의 없었으며, 외부 환경에 강한 박막이 제작되고 있다. 간섭필터용 다중파장분할기는 정확한 두께 조정, 조밀한 박막 제작 등의 면에서 가장 주의가 많이 요구되는 필터이다. 플라즈마 이온보조 증착으로 제작한(TiO₂/SiO₂), (Ta₂O₅/SiO₂) 필터의 경우 온도 이동이 1.5~5 ppm/°C로 매우 안정된 것을 제작하고 있다^[19].

4.3 스퍼터링(Sputtering)

진공 증착에서는 물질을 열로 녹여 증기 상태의 원자가 진공 중을 날아가 기판에 응집되어 박막이 형성되나, 스퍼터링에서는 이온빔으로 타겟을 때려 주어 운동량 전달에 의해 튀어나온 원자가 플라즈마 속을 통과해 기판에 도착하여 박막을 형성한다. 증착 원자의 에너지가 약 10 eV로 진공 증착의 0.1 eV보다 크므로, 진공증착 박막보다 조밀하고 기계적 특성이 뛰어난 고품질의 광학박막을 제작할 수 있으며, 광학박막 제작에 갈수록 많이 사용될 것으로 기대된다.

이온빔을 생성하는 방법에 따라 스퍼터링의 종류가 여러 가지로 나뉘어진다. DC와 RF 스퍼터링은 이온빔을 글로우 방전에서 생성한다. 타겟에 음의 DC 혹은 RF 전압을 걸어주어 양이온을 타겟으로 가속시키며, 기판 지지대는 접지 또는 바이어스 되어 있다. 광학박막으로 많이 사용되는 금속산화 박막은 (Ar+O₂)를 사용한 반응 스퍼터링을 이용해야 한다. 방전을 유지하기 위하여 챔버 안의 압력이 높여야 하며 이는 박막의 기계적 특성에 영향을 주게 된다. 또한 금속 타겟 표면이 쉽게 산화되어, 증착율이 비교적 낮으며, 아크가 발생할 수 있다.

이는 자기장을 음극 주위에 걸어 주어 전자를 원운동시켜 플라즈마를 음극 주위에 집중시켜 어느 정도 해결할 수 있으며 이 방법을 마그네트론 스퍼터링이라 한다. 그림 10과 같은 마그네트론 스퍼터링에서는 압력을 낮출 수 있으며 증착율을 높일 수 있다. DC 마그네트론 스퍼터링은 증착 조건을 적절히



Plasma-IAD

그림 9. 플라즈마 이온보조 증착기의 구조도.

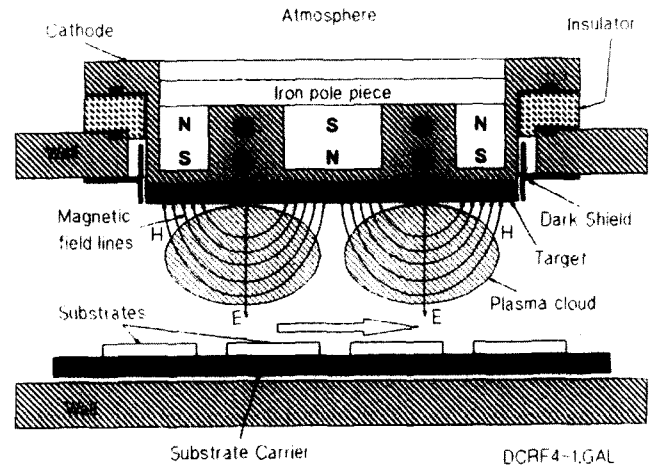


그림 10. 마그네트론 스퍼터링의 구조.

조절하여 금속영역에서 반응영역으로 천이하는 조건에서 증착해야 유전체 박막의 원소조성비가 완전하고 증착율이 높다. RF 마그네트론 스퍼터링은 반응 증착시 증착율이 낮으나 증착 과정이 비교적 안정하여 조절하기가 쉽다.

SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ 같은 유전체 박막을 금속 타겟을 사용하여 반응 스퍼터링할 때 아크 없이 증착율을 높이기 위해 많이 개발되고 방법으로는 AC 스퍼터링과 DC-펄스 스퍼터링이 있다^[26]. AC 스퍼터링의 경우 60 Hz의 낮은 주파수나, 200 kHz의 중간 주파수를 걸어준다. 대형 in-line 스퍼터링에 적합하며 양극이 코팅되는 것을 막을 수 있고, 조밀하고 안정된 박막을 제작할 수 있다. DC-펄스 스퍼터링의 펄스는 주파수가 20~180 kHz이며, 양전압은 짧게 하고 음전압은 길게 한다. 소형 스퍼터링에 적합하고 증착율이 높고 안정되며 낮은 기판온도를 유지할 수 있고 압력을 낮출 수 있다. 스퍼터링의 여러 방법 중

어느 것을 선택하느냐는 생산량, 기판의 크기, 박막의 종류, 증착율, 층수, 증착기의 안정도, 자동화, 기판온도 등에 따라 결정되어야 할 것이다.

스퍼터링에 의해 제작된 박막의 특성은 주로 타겟의 품질, 타 과 기판의 온도, 증착율, 이온빔의 에너지 및 종류, 가스의 압력 및 순도, 기판의 전위, 진공 상태 및 기하학적 배치 등 증착 조건에 따라 변화한다. 여러 공정 변수의 조절은 박막의 미세 구조, 원소 조성비 등을 변화시킬 수 있으며, 목적에 맞는 최적 증착 조건을 찾기 위해서는 체계적 연구가 요구된다.

광학 박막의 경우는 금속, 반도체 혹은 유전체 타겟과 Ar, (Ar+O₂), (Ar+N₂) 혹은 (Ar+O₂+N₂) 이온빔을 이용하여 산화 박막, 질화 박막 혹은 산질화 박막 등 여러 종류와 저굴절률(SiO₂)부터 고굴절률(TiO₂)까지 넓은 범위가 제작되고 있다. TiO₂ 박막은 기판 온도, 바이어스 전압과 이온 에너지를 조정하여 굴절률은 2.0부터 2.5까지, 결정 구조는 비정질로부터 결정 크기가 60 nm되는 rutile까지 변화시킬 수 있다. 레이저 상해 문턱은 스퍼터링에 의한 비정질 TiO₂가 진공 증착의 경우보다 높았으며, 결정 크기가 클수록 작아졌다^[27]. TiO₂와 SiO₂로 이루어진 다층 박막 필터의 경우 분광 이동이 거의 없을 정도로 습기에 강하고 조밀한 박막이 스퍼터링에 의해 제작되고 있다^[28].

스퍼터링에 의해 제작된 MgF₂ 박막은 Mg와 F가 분리되어 Mg이 많은 박막이 증착되고 F의 부족 때문에 빛의 흡수가 컸다. 여분의 F를 공급, Mg와 반응하여 MgF₂ 원소 구성비를 높이기 위해, Freon 14을 이온빔으로 이용하여 흡수율을 감소시켰으나, 접착력이 매우 낮아 스퍼터링에 의한 MgF₂ 박막 제작은 성공을 거두지 못하고 있었다^[29]. 그러나 RF 스퍼터링에서 증착율이 매우 낮아 2 nm/min 정도이면 흡수율이 낮은 MgF₂ 박막을 제작할 수 있으나 증착율이 너무 낮아 많이 사용되지 못하고 있다. 한편 RF 스퍼터링에서 타겟과 음극 사이에 절연체를 넣어 타겟의 온도를 약 700°C까지 증가시켰을 경우 흡수가 매우 적고 굴절률이 1.38인 MgF₂ 박막을 증착할 수 있었다^[30]. 높은 온도의 타겟에서 스퍼터링할 경우 MgF의 분자 상태를 그대로 유지하고 있어 원소조성비가 2.0에 가깝고 흡수가 작은 것이다. 기계적 특성도 높은 기판 온도의 진공증착기에서 제작한 것과 유사한 특성을 나타내었다. 이 때 기판 온도는 100°C 이하였으므로 앞으로 MgF₂를 스퍼터링에서도 많이 이용할 수 있을 것으로 여겨진다.

스퍼터링과 이온총의 장점을 이용한 방법으로 산화 혹은 질화시키는 이온총을 증착율이 높은 마그네트론 스퍼터링과 결합하여 MetaMode라 불리는 스퍼터링 장치에서 조밀하고 외부 환경에 강한 박막을 실온에서 제작하고 있다. 마그네트론 스퍼

터링 지역에서 얇은 금속을 회전 드럼 위의 기판에 증착하면, 기판이 놓여 있는 드럼을 회전시켜 이온총으로 금속 박막을 산화(혹은 질화)시키며, 이를 계속 회전시켜 다시 스퍼터링에서 금속 박막을 증착하고 이온총으로 산화(혹은 질화)시켜 박막의 두께를 증가시키는 방법이다. 이 방법으로 접착력이 높고 외부 환경에 강한 플라스틱 기판 위의 무반사 코팅, 가시 광선을 반사시키고 적외선을 투과시키는 냉거울 코팅, 안경 코팅, electrochromic 코팅 등이 제작되고 있다.

또 다른 방법으로는 이온보조 증착에서 이온빔이 박막에 운동량을 전달하여 주고 반응 이온빔의 산화를 촉진시켜주는 장점과 스퍼터링에서 증착입자의 에너지가 높은 장점을 이용한 이온보조 스퍼터링(ion assisted sputtering)을 연구개발하여 조밀도가 덩어리에 가깝고 외부 환경의 변화에 안정한 광학박막을 증착하고 있다^[31]. 기존의 진공 증착 챔버를 이용하는 이온보조 스퍼터링의 기본구조는 그림 11과 같다. 기존의 이온보조 증착에서 전자총이 있는 자리에 마그네트론총을 사용하는 것이 가장 크게 다른 점이다. 마그네트론 스퍼터링을 사용함으로써 전자빔에 의한 증착보다 입자의 이동도가 높아 조밀도가 큰 박막을 제작할 수 있으며, 이온총에서 나오는 산화이온을 사용하면 산화 박막의 원소조성비를 높일 수 있다.

펌핑 속도가 빠른 고진공 챔버에서 Ar 가스가 직접 타겟에 흐르도록 마그네트론 스퍼터링을 변형하면 타겟에서 튀어나온 원자가 수십 cm 진행하므로 스퍼터링 총을 기존의 광학박막을 증착하는 진공챔버에서 사용할 수 있으며, 기존의 전자빔 증착 방법보다 조밀도가 큰 박막을 증착할 수 있다. 타겟과 기판 사이의 거리가 약 30~50 cm 정도이므로 Kaufman 혹은 end-Hall 이온총을 이용하여 스퍼터링으로 성장하는 박막을 보조증착할

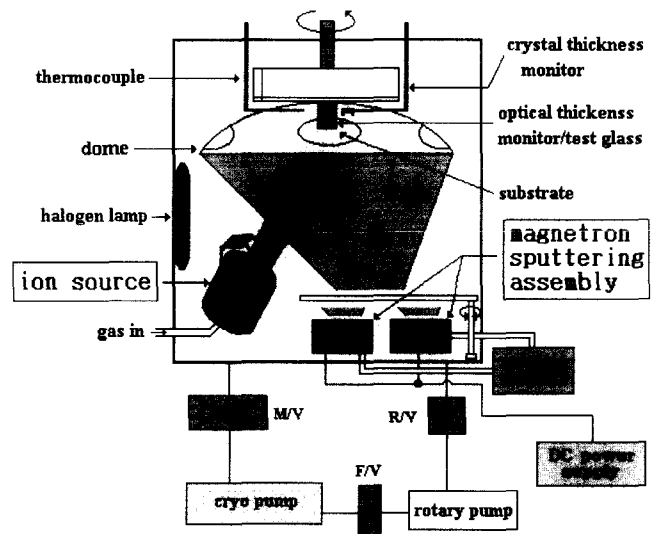


그림 11. 이온보조 스퍼터링 챔버.

수 있다. 따라서 스퍼터링과 이온보조증착의 장점을 이용하여 조밀도가 높고 손실이 작은 광학박막을 제작할 수 있다. 또한 이온보조 스퍼터링은 이온빔 스퍼터링보다 증착율이 높으므로 다층박막을 용이하게 증착할 수 있으며 기존의 증착챔버를 사용할 수 있다. 초고속통신망에 사용되는 다중파장분할기, 선풍이 매우 좁은 간섭 필터 등이 이 방법으로 제작되고 있다. 또한 이온보조 스퍼터링에 의하여 굴절률과 흡수계수는 거의 변하지 않지만 빛의 산란이 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다^[32]. 이는 스퍼터링에 의하여 이미 조밀한 박막이 증착되었고 이온빔은 표면 거칠기를 감소시키는데 크게 기여하는 것으로 보인다.

4.4 이온빔 스퍼터링(Ion Beam Sputtering)

이온빔 스퍼터링에서는 그림 12에서와 같이 Kaufman 이온총의 고에너지 이온빔을 타겔에 때려 주면 타겔에서 튀어나온 원자가 기판에 도착하여 박막이 성장한다^[33]. 이온빔 스퍼터링에서도 기판에 도착하는 증착 원자의 에너지가 ~ 10 eV로 진공 증착보다 크므로 조밀한 미세구조의 박막을 제작할 수 있다. 또한 기존의 스퍼터링보다 잔류 가스 압력을 낮출 수 있어, 증착입자가 가스와의 충돌이 작으며 타겔과 기판 사이 거리를 증가시킬 수 있다. 표면 거칠기와 산란이 작은 반사 거울, 약 X-선 반사 거울, 접착력이 개선된 박막의 제작에 이용되고 있다.

이중 이온빔 스퍼터링은 이온빔 스퍼터링과 이온 보조 증착의 혼합으로 이온빔 스퍼터링에 의해 자라는 박막을 또 다른 Kaufman 이온총으로 기판 청소와 보조 증착을 하는 것이다. 타겔 이온총에서 나온 Ar 이온은 Ti 타겔으로부터 Ti을 떼어내어 기판을 향하게 하고, 기판 이온총에서 나온 O₂ 이온은 성장하는 Ti 박막을 때려주어, Ti과 O이 반응하여 TiO₂ 박막을 형성한다. TiO₂의 경우 굴절률은 2.46, 소멸 계수는 1×10^{-5} 으로 매우 작으며, 결정 구조는 산란이 작은 비정질이다. SiO₂의 경우는 굴절률 1.46이며, 소멸 계수는 5×10^{-6} 으로 매우 작다. 이러한 (TiO₂/SiO₂), (Ta₂O₅/SiO₂)로 이루어진 레이어 거울의 흡수와 산란이 기존의 진공 증착 기술로는 불가능한 5 ppm 이하이다. 조밀도가 높아야 할 뿐만 아니라 산란과 흡수가 매우 작고 반사율이 높아야 하는 링 레이어 자이로 거울, 중력과 측정용 간섭계 거울, 단원 레이저용 공진기 거울 등이 이 방법으로 초고진공 챔버에서 증착되고 있다. 일반적으로 증착율이 낮으나 대형 이온총을 이용하여 증착율을 높일 수 있다.

질화 박막으로 AlN, Si₃N₄, TiN, 산질화 박막으로 SiO_xN_y, AlO_xN_y 등이 제작되고 있다. 불화박막은 밴드갭이 커 UV 영역

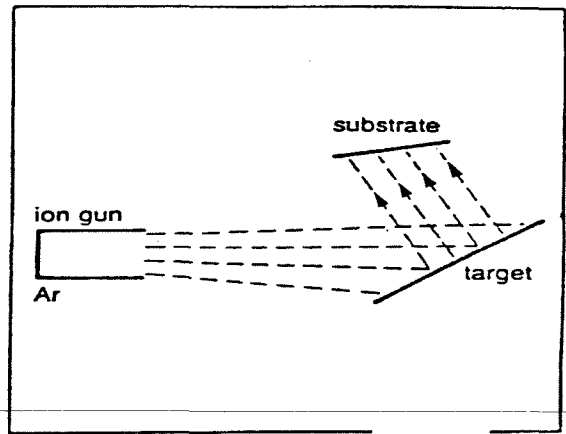


그림 12. 이온빔 스퍼터링의 구조.

에서 거울로 사용될 수 있으나 두께가 1~2 μm 이상이면 기계적 특성이 나빠지고 짧은 파장에서 산란이 커진다. 이온빔 스퍼터링에서도 불화박막은 Mg과 F이 분리되어 F 부족 현상이 쉽게 나타난다. 증착조건을 잘 조절하면 원소조성비가 완전하고 압축응력인 불화박막을 제작할 수 있다. 기존의 스퍼터링에서 원소조성비가 작아 제작되기 어려운 MgF₂를 이온빔 스퍼터링에서 굴절률이 1.38이고 흡수가 매우 작은 박막으로 제작하고 있다. YF₃, LiF 등도 UV 거울(351, 250, 190 nm)로 사용하기 위하여 이온빔 스퍼터링으로 제작하고 있다^[34]. 또한 타겔은 1100~1700 eV의 고에너지 이온으로 스퍼터링하고, 기판은 저에너지(50~150 eV) 고전류의 이온으로 보조 증착하여 원소 조성비가 높고 응력이 작은 Si₃N₄와 접착력이 증가한 hydrogenated a-Si을 제작하고 있다.

4.5 반응저전압 이온플레이팅(Reactive Low-Voltage Ion Plating)

반응 저전압 이온 플레이팅은 그림 13과 같이 낮은 전압, 낮은 압력에서 이온 플레이팅이 가능한 고전류 플라즈마총을 따로 제작하여, 고품질의 광학 박막을 제작하는 방법이다^[35]. 플라즈마총(음극)으로부터 저전압 고전류의 전자가, 크루서블에서 전자빔에 의해 용융된 전도성 증발 물질(양극)로 흐르며 증발 물질을 충돌에 의하여 일부 이온화시킨다. 플라즈마총으로부터 압력 차이에 의해 나온 Ar 이온은 증발 물질 및 반응 가스와 충돌하여 이들을 이온화시킨다. 플라즈마를 형성하고 있는 고이동도의 전자와 접촉하며 전기적으로 절연되어 있는 기판 지지대는 Ar 이온이 충돌로 잃어버린 전위(5~10 eV)만큼 접지에 대해 음의 바이어스된 전압을 가지므로, 이온화 된 증발 물질, 반응 가스 및 Ar 이온이 기판으로 가속되어 박막이 형성된다. 증발물질이 전기를 통해야 하므로 유전체 물질을 사

용할 수 없고 금속을 녹여야 한다.

낮은 기판 온도에서 반응 저전압 이온 플레이팅으로 제작된 광학 박막의 굴절률은 덩어리에 가까우며, 소멸 계수는 보통 박막보다 작으며, 습기 및 온도 변화에도 기계적 특성이 거의 변하지 않아 외부 환경에 강하다. 응력은 이온 빔에 의해 제작된 박막들에서 많이 나타나는 압축 응력으로 그 크기는 비교적 작다. 특히 다층 박막의 경우 응력의 크기가 증가하지 않은 것은 많은 관심을 끌고 있다. 23층의 Ta_2O_5/SiO_2 으로 장광장 투과 필터를 제작하여 온도를 130°C까지 올려도 분광 특성이 거의 변하지 않는 조밀한 박막이 제조되었다. TiO_2 의 경우는 진공 증착보다 굴절률이 높고, 표면 거칠기가 낮으며 비정질 결정 구조를 갖는 것으로 보고 되고 있다³⁶⁾. 따라서 유전체 박막의 기동 미세 구조를 거의 없앨 정도로 조밀하며, 원소 조성비가 높아 흡수가 적으며, 접착력이 높고, 외부 환경에 강한 박막이 반응 저전압 이온 플레이팅에서 제조되고 있다.

4.6 논의

진공 증착에 의해 제작된 박막보다 덩어리에 가까우며 내구성이 높은 광학 박막의 제작이 가능한 이온빔 기술을 양산으로 확장할 경우 고려해야 할 점을 살펴보자.

이온 보조 증착은 기존의 진공 챔버에 있는 기판 지지대, 열 저항원 혹은 전자빔총을 그대로 사용하며 기판 지지대 밑의 적당한 위치에 이온총만 설치하면 되므로 진공 챔버 내부의 구조 변화는 적다. 기판 지지대가 회전하는 경우도 이온 보조 증착의 효과는 진공 증착보다 개선된 효과를 가져오고 있는 것으로 알려져 있다. 회전하는 기판 지지대가 클 경우 대형 이온총, 직사각형 모양의 이온총 혹은 여러 개의 작은 이온총이 필요하

다. 이온총의 크기는 진공 챔버 및 기판 지지대의 크기, 박막의 수량 및 종류 등을 고려하여 선택해야 하며, 양산 전에 충분한 실험을 하여 챔버의 기하학적 조건, 증착 물질, 증착 조건 등에 따른 최적 조건을 찾아야 한다. 산소 가스를 사용할 경우 Kaufman 이온총의 열전자를 방출시키는 텅스텐 필라멘트가 산소와 반응하여 수명이 짧아지므로 자주 교환을 해주어야 하며, 텅스텐으로 박막이 오염되지 않도록 주의해야 한다. 최근에는 열전자 방출 필라멘트를 사용하지 않고 hollow cathode, RF 전원, electron emitter 혹은 마이크로파를 사용한 이온총이 개발되어 장시간 산소와 같은 반응 가스를 이온총에서 사용할 수 있다.

이온 빔의 에너지가 너무 높으면 박막에 상해를 주고, 자라는 박막을 떼어 내므로 증착률이 낮다. 또한 Kaufman형의 평행 이온빔으로는 대형 챔버의 넓은 면적의 기판을 이온보조 증착할 수 없다. 양산용으로는 자라는 박막에 상해를 주지 않을 정도의 낮은 에너지이며 넓게 퍼지는 이온빔을 생성할 수 있는 end-Hall 이온총이 이용되고 있다. 이온빔을 가속시키고 평행하게 하는 그리드가 없으며 증착물질의 응용에 따라 양극 전압과 양극 전류를 조절할 수 있다.

스퍼터링은 광학박막 제작에 진공증착만큼 많이 사용되고 있지는 않으나, 진공증착보다 조밀하고 외부 환경에 강한 광학 박막이 제작되고 있으며, AC 혹은 DC-펄스 마그네트론 스퍼터링을 이용하면 증착율을 높이고 아크가 없는 안정된 증착을 할 수 있으므로 광학박막의 제작에 많이 이용될 것으로 여겨진다. 저굴절률 박막으로 많이 사용되고 있는 금속 불화 박막은 스퍼터링에서 제작됨에 따라 더욱 많이 사용될 것이다. 특히 이온총과 마그네트론 스퍼터링의 장점을 이용하거나 이온보조 증착과 마그네트론 스퍼터링의 장점을 이용한 증착 시스템은 광학박막의 제작에 많이 사용될 것으로 기대된다.

이온빔 스퍼터링은 증착율이 낮아 증착 시간이 오래 걸리나, 제작된 박막의 산란과 흡수가 매우 작아 링레이저 자이로스코프 거울 생산에 사용되고 있다. 양산시 대형 이온 총이 필요하며, 이온과 증착 입자들의 에너지가 크므로 이들이 벽에 부딪칠 경우 원하지 않는 입자가 박막에 오염될 수 있으므로 주의가 필요하다. 고에너지 저전류 이온총으로 타겟을 스퍼터링하고 저에너지 고전류 이온총으로 자라는 박막을 약하게 때려 주는 이중 이온빔 스퍼터링에서는 많은 독립 변수가 있으며 새로운 박막을 합성할 수 있으므로 새로운 연구 분야로 발전할 수 있다.

플라즈마 이온보조 증착과 반응 저전압 이온 플레이팅에서는 광학적, 기계적 및 전기적 특성 면에서 가장 개선된 광학 박막 제조가 제조되고 있어 그 전망이 매우 밝으나, 새 시스템 구

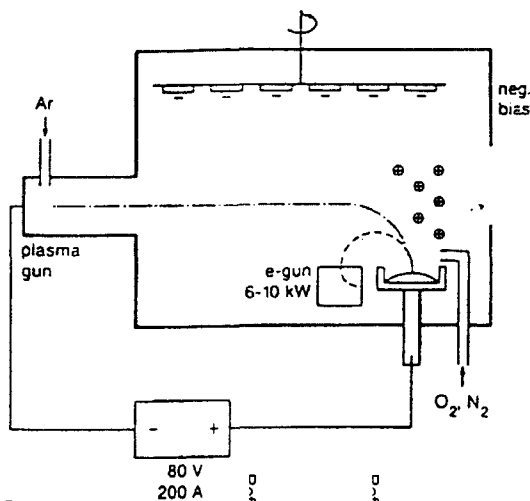


그림 13. 반응 저전압 이온 플레이팅의 구조.

입에 많은 비용이 들며, 기존의 챔버를 이용할 경우에도 플라즈마층을 설계 제작하여 장착해야 되며, 내부 구조의 재배치 및 전기 절연 등이 필요하다.

5. 광학박막의 응용

최근 산업계에서 광학적 특성을 조절하거나 이용하는 박막 코팅이 개발되거나 생산 중에 있다. 이 중 흡수층을 이용한 무반사 코팅, 플라스틱 필름의 무반사 코팅, 초고속 광통신에 이용되는 WDM 간섭필터, 초단 펄스 생성에 이용되는 chirped 거울, rugate 필터, 반도체 레이저 단면의 무반사 코팅 등에 관한 광학박막의 설계와 제작 방법을 간단히 기술하자.

5.1 무반사 코팅

5.1.1 흡수층을 이용한 무반사 코팅

일반적으로 무반사 코팅은 흡수가 없는 유전체 박막을 이용하여 투과율을 증가시키고 반사율을 감소시키는데 많이 사용된다. 컴퓨터나 TV 모니터 표면에는 모니터 밖에서의 반사율을 줄이기 위한 무반사(AR) 코팅과 정전하를 줄이고 전자기파 차폐를 위하여 전도성 박막을 이용한 무정전(antistatic, AS) 코팅을 한다. 전도성 박막으로는 ITO가 가장 많이 사용되고 있으며 한 예로 (Air/SiO₂/TiO₂/SiO₂/ITO/Glass)와 같은 4층 설계를 무반사 무정전 코팅으로 사용할 수 있다^[37].

최근에 모니터의 contrast를 개선하기 위하여 ITO 대신 흡수층 박막인 TiO_xN_y, ZrO_xN_y, Ag, NiO_x, NiCrN_x 등을 사용되고 있다. 무반사, 무정전이며 두께가 얇은 흡수층 박막을 이용하여 투과율을 감소시켜 contrast를 증가시킬 수 있다. 흡수층 박막을 이용할 경우 흡수층의 복소 굴절률(N=n-ik)의 분산이 가시광선 영역에서 SiO₂ 층과 무반사 되는 조건을 만족하면 2층으로 층수를 줄일 수 있다^[38]. TiN을 이용할 경우 광학상수는 어드미턴스 그림을 이용하면 쉽게 계산할 수 있으며, 그림 14에 TiN의 두께가 15 nm, SiO₂의 두께는 85 nm일 때 계산한 광학상수와 반사율을 나타내었다.

5.1.2 플라스틱 필름 위의 무반사 코팅

모니터에 직접 코팅을 하지 않고 무반사, 무정전 코팅을 얇은 플라스틱 필름 위에 하고, 플라스틱 필름을 모니터 위에 부착시키기도 한다. 한 예로(Air/Lubrication layer/SiO₂/ITO/SiO₂/ITO/primer/hard coat/PET)와 같은 코팅은 TV 칼라 모니터에 사용되고 있다^[40].

이와 같이 플라스틱 필름 위에 무반사, 무정전, 고반사율 코

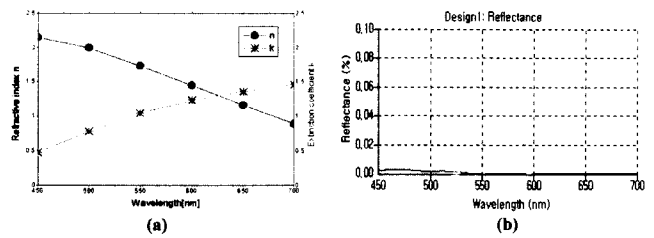


그림 14. 계산된 TiN의 (a)광학상수와 (b)반사율.

팅과 전도성 코팅을 증착하고 이를 PC 모니터, TV 모니터, LCD 등 필요한 곳에 부착시켜 광학적 특성을 변화시키는 것은 앞으로 많은 응용이 있을 것으로 기대된다.

5.2 파장분할기(WDM) 필터

초고속 통신망에서는 대용량 정보를 전달하기 위해 간격이 좁은 여러 개의 파장을 동시에 광섬유로 송신하고 수신부에서 이를 분리하는 파장분할기(wavelength division multiplexer, WDM)를 사용하고 있다. 현재 2, 4, 8 채널의 WDM 필터가 사용되고 있지만 WDM 필터가 1528~1563 nm의 어비움 광섬유 증폭기에 사용될 것으로 예상되어, 채널 수가 16, 32 혹은 그 이상이고, 손실과 cross-talk이 작고, 온도 안정성이 높은 WDM 필터가 요구되고 있다. WDM 필터로는 정렬된 광도파로, 격자, 광섬유 Bragg 격자, 광학박막을 이용한 간섭필터의 4 종류가 연구, 개발되고 있다.

Fabry-Perot형 간섭필터를 사용하는 광학박막 WDM필터는 채널 사이의 간격이 넓을 경우 비교적 제작하기가 쉽고, 광학적 특성이 좋으며, 광섬유에 쉽게 패키징할 수 있다. Fabry-Perot 필터는 가운데 1/2 파장의 정수배 두께인 간격층을 두고 양쪽에 다수의 1/4 파장층으로 이루어진 고반사율 거울로 이루어져 있다. 이상적인 Fabry-Perot 필터의 투과 파장은 간격층의 1/2 파장 정수배 두께, order, 반사거울에서의 반사 위상 등에 의해 결정된다. 채널 간격이 0.8 nm 이하인 다중파장분할(dense WDM) 필터로 발전함에 따라 층 수가 많아지고, 박막이 조밀하고, 채널간 cross-talk이 작고, 편광 교차가 작으며, 온도 및 습도 변화에 안정하고 빛의 손실이 작은 필터가 필요하게 되었다.

DWDM은 기존의 진공 증착 방법으로는 제작이 불가능하여 이온빔을 이용한 방법들이 사용되고 있다. 스퍼터링과 이온보조를 이용한 이온보조 스퍼터링, 플라즈마 이온보조 증착 등의 다양한 방법이 사용되고 있으며 증착 물질도 기계적 특성이 좋은 산화박막, 열팽창 계수와 온도에 따른 굴절률 변화가 작은 물질들을 사용하고 있다. 공진기 수가 5~8개이어서 층수가

100개 이상이 되므로, 두께를 엄격한 조절하여야 하며 굴절률이 불균일하게 변하는지를 관측하고 증착 중 설계치로부터 실제 증착치가 벗어났을 때 이를 보상하는 방법이 필요하다^[41]. 그림 15의 (a)와 (b)는 4채널 WDM 필터의 사용 구조와 16 채널 DWDM의 스펙트럼을 각각 보여 주고 있다^[42]. DWDM의 필터의 설계 및 제작 기술은 초고속 통신망의 용량 증가에 따라 계속 발전할 것으로 기대된다.

5.3 펨토초 chirped 거울 코팅

가변 파장폭이 넓은 펨토초 펄스폭 레이저의 공진기 거울은 반사율의 스펙트럼 폭이 넓어야 하며 반사율이 높아야 한다. 기존의 1/4 파장 두께로 고굴절률(nH)과 저굴절률(nL) 박막을 교대로 다층 증착한 반사경은 두 굴절률의 비인 nH/nL이 클수록 반사율이 증가하고 반사 대역폭(bandwidth)이 넓어진다. 그러나 1/4 파장 다층 박막은 펨토초 펄스 발전에 필요할 정도로 반사 대역폭이 넓지 못하다. 또한 중심 파장에서는 반사 위상이 0이나 그 주위에서는 위상 변화가 크며, 그룹 지연, 그룹 지연 분산, 삼차 분산 등 고차 위상 분산이 나타나 펄스폭의 증가를 초래한다. 반사 대역폭을 증가시키기 위한 기존의 방법으로는 박막의 두께를 공기로부터 기판방향으로 점진적으로 증가시키거나, 두 세개의 장(단)파장 투과필터를 연결시켜 광대역 반사거울을 제작하기도 한다. 광대역 반사거울의 반사 위상은 1/4 파장 다층박막보다 중심파장 혹은 특정 파장 주위에서 급격히 변하거나, 고차 위상 분산이 크게 나타나며, 새로운 파장에서 공명이 일어나 흡수가 증가하기도 하여 펨토초 펄스폭에 영향을 미치게 된다.

10 펨토초 이하 펄스 고체 레이저에서는 레이저 매질에서 Kerr 효과에 의해 발생하는 자체 위상 변조와 공진기의 광학소자에 의해 발생하는 그룹지연 분산을 보상하기 위하여, 넓은 반사 대역폭에서 그룹지연 분산이 음수인 반사거울을 사용해야 한다. 그룹지연 분산이 음수로 일정하므로 그룹지연은 파장에 따라 선형으로 증가해야 한다. 즉 광학박막의 두께가 일정하지 않고 기판 쪽으로 진행할수록 두께가 두꺼워져 장파장이 거울 깊이 들어가도록 해야 한다. 이와같이 박막의 두께가 주기적으로 반복되지 않고 비주기적으로 깊이에 따라 점진적(선형 혹은 비선형)으로 두꺼워지는 코팅을 chirped 다층박막 코팅이라 한다. 이러한 박막의 설계는 주어진 반사율, 그룹지연, 그룹지연 분산을 만족하도록 박막의 굴절률, 두께, 층수를 최적화하는 것이다.

Chirped 다층박막 설계 방법은 Fourier 합성 방법을 이용하여 굴절률이 연속적으로 변하는 불균일 굴절률 박막, 고굴절률

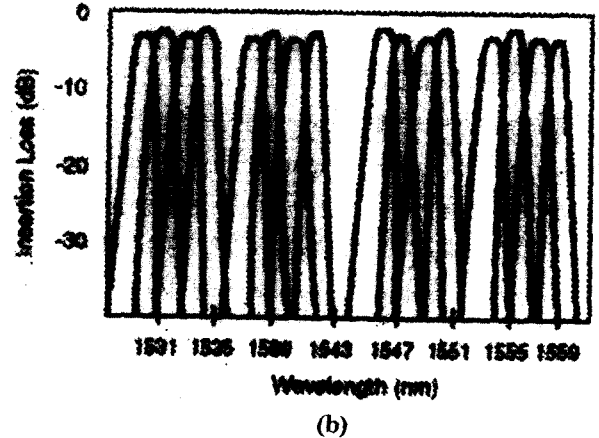
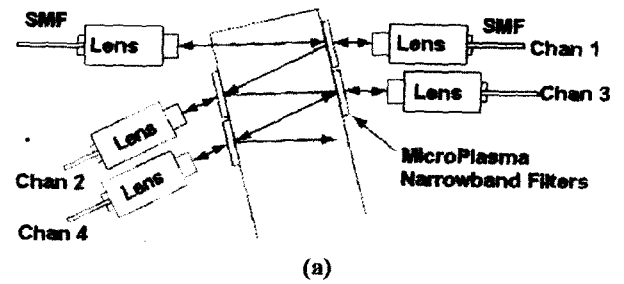


그림 15. 다중파장분할기의 (a)구조와 (b)스펙트럼.

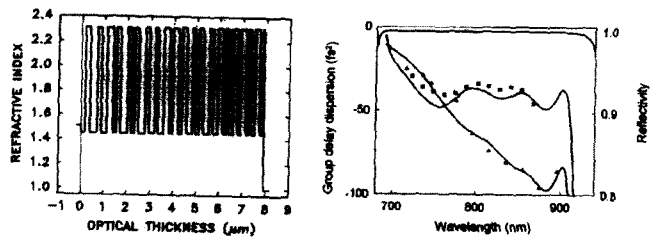


그림 16. 42층 (TiO₂/SiO₂) chirped 반사 거울의 (a)굴절률 분포와 (b) 반사율, 그룹 지연 분산과 2차 분산

과 저굴절률의 두 박막이 결정되어 있을 때 박막의 층수와 두께를 바늘 최적화 방법을 이용하여 최적화하는 방법, 결합 모드 이론을 이용하여 다층광학박막을 설계하는 방법 등이 이용되고 있다^[43,44]. 그림 16은 42층 (TiO₂/SiO₂) chirped 반사 거울 설계와 거울의 반사율, 그룹 지연 분산과 2차 분산을 보여 주고 있으며, 8 fs 레이저 펄스를 측정하였다^[45].

펨토초 펄스 반사 거울은 성능이 두께 오차에 매우 민감하므로 제작시 두께 조절을 잘 해야하며, 굴절률 변화가 작아야 하고, 레이저 상해 문턱이 높아야 하고, 조밀해야 한다. 공기 쪽 층이 두께 오차에 민감한데 이는 공기 쪽 층의 두께가 얇고 모든 파장에 다 영향을 주기 때문이다. 기판 쪽의 두꺼운 층은 장파장을 반사시키므로 공기 쪽 층보다는 두께 오차에 민감하지 않다. 기존의 진공 증착기에서 전자빔 증착, 이온빔 스퍼터링, 플라즈마 이온보조 증착 등이 사용되고 있다.

5.4 Rugate 필터

군사용으로 야외에서 사용하는 레이저 빔은 사람 눈에 치명적이며 광학계를 이용하여 관측하는 사람에게도 매우 위험하다. 눈을 보호하기 위해서는 레이저 파장을 100% 반사시키고 가시광선 혹은 사용광선은 투과시키는 코팅을 광학계에 하거나 이러한 코팅이 된 보호 안경을 사용해야 한다. 반사율이 높고 반사 대역폭이 좁은 반사경으로 고굴절률과 저굴절률의 두 물질과 1/4파장 두께로 이루어진 notch 필터 혹은 마이너스 필터를 사용할 수 있으나, 여러 개의 파장을 반사시켜야 하는 경우는 코팅 설계가 쉽지 않다.

이 경우 굴절률이 두께에 따라 사인 함수에 따라 연속적으로 변화하는 설계를 이용하는 rugate 필터가 적당하다. rugate 필터는 불연속 굴절률을 이용한 1/4 파장 반사경에서 나타나는 고차 반사가 나타나지 않아, 특정 파장만 반사시키고 다른 파장은 투과시킨다. 굴절률이 연속이어서 계면이 없으므로 불연속 굴절률 계면에서 나타나는 반사, 계면 거칠기, 물질의 확산, 계면에서의 결함, 빛의 손실 및 산란, 계면에서의 강한 전기장 등이 없을 것으로 기대된다.

그림 17(a)와 같이 굴절률이 사인함수로 변화하는 rugate 필터는 결합 모드 이론을 이용하면 광학적 현상을 쉽게 이해하고, 반사율의 스펙트럼, 대역폭 등을 빠르게 계산할 수 있으며, 2X2 행렬을 이용하여 정확히 계산한 것과 거의 차이가 없다^[46]. 불균일 굴절률 분포가

$$n(x) = n_{av} + \frac{n_p}{2} \sin(k_0 x + \phi_0)$$

일 경우, $k_0 = (4\pi/\lambda_0) n_{av}$ 이고, n_{av} 는 평균굴절률, n_p 는 최고-최저 굴절률 변화로 n_{av} 보다 작으며, λ_0 는 반사 파장이고, ϕ_0 는 위상이다. 좌표 x 는 물리적 두께이며 공기-박막 계면이 $x=0$ 이고 빛이 박막 속으로 진행하면서 x 는 양으로 증가한다.

반사 파장이 λ_0 일 때 주기 p 는

$$n_{av} p = \frac{\lambda_0}{2}$$

에 의해 결정된다. 반사대역폭은 $\Delta\lambda$ 는

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{n_p}{2n_{av}}$$

이다. 최대 반사율 R_{max} 은

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L)$$

이며, $\kappa = \frac{\pi n_p N}{4n_a}$ 이고 $L = \frac{\lambda_0}{2n_{av}} N$ 으로 필터의 총 두께이고,

N 은 총 주기 수이다. 광학밀도(optical density)는

$$OD = -\log_{10} T = 0.6822 \frac{n_p}{n_{av}} N - \log_{10} \left(\frac{4n_0}{n_s} \right)$$

로 주어지며, n_0 는 입사매질의 굴절률, n_s 는 기판의 굴절률이다. 여러 개의 레이저 파장을 반사시키고자 할 때는 각 파장에 해당되는 굴절률 사인 함수를 더 해주면 되므로 설계가 비교적 쉽다. 입사매질 및 기판과의 굴절률 차이 때문에 반사대역 바깥에 옆 물질이 발생하는데 이를 줄이기 위하여 그림 17(a)와 같은 매칭함수와 apodization 함수를 이용한다. 그림 17(b), (c)는 50 주기의 rugate 필터로 가우시안 apodization과 매칭 박막을 이용한 굴절률 분포와 반사율을 이다. 반사대역이 거의 직사각형에 가깝고 옆에 약간의 물질이 있다.

Rugate 필터는 Fourier 변환법을 이용하여 설계할 수 있다. 주어진 반사율과 반사 대역폭으로부터 불균일 굴절률 함수를 식 (4), (5)의 Fourier 방법을 이용하여 합성할 수 있다. 그림 18은 570~630 nm에서 $R=0.9$ 이고 나머지 구간에서는 $R=0$ 이 되도록 Fourier 방법을 이용하여 합성한 rugate 필터의 반사율과 굴절률 분포이다^[49].

Rugate 필터는 불균일 굴절률 박막만으로 설계되는 것은 아니다. 위와 같은 연속 굴절률 함수를 많은 수의 매우 얇은 두께로 나누고, 각 얇은 두께의 층을 flip-flop 방법을 사용하여 고굴절률과 저굴절률 두 박막으로 대체하면 두 물질을 이용하는 디지털 박막으로 전환시켜 기존의 진공 증착 방법을 사용할 수 있다.

두께가 증가함에 따라 연속적으로 변하는 굴절률 박막을 제작하는 방법으로는 고굴절률과 저굴절률의 두 물질을 동시 증발시키되 증착율을 상대적으로 변화시키는 동시증발 진공 증착법과 oxynitride 박막의 원소조성비를 변화시키는 방법 등이 사용되고 있다.

동시 증발법의 한 예로는 TiO_2 와 SiO_2 를 전자빔 혹은 열저항 방법으로 동시에 증발시키되 한 물질의 증착율이 증가하면 다른 물질의 증착율은 감소시키며 증착율을 사인함수로 변화시키는 방법이다. 박막은 TiO_2 와 SiO_2 의 혼합박막으로 구성비가 두께가 증가함에 따라 변하게 되고 이에 따라 굴절률을 SiO_2 의 1.46부터 TiO_2 의 2.35까지 변화시킬 수 있다. (TiO_2/MgF_2), (TiO_2/CaF_2), ($ZnS/cryolite$), (ZnS/SiO_2), (Si/SiO_2) 등 여러 종류의 짝이 사용되고 있으며, 혼합 박막의 혼합율에 따른 굴절률의 변화폭, 광학적 특성, 기계적 특성, 결정 구조의 변화, 원소 조성비의 변화 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

원소조성비를 변화시키는 방법으로는 $SiO_x N_y$, SiO_x , AlO_x , N_y , $ZrO_x F_y$, $SiO_x F_y$, SiN_x 등이 사용되고 있다. $AlO_x N_y$ 의 경우

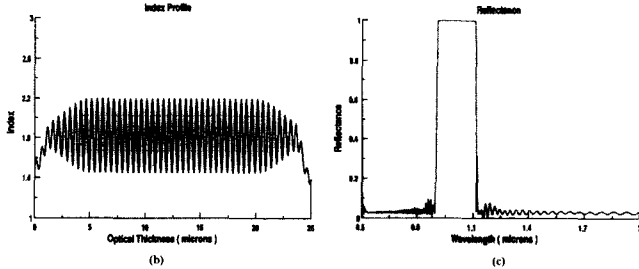
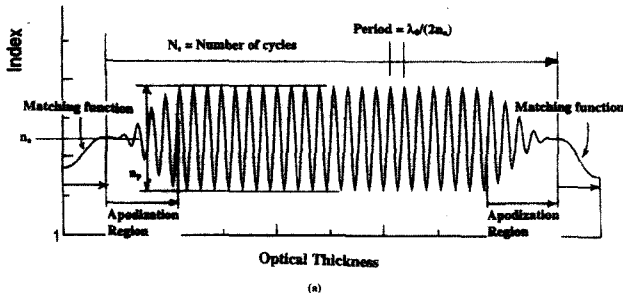


그림 17. (a) 사인함수 굴절률 분포. (b) 50 주기의 rugate 필터로 가우시안 apodization과 매칭 박막을 이용한 굴절률 분포와 (c) 반사율.

는 굴절률이 1.7인 Al_2O_3 부터 1.9인 AlN 까지 변화시킬 수 있으며 그림 19는 15주기를 이용한 rugate 필터의 굴절률 분포와 반사율 및 투과율이다^[47]. 기존의 전자빔 진공 증착기에서 증착하고 있는 동안 산소 가스를 조절하는 방법, 이온보조 증착에서 질소 이온과 산소를 조절하는 방법, 스퍼터링과 CVD 및 레이저 펄스 증착에서 질소와 산소 가스를 조절하는 방법 등이 사용되고 있다. 원소 조성비에 따른 굴절률의 변화폭, 광학적 특성, 기계적 특성, 결정 구조의 변화, 화학적 결합 상태 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

5.5 반도체 레이저 단면의 무반사와 고반사 코팅

진행파형 반도체 레이저 광 증폭기에서 원하지 않는 Fabry-Perot 공명을 피하기 위하여, 반도체 레이저의 광 접속 효율을 높이거나 초발광 반도체 레이저 등의 출력특성을 향상시키기 위하여 반도체 레이저 단면에 무반사 코팅을 하고 있다. 초소 전력의 광전소자로 사용되는 매우 낮은 문턱전류를 가진 반도체 레이저를 만들기 위해서는 고반사 코팅을 한다. Distributed feedback 반도체 레이저는 한 면에 무반사 코팅을 하고 다른 면에는 고반사 코팅을 하여 출력을 증가시킬 뿐 아니라 모드 선택율을 높여서, 다중 모드로 발진되던 레이저를 단일 모드로 발진시켜 수율을 높이고 있다.

반도체 레이저에서 유도 방출이 매우 큰 경우 양단면으로 나오는 총 출력을 P_{out} 이라 하면 $P_1 + P_2 = P_{out}$ 이 된다. 양 단면의 반사율이 $R_1 = R_2$ 이면 $P_1 = P_2 = P_{out}/2$ 가 되어 양쪽 단면으로 나오는

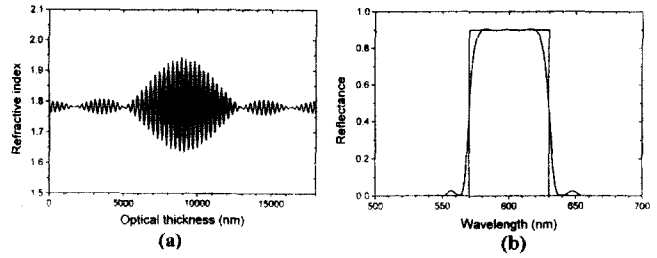


그림 18. 570~630 nm에서 $R=0.9$ 이고 나머지 구간에서는 $R=0$ 이 되도록 Fourier 방법을 이용하여 합성한 rugate 필터의 (a)굴절률 분포와 (b)반사율.

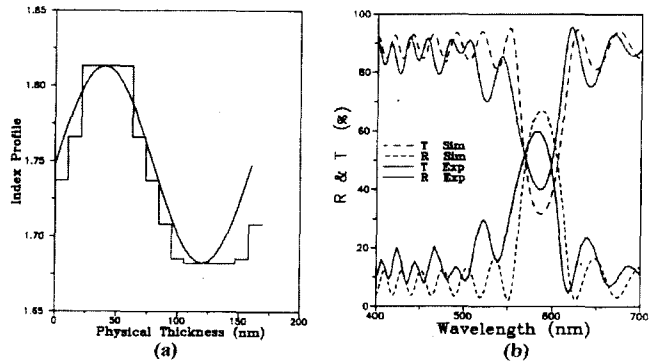


그림 19. AlO_xN_y 를 이용한 15 주기의 rugate 필터의 굴절률 분포와 반사율.

출력은 같게 된다. 만약 무반사 코팅을 하여 $R_1 \approx 0$, $R_2 \approx 1$ 이면 단면 2에서 반사되어 온 빛은 단면 1(출력면)에서 반사되지 않고 레이저 출력으로 나가게 되므로 $P_1 = P_{out}$ 이 되어 단면 1로 레이저의 총출력이 나오게 된다. 또한 단면 1에 증착된 무반사 코팅으로 인하여 높아진 문턱전류를 낮추고 출력을 증가시키기 위하여 반대면에 고반사 코팅을 할 수 있다.

정확한 무반사 코팅 조건은 반도체 레이저의 빔이 도파관 모드이므로 파수벡터가 다른 여러 개의 평면파의 합으로 이루어져 있고, 구조적으로 활성층이 다층으로 구성되어 있어, 이들을 모두 고려하여 설계하여야 한다. 그러나 다층 활성층의 유효굴절률을 계산하여 단일층으로 간단하게 가정하고, 도파관을 진행하는 파를 박막에 대하여 수직으로 입사하는 평면파로 가정하면 무반사 코팅을 위한 굴절률(n_f)은 $\lambda/4$ 두께에서 활성층의 굴절률이 n_a 일때 $n_f = \sqrt{n_a}$ 로 주어진다. 활성층의 유효굴절률 n_a 가 3.43일때 $\lambda=1550$ nm에서 $n_f=1.852$, $d_f=209$ nm된다. 코팅 물질로는 단층일 경우 SiO_2 , Si_3N_4 등이 사용되며, 반사율을 많이 줄이고 단층에 의한 두께 오차를 줄이기 위하여 2층 무반사 코팅을 하기도 한다.

1.55 μm InGaAsP MQW FP 반도체 레이저의 코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사·고반사 코팅 후의 출력 특성을 표 2에 요약하였다^[48]. 무반사 코팅 후 P_1 이 코팅 전보다 87% 증가하였고, 기율기 효율이 코팅 전보다 3.4배 증가하였다. 문턱전류는

표 2. 코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사·고반사 코팅 후의 출력 특성

파라메타	코팅 전	무반사 코팅 후	무반사·고반사 코팅 후
문턱전류(I_m) [mA]	12.25	32.37	13.16
기울기효율(SE) (P_1 : 0.3-0.4 mA)	0.015	0.051	0.057
출력(P_1) [photocurrent in mA]	0.63	1.18	1.63

무반사 코팅 후 약 2.64배 증가하였다. 무반사 및 고반사 코팅 후 P_1 은 무반사 코팅 후보다 38% 증가하여 코팅 전보다 159% 증가하였고, 기울기 효율은 무반사 코팅 후보다 0.12배 증가하여 코팅 전보다 3.8배 증가하였다. 문턱전류는 무반사 및 고반사 코팅 후 무반사 코팅 후보다 15.55 mA 감소하였고, 코팅 전보다 0.91 mA 증가하였다.

6. 맺는 말

최근의 광학박막의 최적화 설계 및 합성 설계에 사용되는 Fourier 변환법, flip-flop법, 바늘 최적화법 등을 간단히 소개하였다. 광학박막에 관한 기본 이론을 모르더라도 이제는 주어진 목표 스펙트럼이 있으면 초기 설계 없이도 빠른 전산기가 단층부터 박막을 합성하여 최적화된 설계를 할 수 있다. 그러나 설계를 전산기에만 의존하는 것은 각 층의 굴절률과 두께에 관한 광학적 의미를 모르는 것이고, 실제 증착된 박막과 설계 박막과 차이가 날 때 해결 능력이 없게 된다. 한편 이 설계를 자동화된 증착기에 연결하여 전산기가 바로 증착할 수 있는 전자동 광학박막 증착기가 연구, 개발되고 있다.

전자빔 진공 증착 방법으로 제작한 광학박막은 미세 기둥 구조로 이루어져 조밀하지 못하고 광학적 특성이 안정되지 못하며 기계적 특성도 대응되는 덩과 투과율어리에 비하여 성능이 떨어진다. 최근 이온빔을 이용하여 광학 박막의 조밀도를 증가시키고 원소 조성비를 완전하게 하거나 조절할 수 있으며 외부 환경에 매우 강한 고품질의 광학 박막을 제작할 수 있는 여러 기술이 개발되었으며 이들을 간단히 비교 설명하였다.

광학 박막의 특성은 위에 언급한 기술뿐 아니라 사용하는 챔버의 기하학적 구조, 증착 물질 및 증착 조건에도 크게 달려 있다. 모든 면에서 덩어리의 특성을 갖는 박막은 아직까지 제작되고 있지 않으며 특정 기술 내에서도 최고 및 최저 품질의 박막이 제작될 수 있으므로, 이온빔을 이용하여 박막을 제작하기 위해서는 광학 박막에 관한 기본적인 기초 이론 및 실험이 뒷받침 되어야 한다. 또한 모든 광학 박막에 이온빔 기

술이 필요한 것은 아니나, 앞으로 주어진 상황 및 목적에 따라 특수한 광학 박막 및 고품질의 광학 박막 제작에는 반드시 이용될 것이므로 이에 대한 준비를 갖추어야 할 것이다.

또한 광학박막의 응용으로 최근 개발되거나 생산 중인 코팅을 소개하였다. 광학적 특성을 이용하는 코팅은 앞으로 수동 소자로서뿐만 아니라 능동 소자로서도 이용될 것이고, 빛을 이용하여 통신, 정보전달, 연산, 광메모리 저장 및 읽기, 광학 도파로 등의 광자기술에도 응용될 것이므로 미래의 응용 분야는 매우 넓다고 판단된다.

한편 대부분의 이온빔 기술이 기둥 미세 구조를 감소시키려 하고 있으나, 이온빔 기술은 미세 구조 및 조성비를 조절할 수 있으므로 새로운 광학 부품의 개발, 새로운 광학 박막의 합성, 새로운 미세 구조에 의한 박막의 성장 및 형성, 이온빔과 표면의 상호 작용 등에 이용할 수 있는 잠재력을 갖고 있으므로, 보다 많은 연구가 진행될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters* 2nd ed., (New York: Macmillan, 1986).
2. J. A. Dowrowolski and D. Lowe, "Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms", *Appl. Opt.* **17**, 3039-3050 (1978).
3. P. G. Verly and J. A. Dobrowolski, "Iterative correction process for optical thin film synthesis with the Fourier transform method", *Appl. Opt.* **29**, 3672-3684 (1990).
4. W. H. Southwell, "Coating design using very thin high- and low layers", *Appl. Opt.* **24**, 457-460 (1985).
5. A. V. Tikhoravov, M. K. Trubetskov, and G. W. DeBell, "Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings", *Appl. Opt.* **28**, 5493-5508 (1996).
6. M. Sikkens, I. J. Hodgkinson, F. Horowitz, H. A. Macleod, and J. J. Wharton, *Opt. Eng.* **25**, 142 (1986).
7. H. K. Pulker, *Coatings on Glass*, (Elsevier, Amsterdam, 1984).
8. B. J. Bartholomeuz, K.-H. Muller, M. R. Jacobson, *SPIE* **821** (1987).
9. H. A. Macleod, *SPIE* **288**, 580 (1981).
10. E. H. Hirsch and I. K. Varga, *Thin Solid Films*, **69**, 99 (1980).
11. K.-H. Mueller, *SPIE* **821**, 36 (1987).
12. P. J. Martin *et al.*, *Appl. Opt.* **26**, 1235 (1987).
13. G. A. Al-Jumaily, *Appl. Opt.* **28**, 3708 (1989).
14. P. J. Martin, *J. Mat. Sci.* **21**, 1 (1986).
15. H. J. Cho and C. K. Hwangbo, "Optical inhomogeneity and microstructure of ZrO_2 thin films prepared by ion-assisted deposition", *Appl. Opt.* **28**, 5545 (1996).
16. J. E. Yehoda *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A6**, 1631 (1988).
17. T. I. Oh, *Appl. Opt.* **27**, 4255 (1988).
18. H. Takashashi, "Temperature stability of thin-film narrow-band-

- pass filters produced by ion-assisted deposition", *Appl. Opt.* **34**, 667-675 (1995).
19. A. Zoller, R. Gotzmann, K. Matl, and D. Cushing, "Temperature-stable bandpass filters deposited with plasma ion-assisted deposition", *Appl. Opt.* **35**, 5609-5612 (1996).
 20. M. L. Fulton and R. Cabrera, "Ion-assisted-deposition using a high-output end-Hall ion source", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 12-14 (1998).
 21. C. M. Kennemore and U. J. Gibson, *Appl. Opt.* **23**, 3608 (1986).
 22. H. S. Niederwald, M. Mertin, U. B. Schallenberg, S. Laux, A. Duparre, N. Kaiser, M. Kennedy, and D. Ristau, "Ion assisted deposition of optical coatings on cold substrates-a comparison of processes using different ion sources", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 5-7 (1998).
 23. H. Windischmann, *J. Appl. Phys.* **62**, 1800 (1987).
 24. C. K. Hwangbo *et al.*, *Appl. Opt.* **28**, 2769 (1989).
 25. F. J. Lee and C. K. Hwangbo, "Characteristics of SiO_xN_y thin films prepared by ion beam assisted deposition", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 39-41 (1998).
 26. R. Adair and B. Hichwa, "Questions to consider in the design of AC-sputter system", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 70-71 (1998).
 27. W. T. Pawlewicz *et al.*, SPIE 325, 105-116 (1982).
 28. N. E. Holm and O. Christensen, *Thin Solid Films*, **85**, 71-75 (1981).
 29. W. J. Coleman, *Appl. Opt.* **13**, 946 (1974).
 30. K. Kawamata and T. Shouzu, "Keep-molecules sputtering deposition of Magnesium fluoride thin films", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 44-46 (1998).
 31. M. A. Scobey, US patent 5525199, "Low pressure reactive magnetron sputtering apparatus and method".
 32. D. W. Reicher, J. Sobczak, and J. P. Black, "Reduction of light scatter from reactively sputtered oxide films by ion bombardment", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 24-26 (1998).
 33. J. Becker, "Ion beam sputtering", in Handbook of Optical Properties, Vol.I, Thin Films for Optical Coatings, Eds R.E. Hummel and K.H. Guenther, (CRC Press, 1995).
 34. E. Quesnel, J. Dijon, P. Garrec, C. Pelle, L. Poupinet, and B. Rolland, "The latest developments in sputtered fluoride films", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 47-49 (1998).
 35. H. K. Pulker, SPIE 1019, 138 (1988).
 36. K. H. Guenther *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A7**, 1436 (1989).
 37. C. K. Carniglia, R. E. Laird, "A new transparent conductive antireflection coating for deposition by sputtering", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 411-413 (1998).
 38. Y. Zheng, K. Kikuchi, M. Yamasaki, K. Sonoi and K. Uehara, "Two-layer wideband antireflection coatings with an absorbing layer", *Appl. Opt.* **36**, 6335-6338 (1997).
 39. S. Pongratz and A. Zöller, "Plasma ion-assisted deposition: A promising technique for optical coatings", *J. Vac. Sci. Technol.* **A10**, 1987 (1992).
 40. T. Saito, K. Kana, T. Inoue, and S. Morikawa, "Application of engineering film and adhesive for Trinitron tube", SID 95 Digest, 28-31 (1995).
 41. F. Q. Zhou, M. Zhou and J. J. Pan, "Optical coating computer simulation of narrow bandpass filters for dense wavelength division multiplexing", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 223-225 (1998).
 42. www.oqa.com
 43. R. Szipocs, K. Ferencz, and C. Spielmann, and F. Krausz, "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers", *Opt. Lett.*, **19**, 2-1-203 (1994).
 44. R. Szipocs, "Theory and design of dispersive high reflectors for femtosecond pulse laser systems", in OIC98, OSA Tech Digest **9**, 290-292 (1998).
 45. R. Szipocs, K. Ferencz, and C. Spielmann, and F. Krausz, "Pushing the limits of femtosecond technology: chirped dielectric mirrors", *OPN*, June, 17-20 (1995).
 46. W. H. Southwell, "Spectral response calculations of rugate filters using coupled-wave theory", *J. Opt. Soc. Am.* **A5**, 1558-1564 (1988).
 47. C. K. Hwangbo *et al.*, *Appl. Opt.* **28**, 2779 (1989).
 48. 김효상, 박홍진, 황보창권, 김부균, 김형문, 주홍로, "반도체 레이저 단면의 실시간 무반사 및 고반사 코팅", *한국광학회지*, **8**, 395-402 (1997).
 49. 조현주, 이종오, 황보창권, "Fourier 변환을 이용한 불균일 굴절을 Rugate 필터의 설계", *한국광학회지*, **6**, 245-256 (1995).
 50. H. J. Cho, I. G. Yu, and C. K. Hwangbo, "Inhomogeneous optical SiO_xN_y thin films prepared by ion assisted deposition", *Nuc. Inst. and Met. in Physics ResearchB*, **121**, 137-140 (1997).