

극자외선 리소그래피에서의 Sub-resolution assist feature를 이용한 근접효과보정

김정식* · 홍성철** · 장용주* · 안진호**,*†

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

Optical Proximity Correction using Sub-resolution Assist Feature in Extreme Ultraviolet Lithography

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

*Department of Nanoscale Semiconductor Engineering,

**Department of Materials Science and Engineering,

†Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University

ABSTRACT

In order to apply sub-resolution assist feature (SRAF) in extreme ultraviolet lithography, the maximum non-printing SRAF width and lithography process margin needs to be improved. Through simulation, we confirmed that the maximum SRAF width of 6% attenuated phase shift mask (PSM) is large compared to conventional binary intensity mask. The increase in SRAF width is due to dark region's reflectivity of PSM which consequently improves the process window. Furthermore, the critical dimension error caused by variation of SRAF width and center position is reduced by lower change in diffraction amplitude. Therefore, we speculate that the margin of SRAF application will be improved by using PSM.

Key Words : EUVL, phase shift mask, sub-resolution assist feature, lithography simulation, imaging performance

1. 서 론

13.5 nm의 파장을 사용하는 극자외선 노광공정(Extreme Ultra Violet Lithography, EUVL)에서도 sub-resolution assist feature(SRAF) 혹은 scattering bar의 적용이 고려되고 있다. [1,2] 이는 근접효과보정(optical proximity correction, OPC) 기술 중 하나로 고립 패턴(isolated pattern)의 전사패턴 크기(critical dimension, CD)를 교정해주는 동시에 초점심도(depth of focus, DOF)를 증가시킨다. [3] SRAF를 적용하는 것은 마스크 상에 새로운 패턴을 그리는 것으로, 마스크 패턴의 선폭을 조절하는 bias OPC 보다는 마스크 제작 공정이

더욱 복잡해진다. 그럼에도 불구하고 패턴이 미세화됨에 따라 극자외선 노광공정에서 고립 패턴들의 초점심도가 100 nm 이하를 가져 SRAF 적용의 필요성이 대두되고 있다. [4] 일반적으로 SRAF의 선폭은 주 패턴의 선폭에 비하여 50~70%의 크기를 유지하여 주 패턴과 일정 공간을 유지한다. 이 SRAF 폭이 클수록 고립 패턴의 초점심도가 증가하며 제작이 용이하지만 SRAF 부분에서 흡수되는 빛의 세기가 증가하여 웨이퍼에 전사될 가능성 또한 증가하게 된다. [5] 따라서 전사되지 않는 한도에서 SRAF의 폭을 증가시켜야 한다. 기존 ArF 노광에서는 SRAF의 폭이 100 nm 내외로 제작하는데 있어서 큰 어려움이 없었지만 극자외선 노광공정의 경우 그 폭이 수십 나노미터 정도로 구현이 쉽지 않을 것으로 예상된다. [6] 또한, 극자외선 노광공정에서의 SRAF의

†E-mail: jhahn@hanyang.ac.kr

적용은 최적 초점의 시프트(best focus shift)와 bossung curve의 기울임을 야기시켜 초점심도가 제한된다. [7] 따라서 새로운 연구를 통해 전사되지 않는 최대 SRAF 폭과 초점심도를 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 전사되지 않는 SRAF의 폭과 초점심도를 모두 향상시키기 위하여 6% 감쇄형 위상변위 마스크(attenuated phase shift mask, attenuated PSM) 구조를 제시한다. [8] 위상변위 마스크의 경우 흡수영역에서 6% 반사도를 갖기 때문에 0.1% 이하의 반사도를 갖는 기존 흡수형 마스크(binary intensity mask, BIM)에 비하여 SRAF 부분의 흡수도를 감소시킨다. 따라서 SRAF 부분에 흡수되는 광자수를 감소시킬 수 있기 때문에 전사되지 않는 SRAF의 폭을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이 뿐만 아니라 위상 변위 마스크 흡수영역에서의 180° 위상반전 효과로 인하여 이미징 특성을 향상시킬 것으로 예상된다. 따라서 이를 확인하기 위해 시뮬레이션을 통하여 탄탈륨(Ta) 계열의 흡수체를 갖는 기존의 흡수형 마스크와 위상변위 마스크에서 전사되지 않는 최대 SRAF 폭과 초점심도를 비교하였다. 또한 미세한 SRAF를 제작할 시 선폭 또는 위치 오차가 발생할 수 있기 때문에 SRAF 폭과 위치에 따른 전사된 패턴의 선폭을 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 에어리얼 이미지(aerial image) 및 현상된 레지스트 이미지(developed photoresist image) 시뮬레이션을 위하여 KLA-Tencor사의 PROLITH X5.1 시뮬레이션 코드를 사용하였다. 에어리얼 이미지 시뮬레이션을 통하여 각 마스크의 전사되지 않는 최대 SRAF 폭과 정규화 이미지 로그 기울기(normalized image log slope, NILS)를 분석하였다. 또한, 일반적인 극자외선 노광공정용 레지스트 모델(EUV generic resist model)을 통해 포토레지스트 이미지 시뮬레이션을 진행하였으며 각 마스크에 bias OPC와 SRAF를 적용한 경우 6% 노광 허용도(exposure latitude)에서의 초점심도를 계산하여 비교하였다.

그림 1과 같이 6% 위상변위 마스크 구조는 26.5 nm 두께의 질화탄탈륨(TaN) 흡수층과 14 nm 두께의 몰리브덴(Mo) 위상변위층으로 구성되어있으며 반사영역과 180° 위상차를 가지도록 설계되었다. 이 위상변위 마스크를 70 nm의 TaN 흡수체를 갖는 흡수형 마스크와 16 nm의 선폭을 가지는 1:1 조밀패턴 및 1:5 고립패턴들에 대하여 비교하였다. 일반적으로 노광공정을 진행할 때 해상하기 가장 힘든 1:1 조밀패턴에 대하여 최적화한 조명계인 center sigma 0.65, pole radius 0.3을 갖는 dipole 조명조건을 각 마스크에 동일하게 적용하였다. [9] 마찬가지로 에어리얼 이

미지에서의 임계광량(threshold intensity)과 초점거리, 포토레지스트 이미지에서의 노출량(dose)과 초점거리 모두 1:1 조밀패턴에 최적화된 조건을 사용하였다. 이를 기준으로 16 nm 선폭 크기를 구현하도록 각 마스크에 bias OPC와 SRAF를 적용하였다. 시뮬레이션에 사용한 물질들의 광학상수는 Center for X-Ray Optics(CXRO) 데이터 베이스를 사용하였으며 KLA-Tencor사에서 제공된 극자외선 노광공정용 레지스트 모델을 사용하였다.

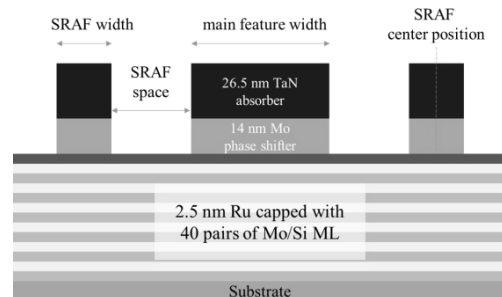


Fig. 1. Schematic images of 6% attenuated PSM with SRAF.

3. 결과 및 고찰

표 1은 에어리얼 이미지에서 각 흡수형 마스크와 위상변위 마스크의 SRAF 폭에 따라 웨이퍼에 전사되는 패턴의 폭이 16 nm가 되도록 최적화한 주 패턴과 SRAF 사이의 거리(SRAF space)를 나타낸 결과이다. 흡수형 마스크의 경우 SRAF 폭이 28 nm 일 때 SRAF 부분에서 흡수하는 빛의 세기가 임계광량보다 낮아져 웨이퍼로 전사된다. 따라서 에어리얼 이미지 상에서 흡수형 마스크와 위상변위 마스크의 전사되지 않는 최대 SRAF 폭은 각각 22와 28 nm이며, 결국 위상변위 마스크를 사용할 경우 SRAF의 폭에 대한 마진이 증가한다. 또한 위상변위 마스크를 사용할 경우, 흡수영역에서의 180° 위상반전 효과로 인하여 흡수형 마스크에 비해 이미징 특성이 향상된다. [10] 표 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 위상변위 마스크를 사용

Table 1. SRAF space for BIM and 6% attenuated PSM depending on SRAF width.

SRAF width (nm)	SRAF space for BIM (nm)	SRAF space for PSM (nm)
4	44	25
10	48	42
16	48	47
22	50	48
28	N/A	48

Table 2. Normalized image log slope (NILS) of aerial image depending on SRAF width by using BIM and 6% attenuated PSM.

SRAF width (nm)	NILS of BIM	NILS of PSM
4	2.08	2.50
10	1.90	2.26
16	1.84	2.18
22	1.83	2.15
28	N/A	2.15

할 경우 모든 SRAF 폭에 대하여 패턴의 경계에서 빛의 세기의 변화를 나타내는 에어리얼 이미지의 NILS가 향상된다.

위상변위 마스크를 사용할 경우 전사되지 않는 SRAF의 폭이 증가하는 현상을 이해하기 위하여 에어리얼 이미지를 분석하였다(그림 2). 두 마스크 모두 SRAF 폭이 증가할 수록 SRAF 부분에서 흡수하는 빛의 세기가 증가한다. 하지만 위상변위 마스크의 경우 흡수체 구조가 6%의 반사도를 가지기 때문에 SRAF 폭의 증가에 따라 빛의 흡수도 변화가 약하다. 즉, 동일한 폭에서 SRAF 부분에서 흡수하는 빛의 세기가 약해 전사되지 않는 SRAF의 최대 폭이 증가한다. 결국 흡수형 마스크의 경우 24 nm 이상, 위상변위 마스크의 경우 30 nm 이상의 SRAF 폭을 가질 때 SRAF 부분의 광량이 임계광량에 근접하게 된다. 각각의 경우에 대하여 ± 55 nm 이내의 초점 흐림(defocus)에서 SRAF 부분의 광량이 임계광량보다 낮아져 웨이퍼 상에 전사되게 된다. 따라서 극자외선 노광공정용 스캐너의 초점 조절능력을 고려하였을 때 흡수형 마스크와 위상변위 마스크의 SRAF 폭은 각각 최대 22 및 28 nm를 가져야 한다. [11] 위상변위 마스크의 반사도를 더욱 증가시킬 수 있지만 이럴 경우에는 SRAF 폭의 증가 효과가 미비하다. 이러한 이유로 6% 위상변위 마스크가 최적화된 구조라 할 수 있으며 이는 적용 가능한 SRAF 폭과 이미징 특성을 모두 개선시킨다. 일반적으로 SRAF 폭이 증가할 경우 조밀한 패턴과 같이 초점 변화에 따라 전사된 패턴의 선 폭 변화량이 덜 민감해지기 때문에 위상변위 마스크의 초점심도도 향상될 것으로 예상할 수 있다. [12]

이를 확인하기 위해 동일한 극자외선 노광공정용 레지스트를 두 마스크에 적용하여 공정여유도(process window) 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3은 이 두 마스크에 대하여 1:1 조밀패턴, bias OPC가 적용된 1.5 고립패턴 그리고 전사되지 않는 최대 SRAF가 사용된 1.5 고립패턴을 적용하였을 때의 6% 노광 허용도에 해당하는 초점심도 결과들이다. 해당 결과들을 통해 실제 공정에서의 모든 패턴

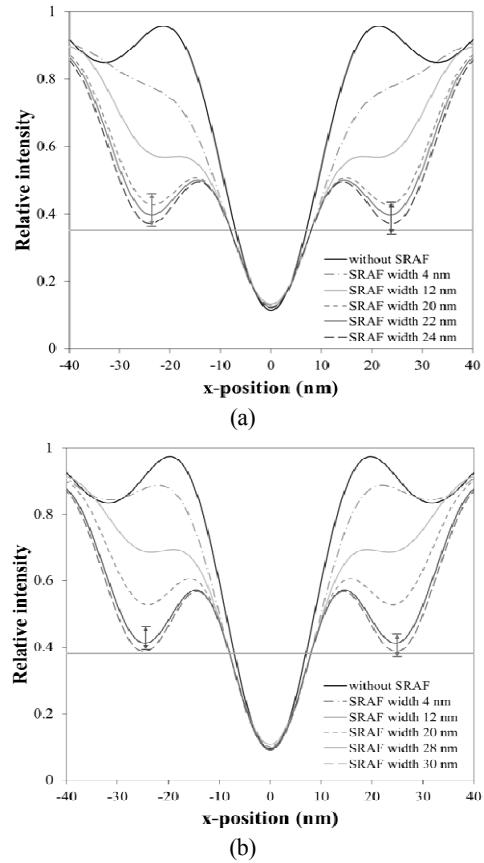


Fig. 2. Aerial image depending on SRAF width: (a) BIM and (b) PSM (Arrow shows the variation of relative minimum intensity in SRAF region for $-55 \sim 55$ nm defocus).

에 대한 공통적인 초점심도를 알 수는 없지만 동일한 resist 모델을 사용하였기 때문에 각 마스크를 적용하였을 때의 비교가 가능하다. 흡수형 마스크의 경우 bias OPC와 SRAF 적용하였을 때 각각 84와 90 nm로 모두 100 nm 이하인 반면, 위상변위 마스크의 경우 bias OPC와 SRAF 적용하였을 때 각각 92와 109 nm이다. 따라서 위상변위 마스크를 사용하였을 경우 bias OPC보다 SRAF를 적용하였을 때 초점심도가 18.5% 증가하여 충분한 이점을 보인다. 또한 흡수형 마스크의 SRAF 적용한 결과에 비해서도 21.1% 증가하였는데 이는 전사되지 않는 최대 SRAF 폭이 흡수형 마스크에 비하여 위상변위 마스크에서 27.3% 증가한 결과로, 고립패턴에 SRAF의 적용으로 조밀한 패턴과 상황이 유사해졌기 때문이다. 따라서 종합적으로 봤을 때, 위상변위 마스크를 사용할 경우 흡수영역의 6% 반사도로 인해 흡수형 마스크에 비하여 전사되지 않는 최대 SRAF

폭이 증가하고 1:5 고립패턴의 초점심도가 향상된다.

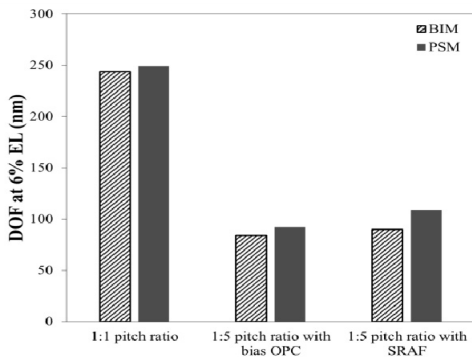
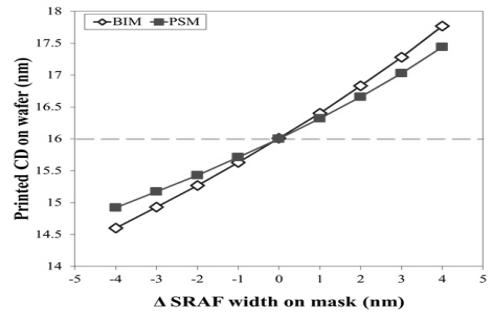
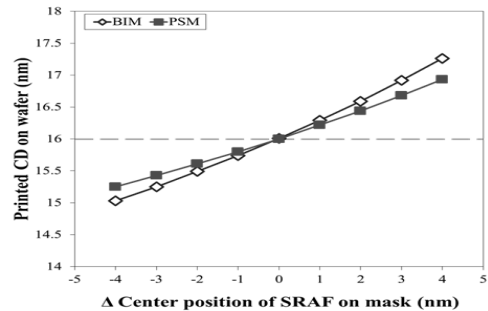


Fig. 3. Depth of focus(DOF) at 6% exposure latitude(EL) for each masks.

추가적으로 포토레지스트 이미지 시뮬레이션을 통해 SRAF 폭과 중심위치의 변화에 따라 전사되는 웨이퍼 패턴의 선폭을 확인하였다(그림 4). 이 변화들은 마스크 패턴 및 SRAF를 구현하기 위한 패터닝 공정을 진행할 때 발생 할 수 있으며 이는 웨이퍼 패턴의 선폭에도 영향을 미친다. [13,14] 따라서 동일한 변화량이 발생하였을 때의 웨이퍼 패턴의 선폭 변화를 통해 흡수형 마스크와 위상 변위 마스크의 SRAF 적용 마진을 비교할 수 있다. SRAF 폭과 중심위치의 변화가 마스크 상에서 4 nm 발생할 경우 흡수형 마스크의 웨이퍼 패턴의 선폭 변화량은 각각 최대 1.8 및 1.3 nm로 나타나며 위상변위 마스크의 웨이퍼 패턴의 선폭 변화량은 각각 최대 1.4와 0.9 nm로 나타난다. 따라서 위상변위 마스크를 사용할 경우 흡수형 마스크에 비하여 SRAF 폭과 중심위치의 변화에 의한 웨이퍼 패턴의 선폭 변화량은 각각 22.2, 30.8% 감소하며 SRAF 적용 마진이 증가한다. 이는 위상변위 마스크에서 SRAF 폭과 중심위치의 변화에 따라 발생하는 회절 효율의 변화가 감소하여 발생한 결과이다. 그림 5는 4 nm의 SRAF 폭과 중심위치의 변화가 발생할 경우 각각 마스크의 0차광을 제외한 회절광 효율의 변화량이다. 흡수형 마스크에 비해 위상변위 마스크에서 SRAF 폭의 변화에 의한 전체적인 회절광의 변화량이 낮으며 중심위치 변화에 의한 3차 회절광의 변화량이 대폭 감소한다. 이 회절광은 패턴의 정보를 갖고 있기 때문에 변화가 발생할 경우 패턴 경계에 전달하는 광자수 변화를 야기시키며 이로 인한 웨이퍼 패턴의 선폭을 변화시킨다. [15,16] 따라서 회절광 효율의 변화가 적은 위상변위 마스크의 웨이퍼 패턴의 선폭 변화가 적게 발생하여 결국 흡수형 마스크에 비하여 SRAF 적용 마진을 증가시킨다.

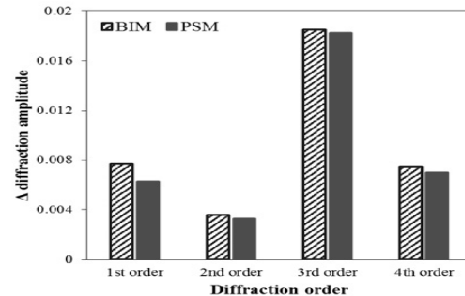


(a)

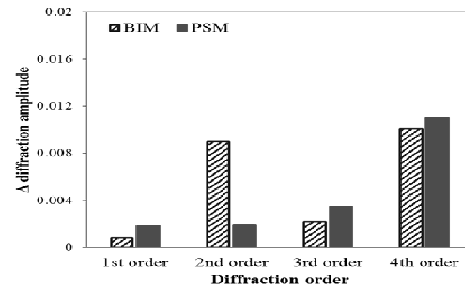


(b)

Fig. 4. Printed CD variation depending on (a) SRAF width variation and (b) center position variation of SRAF.



(a)



(b)

Fig. 5. Change in diffraction amplitude for each order in BIM and PSM due to (a) SRAF width variation and (b) center position variation of SRAF.

4. 결 론

극자외선 노광공정에서 미세한 SRAF를 적용하기 위해서는 전사되지 않는 SRAF 폭을 증가시켜야 하며 공정 여유도를 확보해야 한다. 본 연구에서는 기존 흡수형 마스크에 비하여 전사되지 않는 SRAF 폭을 더욱 증가시키기 위해 흡수영역에서 반사도를 갖는 위상변위 마스크를 제시하였다. 6% 반사도로 인하여 위상변위 마스크의 허용되는 SRAF 폭은 27.3% 증가한다. 증가된 SRAF 폭은 초점 변화에 따른 웨이퍼 패턴의 선폭 변화량을 감소시키기 때문에 결국 위상변위 마스크의 초점심도는 21.1% 증가한다. 뿐만 아니라 SRAF 폭과 중심위치의 변화가 발생할 경우 회절광 효율의 변화가 적은 위상변위 마스크에서 웨이퍼 패턴의 선폭 변화량은 각각 22.2, 30.8% 감소한다. 결론적으로 위상변위 마스크를 사용할 경우 흡수형 마스크에 비해 SRAF 적용 마진과 노광공정 마진을 모두 증가시킬 수 있다.

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. R.-H. Kim, O. Wood, M. Crousec, Y. Chen, V. Placheckic, S. Hsu, K. Gronlund, "Application of EUV resolution enhancement techniques(RET) to optimize and extend single exposure bi-directional patterning for 7nm and beyond logic designs", *Proc. of SPIE 9776*, 97761R, pp. 1-10, (2016).
2. F. Jiang, A. Raghunathan, M. Burkhardt, N. Saulnier, A. Tritchkov, S. Jayaram, and J. Word, "EUV implementation of assist features in contact patterns", *Proc. of SPIE 9776*, 97761U, pp. 1-11, (2016).
3. J. Garofalo, C. J. Biddick, R. L. Kostelak, and S. Vaidya, "Mask assisted off-axis illumination technique for random logic", *Journal of Vacuum Science & Technology B* 11(6), pp. 2651-2658, (1993).
4. F. Jiang, M. Burkhardt, A. Raghunathan, A. Torres, R. Gupta, and J. Word, "Implementation of Assist Features in EUV Lithography", *Proc. of SPIE 9422*, 94220U, pp.1-10, (2015).
5. M. Burkhardt, G. McIntyre, R. Schlieff, and L. Sun, "Clear Sub-Resolution Assist Features for EUV", *Proc. of SPIE 9048*, 904838, pp. 1-7, (2014).
6. H. Kang, "Novel assist feature design to improve depth of focus in low k1 EUV lithography", *Proc. of SPIE 7520*, 752037, pp. 1-7, (2009).
7. 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 9422*, 94221I, pp. 1-16, (2015).
8. S. S. Lee, I. H. Lee, J. G. Doh, J. U. Lee, S. C. Hong, and J. Ahn, "Improved imaging properties of thin attenuated phase shift masks for extreme ultraviolet lithography", *Journal of Vacuum Science & Technology B* 31 (2), 021606, pp. 1-5, (2013).
9. I. Mochi, V. Philipsen, E. Gallagher, E. Hendrickx, K. Lyakhova, F. Wittebrood, G. Schiffelers, T. Fliervoet, S. Wang, S. Hsu, V. Plachecki, S. Baron, and B. Laenens, "Assist features: placement, impact, and relevance for EUV imaging", *Proc. of SPIE 9776*, 97761S, pp. 1-17, (2016).
10. P. Yan, M. Leeson, S. Lee, G. Zhang, E. Gullikson, and F. Salmassi, "Extreme ultraviolet embedded phase shift mask", *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS* 10 (3), 033011, pp. 1-10, (2011).
11. J. Van Schoot, K. Van I. Schenau, G. Bottiglieri, K. Troost, J. Zimmerman, S. Migura, B. Kneer, J. T. Neumann, and W. Kaiser, "EUV high-NA scanner and mask optimization for sub-8nm resolution", *Proc. of SPIE 9776*, 97761I, pp. 1-15, (2016).
12. C. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography*, John Wiley & Sons, pp. 427-429, (2008).
13. W. C. Lo, Y. C. Chen, Y. F. Cheng, and M. J. Chen, "Influence of SRAF size on Main feature CD variation on advanced node", *Proc. of SPIE 8326*, 83262K, pp. 1-8, (2012).
14. T. Lin, F. Robert, A. Borjon, G. Russell, C. Martinelli, A. Moore, Y. Rody, "SRAF Placement and Sizing Using Inverse Lithography Technology", *Proc. of SPIE 6520*, 65202A, pp. 1-15, (2007).
15. D. Van Labeke and D. Barchiesi, "Scanning-tunneling optical microscopy a theoretical macroscopic approach", *Journal of Optical Society of America A* 9 (5), pp. 732-739. (1992).
16. J. A. Herrera Ramirez and J. Garcia-Sucerquia, "19. Digital off-axis holography without zero-order diffraction via phase manipulation", *Optics Communications* 277, pp. 259-263, (2007).

접수일: 2016년 8월 5일, 심사일: 2016년 8월 31일,
게재확정일: 2016년 9월 9일