

Ru/Mo/Si 다층박막 구조를 가지는 극자외선 노광공정용 반사형 다층박막 미러의 제조

(The Fabrication of Reflective Multilayer Mirror for EUVL that Included The Structure of Ru/Mo/Si Multilayer by Magnetron Sputtering)

김형준, 김태근, 이승윤, 강인용*, 정용재*, 안진호
한양대학교 신소재공학부, *한양대학교 세라믹공학과

Abstract

극자외선 노광공정(EUVL: Extreme Ultraviolet Lithography)은 반도체 공정에서 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 해상도를 실현하기 위해 연구되고 있는 유력한 차세대 노광공정(NGL: Next Generation Lithography)이다.[1] 본 연구에서는 극자외선 노광공정에서 사용되는 반사형 다층박막 미러를 제조하기 위해서 직접 제작한 전산모사 도구를 이용하여 $130\sim 135\text{\AA}$ 의 파장 영역에서 고반사도를 가지는 효율적인 다층박막의 구조인자를 예측하였으며, 그러한 구조인자를 실현하기 위해서 상온($\sim 300\text{K}$)에서 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 다층박막을 증착하였다. 증착조건 중에서, 공정압력에 따른 다층박막 계면 성장의 질적 의존성이 나타났으며, 결과적으로는 낮은 공정압력에서 더 좋은 계면특성을 가지는 다층박막이 형성되었다. 다층박막의 구성물질로 Ru, Mo, Si를 사용하였으며, 다층박막의 구조분석은 high/low angle XRD, 단면 TEM images 등을 이용하여 분석되었다.

1. Introduction

반도체의 고집적화, 고용량화가 진행되어감에 따라 반도체를 설계 및 제조하는 데에 있어서 요구되는 소자의 크기는 점차 줄어들고 있는 실정이다. 이러한 고집적화, 초소형화의 추세에 만족하는 소자를 제조하기 위해서는 현재보다 높은 해상도를 실현할 수 있는 노광공정이 반드시 필요하다. 하지만, 이미 1990년대 초반부터 가시광을 광원으로 사용하고 있는 현재의 노광공정이 이러한 해상도를 실현하기에는 그 한계성이 지적되면서, 이를 대체할 수 있는 차세대 노광공정(NGL)의 개발이 필요하게 되었다. 현재까지 미국, 일본, 유럽 등에서 차세대 노광공정에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 몇 가지 대표적인 차세대 노광공정으로는 PXRL(Projection X-ray Lithography), SCALPEL(Scattering with Angular Limitation Projection E-beam Lithography), EPL(Electron Projection Lithography), IPL(Ion Beam Projection Lithography), EUVL(Extreme Ultra-Violet Lithography) 등이 있다.[2]

이러한 몇 가지 차세대 노광기술들 중에서 극자외선을 광원으로 이용하는 EUVL은 30nm 이하 수준까지의 해상도 확장 가능성이 있는 높은 해상도, 낮은 NA(Numerical Aperture)에서 기인한 큰 초점심도와 공정 여유도, 안정적인 마스크 구조, 기존의 가시광 노광공정과의 유사성 등의 이유로 70nm 이하 세대의 소자 제조에서 가장 유력한 노광기술이 될 것으로 생각되고 있다.[3] 극자외선 노광공정은 13nm 영역대의 광투과도가 현저히 떨어지는 빛을 광원으로 사용하기 때문에 반사형 마스크와 노광계를 사용하고 있으며, 반사형 다층박막 마스크의 반사도는 공정의 생산성과 직결된다. 따라서 고반사도를 가지는 무결함 다층박막의 제조가 극자외선 노광공정에서 주요 관건이 되고 있으며, 다층박막 마스크의 반사도는 구조인자에 전적으로 의존하는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서 다층박막의 증착에 사용된 Ru/Mo/Si multilayer의 구조는, Mo/Si multilayer의 안정적인 계면 구조를 위한 Ru barrier layer를 삽입한 전산모사를 한 결과 중에서 반사도가 증가하

는 구조가 있는 것에 착안하여 도입하게 되었다.(Fig. 1)

또한 다층박막의 구성 물질 선택에 기준이 되는 물질의 복합굴절지수($\hat{n} = n - ik$)를 다음과 같이 Fig. 2에 나타내었다. 적절한 구성물질의 선택 기준은 선택된 물질들 간의 실수부(n :굴절계수)의 차이가 크고, 허수부(k :흡수계수)의 값이 작은 것인데[4], Ru/Mo/Si는 이러한 선택 기준에 적절한 물질이라 할 수 있다. 이에 따라서 Ru을 반복되는 단위층의 물질로 도입하여, Ru/Mo/Si 다층박막의 실험을 진행하였다.

2. Experimental

A. 전산모사

본 연구에서는 Fresnel eq.[4]을 기본 알고리즘으로 사용하여 작동하는 MRSP라는 자체개발 simulator를 이용하였으며, 130Å ~ 140Å의 파장 영역에서 Peak wavelength를 가지는 다층박막의 구조인자(table 1)를 위한 d-spacing의 범위에서 고반사도를 위한 전산모사를 통하여, 마그네트론 스퍼터링 장비를 이용한 다층박막의 실험에 앞서 다층박막의 최적의 구조인자를 찾아내기 위한 실험을 진행하였다. d-spacing과 peak wavelength의 관계는 $\lambda/2\sin\theta$ (θ 는 입사각)의 관계를 가지고 있다.

B. 다층박막 미러의 제조

Ru/Mo/Si 다층박막을 제조하기 위하여 마그네트론 스퍼터링 장비를 사용하였으며, 3개의 4-inch target이 동시 장착이 가능하고, 각각의 target에 인가되는 power에는 2개의 DC power와 1개의 RF power가 있는 것이 특징이다. 따라서 박막의 증착은 Ru, Mo, 그리고 Si target을 동시에 장착하여 다층박막을 제조하였다. 앞서 진행된 전산모사를 통하여 얻어진 구조인자의 실험을 위한 박막 증착 조건의 조절은 공정압력 조절(Ar gas), 각각의 target에 인가되는 power 조절 및 시간조절을 통해서 구현하였으며, table 3에 정리하였다. 이상과 같이, 제조된 다층박막은 단면 TEM image, low-angle XRD, high-angle XRD를 통해서 간접적으로 구조 분석이 진행되었다.

3. Results and Discussion

전산모사에서 다층박막의 계면에는 계면층이 없고, 증착되는 물질은 이론밀도로 증착되며, EUV light의 입사각은 81도로 가정하여 계산하였다. 전산모사 결과들을 table 2에 나타내 보이고 있다. 이 중에서 134.7Å에서 74.8251%의 최대반사도를 보이는 구조인자를 가진 다층박막을 증착할 다층박막으로 선택하였는데, 이 다층박막의 구조인자는 d-spacing이 70Å이고, 각 층의 두께가 Ru이 15Å, Mo이 15Å, Si이 40Å이다. 증착 조건으로 선택된 구조인자보다 더 높은 반사도를 보이는 구조인자가 있지만, 이는 Si의 L-edge(124Å)[5]의 근처에서 최대 반사도 파장이 형성되는 구조인자는 증착과정의 오차범위에 들기 때문에 배제하였다. 또한, 전산모사 결과에서도 알 수 있듯이, 많은 연구가 진행되고 있는 Mo/Si 다층박막의 반사도보다 높은 반사도를 보이고 있음을 알 수 있다. d-spacing이 70Å인 경우, Ru(15Å)/Mo(15Å)/Si(40Å) 다층박막과 Mo(30Å)/Si(40Å) 다층박막의 반사도 전산모사 결과를 비교한 것을 Fig. 3에 나타내었다.

이상과 같이 증착된 다층박막의 단면 TEM Images을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 3mTorr의 공정압력에서 증착한 다층박막보다 1.5mTorr의 조건에서 증착한 다층박막의 계면 상태가 더욱 좋은 것을 알 수 있다. 이 사실은 상부층으로 갈수록 비교가 쉬워지는데, 이는 target의 sputter된 입자들의 mean free path가 공정압력이 낮을수록 증가하여, 기판위에 증착될 때 충분한 에너지를 가지고 안정한 위치로 갈 수 있기 때문이라 생각되고 있다. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에서는 증착된 시편의 구조를 간접적으로 분석한 자료들을 보여주고 있다. Fig. 5는 low-angle XRD 자료이다. 이 분석자료는 반복된 단위층의 두께, 단위층 내에서 구성물질간의 두께비, 계면에서 interdiffusion과 roughness의 정도를 종합적으로 보여줄 수 있는 자료이다. 낮은 공정압력에서 증착된 다층박막의

수록, 증착된 다층박막의 low-angle XRD peak가 주기적이며, 고각에서도 잘 나타나고 있음으로 미루어 구조적으로 더욱 좋은 다층박막의 특성을 보여주고 있다. Fig. 6는 Fig. 5의 자료를 이용하여 d-spacing을 계산한 것인데, 이를 통해서 EUV에 근접한 파장의 광원(X-ray)에 대한 광학적 효과를 고려한 실제적인 d-spacing을 알 수 있다. 이는 단면 TEM image를 통한 d-spacing 측정보다 비교적 직접적인 분석자료가 될 수 있다. 분석결과 1.5mTorr의 공정압력에서 증착한 다층박막의 data가 SD(Standard Deviation)값에서 좋은 자료를 보여주고 있다. 그러나, d-spacing이 당초에 기대했던 구조인자를 만족하지 못하는 것으로 봐서 이의 최적화는 과제로 남게 되었다. 이것은 공정압력과는 무관하게 증착시간을 설정한 것에 오류가 있었음을 알 수가 있었다. Fig. 7은 다층박막의 high-angle XRD 분석자료이다. 이 자료에서는 공정압력이 점차 낮아질수록 40도(2 θ)부근의 peak의 intensity가 커지는 것으로 보아 증착되는 박막의 밀도가 이론밀도에 가깝게 증착되고 있음을 간접적으로 보여준다고 생각된다. 이는 이론적인 반사도에 다가갈 수 있는 좋은 결과이다.

이상과 같은 실험과 분석에 따라, 결론적으로 Ru/Mo/Si 다층박막이 기존의 Mo/Si 다층박막보다 이론 반사도가 1%정도 높다는 점과 이론 반사도 값에 근접하는 다층박막을 제조하기 위해서는 적당한 에너지를 가진 입자의 증착이 필요하다는 사실에 근거한 증착조건, 즉 낮은 공정압력이 다층박막의 조건으로 요구된다는 사실 등의 증착 조건 수립에 근접했다는 점이 본 연구의 결과이다. 이에 더하여 고반사도의 실현을 위해서, 다층박막의 층간 계면 구조와 증착 상태 등의 고찰과 실험을 기반으로 증착두께의 최적화가 과제로 남아있다.

References

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductor(ITRS), Semiconductor Industry Association(SIA), November 30, 1999
- [2] Jos P. H. Benschop, anton J. J. van dijseldonk, winfried M. Kaiser, David C. Ockwell : J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 17, No. 6, Nov/Dec 1999
- [3] Richard H. Stulen and Donald W. Sweeney : IEEE Journal of quantum electronics, Vol. 35, No. 5, May 1999
- [4] Dong-Eun Kim, Dong-Ho Cha, and Sang-Won Lee : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37 (1998) pp. 2728-2733
- [5] D.G. Stearns and R.S. Rosen, S.P. Vernon : J. Vac. Sci. Technol. A 9(5), Sep/Oct 1991

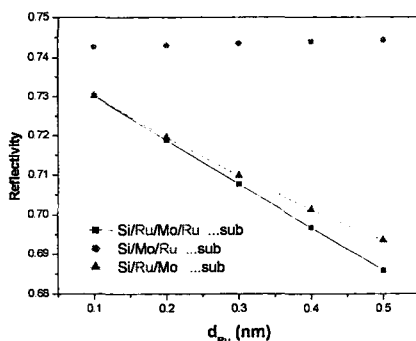


Fig. 1 Optical Simulation of Mo/Si multilayer added Ru barrier layer.

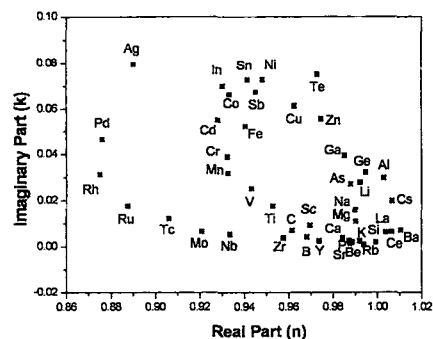


Fig. 2 The indices of refraction of various elements at 135Å in a complex space.

Table 1. Definition of structure factors for Mo/Si multilayer.

d_{Ru}	Ru film thickness
d_{Mo}	Mo film thickness
d_{Si}	Si film thickness
d-spacing	$d_{Mo} + d_{Si} + d_{Ru}$
ν	$\frac{d_{Ru} + d_{Mo}}{d_{Ru} + d_{Mo} + d_{Si}}$
N	Total number of period

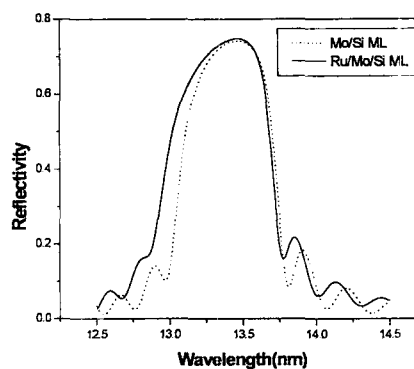


Fig. 3 The reflectivity of Ru/Mo/Si multilayer vs. Mo/Si multilayer.

Table 2 The results of optical simulation of Ru/Mo/Si multilayer.

d-spacing	Ru	Mo	Si	N	Reflectivity	Peak wavelength
72Å	16Å	16Å	40Å	40	73.8691%	138.0Å
72Å	12.8Å	19.2Å	40Å	40	74.2277%	138.0Å
70Å	18Å	12Å	40Å	40	74.2672%	134.7Å
70Å	15Å	15Å	40Å	40	74.8251%	134.7Å
70Å	12Å	18Å	40Å	40	75.0222%	134.7Å
70Å	9Å	21Å	40Å	40	74.9191%	134.6Å
68Å	16.8Å	11.2Å	40Å	40	75.1196%	131.4Å
68Å	14Å	14Å	40Å	40	75.4970%	131.4Å
68Å	11.2Å	16.8Å	40Å	40	75.5836%	131.3Å
68Å	8.4Å	19.6Å	40Å	40	75.4231%	131.3Å

Table 3 The conditions of deposition of Ru/Mo/Si multilayer fabricated by magnetron sputtering.

	Ru	Mo	Si
Power	DC 50W	DC 50W	RF 100W
Target Purity	3N	3N	5N
Deposition Time	28"	19"	2'43"
Film Thickness	15Å	15Å	40Å
Working Pressure	1.5 - 3 mTorr		
Base Pressure	1.0×10^{-6} Torr		
Gas	Ar		
Temp.	R.T. (~300K)		

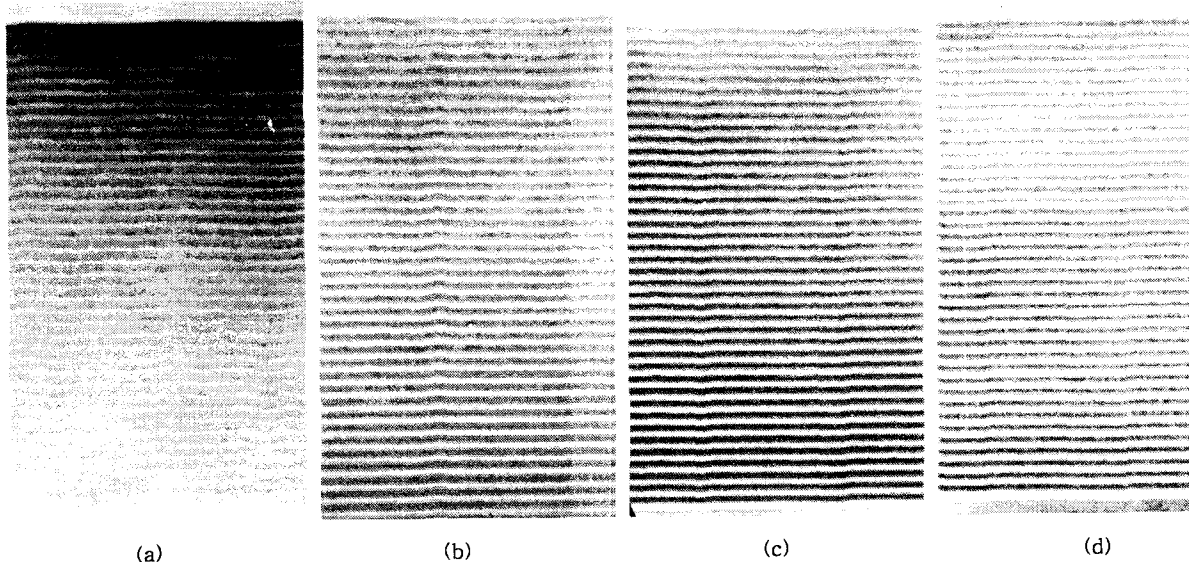


Fig. 4 The cross-sectional TEM Images of Ru/Mo/Si multilayers fabreicated by magnetron sputtering under other conditions. (a) 3mTorr (b) 2.5mTorr (c) 2mTorr (d) 1.5mTorr

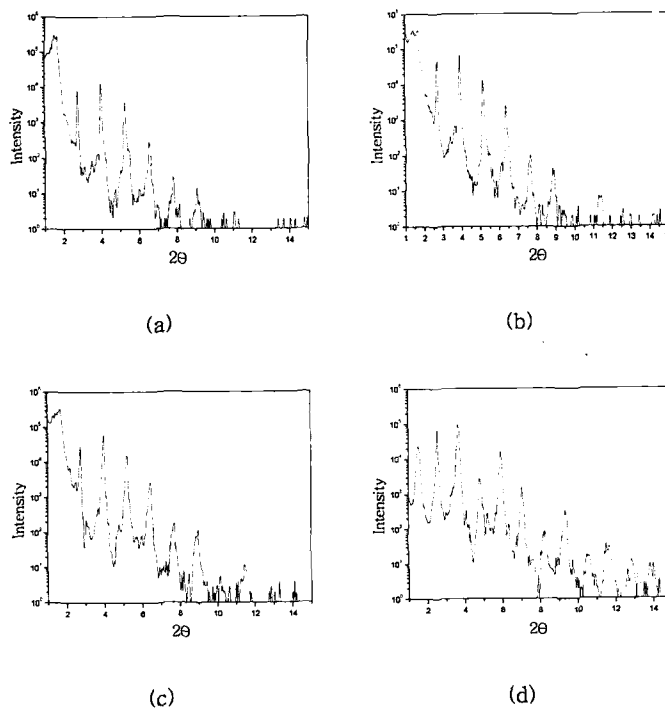


Fig. 5 The low-angle XRD peaks of Ru/Mo/Si multilayers fabreicated by magnetron sputtering under other conditions. (a) 3mTorr (b) 2.5mTorr (c) 2mTorr (d) 1.5mTorr

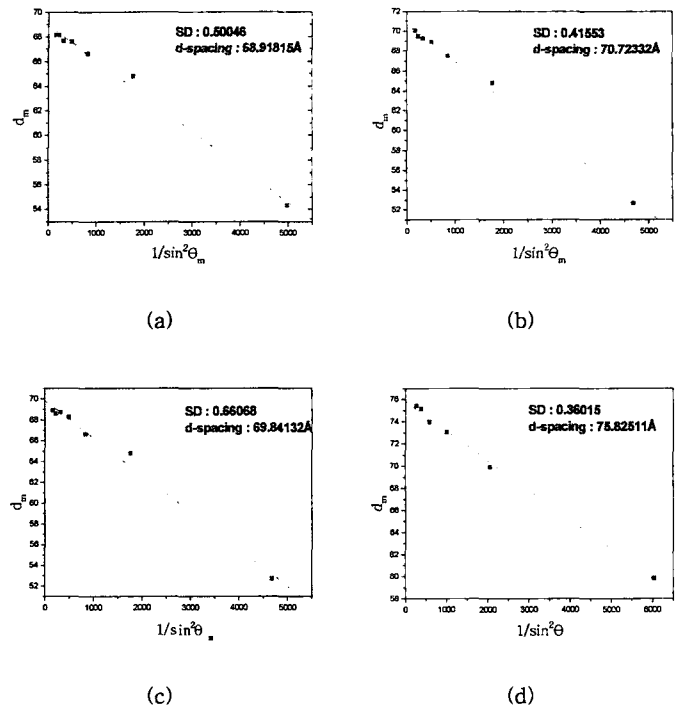


Fig. 6 SD(standard deviation) and d-spacing calculated from low-angle XRD peaks of Ru/Mo/Si multilayers fabricated by magnetron sputtering under other conditions. (a) 3mTorr (b) 2.5mTorr (c) 2mTorr (d) 1.5mTorr

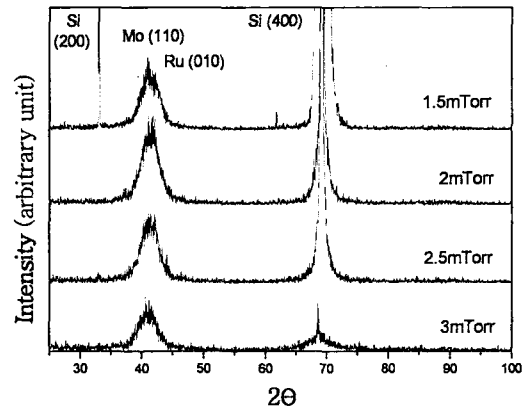


Fig. 7 The high-angle XRD peaks of Ru/Mo/Si multilayers fabricated by magnetron sputtering under other conditions. (3mTorr, 2.5mTorr, 2mTorr, 1.5mTorr)