경 X-선 나노 리소그래피

DOI: 10.3938/PhiT.20.003

노도영

Hard X-ray Nano Lithography

Do-Young NOH

Hard x-ray lithography is a promising candidate for future nano-scale structure fabrication. Extreme short wavelength of the hard x-ray light source below 0.2 nm provides lithographic resolution better than 10 nm in principle. However, its application is limited to micro-scale structure due to the difficulties in fabricating hard x-ray photon mask. Recently, a new type of hard x-ray mask, sectioned multilayer, was introduced and 100 nm scale periodic linear pattern was successfully achieved. In this article, progress of the hard x-ray nano lithography and its potential is described.

들어가는 글

반도체 산업이 소자의 고집적화와 더불어 고성능화를 추구함에 따라, 보다 미세한 패턴을 가공할 수 있는 리소그래피 기술 개발이 절실히 요구되어지고 있다. 현재 대부분의 실리콘 반도체 소자는 포토리소그래피(photolithography) 기술에 의해 제작되고 있다. 포토리소그래피는 광학식 광원(optical light source)을 이용하는 패턴링 기술로, 마스크에 광원을 조사시킴으로써 형성되는 이미지를 감광제(photoresist)가 코팅된 실리콘 웨이퍼에 투영하여 패턴을 얻는다. 광학식 광원을 이용하는 리소그래피 기술에 있어, 패턴링 가능한 최소 선

폭(critical dimension)은 파장에 비례하여 감소한다. 따라서 광원의 파장이 짧을수록 패턴의 미세화에 유리하다고 할 수 있다. 현재 양산에 적용되고 있는 193 nm 파장의 DUV를 대체할 차세대 광원으로써 EUV 및 X-선이 고려되고 있다. 이들 중 X-선은 광원의 파장에 따라 연(soft) X-선($\lambda \sim 1$ nm)과 경(hard) X-선($\lambda < 0.2$ nm)으로 나뉘는데, 경 X-선은 극도로 짧은 파장으로 인해 이론적으로 10 nm 이하의 패턴 형성이 가능할 것으로 인지되고 있다. 하지만 마스크 제작의 어려움으로 인해 고종횡비(high aspect ratio)의 마이크로 스케일 패턴링에 한정되어 응용되고 있다. 최근 광주과학기술원 X-선 나노현상 연구실에서는 새로운 개념의 경 X-선 광원용 마스크(수직 다층박막 마스크)를 도입하여 100 nm급의 패턴을 얻는데 성공하였다. 이 글에는 다층 박막 마스크를 이용하는 경 X-선 나노 리소그래피의 최근 연구 결과 및 앞으로의 가능성을 소개한다.

Deep X-선 리소그래피

리소그래피 분야에서 경 X-선 광원은 LIGA 공정의 일부인 Deep X-선 리소그래피에 적용되어 폭넓게 연구되고 있다. LIGA는 Fig. 1에서와 같이 Deep X-선 리소그래피, 전해 도금(electroforming), 그리고 플라스틱 주조(plastic molding)로 구성된 일련의 공정으로, 고정밀·고종횡비의 마이크로 스케일 구조물 제작에 특화되어 있다.^[1] LIGA 공정에서 Deep X-선 리소그래피는 경 X-선 광원을 이용하여 최종 구조물의 기본이 되는 고분자 형틀(template)을 가공하는 핵심적인 공정이다.

파장이 193 nm인 DUV를 리소그래피 광원으로 이용하는 경우, 마스크로부터 형성된 이미지를 렌즈로 축소시킴으로써 마스크의 패턴보다 미세한 패턴을 형성하는 것이 가능하다.

저자약력

노도영 교수는 미국 매사추세츠공과대학교(MIT) 이학박사(1991)로서 극한광 응용기술 국가핵심연구센터(NCRC, 소장) 사업을 수행하고 있다. 광주과학기술원 광공학응용물리 학제전공 책임교수이며 신소재공학과 교수로 재직 중이다. (dynoh@gist.ac.kr)

REFERENCES

[1] E. W. Becker *et al.*, Microelectron. Eng. **4**, 35 (1986).

Fig. 1. Schematic of the LIGA process.^[2]

반면, 경 X-선 광원은 굴절률의 실수부가 '1'에 근접한 값을 나타내어 일반적인 렌즈로는 굴절을 이용한 집속이 불가능하다. 따라서 경 X-선을 이용한 패터닝 공정에서는 렌즈를 사용하지 않는 접촉(contact) 또는 근접(proximity) 기법을 요구하게 된다. Fig. 1에서와 같이 경 X-선 광원을 마스크에 조사시키면 광원은 마스크에 형성된 흡수체(absorber) 패턴에 의해 선택적으로 투과되어 감광제의 화학 결합에 변화를 유발시킨다. 그리고 광원 노출에 의하여 분자량이 작아지거나(positive type 감광제) 커진(negative type 감광제) 부분이, 현상(development)공정 후 선택적으로 제거되거나(positive type 감광제) 잔류하게(negative type 감광제) 되면서 최종적인 고분자 형틀이 완성된다. 파장이 0.2 nm 이하인 경 X-선은 물질에 대하여 높은 투과력을 보인다. 따라서 감광제의 두께가 수백 μm 에서 수 mm에 달하더라도 두께 방향으로 균일한 선량(dose)을 전달하여 Fig. 2와 같은 고종횡비의 구조물 가공을 가능하게 한다.

한편, 경 X-선의 물질에 대한 높은 투과력은 마스크를 제작하는데 있어서는 장애물로 작용한다. 마스크 내에서 경 X-선 광원을 효과적으로 차단하여 충분한 contrast를 얻기 위해서는 수십 μm 두께의 고 원자번호(gold 또는 tungsten) 흡수체가 필요하다. 그리고 흡수체 패턴의 종횡비는 가공하고자 하는 패턴의 선폭이 나노 스케일로 미세화되면 매우 큰 수치로 증가한다. 단순히 흡수체 패턴의 선폭을 100 nm, 그리고 두께를 10 μm 로 가정하면 흡수체 패턴의 종횡비는 '100'이 되며, 이러한 흡수체 패턴은 일반적인 마스크 제작 기법으로는 가공이 불가능하다. 따라서 경 X-선을 광원으로 이용하는 경우에는 패턴 사이즈가 마이크로 스케일로 제한되며, 현재까지 보고된 가장 미세한 패턴은 400 nm 근처에 머무르고 있다.^[6,7] 경 X-선 광원을 이용하여 나노 스케일 패터닝을 시연하기 위해서는 새로운 개념의 공정 및 마스크 제작 기술 개발이 필수적이라 할 수 있다.

Fig. 2. Polymer structures fabricated by the deep x-ray lithography. (a) fluid filter; (b) photonic crystal; (c) gear structure.^[3-5]

수직 다층박막 마스크

수직 다층박막 마스크는 나노 스케일 패터닝 시연을 위하여 광주과학기술원 X-선 나노현상 연구실에서 새롭게 개발한 마스크로써, 나노 스케일의 폭(width)과 수십 μm 의 두께를 갖는 흡수체 제작을 가능하게 한다. 수직 다층박막은 굴절 및 흡수 성질이 서로 다른 두 물질의 박막을 번갈아가며 증착하여 sectioning한 것으로, 주로 X-선이나 EUV 광원을 위한 mirror의 용도로 사용된다. 나노 스케일 주기의 다층박막은 스퍼터링법을 이용하면 비교적 손쉽게 제작할 수 있다. 실리콘 웨이퍼 위에 형성시킨 다층박막 [예: Si/WSi₂ (100 nm/100 nm)]을 또 다른 웨이퍼와 접착시킨 후, sectioning을 하면 Fig. 3과 같은 형태의 수직 다층박막을 얻을 수 있다. 이를 박막의 수직 방향

REFERENCES

- [2] Y. Hirata, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **208**, 21 (2003).
- [3] Y. Ukita *et al.*, Microsyst. Technol. **13**, 435 (2007).
- [4] B. Y. Shew *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, 1097 (2005).
- [5] G. Aigeldinger, Implementation of an Ultra Deep X-ray Lithography(UDXRL) System at CAMD (2001).
- [6] Y. C. Kim *et al.*, J. Micromech. Microeng. **18**, 015006 (2008).
- [7] D. M. Klymyshyn *et al.*, J. Micromech. Microeng. **20**, 075031 (2010).

Fig. 3. Fabrication procedure of the sectioned multilayer mask.

으로 얇게($\sim 15 \mu\text{m}$ 두께) polishing한 후 알루미늄 프레임에 고정시키면 Fig. 3에 나타난 것과 같은 나노 스케일의 경 X-선 마스크를 얻을 수 있다. 이러한 ‘수직 다층박막 마스크’에 경 X-선을 입사시키면, 실리콘 부분은 X-선이 비교적 쉽게 투과하고 텅스텐 실리사이드 부분은 투과가 쉽게 되지 않으므로, 나노 스케일의 주기적인 선형 패턴을 얻는 것이 가능해진다. 또한 두 개의 다층박막이 서로 직교하도록 마스크를 제작할 경우에는 주기적인 구멍(hole) 패턴을 얻을 수 있다.

경 X-선 나노 리소그래피

앞서 언급한 바와 같이, 파장이 극도로 짧은 경 X-선을 리소그래피 광원으로 이용하는 경우에는 이론적으로 10 nm 이하의 분해능을 얻을 수 있다. 그리고 물질에 대한 투과력이 높은 경 X-선 광원은 공기 중에서의 흡수가 매우 적어 리소그래피 공정을 공기 중에서 수행할 수 있는 장점을 얻을 수 있다. 또한, DUV나 EUV 리소그래피의 경우 마스크에 흡착되는 고분자 오염물이 패터닝 결과물에 결함을 야기시키는 것과는 달리, 경 X-선 리소그래피에서는 광원이 이들을 투과하여 그림자를 형성하지 않으므로 마스크에 흡착되는 고분자 오염물에 영향을 받지 않고 공정을 수행할 수 있다. 이러한 핵심적인 장점으로 인해 경 X-선은 10 nm 급 이하의 패터닝을 위한 차세대 광원으로 주목받고 있다.

수직 다층박막을 마스크로 이용하는 경 X-선 나노 리소그래피 공정은 Deep X-선 리소그래피의 것과 거의 유사하다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 수직 다층박막 마스크를 광원에 대하여 평행하게 정렬시킨 후, 마스크로부터 약 $30 \mu\text{m}$ 정도 떨어진 감광제에 광원을 노출시킴으로써 공정이 완료된다. 경 X-선은 물질에 대한 투과력이 좋기에, 감광제 내에서도 역시 흡수보다는 투과가 훨씬 우세하게 일어난다. 따라서 경 X-선 리

Fig. 4. Schematic of the hard x-ray nano lithography process.

Fig. 5. SEM images of (a) Si/WSi₂(100 nm/200 nm) multilayer mask and (b) resulting resist pattern.

소그래피에서는 직진성 및 휘도가 우수한 방사광(synchrotron radiation)원의 도입이 필수적이다.

Figure 5는 Si/WSi₂(100 nm/200 nm) 다층박막 마스크 및 이를 이용하여 얻은 100 nm 급의 주기적 선형 패턴의 SEM 사진을 나타낸다. Fig. 5(a)에서 밝은 라인은 원자번호가 높은 WSi₂에 해당하고, 어두운 라인은 원자번호가 비교적 낮은 Si에 해당한다. 스퍼터링 법으로 증착한 다층박막을 polishing하여 제작한 마스크는 뛰어난 계면 조도(interface roughness)를 보인다. 따라서 이를 패터닝에 적용하는 경우 뛰어난 패턴 조도를 기대할 수 있다.

Si/WSi₂(100 nm/200 nm) 마스크와 고분해능·고감도의 ZEP520A-7 감광제(positive type)에 0.16 nm 파장의 광원을 노출시켜 패턴을 얻는 경우, 광원이 투과되는 Si 영역만이 100 nm 폭(width)으로 제거되어 선형 패턴의 폭(width)은 200 nm , 그리고 패턴 사이의 간격(space)은 100 nm 가 되

Fig. 6. Periodic hole pattern from two crossed Si/WSi₂(300 nm/300 nm) multilayer mask.

어야 한다. 그러나 예상과는 달리 폭은 100 nm, 그리고 간격은 200 nm로 나타났으며, 패턴의 모서리 조도(line edge roughness)는 현저하게 저하되어 나타났다 (Fig. 5(b)). 이러한 현상에 대한 원인으로 경 X-선 광원 흡수 후 감광제와 실리콘 기판에서 발생하는 광전자(photoelectron) 및 오제이 전자(auger electron)의 장범위 발산을 고려해볼 수 있다. 경 X-선 리소그래피에서 감광제 내의 화학결합은 X-선의 직접적인 흡수가 아닌 X-선 흡수 후 발산하는 광전자 및 오제이 전자에 의해 끊어진다. 따라서 감광제 내에서 이들 전자의 전파 범위는 패턴의 사이즈 및 조도를 결정짓게 된다. X-선 에너지와 그에 따른 패턴 품질 간의 상관관계를 밝히기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

두 개의 수직 다층박막이 서로 직교하도록 마스크를 제작하여 패터닝을 수행하면, 이차원적(2-D) 패턴을 얻는 것이 가능해진다. Fig. 6는 직교하는 두 개의 Si/WSi₂(300 nm/300 nm) 다층박막 마스크와 ZEP520A-7 감광제에 0.16 nm 파장의 광원을 노출시켜 얻은 주기적인 구멍 패턴이다.

경 X-선 나노 리소그래피에서의 Talbot Effect

Talbot effect는 near field diffraction effect의 일종으로, light 및 atom optics에서 관찰된다.^[8] 평면파 광원이 grating과 같은 periodic structure를 투과하면, resulting wave field는 periodic structure를 Talbot distance라 정의되는 특정 거리에서 주기적으로 반복시키며 진행한다. 이에 더불어 Talbot distance의 1/4 및 3/4이 되는 위치에서는 원래 주기의 반이 되는 structure가 형성된다. 지금까지 경 X-선 영역에서 Talbot effect가 나노 리소그래피에 적용된 사례는 보고된 바가 없다. Talbot effect를 리소그래피에 적용시킬 경우, 회절 문제로 수십 μm 이내로 유지해야 하는 마스크와 감광제 간의 거리를 적게는 수백 μm 에서 많게는 수 mm까지 늘릴 수 있게 되어 공정을 보다 안정적으로 수행할 수 있게 된다. 아울러 감광제를 Talbot distance의 1/4 혹은 3/4 위

Fig. 7. Simulated x-ray wave field profile through a Si/WSi₂(100 nm/200 nm) multilayer mask.

치에 놓을 경우, 마스크 주기의 반이 되는 패턴을 얻는 것이 가능해져 포토리소그래피에서의 projection과 유사한 효과를 얻을 수 있게 된다.

Figure 7은 15 μm 두께의 Si/WSi₂(100 nm/200 nm) 마스크에 파장이 0.16 nm인 광원을 입사시켰을 때 마스크 출구(exit)로부터의 wave field 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 이때 Talbot distance(L_T)는 1089 μm 로 나타났으며, 마스크 출구($z=0$)에서의 wave field는 Talbot distance에서 일치했다.

앞서 얻은 시뮬레이션 결과를 토대로 마스크와 감광제 기판 사이의 거리를 바꿔가며 실제적인 노출 실험을 수행하였다. 그 결과, Fig. 5에서 얻었던 것과 동일한 패턴을 Talbot distance(L_T)에서 얻을 수 있었다. (Fig. 8) 그리고 패턴은 마스크와 감광제 기판 사이의 거리를 감소시킴에 따라(‘-’ 방향으로 이동함에 따라) 완전히 사라졌다가 -300 μm 되는 위치에서 희미하게 다시 나타났는데, 이는 시뮬레이션 결과에서 보듯이 해당위치에서 미약한 contrast가 나타났기 때문이다. 이 위치는 3/4 L_T 근처로, 본래 마스크 주기의 반에 해당하는 주기(150 nm)를 갖는 패턴이 형성되어야 한다. 하지만 시뮬레이션 결과에 보듯이 마스크 본래 주기 사이에 형성되는 contrast가 패터닝 되기에 충분하지 않아 결과적으로 300 nm 주기의, 저하된 품질의 패턴이 얻어졌다. 그리고 이러한 경향은 마스크와 감광제 기판 사이의 거리를 증가시켰을 때(‘+’ 방향으로 이동할 때)에도 유사하게 나타났다. 이렇게

REFERENCES

- [8] H. F. Talbot, Philos. Mag. **9**, 401 (1836).

Fig. 8. Series of SEM images on the x-ray wave field recorded on PR before and after the Talbot distance.

$3/4 L_T$ 근처에서 contrast가 명확하게 형성되지 않는 것은, 경 X-선 광원이 좁고 긴 터널(나노 스케일의 폭과 마이크로 스케일의 두께를 갖는 다층박막 마스크)을 통과하는데 기인한다. 이 경우 마스크를 통과하고 난 후의 wave field profile은 마스크의 주기가 동일하더라도 마스크의 두께에 따라 상이하게 나타난다. 따라서 $1/4$ 이나 $3/4 L_T$ 와 같이 주기가 반으로 되는 위치에서 명확한 contrast를 얻기 위해서는 마스크 두께를 최적화시키는 것이 필요하다.

경 X-선 나노 리소그래피의 당면 과제

수직 다층박막을 마스크로 도입하여 경 X-선 광원으로는 한계로 여겨졌던 100 nm급의 패턴을 얻는데 성공하였지만, 현재 경 X-선 나노 리소그래피 기술은 많은 당면 과제를 안고 있다.

가장 선행적으로 수행되어야 할 연구는 경 X-선 광원노출시 발생하는 전자들이 감광제에 미치는 영향을 명확히 규명하는 것이다. Si/WSi₂(100 nm/200 nm) 마스크를 이용하여 얻은 100 nm급의 패턴에서는 라인의 폭과 간격 비율이 마스크의 것과는 정 반대로 나타났으며, 라인 표면은 부풀어 올라 패턴의 품질을 심각하게 저하시켰다. 따라서 이러한 현상의 원인으로 인지되고 있는 광전자 및 오제이 전자가 감광제의 화학구조 변화에 영향을 미치는 범위를 실험적으로 측정하고, 이들이 패턴의 품질에 미치는 부정적인 영향을 최소화하기 위한 방안을 강구하는 것이 요구된다.

X-선 광원이 감광제에 미치는 영향을 평가하는 동시에 수

반되어야 할 것은, 경 X-선 광원에 특화된 감광제를 개발하는 것이다. 현재 Deep X-선 리소그래피 및 경 X-선 나노 리소그래피에 사용되고 있는 PMMA, SU-8, 그리고 ZEP520A-7과 같은 감광제는 본래 UV 및 e-beam lithography를 목적으로 개발된 것으로서, 감광제의 민감도나 콘트라스트 측면에서 경 X-선에는 적합하지 않다고 할 수 있다. 따라서 경 X-선 영역에서 높은 민감도와 콘트라스트를 나타내어 광원 노출시 전자의 산란에 의해 발생하는 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 감광제의 개발이 필요하다.

수직 다층박막을 마스크로 이용하여 패턴링을 수행하는 경우, 얻을 수 있는 패턴의 형상은 주기적인 선형 또는 구형으로 제한된다. 이러한 주기적 구조물은 photonic crystal 또는 X-선을 위한 optics에 유용하게 활용될 수 있다. 그럼에도 불구하고 한 번에 패턴링 가능한 면적이 제한적이라는 것과 임의의 패턴을 제작하는 것이 불가능하다는 점은 경 X-선 나노 리소그래피의 응용을 크게 저해하는 요소로 작용한다. 이에 대한 해결책으로써 X-선의 전반사(total external reflection)를 이용하는 패턴링 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 경 X-선은 굴절률이 1에 근사한다. 또한 그 값이 1보다 작아 물질에 대한 전반사 각도는 1° 이하로 매우 작으며 가시광선과 달리 빛이 소한 물질에서 밀한 물질로 입사할 때 전반사가 일어나게 된다. 이에 더하여 전반사 각도는 밀도의 함수이고 전반사 각도 이후의 반사율은 $\sim \theta^{-4}$ 함수로 감소한다. 따라서 기관 위에 기관과 상이한 밀도를 갖는 물질을 요구되어지는 패턴의 형상에 맞추어 부분적으로 증착 후, 입사각을 그 둘의 전반사 각도 사이에 놓고 X-ray를 입사시키면 반사율에 따른 contrast를 얻을 수 있다.

나오는 글

경 X-선 광원은 광원 자체가 가지는 특성으로 인해 이론적으로 10 nm 이하의 분해능을 제공하는 한편, 공정을 공기 중에서 고분자 오염물에 구애받지 않고 수행할 수 있는 편의성을 제공한다. 이러한 핵심적인 장점에도 불구하고 앞서 언급한 당면 과제들은 경 X-선 나노 리소그래피의 응용에 많은 제한을 가하고 있다. 향후 이를 극복하기 위한 연구들이 성공적으로 완료되는 시점에는 궁극적으로 20 nm급의 패턴링이 가능해져, 경 X-선 나노 리소그래피 기술은 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 응용될 것으로 기대된다.