

저전압 가속 전자빔 응용 노광 특성 E-beam Lithography Characteristics with Low Acceleration Voltage

*#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 : Low acceleration voltage, E-beam lithography, Nano-machining process

1. 서론

전자빔의 응용은 반도체산업의 전자회로 패턴을 나노급으로 구현하기 위한 기술로 진보하면서 동시에 나노크기 센서 또는 미세구조체를 제작하는 응용으로 발전하고 있다.

전자빔 가공방식은 나노크기의 집속 빔을 원하는 패턴에 따라 하나씩 조사하는 방법이므로 단일 전자빔으로 대면적의 패턴을 형성하기에는 생산속도 측면에서 많은 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 프로젝션 방식 또는 병렬 형태의 전자빔을 조사하여 패턴을 형성하고자 하는 방법이 시도되고 있다. 그 중에서 병렬형태 방식은 초소형 칼럼을 대량으로 배치하여 동시에 리소그래피할 수 있도록 설계된 것이며, 이 때 사용되는 초소형 칼럼은 1~2 kV의 낮은 가속 전압하에서 동작된다. 또한 낮은 가속전압을 사용할 경우 10 kV 이상의 고전압을 사용할 경우보다 공간전하, 전자-전자 스캐터링 문제를 적게 할 수 있으며, 근접효과 및 기관의 손상에 유리한 측면이 있다.^{1,2}

가속된 전자빔이 재료에 입사하게 되면 전자빔과 재료 내 원자 및 주변 전자들간의 전자기적 힘이 상호 작용을 하며 반응을 하게 된다. 상호작용은 입사 전자빔의 탄성산란, 비탄성 산란을 통해 에너지를 잃는 과정을 거치며, 상호작용을 통해 나타나는 결과로는 이차전자, 후방산란전자, X선 등이 있다. 탄성 산란은 입사에너지의 변화가 거의 없이 전자빔의 운동방향을 바꾸는 것이며 산란각이 크다. 비탄성 산란은 탄성산란에 비해 산란각의 변화가 작고 연속적인 충돌로 에너지를 잃어버려 재료와의 상호 부피를 좌우한다. 에너지 손실은 Bethe 방정식을 기본으로 하여 해석하며 자유전자 여기, 핵심부 전자 여기 및 플라스몬 손실로 구성된다.³

같은 재료상에서 가속된 전자의 에너지의 크고 작음에 따른 영향은 탄성산란의 경우 산란각이 가속 전자에너지의 제곱에 역 비례하므로 에너지가 클수록 산란각이 작아 침투가 크다. 또한, 비탄성 산란 영향에 의한 전자의 이동 거리에 따른 에너지 손실은 전자에너지에 역 비례하므로 에너지 손실이 감소하여 더욱 깊이 침투한다고 볼 수 있다. 따라서, 가속전자 에너지가 크면 침투 깊이가 커져 박막 표면에서의 산란이 에너지가 작은 것에 비해 상대적으로 적어 선폭을 줄일 수 있지만 기관에서의 후방산란, 근접효과 등에 의해 최종 선폭이 결정된다. 저전압 가속 전자빔에 의한 노광은 이러한 현상을 최소화 하면서 선폭을 줄이는 공정조건을 찾는 것이 중요하다고 할 수 있다.

본 논문은 5 kV 이하의 저전압 가속 전자빔을 이용하여 레지스트를 노광하고 전압별 크기 변화와 현상을 분석하여 저전압에서의 노광 특성을 살펴보고자 하였다.

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 패턴닝이 가능하다. 실험에 사용된 시편은 패턴닝된 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 사용하였고, 코팅 두께는 400 nm 로 하여 실험을 수행하였다. 도포된 레지스트의 경화를 위해 hot-plate 에 시편을 놓고 약 200 도에서 5 분 정도 경화를 시킨 다음 Line Dose 및 Area Dose 노광 방식으로 패턴닝 하였다. Line Dose 의 경우 피치간격을 500 nm, Line Step Size 를 3.2 nm 로 하였으며, Area Dose 인 경우 50 x 50 nm², 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 으로 크기를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

노광의 기준은 도즈량으로 표현할 수 있다. 도즈량은 전하량으로 표현되며 점, 선, 면적에 따라 단위를 결정한다. 재료에 입사되는 전하량은 가속전압 및 개구 크기에 따라 생성되는 전류와 이 전류로 어느 정도 오래 지속되느냐에 따라 결정된다. 또한, 가속전압도 중요한 변수이며, 전하량과 가속전압과의 곱이 에너지로 표현되어 같은 도즈량에 전압을 달리하여 준 3 차원의 형상을 만들기도 한다.⁴ 실험은 면적 도즈와 라인 도즈로 하였으며 각각의 도즈량 및 전압에 따른 특성을 분석하였다.

Fig. 1 은 낮은 가속전압 영역에서 개구 크기에 따른 전류의 변화를 살펴보았다.

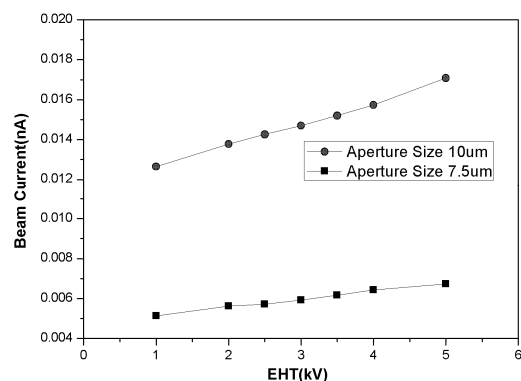


Fig. 1 Beam current as a function of acceleration voltage for 7.5 μm and 10 μm aperture size.

그림에서 보는 바와 같이 개구 크기에 따라 가속전압과 전류의 변화는 7.5 μm 의 경우 4.06×10^{-4} , 10 μm 의 경우 10.7×10^{-4} 의 기울기 변화를 보여 개구 크기가 큰 경우가 전류의 증가율이 컸다. 또한, 면적이 1.78 배 증가했을 경우 전류는 각 가속전압에 관계없이 약 2.5 배 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 변화는 전자빔의 공간 분포가 균일

하지 않고 가우시안 분포와 같은 형상을 갖기 때문에 생각된다.

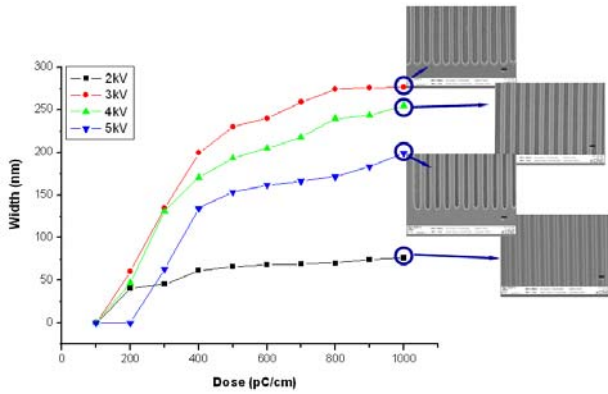


Fig. 2 Line width versus line dose for different accelerating voltages.

Fig. 2는 2 kV ~ 5 kV의 가속전압영역에서 라인 도즈에 의한 실험 결과이다. 2 kV의 경우 도즈가 증가하더라도 선폭의 증가는 크지 않고 약 50 nm 정도의 일정한 선폭을 보인다. 하지만 3 kV의 경우는 2 kV에 비해 매우 큰 선폭을 보이며 가속전압이 커질수록 도즈량에 따른 선폭은 감소해 보인다. 일반적으로 가속 전압이 크면 선폭이 작아짐을 앞서 설명하였듯이 직관적으로 알 수 있지만 2 kV의 적은 가속전압의 경우는 박막 표면에서의 산란만을 야기시켜 선폭이 작아지는 것으로 생각할 수 있다. 2 kV의 현상사진을 보면 노광된 라인의 가장자리의 모습이 다른 가속전압에서 노광된 깨끗한 이미지의 것과 다르다는 것을 볼 수 있는데 이 때가 전자빔에 의한 노광의 정도가 분자간의 사슬을 분해하는 정도의 임계에너지라 생각된다.

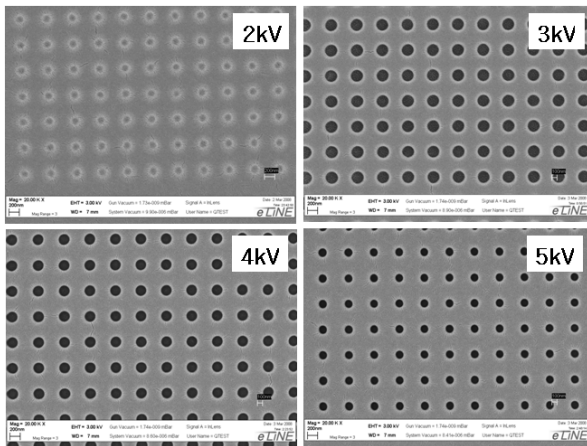


Fig. 3 SEM images of developed pattern at different accelerating voltages. The designed pattern is square.

Fig. 3은 50 nm 사각형 디자인 형상에 대해 면적 도즈량 500 μC/cm², 가속전압이 2 kV ~ 5 kV으로 노광하고 현상한 주사전자현미경 사진이다. 라인도즈와 마찬가지로 가속전압이 3 kV 이상부터는 전압이 커질수록 직경이 감소하지만 2 kV에서는 3 kV보다 직경이 크지 않고 작아짐을 보이며 또한 가장자리 모습도 라인도즈의 2 kV와 같은 양상을 보인다. 또한 사각형 형상을 디자인 했지만 원형의 모양으로 패터닝 된 것은 근접효과의 영향으로 볼 수 있다. 즉, 각 모서리의 위치에서는 그 주변에 비해 산란에 의한 전자빔의 총에너지가 적어져 사슬이 끊어지지 못함으로 나타난 결과이다.

Fig. 4는 1000 μC/cm²까지 각 도즈량에 대한 가속전압에 따른 선폭의 변화를 보였다. 도즈량이 증가할수록 선폭의 변화 양상은 뚜렷하다.

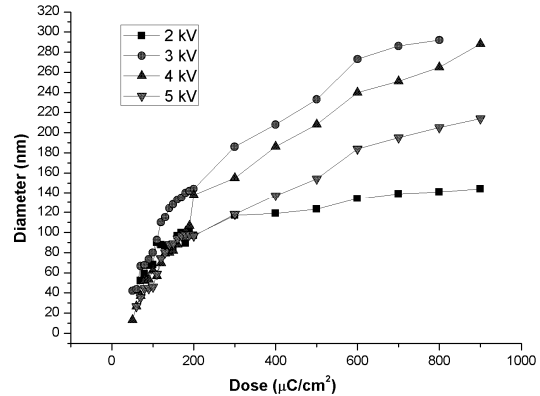


Fig. 4 Diameter versus area dose for different accelerating voltages.

이상의 결과로 볼 때 400 nm 두께의 레지스트에 대한 전자빔의 침투에 따른 선폭은 3 kV에서 선폭이 가장 크고 전압이 높아질수록 침투깊이가 커지며 표면에서의 산란이 적어 선폭은 작아진다. 그러나, 2 kV의 저전압의 경우 전자빔이 깊이 침투하지 못하고 표면에서만 산란이 일어나고 레지스트 분자간의 결합을 끊는 정도만이 현상되어 선폭을 줄일 수 있다. 이 경우 전자빔 에너지 구배가 크지 않아 레지스트 분자의 결합을 완전히 끊지 못한 부분이 넓게 형성되며 고전압과는 다르다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

전자빔에 의한 노광에 있어 높은 생산성을 확보하고자 병렬 형태의 저전압 가속 전자빔을 사용하는데, 이에 활용하기 위한 목적으로 저전압 가속 전자빔의 노광 특성을 400 nm 두께의 레지스트에 라인도즈와 면적 도즈의 실험을 통하여 분석하였다. 2 kV의 저전압에서는 전자빔이 레지스트 내부로 깊게 침투하지 못하고 표면에서의 산란을 유도하여 노광이 됨을 알 수 있었다. 3 kV 이상에서는 가속전압이 높을수록 침투가 깊어짐으로 해서 선폭 또는 직경이 작아짐을 알 수 있었다. 면적도즈의 경우는 근접효과에 의해 사각형의 디자인 형상이 원형으로 나타남을 알 수 있었다.

후기

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

참고문헌

- Kim, J. G., Lee, J. J., Cho, S. H., Choi, D. S., and Lee, E. S., “Nano-machining Technology Using Electron Beam,” J. of KSPE, **25**, 7-14, 2008.
- Suzuki, K. and Smith, B. W., “Microlithography : Science and Technology,” 2nd Ed., CRC press, 329-359, 2007.
- Kim, S. H., Ham, Y. M., Lee, W., and Chun, K., “New Approach of Monte Carlo Simulation for Low Energy Electron Beam Lithography,” ME, **41/42**, 179-182, 1998.
- Ishii, Y., and Taniguchi, J., “Fabrication of Three-dimensional Nanoimprint Mold Using Inorganic Resist in Low Accelerating Voltage Electron Beam Lithography,” ME, **84**, 912-915, 2007.