

# 노광량 변조를 이용한 3차원 나노 구조물 제작

## The Fabrication of 3D Nano-Structures using Dose Modulation

\*오승훈<sup>1</sup>, 김재구<sup>2</sup>, 장성환<sup>2</sup>, #정명영<sup>1</sup>

\*S. H. Oh<sup>1</sup>, J. G. Kim<sup>2</sup>, S.W. Chang<sup>2</sup>, M. Y. Jeong<sup>1</sup>(myjeong@pusan.ac.kr)

<sup>1</sup> 부산대학교 나노융합기술학과, <sup>2</sup> 한국기계연구원

Key words : Dose modulation, 3D structures, Electron beam lithography

### 1. 서론

다양한 형태의 3차원 구조물들이 MEMS 및 NEMS 소자, 광학 소자 그리고 바이오 소자를 위한 용도를 위해 최근 활발히 연구, 개발되고 있다.<sup>1,2</sup> 기존의 잘 알려진 3차원 구조물 제작방법은 UV 경화성 액상의 고분자 모노머를 층별로 응고시켜 제작하는 방법이 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 기술은 마이크로 미터 수준의 해상도를 가지며, 실리콘 기판위에 적용이 불가능하여 그 용도가 제한적인 문제점을 지니고 있다. 또한, 나노 스케일의 3D 구조물을 제작을 위해 전자빔 리소그래피의 가속전압의 차이를 이용한 제작, 연구방법이 진행되고 있다.<sup>3</sup>

본 논문은 전자빔의 가공에 있어 노광 파라미터인 가속전압, 개구수의 크기, 스텝크기를 달리하면서 노광량에 따른 노광패턴을 분석하였고, 이를 기초로 노광량 변조에 의한 나노스케일의 단차를 지닌 Mesa 형태의 구조물을 제작하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

노광량 변조에 의한 패턴 변화를 분석하기 위한 기판은 실리콘 기판을 사용하였다. 사용된 전자빔 레지스트는 495K PMMA A6(Micro Chem사)를 1000 rpm으로 스핀 코팅하여 핫 플레이트에서 5분간 경화시켜 약 600 nm의 두께로 하였다. 노광량 변조에 의한 패턴 특성을 알아보기 위한 전자빔 장치로는 Raith사의 50FE 모델을 사용하였다. 이 장치는 전자빔 에너지 및 전류 범위가 200 eV~30 keV 및 5 pA~5 nA이고, 최고 0.5 μm에서 최대 800 μm까지 16 bit분해능으로 패턴닝이 가능하다.

전자빔 리소그래피에 있어서 점자빔의 양으로 표현할 수 있는 노광량은 식 (1)에 의해 정의된다.

$$Dose = \frac{I_{probe} \times T_{dwell}}{SSZ^2} \quad (1)$$

여기서,  $I_{probe}$ 는 전자빔의 전류,  $T_{dwell}$ 는 전자빔의 노출시간, SSZ는 포커싱된 전자빔의 spot간의 거리를 의미하며, 전자빔의 전류는 가속전압과 개구수의 크기에 의해 결정되며, spot간의 거리에 의해 전자빔의 노출시간이 좌우된다.

따라서, 같은 노광량일지라도 가속전압 및 개구수의 크기와 스텝크기에 의해 노광된 패턴의 선폭 및 깊이가 달라지게 된다. 우리는 가속전압과 개구수의 크기 및 스텝 크기를 달리하면서 다양한 노광량 범위에서 노광을 수행하여 노광량에 따른 깊이 변화를 살펴보았으며, 나노 스케일의 단차를 지닌 3차원 구조물을 제작하기 위한 최적의 전자빔 노광 조건을 도출 하였다.

노광후 현상을 위해 MIBK(Methyl isobutyl ketone): IPA(Isophthalic Acid) = 3:1로 혼합된 용액에 약 45초간 담그고, 꺼낸 후 IPA로 15초간 세정을 하였다. 현상된 패턴의 선폭과 깊이변화는 FE-SEM 및 AFM을 통해 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 가속전압에 따른 패턴 분석

노광량 변조를 이용한 3차원 구조물을 용이하게 제작하기 위한 가속전압을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 가속전압은

5 kV와 10 kV로 설정하여 노광량을 40 μC/cm<sup>2</sup>에서 120 μC/cm<sup>2</sup>까지 10 μC/cm<sup>2</sup>씩 증가시키면서 노광을 수행하였다. 그리고, 개구수의 크기는 7.5 μm, 전자빔 레지스트와 대물렌즈간의 거리인 작업거리는 11.8 mm, 스텝크기는 8.0 nm로 설정하여 노광하였다. 노광을 위한 디자인 형상은 선폭이 500 nm이고 피치가 1 μm인 정사각형 구조물로 디자인하였다.

가속전압을 10 kV로 노광시 노광량에 따른 깊이의 증가비율이 Fig. 1와 같이 전영역의 노광량 부근에서 균일하게 나타났다. 그러나, 상대적으로 낮은 가속전압 5 kV 인가에 의한 전자빔의 노광에 있어서는 낮은 노광량에서도 깊게 노광되었으며, 60 μC/cm<sup>2</sup> 이상에서 코팅두께만큼 노광됨을 알 수 있었다. 이는 낮은 가속전압 인가시 빔 전류가 떨어지므로 인해 상대적으로 한 spot에 머무르는 시간이 길어지므로 침투깊이가 더 깊게 노광된 것으로 사료된다. 따라서, 노광량 변조에 의한 단차를 가지기 위해서는 상대적으로 높은 가속전압을 인가할 필요가 있음을 알 수가 있었다.

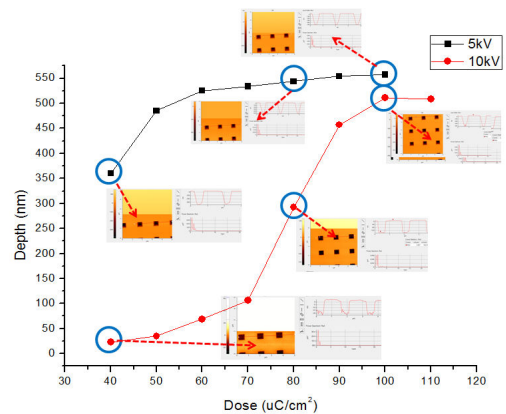


Fig. 1 Depth versus dose for different step size

#### 3.2. 개구수 및 스텝 크기에 따른 패턴 분석

노광량 변조에 의한 3차원 구조물 제작에 있어 개구수의 크기에 따른 노광된 패턴 변화를 알아보았다. 이를 위한 개구수의 크기는 7.5 μm와 20 μm으로 설정하였다. 사용된 가속전압은 10 kV이며, 적용된 노광량 범위는 30 μC/cm<sup>2</sup>에서 130 μC/cm<sup>2</sup>까지 노광을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

개구수의 크기가 20 μm에서의 전자빔 노광시 60 μC/cm<sup>2</sup>에서 깊이가 급속하게 증가하였다. 이는 개구수의 크기가 큰 20 μm의 경우, 많은 전자빔 에너지가 집중됨으로 인해 노광량에 따른 깊이 변화를 얻을 수 없었다. 이에 반해 개구수의 크기가 상대적으로 작은 7.5 μm에서는 한 spot에 머무르는 시간은 길지만, 작은 전자빔 에너지로 인해 노광량에 따른 깊이의 증가비율이 모든 노광량에서 상대적으로 균일하게 적용되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 단차를 지닌 3차원 구조물을 제작하기 위해서는 개구수의 크기를 작게 유지하는 것이 요구되었다.

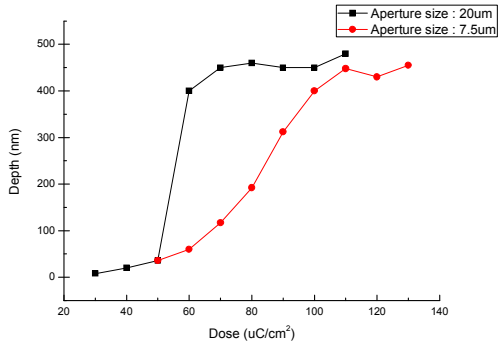


Fig. 2 Depth versus dose for different aperture size

Fig. 3은 스텝 크기를 3.2 nm, 6.4 nm 그리고 8.0 nm로 각각 설정하여 노광량 증가에 따른 패턴 변화를 분석한 그래프이다. 이를 위한 기본 실험 조건은 가속전압을 10 kV, 개구수의 크기를 7.5 um로 설정하였다. 노광량 증가시 스텝 크기에 의한 선폭의 영향은 크게 나타나지 않음을 알 수가 있었다.

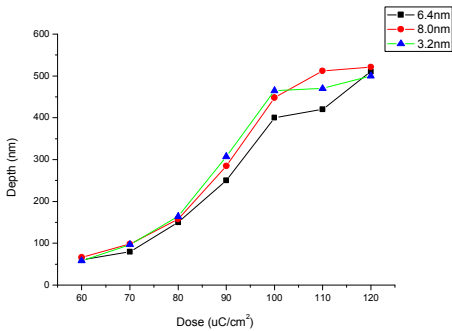


Fig. 3 Depth versus dose for different step size

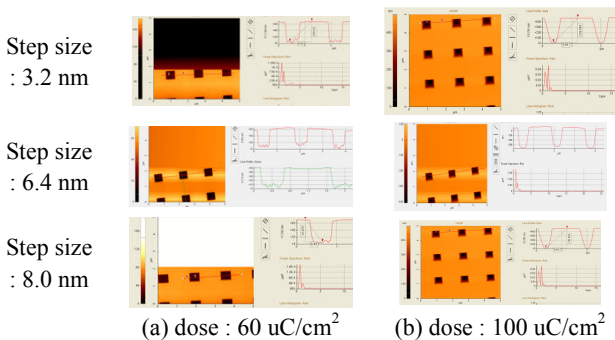


Fig. 4 AFM images of developed pattern at different step size.

### 3.3. 단차를 지닌 나노급 3D Mesa 구조물의 제작

가속전압, 개구수 크기, 스텝 크기에 따른 노광량과 노광 깊이의 변화에 대한 앞서의 실험을 기초로 하여 나노급의 3D Mesa 구조물을 제작하기 위한 최적의 전자빔 노광 조건을 도출하였다.

Fig. 5는 최적의 노광 조건인 가속전압이 10kV, 개구수의 크기가 10um, 스텝 크기가 9.6 nm일 때의 노광량 변조에 따른 깊이 변화를 나타낸 것으로, 노광량의 증가에 따라 거의 모든 영역에서 노광깊이의 증가비율이 균일하게 적용되었다.

우리는 이를 이용하여 400 nm × 400 nm의 사각형을 3개의 layer로 디자인하였고, 각각의 layer에 대한 노광량을 50 μC/cm², 60 μC/cm², 70 μC/cm²으로 설정하여 Fig. 6과 같은 나노급의 3D Mesa 구조물을 제작할 수 있었다.

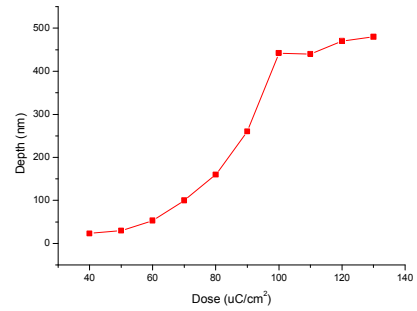


Fig. 5 Depth versus dose at the optimal e-beam exposure conditions

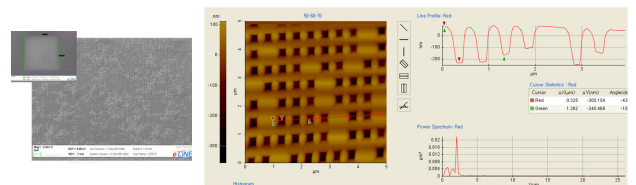


Fig. 6 The fabricated 4 level mesa structure; (a) SEM image, (b) AFM image

## 4. 결론

노광량 변조에 의한 나노스케일의 단차를 지닌 Mesa 형태의 구조물을 제작하기 위하여 전자빔의 가공에 있어 노광 파라미터인 가속전압, 개구수의 크기, 스텝크기를 달리하면서 노광량에 따른 노광패턴을 분석하였다.

노광량 변조에 의한 단차를 가지기 위해서 높은 전압인가를 통해 spot에 머무르는 시간을 짧게 하고, 집속된 전자빔의 에너지의 양을 낮추기 위해 개구수의 크기를 낮게 하는 것이 요구되었으며, 상대적으로 스텝 크기에 의한 깊이 변화는 크게 나타나지 않았다. 이러한 기초실험을 통해 우리는 노광량 변조에 의한 나노스케일의 4 레벨의 단차를 지니는 Mesa 형태의 구조물을 제작할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 지식경제부 차세대기술 개발사업 “고효율 에너지 빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. N. Morita, N. Kawasegi, and K. Ooi, "Three-dimensional fabrication on GaAs surfaces using electron-beam-induced carbon deposition followed by wet chemical etching," Nanotechnology 19, (2008) 155302.
2. J.Kim, D.C. Joy, and S.-Y. Lee, "Controlling resist thickness and etch depth for fabrication of 3D structures in electron-beam grayscale lithography" 1. Microelectron Eng. 84/12, (2007) 2859.
3. Yoshiaki Ishii and Jun Taniguchi, "Fabrication and resolution evaluation of three-dimensional nanoimprint mould using inorganic resist in low acceleration voltage electron beam lithography," MNE'6 Micro- and Nano- Engineering.