

## Mo/Si 다층박막의 극자외선 반사도에 대한 전산모사

이영태 · 강인용 · 정용재 · 이승윤\* · 허성민\* · 안진호\* · 복철규\*\*

한양대학교 세라믹공학과, \*한양대학교 재료공학과, \*\*현대전자산업(주) 메모리연구소

### Optical Simulation on EUV Reflectivity of Mo/Si Multilayer Structure

Young Tae Lee, In Yong Kang, Yong-Chae Chung, Seung Yoon Lee\*, Sung Min Huh\*,  
Jin Ho Ahn\*, and Cheol Kyu Bok\*\*

Dept. of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

\*Dept. of Materials Science Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

\*\*Memory Research & Development Division, Hyundai Electronics Industries Co., Ltd.

**초 록:** EUV 노광공정의 반사형 노광계 및 마스크에 사용되는 Mo/Si 다층박막 증착 시 발생하는 각 층의 두께 변화와 상호확산 층 (inter-diffusion layer)이 생성될 경우에 대하여 이들이 다층박막 반사도에 미치는 영향을 전산모사를 통하여 알아보았다. 본 연구그룹에서 개발한 다층박막 반사 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 Mo/Si 40-period 박막의 반사도를 계산한 결과, 각각의 period가 두께의 편차(28%)를 갖는 경우, 모든 period가 같은 두께를 갖는 다층박막에 비해 최대반사도가 10.8% 감소가 되었으며 두 층 간 물질 사이의 상호확산(interdiffusion) 층을 가정하였을 경우, 다층박막의 경우 그렇지 않은 경우에 비해 4.7%의 최대반사도가 감소가 예상되었다. 그리고 각 층의 적층에 따른 반사도의 변화를 시뮬레이션 프로그램을 통해 계산한 결과 반사도는 25 층까지 계속 증가하며 26 층부터 불규칙한 경향성을 가지며 증가와 감소를 반복함을 알 수 있었다.

**Abstract:** The effect of thickness variation and inter-diffusion layer on the reflectivity of Mo/Si multilayer has been investigated. The reflectivity of the imperfect Mo/Si multilayer with thickness variation of 28% was found to be lowered by 10.8% compared to that of ideal Mo/Si multilayers with 40-periods. When the inter-diffusion layer is taken into account, the reflectivity is decreased by 4.7% additionally. We also found that the reflectivity continued to increase until the 25th-layer but it showed irregular tendencies about increment and decrement from the 26th-layer of Mo/Si multilayer structures.

**Key words:** EUVL, optical simulation, Mo/Si multilayer, reflectivity, NGL

### 1. 서 론

1974년 Brattinin, Bardeen, Shockly에 의해 처음 transistor가 개발된 이후 지속적인 미세화 · 집적화를 거쳐서 현재 최소선폭 0.18  $\mu\text{m}$ 급의 소자가 양산단계에 이르렀다. 이러한 반도체 기술 발전의 원동력은 DRAM의 집적도 향상 및 CPU의 연산능력 향상에 근본적인 영향을 미치는 노광기술의 발전에서 찾을 수 있다. 따라서 효율적인 노광기술의 확보는 차세대 반도체 소자 제조 기술의 성패를 결정지를 뿐만 아니라 경제성을 결정짓는 중요

한 요소라 할 수 있다. 현재의 원자외선 (DUV: deep ultra-violet)을 광원으로 하는 가시광 노광공정은 최소선 폭 0.1  $\mu\text{m}$ 의 영역까지 그 기술의 연장이 가능할 것으로 예상되고 있다. 그러나 Giga bit 급의 미세 패턴을 구현하기 위한 0.1  $\mu\text{m}$  이하의 공정에선 회로의 최소선폭의 크기가 광원의 파장보다 훨씬 작아지므로 사용이 불가능하다. 그리고 같은 노광기술의 연장선이라 할 수 있는 193  $\mu\text{m}$  파장을 가진 ArF 광원의 노광기술이 거의 상용화단계에 있으나 0.1  $\mu\text{m}$ 급의 최소 선폭이 이미 ArF 광원 파장의 0.5배에 이르고 있어, 70 nm급 및 그 이하의

선폭을 가지는 회로 제작을 위해서는 새로운 광원을 이용하는 노광기술이 필요하다.<sup>1)</sup> 이러한 기존의 광학노광 기술이 가지는 물리적인 한계를 넘을 수 있는 0.1  $\mu\text{m}$ 급 이하의 소자세대에 적용이 가능한 차세대 노광기술로 EUVL (Extreme Ultra-Violet Lithography)이 크게 주목 받고 있다.<sup>2,3)</sup> EUV 노광공정은 해당파장 영역에서 대부분의 물질에 대한 낮은 투과율로 인하여 기존의 투과형 노광계와 마스크와는 전혀 다른 반사형 마스크와 노광계를 사용해야 한다. 이에 따라 EUV 노광공정시 극자의 선을 반사하는 반사 미러의 제작이 중요한 이슈로 떠오르고 있는데, 이는 반사 미러의 반사도가 증가할수록 기판에 도달되는 광원의 강도가 강해짐으로 인해 결국 EUV 노광공정의 생산량 (throughput)의 증가로 직결되기 때문이다. 따라서 고 반사율의 극자외선 반사 다층박막의 제작은 EUV 노광공정의 실용화에 있어 가장 중요한 요소기술로 대두되고 있는 실정이다.<sup>4,7)</sup> 이러한 EUV 노광공정의 극자외선 반사 미러의 응용을 위해서 Mo/Si 다층박막이 가장 활발히 연구되고 있는데 그 이유는 이론상 Mo/Si 다층박막의 최대 반사도가 13.6 nm의 파장대에서 73.8%로 다층박막 조합에서 최대치를 가지고 있기 때문이다. 이때의 구조인자는 3 nm의 Mo 층과 4 nm의 Si 층을 하나의 period로 하여 40-period를 형성했을 경우에 해당한다.<sup>8)</sup> 그러나 스퍼터링 공정으로 다층박막을 증착할 경우 제안된 구조인자와 동일하게 균일한 두께로 증착하는 것은 거의 불가능하다. 미세한 공정 조건의 변화에도 각 층의 두께가 변화하고 상호확산(interdiffusion) 층이 생성될 수 있기 때문이다. 이러한 변화는 다층박막의 반사도에 직접적인 영향을 주게 된다.<sup>9,10)</sup> 따라서 실제 증착시 발생하는 period등의 구조인자 및 박막 물질의 변화에 대한 능동적인 예측수단을 가지는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 각 층의 두께와 물성치를 자유롭게 조절할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 Mo/Si 다층박막 형성 시 발생하는 박막의 두께 변화와 두 층간 물질 사이의 상호확산 층의 생성에 따른 다층박막의 반사도에 미치는 영향에 관하여 연구를 하였다.

## 2. 실험방법

일반적인 다층박막의 반사도 시뮬레이션에는 미국 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory) 산하 CXRO(The Center for X-Ray Optics)에서 공개한 것과 같은 단일 구조인자와 밀도를 가지는 다층박막에 대한 반사도 전산모사가 가능한 프로그램이 사용되어져 왔었다.<sup>11)</sup> 그러나 이러한 종류의 프로그램들은 각 층의 두께

와 물성치를 개별적으로 조절하지 못하는 한계를 가지고 있어 실제 공정에서 필연적으로 발생하는 각 층의 두께 변화와 이종물질 두 층 사이에 생성되는 상호확산층 등이 다층박막의 반사도에 미치는 영향은 사실상 고려가 불가능하여 실제적인 다층박막의 연구에 있어 많은 아쉬움을 남겼다. 이러한 점에서 착안, 본 연구에서는 각 층의 두께와 물성치를 자유롭게 조절하여 다층박막의 반사도 계산이 가능한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 다층박막의 반사도를 계산하였다. Fig. 1은 프로그램에 응용된 다층박막 각 층 반사도의 모식도이다. 다층박막에서 각 층의 순서는 기판 위에 증착된 층이 제 1 층이고 박막 표면의 층이 최종 층으로 정해진다. 기판에서의 반사도( $R_{\text{sub}}$ )는 기판의 두께가 증착된 박막의 두께에 비해 매우 크기 때문에 반사된 광원이 기판 자체에 모두 흡수되므로 0이라 가정하였다.<sup>12)</sup>  $R_{\text{sub}}$ 를 초기치로 이용하여 인접한 두 층 간의 반사도( $R_N, R_{N+1}$ ) 관계식을 통하여 제 1 층부터 차례대로 올라가며 최종 층까지의 반사도( $R_{\text{Air}}$ )를 계산하였다. 이러한 반사도 계산 방식으로 개발된 시뮬레이션 프로그램은 CXRO와는 달리 각 층의 반사도가 계산되므로 각 층의 물성치와 두께가 자유롭게 조절이 가능하다. 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 프로그램은 비주얼 C++ MFC를 이용하여 제작되었으며 두 가지의 모드로 구성되어 있다. 첫 번째는 파장 범위의 스캔 범위를 설정하여 파장 변화에 따른 반사도를 계산하는 모드이며 두 번째는 특정 파장대에서 각 층의 변화에 따른 반사도를 계산하는 모드이다.

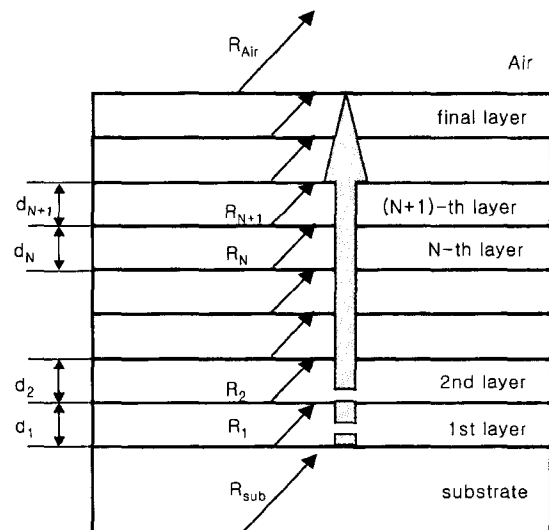


Fig. 1. 시뮬레이션 프로그램에 응용된 다층박막 각 층의 반사도의 모식도.

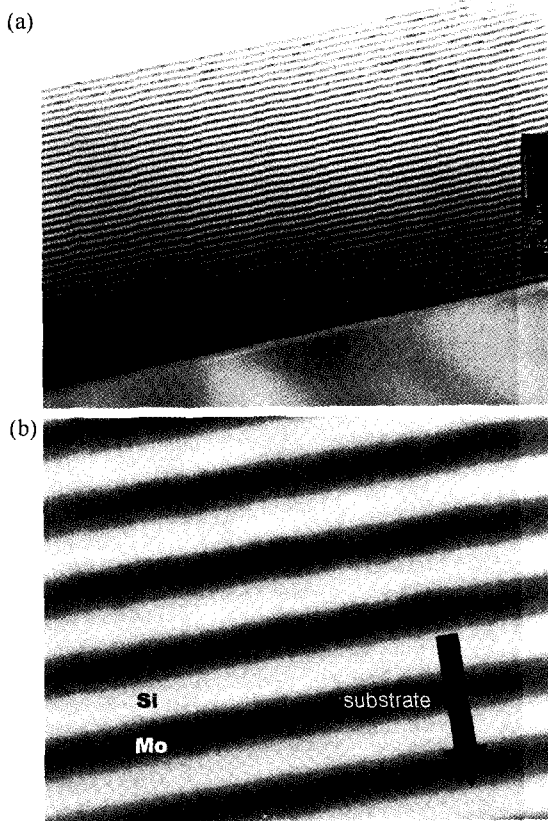


Fig. 2. Mo/Si multilayer의 (a) 40N 전체의 HRTEM 사진과 (b) interface를 보여주는 확대사진.

우선 스퍼터링 공정으로 증착된 Mo/Si 40층 박막의 cross-section TEM 사진을 Fig. 2 (a)에 나타내었다. 박막 증착 시 공정조건으로 증착 온도는 상온, 증착 압력은 2.5 mTorr이며 타겟과 기판사이의 거리는 13 cm이다. 증착시 구조인자는 13 nm의 파장대에서 최대 반사도를 가지는 구조인자를 고려하여 Mo 층은 DC 스퍼터링 (100W)공정으로 4 nm의 두께로 증착하였고 Si 층은 RF 스퍼터링 (100W)공정으로 3 nm의 두께로 증착하였다. Fig. 2 (b)는 TEM 사진의 일부를 확대시켜 관찰한 것이다. 확대된 TEM 사진을 통해 각 층의 두께를 측정하고 상호확산층의 생성을 확인하였다. 두께 측정은 TEM 사진 상에서 평도의 차이가 확연하게 나타나는 부분을 경계로 하여 측정하였다. 측정 오차의 가능성은 모든 period에 같은 기준을 적용하였기 때문에 결과적으로 소거되었다고 볼 수 있다. TEM 사진을 통해 측정된 다층박막 각 층의 두께와 각 층을 이루는 물질의 물성치를 대입하여 반사도 계산을 위한 데이터 파일을 형성하였다. 이 때 사용된 물성치는 atomic scattering factor( $f_1$ ,  $f_2$ )와

단위 부피당 원자 개수인 원자농도로 구성되어 있다. atomic scattering factor와 원자농도를 물성치로 선택한 이유는 각 층의 굴절률이 atomic scattering factor와 원자농도의 함수이기 때문이다.<sup>8)</sup> 식 1에 굴절률에 관한 식을 나타내었다.

$$n = 1 - \frac{r_e N_a \lambda^2}{2\pi} (f_1 + i f_2) \quad (1)$$

식에서  $\lambda$ 는 입사된 광원의 파장이며,  $r_e$ 는 전자의 반지름의 값으로  $2.817940285 \times 10^{-15}$  m이다.  $N_a$ 는 층 구성물질의 단위부피당 원자 개수로서 단위는 개수/m<sup>3</sup>이다. 그리고  $f_1$ ,  $f_2$ 는 층 구성물질의 atomic scattering factor를 나타낸다.

첫 번째 실험은 증착 공정 시 각 층의 두께 변화가 반사도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험이다. TEM 사진으로 측정된 Mo 층, Si 층의 두께와 물성치를 데이터로 만들어 시뮬레이션 프로그램을 통해 반사도를 계산하였다. 그리고 이론적인 최대 반사도와 비교를 위해 Mo 층과 Si 층 두께의 평균값을 계산하여 이를 Mo 층과 Si 층에 각각 40번 반복시킨 데이터를 만들어 반사도를 계산하였다. 두 번째 실험은 증착 공정 시 상호확산층의 생성이 반사도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험이다. TEM 사진으로 측정된 생성 상호확산층의 두께와 물성치를 데이터로 만들어 시뮬레이션 프로그램을 통해 반사도를 계산하였다. 그리고 상호확산층이 전혀 없는 첫 번째 실험 결과를 이용하여 최대 반사도를 비교하였다. 세 번째 실험은 최대 반사도가 나타나는 파장에서 각 층의 변화에 따른 반사도의 변화를 알아보기 위한 실험이다. 첫 번째 실험 결과로부터 최대 반사도를 가지게 되는 파장을 구하고 시뮬레이션 프로그램을 통해 각 층의 변화에 따른 반사도를 계산하였다. Mo 층위에 Si 층이 적층되었을 때와 Si 층위에 Mo 층이 적층되었을 때의 각각의 반사도의 변화 양상을 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1. 각 층 두께의 불균일성이 반사도에 미치는 영향

Mo/Si 40층 박막의 TEM 사진에서 측정된 Mo 층과 Si 층의 두께 분포를 Fig. 3 (a)에 나타냈다. Mo 층과 Si 층의 두께 분포 측정의 결과에 대한 두 층의 두께 모두 28%의 편차를 가지는 것으로 나타났다. 앞서 언급했듯이 측정된 각 층의 두께와 각 층의 물성치인 atomic scattering factor, 원자 농도를 데이터 파일로 만들어 계산한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3 (b)의 실선 그래프이다. 파장의 변화 범위는 11.8 nm에서 13.8 nm이며 12.76 nm의

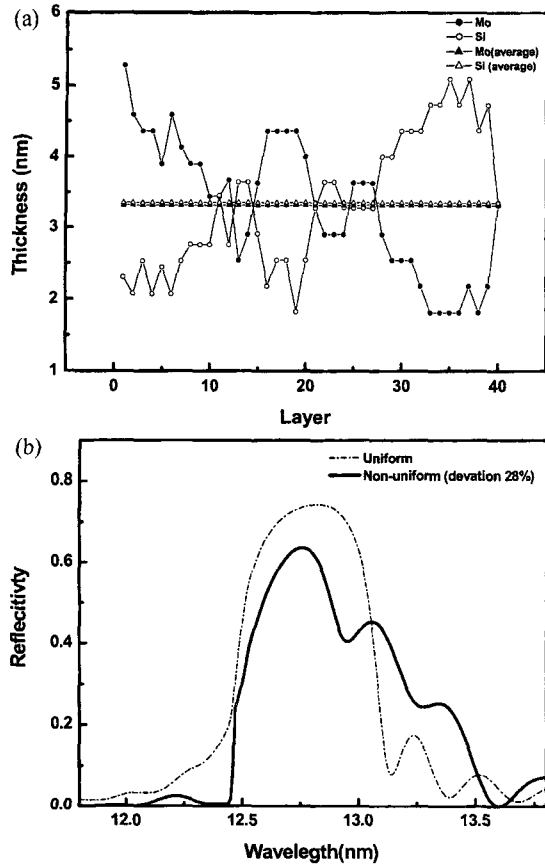


Fig. 3. 증착된 Mo/Si 다층박막에 대한 (a) HRTEM에서 측정된 구조인자 값과 (b) 이를 대입하여 구한 반사도 시뮬레이션 결과.

파장대에서 63.5%의 최대 반사도가 나타났다. 또한 이론적인 최대 반사도와 비교를 위해 측정된 Mo 층과 Si 층의 평균 두께를 계산하였다. Fig. 3 (a)에서와 같이 Mo 층의 평균 두께는 3.31 nm이고 Si 층의 평균 두께는 3.35 nm이다. Mo 층의 평균 두께와 Si 층의 평균 두께를 40번 반복하고 이를 데이터 파일로 만들어 계산한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3 (b)의 점선 그래프이다. 파장의 변화 범위는 실선 그래프와 동일하게 11.8 nm에서 13.8 nm이며 12.84 nm의 파장대에서 74.3%의 최대 반사도가 나타났다. 두 그래프를 비교하면 266.4 nm의 동일한 두께를 가진 Mo/Si 40층 박막에서 두께의 편차가 전혀 없이 같은 두께로 반복되는 경우인 점선 그래프에 비해 28%의 두께의 편차가 생기는 경우인 실선 그래프는 최대 반사도가 10.8% 감소하며 최대 반사도가 나타나는 파장대도 0.08 nm 감소하였다.

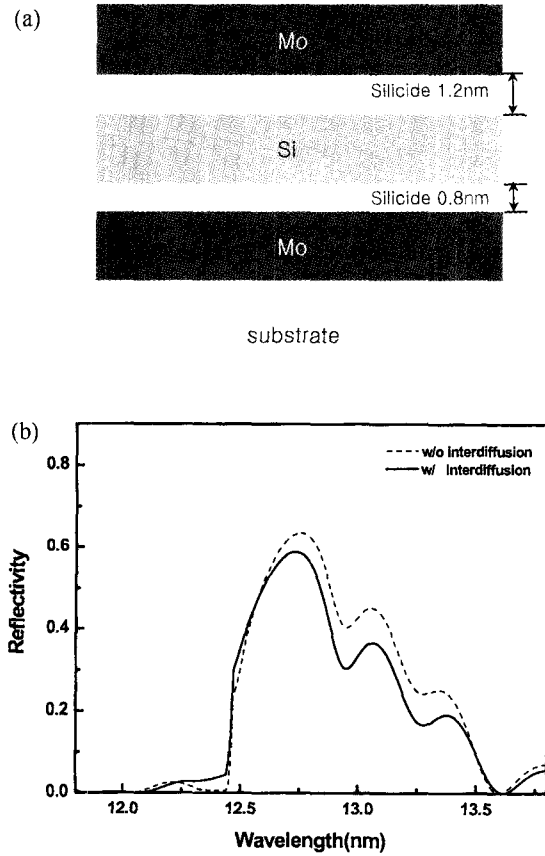


Fig. 4. (a) 상호확산층의 형태에 대한 개략도와 (b) 이를 고려하였을 경우의 반사도의 하락 그래프.

## 2. 상호확산 층의 생성이 반사도에 미치는 영향

그리고 Mo/Si 40층 박막의 TEM 사진에서 측정된 상호확산 층인 silicide의 모식도를 Fig. 4 (a)에 나타내었다. silicide는 Mo 층위에 Si 층이 증착될 때는 0.8 nm의 두께로 생성되고 Si 층위에 Mo 층이 증착될 때는 1.2 nm의 두께로 생성된다. 생성된 silicide 두께 차이의 원인은 Si 이 Mo보다 원자량이 적고 Si의 물질구조가 비정질이기 때문이다. 시뮬레이션에 적용된 silicide의 물성치 중 atomic scattering factor는 Mo의 atomic scattering factor로 대체하였다. 따라서 생성된 silicide의 두께와 silicide의 물성치를 데이터 파일로 만들어 계산한 시뮬레이션 결과는 Fig. 4 (b)의 실선 그래프이다. 파장의 변화 범위는 11.8 nm에서 13.8 nm이며 12.73 nm의 파장대에서 58.8%의 최대반사도가 나타난다. Silicide가 전혀 생성되지 않은 경우와 비교하기 위해 앞서 실험했던 실제 측

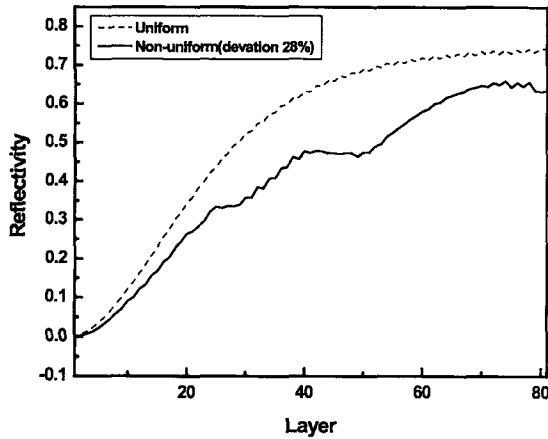


Fig. 5. 적층 수 증가에 따른 각 층의 반사도 변화 그래프.

정한 두께의 편차가 생기는 경우의 시뮬레이션 결과를 점선 그래프로 나타내었다. 두 그래프를 비교하면 266.4 nm의 동일한 두께를 가진 Mo/Si 40층 박막에서 silicide가 전혀 생성되지 않는 경우인 점선 그래프에 비해 silicide가 생성되는 경우인 실선 그래프는 최대 반사도가 4.7% 감소하고 최대 반사도에서의 파장대도 0.03 nm 감소하였다.

### 3. 적층수의 변화에 따른 반사도의 변화

앞서 실험한 결과 스퍼터링 공정으로 제작된 Mo/Si 40층 박막의 최대 반사도가 나타나는 파장대는 12.76 nm이다. 시뮬레이션 프로그램을 통해 계산된 12.76 nm의 파장대에서 적층수의 변화에 따른 반사도의 변화 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 반사도의 변화 양상은 25층까지는 반사도가 계속적으로 증가하며 26층부터는 불규칙적인 경향성을 보이며 반사도의 증가와 감소가 나타난다. 또한 이론적인 경우와의 비교하기 위해 앞서 실험했던 Mo층과 Si층의 평균두께 데이터를 이용하여 12.84 nm의 파장대에서 적층수의 변화에 따른 반사도의 변화 결과를 계산하여 Fig. 5 나타내었다. 반사도의 변화 양상은 42층까지는 반사도가 계속적으로 증가하며 43층부터 반사도의 증가와 감소가 규칙적으로 나타났다.

### 4. 결 론

시뮬레이션 결과를 통해 알아낸 Mo/Si 다층박막의 최대 반사도를 감소시키는 요인은 각 층 두께의 변화와 상호확산 층인 silicide의 생성이다. 각 층 두께의 변화(28%의 편차)는 silicide의 생성보다 상대적으로 최대 반

사도를 5.1% 더 감소시키고 최대 반사도에서의 파장도 0.05 nm 더 변화시켰다. 실제 스퍼터링 공정으로 다층박막 반사 마스크를 제조할 때 다층박막의 각 층 두께의 변화가 생기거나 상호확산 층이 생길 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 다층박막의 반사도 변화 양상을 알아낼 수 있다면 반사 마스크 제조시 공정의 가이드 라인을 제공할 수 있다. 또한 EUV의 파장 영역에서 다층박막의 반사도는 실험 장비에 의해 측정하지 않고서도 시뮬레이션 프로그램을 통해 최대 반사도를 계산할 수 있다. 이는 제조된 반사 마스크를 EUV 노광공정에 사용할 때 그 사용여부를 미리 예측할 수 있으므로 공정의 여유도를 제공할 수 있다. 그리고 적층수의 변화에 따른 반사도 변화의 시뮬레이션 결과는 25층까지는 반사도가 계속 증가하며 26층부터는 반사도의 증가와 감소가 불규칙적인 경향성을 보이며 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과는 이중물질의 다층박막 구조나 삼중물질의 다층박막 구조 연구에 있어서 중요한 길잡이가 될 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 추진하는 21세기 프론티어 사업중 테라급 나노소자 개발 사업단 지원으로 수행되었습니다.

### References

1. Phil Seidel, John Canning, Scott Mackay, "Beyond Refractive Optical Lithography Next Generation Lithography-What's After 193 nm?", IEEE/CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium., pp. 334-341, (1997).
2. C. W. Gwyn, R. Stulen, D. Sweeney, and D. Attwood, "Extreme Ultraviolet Lithography", American Vacuum Society., pp. 3142-3149, (1998).
3. Richard H. Stulen and Donald W. Sweeney., "Extreme Ultraviolet Lithography", IEEE J. of Quantum Electronics., Vol. 35, pp. 694-699, (1999).
4. D. G. Stearns, R. S. Rosen and S. P. Vernon, "Multilayer Mirror Technology for Soft-X-Ray Projection Lithography", Appl. Opt. 32, 6952-6960, (1993).
5. B. S. Bollepalli, M. Khan, and F. Cerrina, "Imaging Properties of the Extreme Ultraviolet Mask", American Vacuum Society., pp. 3444-3448, (1998).
6. Katsuhiko Murakami, Tetsuya Oshino, Hiroo Kinoshita, Takco Watanabe, and Hiromasa Yamanashi, "Ring-Field Extreme Ultraviolet

- Exposure System Using Aspherical Mirrors”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. 6750-6755, (1998).
7. Mandeep Singh and Joseph J. M. Braat, “Design of Multilayer extreme-ultraviolet mirrors or enhanced reflectivity”, *App. Opt.*, Vol. 39, No. 13, pp. 2189-2197, (2000).
  8. Dong-Eon Kim, Dong-Ho Cha and Sang-Won Lee, “Optimized Structures of Multilayer Soft X-Ray Reflectors in the Spectral Range of 30 to 300Å”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. 2728-2733, (1998).
  9. Robert S. Rosen, Daniel G. Stearns, Michael A. Viliardos, Michael E. Kassner, Stephen P. Vernon, and Yuanda Cheng, “Silicide layer Growth Rates in Mo/Si Multilayers”, *App. Opt.*, Vol. 32, No. 34, pp. 6975-6980 (1993).
  10. Noboru Miyata, Sadayuki Ishikawa, Mihiro Yanagihara and Makoto Watanabe, “Buried Interfaces in Mo/Si Multilayers Studied by Soft-X-Ray Emission Spectroscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, pp. 6476-6478, (1999)
  11. [http://www-cxro.lbl.gov/optical\\_constants/multi2.html](http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/multi2.html).
  12. V. G. Kohn, “On The Theory of Reflectivity by an X-Ray Multilayer Mirror”, *phys. stat. sol. (b)*, Vol. 187, No. 61, pp. 61-70 (1995).