

나노스텐실 제작을 위한 집속이온빔 밀링 특성

Focused Ion Beam Milling for Nanostencil Lithography

김규만^{1,*}Gyu Man Kim^{1,*}

1 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.

✉ Corresponding author: gyuman.kim@knu.ac.kr, Tel: 053-950-7570

Manuscript received: 2010.10.29 / Accepted: 2010.11.25

A high-resolution shadow mask, a nanostencil, is widely used for high resolution lithography. This high-resolution shadowmask is often fabricated by a combination of MEMS processes and focused ion beam (FIB) milling. In this study, FIB milling on 500-nm-thin SiN membrane was tested and characterized. 500 nm thick and 2x2 mm large membranes were made on a silicon wafer by micro-fabrication processes of LPCVD, photolithography, ICP etching and bulk silicon etching. A subsequent FIB milling enabled local membrane thinning and aperture making into the thinned silicon nitride membrane. Due to the high resolution of the FIB milling process, nanoscale apertures down to 60 nm could be made into the membrane. The nanostencil could be used for nanoscale patterning by local deposition through the apertures.

Key Words: Shadow Mask (섀도우마스크), Nanostencil (나노스텐실), Focused Ion Beam (집속이온빔), Evaporation (기화 증착), Nanolithography (나노리소그라피)

1. 서론

나노리소그라피 기술은 나노기술의 기반을 제공하는 필수적이고 원천적인 기술이다. 자외선(UV), 전자빔(e-beam), 엑스레이(X-ray) 등을 이용하는 나노 패턴 기술은 이러한 원천기술을 가능하게 하고 또한 고집적화로 제작분야에서 한 단계 발전 할 수 있는 기반을 제공하였다. 특히 최근에 생명 공학의 중요성이 강조되고 기술 융합의 중요성이 강조되면서 고기능 유기(organic)층을 표면에 처리하는 경우가 급증하고 있고 미세 구조물 표면위에 기능성 패턴을 제작해야 할 필요가 늘고 있다.

섀도마스킹은 스텐실(stencil, 혹은 shadowmask)을 표면위에 놓고 원하는 물질을 증착하여 마이크로 패턴을 제작하는 방법이다. 스템실은 미리 정의된 패턴만이 개방되어 있고 그 나머지 부분은

막혀 있는 얇은 막으로서, 패턴 하고자 하는 표면 위에 스템실을 올려놓으면 개방부위만 표면이 노출되기 때문에 그 위로 물질을 증착시키면 스템실에 정의된 개방패턴이 그대로 표면위로 전사되어 패터닝이 가능하다.¹⁻³ 기존에 많이 사용되는 금속 스템실은 일렉트로포밍(electroforming), 에칭(etching), 레이저컷팅(laser cutting)등 다양한 방법으로 제작되고 있으나, 멤브레인 두께가 수십-수백 μm 로 두껍기 때문에 미세 패턴제작에 한계가 있다. 보다 미세한 패턴의 경우 멤스(MEMS) 공정을 이용한 실리콘계 스템실이 사용되고 있다. 스템실이 지니는 패턴크기에 따라 다양한 방법이 사용될 수 있는데, 일반 포토리소그래피(photolithography)를 사용하는 경우 수 μm 의 미세패터닝이 가능하다. 선 폭 1 μm 이하의 나노스케일의 극미세패턴의 경우 포토리소그래피의 적용이 어려우며, 전자빔 리소

그래피(e-beam lithography),⁴ 레이저간섭리소그래피(laser interface lithography),⁵ 집속이온빔밀링(focused ion beam milling)⁶ 등이 사용된다.

본 연구에서는 나노스텐실을 이용한 나노리소그래피특성 평가를 위하여 나노스텐실의 FIB 특성을 알아보았다. 우선 MEMS 공정을 이용하여 실리콘계 스텐실을 제작하고 집속이온빔 밀링(FIB milling) 테스트와 국부증착을 통한 나노리소그라피를 수행하였다. 그리고 이를 레이저빔 리소그라피와 전자빔 리소그라피로 제작된 패턴과 비교 분석하였다.

2. FIB 이용 나노스텐실 제작

MEMS 공정과 집속이온빔(FIB) 밀링을 이용하여 나노스텐실을 제작하였다. Fig. 1에 나노스텐실 제작공정의 개요를 나타내었다. 우선 실리콘 웨이퍼상에 500nm 두께의 질화실리콘막을 LPCVD로 생성하였다. 이 질화실리콘막은 최종 멤브레인이 되므로 스트레스를 최소화하기 위해 저 스트레스 공정을 사용하였다. 멤브레인에 개방형 패턴을 만들기 위해서는 웨이퍼 윗면에 포토리소그라피 공정으로 포토레지스트(PR, photoresist)에 패터닝을

한 후 ICP 에칭(inductively coupled plasma etching)으로 질화실리콘을 패터닝하였다. 질화실리콘막을 멤브레인으로 만들기 위하여 웨이퍼 아랫면에 동일한 공정 (photolithography, ICP etching)으로 멤브레인 원도우를 패터닝 하고, 마지막으로 KOH를 이용한 실리콘 에칭(bulk silicon etching)을 사용하여 정의된 멤브레인 원도우를 통하여 웨이퍼 내 실리콘을 제거하여 질화실리콘 멤브레인을 제작하였다.

MEMS 공정을 이용하여 제작된 스템실에 FIB를 이용하여 나노스케일의 관통형 패턴(aperture)을 가공하였다. 관통형 나노패턴(nanoaperture)의 가공에 앞서 500nm 두께의 SiN 멤브레인을 FIB을 이용하여 국부적으로 가공하여 멤브레인 두께를 50nm 두께로 줄인 후 나노패턴(nanoaperture)을 가공하였다. Fig. 2에 FIB을 이용한 관통형 나노패턴(nano-aperture)의 위치를 나타내는 전자현미경(SEM) 이미지를 나타내었다. 화살표로 지정된 위치에 관통형 나노패턴을 가공하였다. FIB 밀링은 우선 가공하고자 하는 범위의 원도우를 정하고 이온빔에 가하는 전압, 전류 등의 가공조건을 설정하면 설정된 범위에서 이온빔에 의한 가공이 진행된다. 가공 범위는 최소 10nm의 매우 작은 범위를 설정할 수 있기 때문에 고 해상도의 미세가공이 가능하다. 사용된 FIB 시스템은 듀얼빔(dual beam, ion/electron beam) 시스템으로서 시료를 이동하지 않고도 이온빔(ion beam)을 이용한 가공과 전자빔(electron beam)을 이용한 이미지 측정이 가능하다. 물론 ion beam을 이용하여 이미지를 측정할 수도 있으나 이 경우에는 이온에 의하여 매우작은 양이지만 물질이 가공되기 때문에 전자빔 측정이 가능한 듀얼빔 시스템이 최근에 많이 사용되고 있다.

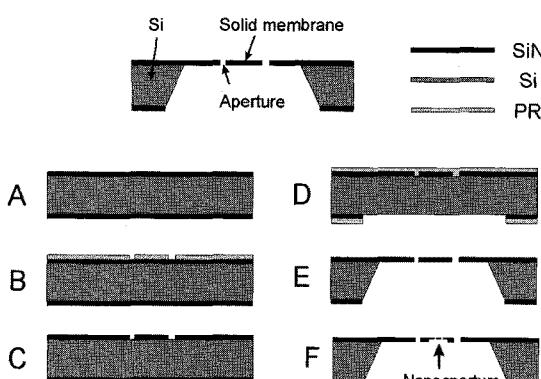


Fig. 1 Schematic overview of nanostencil fabrication process. (a) Deposition of 500-nm thick low stress SiN. (b) Photolithography of microscale pattern. (c) SiN etching of microscale pattern. (d) Photolithography and SiN etching on backside. (e) KOH etching of bulk Si from backside for 500-nm thick SiN membrane releasing. (f) FIB milling for local SiN membrane thinning into 50-nm thick, and then, nanoaperture fabrication

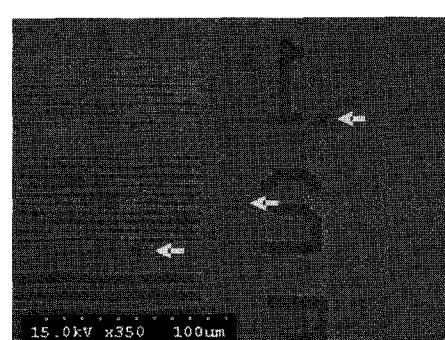


Fig. 2 SEM image of micromachined stencil. Arrows show the FIB milled nanopatterns

Fig. 3에 FIB을 이용하여 관통가공할 때 맴브레인의 형상변화를 나타내었다. 가공된 구멍의 크기는 $4\text{ }\mu\text{m} \times 4\text{ }\mu\text{m}$ 이고, 가공에 사용된 FIB 조건은 30kV, 0.3nA이다. FIB 밀링이 진행되면서 처음에는 맴브레인의 두께가 얇아지다가 중앙부부터 관통이 되고 코너부로 관통부가 진행됨을 보인다. 관통원도우 주위에 겹게 나타난 부위는 FIB 밀링 시 SiN 시료에 전도성을 주기 위하여 금(Au)막을 스퍼터링 하였는데, Au 막이 제거되었기 때문이다. FIB 밀링가공은 일반 리소그라피와의 비교을 위하여 일반리소그라피로 가공된 관통된 마이크로 패턴 근처에 가공하였다. Fig. 4를 보면 FIB 가공부분이 일반 포토리소그라피로 가공된 사각형 패턴보다 정확한 코너부 가공이 가능함을 확인할 수 있다. FIB 가공 시 사용된 전류조건에 따라 코너부 곡률반경이 달라지고, 작은 전류조건에서 보다 정밀한 가공이 가능하고 이에 따라 작은 코너부 형상을 제작할 수 있다.

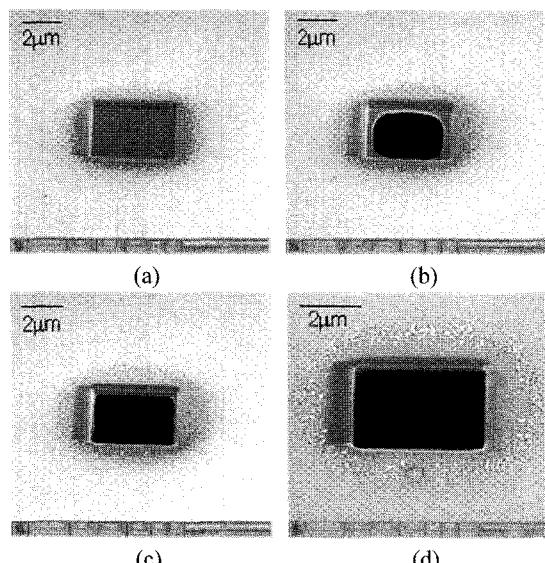


Fig. 3 Membrane thinning and drilling according to FIB milling time: (a) 20sec, (b) 40 sec, (c) 60 sec, (d) 80sec

Fig. 5에 FIB을 이용하여 가공된 nanoaperture들의 전자현미경 사진의 예를 나타내었다. 사각구멍의 크기는 $300\text{nm} \times 1000\text{ nm}$ 이고, 슬릿(slit)은 폭을 5nm, 10nm, 30, 50 nm로 달리하고 길이를 1000nm를 목표로 가공한 결과이다. 52° 기울여 찍은 이미지로부터 나노구멍의 막두께를 측정한 결과 막의 두께는 약 60nm로 측정되었다.

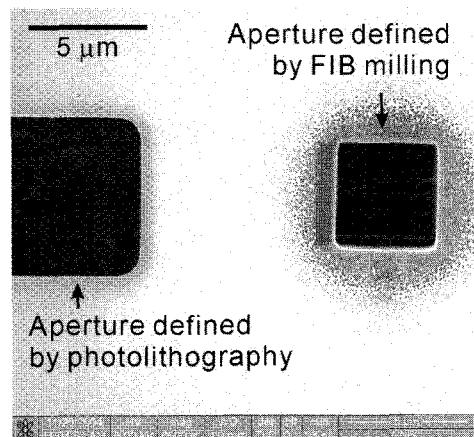


Fig. 4 Membrane holes made by photolithography (left) and FIB milling (right)

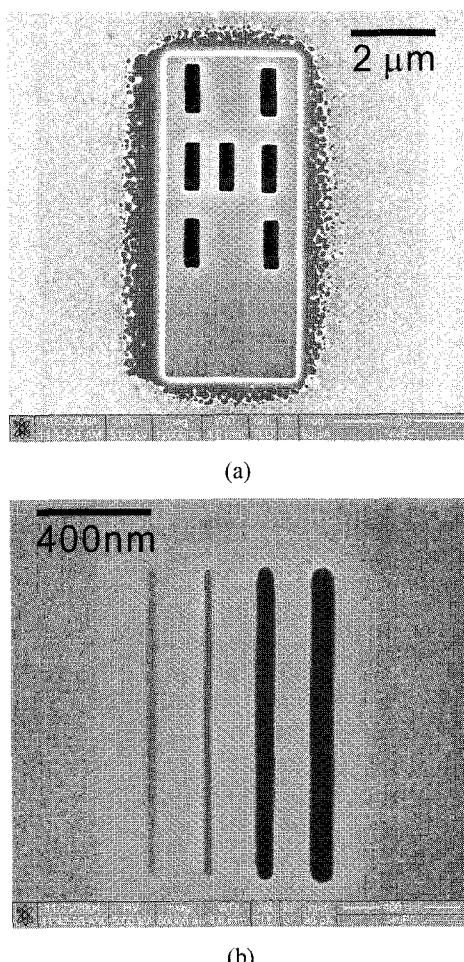


Fig. 5 SEM images of FIB milled test patterns. (a) $300\text{nm} \times 1000\text{ nm}$ squares, (b) 5nm, 10nm, 30, 50 nm slits

선폭을 달리한 (왼쪽부터 5, 10, 30, 50 nm 선폭) 슬릿의 경우 10 nm 이하에서는 관통여부 확인이 어려웠다. 관통여부는 가공된 스텐실을 이용하여 증착을 통한 패터닝 후에 가능하다. 선폭 측정결과 30, 50nm 경우 대략 60, 80nm로 측정되었는데, 이는 이온빔 직경 (14nm)에 의한 영향으로 판단된다.

3. 스템실 리소그라피 결과 및 비교

제작된 나노스텐실을 이용하여 색도증착을 이용한 나노패턴을 제작하였다. 전자빔 증착(e-beam evaporation)을 사용하여 50nm 두께의 알루미늄(Al) 막을 목표로 하여 유리모재에 증착하였다.

패턴은 FESEM 을 이용하여 관찰하였다. 모재인 유리가 비전도성 물질이기 때문에 SEM 측정시 차징(charging) 효과로 인하여 매우 깨끗한 이미지를 얻기에는 어려움이 있었다. Charging 효과를 줄이기 위하여 시료에 백금(Pt) 막을 스퍼터링으로 입혀서 전도성을 좋게 하여 다시 측정하였으나 실리콘 모재와 같은 전도성 모재위의 패턴처럼 깨끗한 이미지를 얻는 데에는 어려움이 있다.

Fig. 6 은 샤도우마스킹법을 이용하여 제작된 패턴과 레이저 빔을 이용한 포토리소그라피로 제작된 패턴의 코너부에서 발생하는 라운딩효과를 비교한 FESEM 사진이다. 직각패턴을 목표로 했을 때 실제패턴 코너부의 곡률반경을 통하여 가공정밀도를 비교하고자 하였다. Fig. 6 의 왼편에는 레이저 빔을 이용한 포토리소그라피로 제작된 패턴을, 오른편에는 FIB 으로 제작된 샤도우마스크로 제작된 패턴을 보이고 있으며, FIB 샤도우마스크로 제작된 패턴의 코너부에서 라운딩효과가 확연히 작음을 관찰할 수 있다.

기존의 포토리소그라피 방법에서는 크롬마스크용 포토레지스트(PR, photo-resist)노광에 사용되는 레이저빔의 스팟(spot) 크기가 약 0.8 μm 로 매우 크기 때문에 패턴의 코너부에서 라운드 지는 왜곡현상이 발생한다. 또한 PR의 현상, 메탈층의 에칭과정에서 코너부는 보다 풍부한 에칭용액(etchant)을 공급받기 때문에 라운딩 현상이 보다 커지게 된다. 반면 샤도우 마스킹 방법은 샤도우 마스크의 구멍패턴을 FIB 으로 제작하는 경우에는 이온빔의 스팟크기가 14nm로 매우 작고 에칭 공정이 없기 때문에 매우 정확한 코너부의 가공이 가능하다.

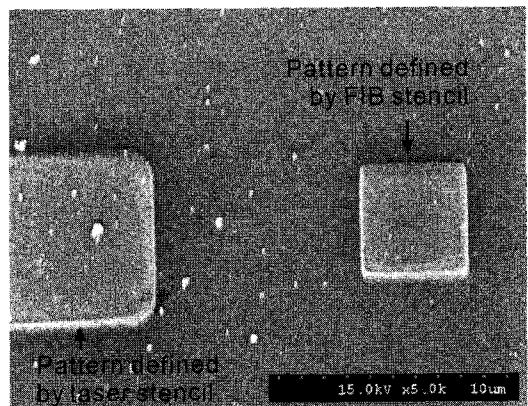
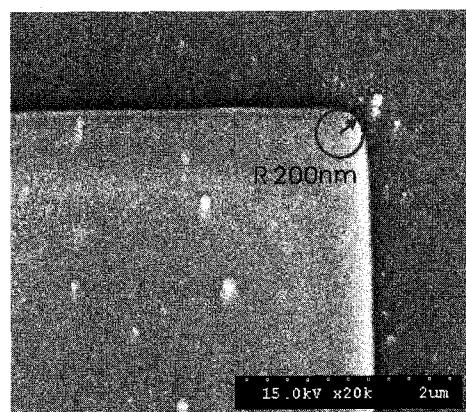
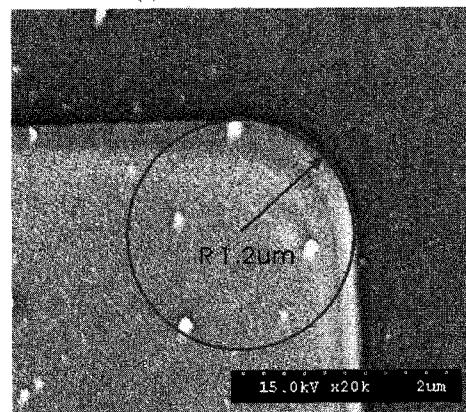


Fig. 6 Cr Mask patterns made by photolithography (on left) and FIB stencil method (on right)



(a) FIB stencil method



(b) laser exposed photolithography

Fig. 7 Radius of curvatures of patterns made by photolithography and FIB stencil method

Fig. 7 은 FESEM 이미지를 이용하여 측정된 코너부의 곡면반경을 비교한 그림이다. 사각(Square)

형상을 패턴한 결과 photolithography 경우 코너반경은 1.2um로 측정되었고, FIB stencil lithography 경우 코너반경은 200nm로 측정되었다. FIB에 사용된 가공조건은 30kV, 0.3nA로 고속, 저정밀도의 황삭가공에 해당되는 조건으로서 보다 작은 전류 조건을 사용하며 보다 작은 코너반경으로 가공이 가능하다. 이러한 상대적으로 저정밀도 조건의 FIB 가공 조건에서도 Photolithography 와 비교하여 FIB stencil lithography 가 6 배 이상 작은 코너부 반경을 보임을 확인할 수 있었다.

기존의 리소그라피 가공방법 중에서 sub- μm 패턴의 고정밀 가공을 위해서는 주로 e-beam lithography 를 사용한다. 본 연구에서 사용된 FIB shadowmasking 방법을 e-beam lithography 와 비교하였다. E-beam pattern 과 FIB shadowmasking 패턴의 FESEM 이미지로부터 패턴의 코너부 곡률반경을 측정하고 이를 비교하였다. Fig. 8에 그 결과를 나타내었다.

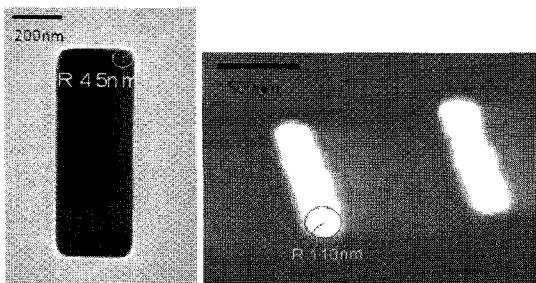


Fig. 8 Radius of curvatures of patterns made by FIB stencil method (left) and e-beam lithography (right)

FIB 밀링에서는 가공조건인 전류를 작게할 수록 가공정밀도는 좋아진다. 본 실험에서는 정삭조건에 해당되는 10pA 조건에서 가공된 패턴을 사용하였고 이때 코너반경이 45nm로 측정되었다. E-beam lithography 경우 코너반경은 110nm로 측정되었다. 측정결과 FIB 밀링이 e-beam lithography 와 비교하였을 때 2 배 이상 작은 코너부 반경을 지니는 것으로 측정되었다. E-beam lithography 는 매우 작은 직경의 전자빔을 사용하지만, 역시 PR 의 현상(development)이 필요하고 후공정인 에칭공정이 필요하다. 고정밀 가공에서는 에칭에서 발생하는 형상왜곡현상을 최소화하기 위해 건식에칭공정을 사용하지만 현상, 에칭 공정이 없는 FIB 과 비교하여 현상과 에칭공정에서 발생하는 정밀도 저하에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에 나타낸 슬릿형 샤파우 마스크를 이

용한 패턴결과를 Fig. 9에 나타내었다. 선폭을 달리한 (왼쪽부터 5, 10, 30, 50 nm 선폭, 1 μm 길이) 슬릿의 경우 10 nm 이하에서는 관통여부 확인이 어려웠기 때문에 가공된 스텐실을 이용하여 증착을 통한 패터너으로 관통여부를 확인하였다. 그림에 나타난 바와 같이 두개의 라인만이 확인이 가능하였다. 즉 5, 10 nm 라인은 관통되지 않았음을 확인하였다. 이는 stencil의 FIB 밀링에서 10nm 이하 선폭에서는 패턴폭 대비 맴브레인 두께비가 5 이상으로 높고, FIB 가공 시 발생하는 재증착(redeposition) 등에 기인하는 것으로 판단된다.

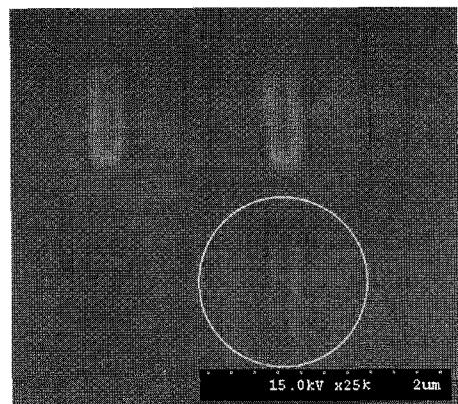


Fig. 9 SEM image of nanopatterns made by shadowmasking

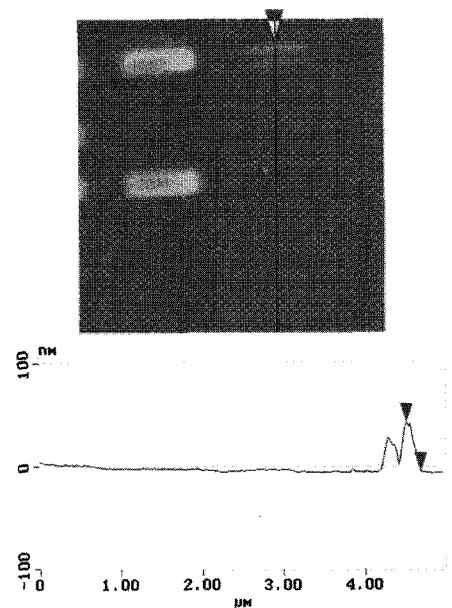


Fig. 10 AFM image and section analysis of nanopattern

패턴의 정확한 두께는 SEM 측정시 차장(charging) 효과 때문에 정확한 측정은 어려웠다. 사도우 마스크에서 선폭 측정결과 30, 50nm 경우 이온빔 직경(14nm)에 의한 영향으로 대략 60, 80nm로 측정되었고 이보다 작은 패턴은 본 연구에 사용된 기계의 한계가 있음을 확인하였다. 따라서 현 상황에서 본 연구로 가능가능한 패턴은 약 60nm로 판단된다. Fig. 10에 나노패턴의 원자력 현미경(AFM) 분석결과를 나타내었다. 증착된 금속 패턴의 두께는 대략 30nm로 측정되었다.

4. 결론

본 연구는 스텐실 증착기술을 이용하여 나노패턴 크롬마스크 제작기술을 개발하기 위하여 일련의 연구를 수행하였다. MEMS 기술과 FIB (Focused Ion Beam)을 이용하여 60nm 크기의 nanoaperture를 지닌 나노스텐실을 제작하고 그 형상을 측정하였다. 제작된 나노스텐실을 이용하여 나노패턴을 제작하고 이를 레이저빔 포토리소그라피, e-beam lithography 와 비교하였으며, 그 결과 FIB으로 제작한 새도마스킹(FIB milled shadowmasking) 방법은 레이저빔 포토리소그라피보다 6-26 배 이상, e-beam lithography 보다 2 배 이상 정밀가공이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 FIB 장치의 한계로 인하여 FIB milled shadowmasking 방법의 가공 가능 최소폭은 약 60 nm였으며, 그 이하의 구멍을 관통 가공하는 것은 어려움이 있음을 확인하였다.

후기

본 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 기본연구지원사업(2010-0028011), 대학중점연구소지원사업(2010-0020089), 지역거점연구단육성사업(노화극복웰빙을 위한 융합의료기술개발사업단)으로 수행된 연구임.

참고문헌

- Burger, G. J., Smulders, E. J. T., Berenschot, J. W., Lammerink, T. S. J., Fluitman, J. H. J. and Imai, S., "High-resolution shadow-mask patterning in deep holes and its application to an electrical wafer feed through," Sensors and Actuators A, Vol. 54, No. 1-3, pp. 669-673, 1996.
- Brugger, J., Andreoli, C., Despont, M., Drechsler, U., Rothuizen, H. and Vettiger, P., "Self-aligned 3D shadow mask technique for patterning deeply recessed surfaces of micro-electro-mechanical systems devices," Sensors and Actuators A, Vol. 76, No. 1-3, pp. 329-334, 1999.
- Kim, G. M., Kim, B. and Brugger, J., "All-photoplastic microstencil with self-alignment for multiple layer shadow-mask patterning," Sensors and Actuators A, Vol. 107, pp. 132-136, 2003.
- Deshmukh, M. M., Ralph, D. C., Thomas, M. and Silcox, J., "Nanofabrication using a stencil mask," Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 2, pp. 1631-1633, 1999.
- Van Rijn, C. J. M., Veldhuis, G. J. and Kuiper, S., "Nanosieves with microsystem technology for microfiltration applications," Nanotechnology, Vol. 9, No. 4, pp. 343-345, 1998.
- Kim, G. M. and Brugger, J., "Fabrication of miniaturized shadow-mask for local deposition," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 152-156, 2004.