집속이온빔을 이용한 마이크로 노즐의 제작

김규환*, 민병권, 이상조(연세대학교 기계공학부)
박철우, 이종항(한국산업기술대학교 기계공학과)

Machining of The Micro Nozzle Using Focused Ion Beam

G. H. Kim, B.- K. Min, S. J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)
C. W. Park, J. H. Lee (Department of Engineering, Korea Polytechnic University)

ABSTRACT

Micro nozzle is employed as a dynamic passive valve in micro fluidic devices. Micro nozzle array is used in micro droplet generation in bio-medical applications and propulsion device for actuating satellite and aerospace ship in vacuum environments. Aperture angle and the channel length of the micro nozzle affect its retification efficiency, and thus it is needed to produce micro nozzle precisely. MEMS process has a limit on making a micro nozzle with high-aspect ratio. Reactive ion etching process can make high-aspect ratio structure, but it is difficult to make the complex shape. Focused ion beam deposition has advantage in machining of three-dimensional complex structures of sub-micron size. Moreover, it is possible to monitor machining process and to correct defected part at simultaneously. In this study, focused ion beam deposition was applied to micro nozzle production.

Key Words : Micro nozzle (마이크로 노즐), Focused ion beam (집속이온빔), Deposition (증착), Ion milling (이온밀링)

1. 서론

마이크로 노즐 (micro nozzle)은 마이크로 유체의 흐름을 제어하는 부품으로서 바이오멤스(bio-MEMS)기술을 이용한 의약품 제조 시 미세액적의 형성 [1], 우주선 추진체에 응용되는 마이크로 액추에이터 분사노즐 [2] 등에 사용된다. 기존의 마이크로 노즐의 제작 방법은 멤스공정을 이용한 실리콘 웨이퍼의 이방성 에칭을 이용하는 방법이 많이 연구되어 왔는데, 이와 같은 방법은 실리콘 웨이퍼의 특성에 따라 영향을 받으므로 노즐형상의 구현에서 일정한 에칭 각도를 갖는 피라미드형태로 가공이 되어 노즐형상의 구현에 제한이 있다. 반응성 이온 에칭(reactive ion etching, RIE)은 마스크를 이용하여 형상을 비교적 높은 세장비로 가공이 가능하지만 형상의 자유도에 제한이 있어 임의의 3 차원 노즐 형태를 가공하는 것은 불가능하다.

마이크로 노즐의 형상은 마이크로 유체의 유동 특성에 영향을 주는 요소로서 마이크로 노즐의 성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 노즐의 확산 각도와 길이, 유체 유입구의 형상은 흐름의 상류와 하류간의 압력 차에 따른 포텐셜 에너지의 변환효율에 영향을 주므로 [3], 일정효율이 요구되는 노즐의 형상을 만족시킬 수 있는 가공방법이 요구된다.

본 연구에서는 집속이온빔 (Focused Ion Beam, FIB) 증착 (deposition)을 적용하였다. 집속이온빔 증착은 이온빔을 조사할 때 함께 주입한 텅스텐, 탄소 화합물의 가스 반응을 이용하여 원하는 위치에 미세구조물을 증착시켜 가공하는 방법이다. 가공과 동시에 이차 전자(secondary electron)를 이용하여 형상을 바로 측정하여 동일 장비 내에서 이온밀링(ion milling)의 방법으로 형상의 수정이 가능하다. 이를 통하여 마이크로 노즐의 미세한 형상구현의 자유도가 높은 편이다. 또한 마스크 사용 등의 여러 단계의 공정을 거치지 않고 단일 공정으로 미세구조물을 가공할 수 있으며 수십 나노미터 크기의

이온빔을 이용함으로써 작은 형상의 구현이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 집속이온빔 증착을 이용하여 마이크로 노즐의 증착 시 필요한 조건을 얻기 위한 기초실험과 이를 통해 얻은 조건으로 원형, 사각, 타원형의 마이크로 노즐을 증착하여 노즐의 형상과 가공특성을 관측하였다.

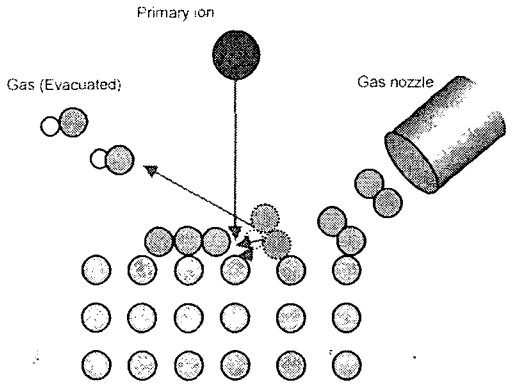


Fig. 1 Schematic diagram of focused ion beam induced deposition

2. 집속이온빔을 이용한 증착

2.1 이온빔 증착

이온빔이 시료표면에 가속하여 조사하게 되면, 시료원자와의 충돌에 의한 스퍼터링(sputtering)이 발생하게 된다. 시편의 원자간 결합에너지보다 큰 에너지를 전달하게 되면 원자가 제거되는 에칭(etching)이 일어나며, 시편의 이온화된 입자(secondary ion)과 이차전자 (secondary electron)가 발생하게 된다. 이온빔 증착은 이때 발생하는 이차전자를 이용하며, 먼저 시료표면에 증착시키고자 하는 물질의 화합물을 기화시켜 시료 위에 흡수시킨다. Fig.1 과 같이 표면에 도포된 화합물은 가속된 이온의 충돌로 발생한 이차전자와 반응하여 기체와 고체로 생성되어 기체는 저압의 챔버내에서 제거되고, 고체는 시료표면에 증착된다.

2.2 증착 조건

이온빔 가공시 주요설정변수는 단위면적당 이온빔전류량(ion beam current), 드웰타임(dwell time), 오버랩(overlap)과 이온도즈(ion dose)가 있다[4]. 이온빔 전류량은 이온소스에서 발생하는 이온이 어퍼쳐(aperture)의 원형 홀의 크기에 따라 통과하는 양이 달라진다. 이온빔 전류량은 패러데이컵을 이용하여 측정한다. 통과한 이온은 일정한 크기로 집속되므로 이온빔의 직경(beam size)는 이온빔 전류에 종속적으로 결정된다. 드웰타임은 이온빔이 시료표면을 조사하는 속도로서 각 조사지점에 이온빔이 머무는 시간이다. 오버랩은 가공 영역 내에 이온빔이 조사될 때 이온빔과 이온빔이 조사되는 거리로서 이온빔의 직경을 기준으로 겹쳐지는 비율이다. 일정면적에 대하여 오버랩을 주어 이온빔을 조사하는 방식은 평행하게 순차적으로 조사하는 수평주사방식의 래스터 스캔 방법(raster scan method)을 사용하였다. 이온도즈는 단위면적당 조사되는 이온의 개수로서 이온의 양에 따라 에칭의 경우 가공깊이, 증착시에는 증착 높이를 설정하는 기준이 된다.

본 연구에서 마이크로 노즐의 제작은 이온빔 가공장치에 설치되어 있는 기능으로서 3 차원 CAD 파일에서 여러 개의 이미지 파일을 생성하여 각 층별로 증착하는 기능을 활용하였다.

3. 마이크로 노즐 증착 실험

3.1 실험조건

사용장비(SMI2050, SII Nanotechnology)는 전극형태로서 갈륨이온(Ga+)의 액체이온소스 (Liquid Metal Ion Source, LMIS)를 사용한다. 이온소스에서 7 kV의 추출전압을 인가하여 생성된 갈륨 이온을 30 kV로 가속시켜 사용하며, 증착시 사용되는 화합물은 $C_{14}H_{10}$ (Phenanthrene)와 $W(CO)_6$ (Hexacarbonyl)이다. 표면에 갈륨 이온을 조사할 때 발생하는 이차전자를 측정하여 표면의 형상을 관측할 수 있다.

3.2 가공조건에 따른 증착 특성

이온빔 증착 가공시 설정조건은 이온빔 전류와 드웰타임 오버랩이 있으며, 노즐을 증착하기 위한 조건확인을 위하여 1 탆 ? 1 탆 의 영역에 일정량의 이온조사량에 따른 증착특성과 증착율(deposition rate)을 확인하였다. $C_{14}H_{10}$의 증착율은 0.9 nm/ 10^{15} Ga^+이며, 이온빔 전류와 오버랩에 따른 증착 실험을 통하여 마이크로 노즐의 가공조건을 설정하였다

3.2.1 이온빔 전류

1 탆 ? 1 탆 의 실리콘 웨이퍼 위에 1.1? 0^{18} Ga^+/cm^2 의 이온도즈량을 조사하여 탄소를 증착 할 때 이온빔 전류를 각각, 8.3 pA, 48 pA, 193 pA, 1318 pA 으로 전류의 양을 변화시켰다. 드웰타임은 모두 0.5 탎ec, 스캐닝하는 빔간의 간격은 50 nm 의 간격으로 - 46 %의 오버랩[4]으로 설정하였다. 각 면적에 대한 증착 높이는 Fig. 2 와 같으며 이온빔의 전류값이 커질수록 증착되는 양이 감소하며, 190 pA 이상의 전류값에서는 이온빔이 조사된 부위에서 증착이 일어나지 않고, 에칭 현상이 나타났다.

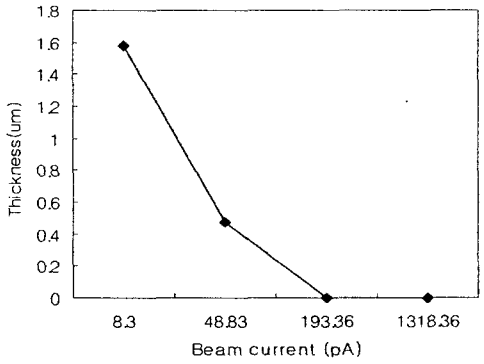
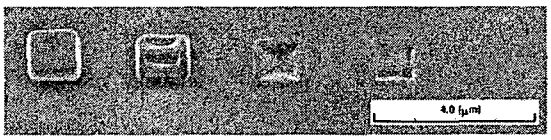
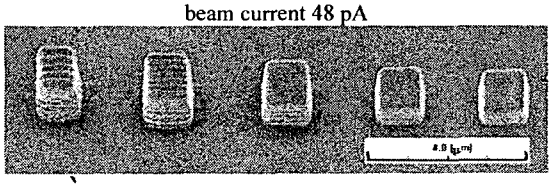


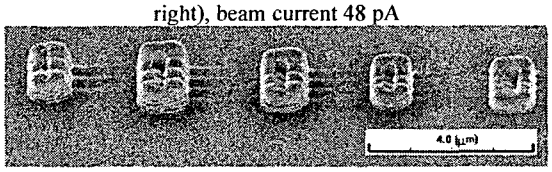
Fig. 2 Thickness of carbon on silicon w.r.t. beam current



(a) Dwell time (탎ec): 1, 10, 100, 1000 (from left to right), beam current 48 pA



(b) Overlap (%): -800, -600, -400, -200, -100 (from left to right), beam current 48 pA



(c) Overlap (%) : -900, -800, -700, -600, -500 (from left to right), beam current 193 pA, dwell time: 0.5 탎ec

Fig. 3 Images of 1탏 ? 1탏 carbon deposition

3.2.2 드웰타임, 오버랩

앞의 실험에서 이온빔 전류가 강한 경우 증착보다 에칭이 일어나므로 48 pA 의 이온빔 전류를 사용하여 드웰타임과 오버랩의 변화에 따른 증착 특성을 확인하였다. Fig.3 은 오버랩을 -46 %일 때 드웰타임에 따른 경우와, 드웰타임을 0.5 탎ec 일 때 오버랩다르게 하여 탄소를 증착하였고 결과는 Fig. 4 와 같다. 드웰타임이 증가하게 되면 이온빔의 전류가 커지는 것과 같이 에칭 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 오버랩이 증가하는 경우 이온빔과 이온빔의 간격이 넓어지므로 Fig. 3(c)와 같이 오버랩의 값이 작을 때 구조물내의 증착되지 않은 영역이 형성된 것을 볼 수 있다.

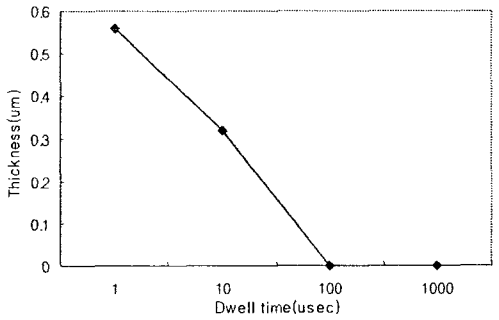


Fig. 4 Thickness of carbon on silicon wafer w.r.t. dwell time

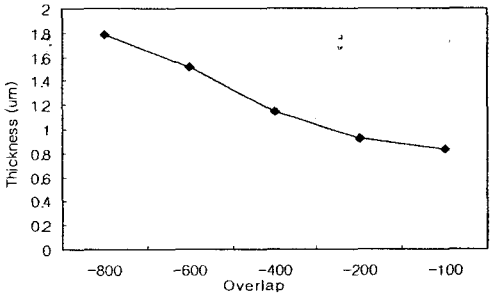


Fig. 5 Thickness of carbon on silicon wafer w.r.t. overlap

3.3 마이크로 노즐 증착

이온빔 전류와 오버랩, 드웰타임에 따른 증착특성 실험결과를 바탕으로 적절한 가공조건인 전류량 48 pA (이온빔 직경 23 nm), 드웰타임 0.5 탎ec, 오버랩 - 46 %으로 원형, 사각형, 타원형의 마이크로 노즐을 제작하였다. 각 노즐 가공을 위한 이미지 파일은 CAD 소프트웨어 SolidEdge 를 사용하여 디자인한 모델을 각각의 여러 단면의 이미지 파일로 변환하여 증착에 사용하였다.

3.3.1 모제 시편에 따른 특성

실리콘 웨이퍼와 텅스텐, 니켈 시편 위에 탄소를 증착하여 노즐을 제작하였다. 각 시편 위에 형성될 노즐은 외경 하부 3 탏, 상부 800 nm 이고 내경 상부 300 nm, 하부 500 nm, 높이 2 탏 로 공정을 설계하여 가공하였다. 실리콘웨이퍼, 텅스텐, 니켈 등 서로 다른 시편 위에서 노즐을 증착할 때 증착된 노즐의 형상은 Fig.6 과 같고 각 노즐간의 크기 차이가 50 nm 이내로서 노즐이 증착되는 하부의 종류는 증착 특성에 크게 영향을 주지 않았다.

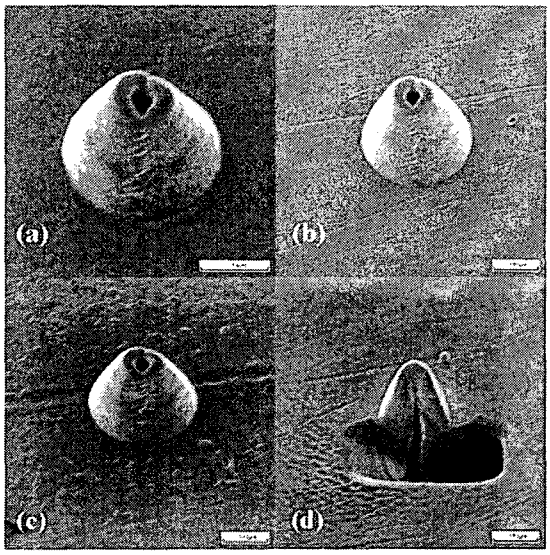


Fig. 6 Circular micro nozzle deposition on (a) silicon wafer, (b) tungsten and (c) nickel plate. (d) Cross section of nozzle of (b)

3.3.2 노즐디자인

이미지파일의 적층을 통해 노즐을 증착할 때 디자인한 노즐에 비해 외경은 커지고, 내경은 작아지게 된다. 47 pA 인 이온빔의 빔직경은 23 nm 으로서 스팟(spot)빔으로 증착시 실제 증착되는 크기는 210 nm 으로 이온빔의 직경보다 증착되는 증착물의 직경이 크게 나타났다. 따라서 이미지 파일을 이용한 마이크로 노즐의 가공 시 외경의 크기는 증가하고 내경의 크기는 작아지게 된다. Fig.6(d) 의 노즐의 단면의 경우, 빔의 직경보다 크게 증착되는 현상에 의해 내부 직경이 감소한 것을 볼 수 있다. 이미지 파일의 내경 크기는 2.5탆 으로 단일 빔의 증착에서 확인한 증착 폭의 증가를 고려할 때 내경이 210 nm 감소한 약 2.3 탆 으로 예상할 수 있으나, 실제 증착된 노즐하단부 내경은 0.5 탆 으로 예상보다 감소하였고, 이것은 가공이 진행됨에 따라 이미지파일의 내경의 크기가 작아지고 노즐의 내부에 해당되는 영역으로 이온빔이 조사되어 디자인된 내경보다 안쪽의 영역에서 발생하는 증착에 의한 것으로 판단된다. 노즐의 높이는 이온도즈량에 따라 결정되며, Fig. 7 은 도즈량을 증가시켜 5 탆 높이의 원형과 사각형의 노즐을 증착한 것을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 액체이온소스로 갈륨이온을 사용하여 마이크로 노즐을 가공하였다. 집속이온빔 증착을 이용한 미세구 조물의 제작에 대한 기초연구로서

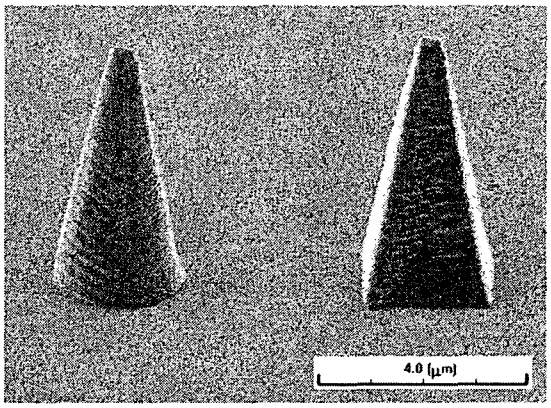


Fig. 7 Circular nozzle of 2.3 탆 diameter and pyramid shaped micro nozzle with 2.3 탆 width and 5um height

기초실험을 통하여 5 μm 이하의 외경과 300 nm 이내의 내경을 갖는 원형, 사각형, 타원형의 마이크로 노즐을 제작하였다. 조사된 빔의 드웰타임과 오버랩의 가공조건의 실험을 통하여 노즐 증착에 적절한 이온빔 전류량, 드웰타임을 구하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 산업기술기반조성사업인 마이크로 나노 점·선 가공기반 구축 사업의 결과물입니다.

참고문헌

1. Sugiura, S., "Size control of calcium alginate beads containing living cells using micro-nozzle array," Annals of Biomaterials, Vol. 26, pp. 3327-3331, 2005.
2. Xiang, J., Xhoua, X., Sun, D., "Propulsion device for actuating satellite, aerospace ship in vacuum environment", Annals of Sensors and Actuators, Vol. A117, pp.168-172, 2005.
3. Gerlach, T.,"Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump application," Annals of Sensors and Actuators, Vol. A69, pp. 181-191, 1998.
4. 한진, "집속이온빔을 이용한 나노패턴 형성," 춘계정밀공학회 학술대회, 2005.