

준 3 차원 나노급 형상가공을 위한 전자빔의 전압별 노광 특성 E-beam Lithography Characteristics with Acceleration Voltage for Quasi-3D Nano-machining

*#김재구¹, 오승훈², 조성학¹, 정명영², 최두선¹

*#J. G. Kim(gugu99@kimm.re.kr)¹, S. H. Oh², S. H. Cho¹, M. Y. Jeong², D. S. Choi¹
¹ 한국기계연구원 나노기계연구본부, ² 부산대학교 나노시스템공정학과

Key words : E-beam lithography, Nano-machining process, Quasi-3D mold

1. 서론

전자빔을 응용하여 나노급의 형상을 제작하는 공정은 매우 활발히 진행되고 있다. 전자빔 가공기술은 1960 년대 전후로 개발된 전자주사현미경을 기반으로 하며, 전자에 에너지를 이용하여 나노크기의 패턴을 제작하는 기술로 전자총에서 방출된 운동에너지를 가진 전자를 집속하고 정밀하게 편향시켜 스캔하는 방식으로 대상물 주로 레지스트를 가공(노광)한다.¹⁾ 이후의 공정은 일반 반도체 공정과 같이 레지스트를 현상하고 습식 또는 건식 방식에 의해 기판을 에칭하거나, 현상된 레지스트 자체를 마스터로 하여 복제하는 방법을 이용한다. 이 전자빔 가공방식은 나노크기의 집속 빔을 원하는 패턴에 따라 하나씩 조사하게 되므로 넓은 면적을 패터닝 하기에는 많은 시간이 소요되므로 공정 시간에 덜 구애 받는 반도체 제조용 마스크제작, MEMS 소자 제작, 나노형상의 스탬프 제작 등 주로 2 차원적인 형상 제작에 많이 활용된다.

한편, 단일 전자빔이 가진 낮은 효율의 생산성을 극복하고자 최근 들어 소형 저전압 컬럼을 다중으로 적용하여 생산성을 향상시키려 하는 연구가 활발해지고 있다.^{2,3)} 이에 따라 본 연구는 저전압에서의 노광 특성을 살펴보고 이를 이용하여 준 3 차원의 나노급 형상을 제작하기 위한 실험과 분석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

전압별 가공 특성을 살펴보기 위한 전자빔 장치로는 Raith 사의 50FE 모델을 사용하였다. 이 장치는 전자빔 에너지 및 전류 범위가 200 eV ~ 30 keV 및 5 pA - 5 nA 이고 최소 0.5 μm 에서 최대 800 μm 까지 16 bit 분해능으로 패터닝이 가능하다. 실험에 사용된 시편은 패터닝된 시편이 금형으로 사용될 수 있는 가능성 및 UV 경화를 고려하고 또한 SAM(self assembled-monolayer) 공정을 위해 용융실리카 위에 금을 스퍼터링 방식으로 증착한 시편을 사용하였으며 접착층으로 크롬을 사용하였다. 각 재료의 두께는 용융실리카 1 mm, 크롬 박막층 30 nm, 금 박막층 500 nm 이다.

레지스트는 사용하는 응용에 따라 여러 가지 종류가 있지만 본 연구에서는 전자빔 노광에 일반적으로 많이 사용되는 6% 495K PMMA in Anisol (MicroChem 사)을 사용하였다. 레지스트 코팅 두께는 가속전압에 따른 특성으로 인해 600 nm 및 250 nm 로 하여 실험을 수행하였다. 도포된 레지스트의 경화를 위해 hot-plate 에 시편을 놓고 약 200 도에서 10 분 정도 경화를 시킨 다음 전자빔 노광을 수행하였다. 노광 방법으로는 Line Dose 및 Area Dose 방식으로 패터닝하였다. Line Dose 의 경우 피치간격을 500 nm, Line Step Size 를 3.2 nm 로 하였으며, Area Dose 인 경우 선폭을 300 nm, Area Step Size 를 6.4 nm 로 하고, 길이는 5 μm 로 디자인하여 수행 하였다. 노광된 시편은 현상을 위해 사용된 현상액으로는 MIBK(Methyl isobutyl ketone):IPA(Isophthalic Acid) =3:1 로 혼합된 용액에 약 45 초간 담그고, 꺼낸 후 IPA 로 세정을 하였다.

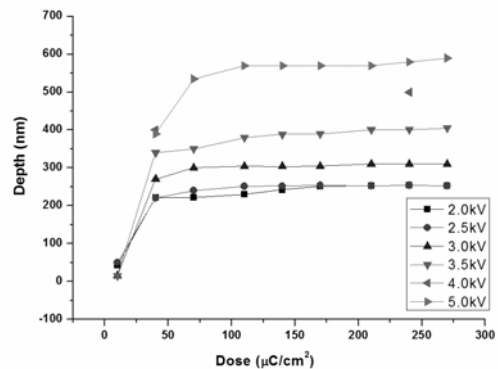
현상된 시편은 SEM 및 AFM(PSIA, XE-150)으로 반경이 10 nm 이하인 팁을 사용하여 폭 및 깊이 측정을 수행하

였다.

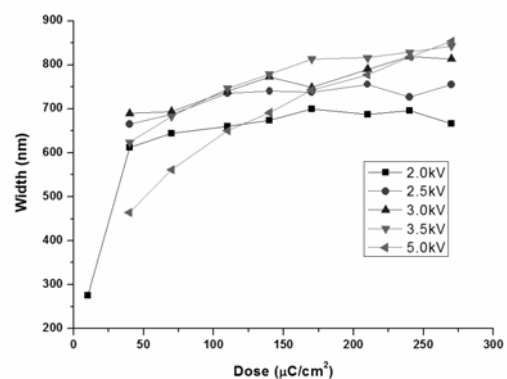
3. 실험결과 및 고찰

저전압에서의 노광 특성을 살펴보기 위해 가속 전압 1 kV 에서 5 kV 까지 레지스트 두께 600 nm 에 대해 Area Dose 에 의한 실험을 수행하였다. 2 kV 미만의 경우는 노광이 원활히 이루어지지 않아 데이터를 얻기가 어려웠으며, 1 kV 의 경우 레지스트 두께를 달리하여 패터닝을 수행하였다.

AFM 의 측정 결과에 의한 노광 선폭 및 깊이에 대한 결과를 그래프로 표현하면 다음 Fig. 1 과 같다.



(a)



(b)

Fig. 1 Characteristics of developed-depth (a) and width (b) versus the dose under 5 kV accelerating voltage.

그래프에서 알 수 있듯이 가속전압에 따라 또 도즈량에 따라 노광된 선폭 및 깊이의 경향을 파악할 수 있다. 즉 깊이의 경우 가속전압이 커질수록 노광 깊이가 커지지만 어느 일정 도즈량을 넘은 경우 깊이의 증가는 더 이상 커지지 않았다. 또한 같은 에너지가 입사된다 하더라도 깊이에 대한 영향은 가속전압의 크기에 따라 결정되었다. 이는 전압에 의한 가속된 전자가 입자라고 생각하고 이를 파장으로 변환하면 $1.23/V^{0.5} = \lambda(\text{nm})$ 로 계산되는 짧은 파장을 가

진 파동으로 변환된다. 짧은 파장일수록 회절한계가 작아져 레지스트로의 집속이 작아졌다고 볼 수 있으며 전자의 운동에너지가 커져 전자빔들의 에너지가 폭보다는 깊이 방향으로 진행하면서 사용되었다고 볼 수 있다. 선폭의 경우 도즈량에 따른 선폭의 영향은 가속전압이 3.5 kV 이하에서는 노광 깊이와 같이 어느 일정 도즈량을 넘어서면 약간의 증가를 가져오고, 가속전압의 증가에 따라 약간 증가하지만, 5 kV의 경우의 선폭은 $110 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이하의 낮은 영역의 도즈량에서는 2 kV 보다도 작고 도즈량이 커질수록 증가폭도 커진다. 이는 레지스트의 원자와 전자빔과의 충돌이 많아 폭 방향으로 산란의 영향이 커져서 나타난 영향이라고 생각 할 수 있다.

이러한 값을 10 kV의 높은 가속전압의 경우와 비교하면 Fig. 2와 같다. 5 kV 이하의 저전압의 경우는 적은 도즈량에서 노광 깊이의 한계 값에 도달하여 깊이의 증가가 없었으나 높은 가속전압에서는 도즈량이 증가 증가할수록 지속적인 깊이의 증가를 보였다. 선폭은 5 kV의 가속전압과 유사한 양상을 보여 가속전압 및 도즈량이 선폭과 깊이를 결정하는 주요한 인자임을 알 수 있다. 특히 선폭의 변화가 크기 않으면서 가공 깊이를 결정하기엔 낮은 가속전압에서 전압을 달리하면서 $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이상의 일정한 도즈량으로 공정하는 것이 유리함을 확인할 수 있었다.

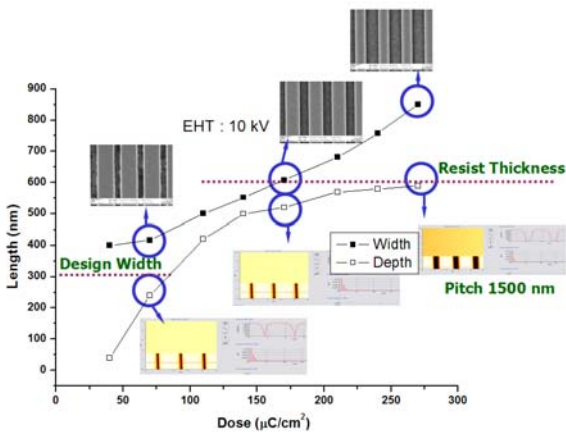


Fig. 2 Characteristics of developed-depth and width versus the dose at 10 kV accelerating voltage.

소형 저전압의 경우 가속전압 범위가 1 kV 근방이므로 가속 전압을 1 kV로 설정하여 도즈량에 따라 깊이 특성을 비교하였다. 이 가속전압에서 레지스트 두께가 600 nm의 경우에는 노광이 원활하지 않았으므로 제시된 레지스트 도포 공정조건의 최대값인 RPM으로 도포하여 250 nm로 하였다. 이와 함께 서로 직각인 방향으로 디자인하여 중첩이 이루어지는 부분에서의 깊이 변화를 관찰하였다. 이에 대한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 레지스트 두께 600 nm의 경우와는 달리 도즈량이 증가할수록 깊이가 증가하였으며 같은 도즈량으로 중첩된 부분의 깊이도 도즈량이 커질수록 증가하였다. 중첩된 부분의 깊이는 중첩되지 않은 부분의 깊이에 비해 10~20%의 비율을 보였고 도즈량 증가에 따른 증가비율은 0.046이었다. 이는 전자빔에 의해 레지스트의 분자들이 결합을 이루고 나서 다음에 오는 전자빔에 의해 노광 할 때는 전자빔의 침투 깊이가 결합을 끝낸 분자들에 의해 제한을 받아 폴리머의 분자결합을 유도해내기 어려워서 나타난 결과라고 풀이된다.

Fig. 4 (a)는 단일 노광 된 부분과 중첩 노광 된 부분의 사진이며 (b)는 500 nm 주기를 형상을 측정된 사진이다. 이러한 특성들을 적절히 이용하면 깊이가 다른 나노급의 형상을 제작할 수 있으리라 생각된다.

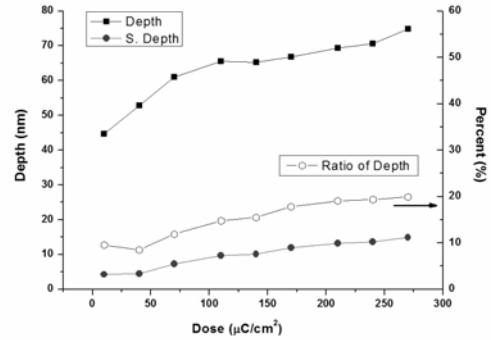


Fig. 3 Characteristics of developed-depth for single-dosed area and superposition-dosed area and its ratio versus the dose at 1 kV accelerating voltage.

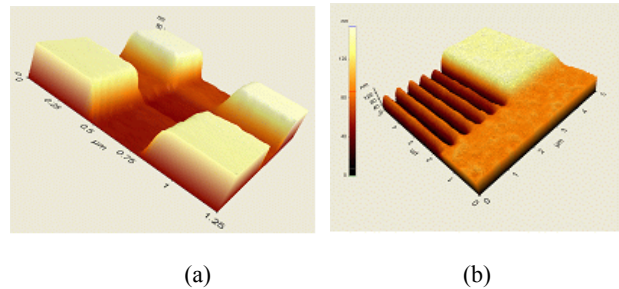


Fig. 4 AFM images of cross pattern (a) using area dose method at $170 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ and grating pattern (b) using line dose method at $7000 \text{ pC}/\text{cm}$.

4. 결론

준 3 차원 나노급 형상 제작을 위해 전자빔을 이용하여 가속전압 별 노광 특성을 분석하였다. 가속전압 및 도즈량에 따라 선폭 및 깊이의 변화가 나타났으며, 레지스트 두께에 따른 영향도 관찰되었다. 5 kV 이하의 낮은 가속전압 영역의 경우 노광 깊이는 어느 일정도즈량을 넘어서게 되면 증가폭 변화가 거의 없었으며, 선폭은 3.5 kV까지 도즈량이 증가하더라도 그 변화 폭은 크지 않았다. 선폭의 변화가 크기 않으면서 가공 깊이를 결정하기엔 낮은 가속전압에서 전압을 달리하면서 $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이상의 일정한 도즈량으로 공정하는 것이 유리함을 확인할 수 있었다.

1 kV의 낮은 가속 전압의 경우 레지스트 두께가 얇아야 노광이 원활하게 이루어지며, 실험조건 내에서 중첩되어 노광 된 부분은 원래의 노광 깊이에 비해 도즈량에 따라 10~20% 비율로 노광 되었으며 도즈량에 따른 증가비율은 약 0.046으로 분석되었다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Suzuki, K. and Smith, B. W., “Microlithography : Science and technplogy,” 2nd Ed., CRC press, 329-359, 2007.
2. Kim, H. S., Kim, Y. C., Kim, D. W., Ahn, S. J., Jang, Y., Kim, H. W., Seong, D. J., Park, K. W., Park, S. S. And Kim, B. J., “Low energy electron beam microcolumn lithography,” Microelectronic Engineering, **83**, 962-967, 2006.
3. Spallas, J. P., Silver, C. S., Muray, L. P., Wells, T. and El-Gomati, M., “A manufacturable miniature electron beam column,” Microelectronic Engineering, **83**, 984-989, 2006.