

Cr 박막의 이온빔 보조 증착*

유광림 · 황보창권

인하대학교 이과대학 물리학과

(1993년 10월 12일 받음)

저에너지의 Ar 이온빔으로 Cr 박막을 보조 증착하였으며, 이온빔 보조 증착 박막과 보통 박막의 광학적, 전기적 및 기계적 특성을 비교 분석하였다. 보통 박막에 비해 이온빔 보조 증착 Cr 박막의 광학 상수와 반사율은 증가하고 전기 비저항은 감소하여 bulk에 가까운 특성을 나타내었으며, 인장 응력은 감소하며 날알 크기는 큰 차이가 없었다. 성장하는 Cr 박막에 대한 이온빔의 충격과 기관의 이온빔 세척은 박막의 조밀도를 증가시키는 경향으로 박막의 내부 구조에 변화를 주어 Cr 박막의 광학적 및 전기적 특성을 개선시키는 것으로 판단된다.

I. 서 론

일반적으로 광학 박막은 진공 챔버에서 증착하고자 하는 물질을 열저항 혹은 전자빔으로 녹여 기관 위에 증착한다. 낮은 기관 온도의 비평형 상태에서 성장하는 광학 박막의 내부 구조는 기둥(column)과 빈공간(void)로 구성되어 있다.^[1] 광학 박막 내의 기둥의 양은 조밀도(packaging density)로 나타내며, 조밀도는 박막의 총부피(기둥+빈공간)에 대한 기둥 부피의 비로 정의된다.^[2] 이러한 기둥 구조 때문에 광학 박막의 조밀도는 bulk의 조밀도인 1.0 보다 작으며, 이에 따른 광학 박막의 광학적, 전기적 및 기계적 성능은 대응되는 bulk보다 떨어진다.^[3,4]

bulk에 가까우며 내구성이 높고 외부 환경의 변화에 강한 광학 박막의 연구 혹은 개발에 사용중인 이온빔 기술로는 기관에 도착한 증착 입자에 이온충에서 나온 이온빔의 에너지와 기계적 운동량을 전달해 주어 증착 입자의 이동을 증가시키는 이온빔 보조 증착(ion-beam assisted deposition), 이온충에서 나오는 이온빔으로 타겟을 때려 주어 튀어 나온 높은 에너지의 증착 입자가 기관에 도착하게 하는 이온빔 스퍼터링(ion beam sputtering), 이온빔으로 증착 물질을 이온화하여 가속된 증착 입자가 기관에 도착하여 성장시키는 반응 저전압 이온 플레이팅(reactive low-voltage ion plating) 등이 있다.^[5,6,7]

위의 여러 이온빔 기술 중 이온충을 기존의 진공 증착기에 부착하여 사용하고 있는 이온빔 보조 증착법은 기존의 진공 챔버를 크게 변화시키지 않으며, 박막의 증착 변수와는 독립적으로 박막의 미세 구조를 변화시킬 수 있는 이온빔 변수를 기존의 진공 증착법에 추가시킬 수 있다.

유전체 박막의 경우 이온빔 보조 증착은 박막의 형성기부터 높은 에너지의 이온빔으로 기관에 도착한 증착 입자의 이동을 증가시켜 기둥구조를 감소시키고 조밀도를 bulk에 가깝게 증가시킬 수 있다.^[8] 금속 박막은 이온빔 보조 증착으로 기관에 대한 접착력이 증가되고 습기에 보통 박막보다 강하며, 이온빔 충격(bombardment)으로 박막의 응력이 완화되거나 인장 응력(tensile stress)에서 압축 응력(compressive stress)으로 반전되기도 한다.^[9,10,11] 또한 질소와 산소와 같은 반응 이온빔을 사용하면 굴절률을 변화시킬 수 있는 oxynitride 박막을 증착할 수 있으며, 비균일 굴절률 박막을 주기적으로 반복하여 고차 반사를 줄인 rugate 필터도 이온빔의 보조로 증착되고 있다.^[12]

본 연구에서는 이온빔 보조 증착으로 Cr 박막을 제작하고, 이들의 광학적, 기계적 및 전기적 특성을 기존의 진공 증착법으로 제작된 보통 박막과 비교하였다. Cr 박막은 다른 금속 박막과 비교하여 유리에 대한 접착력이 매우 높고, 공기 중에 노출될 경우 쉽게 산화되어 얇은 산화 박막을 형성하며 외부 환경에 강하다. 광학적 목적으로는 얇은 두께를 증착할 경우 빛의 양을 분리시키는

* 본 연구는 1992년도 교육부 기초과학 육성 연구비와 인하대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행된 과제임.

광속 분리기에 사용되고 있으며, 금 혹은 구리 등의 금속 박막을 유리 기판 위에 증착하기 전에 Cr 박막을 buffer층으로 유리 기판 위에 증착을 하여 금속 박막의 접착력을 높이기도 하며, 광학적 망선(reticle) 제작과 반도체 분야에서 photomask로 많이 이용되고 있다. 광학 박막 분야에서는 열저항 혹은 전자빔으로, 반도체 분야에서는 주로 스퍼터링으로 제작하는 Cr 박막은 두께가 얇을 경우 박막에 작은 구멍(pinhole)이 생겨 광학적 특성이 떨어지거나 에칭할 때 에칭선이 뚜렷하지 않은 경우가 있어, 높은 기판 온도에서 증착하거나 증착 후 열처리를 한다.

Cr 박막에 관한 이온 보조 증착 연구로는 고에너지(11 KeV)의 이온빔을 적정량 이상으로 박막에 충격을 줄 경우 반사율이 증가하고 인장응력에서 압축응력으로 반전되었으며,^[13] 스퍼터링에서도 Ar 가스의 압력을 낮게 하면 역시 응력이 반전되는 것으로 보고되고 있다.^[14,15]

본 연구에서는 저에너지 이온빔으로 보조 증착된 Cr 박막의 광학 상수, 반사율, 전기 비저항, 결정 구조, 응력, 날알 크기 등을 측정하였으며, 이온빔 충격에 의해 변화한 박막의 내부 구조가 박막의 광학적 및 전기적 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

II. 실험 장치

1. 이온빔 보조 증착 Cr 박막의 준비

그림 1은 본 실험에 사용한 진공 증착기(Edwards)로 6" 확산 펌프(diffusion pump)와 직경 40 cm 높이 80 cm의 bell-jar형 챔버로 구성되어 있다. 증착되는 박막의 두께와 증착율을 측정하기 위한 수정결정 두께 측정기(quartz-crystal thickness monitor, Edwards FTM-5), 챔버 내의 온도를 측정하는 열전대, 기판의 온도를 조절하는 할로겐 램프, 증착 물질을 가열시키는 보트, 가림판(shutter), 이온총, 이온빔 전류 밀도 측정용 탐침 등을 내부에 갖추고 있다. 기판과 이온총 사이의 거리는 약 20 cm 이고 기판과 보트 사이의 거리는 약 30 cm 이다. 기판의 법선에 대한 이온총의 기울기는 약 20°이고 보트는 거의 수직이다.

입자 크기가 약 3~5 mm인 Cr을 W 보우트(두께 0.2 mm)에서 증발시켰으며, 수정결정 두께 측정기로 측정된 Cr 박막의 증착율은 약 1 nm/s 이고 두께는 약 300 nm이었다. stylus(Tenco Alpha Step 2000)로 측정된 박막의 실제 두께는 보통 박막은 250 nm이고, 이온빔 보조 증착된 박막은 이온빔에 의해 일부 Cr 입자가 sputter-

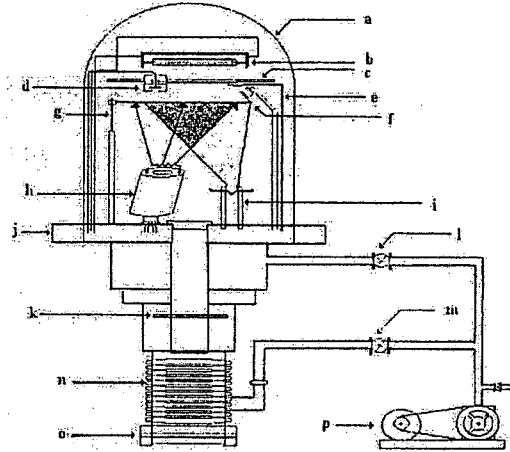


그림 1. 이온빔 보조 증착 챔버의 구조

- (a) bell-jar (b) halogen lamp (c) sample holder
- (d) Faraday probe (e) thermocouple (f) quartz crystal thickness monitor (g) shutter (h) ion source (i) boat (j) base plate (k) high vacuum valve (l) roughing valve (m) foreline valve (n) diffusion pump (o) diffusion pump heater (p) rotary pump.

out되므로 이온빔의 전류 밀도가 증가함에 따라 250 nm부터 180 nm까지 감소하였다. 기판의 온도는 100°C이며 증착 물질을 녹이는 보트와 이온총에서 나오는 열로부터 끝날 때의 온도는 약 140~180 °C 이었다.

이온총을 사용할 경우 챔버의 기본 진공은 7.0×10^{-6} torr이었고, 이온총 가스관을 통하여 Ar 가스를 이온총에 주입하였으며, Ar 가스의 압력은 이온빔 전류 밀도의 변화에 따라 $1.5 \sim 2.1 \times 10^{-4}$ torr로 변화시켰다. Ar 가스는 증착 전 약 30분 동안 홀러 챔버의 압력이 안정되도록 하였다. 이온빔 전류 밀도의 변화에 따라 이온총의 양극 전압은 55~100 V, 양극 전류는 0.4~5.0 A, 음극 전류는 10~15 A이었다. 기판 옆에 놓여 있는 Faraday 컵으로 측정된 이온빔 전류 밀도는 $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로부터 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 까지 $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 씩 증가시켰다.

모든 기판은 챔버에 장착 전에 초음파 세척기에서 화학적 세척을 하였으며, 챔버 내 장착 후 증착하기 전에 이온빔으로 5분동안 이온빔 세척을 하였다. 기판은 70×25 mm의 슬라이드 글라스와 50×24 mm의 실리콘 웨이퍼를 특성 조사의 목적에 따라 사용하였다. 슬라이드 글라스에 증착한 박막은 반사율, 전기 비저항, 결정 구조 측정에 사용하였고, 실리콘 웨이퍼는 광학 상수 측정에

사용하였다.

2. 이온총의 특성

이온빔 보조 증착에 사용한 이온총은 본 연구실에서 제작한 그리드가 없는 end-Hall 이온총이다.^[16] 본 연구에서는 방전 챔버로 유입되는 가스의 손실을 줄이기 위하여 기존의 이온총에 가스 가이드관을 새로이 추가하여 이온총의 이온화 효율을 개선하였으며, 이온총의 특성 조사로서 음극에서 자기장의 크기를 변화시키며 이온빔 전류 밀도를 측정하여 자기장이 이온빔 전류에 미치는 영향을 조사하였다.

그림 2~4는 자기장을 15, 50, 70 Gauss로 변화시키며 이온빔 전류 밀도의 분포를 측정한 것으로, 양극 전압은 120 V, 양극 전류는 4.39~4.57 A, 음극 전류는 13.5 A이고 Ar 가스의 압력은 1.6×10^{-4} torr이었다. 이온빔 전류 밀도는 Faraday 컵으로 이온총의 중앙인 빔축으로부터 동경 방향(radial distance)으로 약 1.3 cm 간격으로 약 22 cm까지 측정하였으며, 빔축 위에서 음극으로부터의 거리(axial distance)를 15 cm부터 30 cm까지 5 cm 간격으로 증가시키며 측정하였다. 15 Gauss일 때의 영구 자석은 Ferrite이고 50 Gauss와 70 Gauss일 때 영구 자석은 Alnico이다.

그림 2는 자기장이 70 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포이다. 빔축 거리가 15 cm일 때 빔축 위의 이온빔 전류 밀도는 최대 $830 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이며, 동경 방향으로 약 4 cm일 때 최대치의 약 80%로 감소하고 약 7 cm일 때 50%로 급격히 감소한다. 동경 방향으로 15 cm 이후에는

이온빔의 변화가 매우 적으며, 22 cm일 때 약 $160 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이었다. 빔축 거리가 20 cm일 때 빔축 위에서의 최대 전류는 $490 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소하며, 동경 방향으로 이온빔 전류의 감소는 위와 유사한 경향을 보여 주고 있다. 빔축 거리가 30 cm일 때 빔축 위에서는 $170 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 작으나 동경 방향으로 이온빔 전류의 감소는 매우 적어 22 cm에서 $120 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 최대치의 70%를 유지하였다. 빔축 거리가 증가함에 따라 이온빔의 크기는 작아지며 동경 방향으로의 이온빔 분포는 매우 균일해지는 것을 알 수 있다.

그림 3은 자기장이 50 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포이다. 빔축 거리가 15 cm일 때 빔축 위의 이온빔 전류 밀도는 최대 $650 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이며, 동경 방향으로는 급격히 감소하며 7 cm일 때 50%가 되며, 15 cm 이후에는 이온빔의 변화가 매우 적다. 빔축 거리가 20, 25 cm로 증가함에 따라 동경 방향으로의 이온빔 전류 밀도는 위와 유사한 경향을 보여 주고 있다. 빔축 거리가 30 cm 일 때의 이온빔 분포는 70 Gauss일 때와 거의 유사하여 동경 방향으로 매우 균일하다. 그림 4는 자기장이 15 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포이다. 이온빔 전류 밀도의 크기가 작으며 동경 방향으로의 분포는 균일하다.

그림 5는 빔축 위에서 빔축 거리에 따른 이온빔 전류 밀도의 분포를 자기장의 변화에 따라 나타낸 것이다. 자기장이 일정할 때 빔축 거리가 증가함에 따라 이온빔 전류가 감소하며, 빔축 거리가 일정할 때 자기장이 증가할수록 이온빔 전류가 큰 것을 알 수 있다.

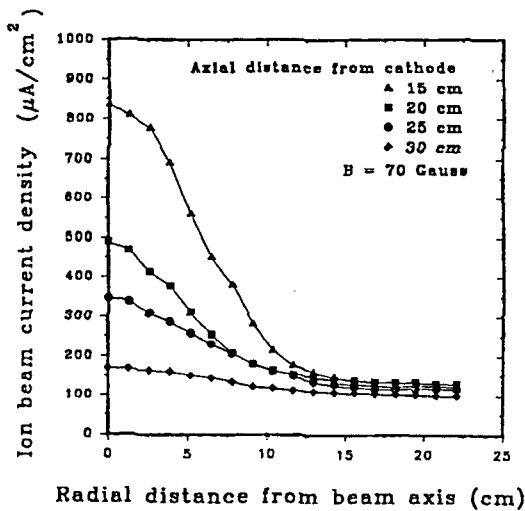


그림 2. B=70 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포.

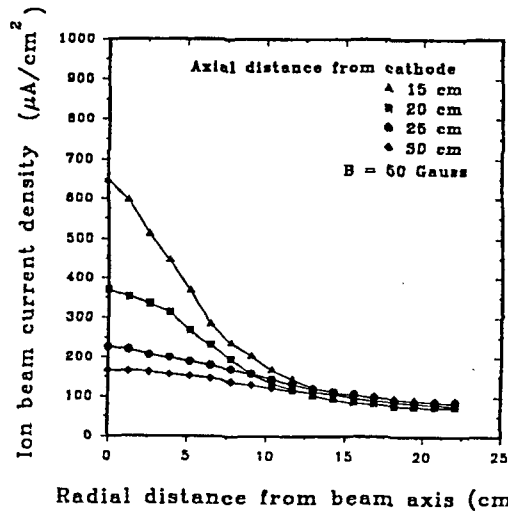


그림 3. B=50 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포.

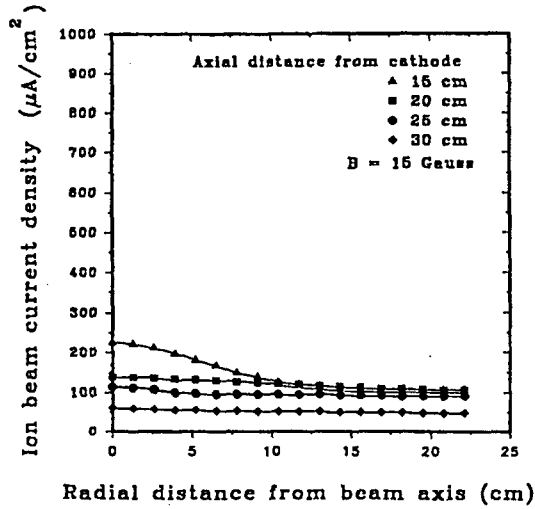


그림 4. B=15 Gauss일 때의 이온빔 전류 밀도 분포

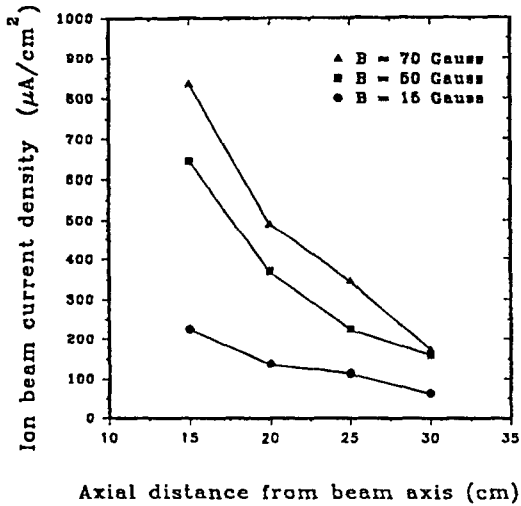


그림 5. 빔축 거리에 따른 이온빔 전류 밀도 분포

III. 이온빔 보조 증착된 Cr 박막의 특성

Cr 박막의 광학적 특성은 타원편광해석계(ellipsometer)에서 박막의 굴절률(n)과 소멸계수(k)를 측정하였고, 분광광도계(spectrophotometer)에서는 반사율을 측정하였다. 기계적 특성으로는 X-선 회절계(X-ray diffractometer)를 이용하여 박막의 결정 구조 및 격자 간격 등을 조사하였으며, 전기적 특성으로는 4점 탐침(4-point probe)으로 박막의 전기 비저항을 측정하였다. 본 논문에서 이온빔 보조 증착을 한 박막은 IBAD 박막으로,

이온빔 보조증착을 하지 않은 박막은 보통(conventional) 박막으로 부르겠다.

1. 광학적 특성

광학적 특성으로는 타원편광해석계를 이용하여 Cr 박막의 광학 상수를 측정하였으며 분광광도계를 이용하여 Cr 박막의 반사율을 측정하였다.

1.1 타원편광해석계

타원편광해석계(Rudolf Auto ELII)를 이용하여 두께가 약 180~250 nm인 Cr 박막의 광학 상수(굴절률 n, 소멸계수 k)를 측정하였다. 광원의 파장은 633 nm이고 입사각은 70°이다.

그림 6은 측정된 Cr 박막의 굴절률(n)과 소멸계수(k)를 이온빔 전류 밀도(J)의 변화에 따라 나타낸 것이다. 이온빔 전류 밀도가 J=0 μA/cm²인 보통 박막의 광학 상수는 (n=2.804, k=2.904)이다.

IBAD 박막의 경우 이온빔 전류 밀도가 50~100 μA/cm²일 때 광학 상수의 변화는 매우 작으나, 이온빔 전류 밀도가 200 μA/cm² 이상으로 증가하면 n, k 모두 증가하여, 450 μA/cm²에서 n=3.501, k=4.284로 증가하였다. 이온빔의 영향으로 굴절률과 소멸 계수가 증가하며, 특히 소멸 계수의 증가율이 굴절률보다 크다.

1.2 분광 광도계

박막의 반사율을 분광광도계(Hitachi UV2000)에서 Al을 기준으로 하여 400~700 nm의 파장 영역에서 측

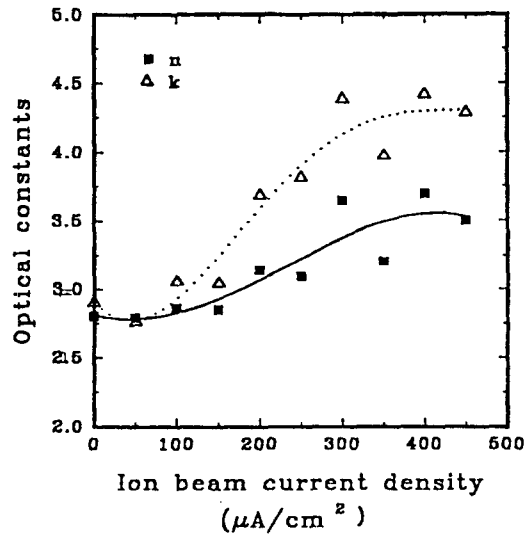


그림 6. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Cr 박막의 굴절률과 소멸 계수.

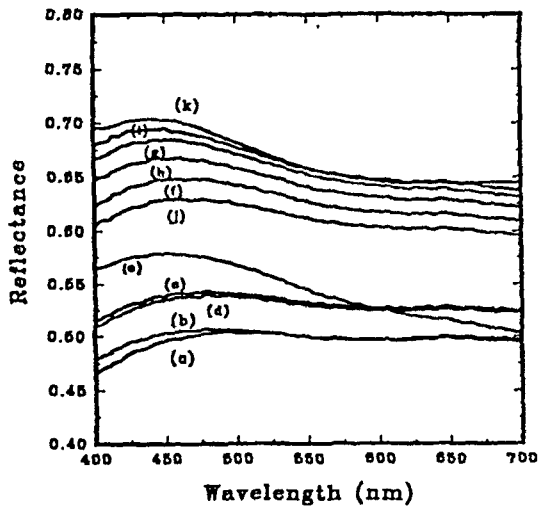


그림 7. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Cr 박막의 반사율: 이온빔 전류 밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (a) 0 (b) 50 (c) 100 (d) 150 (e) 200 (f) 250 (g) 300 (h) 350 (i) 400 (j) 450 (k) bulk.

정하였으며, 그림 7에 Al에 대해 교정된^[17] 반사율을 나타내었다.

전파장 영역에서 IBAD 박막의 반사율이 보통 박막보다 크다. 이온빔 전류 밀도가 $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 반사율은 보통 박막과 거의 비슷하며, $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상이 되면 반사율이 증가하며 $250 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상에서는 현저한 차이를 보여주고 있다. $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 반사율은 최대이며 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 가 되면 다시 감소한다. 참고로 bulk Cr의 반사율을 표시하였다.^[18] $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 와 $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때의 반사율은 짧은 파장 영역($400\sim 500 \text{nm}$)에서는 bulk의 반사율보다 작으나 나머지 영역에서는 bulk와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

2. 전기 비저항 측정

일반적으로 박막의 전기 비저항은 bulk보다 작다. 이는 박막이 성장하는 동안 형성된 미세 구조가 bulk와 다르기 때문이다. 포논 산란 이외에 박막의 다결정 구조, 낱알 경계, 낱알 크기, 성장하는 동안 생긴 빈공간(void), 결함(defect), 불순물, 잔류 가스, 표면 거칠기, 국부적 전하 분포 등이 자유 전자의 흐름에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^[19]

유리 기판 위에 증착한 Cr 박막의 전기 비저항은 4점 탐침(Veeco FPP-5000)를 이용하여 측정하였다. 비저항 $\rho[\Omega\text{-cm}]$ 는

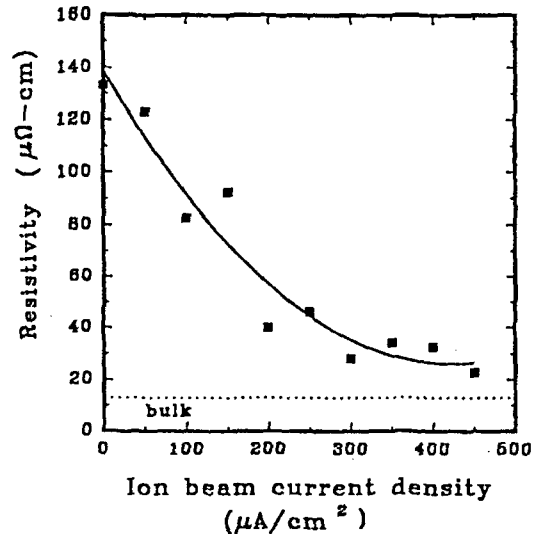


그림 8. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Cr 박막의 전기 비저항.

$$\rho = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) R_{av} d_f$$

로 주어진다. 여기서 $(\pi/\ln 2)R_{av}$ 는 sheet resistance [Ω/\square]의 평균값이고 d_f 는 박막의 두께이다.

Cr 박막의 전기 비저항을 이온빔 전류 밀도의 증가에 따라 나타낸 것이 그림 8이다. 보통 박막의 비저항은 $133 \mu\Omega\text{-cm}$ 로 매우 크다. 이온빔 전류 밀도 $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때부터 IBAD 박막의 비저항은 감소하기 시작하며, $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상에서는 약 $40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 급격히 감소하며, $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서는 $23 \mu\Omega\text{-cm}$ 으로 최소값을 나타내었다.

bulk Cr의 비저항($12.9 \mu\Omega\text{-cm}$)^[17]을 참고로 그림 8에 표시하였다. 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 IBAD 박막의 전기 비저항이 bulk Cr에 접근하고 있다. 즉 이온빔이 자라는 박막의 구조를 자유 전자의 산란이 적은 구조로 바꿔주고 있음을 알 수 있다.

3. X-선 회절 분석

X-선 회절계(Gogaku D/MAX IIA 2KW)를 이용하여 다결정 Cr 박막의 선호된 방향(preferred orientation), 격자간격(lattice spacing), 낱알 크기(grain size), 변형(strain) 및 응력(stress)을 측정하였다.

모든 Cr 박막은 다결정이며 (110) 방향의 세기가 가장 강하므로 (110) 방향만 고려하겠다. 박막면에 수직인 격자간격 d_{110} 의 크기를 이온빔 전류 밀도의 증가에 따라 표 1에 나타내었다. 참고로 JCPDS에^[20] 의한 분말(pow-

표 1. Cr 박막의 격자 간격, 변형 및 낱알 크기

$J(\mu A/cm^2)$	$d_{110}(\text{\AA})$	$\epsilon_z (\times 10^{-3})$	σ_f (GPa)	$L_{110}(\text{\AA})$
0	2.025	-7.353	4.560	121.9
50	2.030	-4.902	3.040	125.3
100	2.029	-5.392	3.344	125.4
150	2.029	-5.392	3.344	108.9
250	2.029	-5.392	3.344	108.8
300	2.030	-4.902	3.040	121.7
350	2.027	-6.373	3.952	109.0
400	2.034	-2.941	1.824	118.0
450	2.036	-1.961	1.216	105.8
JCPDS	2.040			

der)의 격자간격도 표 1에 표시하였다.

이온빔 충격을 받은 박막들의 d_{110} 격자간격은 보통 박막보다 약간 증가하며 이온빔 밀도가 $300 \mu A/cm^2$ 까지는 큰 변화가 없으나, $400 \mu A/cm^2$ 이상에서는 분말의 격자간격에 가까이 접근하는 큰 변화를 보여 주고 있다.

기판에 수직인 다결정의 격자간격 변화는 수직 방향(z축) 다결정의 변형(strain, ϵ_z)에 영향을 주며, 이들 사이의 관계는

$$\epsilon_z = \frac{d - d_0}{d_0}$$

주어진다.^[21] 여기서 d 는 변형된(strained) 박막의 격자간격이고, d_0 는 변형되지 않은(unstrained) 격자간격으로 본 논문에서는 JCPDS의 격자간격을 사용하였다.

등방성 박막이라고 가정할 경우 변형에 의한 기판에 평행한 박막 평면(xy 평면)에서의 평균 응력 σ_f 은

$$\sigma_f = -\left(\frac{E}{2\nu}\right)\epsilon_z$$

로 주어진다.^[21] 여기서 E 는 박막의 Young률로 Cr의 경우 $E=273$ GPa이고 ν 는 Poisson 비로 Cr의 경우 0.22를 사용하였다.^[22]

위의 관계식들을 이용하여 (110) 방향 다결정의 변형과 응력을 계산하여 표 1에 나타내었으며, 응력을 이온빔 전류 밀도의 증가에 따라 그림 9에 나타내었다. 모든 박막의 격자 간격이 분말보다 작으므로, 기판에 수직인 방향으로 압축 변형을 받으며, 기판에 평행한 박막 평면 상에서는 인장 응력을 가지고 있다. IBAD 박막의 인장 응력은 보통 박막보다 작으며, 이온빔 전류 밀도가 $50 \sim 300 \mu A/cm^2$ 일 때 응력의 변화는 거의 없으나 $400 \mu A/cm^2$ 와 $450 \mu A/cm^2$ 에서는 급격히 감소하여 약 1.2 GPa가

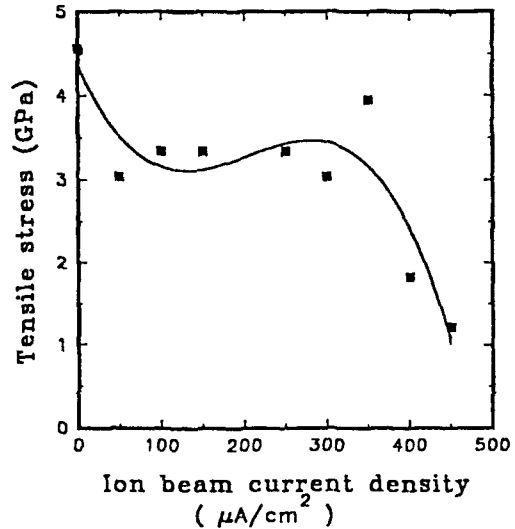


그림 9. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Cr 박막의 인장 응력.

되었다.

다결정 낱알의 크기(L_{110})는 X-선 회절 세기의 반치폭으로부터 Scherrer 방정식에 의하여

$$L_{110} = \frac{\kappa\lambda}{\beta\cos\theta}$$

로 주어진다.^[21] 여기서 κ 는 상수로 1을 취하였으며, λ 는 CuK α 인 1.5405\AA 이고, θ 는 Bragg 각도이며 β 는 2θ 로 나타낸 반치폭이다. 낱알 크기를 표 1에 나타내었다. 보통 박막의 낱알 크기는 약 122\AA 으로 작으며, IBAD 박막도 $105 \sim 125 \text{\AA}$ 으로 보통 박막과 큰 차이를 나타내지 않는다.

IV. 논 의

bulk Cr의 광학 상수는 참고 문헌에 따라 차이가 나지만 633 nm 근처에서 표 2와 같다. 그림 6의 보통 박막의 굴절률과 소멸 계수는 표 2와 비교할 때 매우 작으며, 이온빔 전류 밀도가 $300 \mu A/cm^2$ 이상일 때 IBAD 박막들은 표 2에 가까운 광학 상수를 나타낸다.

그림 6에서 이온빔 전류 밀도의 증가에 따라 소멸 계수(k)의 증가율이 굴절률(n)의 증가율보다 크다는 것은 Cr 박막의 반사율이 증가함을 의미한다. 타원편광계에서 측정된 n, k 의 변화를 보다 쉽게 이해하기 위해 n 과 k 로부터 박막의 수직 반사율을 계산한 것이 그림 10에

표 2. Cr 금속의 광학 상수

파장(nm)	n	k	반사율	참고문헌
582.1	3.34	4.38	0.645	18
610.8	3.48	4.36	0.644	18
700.5	3.84	4.37	0.645	18
579	2.97	4.85	0.698	17

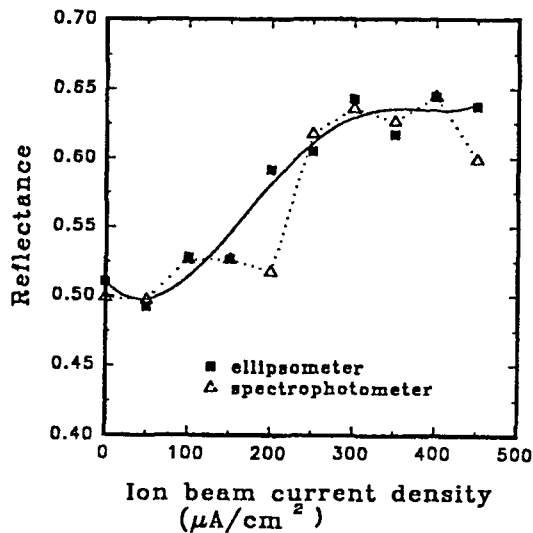


그림 10. 타원편광해석계에서 구한 (n, k) 로부터 계산한 반사율과 분광 광도계에서 측정된 반사율.

나타나 있다.

보통 박막의 반사율이 0.51이다. IBAD 박막의 경우 $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 까지는 반사율이 보통 박막과 비슷하나, 이온빔 전류 밀도가 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상에서는 반사율이 약 0.60 이상으로 증가하여, $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 와 $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서는 최대 0.64가 되며 이는 표 2에 계산된 bulk의 반사율과 비슷하다.

IBAD 박막에서 반사율의 증가를 직접 측정하기 위해 분광광도계를 이용하였으며, 분광광도계에서 측정된 633 nm에서의 반사율을 타원편광해석계에서 계산한 반사율과 비교하기 위해 그림 10에 함께 나타내었다.

분광광도계에서 측정된 보통 박막의 반사율은 약 0.50으로 타원편광해석계의 결과와 비슷하다. IBAD 박막에서도 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 과 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 를 제외한 대부분 분광광도계의 반사율이 타원편광해석계의 결과와 비슷하다. 분광광도계에서 측정된 최대 반사율은 $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서

약 0.64이며, 이는 bulk의 반사율에 가까운 것이다. 따라서 이온 보조 증착에 의해 Cr 박막의 반사율이 증가하고 bulk에 접근하고 있음을 직접 확인할 수 있었다.

$200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 분광광도계에 측정된 반사율은(그림 7) 파장이 긴 550~700 nm 영역에서 급격히 감소하여 다른 박막들과 다른 경향을 보여 주고 있으며, 타원편광해석계의 결과와는 약 0.08의 반사율 차이를 나타낸다. 한편 그림 8에서 전기 비저항은 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상일 때부터 매우 작아, 타원편광해석계에서 계산한 반사율이 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상일 때부터 큰 것과 유사한 경향을 보여 주고 있다. 이것은 분광광도계의 측정이 잘못된 것이 아니라, $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서 증착된 박막의 경우 getter로 널리 알려진 Cr 박막 혹은 박막 표면이 산화되어 Cr_2O_3 박막이 형성되고, 이 유전체 박막에 의한 간섭 효과때문에 반사율이 감소한 것으로 여겨진다. 이 박막은 X-선 회절계 측정에서 다결정 구조가 아니라 비정질 구조를 나타냈으며(표 1와 그림 9에 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때의 시료가 없음), 이는 표면에 형성된 두꺼운 산화 박막때문인 것으로 판단된다. 즉 타원편광해석계와 전기 비저항 측정에서는 산화박막과 그 밑의 Cr 박막을 측정하였으나, 분광광도계와 X-선 회절 측정에서는 산화박막에 의해 Cr 박막의 측정이 방해받은 것으로 여겨진다. $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에서 증착된 박막만 산화가 많이 되었는지는 계속 연구 중이다.

IBAD 박막의 경우 타원편광해석계에서 측정된 광학 상수의 변화와 분광광도계에서 측정된 반사율의 증가는 Cr 박막의 광학적 특성이 bulk에 가까이 가고 있다는 면에서 서로 일치하고 있다. 즉 이온빔에 의한 광학 상수의 변화는 반사율을 증가시키며 이는 Cr 박막이 이온빔의 충격으로 bulk Cr에 가까이 가고 있는 것으로 판단된다. X-선 회절 분석에서 낱알의 크기는 큰 변화가 없으므로, IBAD 박막들은 보통 박막보다 조밀한 것으로 유추할 수 있다.

본 연구에서 X-선 회절을 이용하여 측정된 다결정 Cr 박막의 낱알 크기는 Nestell 등^[23]이 실온의 기판 온도에서 증착한 Cr 박막의 낱알 크기와 유사하다. 그들의 결과에 따르면 실온 기판 온도에서 증착한 Cr 박막은 빛의 반사율과 전기 비저항이 bulk에 비해 낮으며 낱알 크기가 작으나, 고온(약 700°C 와 1000°C)에서 증착한 Cr 박막은 낱알 크기가 약 400 \AA 로 증가하여 반사율과 전기 비저항이 bulk에 가깝다.^[24] 기판 온도가 낮은 경우 기동 구조의 낱알 크기가 작고 낱알 경계가 증가하여 박막의 구조가 조밀하고 균일하지 못하므로, 반사율과 전기 비저항이 작은 것으로 설명하고 있다.

본 연구에서 Cr 박막의 기판 온도는 약 100~180°C로 비교적 낮으며, 보통 박막과 IBAD 박막의 낱알 크기가 비슷하나 광학 상수, 반사율과 전기 비저항은 큰 차이를 보여 주고 있다. 보통 박막과 IBAD 박막 모두 기판 온도가 거의 같고 낱알 크기가 비슷한 것로부터 이온빔이 Cr 박막의 낱알 크기에는 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있으며, IBAD 박막의 경우 낱알의 크기는 유사하나 보통 박막보다 기판에 평행한 방향의 인장 응력은 감소되었다. 이로부터 IBAD 박막에서 광학 상수, 반사율과 전기 비저항이 bulk에 가까운 것은 낱알의 크기 때문이 아니라, 이온빔 충격이 Cr 박막의 조밀도(packaging density)를 증가시키고 낱알 사이의 빈공간을 감소시켜 bulk에 가까운보다 균일한 박막으로 만들었기 때문으로 사료된다. 또한 이온빔의 충격에 의한 Cr 박막 내의 불순물 감소, Cr의 산소 getter로서의 영향력 감소 및 증착전 이온빔에 의한 기판 세척 등이 전기 비저항의 감소에 영향을 주었을 것으로 판단된다. stylus에서 측정된 박막의 표면 거칠기는 모든 박막이 약 70~90 nm로 큰 차이를 보이지 않아 이온빔이 표면 거칠기의 개선에 기여를 하지 않는 것으로 판단되며, 표면 거칠기의 개선에 의한 전기 비저항의 감소는 없는 것으로 보인다.

따라서 높은 기판 온도에서 나타나는 Cr 박막의 bulk에 가까운 광학적, 전기적 및 기계적 특성을 낮은 기판 온도에서 저에너지 이온빔의 충격으로 얻을 수 있으며, 이온빔의 충격은 높은 기판 온도의 효과인 열처리와는 다른 미세 구조의 특성을 박막에 주고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

End-Hall형 이온총을 이용하여 진공 증착 Cr 박막을 Ar 이온빔으로 보조 증착하였으며, IBAD 박막과 보통 박막의 광학적, 기계적 및 전기적 특성을 비교 분석하여, 이온빔 충격에 의한 박막의 내부 구조 변화를 연구하였다.

광학적 특성으로 Cr 박막의 광학 상수는 굴절률과 소멸 계수가 이온빔의 영향으로 증가하였으며 소멸계수의 증가율이 굴절률보다 크다. IBAD 박막의 반사율은 보통 박막보다 크며 이는 광학 상수의 변화와 일치하고 있다. 전기적 특성으로 IBAD 박막의 전기 비저항은 보통 박막보다 현저히 감소하였다. 기계적 특성으로 IBAD 박막의 인장 응력은 이온빔 진류 밀도가 크면 감소하는 경향을 보여 주고 있으며 낱알 크기는 보통 박막과 큰 차이가 없었다.

따라서 이온빔 보조 증착으로 Cr 박막의 광학적, 전기적 및 기계적 특성이 개선되어 bulk에 가까운 Cr 박막을 제작할 수 있었으며, 이는 기판의 이온빔 세척과 성장하는 박막에 대한 이온빔의 충격이 박막의 조밀도를 증가시키는 경향으로 박막의 내부 구조에 변화를 주고 박막의 불순물이 감소되었기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] K.H. Guenther, "Microstructure of vapor-deposited optical coatings", *Appl. Opt.* **23**, 3806(1984).
- [2] H.A. Macleod, "Microstructure of optical thin films", *SPIE* **325**, 21(1982).
- [3] H.K. Pulker, *Coatings on Glass*, (Elsevier, Oxford, 1984).
- [4] H.A. Macleod, "Performance-limiting factors in optical coatings", *SPIE* **288**, 580(1981).
- [5] J.M.E. Harper, J.J. Cuomo, R.J. Gambino, and H.R. Kaufman, "Modification of Thin Film Properties by Ion Bombardment during Deposition," in *Ion Bombardment Modification of Surfaces*, O. Auciello and R. Kelly, Eds. (Elsevier, Amsterdam, 1984).
- [6] P.J. Martin and R.P. Netterfield, "Optical films produced by ion-based techniques," in *Progress in Optics XXIII*, E. Wolf, Ed. (North-Holland, Amsterdam, 1986).
- [7] P.J. Martin, H.A. Macleod, R.P. Netterfield, C.G. Pacey, and W.G. Sainty, "Ion-beam-assisted Deposition of Thin Films," *Appl. Opt.* **22**, 178 (1983).
- [8] P.J. Martin, R.P. Netterfield and W.J. Sainty, "Modification of the Optical and Structural Properties of Dielectric ZrO₂ films by Ion-assisted Deposition," *J. Appl. Phys.* **55**, 235 (1984).
- [9] P.J. Martin, W.G. Sainty, and R.P. Netterfield, "Enhanced Gold Film Bonding by Ion-assisted Deposition," *Appl. Opt.* **23**, 2688 (1984).
- [10] F. Parmigiani, E. Kay, T.C. Huang, J. Perrin, M. Jurich, and J.D. Swalen, "Optical and Electrical Properties of Thin Silver Films Grown under Ion Bombardment," *Phys. Rev.* **B33**, 879 (1985).
- [11] C.K. Hwangbo, L.J. Lingg, J.P. Lehan, H.A. Macleod, J.L. Makous, and S.Y. Kim, "Ion-Assisted Deposition of Thermally Evaporated Ag and Al Films," *Appl. Opt.* **28**, 2769(1989).
- [12] C.K. Hwangbo, L.J. Lingg, J.P. Lehan, H.A. Macleod, and F. Suits, "Reactive Ion-Assisted Deposition of Aluminum Oxynitride Thin Films," *Appl. Opt.* **28**, 2779(1989).

- [13] D.W. Hoffman and M.R. Gaertner, "Modification of evaporated chromium by concurrent ion bombardment," *J. Vac. Sci. Technol.* **A17**, 425(1980).
- [14] D.W. Hoffman and J.A. Thornton, "Internal Stresses in Sputtered Chromium," *Thin Solid Films* **40**, 355 (1977).
- [15] J.A. Thornton, J. Tabock, and D.W. Hoffman, "Internal Stresses in Metallic Films Deposited by Cylindrical Magnetron Sputtering," *Thin Solid Films* **64**, 111 (1979).
- [16] 황보창권, 송석균, "그리드가 없는 이온총의 제작과 작동 특성," *응용물리* **5**, 530(1992).
- [17] D.E. Gray, Ed., *American Institute of Physics Handbook*, 3rd Ed. (McGraw-Hill, New York, 1972).
- [18] E.D. Paulik, ed. *Handbook of Optical Constants of Solids II*, (Academic Press, San Diego, 1991).
- [19] K.L. Chopra, *Thin Film Phenomena* (McGraw-Hill, New York, 1969).
- [20] Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 1601 Park Lane, Swarthmore, PA (1969).
- [21] H.P. Klug and L.E. Alexander, *X-Ray Diffraction Procedures*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1974).
- [22] M. Janda and O. Stefan, "Intrinsic Stress in Chromium Thin Films Measured by a Novel Method," *Thin Solid Films* **112**, 127(1984).
- [23] J.E. Nestell, Jr., R.W. Christy, M.H. Cohen, and G.C. Ruben, "Structure and Optical Properties of Evaporated Films of the Cr-and V-group Metals," *J. Appl. Phys.* **51**, 655 (1980).
- [24] J.E. Nestell, Jr. and R.W. Christy, "Optical Conductivity of bcc Transition Metals: V, Nb, Ta, Cr, Mo, W," *Phys. Rev.* **B21**, 3173 (1980).

Ion-beam Assisted Deposition of Thermally Evaporated Cr Thin Films

Kwang-Lim Yoo and Chang Kwon Hwangbo
Department of Physics, College of Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received: October 12, 1993)

Thermally evaporated Cr thin films were prepared by low energy Ar ion-beam assisted deposition (IBAD) and the optical, electrical and mechanical properties of IBAD Cr films were investigated. The result shows that the optical and electrical properties of IBAD Cr films are close to those of the corresponding bulk: the optical constants and the reflectance of IBAD Cr films increase, the electrical resistivity decreases, and the tensile stress decreases, while the grain size does not change. It seems that the ion-beam bombardment on growing films and the ion-beam cleaning of substrates contribute to change the microstructure of films in such a way that the packing density of Cr films increases.