

브릴루앙 산란 실험을 이용한 이온빔 보조 증착법의 Cr 박막의 탄성특성*

이석목 · 황보 창권 · 최동철

인하대학교 물리학과

John R. Dutcher

Department of Physics, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada

(1994년 9월 6일 받음)

Ar이온빔의 보조 증착법으로 soda-lime유리판에 증착한 Cr박막을 브릴루앙 산란 실험을 통하여 박막의 탄성특성을 조사하였다. 박막증착시 사용된 이온의 진류 밀도가 증가할 수록 박막의 탄성계수가 증가하였으며 박막의 탄성특성이 bulk의 특성에 근접하였다. $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 이온전류밀도의 이온빔의 보조 증착으로 제작된 Cr박막의 탄성계수는 $c_{11}=296$, $c_{13}=83$, $c_{33}=289$, 그리고 $c_{55}=c_{44}=108(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$ 이었으며 이는 bulk의 값들에 비해 5% 감소한 것이다.

I. 서 론

이온빔 보조 증착(Ion-beam assisted deposition : IAD)은 박막 제작에 미치는 광학적, 전기적, 그리고 역학적인 영향때문에 적지않은 흥미를 이끌어왔다. 일반적으로 열저항이나 전자빔으로 녹여 기판위에 증착한 광학박막들은 기둥구조(columnar structure)들로서 기둥(column)과 기둥사이에는 빈공간(voids)들로 이루어져 있다. 이러한 빈공간들은 덩어리형태(bulk)에 비해 박막의 기계적인 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 대기중의 물분자들을 흡인하여 박막의 광학적 특성을 떨어뜨리게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 진공챔버 내에서 박막을 증착하는 동안 높은 운동량의 이온빔의 에너지를 증착입자에 전달함으로써 박막내부의 기둥구조의 생성을 억제하는 이온빔 기술^[1,3]이 사용되고 있다. 이온빔 기술은 이온빔 보조 증착(IAD)과 이온빔 스퍼터링(ion beam sputtering)으로 크게 두 가지로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 IAD를 사용하였다. IAD는 이온총을 기존의 진공 증착기에 부착함으로써 챔버를 크게 변화시키지 않으며 또 하나의 독립적인 증착변수로 추가될 수 있는 장점을 갖고 있다.

Cr은 기판과의 강한 부착 특성과 대기중의 산소와 쉽게 결합하여 얇은 산화막을 형성하여 외부 환경에 강한 특성 때문에 광학박막으로 많이 사용되고 있다. 하지만, 박막의 두께가 얇을 경우, 박막에 작은 구멍(pinhole)이 생겨 광학적 특성이 떨어지거나 에칭할 때 에칭선이 뚜렷하지 않는 문제가 있어, 높은 기판 온도에서 증착하거나 증착 후 열처리를 한다. 참고문헌 [4]에서는 이온빔 보조 증착으로 제작한 Cr박막이 보다 bulk에 가까워짐을 광학적, 기계적, 전기적 방법으로 측정되었다.

브릴루앙 산란(Brillouin light scattering : BLS)이란 매질내의 열적인 장파장의 들뜸(excitation)에 의한 빛의 비탄성산란으로 수 10내지 수 100 GHz의 진동수를 갖는 들뜸의 음향포논(acoustic phonons)이나 스핀파(spin waves ; magnons)와 빛과의 상호작용을 총칭한다. 지난 60년대 이후의 레이저의 개발과 간섭계의 발전과 더불어 표면 스핀파 및 불투명한 박막의 표면음향포논(surface acoustic phonon modes or waves : SAW)에 대한 측정도 가능하게 되었다.^[5] 특히, 표면음향포논으로부터 박막의 탄성특성을 규명할 수 있으며 이는 기존에 사용된 기계적인 방법에 비해 비파괴적인 방법으로 박막의 탄성 특성 및 역학적인 구조를 밝히는 장점을 갖고있다.

본 논문에서는 브릴루앙 산란 실험을 이용하여 이온빔 보조 증착법으로 제작된 Cr박막내의 여러 표면음향포

*본 연구는 1994년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI-94-2429)와 1994년도 인하대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 수행된 과제임.

논들의 진행속도를 측정하고 이들로부터 탄성계수를 조사하였다. 아울러 박막제작시 사용된 이온빔의 전류밀도 변화에 따르는 탄성계수의 변화를 조사하였다.

II. 이론적 배경

BLS 실험에는 두가지 측정가능한 물리량들이 있는 데 산란실험의 기하학적 상태에서 얻어지는 음향포논의 파수벡터(wavevector) q 와 정밀한 간섭계를 이용하여 분석된 음향포논의 각진동수 ω 가 또 하나이다. 그러면 이 두가지 측정치로부터 음향포논의 위상속도(sound velocity) V 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V = \frac{\omega}{q} \quad (1)$$

여기서 q 는 파수의 크기이며 표면음향포논에 대해서는 입사각(θ_i)와 산란각(θ_s)으로부터 쉽게 다음과 같이 계산되어진다:

$$q = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta_s) \quad (2)$$

음향포논의 파장(~ 400 nm)은 물질입자들간의 거리보다 무척 길기 때문에 연속적인 매질의 가정하에 계산된 탄성파(elastic waves)의 속도는 장파장의 음향포논의 위상속도와 일치하게 된다. 이 이론에 의하면 탄성파의 속도는

$$V = \sqrt{\frac{c_{ij}}{\rho}} \quad (3)$$

으로 주어지며 여기서 ρ 는 매질의 질량밀도이고 c_{ij} 는 탄성계수이다. 따라서, 만약 매질의 질량밀도를 알고 있다면 측정된 음향포논의 속도로부터 매질의 탄성계수, 즉 탄성특성을 귀납적인 방법으로 구할 수 있게 된다.

탄성계수란 원자나 분자들간의 미시적인 상호작용에 의해 결정되는 물리적인 상수로서 본래는 4차 텐서(Tensor)량이나 고체의 대칭성으로 최대 21개의 독립적인 변수들로 이루어져있다. 그러나 매질의 대칭구조의 대칭성이 높을수록 그 수는 적어진다. 예를 들어, 등방성(isotropic) 매질에 대해서는 단지 2개의 탄성계수($c_{11}=c_{22}=c_{33}$, c_{55} , $c_{12}=c_{11}-2c_{55}$)로 표현되고, 본 논문에서 연구한 Cr박막과 같은 hexagonal 대칭구조를 갖는 매질에는 총 5개($c_{11}=c_{22}$, c_{13} , c_{33} , c_{55} , 그리고 c_{12})의 탄성계수가 있다.

덩어리형태의 매질에는 언제나 3개의 음향포논(1 longitudinal과 2 transverse)이 있다. 그러나 매질이 만약

다른 매질과 경계면을 갖고 있다면, 그 경계면에서는 경계조건 때문에 새로운 형태의 음향포논, 즉 표면음향포논이 존재하게된다.^[6,7] 이 표면음향포논을 Rayleigh mode라 부른다. 즉 이 mode는 매질의 표면에는 언제나 존재하며, 그의 속도는 일반적으로 transverse bulk acoustic phonon의 위상속도의 약 90%에 해당하나, 정확한 값은 매질마다 차이가 있다. 더군다나 매질이 박막과 같이 한 방향으로 두 개의 경계면을 갖고 있다면, 특히 그 두께가 음향포논의 파장보다 얇다면, 각 경계면에서의 음향학적 임피던스(acoustic impedance)의 차이때문에 bulk의 음향포논은 존재할 수 없게 되고, 그 대신 표면과 나란히 박막내에서 진행되는 여러 형태의 표면음향파(SAW)가 형성될 수 있다. hexagonal 대칭구조를 갖는 박막내의 SAW는 입자들의 변위방향에 따라 두 가지로 분류되는 데, 진행방향과 박막의 표면과 수직선이 함께 이루는 평면을 sagittal면이라 할 때, 한가지는 변위가 sagittal 면과 수직한 파동들이며 Love mode라 불리우고 이들의 속도는 c_{12} 에 의해 결정된다. 또 한 가지는 변위가 바로 sagittal 면과 평행한 파동들(Sezawa modes)이며 이들의 속도는 나머지 4개의 탄성계수(c_{11} , c_{13} , c_{33} , c_{55})에 의해 결정된다. 앞에서 언급한 Rayleigh mode는 Sezawa modes와 유사하다. 이들 여러가지 modes 중에서, 일반적으로 Love mode를 측정하는 것은 실험상의 어려움이 있으며, 또한 c_{12} 는 c_{13} 와 비슷하기 때문에 본 실험에서 생략되었다.

III. 실험장치

Cr 박막의 증착과정및 X-선 조사는 참고문헌 [4]에 상세히 설명되었다. 덩어리형태의 Cr이 b.c.c. 결정구조를 갖음에 따라 박막의 증착면은 강한(110) 결정면을 갖는 10 nm의 크기의 난알(cluster)들이 soda-lime glasses의 기판위에 무작위로 정렬되어 있는 다결정구조로서 전체적으로 [110] 방향의 c-축을 갖고 a-b평면은 등방성인 hexagonal 대칭성을 갖는 구조를 띄고있다. 본 연구에서 사용된 3개의 시료의 두께는 각각 275(A), 234(B), 245(C) nm이고, 박막 제작시 사용된 Ar이온빔의 전류밀도는 각각 100(A), 290(B), 390(C) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이다. 여기서 A, B, C는 시료 번호를 가리킨다. 각 시료들은 또한 증착입자들을 기판위에 올려놓기 전에 표준 방법으로 세척된 기판을 같은 양의 Ar이온빔으로 각각 세척되었다.

브릴루앙 산란 실험은 실온의 대기중에서 실행되었으며 안정화된 p-편광된 10 mW의 Ar⁺ 레이저 ($\lambda=514.5$ nm) 빔이 카메라 렌즈 ($f=50$ mm)를 이용하여 시료표

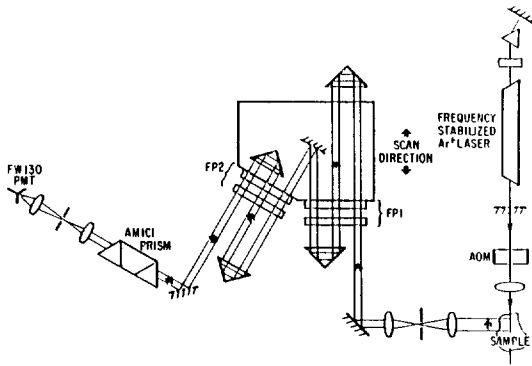


그림 1. 브릴루앙 산란 실험장치도. AOM: Acousto-Optic modulator; FP1 and FP2: Fabry-Perot interferometer.

면에 초점이 맞도록 입사되었으며 같은 렌즈를 이용하여 180° 후방산란된 빛을 모아 이중 (3+3 경로) 패브리-페로 간섭계로 분석하였다. 이 간섭계는 Sandercock 형태의 것[5]으로 공동거리(cavity spacing)이 약간 다른 두 개의 패브리-페로 간섭계가 직렬로 연결되어 있으며 각 공동을 3번씩 통과하도록 되어 있어 실질적으로 6개의 간섭계가 직렬로 연결된 효과를 얻을 수 있어 10¹²의 최대와 최소의 비를 갖고있다. 빛의 검출은 냉각수를 이용한 PMT를 이용하였다. 그림 1은 사용된 산란 실험장치의 개략적인 구조를 보여주고 있으며 참고문헌 [8]에 본 간섭계의 작동원리에 대하여 자세히 설명되어 있다.

IV. 실험결과 및 논의

그림 2는 시료 A의 한 브릴루앙 산란 스펙트럼이며 약 2시간동안 누적된 신호들이다. 수평축은 산란된 빛의 진동수가 시료에 입사한 빛의 진동수로부터 변이된 양을 가리키는 진동수변이(frequency shift)이며 수직축은 신호의 세기를 가리킨다. 수평축의 0에 있는 신호는 시료에서 탄성산란된 빛들로서 그 세기가 브릴루앙 산란신호에 비해 너무 커서 잘려졌다. 수평축의 양쪽의 대칭성은 음향포논에 의한 브릴루앙 산란 실험의 특징으로 레이저 빔과 음향포논과의 Stokes와 anti-Stokes 산란들을 가리킨다. 본 스펙트럼은 3개의 SAW에 의한 산란된 신호를 보여주고 있다. 양쪽의 신호의 진동수 변이들의 평균치는 각각 12.04, 13.56 그리고 17.68 GHz들이며 오차는 1% 미만이다. 간섭계의 공동거리가 5 mm임을 감안할 때 25 GHz 부근의 신호는 탄성산란된 빛들에 의한

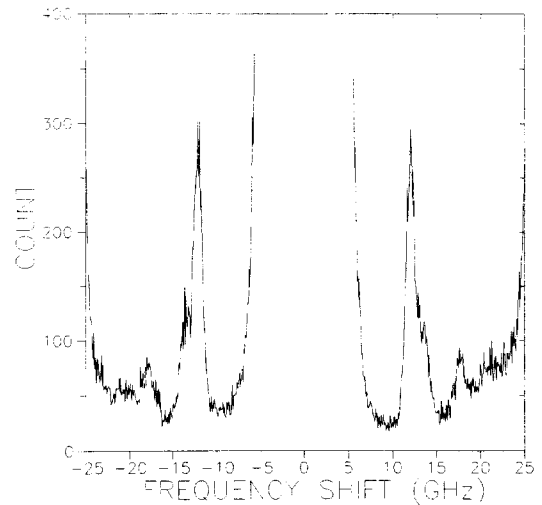


그림 2. 이온빔 보조로 증착된 Cr박막의 브릴루앙 산란 스펙트럼. 사용된 이온빔 전류밀도는 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이며 산란 입사각과 산란각은 동일하게 70°이다.

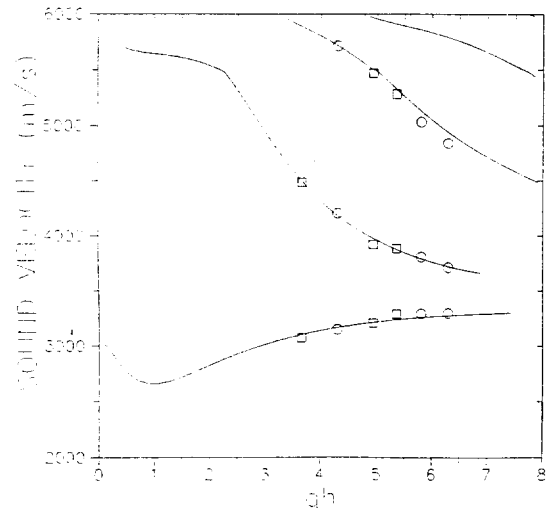


그림 3. 시료 A의 표면음향포논의 분산관계. 실선은 표 1의 탄성계수를 이용한 이론적인 값들이며 원표시는 실험치들이다. 정사각형표시들은 시료 B의 실험치들로서 시료 A와 동일한 탄성계수를 갖음을 보여주고 있다.

ghost peak⁽⁸⁾에 해당하며 그 신호의 정확한 위치는 30 GHz로서 간섭계의 Free Spectral Range으로 결정된다. SAW들의 파수는 입사각과 산란각이 동일하게 70°임을 고려할 때 0.023 nm⁻¹이며, 진행속도는 각기 3296, 3712

그리고 4840 m/s들이다.

각각의 sagittal mode들의 진행속도는 어느 특정한 탄성계수에 의해 결정되는 것이 아니라 모든 탄성계수들의 합성된 함수로서 이들간의 관계식이 해석적으로 존재하지 않는다. 따라서, 수치적인 방법으로 음향파동의 경계조건을 구비한 파동방정식을 풀어야만 한다. 그림 3은 그 파동방정식의 해를 구한 결과 각 sagittal mode들의 분산관계를 보여주는 도표이다. 수평축은 각 mode들의 파수와 박막의 두께를 곱한 무차원의 물리량(qh)이며 수직축은 각 mode의 위상속도(v)를 보여주고 있다. 실선은 이론의 분산관계들이고 원 표시들은 실험치들로서 산란 실험의 입사각과 산란각을 변화시켜 얻은 값들이다. 예를 들어, qh=6.31에 해당하는 3개의 실험치들은 그림 2에서 얻은 결과들이다. 가장 낮은 위상속도의 실선은 Rayleigh mode를 가리키며 박막의 두께가 얇을 경우에는 기관의 Rayleigh mode의 위상속도(=3024 m/s)가 되나 두께가 커질수록 그 값은 박막의 값(=3320 m/s)으로 됨을 볼 수 있다. 그보다 높은 속도들은 Sezawa modes이다.

이론의 분산관계를 구하기 위해 사용된 Cr 박막의 초기의 탄성계수는 bulk의 Cr의 cubic 단결정구조의 $c_{11}=346$, $c_{12}=66$, $c_{44}=100$ GPa^[9]로부터 Voigt(Reuss) 평균치^[10]들로 구하였다. Voigt(Reuse) 평균치는 다결정의 박막의 a-b평면내의 strain(stress)이 연속적임을 감안하여 계산된 값들로 초기에 사용된 값은 이들 두 평균치의 중간값으로 다음과 같다: $c_{11}=309(2)$, $c_{12}=82(1)$, $c_{13}=87(1)$, $c_{33}=304(2)$, $c_{44}=114(2)$ GPa. 팔호안의 값은 각 탄성계수들의 오차들이다. 실제 박막의 탄성계수는 각각의 탄성계수를 변화시켜 가장 실험에 가까운 분산관계를 구함으로써 얻을 수 있다. 그림 2에 그려진 실선은 얻어진 시료 A의 탄성계수를 갖고 얻어진 분산관계이다. 이 때 사용된 탄성계수는, 박막의 질량밀도가 덩어리형태의 Cr의 질량밀도와 같은 값 ($\rho=7.19$ g/cm³)을 이용할 때, $c_{11}=260$, $c_{13}=73$, $c_{33}=255$, $c_{44}=96$ GPa

이며 초기의 값들로부터 각각 16% 감소되었다. 전체적으로 실선과 실험치들이 일치하며 이는 모든 실험 및 분석과정 모두 만족스러움을 보여주고있다.

탄성계수를 얻는 과정에서 박막의 구조를 임의로 등방성 매질로 간주하여 탄성계수를 구하려 했으나 그에 알맞는 탄성계수들을 찾을 수 없었다. 이는 측정된 박막의 구조가 등방성에 가까운 hexagonal 대칭구조를 갖고있음을 보여주고 있다.

위의 일련의 실험 및 계산 과정을 나머지 두 개의 시료에 대하여 실행하였으며 그 중간 과정들은 시료 A의 것과 거의 유사하였다. 표 1은 그들의 최종결과를 보여주고 있다. 탄성계수를 정하는 과정에서 사용된 조건은 각 탄성계수가 일정히 변화하도록 한 것이었다. 이 조건은 각 탄성계수가 박막의 구조의 변화에 따라 변할 수 있는

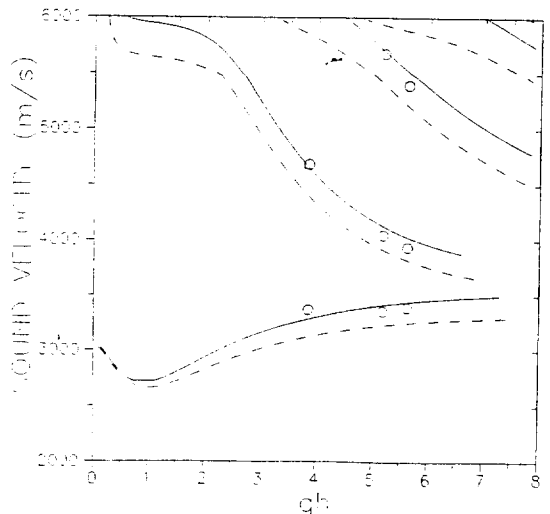


그림 4. 시료 C의 표면음향포논의 분산관계. 실선은 표 1의 탄성계수를 이용한 이론적인 값들이며 원 표시는 실험치들이다. 점선은 시료 A에 대한 이론치들로서 실험치들보다 낮은 속도를 가리키고 있다.

표 1. 실험적으로 얻은 이온빔 보조 증착법의 Cr 박막의 탄성계수와 bulk(덩어리형태) 값들에 대한 탄성계수들의 증감. 단위는 GPa(=10⁹ N/m²). 덩어리형태의 값은 다결정의 박막내의 strain과 stress가 a-b평면에서 연속적임을 감안하여 계산되었다. 이온빔의 전류밀도(current density)의 단위는 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이다.

시료	Ion-beam current density	c_{11}	c_{13}	c_{33}	c_{44}	탄성계수의 증감(%)
bulk	—	309±2	87±1	304±2	114±2	—
A	100	260	73	255	96	-16
B	290	260	73	255	96	-16
C	390	296	83	289	108	-5

가능성에 비추어볼 때 적당하지 않다. 하지만, 3개의 시료를 이용하여 각 탄성계수의 변화에 미치는 영향을 얻는 것은 무리일지라도, 이온빔이 박막의 전체적인 탄성특성에 미치는 영향을 조사하는 데 충분하다고 생각되었다. 이러한 조건하에서 각 탄성계수들의 오차는 단지 1~2%에 지나지 않으며, 표 1의 탄성계수는 시료 A와 B의 탄성특성이 이러한 오차범위내에서 동일함을 보여 주고 있다. 이 오차는 질량밀도의 오차 및 박막의 두께에 대한 오차를 고려하지 않은 값이다.

그림 3의 정사각형들은 시료 B의 실험치에 대한 분산관계들로서 실선과 거의 일치하기 때문에 시료 B와 시료 A가 거의 동일한 탄성특성을 갖고 있다고 판단되었다. 그림 4는 시료 C의 실험치의 분산관계와 표 1에 있는 탄성계수를 이용한 이론치(실선)을 보여주고 있으며 시료 A 또는 B에 해당하는 분산관계(점선)에 비해 실험치들은 높은 속도를 나타내어 높은 탄성계수를 의미하고 있다.

시료 A와 B는 같이 덩어리형태의 값으로부터 16%씩 감소되었고 시료 C는 덩어리형태의 값으로부터 오직 5%의 감소밖에 없음을 감안할 때 이온빔의 증가가 기대한 바와 같이 박막내부의 빈공간들을 감소시킴으로서 박막의 탄성특성을 높인 결과로 추론할 수 있으며 아울러 빈공간들의 감소가 Cr 박막의 탄성특성이 덩어리형태에 가까워지게 함을 알 수 있다.

또 하나의 주목할 사항은 시료의 여러 특성들이 박막의 구조에 의존하는 정도가 다르게 나타난 것이다. 이온빔의 전류밀도가 100에서 $290 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 증가함에 따라 시료의 광학상수(굴절률 n , 소멸계수 k)는 증가하였으며 전기비저항은 급격히 감소하였다. 그리고 전류밀도가 290에서 $390 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 증가할 때는 두 특성 모두 거의 변하지 않았다.^[4] 이에 반해 시료의 탄성특성은 X-선 회절분석에 의한 박막의 격자간격(d -spacing)의 변화 즉, 인장응력의 변화^[4]와 같이 첫구간에서는 변하지 않더니 $290 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이후 급격히 변화하는 경향을 보이고 있다. 이러한 서로 상이한 변화는 다음의 두가지의 설명으로 이해할 수 있을 것이다. 첫째로, 광학적 및 전기적 특성이 증착입자들의 전자(electron)들의 운동에 관련된 반면 인장응력 및 탄성특성은 입자들간의 상호작용에 관련되어 있기 때문에 이들 특성들간에 서로 비례적으로 연관짓는 것은 상당히 무리가 따를 것이다. 두번째로, X-선의 파장은 수 Å인 반면 빛의 파장은 수 백 nm이고 이에 따라 전자들의 mean free path는 수 십 nm 그리고 음향포논의 파장은 수 백 nm으로서 서로 다른 파장 영역에서의 특성들에 대한 결과이기에 생기는 현상이라

판단된다. 따라서 특성들간의 연관성에 대해서는 차후 계속 연구해야 할 분야라 생각된다.

V. 결 론

브릴루앙 산란 실험을 이용하여 이온빔 보조 증착법으로 제작한 soda-lime glass 기판위의 Cr 박막의 탄성특성을 조사하였다. 세 가지의 다른 이온빔 전류밀도의 값으로 제작된 박막의 탄성계수들은 이론적인 분산관계와 비교함으로써 구하였으며, 그 결과 각각 덩어리형태의 값으로부터 각각 16, 16 그리고 5%의 감소된 탄성계수를 갖고 있으며 등방성에 가까운 hexagonal 대칭구조를 갖고 있음을 알게되었다. 이온빔의 전류밀도가 290에서 $390 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 증가함에 따라 탄성계수도 증가하였으며 박막의 탄성특성이 다른 특성들이 보여준 결과와 동일하게 덩어리형태에 가까워진 것을 확인하였다.

감사의글

이탈리아의 Ferrara대학의 F. Nizzoli교수의 컴퓨터 프로그램의 사용에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, R. J. Gambino and J. R. Kaufman, "Modification of Thin film Properties by Ion Bombardment during Deposition," in *Ion Bombardment Modification of surfaces*, edited by O. Auciello and R. Kelly(Elsevier, Amsterdam, 1984).
- [2] P. J. Martin and R. P. Netterfield, "Optical films produced by ion-based techniques," in *Progress in Optics XXIII*, edited by E. Wolf(North-Holland, Amsterdam, 1986).
- [3] 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).
- [4] 유광림, 황보 창권, "Cr 박막의 이온빔 보조 증착," *한국광학회지* **4**, 411-419(1993).
- [5] J. R. Sandercock, "Trends in Brillouin scattering: Studies of opaque materials, supported films, and central modes," in *Light Scattering in Solids III*, edited by M. Cardona and G. Guntherodt, Topics in Applied Physics 51(Springer-Verlag, Berlin, 1982).

- [6] G. W. Farnell and E. L. Adler, in *Physical Acoustic*, edited by W.P. Mason and R.N. Thurston (Academic, New York, 1972), Vol. IX, chap. 2.
- [7] B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids* (Wiley, New York, 1973), Vol. 1.
- [8] 이석목, George I. Stegeman, "이중 패브리-페로 간섭계에 대한 분광학적 분석방법," 한국광학회지 **5**, 231-237(1994).
- [9] *Landolt-Bornstein New Series*(Springer-Verlag Berlin, 1982), Vol. 18.
- [10] M.J.P. Musgrave, *Crystal Acoustics*(Holden-Day, San Francisco, 1970).

Elastic Properties of Ion-assisted Cr films measured by Brillouin light scattering

Sukmock Lee, Chang Kwon Hwangbo, and Tong Chull Chey
Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Republic of Korea

John R. Dutcher
Department of Physics, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada

(Received: September 6, 1994)

We have performed Brillouin light scattering experiments to study the elastic properties of Cr films deposited on soda-lime glasses by using Ar-ion assisted deposition techniques. The elastic constants of the films increased as the ion-current density employed during the film deposition increases and they approached to the values of bulk Cr. The best fit values of the elastic constants of the films manufactured with ion current density of $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ are $c_{11}=296$, $c_{13}=83$, $c_{33}=289$, and $c_{55}=c_{44}=108$ ($\times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$) and these are 5% lower than those of bulk Cr in hexagonal symmetry.