

# 실리콘 나노임프린팅 및 솔벤트증기를 이용한 폴리머 나노채널 제작 Fabrication of Polymer Nanochannel Using Silicon Nanoimprinting and Solvent Assisted Sealing

\*조영학<sup>1</sup>, 김현수<sup>2</sup>, 김범준<sup>3</sup>, #한아름<sup>2</sup>

\*Y. H. Cho<sup>1</sup>, H. S. Kim<sup>2</sup>, B. J. Kim<sup>3</sup>, #A. Han<sup>2</sup> (arum.han@ece.tamu.edu)

<sup>1</sup> 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, <sup>2</sup>Texas A&M University 전기공학과, <sup>3</sup>동경대학교 정밀기계공학과

Key words : Nanoimprint lithography (NIL), PMMA nanochannel, Solvent assisted sealing

## 1. 서론

최근, 새롭게 각광을 받고 있는 나노바이오 기술 분야에서 나노 스케일의 초미세 채널(이하 나노채널)은 DNA 또는 단백질과 같은 생체분자를 단일분자 수준에서 조작 및 분석을 가능하게 한다.<sup>1</sup> 따라서, 나노플루이드 디바이스에 대한 높은 요구를 만족시키기 위해서 다양한 나노채널 제작 기술이 개발되어 왔다.<sup>2,3</sup> 고세장비(high-aspect-ratio)의 나노채널은 길이가 긴 채널에 있어서 과도한 압력으로 인한 디바이스의 파괴 등을 막고 빠른 유체 흐름을 만족시키기기에 적합하다.<sup>2</sup>

지금까지는 집속이온빔 밀링(FIB milling; focused ion beam milling) 또는 전자빔 리소그래피(electron beam lithography)와 같은 톱-다운(top-down) 방식의 나노리소그래피(top-down nanolithography)를 이용한 나노채널 제작 기술이 주를 이루어왔다. 이러한 기술은 나노채널의 형성에 있어 높은 해상도를 제공하나, 고비용 및 저효율의 단점을 가지고 있다. 반면, 나노임프린트 리소그래피(NIL; nanoimprint lithography)는 이와 같은 고비용, 저효율의 문제점들을 해결할 수 있는 대체기술로 제안되었다. NIL은 저비용으로 대면적에 나노미터 크기의 물체를 만들 수 있는 병렬처리 및 대량 생산이 가능한 기술이다.<sup>4</sup> 일반적으로, 임프린팅 스탬프는 앞에서 언급한 집속이온빔 밀링 또는 전자빔 리소그래피를 이용하여 제작하나, 이 논문에서는 기존의 멤스공정을 이용하여 마이크로 스케일의 형상으로부터 선택적인 에칭을 통해 나노임프린팅 스탬프를 제작한다. 제작된 나노임프린팅 스탬프를 이용하여 나노트렌치를 형성한 후, 솔벤트 증기를 이용한 채널 실링 과정을 거쳐 최종적으로 폴리머 나노채널을 제작한다.

## 2. 방법

이전 논문<sup>3</sup>에서 나노리소그래피의 도움 없이 몸체미세 가공기술을 이용하여 이산화 실리콘 나노채널을 제작하였다. 이와 같은 방식의 나노제작공정을 이용하여 실리콘 나노임프린트 몰드를 제작하는데 성공하였고, 이를 이용하여 고세장비의 PMMA (poly(methyl methacrylate)) 나노채널을 제작하였다. 실리콘 임프린트 몰드의 제작 공정의 개략도는 Fig. 1에 도시되어 있다. 3인치 <100> 결정면을 가진 실리콘 웨이퍼 위에 LPCVD(low-pressure chemical vapor deposition) 장치를 이용하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층을 100nm 정도 증착한다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층을 패터닝하기 위해 positive photoresist S1818을 spin-coating 한다. UV-리소그래피를 이용하여 <110> 결정면에 평행하도록 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층을 패터닝한다(Fig. 1(a),(f)). 이 공정에 있어 패터닝된 라인의 폭은, 초기 패터닝의 폭에 따라 임프린트 몰드의 폭이 결정되므로 PMMA 나노채널의 형성에 있어 아주 중요한 역할을 한다. Photoresist를 마스크로 하여 RIE(reactive ion etching; CF<sub>4</sub> gas 이용) 공정을 통해 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 에칭하고(Fig. 1(b)), 다시 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 마스크로 KOH 용액(40wt%, 56°C)을 이용하여 실리콘의 이방성 에칭을 한다(Fig. 1(c)). 이는 단결정 실리콘 웨이퍼의 <100>면이 상대적으로 낮은 에칭 속도를 갖는 것을 이용한 것이다. 다음 공정으로 1100°C에서 LOCOS(local oxidation of Si)를 통해 실리콘의 최종 두께가 200nm 정도가 되도록 실리콘 산화막을

성장시킨다(Fig. 1(d)). 마지막으로 RIE 공정과 BOE 용액 이용하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층과 SiO<sub>2</sub> 층을 제거한다(Fig. 1(e)).

나노임프린트 몰드 제작공정에서 사용된 모든 공정은 기본적인 MEMS bulk micromachining에 기반한 것으로, 한장의 포토마스크(photomask)와 단결정 <100> 실리콘 웨이퍼를 이용하여 만들 수 있어 기존의 다른 제작 방법에 비하여 저비용·고효율의 장점을 가진다. 제작된 몰드를 이용하여 가열프레스기를 통해 나노임프린팅을 수행한다. 임프린팅 조건은 175°C의 온도 및 5 × 10<sup>6</sup> Pa의 압력 아래에서 5분간 수행되었다. 이후 60°C 이하로 식힌 후 PMMA 구조물은 몰드로부터 떼어내었다.

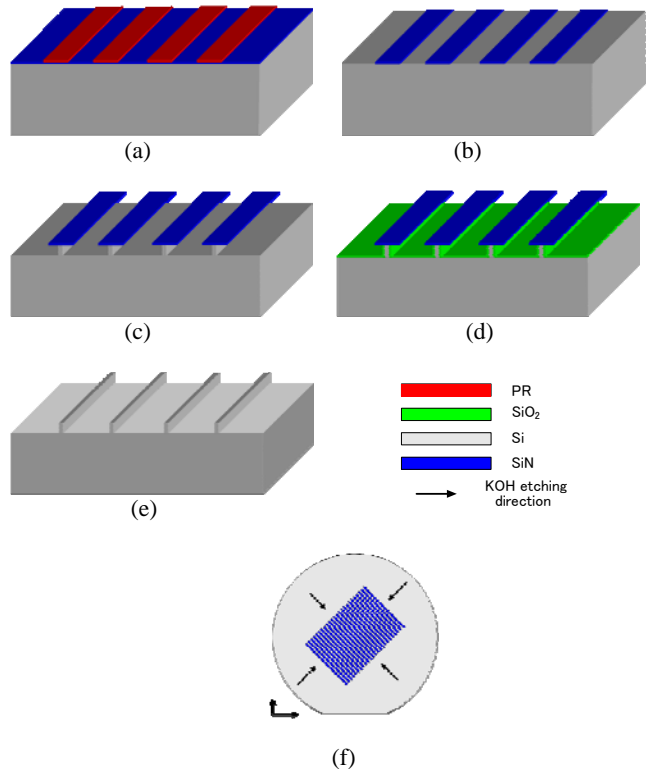


Fig. 1 Silicon nanoimprint mold arrays fabrication steps. (a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> deposition and photolithography, (b) RIE of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Anisotropic Si etching using KOH solution resulting in vertical Si structures, (d) Local Oxidation of Silicon (LOCOS), (e) BOE wet etching and RIE for SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layer removal, (f) Illustration showing the top side view of the pattern alignment scheme for anisotropic Si etching in KOH solution.

## 3. 결과 및 토의

Fig. 2는 200nm의 폭과 1.1µm의 높이를 가지는 고세장비 실리콘 나노임프린트 몰드(5.5:1)의 SEM 사진이다. Fig. 3은 나노임프린트를 통해 형성된 PMMA 나노트렌치 어레이의 현미경 이미지와 SEM 사진을 보여주고 있으며, 그 크기는 폭 250 nm와 깊이 1.2 µm이다.

이와 같은 나노트렌치로부터 나노채널을 만들기 위해서는 나노트렌치를 실링을 해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 PMMA 나노채널을 형성하기 위해 솔벤트 증기를 이용하여 실링하는 방법을 개발하였다. Fig. 4는 약 10 초 톨루엔 증기를 나노트렌치에 가한 후 나노채널이 형성된 사진을 나타낸다. 고세장비의 기하학적 구조 덕분에 나노채널의 표면에만 톨루엔 증기의 영향을 받아 채널이 실링되고 그 내부에는 영향을 미치지 않는다. 즉, Fig. 4(b)에서 보이는 바와 같이 솔벤트를 이용한 실링 과정 중 나노트렌치의 바닥 쪽에서는 채널이 형성되었으며 그 채널 폭은 변화가 없는 것을 알 수 있다.

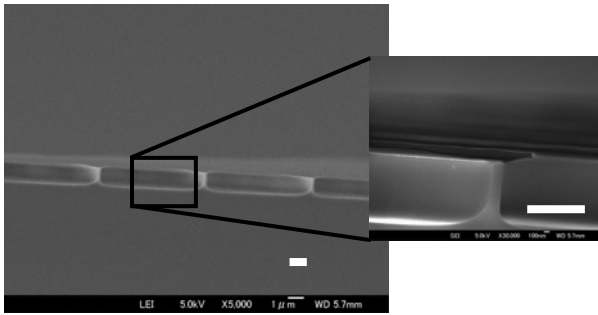
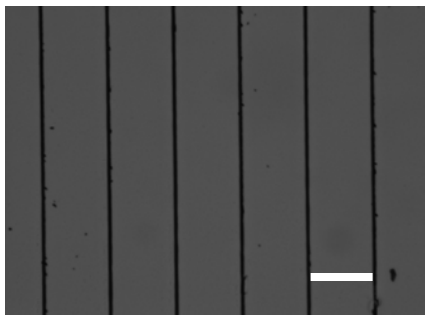
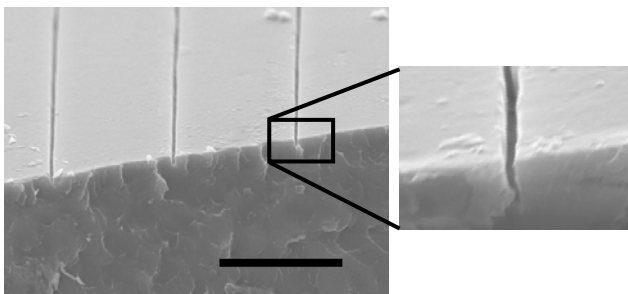


Fig. 2 SEM images of a high-aspect-ratio Si nanoimprint mold before removing  $\text{Si}_3\text{N}_4$  layer. Width and height of the Si structures are 200 nm and 1.1  $\mu\text{m}$ , respectively. (Scale bar: 1  $\mu\text{m}$ )

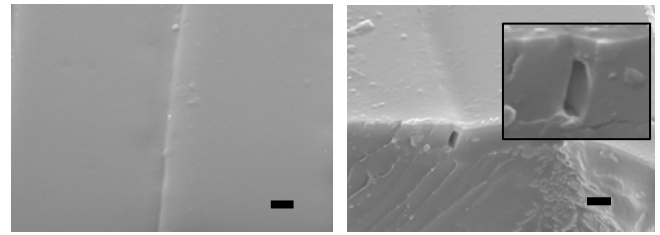


(a)



(b)

Fig. 3 Arrays of PMMA nanotrenches after nanoimprinting. (a) A microscopy image and (b) an SEM image. Width and height of the PMMA nanochannels were 250 nm and 1.2  $\mu\text{m}$ , respectively. (Scale bar: 20  $\mu\text{m}$ )



(a)

(b)

Fig. 4 SEM images of PMMA structure after imprinting and solvent assisted sealing of nanochannels. (a) Top-side view and (b) cross-section view. Width and height of the PMMA nanochannels were 250 nm and 1.2  $\mu\text{m}$ , respectively. (Scale bar: 2  $\mu\text{m}$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 실리콘의 이방성 KOH 에칭과 LOCOS, 그리고 나노임프린팅과 솔벤트 증기를 이용한 실링 방법을 이용하여 간단하고 저비용으로 고세장비의 PMMA 나노채널을 제작하는 방법을 개발하였다. 제작된 나노채널은 그 제작 방법이 비교적 간단하며, 나노채널의 대량생산에 적합한 방법으로, 현재 그 특성 파악을 위해 테스트 중에 있으며 DNA 분자 검출과 같은 분야에 응용가능할 것이다.

#### 후기

This work was supported by the Practical Application Project of Advanced Microsystems Packaging Program of Seoul Technopark, funded by the Korean Ministry of Knowledge Economy (Grant # 10029790).

#### 참고문헌

1. Graighead, H.G., "Future lab-on-a-chip technologies for interrogating individual molecules," *Nature*, **442**, 387-393, 2006.
2. Abgrall, P., and Nguyen, N.T., "Nanofluidic devices and their applications," *Anal. Chem.*, **80**, 2326-2341, 2008.
3. Cho, Y.H., Lee, S.W., Kim, B.J., and Fujii, T., "Fabrication of silicon dioxide submicron channels without nanolithography for single biomolecule detection," *Nanotechnology*, **18**, 465303-465308, 2007.
4. Chou, S.Y., Krauss, P.R., and Renstrom, P.J., "Imprint lithography with 25-nanometer resolution," *Science*, **96**, 85-87, 1996.