

극자외선 노광공정에서의 사이드 로브 세기와 포톤 샷 노이즈 효과가 컨택 홀 missing 현상에 미치는 영향

김정식¹·홍성철²·장용주¹·안진호^{1,2,3,*}

¹한양대학교 나노반도체공학과

²한양대학교 신소재공학과

³한양대학교 나노과학기술연구소

Effect of Side Lobe Intensity and Photon Shot Noise Effect on the Missing Hole Phenomenon in Extreme Ultraviolet Lithography

Jung Sik Kim¹, Seongchul Hong², Yong Ju Jang¹, and Jinho Ahn^{1,2,3,*}

¹Department of Nanoscale Semiconductor Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

³Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

Abstract: The missing hole phenomenon in a wafer pattern is a critical issue in extreme ultraviolet lithography. It occurs randomly, even when the process conditions are consistent. The main reason for this phenomenon is thought to be the photon shot noise effect, which is a random reaction between photons and photoresist particles. We speculate that side lobe intensity can be another reason, since the missing hole is affected by the light distribution of the main hole pattern. To confirm the effect of side lobe intensity and photon shot noise on the missing hole phenomenon, we used an attenuated phase shift mask (PSM), whose reflectivity can be changed without varying the total absorber stack thickness. The results show that the photon shot noise effect and the side lobe intensity are both affected by the reflectivity of the PSM and are the critical factors for the missing holes.

(Received August 24, 2016; Accepted August 25, 2016)

Keywords: EUV phase shift mask, lithography simulation, missing hole, photon shot noise effect, side lobe intensity

1. 서 론

13.5 nm의 파장을 사용하는 극자외선 노광공정 (extreme ultraviolet lithography EUVL)에서는 광자 한 개의 에너지가 93eV으로 기존 ArF 노광공정에 비하여 14배 높기 때문에 포톤 샷 노이즈 (photon shot noise)가 심각하게 발생한다 [1]. 이는 웨이퍼 패턴의 선폭 불균일성과 가장자리 거칠기를 야기시키기 때문에 반드시 완화시킬 필요가 있다 [2]. 이러한 극자외선 노광공정으로 미세한 컨택 홀 (contact hole) 패턴을 해상할 경우에는 가장자리 거칠기를 악화시킬 뿐만 아니라 컨택 홀 자체가 소멸되는 현상이 일어난다 [3,4]. 이러한 가장자리 거칠기 악화와 소멸되는 현상은 소자의 퍼포먼스에 직

접적으로 영향을 주기 때문에 반드시 완화될 필요가 있다. 컨택 홀이 소멸되는 현상은 동일한 공정조건에서 임의적으로 발생하기 때문에 광자와 포토레지스트 입자간의 확률적인 반응을 야기하는 포톤 샷 노이즈 효과의 영향이 크다고 생각된다 [5]. 하지만 포톤 샷 노이즈 효과가 보다 적게 작용하는 ArF 리소그래피에서도 발생하기 때문에 단순히 포톤 샷 노이즈 효과에 의한 현상이라고 보기는 어렵다 [6].

본 연구에서는 주 홀 패턴의 빛 분포가 소멸에 영향을 주기 때문에 사이드 로브 (side lobe)의 세기 또한 컨택 홀 missing에 미치는 원인이라고 예상하였다. 포토레지스트에 흡수된 광자수가 일정할 때 사이드 로브 세기가 증가할 경우 주 홀 패턴의 빛 세기가 감소하여 컨택 홀 형성에 영향을 미칠 수 있기 때문이다 [7]. 따라서 이를 시뮬레이션으로 확인하기 위해 흡수체 구조의 총 두께는 일정하지만 사이드 로브 세기,

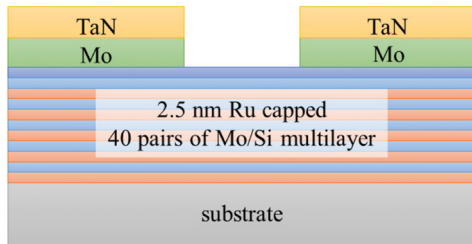
*Corresponding Author: Jinho Ahn

[Tel: +82-2-2220-0407, E-mail: jhahn@hanyang.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Optical properties for mask materials at 13.5 nm wave length.

Materials	Refractive index (n)	Extinction coefficient (k)
TaN	0.9260	0.0436
Ru	0.8864	0.0171
Mo	0.9238	0.0064
Si	0.9990	0.0018

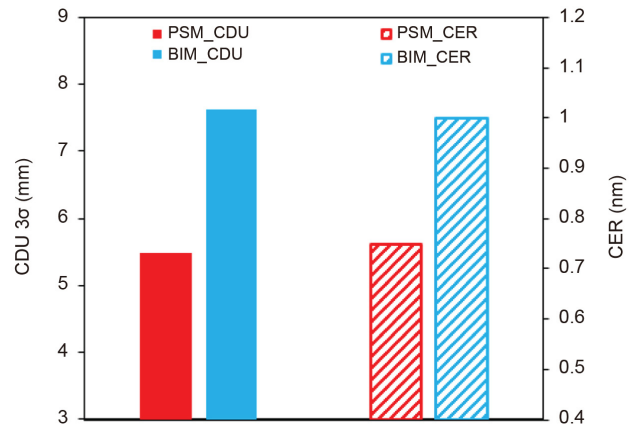
**Fig. 1.** Schematic of the PSM with TaN/Mo phase-shifting absorber stack for EUV lithography

즉 흡수 영역의 세기를 조절할 수 있는 질화탄탈륨 (tantalum nitride, TaN)의 흡수층과 몰리브데늄 (molybdenum, Mo)의 위상변위층을 갖는 위상변위 마스크 (phase shift mask, PSM)를 사용하였다 [18]. 이 위상변위 마스크의 경우 이미징에 미치는 영향 중 흡수체 구조의 두께에 의한 인자를 배제할 수 있기 때문에 포톤 샷 노이즈 효과와 사이드 로브 세기에 의한 영향만을 확인할 수 있다. 따라서 위상변위 마스크 반사도에 따른 missing된 컨택 홀 수, 가장자리 거칠기 등의 결과들을 통해 하고 포톤 샷 노이즈 효과와 사이드 로브 세기가 미치는 영향을 확인하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 에어리얼 이미지 (aerial image)뿐만 아니라 현상된 포토레지스트 이미지 시뮬레이션이 가능한 KLA-Tencor사의 PROLITH X5를 사용하였다. 이는 특히 포톤 샷 노이즈 효과에 의해 악화되는 임계치수 균일성, 가장자리 거칠기 등의 stochastic 이미징 특성들의 계산이 가능하다. 18 nm의 작은 컨택 홀을 해상하기 위하여 0.33 개구수 (numerical aperture, NA) 4배 축소 투영시스템에서 center sigma 0.75, pole radius 0.2의 quadrupole 조명계 조건을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 표 1의 마스크 물질들의 광학상수는 CXRO 데이터 베이스에서 참고하였다 [9].

그림 1과 같이 위상변위 마스크의 경우 2.5 nm의 루테늄

**Fig. 2.** CDU 3sigma and CER results with BIM and 6% PSM

(ruthenium, Ru)으로 캡핑된 40쌍의 Mo/Si 다층박막거울 위에 TaN 흡수층과 Mo 위상변위층으로 구성되어 있으며 이 두 층의 굴절 지수 (n)값이 매우 유사하여 총 두께 40.5 nm (흡수층과 위상변위층의 두께를 합)를 갖는 모든 경우에 대하여 180° 위상변위 효과를 갖는다 [10,11]. 따라서 앞서 언급하였듯이 위상변위 마스크의 반사도에 따른 시뮬레이션 결과들을 비교할 시 흡수체 구조의 두께에 의한 인자를 배제할 수 있다. 따라서 반사도에 따라 변화하는 포톤 샷 노이즈 효과 및 사이드 로브 세기에 의한 영향만을 확인할 수 있다. 우선적으로 이 위상변위 마스크를 통하여 기존 바이너리 마스크 (binary intensity mask, BIM)에서 발생하는 missing된 컨택 홀 수를 완화시킬 수 있는지 확인하기 위하여 이미징 퍼포먼스가 우수하다고 알려진 6% 위상변위 마스크와 70 nm TaN 흡수층을 갖는 바이너리 마스크와 비교하였다 [12-14]. 이 후 포톤 샷 노이즈 효과 및 사이드 로브 세기가 컨택 홀 missing 현상에 미치는 영향을 확인하기 위하여 위상변위 마스크의 반사도에 따라 에어리얼 이미지, missing된 컨택 홀 수, 가장자리 거칠기 등을 계산하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 6% 위상변위 마스크와 기존 바이너리 마스크를 사용하여 18 nm의 컨택 홀을 전사하였을 때의 임계치수 균일성과 가장자리 거칠기 결과들이다. 이전 연구들에 의하면 이 6% 위상변위 마스크는 바이너리 마스크에 비하여 0차광을 제외한 회절 효율을 대폭 증가시켜 패턴 가장자리에 전사되는 광자 수를 증가시킨다 [15]. 따라서 6% 위상변위 마스크를 사용하였을 경우 포톤 샷 노이즈 효과에 의하여 악화된

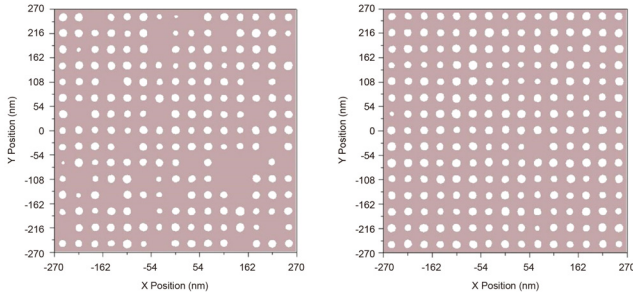


Fig. 3. Developed photoresist image of (left) BIM and (right) 6% PSM

Table 2. Mask structure and diffraction efficiency of PSM depending on reflectivity.

Reflectivity of PSM (%)	Thickness of TaN (nm)	Thickness of Mo (nm)	0th order diffraction efficiency	1st order diffraction efficiency	2nd order diffraction efficiency
2	39.5	1.0	0.0410	0.1351	0.0494
4	32.5	8.0	0.0387	0.1520	0.0535
6	26.5	14.0	0.0371	0.1693	0.0574
8	24.5	16.0	0.0375	0.1821	0.0609
10	22.5	18.0	0.0358	0.1942	0.0638

임계치수 균일성과 가장자리 거칠기 등의 stochastic 이미징 특성들을 개선시킨다. 특히 그림 2에서 볼 수 있듯이 바이너리 마스크에 비하여 위상변위 마스크의 임계치수 균일성은 28%, 가장자리 거칠기는 25% 감소한다. 또한 6% 위상변위 마스크와 바이너리 마스크를 사용하였을 경우 missing된 콘택 홀 수를 비교하면 225개의 콘택 홀 중 31개에서 1개로 위상변위 마스크의 경우 대폭 감소하는 것을 확인할 수 있다 (그림 3). 이는 마찬가지로 향상된 위상변위 마스크의 회절 효율로 인해 패턴 정보를 갖는 광자수가 증가하여 웨이퍼 패턴 가장자리에 전달되는 광자수가 증가하기 때문에 missing된 콘택 홀 수가 감소하는 것이다. 따라서, 단순히 위 결과에 따르면 위상변위 마스크의 회절 효율이 증가될수록 패턴 가장자리에 집중되는 광자수가 증가하여 missing된 콘택 홀 수가 감소될 것으로 예상된다.

일반적으로 흡수영역의 반사도를 증가시키면 위상변위 마스크의 회절효율이 증가한다 [16]. 다음 표 2는 위상변위 마스크의 반사도에 따른 TaN 흡수층과 Mo 위상변위층의 두께 및 회절효율 시뮬레이션 계산 결과이다. 흡수층 TaN에 비하여 위상변위층 Mo의 소광계수 (k)값이 높기 때문에 흡수체 구조에 Mo의 비율이 높아질수록 반사도가 증가하며 회절효율이 증가한다. 반사도 증가에 의한 회절효율의 향상은 패턴 가장자리에 집중되는 광자 수를 증가시키지만 이와 동시에

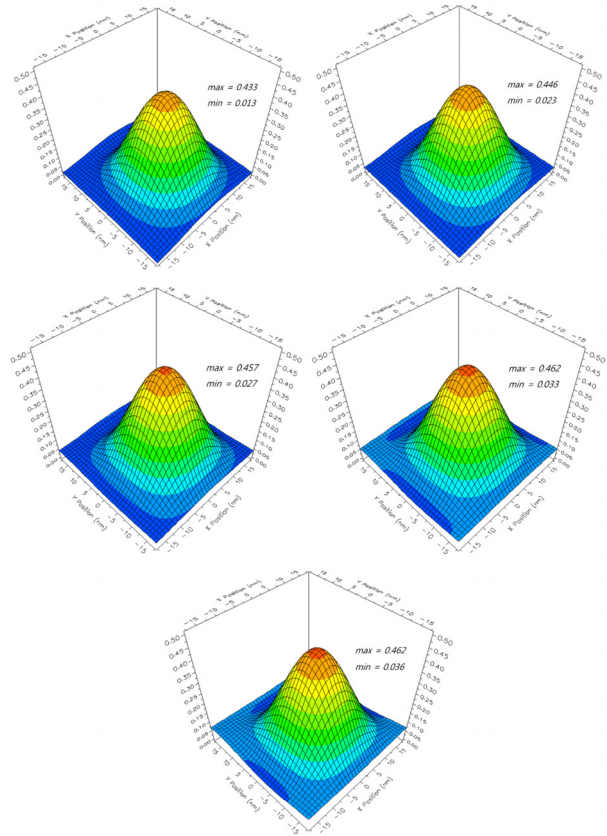


Fig. 4. 3D aerial image of contact hole pattern depending on reflectivity of PSM: (a) 2% PSM, (b) 4% PSM, (c) 6% PSM, (d) 8% PSM, (e) 10% PSM

흡수영역의 빛 세기가 증가하기 때문에 사이드 로브 세기에 의한 빛 분포가 달라질 수 있다. 특히 콘택 홀 패턴의 경우 사이드 로브 세기가 line and space 패턴에 비하여 높기 때문에 반사도에 따라 빛 분포가 더욱 크게 영향을 받는다 [17]. 다음 그림 4는 위상변위 마스크 반사도에 따른 웨이퍼에 전사되기 직전의 빛 분포를 나타낸 결과이다. 반사도가 증가할 경우 반사영역과 흡수영역 간의 image contrast가 감소한다. 특히 10% 위상변위 마스크에서 최대 빛 세기가 0.462 이고, 최소 빛 세기가 0.036으로 image contrast (85.5%)가 가장 낮으며 2% 위상변위 마스크에서 최대 빛 세기가 0.433이고, 최소 빛 세기가 0.013으로 image contrast (94.2%)가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 반사도에 따라 image contrast가 영향을 받기 때문에 다음 그림 5와 같이 포토레지스트에 흡수된 광자분포에도 차이가 나타난다. 앞서 예상한 바와 같이 10% 위상변위 마스크의 경우 2% 위상변위 마스크에 비하여 회절효율이 증가하기 때문에 hole 가장자리 부분에 광자들이 더욱 분포되

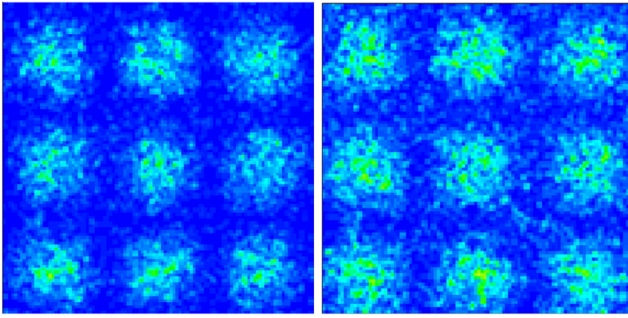


Fig. 5. Magnified image of photon distribution in photoresist for (left) 2% PSM and (right) 10% PSM

어 있지만 사이드 로브 세기증가로 인해 흡수영역에도 광자들이 더욱 분포되어 있다. 이렇게 흡수영역에도 광자들이 분포하여 image contrast가 감소할 경우 현상 과정에서 컨택 홀 missing이 일어날 확률이 높을 것으로 예상된다 [18]. 따라서 앞선 예상과 달리 위상변위 마스크의 반사도가 증가할 경우 포톤 샷 노이즈 효과 완화에 의한 컨택 홀 missing 감소 보다는 오히려 사이드 로브 세기 증가에 의한 image contrast 저하로 missing 현상이 증가할 것으로 예상된다.

이를 확인하기 위해 225개의 컨택 홀을 해상하기 위하여 모든 위상변위 마스크에 대해 동일한 공정조건을 적용하여 현상된 포토레지스트 이미지 시뮬레이션을 stochastic 모드로 300번 반복하였다. 다음 그림 6은 반사도에 따른 missing된 컨택 홀 수와 가장자리 거칠기 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 위상변위 마스크 반사도가 증가할 경우 포톤 샷 노이즈 효과가 완화되어 가장자리 거칠기가 감소한다. 10% 위상변위 마스크의 가장자리 거칠기는 0.66 nm로 2% 위상변위 마스크의 가장자리 거칠기 0.92 nm에 비하여 28% 감소한 결과이다. 또한 반사도가 증가함에 따라 흡수영역과 반사영역의 image contrast가 감소하여 missing된 컨택 홀 수가 증가한다. 총 67,500개의 컨택 홀 중 604개의 missing이 일어나는 2% 위상변위 마스크에 비하여 10% 위상변위 마스크의 missing 수는 101% 정도 증가하여 1215개이다. 특히 그래프에서 볼 수 있듯이 반사도가 6%를 초과할 경우 missing된 컨택 홀 수가 급격히 증가하며 1% 이상의 확률로 missing 현상이 발생한다. 즉, 6% 이하의 반사도에서 missing 수가 감소하는 양이 줄어들는데 이 것은 낮은 반사도의 위상변위 마스크에서는 포톤 샷 노이즈 효과가 크게 작용하여 missing 된 컨택 홀 수에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다. 따라서 이 때문에 BIM의 경우에도 사이드 로브 세기가 매우 낮지만 포톤 샷 노이즈 효과에 의한 컨택 홀 missing 현상이 심각하게

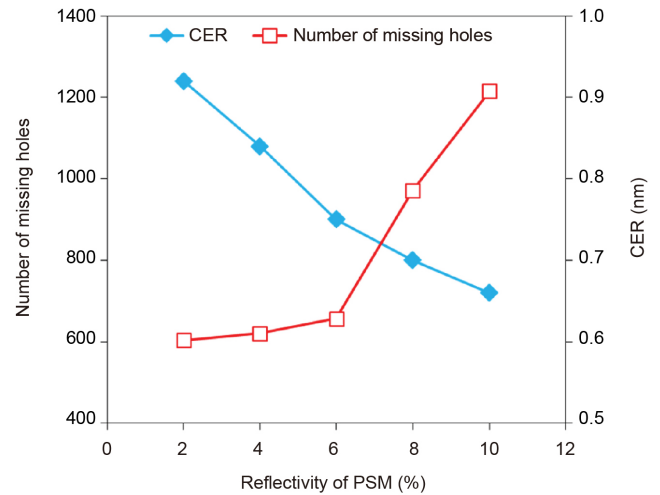


Fig. 6. Number of missing holes and CER depending on reflectivity of PSM

발생하는 것이다.

결론적으로 극자외선 노광공정에서의 컨택홀 missing 현상은 포톤 샷 노이즈 효과와 사이드 로브 세기가 복합적으로 작용하는 것을 확인하였다. 결국 가장자리 거칠기 등의 stochastic 이미징 특성들을 향상시키기 위해서는 높은 반사도의 위상변위 마스크가 유리하지만, 반사도가 6%를 초과할 경우 컨택 홀 missing의 발생확률이 급격하게 증가하기 때문에 6% 위상변위 마스크를 통해 전체적인 컨택 홀 패턴의 이미징 퍼포먼스를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

극자외선 노광공정에서 컨택 홀 missing에 미치는 원인으로 포톤 샷 노이즈 효과뿐만 아니라 사이드 로브 세기로 예상하였다. 이를 증명하기 위해 흡수체 구조의 총 두께를 변화시키지 않고 반사도, 즉 사이드 로브 세기를 조절할 수 있는 감쇠형 위상변위 마스크를 사용하여 노광공정 시뮬레이션을 진행하였다. 본 위상변위 마스크를 사용할 경우 바이너리 마스크에 비하여 증가된 회절효율로 인해 포톤 샷 노이즈 효과가 완화되어 missing된 컨택 홀 수가 대폭 감소하는 것을 확인하였다.

위상변위 마스크의 반사도를 변수로 하여 광자분포를 확인한 결과, 반사도가 증가함에 따라 흡수영역에 분포하는 광자들이 증가하여 image contrast가 감소하는 것을 확인하였다. 결국 image contrast 저하로 인해 missing된 컨택 홀 수는 반사도에 따라 증가하며 특히 6%를 초과할 때 missing된 컨

택 홀 수가 급격하게 증가한다. 이는 결국 사이드 로브 세기의 증가로 인해 missing 수가 증가하는 것이다. 결론적으로 반사도에 따라 포톤 샷 노이즈 효과, 사이드 로브 세기가 변화하며 이 인자들이 컨택 홀 missing의 주된 요인인 것을 확인하였다. Missing된 컨택 홀 수 감소를 위해 위상변위 마스크의 반사도는 낮아야 하지만 임계치수 균일성 및 가장자리 거칠기의 향상을 위해서 6%의 반사도가 필요하다.

감사의 글

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

REFERENCES

1. Z.-Y. Pan, C.-K. Chen, T.-S. Gau, and B. J. Lin, *Proc. of SPIE* **6924**, 69241K (2008).
2. R. L. Brainard, P. Trefonas, J. H. Lammers, and C. A. Cutler, *Proc. of SPIE* **5374**, 74 (2004).
3. D. Civay, T. Wallow, N. Doganaksoy, E. Verduijn, G. Schmid, and P. Mangat, *Proc. of SPIE* **9048**, 90483D (2014).
4. P. D. Bisschop, J. V. de Kerkhove, J. Mailfert, A. V. pret, and J. Biafore, *Proc. of SPIE* **9048**, 904809 (2014).
5. M. Neisser, K. Y. Cho, C. Sarma, and K. Pettrillo, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **26**, 617 (2013).
6. A. V. Pret, P. D. Bisschop, M. D. Smith, and J. J. Biafore, *Proc. of SPIE* **9048**, 904834 (2014).
7. K. Watanabe, E. Kurose, T. Suganaga, and T. Itani, *Proc. of SPIE* **5130**, 736 (2003).
8. S. Lee, I. Lee, J. G. Doh, J. U. Lee, S. Hong, and J. Ahn, *J. Vac. Sci. Technol. B* **31**, 021606 (2013).
9. P. Naulleau, *The Center for X-ray Optics*, http://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html (2010).
10. S. Jeong, S. Hong, J. S. Kim, and J. Ahn, *Korean J. Met. Mater.* **54**, 379 (2016).
11. J. Jeon, J. Lee, S. Hwang, and H. Kim, *Met. Mater. Int.* **17**, 593 (2011).
12. Y. J. Jang, J. S. Kim, S. Hong, and J. Ahn, *Korean J. Met. Mater.* **54**, 455 (2016).
13. T. Lee, S. Lee, and J. Ahn, *Met. Mater. Int.* **3**, 272 (1977).
14. P. Yan, M. Leeson, S. Lee, E. Gullikson and F. Salmassi, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **10**, 033011 (2011).
15. S. Hong, S. Jeong, J. U. Lee, S. M. Lee, and J. Ahn, *Appl. Phys. Express* **6**, 096501 (2013).
16. Y. J. Jang, J. S. Kim, S. Hong, H. K. Cho, and J. Ahn, *KSDet* **14**, pp. 1-5 (2015).
17. M.-R. Moitreyee, *Ph. D. Thesis*, pp. 143-144, National University of Singapore, Singapore (2004).
18. Y. Wei and R. L. Brainard, *Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography*, pp. 216-217, SPIE Press, Washington (2009).