

< 논문 >

나노 X-선 웨도우 마스크를 이용한 고폭비의 나노 구조물 제작

김용철[†] · 김종현^{**} · 이승섭^{*}

(2006년 5월 19일 접수, 2006년 7월 28일 심사완료)

A Novel Fabrication Method of the High-Aspect-Ratio Nano Structure (HAR-Nano Structure) Using a Nano X-Ray Shadow Mask

Yong Chul Kim, Jong Hyun Kim and Seung S. Lee

Key Words : Nano Shadow Mask(나노 웨도우 마스크), High-Aspect-Ratio Nano Structure(고폭비의 나노 구조물), Deep X-Ray Lithography(X-선 노광 공정), Nano X-Ray Shadow Mask(나노 X-선 웨도우 마스크), Central Beam Stop Method(중앙 빔 차단 방식)

Abstract

This paper describes the novel fabrication method of the high-aspect-ratio nano structure which is impossible by conventional method using a shadow mask and a Deep X-ray Lithography (DXRL). The shadow mask with 1 μ m-sized apertures is fabricated on the silicon membrane using a conventional UV-lithography. The size of aperture is reduced to 200nm by accumulated low stress silicon nitride using a LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) process. The X-ray mask is fabricated by depositing absorber layer (Au, 3 μ m) on the back side of nano shadow mask. The thickness of an absorber layer must deposit dozens micrometers to obtain contrast more than 100 for a conventional DXRL process. The thickness of 3 μ m-absorber layer can get sufficient contrast using a central beam stop method, blocking high energy X-rays. The nano circle and nano line, 200nm in diameter in width, respectively, were demonstrated 700nm in height with a negative photoresist of SU-8

1. 서 론

최근 몇 년간 여러 가지 방식의 나노 패터닝 기술이 급속한 발전을 이루었으며, 그 크기는 수십 나노로 점점 더 작아지는 추세에 있다. 나노 구조물을 제작하는 기존의 방법으로는 direct E-beam lithography, nanoimprint, dip-pen 방식이 대부분을 차지하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ Direct E-beam lithography 방식은 감광제에 E-beam 을 직접 조사하는 방식으로 공정의 정확도가 매우 높지만 면적당 단가가 매우 높으며 대면적에 나노 형상을 제작하는데 오랜 시간이 소요되며 일회성의 공정으로 반복성이 없는 단점을

가지고 있다. 반복성의 문제점을 보완하기 위한 방식으로 E-beam lithography 로 나노 스템퍼를 제작하여 나노 구조물을 반복적으로 제작할 수 있는 nanoimprint 방식이 수행되고 있다. 하지만 이 경우에도 대면적 및 고폭비를 가지는 나노 구조물의 구현에 대한 한계는 벗어나지 못하고 있다. 한편 나노 구조물을 반복적으로 제작하는 또 다른 방법으로는 나노 웨도우 마스크(shadow mask)를 이용하는 방법이 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ Direct E-beam lithography 와 FIB(focused ion beam)을 이용하여 멤브레인(membrane) 위에 나노 구멍(aperture)을 제작하고 이를 웨도우 마스크로 이용해 금속을 증착하여 기판 위에 나노 형상을 제작 하는 방법으로 이 또한 고폭비를 가지는 나노 구조물을 제조하기 어려운 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 나노 웨도우 마스크 개념과 X-선 노광 공정(deep X-ray lithography)을 이용한 새로운 방식의 고폭비를 가지는 나노 구조물을 제작할 수 있는 방법을 제안한다.

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : yckim74@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3086 FAX : (042)869-5046

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

^{**} 포항 가속기 연구소

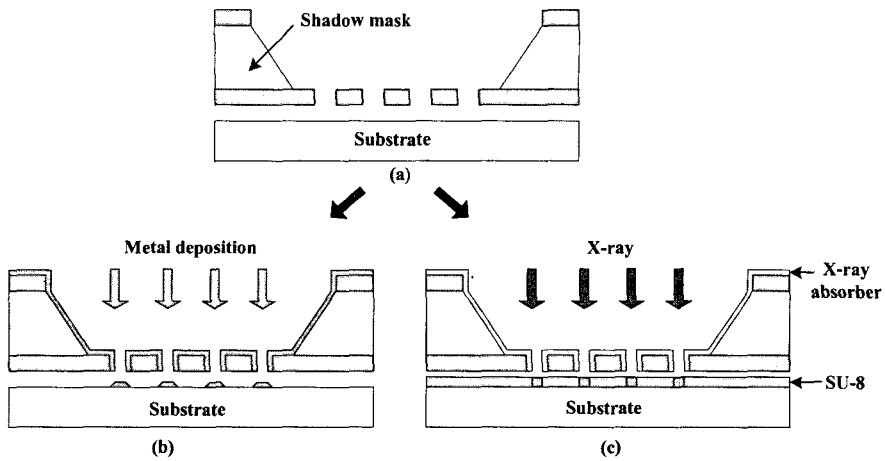


Fig. 1 Schematic view of the principle of shadow mask; (a) a fundamental structure of the shadow mask, and (b) a conventional process method using shadow mask, and (c) a novel process method using nano shadow mask as the nano X-ray mask

2. 원리

2.1 웨도우 마스크의 원리

Fig. 1은 웨도우 마스크를 이용한 공정의 개략도를 보여 주고 있다. 웨도우 마스크는 마이크로 형상이 있는 멤브레인과 실리콘 틀로 구성되어 있다. 이를 이용해 원하는 재료를 사진 식각 공정 없이 바로 기판에 증착 할 수 있으며 하나의 마스크로 똑같은 형상을 반복적으로 제작하는 것이 가능하다. 또한, 사진 식각 공정이 불가능한 표면(단차가 큰 표면, 구부러지기 쉬운 기판 등)에 웨도우 마스크를 효과적으로 이용 할 수 있는 이점이 있다. 이런 웨도우 마스크 개념을 이용한 나노 웨도우 마스크는 대부분 direct E-beam lithography와 FIB를 이용하여 멤브레인 위에 나노 크기의 구멍을 제작하고 이를 이용해 나노 구조물을 증착하는데 사용된다. 하지만 본 논문에서는 단순히 금속 증착을 통한 나노 구조물의 제작이 아니라 나노 웨도우 마스크를 X-선 마스크로 이용하여 X-선 노광 공정을 통해 고풍비의 나노 구조물을 제작하는데 사용하였다.

2.2 중앙 빔 차단 방법의 원리

Fig. 2는 중앙 빔 차단 방법(central beam stop method)의 원리를 개략적으로 보여 주고 있다.⁽⁹⁾ X-선 노광 공정은 고풍비를 가지는 마이크로 구조물을 제작하는 공정으로 일반적으로 널리 사용되고 있다.^(10,11) 이 공정은 방사광 가속기의 강한 X-선을 이용한 노광으로 마이크로 이하의 정밀도를 갖는 수백 마이크로 두께의 고풍비의 구조물을

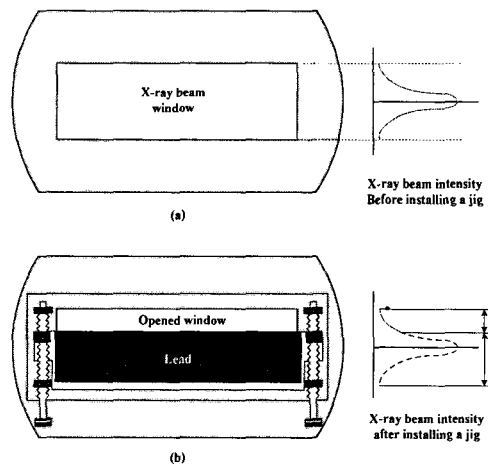


Fig. 2 Schematic view of the principle of the central beam stop method; (a) X-ray beam window for a conventional deep X-ray lithography process, and (b) X-ray beam window using the central beam stop jig

제작 할 수 있다.

Fig. 2의 (a)는 일반적인 X-선 노광 공정을 할 경우 X-선 빔 창(X-ray beam window)을 통해 모든 영역의 X-선 빔이 투과한다. 이런 경우 100이상의 콘트라스트(contrast)를 얻기 위해서 일반적으로 X-선 흡수층(X-ray absorber layer)을 10 μ m 이상을 증착하여야 한다. 따라서 기존의 X-선 노광 공정으로는 나노 크기의 구조물을 제작하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2의 (b)와 같이 중앙 빔을 차단 할 수 있는 납이 부착 된 지그를 빔 창에 설치

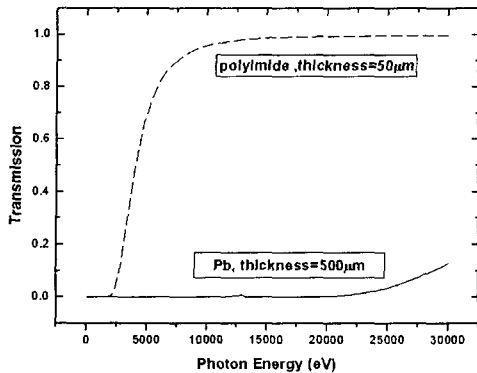


Fig. 3 Effect of the central beam stop jig with lead using the Lawrence Berkeley national Lab simulation

하면 개방되는 창 크기의 조절이 가능하다. 또한, 높은 에너지 X-선을 막아줌으로써 3µm 두께의 X-선 흡수층만으로 충분한 콘트라스트를 얻을 수 있다.

Fig. 3은 모사(simulation)를 통해 납이 부착된 지그에 의해 강한 광자 에너지(high photon energy)가 차단되는 것을 보여준다. 또한 가속기 9C1 빔라인은 헬륨 가스의 누설을 막기 위해 X-선 빔 창에 폴리이미드(polyimide) 필름이 부착되어 있고 이를 통한 X-선의 투과율과 비교하면 지그를 이용한 중앙 빔 차단 방법이 높은 X-선 에너지의 투과율을 급격하게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3. 제작

3.1 웨도우 마스크 제작

Fig. 4는 웨도우 마스크의 제작 공정을 개략적으로 보여주고 있다. 공정의 단계는 우선 (a) 실리콘 웨이퍼를 1050 °C 에서 2시간 동안 건식 산화시켜 1000 Å 두께의 산화막을 성장하고 그 위에 LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) 공정으로 저 응력 실리콘 질화막 3000 Å (first SixNy)을 증착한다. (b) 기존의 자외선 사진 식각 공정으로 1µm 크기의 패턴을 형성하고 건식식각(reactive ion etching)을 이용해 실리콘 질화막과 실리콘 산화막을 식각한다. (c) 멤브레인을 만들기 위해 뒷면을 패턴하고 건식 식각으로 실리콘 질화막과 실리콘 산화막을 에칭한다. (d) 뒷면을 완전히 개방하기 위해 TMAH(90 °C, 20wt %)로 기판식각(bulk etching)을 한다. 이러한 공정을 통해 웨도우 마스크를 제작하였다.

Fig. 5에서는 제작 되어진 웨도우 마스크의 SEM 이미지를 보여 주고 있다. (a)는 실리콘 질화막에 1 µm 지름의 원형을, (b)는 1 µm 폭의 선을 보여준다.

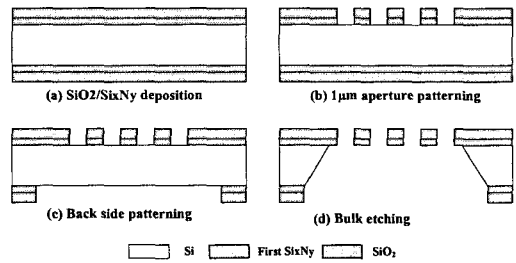


Fig. 4 Fabrication process of shadow mask

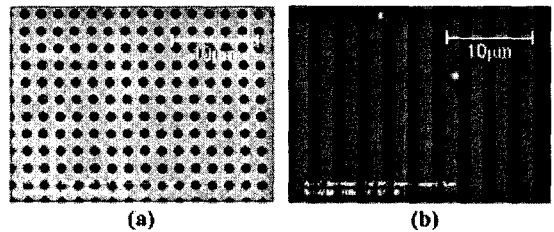


Fig. 5 SEM image of the fabricated shadow mask; (a) 1µm diameter circle, and (b) 1µm width line

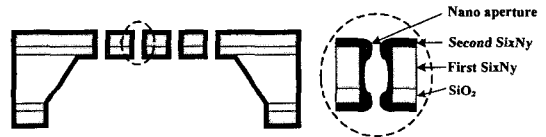


Fig. 6 Schematic view of the nano shadow mask

3.2 나노 웨도우 마스크 제작

Fig. 6은 제작 된 웨도우 마스크에 LPCVD로 저 응력 실리콘 질화막(second SixNy) 증착하여 나노 웨도우 마스크 제작 공정을 보여주고 있다. 기존의 자외선 사진 식각 공정으로 만든 1 µm 크기의 형상이 있는 웨도우 마스크에 LPCVD 공정으로 저 응력 실리콘 질화막을 증착한다. 증착 된 두께에 따라 1µm 크기의 형상을 수십 나노 크기로 줄일 수 있다.^(12,13)

Fig. 7은 웨도우 마스크에 LPCVD로 저 응력 실리콘 질화막을 증착 두께에 따른 SEM 이미지를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 실리콘 질화막을 2000 Å 증착 했을 경우 지름이 1µm 원이 600nm 지름의 원형으로 줄어들었고 1µm 선폭이 600nm 크기의 선폭으로 줄어들었으며, Fig. 7(b) 5000 Å 증착 했을 경우 1µm 크기의 형상이 250nm 크기로 줄어들었고, Fig. 7(c) 6500 Å 증착 했을 경우 1µm 크기의 형상이 130nm 크기로 줄어들었다.

Fig. 8은 LPCVD로 증착 된 저 응력 실리콘 질화막의 두께에 따른 구멍 크기를 보여준다. 증착 두께 조절로 나노 구멍을 제작할 수 있으며 100nm이하의 제작도 가능하다.

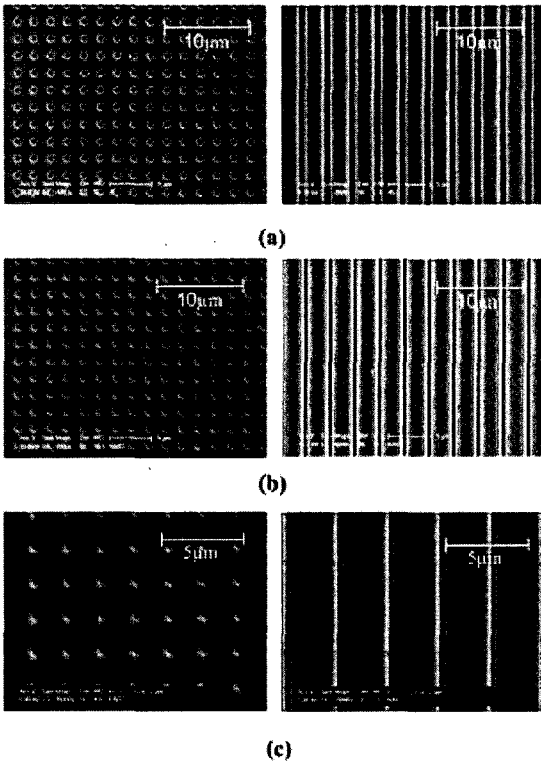


Fig. 7 SEM image after SixNy deposition using a LPCVD process; (a) 2000 Å thickness resulting in 600nm diameter circle and 600nm width line, and (b) 5000 Å thickness resulting in 250nm circle and line, and (c) 6500 Å thickness resulting in 130nm circle and line

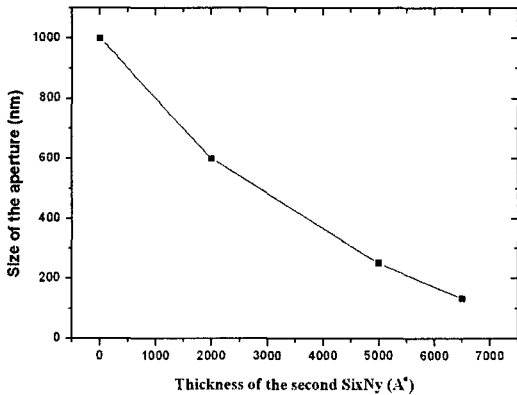


Fig. 8 Measured size of the aperture vs. thickness of the second Si₃N₄

3.3 나노 X-선 마스크 제작

Fig. 9는 나노 웨도우 마스크 뒷면에 E-빔 증착기 (E-beam evaporator)를 이용하여 3μm 두께의 금을 증착하여 나노 X-선 마스크 제작 공정을 보여 준다. 기존의 X-선 노광 공정에서는 100이상의 콘트라스트를 얻기 위해 10μm 이상의 금을 증착해

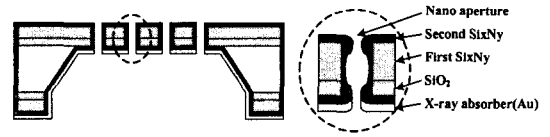


Fig. 9 Schematic view of the nano X-ray mask

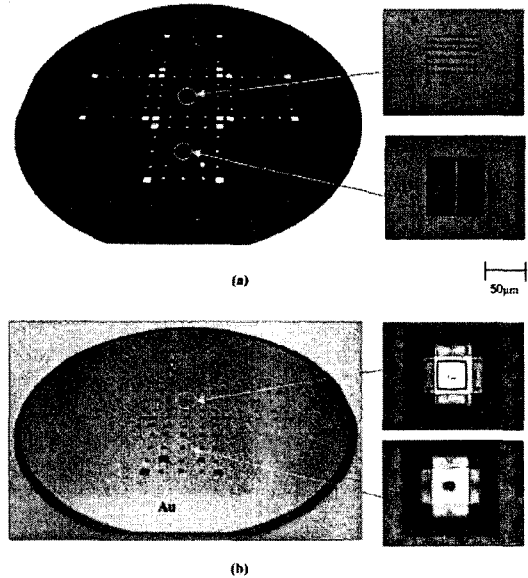


Fig. 10 Pictures of the fabricated nano X-ray mask; (a) front side of the nano X-ray mask, and (b) back side of the nano X-ray mask

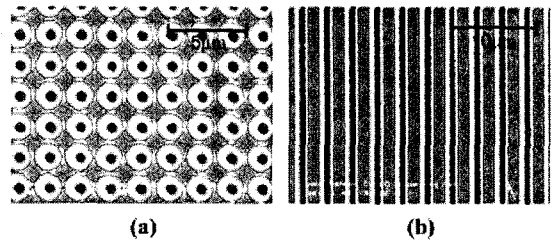


Fig. 11 SEM image after Au deposition using a E-beam evaporator

야 하므로 sub-micro 패턴을 제작하는 것은 매우 어렵다. 하지만 중앙 빔 차단 방법을 사용하여 높은 X-선 에너지를 차단하므로 3μm 두께의 금으로 충분한 콘트라스트를 얻을 수 있어 나노 크기의 형상 제작이 가능하다.

Fig. 10은 실제 제작된 나노 X-선 마스크의 현미경 사진을 보여주고 있다. 마스크의 앞면에는 나노 크기의 패턴이 램브레인을 관통 되어 있고 마스크의 뒷면에는 X-선 흡수층으로 3μm 두께의 금이 증착되어 있다.

Fig. 11은 제작 되어진 나노 X-선 마스크의 SEM 이미지를 보여 주고 있다. (a)는 200nm 지름의 원형을, (b)는 200nm 폭 선을 보여준다.

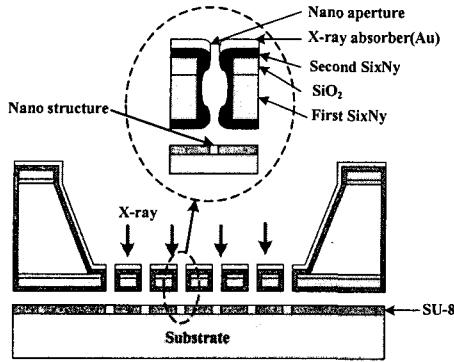


Fig. 12 Schematic view of the deep X-ray lithography process using the nano X-ray mask

Table 1 The parameters used in deep X-ray exposure at PLS LIGA beamline (9C1)

Acceleration voltage (GeV)	2.5
Bending magnet (T)	1.323
Beryllium window (μm)	508
Helium spool (mm)	400
Distance to source (m)	15
Mask blank (\AA)	3000 (SixNy)
Absorber (μm)	3 (Au)
Opened Beam window width (mm)	3
Beam current (mA)	180
Exposure time (sec)	45
SU-8 thickness (μm)	1~2
Lead thickness (μm)	500

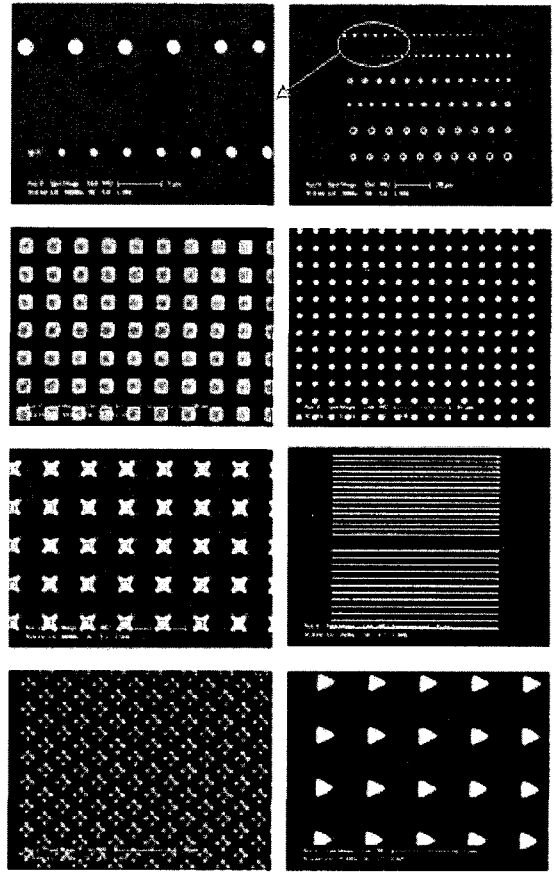


Fig. 13 SEM image of developed SU-8 using X-ray mask without second SixNy deposition

4. 실험 및 고찰

Fig. 12는 나노 X-선 마스크를 이용한 X-선 노광 공정을 개략적으로 보여주고 있다. SU-8 을 두께 1~2 μm 로 스핀 코팅

한 실리콘 위에 나노 X-선 마스크를 밀착하여 고정시키고 X-선에 노출시키면 나노 구멍 부분만 X-선이 투과하고 그 외 부분은 X-선 흡수층에 의해서 X-선이 차단된다. 이렇게 노광 된 SU-8 을 현상했을 때 X-선에 노출 된 나노 구조물만 남게 된다. X-선 노광 실험에 사용된 변수들은 Table 1 에 요약하여 보여주고 있다.

Fig. 13은 두 번째 실리콘 질화막을 증착하지 않은 웨도우 마스크에 금을 바로 증착한 X-선 마스크를 이용한 실험을 통해 잔여물이 없이 완전히 현상된 SU-8의 다양한 형상을 보여주고 있다. 중앙 빔 차단 방법을 이용했을 경우 3 μm 두께의 금으로 충분한 콘트라스트를 얻을 수 있음을 보여 준다

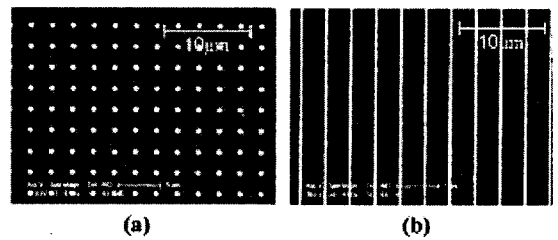


Fig. 14 SEM image of developed SU-8 using nano X-ray mask with second SixNy deposition; (a) 200nm diameter circle, and (b) 200nm width line

Fig. 14에서는 웨도우 마스크에 두 번째 실리콘 질화막을 증착하고 그 위에 금을 증착한 나노 X-선 마스크를 통해 실험한 SU-8 형상을 보여 준다. 두 번째 실리콘 질화막을 증착하여 나노 크기로 형상을 줄인 다음 금을 증착한 나노 X-선 마스크로 200nm크기의 나노 구조물을 제작 하였다.

본 실험에서 SU-8로 제작된 나노 구조물은 기관과의 접촉력이 약해서 현상 과정과 건조 과정에서 기관에서 떨어지거나 큰 고폭비로 인해 구조물이 기울어 지는 현상이 발생하였다. 이를 최소화 하기 위해 현상 중에는 교반을 하지 않고 적외선 램프로 건조를 하였다.

5. 결론

본 연구에서는, 나노 웨도우 마스크 개념과 X-선 노광 공정을 이용한 새로운 방식의 고폭비를 가지는 나노 구조물을 제작할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해, 1 μ m 형상이 있는 웨도우 마스크를 제작한 후, 나노 형상을 제작 하기 위해 웨도우 마스크에 LPCVD 공정으로 저 응력 실리콘 질화막을 증착하였다. 이 때 증착된 실리콘 질화막의 두께에 따라 1 μ m 형상이 130nm까지 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이렇게 제작된 나노 웨도우 마스크의 뒷면에 X-선을 흡수 할 수 있는 3 μ m 두께의 금을 증착하여 나노 X-선 마스크를 제작 할 수 있었다.

X-선 노광 실험에서 충분한 콘트라스트를 얻기 위해 중앙 빔 차단 방법을 사용하여 최소 200nm 지름의 원형과 200nm 선폭을 가지는 SU-8 구조물을 제작하였다.

제안된 방법을 이용하면, 기존의 자외선 사진 식각 기술로 나노 형상의 제작이 가능하며, 제작된 나노 구조물의 고폭비를 이용하여 다양한 용도로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원이 주관하는 교원 기본연구의 연구비 지원(GPH1238)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Madou M. J., 2002, "Fundamentals of Micro-

fabrication," *CRC Press*, pp. 53~57.

- (2) Chou S. Y., Krauss P. R. and Renstrom P. J., 1996, "Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 4129~4133.
- (3) Ginger D. S., Zhang H. and Mirkin C. A., 2004, "The Evolution of Dip-Pen Nanolithography," *Ang. Chem.*, Vol. 43, No. 1, pp. 30~45.
- (4) Seo Y. H., Choi D. S., Lee J. H., Je T. J. and Whang K. H., 2004, "Fabrication of High Aspect Ratio 100nm-scale Nickel Stamper Using E-beam Writing based on Chrome/Quartz Mask Without Anti-Reflection Layer for Injection Molding of Optical Grating," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 11, pp. 1794~1798.
- (5) Brugger J., Berenschot J. W., Kuiper S., Nijdam W., Otter B. and Elwenspoek M., 2000, "Resistless Patterning of Sub-Micron Structures by Evaporator Through Nanostencils," *Microelectron. Eng.*, Vol. 53, pp. 403~405.
- (6) Kim G. M., M. A. F. van den Boogaart, and Brugger J., 2003, "Fabrication and Application of a Full Wafer Size Micro/Nanostencil for Multiple Length-Scale Patterning," *Microelectron. eng.*, Vol. 67-68, pp. 609~614.
- (7) Schumacher C. and Faschinger W., 2000, "Self-Organized Nucleation of Sharply Defined Nanostructures During Growth into Shadow Mask," *J. cryst. growth*, Vol. 214-215, pp. 732~736.
- (8) Blech V., Nobuyuki T. and Kim B. J., 2005, "Nano Stencilling Through a cm²-wide Silicon Membrane," *Proc. Korean MEMS Conf*, pp. 451~454.
- (9) Perennes F. and Pantenburg F. J., 2001, "Adhesion Improvement in the Deep X-Ray Lithography Process Using a Central Beam Stop," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, Beam Interact. Mater. Atoms*, Vol. 174, pp. 317~323.
- (10) Guckel H., 1998, "High-Aspect-Ratio Micromachining via Deep X-Ray Lithography," *Proc. IEEE98*, Vol. 80, pp. 1586~1593.
- (11) Lee K. C. and Lee S. S., 2003, "Deep X-Ray Mask with Integrated Actuator for 3D Microfabrication," *Sens. Actuator A*, Vol. 108, pp. 121~127.
- (12) Bar E., and Lorenz J., 1996, "3-D Simulation of LPCVD Using Segment-Based Topography Discretization," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, Vol. 9, No. 1, pp. 67~73.
- (13) Lee S. J., Kim G. M., 2006, "Fabrication of Nanostencil Using Additional Deposition" *Proc. of the KSME 2006 Spring Annual Meeting*, pp. 4082~4086.