

SRAF를 적용한 극자외선 노광기술용 위상 변위 마스크의 반사도에 따른 이미징 특성 연구

장용주* · 김정식* · 홍성철† · 조한구** · 안진호*†

*한양대학교 공과대학 나노반도체공학과, **한양대학교 나노과학기술연구소,
†한양대학교 공과대학 신소재공학과

Evaluation of Imaging Performance of Phase Shift Mask Depending on Reflectivity with Sub-resolution Assist Feature in EUV Lithography

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

*Department of Nanoscale Semiconductor Engineering,

**Institute of Nano Science and Technology,

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

ABSTRACT

In photolithography process, resolution enhancement techniques such as optical proximity correction (OPC) and phase shift mask (PSM) have been applied to improve resolution. Especially, sub-resolution assist feature (SRAF) is one of the most important OPC to enhance image quality including depth of focus (DOF). However, imaging performance of the mask could be varied with the diffraction order amplitude changed by inserting SRAF. Therefore, in this study, we investigated the imaging properties and process margin of attenuated PSM with SRAF. Reflectivities of attenuated PSMs at 13.5 nm were 3, 6, 9% and simulation was performed by PROLITH™. As a result, aerial image properties and DOF as well as diffraction efficiency were improved by increasing the reflectivity of attenuated PSM. Additionally, printed critical dimension variations depending on SRAF width and space error were also reduced for attenuated PSM with high reflectivity. However, SRAF could be printed when reflectivity of attenuated PSM is high enough. In conclusion, optimization of reflectivity of attenuated PSM and SRAF to prevent side-lobe from being printed is needed to be considered.

Key Words : EUV lithography, phase shift mask, SRAF, process window, optical proximity correction

1. 서 론

2013년도 International Technology Roadmap for Semiconductors에 따르면 13.5 nm의 극자외선 (Extreme Ultraviolet, EUV) 영역의 빛을 이용하는 극자외선 노광기술 (EUV lithography)은 20 nm 이하의 선폭을 갖는 메모리 반도체 양산 공정에 적용될 가능성이 가장 높은 차세대 노광 기술이다[1]. 극자외선 노광기술에서도 더욱 높은 해상력을 확보하기 위해 기존 KrF, ArF

노광 기술과 마찬가지로 위상 변위 마스크 (phase shift mask, PSM) 및 광학 근접 효과 보정 (optical proximity correction, OPC) 등 여러 해상도 향상 기법 (resolution enhancement technique, RET) 연구가 진행되고 있다[2-3].

미해상 어시스트 패턴 (sub-resolution assist feature, SRAF)은 전사되지 않는 미세 패턴을 이용하여 웨이퍼 상에 전사되는 패턴의 치수를 보정해주는 OPC 방법이다. 이는 bias OPC에 비해 넓은 공정 허용도 (process window)를 가져갈 수 있어 기존의 KrF, ArF 노광 기술에서 중요한 OPC기법으로 적용되어 왔다[4]. 극자의

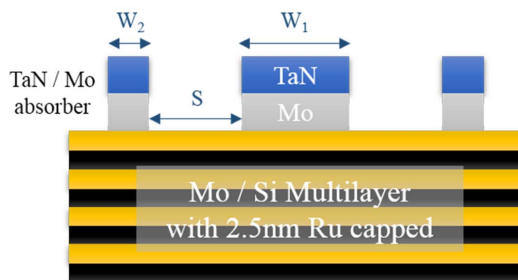
†E-mail : jhahn@hanyang.ac.kr

선 노광기술에서도 고립 패턴에 대한 해상력 및 공정 허용도 확보를 위해 위상 변위 마스크와 함께 SRAF의 적용이 고려되고 있다[5]. 위상 변위 마스크는 흡수 영역과 반사 영역에서 나오는 빛들 사이에 180° 위상차를 가지게 하여 더 높은 해상력을 확보할 수 있는 마스크 구조이다[6-7].

하지만 위상 변위 마스크에 SRAF를 적용 시 회절광의 세기가 변화하여 이미징 특성에 영향을 줄 수 있기 때문에 SRAF를 적용한 마스크에 대한 최적화 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 SRAF 구조에서 위상 변위 마스크의 반사도에 따른 이미징 특성과 공정 허용도를 측정 및 비교하는 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 KLA-Tencor사의 PROLITH X5리소그래피 시뮬레이션 툴을 통해 위상 변위 마스크의 구조를 반사도에 따라 설계하고 엄격한 결합과 분석(rigorous coupled wave analysis) 알고리즘을 이용하여 맥스웰 방정식을 계산, 에어리얼 이미지 및 공정 허용도 시뮬레이션을 진행해 주었다. Fig. 1은 본 실험에서 적용한 위상 변위 마스크 구조이다. 극자외선 노광기술에서는 반사형 마스크를 사용하기 때문에 40쌍의 2.8 nm 몰리브데늄(Mo)과 4.2 nm 실리콘(Si)을 교차 반복 적층하고 2.5 nm의 루세늄(Ru) 덮개층(capping layer)이 증착되어 있는 Mo/Si 다층 박막 거울(multilayer mirror)을 사용하였다. 위상 변위 마스크의 흡수체 구조는 흡수층 역할을 하는 질화탄탈륨(TaN)과 위상 변위층 역할을 하는 Mo 두 물질로 이루어져 있으며 두 물질이 비슷한 굴절 지수를 가지



W_1 = Feature linewidth, W_2 = SRAF width
S = SRAF space

Fig. 1. Structure of attenuated phase shift mask (att-PSM) with SRAF.

Table 1. Thickness of TaN and Mo layer with reflectivity of att-PSM.

PSM Reflectivity	TaN thickness (nm)	Mo thickness (nm)
3%	36.5	4.0
6%	26.5	14.0
9%	23.5	17.0

Table 2. Simulation condition.

Parameter	Value
Linewidth / Pitch	16 / 96 nm
SRAF width	7.5 nm
Illumination (center sigma / radius)	Dipole (0.65 / 0.3)
NA	0.33
Reduction	4X
Angle of incidence	6°
Resist	Generic EUV resist

고 있기 때문에 40.5 nm의 총 두께에서 Mo layer의 두께를 변화시켜 13.5 nm 파장에 대하여 3, 6, 9%의 반사도와 180° 위상 변위를 구현할 수 있는 두께를 계산하여 적용하였다(Table 1) [8]. 또한 40.5 nm 두께의 TaN 흡수층만을 가지는 마스크를 비교 군으로 설정하였다. 이 마스크는 13.5 nm 파장에 대하여 1.9%의 반사도와 180° 위상 변위를 갖는다.

본 실험에서 설정한 패턴 사이즈와 노광계 조건 및 감광제는 아래와 같다(Table 2) [9-10]. SRAF 공간의 경우 반사도에 따라 최적화된 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 Fig. 2와 같이 16 nm 선폭과 96 nm pitch를 가지는 패턴에 대해 진행하였다. Fig. 3은 비교군과 각각 3, 6, 9% 반사도를 가지는 위상 변위 마스크에 대한 회절 효율을 시뮬레이션을 통해 도출하여 그래프로 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 비교군과 가장 반사도가 높은 9% 반사도의 위상 변위 마스크 간에 회절 효율을 비교하였을 때 16% 정도의 1차광 및 2차광 회절 효율 차이를 보였으며 약 25%의 3차광 및 4차광 효율 차이를 보인다. 따라서 높은 반사도의 위상 변위 마스크에서 0차광 회절 효율이 낮아지고 패턴의 정보를 가지고 있는 고차 회절광 효율이 높아져 우수한 이미징 특성을 가질 것으로 예상된다[11].

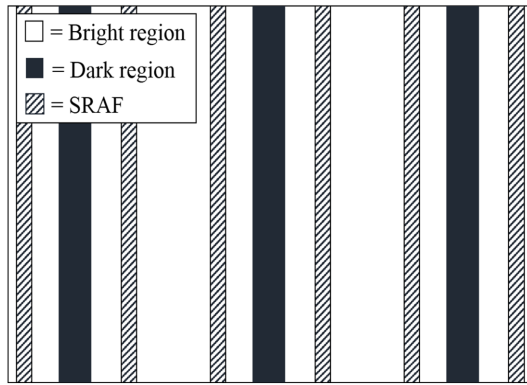


Fig. 2. Mask design of isolated pattern with SRAF.

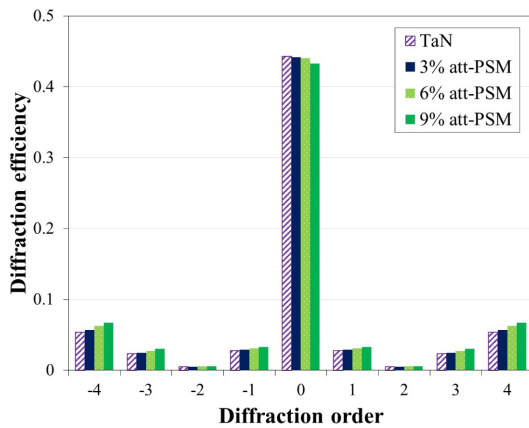


Fig. 3. Comparison of diffraction efficiency for PSM with 3, 6, 9% reflectivity and reference mask.

이를 확인하기 위해 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 진행하고 각 마스크에 대한 명암비 (image contrast) 및 정규화 이미지 로그 기울기 (normalized image log slope, NILS)를 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 비교 군과 각각 3, 6, 9% 반사도를 가지는 위상 변위 마스크에 대한 명암비는 각각 75.0, 76.3, 80.4, 83.3%의 결과값을 그리고 NILS 값은 각각 1.85, 1.95, 2.14, 2.23의 결과값을 보인다. 이는 앞서 예상한 바와 같이 9%의 반사도를 가지는 위상 변위 마스크의 고차광 회절 효율이 높기 때문에 나타난 결과로 반사도가 높을수록 우수한 명암비와 NILS값을 가진다.

Fig. 5는 공정 허용도 시뮬레이션을 통해 구한 노광 허용도 (exposure latitude, EL)에 따른 초점 심도 (depth of focus, DOF) 값을 나타낸 것이다. 각 위상 변위 마스크는 6%의 노광 허용도에서 100, 102, 104, 110 nm의 초점 심도 값을 나타내었다. 이 결과를 통해

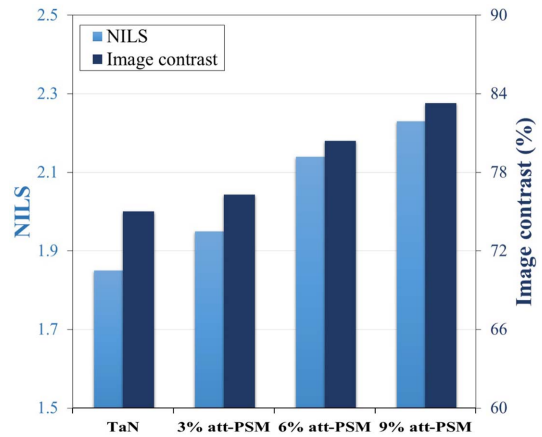


Fig. 4. Comparison of image contrast and normalized image log slope (NILS) for PSM with 3, 6, 9% reflectivity and reference mask.

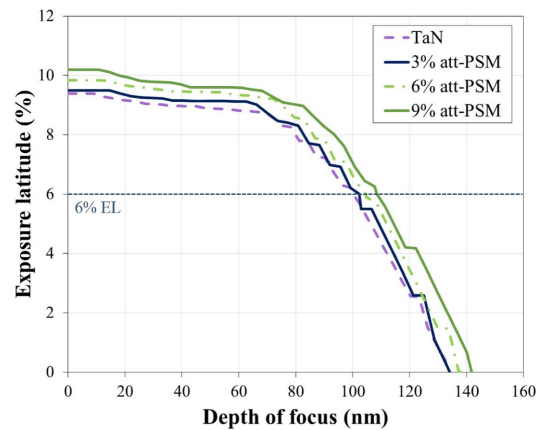


Fig. 5. Exposure latitude depending on depth of focus for PSM with 3, 6, 9% reflectivity and reference mask.

9% 반사도를 가지는 위상 변위 마스크가 가장 넓은 초점 심도 값을 가지며 비교군과 비교해 봤을 때 10.0%만큼 향상된 값을 가지는 것을 확인하였다.

Fig. 6(a)는 SRAF 선폭 오차에 의하여 발생하는 웨이퍼 상에 전사된 패턴의 선폭 오차를 각 위상 변위 마스크에 대해 나타낸 그래프이다. 그래프에서 SRAF 및 웨이퍼 상에 전사된 선폭은 웨이퍼 상을 기준으로 나타냈으며 결과를 통해 위상 변위 마스크의 반사도가 증가할수록 SRAF 선폭 오차에 따라 웨이퍼 상에 전사된 선폭 오차가 감소하는 것을 확인하였다. 9%의 반사도를 가지는 위상 변위 마스크의 경우 SRAF 선폭이 1 nm 증가했을 때 전사된 패턴의 선폭 오차는 비교군에

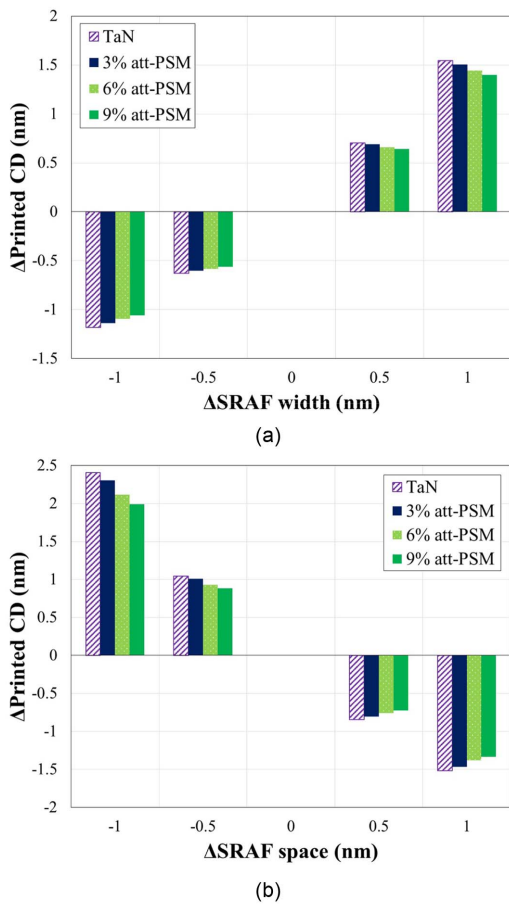


Fig. 6. Variation of printed CD for PSM with 3, 6, 9% reflectivity and reference mask: (a) depending on SRAF width error, (b) depending on SRAF space error.

비해 9.7% 향상된 결과를 보인다.

다음 Fig. 6(b)는 SRAF 공간의 오차에 의하여 발생하는 웨이퍼 상에 전사된 패턴의 선폭 오차를 각 마스크에 따라 나타낸 그래프이다. Fig 6(a)의 결과와 마찬가지로 SRAF 공간 및 웨이퍼 상에 전사된 선폭은 웨이퍼 상을 기준으로 나타내었으며 위상 변위 마스크의 반사도가 증가할수록 SRAF 공간 오차에 따라 전사된 선폭 오차가 감소하는 것을 확인하였다. 특히, 9%의 반사도를 가지는 위상 변위 마스크의 경우 SRAF 공간이 1 nm 감소했을 때 전사된 패턴의 선폭 오차는 비교군에 비해 17.4% 향상된 결과를 보인다.

상기의 결과들은 웨이퍼 상에 전사된 선폭 오차가 SRAF 공간에 대해 영향을 많이 받으며 위상 변위 마스크 반사도가 커질수록 선폭 오차가 줄어드는 것을

보여준다. 이는 반사도가 높은 위상 변위 마스크에서 SRAF 선폭 및 공간의 오차 발생에 따른 고차 회절광 효율의 변화량이 적기 때문이다. 이를 에어리얼 이미지의 관점에서 분석해보면 위상 변위 마스크의 반사도가 높을수록 고차 회절광 효율의 변화량이 작아지면서 SRAF 선폭 및 공간의 오차가 에어리얼 이미지에 미치는 영향이 적어지기 때문에 정규화 이미지 로그 기울기의 값이 큰 가파른 형태의 에어리얼 이미지를 유지할 수 있다. 우수한 에어리얼 이미지가 형성될수록 스톱 밴드 값 (threshold intensity)을 기준으로 한 웨이퍼 상에 전사된 패턴의 선폭 변화량이 적어지게 된다. 따라서 마스크 제작 시 발생할 수 있는 SRAF 선폭 및 공간의 오차를 고려해 보았을 때 반사도가 높을수록 마스크 제작 공정의 허용도가 크다.

결과를 종합해 보았을 때 9%의 반사도를 가지는 위상 변위 마스크가 가장 우수한 이미징 특성 및 공정 허용도를 가진다. 하지만 위상 변위 마스크의 반사도가 높을 경우 마스크의 해상력 또한 높아져 사이드로브 (side-lobe)로 인해 SRAF가 웨이퍼 상에 전사될 수 있다[12-14]. 감광제에 따라서도 SRAF가 전사될 확률이 달라지기 때문에 감광제를 고려하여 위상 변위 마스크의 반사도에 대한 마스크 최적화 과정이 필요하다[15].

4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션 툴을 통해 현행 노광 조건을 구현하여 SRAF를 적용하였을 때 위상 변위 마스크의 반사도에 따른 이미징 특성과 공정 허용도 그리고 SRAF 선폭 및 공간에 따른 전사 패턴의 오차를 측정하였다. 그 결과 위상 변위 마스크의 반사도가 높을수록 우수한 이미징 특성 및 공정 허용도를 나타내었다. 9% 반사도를 가지는 위상 변위 마스크의 명암비와 규격화 이미지 로그 기울기가 비교군에 비해 각각 11.3%, 20.5% 증가하였으며 초점 심도 또한 10.0% 향상된 값을 보인다. 이는 반사도가 높아질수록 패턴의 정보를 가지고 있는 고차광에 대한 회절 효율이 좋아져 더 정확한 패턴 이미지가 형성되기 때문이다. 또한 높은 반사도의 위상 변위 마스크는 SRAF 선폭 및 공간 오차가 발생하여도 높은 회절 효율을 유지할 수 있어 SRAF 선폭 및 공간 오차에 대해 전사되는 패턴 선폭 오차가 작아 마스크 제작 공정에 대한 허용도를 높게 가져갈 수 있다. 하지만 위상 변위 마스크의 반사도가 높아질 경우 사이드로브로 인해 SRAF가 웨이퍼 상에 전사되어 패턴을 형성할 수 있으므로 이를 고려하여 SRAF가 전사되지 않는 공정 조건을 탐색해야 한다.

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 roadmap for semiconductors 2013 edition : Lithography summary", 2013, from <http://www.itrs.net>
2. C. Constancias, M. Richard, D. Joyeux, J. Chiaroni, R. Blanc, J.Y. Robic, E. Quesnel and V. Muffato., "Phase shift mask for EUV lithography", *Proc. of SPIE*, Vol. 6151, pp. 1-4, (2006).
3. C. H. Clifford, Y. Zou, A. Latypov, O. Kritsun, T. Wallow, H. J. Levinson, F. Jiang, D. Civay, K. Standiford, R. Schlieff, L. Sun, O. R. Wood, S. Raghunathan, P. Mangat, H. Peng Koh, C. Higgins, J. Schefske. and M. Singh., "EUV OPC for the 20nm node and beyond", *Proc. of SPIE*, Vol. 8322, pp. 1-14, (2012).
4. M. Burkhardt, G. McIntyre, R. Schlieff and L. Sun., "Clear sub-resolution assist features for EUV", *Proc. of SPIE*, Vol. 9048, pp. 1-7, (2014).
5. F. Jiang, M. Burkhardt, A. Raghunathan, A. Torres, R. Gupta, and J. Word., "Implementation of assist features in EUV lithography", *Proc. of SPIE*, Vol. 9422, pp. 1-10, (2015).
6. N. Davydova, E. van Setten, R. de Kruif, D. Oorschot, M. Dusa, C. Wagner, J. Jiang, W. Liu, H. Y. Kang, H. Liu, P. Spies, N. Wiese and M. Waiblinger., "Imaging performance improvements by EUV mask stack optimization", *Proc. of SPIE*, Vol. 7985, pp. 1-4, (2011).
7. A. Erdmann and P. Evanschitzky., "Imaging characteristics of binary and phase shift masks for EUV projection lithography", *Proc. of SPIE*, Vol. 8550, pp. 1-10, (2012).
8. S. Lee, I. Lee, J. Doh, J. U. Lee, S. Hong and J. Ahn., "Improved imaging properties of thin attenuated phase shift masks for extreme ultraviolet lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B* 31(2) 021606, pp. 1-6, (2013).
9. S. Hsu, R. Howell, J. Jia, H. Y. Liu, K. Gronlund, S. Hansen., and J. Zimmermann, "EUV resolution enhancement techniques (RETs) for k1 0.4 and below", *Proc. of SPIE*, Vol. 9422, pp. 1-16, (2015).
10. J. S. Kim, S. Hong, J. U. Lee, S. M. Lee, and J. Ahn., "Attenuated phase-shift mask for mitigation of photon shot noise effect in contact hole pattern for extreme ultraviolet lithography", *Appl. Phys. Express*, Vol. 7, pp. 1-4, (2014).
11. 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, pp. 1-4, (2013).
12. C. B. Tan, K. K. Koh, D. Zhang and Y. M. Foong., "Sub-resolution assist feature (SRAF) printing prediction using logistic regression", *Proc. of SPIE*, Vol. 9426, pp. 1-6, (2015).
13. M. Coles, Y. S. Choi, K. Yang, C. Parker and A. Self., "Automated method of detecting SRAF and sidelobe printing with automated CD-SEM recipes", *Proc. of SPIE*, Vol. 6924, pp. 1-11, (2008).
14. R. Viswanathan, J. T. Azpiroz and P. Selvam., "Process optimization through model based SRAF printing prediction", *Proc. of SPIE*, Vol. 8326, pp. 1-10, (2013).
15. C. Bürgel, M. Sczyrba and G. R. Cantrell., "A systematic approach to the determination of SRAF capabilities in high end mask manufacturing", *Proc. of SPIE*, Vol. 7823, pp. 1-11, (2010).

접수일: 2015년 8월 18일, 심사일: 2015년 9월 3일,
 게재확정일: 2015년 9월 22일