한국정밀공학회지 제 23 권 제 3 호 (2006 년 3 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, March 2006

# FIB 밀링을 이용한 나노스텐실 제작 및 나노패터닝

김규만#, 정성일*, 오현석*

# Fabrication of nanostencil using FIB milling for nanopatterning

Gyu Man Kim#, Sung Ill Chung*, Hyeon-Seok Oh*

## ABSTRACT

A high-resolution shadow mask, or called a nanostencil was fabricated for high resolution lithography. This high-resolution shadowmask was fabricated by a combination of MEMS processes and focused ion beam (FIB) milling. 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 70 nm could be made into the membrane. By local deposition through the apertures of nanostencil, nanoscale patterns down to 70 nm could be achieved.

**Key Words** : Shadow mask (샤도우마스크), nanostencil (나노스텐실), Focused ion beam (집속이온빔), Evaporation (기화증착), nanolithography (나노리소그라피)

## 1. 서론

최근 들어 미래 지향적 원천기술로서 나노기술에 대한 중요성이 부각되고 있는 상황이다. 나노스케일의 패턴을 기판 위에 제작하는 나노리소그라피(nanolithography) 기술은 나노기술의 기반을 제공하는 원천적인 선행기술이다. 기존의 UV 포토리소그라피(photolithography)는 최소 패턴 가능 선폭이 1-2 ㎛로 한계를 지니고 있다. 이를 극복하기 위하여 최근 DUV, e-beam, X-ray 등을 이용하는 나노 패턴 기술은 최소 선폭을 1 ㎛ 이하로 줄임으로써 고집적회로 제작에서 한 단계 발전할 수 있는 기반을 제공하였다. 하지만 이 기술들은 고가의 장비를 필요로 한다. 한편 최근에 생명공학의 중요성이 강조되고 기술 융합의 중요성이 강조되면서, 고기능 유기체층(organic layer)을 표면에 처리, 미세 구조물 표면 위로의 기능성 패턴 제작 등 일반 포토리소그라피로 해결할 수 없는 특수한 요구가 증가하고 있다. 위에 기술한 단점을 극복하기 위하여 여러 가지 새로운 나노패터닝 방법들이 제안되었다. 폴리머 스템프(polymer stamp)를 이용하여 분자층을 패터닝하는 micro-contact printing 법 [1], 미세 금형을 제작하고 폴리머 표면에 가열 가압하여 금형패턴을 전사하는 nano-

접수일: 2005 년 8 월 11 일; 게재승인일: 2006 년 1 월 13 일
# 교신저자: 경북대학교 기계공학부
E-mail gyuman.kim@knu.ac.kr Tel. (053) 950-7570
* LG 생산기술원

imprint lithography 법[2], scanning probe 를 이용하여 분자를 표면에 전이하는 dip pen lithography[3]와 전원을 인가하여 직접 표면의 성질을 변화시키는 scanning probe lithography[4] 등을 예로 들 수 있다.

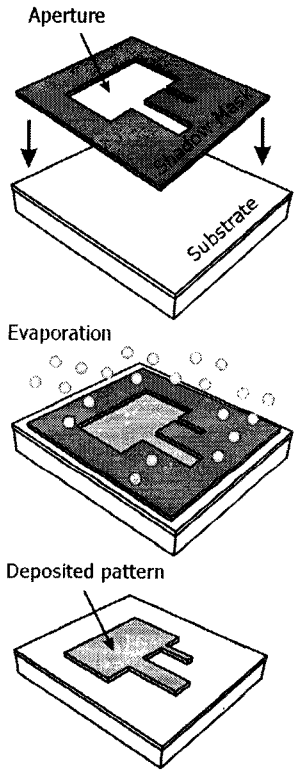



Fig. 1 Principle of patterning using shadow evaporation through stencil

그 외에 새롭게 부각되고 있는 기술로서 스텐실링(stenciling, 혹은 shadowmasking)을 들 수 있다. 스텐실링이란 스텐실(stencil 혹은 shadowmask)을 이용하여 원하는 패턴을 제작하는 방법이다. 스텐실이란 미리 정의된 패턴만이 개방되어 있고 그 나머지 부분은 막혀 있는 얇은 멤브레인(membrane)을 의미한다. 스텐실 제작을 위해서는 멤브레인에 원하는 패턴부위만을 개방하는 기술이 필수적으로 필요하다. 패터닝을 위해서는 표면 위에 제작된 스텐실을 올려놓으면 개방부위의 표면만이 노출되기 때문에 그 위로 물질을 증착시키면 스텐실에 정의된 개방 패턴이 표면위로 전사되어 패터닝이 가능하다. 스텐실링은 레지스트(resist)를 사용하지 않고 한번의 증착공정으로 원하는 물질을 표면에 증착하기 때문에 모재와 증착물질의 선택의 폭이 넓어 고기능 바이오/화학적 처리표면이나 기계적 강성이 약한 마이크로 구조물로의 패터닝에서 기존 광리소그라피 방법의 한계를 극복할 수 있는 장점이 있다. 반면 스텐실을 우선 제작해야 하고 멤브레인의 지지문제로 인하여 O 형상 패턴은 제작할 수 없는 단점이 있다. 선행연구로는 Si, SiN, SiO 등 고상 멤브레인(solid-state membrane) 위에 마이크로 사이즈의 구멍 패턴을 정의하고 이를 이용하여 마이크로 크기의 미세패턴 제작에 대한 연구가 수행되었다 [5,6,7].

본 연구에서는 MEMS 공정과 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB) 밀링을 이용하여 선폭 100nm 이하의 개방형 패턴을 지닌 나노스텐실을 제작하고 국부증착을 통한 나노패터닝을 수행하였다.

## 2. 나노스텐실 제작

Fig.1 에 스텐실을 이용한 리소그라피 원리를 나타내었다. 스텐실을 표면에 얹고 증착공정 후 스텐실을 제거하면 원하는 패턴을 얻을 수 있다. 이를 위해서는 원하는 패턴을 지닌 스텐실을 우선 제작하여야 한다. Fig.2 에 나노스텐실 제작공정의 개요를 나타내었다. 우선 실리콘 웨이퍼상에 500nm 두께의 질화실리콘(SiN)층을 LPCVD 로 생성하였다. 이 질화실리콘층은 최종 멤브레인이 되므로 스트레스를 최소화하기 위해 저 스트레스 공정을 사용하였다. 멤브레인에 개방형 패턴을 만들기 위해서는 웨이퍼 윗면에 포토리소그라피(photolithography)공정으로 PR (photoresist)에 패터닝을 한 후 inductively coupled plasma (ICP) etching 으로 질화실리콘층을 패터닝하였다. 질화실리콘층을 멤브레인으로 만들기 위하여 웨이퍼 아랫면에 동일한 공정 (photolithography, ICP etching)으로 멤브레인 영역을 패터닝 하고, 마지막으로 KOH 액 중에서 실리콘을 에칭하여 질화실리콘 멤브레인을 제작하였다. 이때 제작된 스텐실은 질화실리콘 멤브레인에 포토리소그라피로 제작된 개방형 패턴을 가지고, 그 크기는 수㎛이다. 한편, 1 ㎛ 이하의 패턴을 제작하기 위해서는 고분해능 (high resolution) 가공방법을 사용해야 한다. FIB 밀링은 Ga 이온을 미리

정의된 영역에 집중적으로 조사하여 물질을 제거하는 공정으로서, 최소 선폭 30nm 이하의 초미세 제거가공이 가능하기 때문에 본 연구에서 선폭 100nm 이하의 초미세 관통패턴을 가공하는데 적합한 공정이다. 한편, 본연구에서는 개방형 패턴의 폭이 100nm 이하이고 멤브레인의 두께는 500nm 이므로 구멍의 세장비(aspect ratio)가 50 이상으로 크기 때문에 이를 통과하여 물질의 증착이 어렵게 된다. 이러한 이유로 구멍을 가공하기 전에 우선 구멍주위에 멤브레인을 관통하지 않고 두께를 얇게 만든 후, 얇아진 질화실리콘 멤브레인에 100nm 이하의 개방형 패턴을 관통 가공하였다.

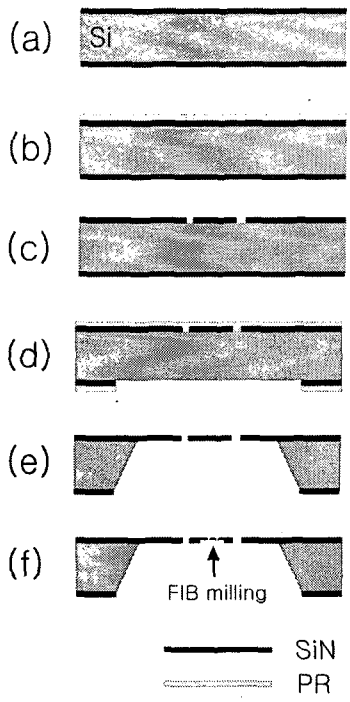



Fig. 2 Schematic overview of nanostencil fabrication process. (a) Deposition of 500-nm thick low stress SiN. (b) Photolithography of microscale pattern. (c) SiN etching of microscale pattern. (d) Photolithography and SiN etching on backside. (e) KOH etching of bulk Si from backside for 500-nm thick SiN membrane releasing. (f) FIB milling for local SiN membrane thinning into 50-nm thick, and then, nanoaperture fabrication

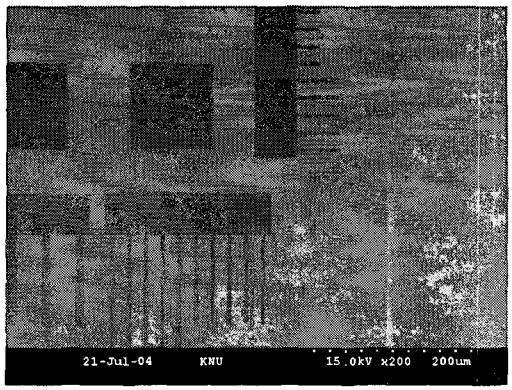


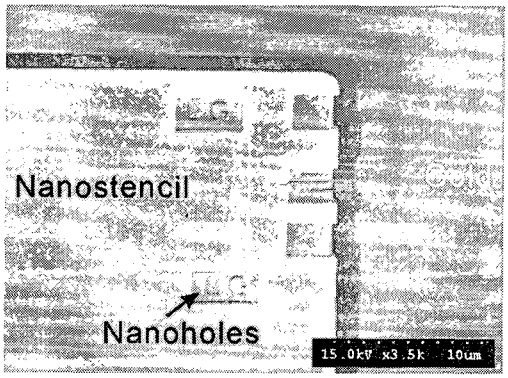

Fig. 3 SEM image of micro-scale apertures made by photolithography and SiN etching

## 3. 결과

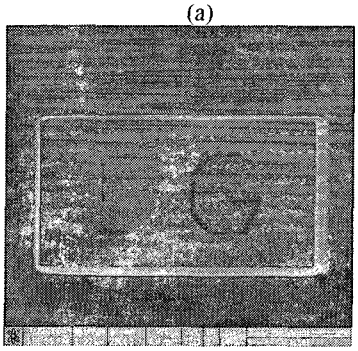
Fig.3 에 MEMS 공정으로 제작된 스텐실의 개방형 패턴을 나타내었다. 멤브레인의 크기는 2 mm x 2mm 이고 두께는 500 nm 이다. 실리콘 림(rim)으로 각 멤브레인 주위를 보강하여 멤브레인의 안정성을 높였다. 포토리소그라피로 1 ㎛ 이상 크기의 구멍패턴은 다양하게 제작할 수 있으나 1 ㎛ 이하 크기의 나노스케일 패턴은 FIB 밀링을 이용한 후 가공이 필요하다. 적절한 위치에 나노스케일 패턴을 제작함으로써 수백 ㎛에서 수십 nm 에 이르는 다양한 크기의 구멍패턴을 지닌 스텐실의 제작이 가능하다. 본 연구에서는 Fig.3 에 나타낸 멤브레인의 켄티레버 상에 나노스케일 패턴을 가공하였다. Fig.4 에 FIB 밀링으로 가공된 나노스케일 패턴의 SEM 이미지를 나타내었다. Fig.4 (a)는 30nm 두께 Au 증착 후에 표면 위에 놓인 상태의 SEM 이미지 이고, Fig.4 (b)와 (c)는 FIB 가공 직후 측정된 SEM 이미지이다. 구멍주위의 멤브레인의 두께를 줄이기 위하여 구멍주위 영역에서 30kV, 0.3nA 조건에서 FIB 밀링하여 멤브레인 두께를 500nm 에서 약 50nm 로 얇게 만든 후, 30kV, 10pA 의 저에너지, 초정밀가공 조건에서 나노패턴을 관통 가공하였다. Fig.4 (b)의 나노글자의 폭은 최소 70nm 이고 글자의 총 높이는 1 ㎛ 이다. 글자패턴의 가공에 앞서 국부적으로 4 ㎛ x 2 ㎛ 크기로 구멍주위의 멤브레인의 두께를 줄인 영역을 볼 수 있다. Fig.4 (c)의 나노슬릿의 폭은 90nm, 120nm 이고, 길이는

2 ㎛, 3 ㎛이다. 나노슬릿 주위에는 4 ㎛ x 2 ㎛ 크기로 맴브레인의 두께를 줄였다.

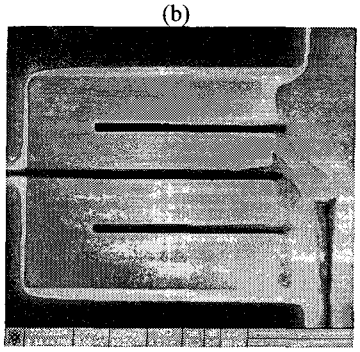
제작된 나노스텐실을 Si 기판 위에 올려놓고 나노구멍패턴을 통하여 증착공정을 수행하여 나노패터닝을 하였다. 나노스텐실은 폴리이미드 테이프를 사용하여 고정하였고 30nm 두께의 Au 를 e-beam 증착 공정으로 증착하였다. Fig.5 에 제작된 나노패턴의 SEM 사진을 나타내었다.




(a)

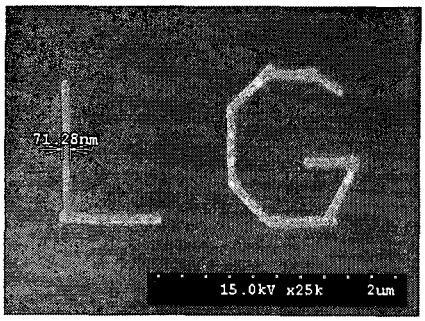


(b)

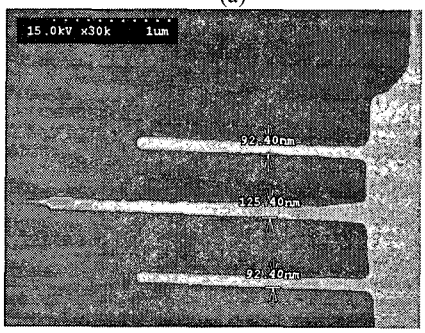


(c)

Fig. 4 SEM images of nano-scale apertures made by FIB milling: (a) nanostencil after evaporation of 30-nm-thick Au; (b) nanoletters; (c) nanoslits




(a)




(b)

Fig. 5 SEM images of nanopatterns; (a) nanoletters; (b) nanoslits

측정된 나노패턴들의 크기는 나노글자의 경우 글자폭이 최소 70nm 이었고, 슬릿의 경우 폭이 약 90 nm 와 125nm 로 측정되었다. 특히 주목할 사항은 중간 슬릿의 끝부분의 형상이다. Fig.4 (c)에 나타낸 바와 같이 중간 슬릿의 끝부분은 멤브레인의 두께를 줄인 영역 밖에 나와 있어 전체 슬릿의 구멍의 깊이가 대략 50nm 이지만 중간 슬릿 끝부분은 깊이가 500nm 이고 구멍의 세장비가 4 에 이른다. 이러한 높은 세장비의 영향으로 패턴의 끝부분의 폭이 급격하게 감소함을 보이고 있으며, 결과적으로는 Fig.5(b)에서와 같이 십 수 nm 의 매우 날카로운 선단을 지님을 보이고 있어 후공정을 통한 팁의 가공 등으로 응용될 수 있음을 보인다.

제작된 나노패턴의 AFM 측정 결과를 Fig.6 에 나타내었다. 스캔 영역은 5 ㎛ x 5 ㎛ 이고 스캔속도 0.5Hz, 샘플 수 256 개의 조건 하에서 측정하였다. 측정결과, 패턴의 경계가 분명하게 나타나고 있어 70nm 이하의 고정밀 패턴이 가능함을 나타내고 있다. 측정된 메탈패턴의 두께는 대략 35nm 로 측정되었다.

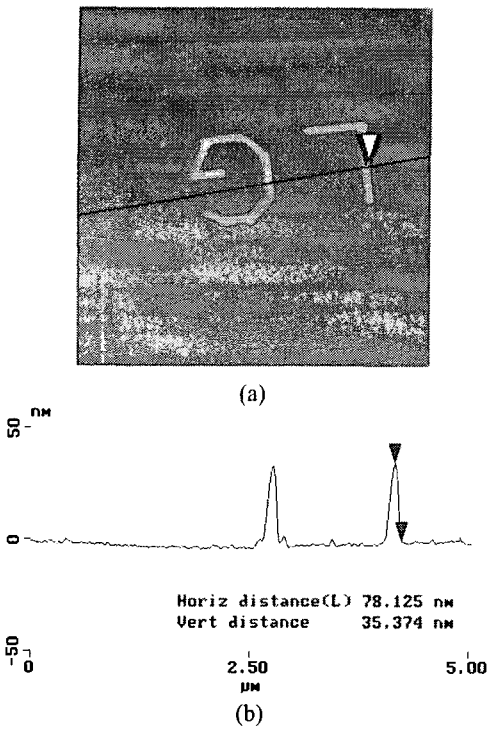



Fig.6 AFM analysis of the nanopattern; (a) AFM image; (b) topography

## 4. 결론

본 연구에서는 새로운 나노리소그라피 방법으로 사용될 수 있는 나노스텐실을 제작하였다. 우선 MEMS 공정을 이용하여 마이크로스텐실을 제작한 후 집속이온빔 밀링을 이용하여 개방형 나노스케일 패턴을 스텐실 멤브레인에 가공하였다. 본 연구에서는 선폭 70nm 의 극소형 나노패턴을 지닌 나노스텐실 제작이 가능하였다. 제작된 나노스텐실을 이용한 증착실험 결과 나노스텐실을 이용하여 최소 70nm 크기의 나노리소그라피를 구현하였다.

## 후기

이 논문은 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R05-2004-000-10004-0)

## 참고문헌

1. Kumar, A. and Whitesides, G. M., "Features of gold having micrometer to centimeter dimensions can be formed through a combination of stamping with an elastomeric stamp and an alkanethiol ink followed by chemical etching," Applied Physics Letters, Vol. 63, No. 14, pp. 2002-2004, 1993.
2. Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., "Nanoimprint lithography," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14, No. 6, pp. 4129-4133, 1996.
3. Piner, R. D., Zhu, J., Xu, F., Hong, S. and Mirkin, C. A., "Dip-pen nanolithography," Science, Vol. 283, No. 29, pp. 661-663, 1999.
4. Wilder, K., Quate, C. F., Adderton, D., Bernstein, R. and Elings, V., "Noncontact nanolithography using the atomic force microscope," Applied Physics Letters, Vol. 73, No. 17, pp. 2527-2529, 1998.
5. 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 and electrical wafer feed-through," Sensors and Actuators A, Vol. 54, pp. 669-673, 1996.
6. 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, pp. 329-334, 1999.
7. Kim, G. M., Brugger, J., "Fabrication of miniaturized shadow-mask for local deposition," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 8, pp.152-156, 2004.