

위상변위 극자외선 마스크의 흡수체 패턴의 기울기에 대한 오차허용도 향상

장용주 · 김정식 · 홍성철* · 안진호*

한양대학교 공과대학 나노반도체공학과, *한양대학교 공과대학 신소재공학과

Improved Margin of Absorber Pattern Sidewall Angle Using Phase Shifting Extreme Ultraviolet Mask

Yong Ju Jang, Jung Sik Kim, Seongchul Hong* and Jinho Ahn**

Department of Nanoscale Semiconductor Engineering

**Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT

Sidewall angle (SWA) of an absorber stack in extreme ultraviolet lithography mask is considered to be 90° ideally, however, it is difficult to obtain 90° SWA because absorber profile is changed by complicated etching process. As the imaging performance of the mask can be varied with this SWA of the absorber stack, more complicated optical proximity correction is required to compensate for the variation of imaging performance. In this study, phase shift mask (PSM) is suggested to reduce the variation of imaging performance due to SWA change by modifying mask material and structure. Variations of imaging performance and lithography process margin depending on SWA were evaluated through aerial image and developed resist simulations to confirm the advantages of PSM over the binary intensity mask (BIM). The results show that the variations of normalized image log slope and critical dimension bias depending on SWA are reduced with PSM compared to BIM. Process margin for exposure dose and focus was also improved with PSM.

Key Words : EUV lithography, phase shift mask, sidewall angle, aerial image, process window

1. 서 론

극자외선 노광 기술(EUV lithography, EUVL)은 13.5 nm 파장의 극자외선을 사용하는 노광 기술로 나노패턴을 구현하기 위한 가장 유망한 차세대 리소그래피 기술이다[1]. 웨이퍼 상에 10 nm 이하의 선폭을 가지는 패턴을 전사하기 위해서는 이 선폭의 4배 크기인 수십 나노미터 단위의 흡수체 패턴을 전자빔 노광기술과 플라즈마 식각을 통해 다층 반사막 상에 구현해야 한다. 일반적으로 흡수체의 플라즈마 식각은 이방성식각을 목표로 진행되기 때문에 이론상으로는 식각 후 90°의 측벽 각도(sidewall angle, SWA)를 가지는 흡수체가 형성되어야 한다. 하지만 실제로 플라즈마 식각을 진행했을 때 플라즈마 소스 파워와 기관 바이어스, 반

응 기체의 종류 및 유량 조건에 따라 식각 후 최종 흡수체의 SWA가 달라지게 된다.[2-3]. 특히 EUV 마스크는 패턴의 크기가 수십 나노미터 단위로 매우 작아 micro-loading effect가 심화되기 때문에 패턴의 위치에 따라 식각 속도가 달라져 수직의 SWA를 가지는 흡수체를 얻기 힘들다[4-6].

Fig. 1은 전자빔 노광기술과 유도결합 플라즈마 식각(inductively coupled plasma etching) 장비를 이용하여 제작한 TaN/Mo 위상 변위 마스크이다. Fig. 1의 마스크는 88 nm의 흡수체 패턴의 선폭을 목표로 제작이 되었었는데 사진과 같이 실제 패턴 형성 시 플라즈마 식각 후 최종 흡수체의 SWA가 90°에서 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 특히 마스크를 제작할 때 각각의 패턴에 대한 최적화된 식각 조건이 다르기 때문에 필연적으로 패턴마다 서로 다른 SWA가 발생하게 된다[7-9]. 패턴마다 서로 다른 SWA가 형성될 경우 같은 노광 조

*E-mail : jhahn@hanyang.ac.kr

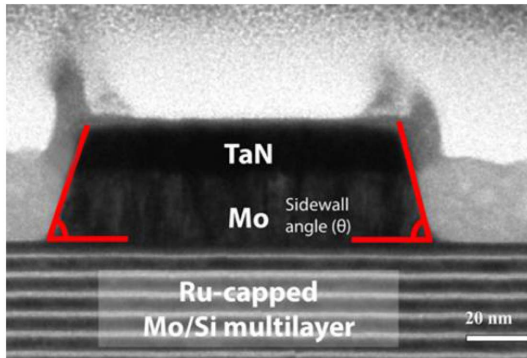


Fig. 1. Cross-sectional image of phase shift mask with TaN/Mo absorber pattern fabricated by inductively coupled plasma etching.

건이라도 각 패턴의 SWA에 따라 서로 다른 임계 치수 (critical dimension, CD) 및 이미징 특성이 나타날 수 있다[10-13]. SWA로 인해 CD 및 이미징 특성이 달라질 경우 마스크 상에서 패턴을 보정해주기 위해 적용하는 광학 근접 보정 기법(optical proximity correction, OPC)이 SWA을 감안하지 않았을 때보다 더 복잡해지게 된다. 따라서 새로운 마스크 구조 및 물질을 통해 SWA 변화에 대한 이미징 특성의 변화율을 줄여 OPC를 좀 더 단순화시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 일반적으로 Ta 계열의 흡수체를 사용하는 바이너리 마스크에 비해 얇은 흡수체 두께를 갖는 TaN/Mo 위상 변위 마스크를 제시하였다[13-15]. 위상 변위 마스크는 얇은 흡수체 두께를 가지고 있기 때문에 SWA 변화에 대한 흡수체 부피 변화가 줄어들게 되고 그에 따라 이미징 특성이 SWA에 의해 받는 영향이 줄어들 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위해 TaN 흡수체를 기반으로 한 기존의 바이너리 마스크와 Mo 위상 변위층을 이용한 위상 변위 마스크에 대하여 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하였다. 각 마스크에서 90°의 이상적인 SWA을 가질 때를 기준으로 공정 조건을 최적화하여 시뮬레이션을 진행하였으며 해당 공정 조건에서 SWA에 따른 표준화 이미지 로그 기울기(normalized image log-slope, NILS), CD변화(CD bias)를 마스크 별로 비교하였다. 또한 SWA에 따른 감광제 패턴링 시뮬레이션을 통해 노광량과 초점에 대한 공정 허용도를 나타내는 노광 공정 허용도를 구하여 SWA이 실제 패턴링 특성에 미치는 영향을 확인하고 SWA이 발생했을 때의 공정 허용도에 대해 비교해 보았다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 SWA이 90°에서 벗어날 때 각 마스크 별 이미징 특성과 공정 허용도를 비교하기 위해 KLA-Tencor사의 PROLITH X5.1시뮬레이션 툴을 이용하였다. 2.8 nm의 Mo와 4.2 nm의 Si으로 이루어진 이중층 40쌍과 2.5 nm의 Ru 덮개층으로 구성되어 있는 다층 박막 거울 상에 흡수체를 설계하여 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크를 구현하였다. 바이너리 마스크는 70 nm의 TaN 흡수층으로 구성되어 0.1%의 반사도를 가지는 반면 위상 변위 마스크는 14 nm의 Mo 위상 변위층과 26.5 nm의 TaN 흡수층으로 이루어져 있어 흡수 영역에서 13.5 nm의 파장에 대해 6% 반사도와 반사층과 180°의 위상차이를 가진다. 흡수체의 SWA에 따른 두 마스크의 이미징 특성을 비교하기 위해 Fig. 2와 같이 흡수체의 가장 아랫부분을 목표 선폭(마스크 상 72 nm)에 맞추어 SWA은 80°부터 90°까지, 흡수체의 윗면을 목표 선폭에 맞추어 SWA은 90°부터 100°까지의 변화를 주었다. NILS와 CD 변화를 비교하기 위해 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하였으며 감광제 패턴링 시뮬레이션을 통해 각 마스크의 SWA에 대한 공정 허용도를 비교하였다. 시뮬레이션을 위해 Center for X-ray optics (CXRO)에서 차용한 13.5 nm에서의 물질 별 광학 상수를 Table 1에 나타내었다. 0.33NA 및 4배 축소 투영 시스템에서 6° 입사각을 가

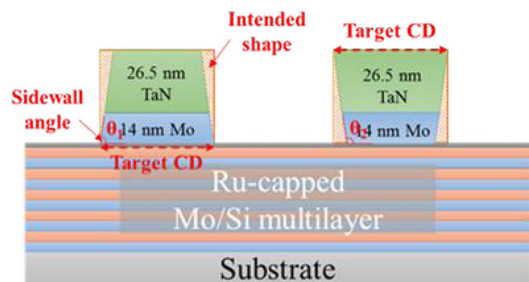


Fig. 2. Schematic diagram of mask absorber with sidewall angle of θ_1 and θ_2 .

Table 1. Complex refractive index of the materials used in the simulation

Materials	n	k
TaN	0.9260	0.0436
Mo	0.9238	0.0064
Si	0.9991	0.0013
Ru	0.8864	0.0171

지는 광학계를 설계하였으며 조명계와 감광제의 경우 0.8 center sigma 및 0.2 pole radius를 가지는 quadrupole 조명계 및 EUV generic resist를 적용하여 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에서는 90°의 SWA를 가지는 수직 패턴에 최적화된 노광 조건을 통해 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하여 SWA 변화에 따른 NILS와 임계 치수를 확인하였다. 수직 패턴은 패턴의 방향과 극자외선의 입사 방향이 평행한(non-shadowing) 패턴으로 정의되며, 수평 패턴은 패턴의 방향과 극자외선의 입사 방향이 수직인(shadowing) 패턴으로 정의된다. 수직 패턴에서 SWA이 80°부터 90°까지 변할 때 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크의 NILS 변화율은 각각 0.8%, 0.5%로 NILS가 SWA에 따라 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 수평(shadowing) 패턴의 경우 80°부터 90°까지 SWA를 가질 때 바이너리 마스크에서는 최대 12.2%만큼 NILS 값의 차이를 보이지만 위상 변위 마스크의 경우에는 2% 이하의 NILS 변화로 SWA에 따른 이미징 특성 변화율이 작다. SWA에 따른 CD 변화의 경우에도 마찬가지로 80°까지 SWA의 변화를 주었을 때 수직 패턴에서 바이너리 마스크는 2.2 nm 이하, 그리고 위상 변위 마스크에서는 1.5 nm 이하의 CD 변화량을 보인다[11]. 이는 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크 모두 SWA이 감소할수록 총 흡수체 부피가 작아지는데 흡수체가 더욱 두꺼운 바이너리 마스크의 부피 감소량이 더욱 크기 때문이다. 흡수체의 총 부피가 감소 할수록 패턴에 의해 가려지던 입사광 및 반사광이 일부 통과하기 때문에 결과적으로 패턴의 CD가 감소한다[11]. 또한 SWA이 형성되면서 0차광과 1차 회절광이 흡수체를 통과하는 비율이 높아져 SWA이 심해질수록 NILS가 증가하는 결과를 보인다.

플라즈마 식각 후 나타날 수 있는 흡수체의 다양한 모양을 고려하기 위해 90°이상의 SWA이 형성되었을 때 SWA변화에 따른 NILS와 CD의 변화를 계산하였다(Fig. 4). SWA이 90°부터 100°까지 변할 때 수직 패턴에서는 90°이하의 SWA에서와 마찬가지로 바이너리 마스크에서 2% 이내의 NILS 변화를 보이며 위상 변위 마스크에서는 0.7% 이내의 NILS 변화를 보인다. 하지만 수평 패턴에 대해 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하였을 때 바이너리 마스크는 90°의 SWA에서 2.49의 NILS 값을 가지지만 SWA이 100°까지 증가할 경우 2.79의 NILS 값을 가져 90°의 SWA 을 기준으로

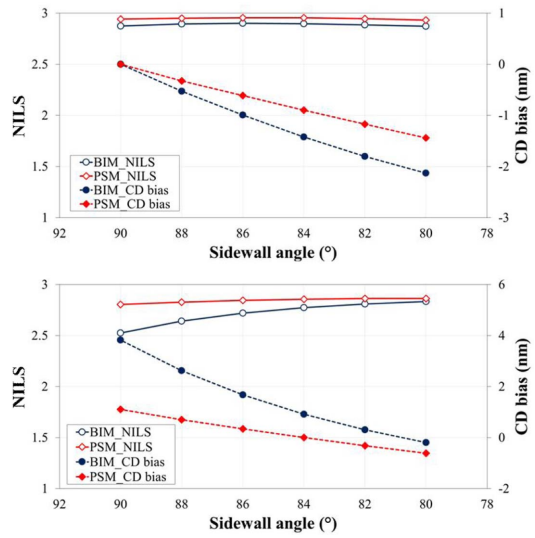


Fig. 3. Comparison of NILS and CD bias between BIM and PSM depending on absorber SWA from 80° to 90° for (top) non-shadowing pattern, (bottom) shadowing pattern.

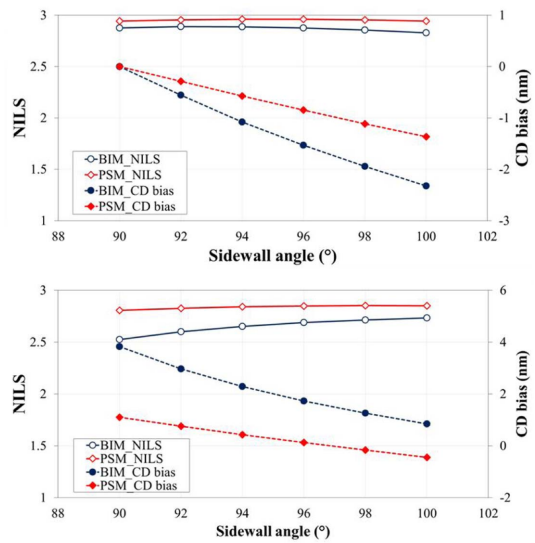


Fig. 4. Comparison of NILS and CD bias between BIM and PSM depending on absorber SWA from 90° to 100° for (top) non-shadowing pattern, (bottom) shadowing pattern.

했을 때 NILS값이 최대 12.2%만큼의 차이를 나타낸다. CD변화량 또한 90°이하의 SWA를 가질 때의 결과와 유사한 경향성을 보인다. 90°부터 100°까지 SWA이 변할 때 CD의 변화량은 수직 패턴에서 바이너리 마스크

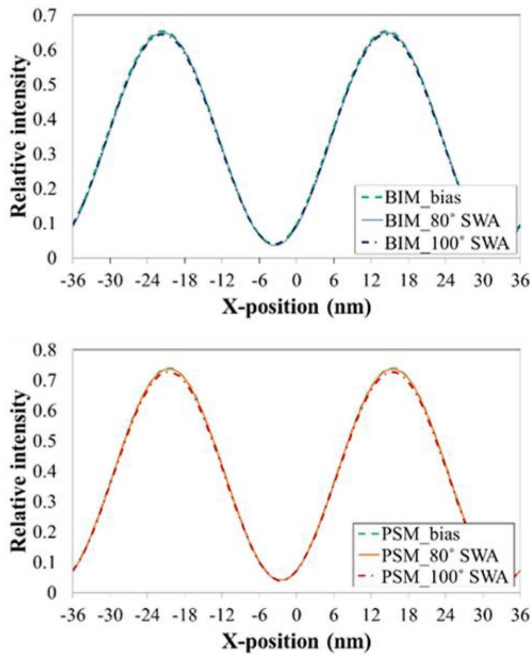


Fig. 5. Aerial image of BIM and PSM with mask absorber having SWA of 90° with mask bias to compensate volume change due to SWA of 80° and 100°.

와 위상 변위 마스크가 각각 최대 2.4 nm, 1.4 nm로 나타나며 수평 패턴의 경우 각각 2.9 nm, 1.1 nm로 그 차이가 더욱 심화되었다.

바이너리 마스크의 경우 SWA이 90°에서 10°만큼 변화가 일어날 때 흡수체의 부피가 SWA이 90°일 때를 기준으로 최대 17.1%만큼 부피 감소가 일어난다. 반면에 위상 변위 마스크는 SWA이 90°에서 10°만큼 변화가 일어날 때 흡수체의 최대 부피 변화율은 9.9%로 바이너리 마스크에 비해 작은 감소율을 보인다. 이는 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크의 흡수체 두께가 달라 나타나는 현상으로 바이너리 마스크의 경우 70 nm의 흡수체 두께로 위상 변위 마스크에 비해 두꺼운 흡수체를 가지고 있기 때문에 같은 SWA 변화에 대한 흡수체 부피 변화가 위상 변위 마스크에 비해 커지게 된다. 흡수체의 부피 변화가 커질 경우 수평 패턴에서 이미징 특성의 변화량이 현저히 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 수평 패턴에서 흡수체로 인한 mask 3D effect가 심화되기 때문에 SWA로 인한 흡수체의 부피 변화가 이미징 특성에 미치는 영향이 수직 패턴에 비해 더 크기 때문이다.

흡수체 부피가 에어리얼 이미지에 미치는 영향을 확

인하기 위해 SWA이 90°에서 벗어날 때의 부피 변화를 흡수체의 인위적인 선폭 감소를 통해 구현하였다. 구현한 각각의 흡수체로 18 nm의 선폭을 가지는 수평 패턴에 대한 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 5는 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크에 대해 SWA이 90°에서 10°만큼 벗어난 흡수체와 90°SWA에서 선폭을 감소시킨 흡수체의 에어리얼 이미지를 비교한 것이다. 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크의 흡수체의 선폭을 각각 -12.34, -7.14 nm 만큼 줄여줌으로써 SWA이 10°만큼 벗어날 때 발생하는 흡수체의 부피 변화량을 맞추어 주었다. 그 결과, 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크에서 각각 80°, 100°의 SWA를 가지는 흡수체와 선폭을 감소시킨 흡수체에 대해 거의 유사한 에어리얼 이미지를 나타내었다. 따라서 흡수체의 부피가 마스크의 이미징 특성과 직접적으로 연관이 있으며 SWA에 따른 흡수체 부피 변화량이 상대적으로 작은 위상 변위 마스크는 SWA에 따른 이미징 특성 변화율이 작아진다는 것을 확인하였다.

감광제 패턴링 시뮬레이션을 통해 각 SWA에서 나타나는 초점 및 노광량에 대한 공정 허용도를 구하였다. Fig. 6은 노광 공정의 허용도를 나타내는 대표적인 척도로 목표 선폭의 ±10%의 오차 범위 안에 들어가는 패턴을 얻을 수 있는 초점 및 노광량의 범위이다. 해당 곡선의 중첩 정도에 따라 다양한 SWA이 존재하는 마스크에 대해 실제 노광 공정을 진행했을 때 원 구한 결과이다. 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크에 대한 공정 허용도를 확인해 본 결과 SWA이 90°에서 벗어날 수록 원하는 패턴을 얻는 데 허용되는 노광량이 줄어들게 된다. 이는 흡수체의 SWA이 90°에서 벗어날수록 0차광, 1차 회절광의 회절 효율이 커져 최종적으로 웨이퍼 상에 도달하는 빛의 전체적인 광량이 높아지기 때문이다. 100° SWA에서 공정 허용도는 80°의 SWA를 가질 때와 거의 유사한 결과를 보이기 때문에 80°와 90° SWA에서의 결과만을 나타내었다.

가지는 패턴을 같은 조건으로 노광했을 때 공정 허용도의 중첩이 일어나지 않아 두 패턴을 모두 만족시키는 공정 조건을 얻을 수 없다. 반면 위상 변위 마스크는 80°까지 SWA이 변하더라도 90°의 SWA를 가지는 흡수체와 중첩되는 노광량 및 초점 허용도 영역이 존재한다. 이는 위상 변위 마스크가 바이너리 마스크에 비해 SWA이 줄어들면서 생기는 흡수체 부피 변화가 더 적어 원하는 패턴을 얻을 수 있는 노광량의 변화가 작기 때문이다. 따라서 Fig. 6를 통해 각 마스크의 SWA에 따른 노광 공정의 허용도를 확인했을 때 위상 변위 마스크가 SWA의 변화에 대해 더 우수한 공정 허

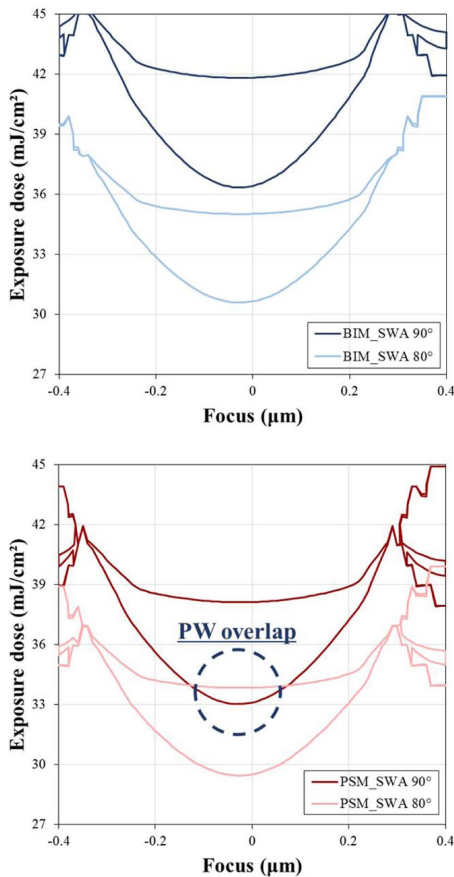


Fig. 6. Results of process window simulation for BIM and PSM depending on absorber SWA of 80° and 90° for (top) BIM and (bottom) PSM.

용도를 가지는 것을 알 수 있다.

결과적으로 SWA를 변수로 에어리얼 이미지 및 감광제 패터닝 시뮬레이션을 통해 이미징 특성 및 노광 공정 허용도를 구해주었을 때 위상 변위 마스크는 이미징 특성과 노광 공정 허용도의 변화량이 작기 때문에 위상 변위 마스크에 비해 마스크 제작 공정을 향상시킬 수 있다. 특히 위상 변위 마스크를 사용했을 때 바이너리 마스크에 비해 우수한 이미징 특성을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그렇기 때문에 위상 변위 마스크를 제작하여 공정을 진행하는 것이 마스크 제작 공정과 노광 공정을 진행함에 있어 더 유리한 점을 가져갈 수 있을 것이다. 추가로 감광제나 조명계 조건 개선을 통해 더 우수한 이미징 특성 및 공정 허용도를 확보할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 에어리얼 이미지 및 감광제 패터닝 시뮬레이션을 통해 SWA이 발생했을 때 바이너리 마스크와 위상 변위 마스크의 이미징 특성 및 노광 공정의 허용도를 확인하였다. 그 결과 위상 변위 마스크가 수직 및 수평 패턴에서 이미징 특성의 변화량이 바이너리 마스크에 비해 작은 결과를 나타내었다. 또한 SWA 변화에 따른 노광 공정 허용도의 중첩 정도를 보았을 때에도 위상 변위 마스크가 좀 더 넓은 범위의 SWA에 대해서 중첩이 일어났다. 상기 결과가 나타나는 이유는 위상 변위 마스크가 바이너리 마스크에 비해 얇은 두께를 가지고 있어 SWA 변화에 따른 흡수체 부피의 변화량이 작아지기 때문이다. SWA에 대한 흡수체 부피의 변화량이 작아지면서 SWA 변화가 에어리얼 이미지 및 최종 감광제 패턴에 미치는 영향이 작아지게 된다. 실제로 인위적인 선폭 감소를 통해 각 흡수체의 에어리얼 이미지를 확인해 보았을 때, 같은 부피를 가지는 흡수체는 거의 유사한 에어리얼 이미지를 보인다. 따라서 위상 변위 마스크를 사용했을 때 바이너리 마스크를 사용한 것에 비해 SWA이 이미징 특성에 미치는 영향이 작아 마스크 상에 좀 더 단순화된 OPC를 적용시킬 수 있을 것으로 기대된다. 더불어 마스크 제작 공정을 진행할 때에도 좀 더 높은 공정 허용도를 확보하여 마스크 제작 마진과 수율에 있어 좀 더 유리한 점을 확보할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국 정부(MSIP)에서 후원하는 한국연구재단(National Research Foundation of Korea, NRF)의 기초연구 사업(Grant No.2011-0028570) 및 KLA-Tencor사의 PROLITH™에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. ITRS organization, "International technology road-map for semiconductors 2013 edition : Lithography summary", March, 13, 2015 from <http://www.itrs2.net>, (2014).
2. E. Hoshino, T. Ogawa, N. Hirano, H. Hoko, M. Takahashi, H. Yamanashi, A. Chiba, M. Ito, S. Okazaki, "Dry Etching of Ta Absorber for EUVL Masks", *Proc. of SPIE*, Vol. 4186, pp. 749-755 (2001).
3. R. Wistrom, Y. Sakamoto, J. Pantan, T. Faure, T. Isogawa, A. McGuire, "Controlling the sidewall angle of

- advanced attenuated phase-shift photomasks for 14nm and 10nm lithography”, *Proc. of SPIE*, Vol. 8880, 88800W (2013).
4. J. Karttunen, J. Kiihamäki, S. Franssila, “Loading effects in deep silicon etching”, *Proc. of SPIE*, Vol. 4174, pp. 90-97 (2000)
 5. S. Jensen and O. Hansen, “Characterization of the Microloading Effect in Deep Reactive Ion Etching of Silicon”, *Proc. of SPIE*, Vol.5342 (2004).
 6. C. Hedlund, H. O. Blom, and S. Berg, “Microloading effect in reactive ion etching”, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 12 (4), pp. 1962-1965 (1994)
 7. Y. Du, C. J. Choi, G. Zhang, S. Park, P. Yan, and K. Baik, “Ta₂N₅-based EUV Mask Absorber Etch Study”, *Proc. of SPIE*, Vol. 6283, 62833D (2006)
 8. T. Abe, A. Fujii, S. Sasaki, H. Mohri, N. Hayashi, T. Shoki, T. Yamada, O. Nozawa, R. Ohkubo and M. Ushida, “Process development for EUV mask production”, *Proc. of SPIE*, Vol. 6349, 63493G (2006)
 9. U. Dersch, A. Korn, C. Engelmann, C. Georg Frase, W. Häßler-Grohne, H. Bosse, F. Letzkus, J. Butschke, “Impact of EUV Mask Pattern Profile Shape on CD Measured by CD-SEM”, *Proc. of SPIE*, Vol. 5752 (2005)
 10. E. van Setten, C. W. Man, R. Murillo, S. Lok, K. van Ingen Schenau, K. Feenstra, C. Wagner, “Impact of mask absorber on EUV imaging performance”, *Proc. of SPIE*, Vol. 7545, 754503 (2010)
 11. M. Sugawara and I. Nishiyama, “Impact of slanted absorber side wall on printability in EUV lithography”, *Proc. of SPIE*, Vol. 5992, 59923V (2005)
 12. E. Gallagher, G. McIntyre, T. Wallow, S. Raghunathan, O. Wood, L. Kindt, J. Whang, M. Barrett, “EUV masks under exposure: practical considerations”, *Proc. of SPIE*, Vol. 7969, 79690W (2011)
 13. S. Lee, I. Lee, J. G. Doh, J. U. Lee, S. Hong, J. Ahn, “Improved imaging properties of thin attenuated phase shift masks for extreme ultraviolet lithography”, *J. Vac. Sci. Technol. B* Vol. 31, 021606, pp.1-5 (2013).
 14. S. Hong, S. Jeong, J. U. Lee, S. M. Lee, and J. Ahn., “Stochastic Patterning Simulation Using Attenuated Phase-Shift Mask for Extreme Ultraviolet Lithography”, *Appl. Phys. Express* Vol. 6, 096501, pp.1-4 (2013).
 15. J. Y. Jang, J. S. Kim, S. Hong, H. Cho, and J. Ahn., “Evaluation of Imaging Performance of Phase Shift Mask Depending on Reflectivity with Sub-resolution Assist Feature in EUV Lithography”, *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 14 (3), pp.1-5 (2015).

접수일: 2016년 5월 23일, 심사일: 2016년 6월 3일,
 게재확정일: 2016년 6월 10일