

극자외선 노광공정용 Mo/Si 다층 박막 미러의 구조 분석 (Structural Characterization of Mo-Si Multilayer Mirror for Extreme Ultraviolet Lithography)

허성민, 김형준, 이승윤, 윤종승, 강인용*, 정용재*, 안진호
한양대학교 신소재공학부
* 한양대학교 세라믹공학과

Abstract

극자외선영역의 빛에대한 Mo/Si 반사형 다층 박막 미러를 스퍼터링 시스템으로 증착하여, 특성을 평가한 결과 3mTorr의 낮은 공정 압력에서 최적의 구조인자를 가진 다층 박막을 증착할 수 있었다. TEM, low angle XRD peak, 반사도 그래프로부터 다층 박막의 구조인자를 분석하였으며, 특히 low angle XRD peak로부터 다층박막의 d-spacing, 층간 두께 uniformity에 대한 정보 및 광학적 정보를 간접적으로 분석할 수 있었다. 최대 반사도는 12.7nm 파장에서 약 63%였으며, low angle XRD에서 추출한 d-spacing 값이 TEM 이미지에서 측정된 값보다 더 정확한 값을 얻을 수 있었다.

1. Introduction

1990년대 초반부터 기존의 가시광을 이용한 노광기술의 한계가 지적됨에 따라 이를 대체 할 수 있는 여러 차세대 노광공정 (Next Generation Lithography: NGL)의 필요성이 요구되었다. 이에 따라, 최근 미일 등의 반도체 선진국을 중심으로 차세대 노광공정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 몇 가지 대표적인 차세대 노광공정에는 PXRL (Projection X-ray lithography)¹⁾, SCALPEL (Scattering with angular limitation projection e-beam lithography)²⁾, 그리고 극자외선 노광공정 (Extreme Ultra-Violet Lithography: EUVL)³⁾ 등이 있다. 이러한 차세대 노광기술들 중에서 13nm의 극자외선을 광원으로 이용하는 EUVL은 높은 해상도, 낮은 NA에서 기인한 큰 초점심도와 공정 여유도, 안정적인 마스크 구조, 기존의 가시광 노광공정과 유사성 등의 이유로 70nm 이하 세대의 소자 제조시 가장 채택 가능성이 높은 노광기술로 평가받고 있다. 이와 같은 극자외선 노광공정은 기존의 굴절식 광학계 (refractive optics)와 투과형 마스크 (transmission mask)와는 달리 반사형 노광계 (reflective optics)와 반사형 마스크를 사용하여 빛을 축소 투영하는 방식을 사용한다⁴⁾. 이 때 마스크에서 웨이퍼 상으로의 정확한 상 전달과 높은 수율을 위해서 고반사율을 갖는 저 결함의 X-선 반사 다층박막의 증착은 EUVL의 실제 공정 적용에 가장 큰 영향을 미치는 변수라 할 수 있다. 극자외선의 영역의 빛을 반사시키기 위해서는 광학적으로 상이한 2층의 박막을 13nm의 반정도의 주기(period)로 수십 층 적층한 구조이다. 즉, Mo/Si 다층박막의 경우 $d(d_{Mo}+d_{Si})=7nm$, $\gamma(d_{Mo}/d)=0.4$, $N(\text{전체 주기 수})=40$ 인 구조인자 (structure factor)로 증착한 다층 박막은 13.5nm 파장에서 최대 74.2%의 이론 반사도를 보이나, 증착 시 계면에서 물질간 상호확산으로 인한 계면의 거칠기 증가, 매질 내에서 빛의 산란 등으로 인해 이론반사도의 약 90-95% 정도 구현되고 있는 실정이다. 본 실험에서는 Mo/Si 다층박막 미러를 스퍼터링 시스템으로 제작하여 각 공정 조건 별로 다층박막의 구조, 주기의 두께, Mo-Si 간의 계면 상태 등을 분석하여 최적의 증착 조건을 도출하였으며, 한 주기가 수 nm에 불과한 다층 박막에 대해서 다양한 직/간접적인 분석 방법을 이용하여 물리적 특성 및 구조 인자 분석을 행하였다.

2. Experimental Procedure

박막의 증착은 4-inch의 Mo와 Si target이 동시에 장착 가능한 스퍼터 장비를 사용하였으며, 공정 압력 조절, 각각의 target에 인가되는 direct current (DC) 또는 radio frequency (RF)의 시간조절 및 파워 조절을 통하여 원하는 구조인자를 가지는 다층박막을 얻을 수 있었다. 이와 같이 증착된 다층박막에 대해 단면 TEM, low/high angle XRD, AFM 등을 이용하여 박막의 미세구조와 계면층의 거동을 살펴보았다. 특히 다층박막의 계면에 의해 형성되는 low angle XRD peak를 분석함으로써 다층박막의 구조인자 및 층간 두께의 uniformity에 관한 정보를 간접적으로 얻을 수 있었다. Mo/Si 다층박막의 반사도는 Lawrence Berkeley National Laboratory의 Advanced Light Source에 설치되어 있는 EUV 반사도 측정 전용 빔라인에서 측정하였다.

3. Results and Discussion

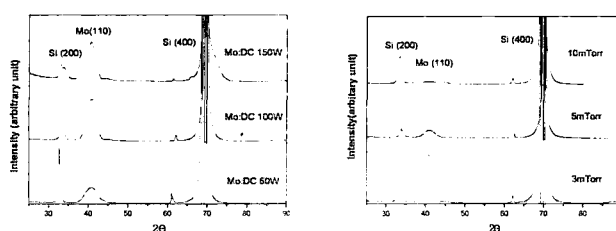
그림 1은 Mo 증착 파워에 따른 high angle XRD와 Ar 공정압력에 따른 high angle XRD를 비교한 것인데, Mo는 (110) texture를 가진 polycrystalline으로 Si은 amorphous로 분석되었으며⁵⁾, Mo 증착 파워가 증가할수록 Ar 공정압력이 감소할수록 Mo의 texture는 증가함을 알 수 있다.

High angle XRD에서 얻은 결과를 확인하기 위해서 단면 TEM 이미지와 AFM 이미지를 그림 2에 나타내었다. 다층 박막에서 반사의 대부분은 표면층에서 일어나기 때문에 원자단위로 부드러운 표면의 거칠기가 요구되어진다. 3mTorr의 공정압력에서 성공적으로 다층 박막이 증착되었으며, 표면의 거칠기는 약 1Å(rms)대로서, 아주 우수한 값을 보였다. 공정 압력이 증가할수록 표면의 거칠기도 증가하였고, 10mTorr 공정압력에서는 더 이상 다층박막의 특성을 발견할 수 없었다. 그림 3은 3mTorr 공정 압력에서 증착한 다층 박막의 단면 TEM 이미지를 확대한 것인데, 계면층의 두께가 Mo-on-Si는 ~1.2 nm인 반면에 Si-on-Mo는 ~0.8 nm였다⁶⁾. 이와 같은 이유는 첫째, 상대적인 원자량의 차이 (Mo:95.94, Si:28.09). 둘째, polycrystalline인 Mo의 구조가 amorphous Si보다 더 치밀한 구조이기 때문에 더 무거운 Mo 원자가 open structure인 Si쪽으로 더깊이 침투하기 때문이라고 생각된다. 4개의 서로 다른 구조인자를 가진 다층박막을 제작하여 측정한 반사도를 그림 4에 나타내었다. 반사도 측정시 입사각은 약 89° 였다. 최대 반사도는 시편 D의 경우 약 63%로 측정되었다. 반사도는 물질의 광학적 특성, 계면의 안정성, 층간 두께 uniformity등에 의한 복잡한 함수이다. 수 nm에 불과한 다층 박막의 구조인자를 정확히 분석하는 것은 구조인자를 최적화 하기 위해서 아주 중요한 부분이라 할 수 있다. 이 구조 인자를 분석하기 위해서 반사도 그래프, TEM, low angle XRD로부터 층간 두께 uniformity와 d-spacing을 구하였다. 그림 5는 TEM 이미지에서 구한 d-spacing이다. d-spacing 측정시 각 계면층의 두께를 무시한 값이며 각 층간 d-spacing uniformity는 5%이내 였다. 그림 6은 1-14° 에 대한 low angle XRD peak이다. 이 때 Peak의 sharpness와 주기성으로부터 다층 박막의 quality에 대한 정보를 간접적으로 분석할 수가 있는데, 시편 D의 구조인자가 가장 잘 확립된 것임을 간접적으로 알 수 있었다. 또한 일차 굴절 보정 Bragg 법칙을 이용하여 다층박막의 평균적인 d-spacing을 구할 수 있었으며 이를 그림 7에 나타내었다⁷⁾. 다층 박막은 standard quarter wavelength multilayer를 이용하므로 반사도 그래프에서는 최대 반사도를 보이는 입사각을 고려 할 때 $d\text{-spacing}=(\lambda/2\sin 89^\circ)$ 으로 계산할 수 있으며, 이를 다층박막의 정확한 d-spacing으로 볼 수 있다.

반사도 그래프, TEM, low angle XRD에서 구한 d-spacing을 구한 값을 그림 8에 나타내었는데, TEM에서 구한 값은 반사도 그래프에서 구한 값과 차이가 큰 반면에 low angle XRD에서 구한 값은 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 TEM을 이용한 방법은 d-spacing을 직접 눈으로 정확하게 측정 할 수 있는 장점은 있는 반면에, XRD를 이용한 방법은 다층 박막의 nonideal한 성분 및 광학적 성분을 모두 포함하여 나오는 방법이므로 TEM을 이용한 방법 보다 더 정확한 다층 박막에 대한 간접 분석이 가능하리라 생각된다.

4. Reference

1. J.P. Silverman, "X-Ray Lithography: Status, Challenges, and Outlook for $0.13\mu\text{m}$," J. vac. Sci. Technol. B15, 2117 (1997)
2. L.R. Harriot, "Scattering with Angular Limitaion Projection Electron Beam Lithography for Sub-Optical Lithography," J. Vac. Sci. Technol. B15, 2130 (1997)
3. C.Montcalm, S.Bajt, p.B. Mirkarimi, E.Spiller, F.J. Weber, and J.A. Folta, "Multilayer Reflective Coatings for Extreme Ultraviolet Lithography," priceedings of SPIE, Vol. 42, 3331 (1998)
4. D.W. Sweeney, R.Hudyma, H.N. Chapman, and D.Shafer, "EUV Optical Design for a 100nm CD Imaging System," Emerging Lithography Technologies II, ed. Y. Vladimirsky, SPIE, Vol.(2), 3331 (1998)
5. H. Nakajima, H. Fujimori, and M. Koiwa, "Interdiffusion and Structural Relaxation in Mo/Si multilayer Mirrors" , J. Appl, Physics. 63(4), 1046 (1988)
6. D.G. Stearns, R.S. Stearns, S.P.Vernon, "Fabrication of High-reflectance Mo-Si multilayer mirrors by planar magnetron sputtering" , J. Vac. Sci. Technol. A 9(5), 2662 (1991)
7. Kim et al, "Mo-Si multilayer as soft X-ray Mirrors," , J. Vac. Sci. Technol. A 21(1), 148 (1994)



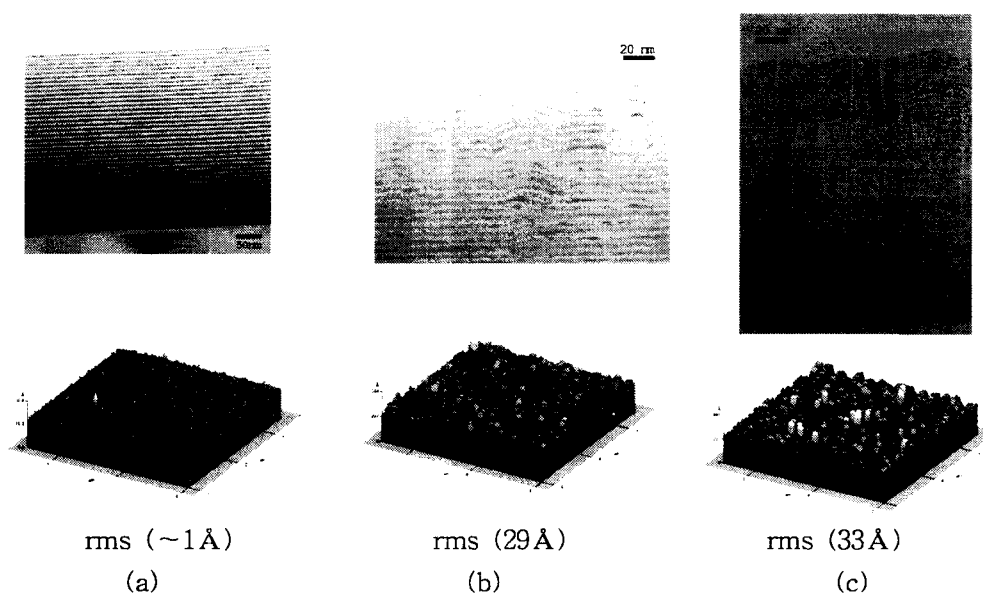
(a)

(b)

Fig 1. High angle XRD peaks with variations

(a) Mo sputtering power (Mo:DC 50-150W, Si:RF 100W, 3mTorr)

(b) Deposition pressure (Mo:DC 100W, Si:RF 100W, 3-10mTorr)



rms ($\sim 1\text{\AA}$)

(a)

rms (29Å)

(b)

rms (33Å)

(c)

Fig 2. HRTEM and AFM images fo multilayer deposited at (a) 3mTorr, (b) 5mTorr, (c) 10mTorr Ar working pressure

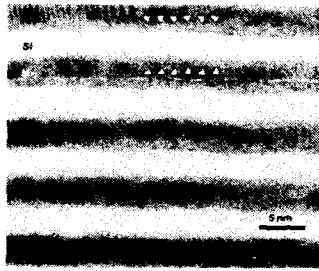


Fig 3. Magnified TEM image of multilayer with well-definde sturcture factor deposited at 3mTrr Ar working pressure

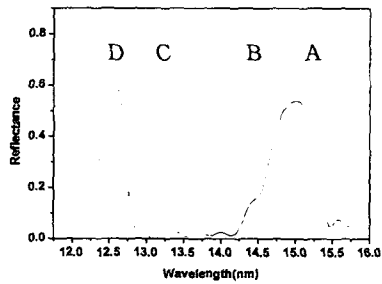


Fig. 4. Reflectivity curve of 4 differnt Mo/Si multilayers

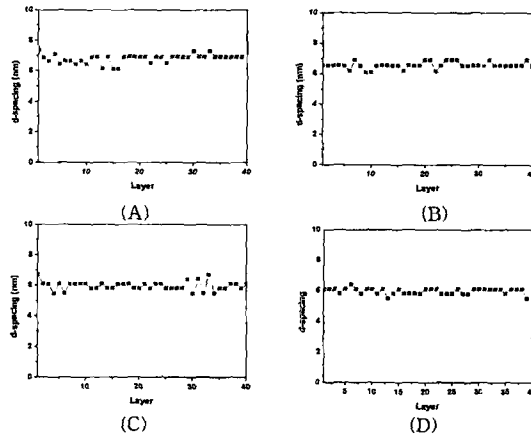


Fig. 5. d-spacing measured from the cross sectional TEM images for A, B, C, D multilayers

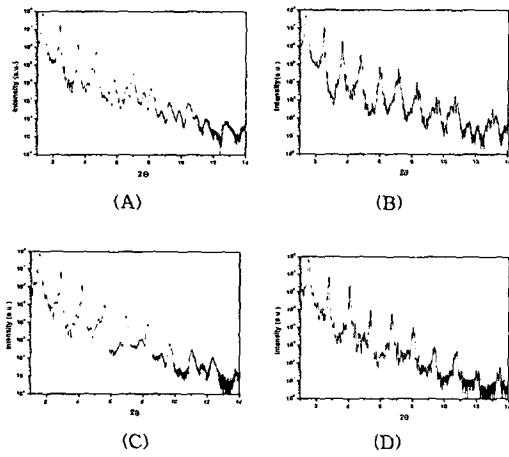


Fig. 6. Low angle XRD peaks for A, B, C, D multilayers

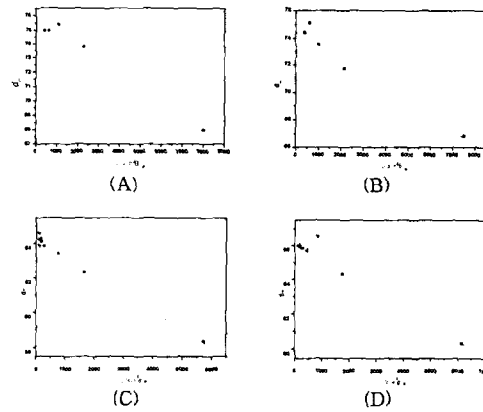


Fig. 7. d-spacing obtained from Low angle XRD peaks for A, B, C, D multilayers

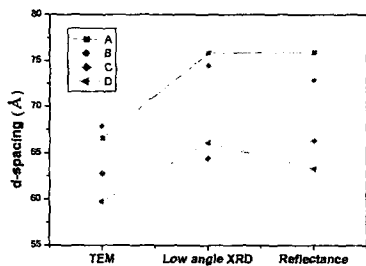


Fig. 8. Comparison of d-spacing obtained from various methods