

EUVL 응용을 위한 Mo/Si 박막 특성 전산모사

이영태 · 정용재[†]

한양대학교 세라믹공학과

(2002년 7월 30일 접수; 2002년 8월 7일 승인)

Computer Simulation of Mo/Si Thin Film Characteristics for EUVL Technology

Young Tae Lee and Yong-Chae Chung[†]

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 30, 2002; Accepted August 7, 2002)

초 록

본 연구에서는 EUVL(Extreme Ultra-Violet Lithography) 공정에서 사용되어지는 Mo/Si 다층박막 마스크 물질의 최적화된 제조공정을 도모하기 위해 Monte Carlo법을 적용한 PVD 공정 시뮬레이터를 사용하여 Mo/Si 다층박막 증착변수에 따른 박막의 형상변화를 분석하였다. 박막의 형상은 가스압력($1\sim 30\text{ mTorr}$), 타겟과 기판과의 거리($1\sim 30\text{ cm}$) 및 확산거리($1\sim 10\text{ nm}$)에 따라 크게 변함을 알 수 있었으며 가스압력이 낮을수록, 기판과 타겟과의 거리가 멀어질수록 균일한 표면의 박막 형성이 가능할 것으로 예측되었다.

ABSTRACTS

In this work, we investigated the deposition behavior of Mo/Si multilayer thin film structures simulated by a PVD process simulator based on Monte Carlo method to assist the optimized fabrication of the high quality mask in EUVL(Extreme Ultra-Violet Lithography) process. The shape of simulated thin film structures turned out to be largely dependent on the gas pressure ($1\sim 30\text{ mTorr}$), the target-substrate distance($1\sim 30\text{ cm}$) and the diffusion length($1\sim 10\text{ nm}$). From the simulation studies, it was predicted that relatively uniform thin film structures can be fabricated by decreasing gas pressure and increasing the target-substrate distance.

Key words : Mo/Si thin film, EUVL, Monte Carlo simulation, PVD process, SIMBAD

1. 서 론

반도체 메모리 소자는 지난 20여년 동안 Moor's law에 따르는 지속적인 크기 감소와 성능의 향상을 이룩하고 있으며 이와 같은 소자의 발전은 노광기술의 해상도 한계와 직접적인 연관성을 가지고 있다. 그러나 90년대 초반에 들어 기존 원자외선을 이용한 광학 노광공정의 100 nm 이하 해상도 영역에 대한 우려와 지적이 계속적으로 일어났으며 이에 따라 광학 노광공정의 한계를 극복하기 위한 몇 가지의 차세대 노광공정에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 대표적인 차세대 노광공정으로는 PXRL(Projection X-Ray Lithography), SCALPEL(Scattering with Angular Limitation for Projection E-beam Lithography), EUVL, IPL(Ion Projection Lithography) 등이 있으며, 이들 중 극자외선을 광원으로 사용하는 EUVL

기술이 높은 해상도, 생산성, 요소 기술 등의 주변여건을 고려하여 볼 때 가장 현실화에 근접한 기술로 평가되고 있다.^{1,2)}

EUVL은 기존의 광학 노광기술과는 전혀 다른 반사형 노광계와 마스크를 사용하여 Soft X-선을 반사한다. 따라서 효율적인 X-선 반사를 위한 다층박막 제조는 EUVL 공정의 현실화에 있어 중요한 선결 조건으로 인식되고 있다.^{3,4)} 현재까지 연구되어온 Soft X-선 반사물질로는 Mo/Si 다층박막이 사용되고 있으며 이론상 13 nm 의 과정에서 가장 높은 X-선의 반사도(약 78%)를 가지는 것으로 알려지고 있다.⁵⁾ 그러나 계면의 불안전성에 의해 실제 다층박막의 반사도는 이론적 반사도에 미치지 못하고 있는 것이 현실이며 다층박막의 적층 시 발생하는 결함에 대한 평가와 결합 저감 공정의 확보가 다층박막형 마스크 개발의 관건으로 대두되고 있다.

본 연구에서는 EUVL 공정에서 사용되어지는 Mo/Si 다층박막 마스크 물질 제조공정의 최적화를 도모하기 위해 Monte Carlo 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 이러한 시뮬레이션 방식은 재료의 특성평가 및 새로운 재료의 설계

[†]Corresponding author : Yong-Chae Chung

E-mail : yongchae@hanyang.ac.kr

Tel : +82-2-2296-5308 Fax : +82-2-2281-5308

에 컴퓨터를 이용하는 기술을 말하며, 실제 실험으로 얻는 결과와 비교하여 짧은 시간이 소요될 뿐만 아니라 실제 실험에서는 불가능한 공정조건의 완전한 제어를 통하여 특정변수가 미치는 효과를 예측할 수 있다. 이러한 공정변수의 독립적 변화가 가능한 PVD 공정 시뮬레이터를 사용하여 Mo/Si 다층박막 마스크 제작 시 각각의 공정조건들에 따른 계면의 특성이 어떻게 변화하는지에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

스퍼터링 공정에 의해 제작된 다층박막의 특성을 결정하는 일반적 조건으로는 스퍼터 압력, 타겟과 기판사이의 거리, 고주파 파워, 기판온도 등이 있으며 이를 공정조건의 조절을 통하여 원하는 박막을 제조할 수 있다. 이러한 공정조건에 따른 다층박막 계면특성의 영향을 알아보기 위해 본 연구에서는 통계역학에 기본을 둔 Monte Carlo 시뮬레이션 방식을 적용한 SIMBAD 2.1을 사용하였다. SIMBAD 2.1은 PVD 공정 시뮬레이션에 적용이 가능한 소프트웨어로 박막 증착시의 원자들의 유동과 계면에서의 반응 및 확산현상에 대한 물리적인 면의 해석이 가능하다.

2.1. 증착압력의 변화

증착속도를 증가시킬 수 있는 효과적인 방법으로 주입되는 Ar 가스의 압력을 증가시키는 방식을 사용한다. 주입 가스의 압력이 증가되면 타겟으로부터 방출된 물질의 평균자유행로(mean free path)가 감소해서 큰 current가 흐르게 되어 증착속도를 증가시키지만 압력이 너무 높게 되면 이온과 스퍼터 입자의 운동이 충돌에 의해 방해받게 되어 오히려 증착속도를 감소시키게 되므로 적당한 압력조정이 필요하다. 기판형성에서 가스압력의 영향을 알아보기 위해 Mo, Si를 각각 타겟물질로 사용하여 압력을 1 ~ 30 mTorr로 변화시켜 균일도(uniformity)와 증착효율(deposition efficiency)을 관찰하였다. 이때 또 다른 박막증착을 위한 스퍼터링의 공정변수들을 Table 1에 정리하였다.

2.2. 타겟-기판 사이의 거리 변화

박막의 잔류응력은 증착 되는 물질분자 또는 클러스터가 갖는 에너지 및 박막형성 시 포함되는 불순물에 영향을 받는다. 스퍼터링 전 진공도가 $10 E^{-5}$ Pa 이하일 경우 불순물의 영향은 무시할 수 있으며, 이때 박막의 잔류응력은

음극 전압, 타겟 침식, 플라즈마 압력 등에 영향을 받으며, 특히 타겟과 기판 사이의 거리가 중요하다. Table 1의 스퍼터링 제반변수를 이용하여 타겟과 기판 사이의 거리를 1~30 cm로 변화시켜 균일도와 증착 효율을 관찰하였으며 타겟에서 발생한 입자들이 기판에 도달할 때 갖게 되는 입사각 분포(angular distribution)에 대한 영향을 분석하였다.

2.3. 기판온도의 변화

기판온도가 높아지면, 스퍼터 입자가 기판에 도달하여 원하는 자리를 찾아 갈 수 있는 충분한 에너지를 얻을 수 있어서 결정화가 양호하지만 휘발 성분이 손실되는 단점이 있다. 박막성장에서 기판온도는 매우 중요하게 고려되어야 하는 변수이나 본 연구에 사용된 시뮬레이터에서는 직접적으로 제어할 수 없었다. 따라서 기판온도에 따른 증착계면의 변화를 관찰하기 위해 식(1)을 이용해서 확산거리에 따른 기판온도를 구할 수 있었다.^{6,7)}

$$L = \sqrt{D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)t} \quad (1)$$

여기서 L은 확산거리를 나타내며 D_0 은 확산계수(diffusion coefficient), E_a 는 활성화에너지(activation energy), k는 볼츠만 상수, T는 기판온도이다. 식(1)의 확산거리를 이용 두 가지 가정을 하였다. 첫 번째로 활성화 에너지가 상수라는 것과 두 번째로 시간이 고정된다는 것이다. 이 두 가정을 바탕으로 식(1)의 확산거리는 $T \propto \ln L$ 관계를 가지게 되며 결과적으로 확산거리가 온도만의 함수로 나타나게 된다. 스퍼터링 공정에서 기판온도에 따른 증착계면의 형상을 관찰하기 위해서 Si 기판 위에 Mo 4 nm, Si 3 nm의 두께로 확산거리를 1~10 nm로 변화시켜가며 각

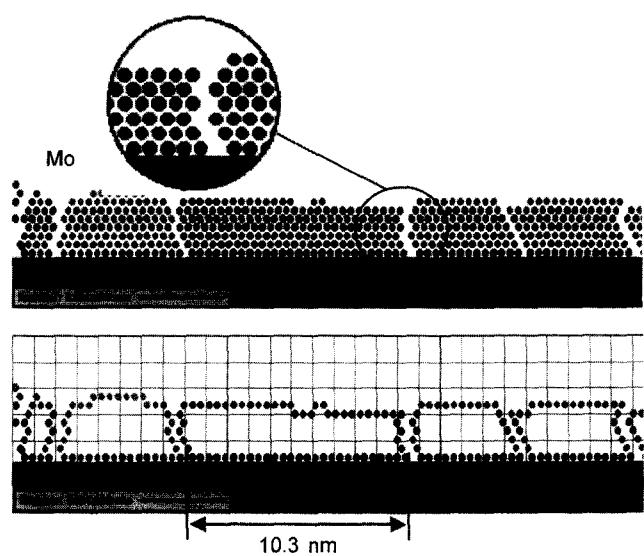


Fig. 1. A schematic diagram illustrating the way of measuring grain size from the each simulation result.

Table 1. Summary of Sputtering Conditions

Target	Mo, Si	Target radius	2 inch
Substrate	Si	Temperature	Room Temperature
Working gas	Ar	Working Pressure	3 mTorr
Target-substrate distance			13 cm

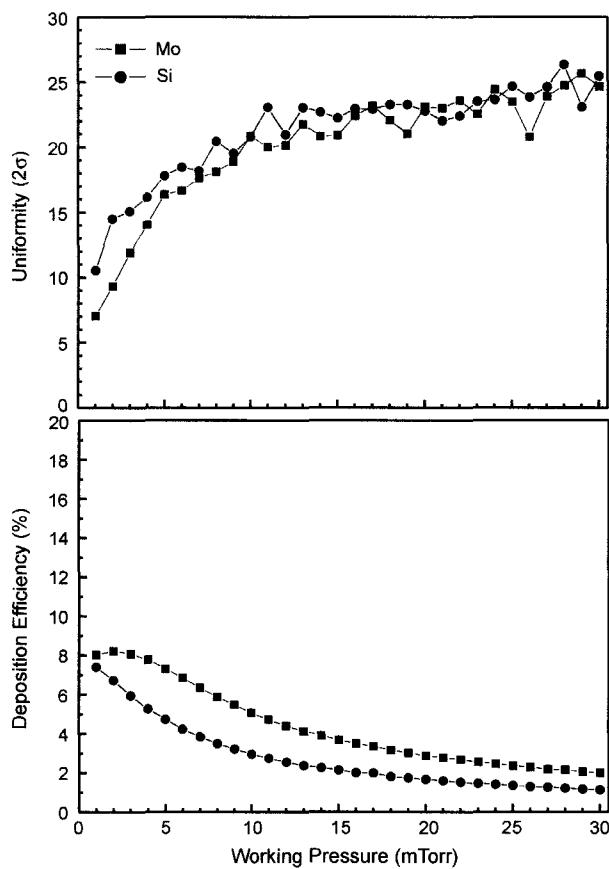


Fig. 2. The variation of uniformity and deposition efficiency according to the working pressure.

각의 결정립(grain)의 크기를 측정하였다. 이 때 결정립의 크기는 Fig. 1에서와 같이 결정립의 가장자리 원자를 기준으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 증착압력의 영향

Fig. 2의 시뮬레이션 결과로부터 가스압력에 따른 박막의 균일도와 증착효율의 변화를 살펴보면 Mo, Si 모두 가스압력이 낮은 값일수록 증착면이 균일하게 형성되며, 타겟에서 스퍼터 되어 나온 입자가 기판에 도달하는 정도가 높게 됨을 알 수 있다. 증착공정에서 이와 같은 현상이 발생되는 이유는 가스압력이 높을수록 타겟에서 스퍼터 되어 나온 입자가 많아져 기판까지 도달하는 동안 스퍼터 입자의 평균자유행로가 짧아지기 때문으로 생각되며, 이 때 스퍼터 입자는 상대적으로 늘어난 다른 입자 또는 이온들과의 충돌에 의해 스퍼터 되는 순간의 운동에너지를 많이 잃게 된 채로 증착기판에 도달하게 되어 원하는 자리를 찾아 갈 수 있는 충분한 양의 에너지를 얻을 수 없게 되므로 결국 낮은 가스압력에서의 증착공정과

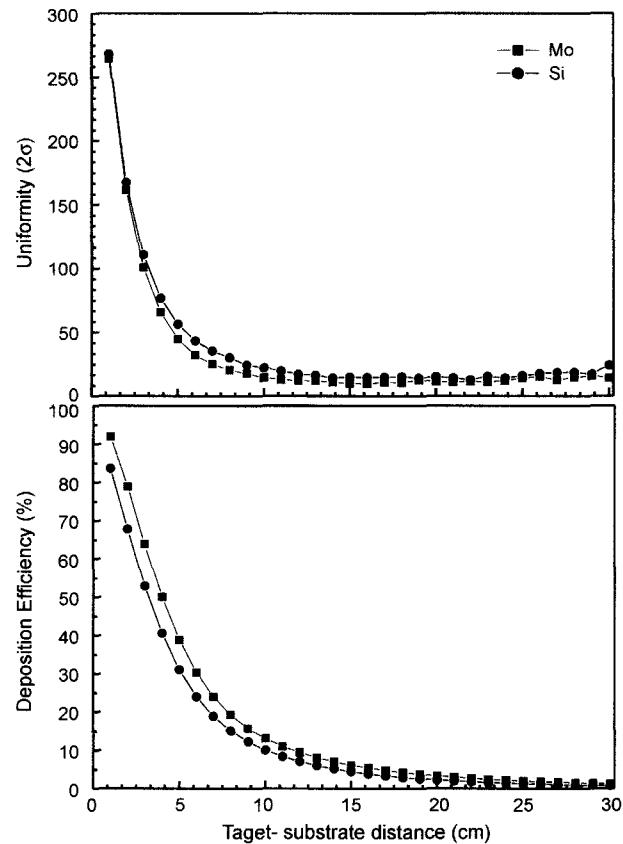


Fig. 3. The variation of uniformity and deposition efficiency according to the target-substrate distance.

비교하여 균일한 박막을 형성하기가 어려울 것이라 생각된다. 가스압력이 높을수록 플라즈마내의 이온밀도가 높아지며 결국 타겟에 충돌하는 이온의 양이 많아져서 증착속도는 커지게 되는데 물론 가스압력이 어느 한계 이상으로 높게 되면 스퍼터된 물질이 기체와의 지나친 충돌 때문에 기판에 효과적으로 도달하기 어려워 오히려 증착속도가 낮아지기도 한다.⁸⁾

3.2. 타겟-기판 거리변화의 영향

Fig. 3은 타겟과 기판 사이의 거리에 따른 증착계면의 균일도와 증착효율의 변화를 나타낸 것이다. 거리가 13 cm 이상이 되면 균질도의 수치는 거의 변화가 없었으며 일반적으로 예상할 수 있듯이 타겟과 기판사이의 거리가 좁을수록 타겟에서 발생된 입자들이 기판에 도달하게 되는 확률은 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. Fig. 4는 Mo를 타겟물질로 사용하여 타겟과 기판사이의 거리를 변화시켰을 때 나타나는 입사각 분포를 나타낸 것으로 이 때 사용되는 입사각 분포란 입자와 입자간의 결합에너지 및 질량, 타겟에서 방출된 입자의 평균자유행로 등에 의해 주로 결정이 되는 인자로써 방출된 타겟물질이 기판

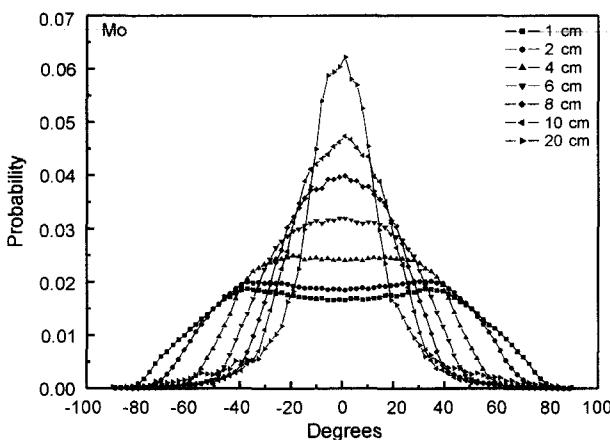


Fig. 4. The probability distribution of sputtered target materials arriving at substrate corresponding to various target-substrate distance sets.

에 도달할 때 가지게 되는 각 flux들의 입사각만의 확률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 타겟과 기판과의 거리가 1 cm인 경우, 입사각 분포의 형상이 다른 조건들에 비해 비교적 완만하게 나오는 것을 알 수 있는데 이것은 타겟에서 발생된 입자들의 수가 같다 하더라도 거리가 큰 다른 경우들과 비교하여 상대적으로 높은 입자밀도를 보이게 되므로 입자들간의 상호충돌에 의해 기판에 도달할 때 다양한 입사각을 보이는 것이라 생각된다. Figs. 3과 4를 연관지어 볼 때 타겟에서 방출된 입자들이 기판에 수직으로 도달할 확률이 높은 경우 즉 타겟과 기판 사이의 간격을 멀리하면 증착계면이 균일하게 형성될 수 있다는 것을 알 수 있었으나 단점으로 타겟에서 발생된 입자들이 기판에 도달하게 되는 확률은 낮아져 증착속도가 느려지게 된다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 기판온도의 영향

Fig. 5는 Mo를 타겟물질로 사용하여 확산거리가 6 nm 일 때 생성되는 결정립의 크기에 따른 결정립 개수의 분포를 나타낸 것이다. 확산거리가 6 nm인 경우 기판 위에 생성된 결정립의 평균 크기는 6.35 nm이고 이 때 표준편차는 1.95였다. 일반적인 PVD 증착공정에서 증착속도는 기판의 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 기판 위에 흡착된 박막이 탈착 하기까지 기판 위에 존재할 수 있는 시간은 기판의 온도증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 반면에,⁹⁾ 기판 위에서 이동할 수 있는 능력은 기판의 온도증가에 따라 지수함수적으로 증가한다.¹⁰⁾ 따라서 기판의 온도가 증가함에 따라 기판 위에서 이동할 수 있는 능력이 증가되어 에너지적으로 안정한 위치를 충분히 찾아갈 수 있기 때문에 박막의 결정성은 온도가 증가함에 따라 증가한다. 이러한 사실은 Fig. 6의 확산거리

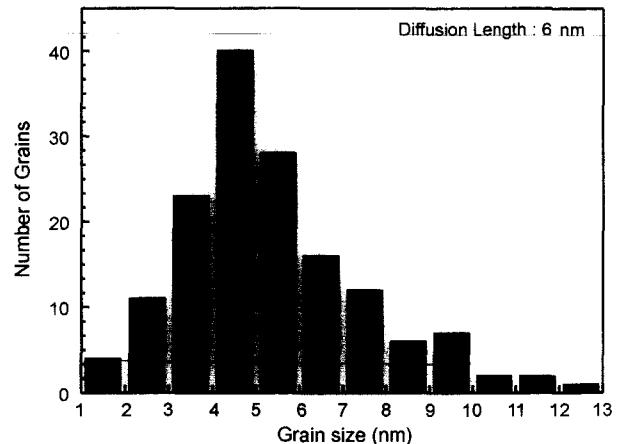


Fig. 5. The distribution of the grain size at the diffusion length (=6 nm).

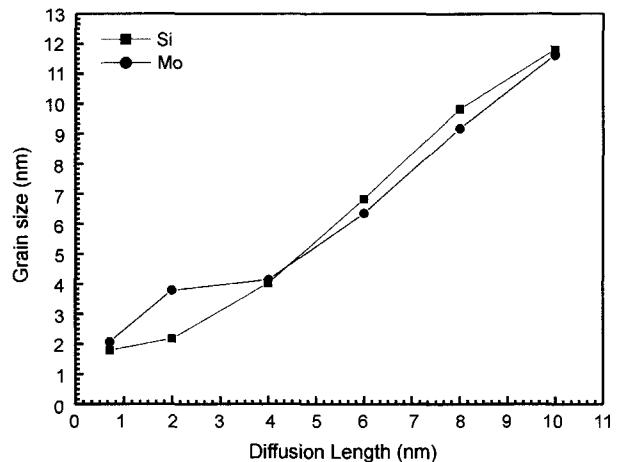


Fig. 6. The variation of the grain size according to the diffusion length.

가 쿨수록 평균 결정립의 크기가 커지는 결과와 일치한다. 앞서 식(1)에서 설명되었듯이 확산거리는 온도의 함수로 나타내어지며 Fig. 6의 확산거리가 쿨수록 다시 말해 기판온도가 높을 수록 결정립의 크기는 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 결정립의 크기가 크다는 것은 그만큼 계면에서의 결합이 없다는 뜻으로 생각할 수 있을 것이다. 그러나 기판의 온도가 너무 높게 되면 생성기판의 기본적인 성질이 변형이 되므로 적당한 온도 조절이 필요하게 된다.

4. 결 론

EUVL 공정에서 사용되어지는 Mo/Si 다층박막 마스크 물질의 최적화된 제조공정을 도모하기 위해 PVD 공정 시 블레이터를 사용하여 다층박막 마스크 제작 시 가스압력,

타겟과 기판과의 거리 및 기판온도에 따른 박막계면의 형상변화를 분석하였다. 가스압력이 낮을수록 균일한 증착계면이 형성되었고 타겟에서 스퍼터 되어 나온 입자가 기판에 도달하는 효율은 높게 나타났다. 하지만 타겟에서 발생되는 입자의 수가 감소하게 되므로 증착속도는 느려지게 되었다. 타겟과 기판 사이의 거리를 증가시키면 증착계면의 균일도는 증가하게 되었지만 증착효율은 낮아지는 것을 알 수 있었으며 발생되는 입자의 수가 일정하므로 증착속도는 증착효율에 비례하였다. 기판온도에 따른 증착계면의 형상변화는 확산거리의 변화에 의해 관찰하였으며 확산거리가 커질수록 결정립의 평균 크기가 커지는 것을 알 수 있었다. EUVL 반사형 마스크 물질인 Mo/Si 다층박막은 이론적(78%) 반사도를 구현하기 위해 균일한 계면으로 형성되어야 하며 따라서 스퍼터링 공정에서 증착속도보다는 균일도에 비중을 두어야 한다고 생각된다. 따라서 균일한 계면을 형성하기 위한 스퍼터링 공정조건으로 1~3 mTorr 정도의 낮은 압력과, 타겟과 기판 사이의 거리를 13 cm 이상으로 해야 한다는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다. 실제 스퍼터링 공정에서 다층박막 반사 마스크를 제조할 때 다층박막의 각 층 두께의 변화가 생기거나 상호확산 층이 생길 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 다층박막의 변화 양상을 알아낼 수 있다면 반사 마스크 제조시 공정의 가이드 라인을 제공할 수 있는 중요한 길잡이가 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한양대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사 드립니다.

REFERENCES

- C. W. Gwyn, R. Stullen, D. Sweeney and D. Attwood, "Extreme Ultraviolet Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16** [6] 3142-49 (1998).
- R. H. Stulen and D. W. Sweeney, "Extreme Ultraviolet Lithography," *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** [5] 694-99 (1999).
- B. S. Bollepalli, M. Khan and F. Cerrina, "Imaging Properties of the Extreme Ultraviolet Mask," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16** [6] 3444-48 (1998).
- M. Singh and J. J. M. Braat, "Design of Multilayer Extreme -Ultraviolet Mirrors or Enhanced Reflectivity," *App. Opt.*, **39** [13] 2189-97 (2000).
- D. E. Kim, D. H. Cha and S. W. Lee, "Optimized Structures of Multilayer Soft X-ray Reflectors in the Spectral Range of 30 to 300 Å," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** [5] 2728-33 (1998).
- S. K. Dew, T. Smy and M. J. Brett, "Simulation of Elevated Temperature Aluminum Metallization Using SIMBAD," *IEEE Trans. on Electron. Dev.*, **39** [7] 1599-606 (1992).
- A. T. Voutsas and M. K. Hatalis, "Structure of As-deposited LPCVD Silicon Films as Low Deposition Temperatures and Pressures," *J. Electrochem. Soc.*, **139** [9] 2659-65 (1992).
- R. K. Waits, "Planar Magnetron Sputtering," *J. Vac. Soc. Technol.*, **15** [2] 179-86 (1978).
- M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*; Vol. 1, pp. 79-145, Academic Press, New York, 1992.
- Y. J. Lee and S. Baik, "Effects of Deposition Parameters on MgO Thin Films on Si(100) Substrates by Reactive RF Magnetron Sputtering," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **31** [6] 643-50 (1994).