

# FIB를 이용한 마이크로 플라즈마 전극 개발

최헌종\*, 강은구\*, 이석우\*, 홍원표#

## Development of Micro Plasma Electrode using Focused Ion Beam

Hon-Zong Choi\*, Eun-Goo Kang\*, Seok-Woo Lee\*, Won-Pyo Hong#

### ABSTRACT

The application of focused ion beam (FIB) technology in micro/nano machining has become increasingly popular. Its use in micro/nano machining has advantages over contemporary photolithography or other micro/nano machining technologies such as small feature resolution, the ability to process without masks and being accommodating for a variety of materials and geometries.

In this research, fabrication of micro plasma electrode was carried out using FIB. The one of problems of FIB-sputtering is the redeposition of material including Ga<sup>+</sup> ion source during sputtering process. Therefore the effect of the redeposition was verified by EDX. And the micro plasma electrode of copper was fabricated by FIB.

**Key Words** : Micro plasma electrode(마이크로 플라즈마 전극), FIB(Focused Ion Beam), Nano machining technology(나노가공기술), Sputtering

### 1. 서론

최근 마이크로 및 나노가공기술에 있어 소형화에 대한 주제가 대두되고 있는데, 이는 다양한 제품들에 이용되는 많은 부품들이 점점 작아지고 있기 때문이라고 할 수 있다.

FIB 이용 나노 가공공정 기술은 신산업의 정밀도 요구에 부응하는 극미세/극초정밀 제품의 제조에 기여하며, 나아가서는 이와 같은 응용 기술을 야기함으로써 생산기술 전반에 걸친 막대한 기술적 파급효과와 정보통신기술, 바이오기술, 환경기술, 우주항공기술, 로봇기술 등과 연관된 Synergy 효과

를 미칠 것으로 예상된다. 현재 FIB 장비의 주용도는 TEM 시편 제작, 반도체 패턴 유지 및 보수 등에 국한되어 있으며, 기타 응용기술에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 반해 나노 가공기술은 초소형 정밀 마이크로 부품 및 첨단 디바이스 개발 등에 필요한 기능성 재료의 가공을 실현하기 위해서 필수적으로 요구되는 기술이며, 그 응용분야는 더욱 확대될 것이다.

FIB는 매우 짧은 파장과 매우 높은 에너지를 이용하기 때문에 1 $\mu$ m 이하의 크기를 갖는 구조물의 직접 제작이 가능하다. 따라서 높은 성능을 갖는 마이크로 장치나 높은 정밀도를 갖는 마이크로 구

접수일: 2004년 8월 27일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

\* 한국생산기술연구원 나노가공팀

# 교신저자: 한국생산기술연구원 나노가공팀

E-mail wonpyodr@kitech.re.kr Tel. (032) 850-0306

조물의 제작에 있어 최근에 그 이용범위가 널리 확대되고 있는 추세이다. 현재 FIB는 반도체 산업에서 매우 강력한 도구로 이용되고 있으며, 주로 마스크 수리, 장치 교정, 결함 분석, 집적회로의 오류 수정 등의 용도로 사용되었다. FIB의 기본적인 기능으로는 모재를 제거함으로써 원하는 형상을 만드는 Sputtering, 특정 재료를 쌓아가며 구성된 재료에 기능 또는 형상을 유도하는 CVD, 특정 재료를 침투시켜 그에 상응하는 기능을 유도하는 Implantation과 재료를 분석할 수 있는 기능이 모두 가능하다.

FIB를 이용한 Sputtering에 있어 중요한 파라미터는 이온빔 직경, 분포, 전류와 에너지이며, 최종적으로는 복잡한 3차원 형상을 높은 정밀도로 가공하기 위해 원하는 위치와 요구되는 재료 제거량을 고려하여 적절한 파라미터 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1</sup> 그러나 강력한 이온에너지가 시편에 충돌될 때, 이온과 시편과의 상호 작용에 의한 부풀어 오름, 증착, 침투, 되튀김 현상 등이 발생할 수 있다.<sup>7</sup>

Sputtering에서 보다 중요한 상호작용은 이온에서 재료로 얼마나 충분한 에너지가 전달되는가 하는 것이며, 이러한 에너지의 크기에 의해 재료 제거시 발생하는 중요한 두 가지 현상인 Sputtering과 재증착(redosition) 과정에 많은 영향을 미치게 된다. FIB에서 대부분의 기계 재료에 대해 적절한 이온 에너지는 10-100keV 영역에 해당된다. 그러나 100keV이상일 경우 이온이 재료에 침투하여 재료 내부에 갇혀 버리는 현상이 발생한다.

최근 FIB의 Sputtering 관련 기능이 광학적, 자기적, 전기적, 전자적, 기계적, 열유체학적, 생화학적, 생물 의료 분야의 다양한 제품 제작에 적용되고 있다.<sup>2,3,4</sup> 이러한 관심이 다양한 Sputtering 관련 연구로 이어져, 마이크로 디바이스나 구조물의 정밀가공을 주제로 한 연구가 활발해지고 있다. 기존 FIB를 이용한 Sputtering 관련된 연구는 이온 종류, 입사각, 이온에너지 그리고 시편과 이온과의 상호작용 등이 수치적인 계산과 실험 결과와의 정량적인 비교를 통해 수행되었으며, 결과적으로 정밀 Sputtering 가공의 최적 조건을 찾기 위한 연구가 주로 진행되었다.<sup>1,5,6</sup> 특히, Sputtering시 최근까지도 문제가 되고 있는 현상인 재증착 현상에 관한 연구가 진행되고 있으며, 기초적인 단일경로를 가공함으로써 발생하는 가공 형상 연구뿐만 아니라, 다중경로

를 통한 재증착 또한 연구되고 있다. 원하는 형상의 가공시 Sputtering의 주사 순서에 따른 효과에 대한 연구도 진행되고 있다.

본 논문에서는 FIB Sputtering에 관한 현재까지의 연구결과를 토대로 FIB의 재증착 현상을 조건에 따라 관찰하였다. 재증착 현상을 관찰하기 위해서 EDX를 이용하여 성분을 분석하였고, 결과적으로 마이크로 플라즈마 전극제작에 필요한 적정 가공 조건을 유추하는데 이를 활용할 수 있었다.

## 2. FIB 장비 개요

Fig. 1은 본 논문의 가공 실험에 사용된 FIB 장비이며, 일본 SEIKO사의 SMI8800이다. 초고진공 상태를 효과적으로 유지하면서 시편을 진공 챔버내로 삽입하거나 제거하기 위한 load-lock 장치가 설치되어 있다. Table 1은 이온의 집속 또는 수차제거 등에 관한 사양을 나타내었다. 이온 소스는 Ga<sup>+</sup>를 이용하고 있으며, 렌즈는 상하 두 개를 가지고 있다. 또한 하부에 있는 aperture는 5개의 직경으로 자동 조절이 가능하며, 배율은 80,000배까지 가능하다. 최소 분해능은 0.03 $\mu$ m 정도이며, 이때의 적정 가속도는 30keV 이다.

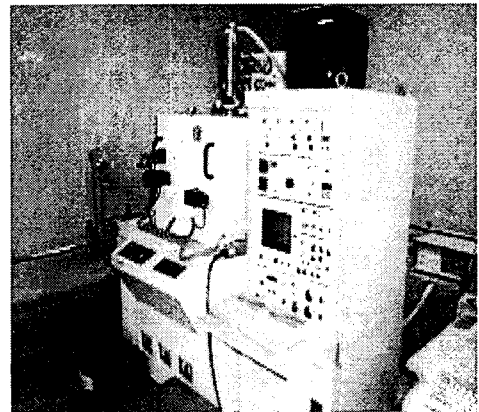


Fig. 1 Ion Beam (SMI8800, SEIKO, Japan)

이송스테이지는 X, Y, Z,  $\theta$ , Tilting의 총 5축으로 구성되어 있다. 이송범위는 200×200×20mm이며, 분해능은 수백nm 정도이다.

Table 2는 진공 챔버내의 진공펌프 관련 사항으

로  $10^{-7}$ -  $10^{-8}$  torr 정도의 진공도의 유지가 가능하다. 이중 이온 챔버가  $5 \times 10^{-7}$  torr 정도로 가장 낮은 진공을 유지하며, 메인 챔버는  $5 \times 10^{-6}$  torr 정도이다.

Table 1 Specifications of ion optical system

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Ion Source            | Ga <sup>+</sup> LMIS                          |
| Lens                  | 2 lens electrostatic                          |
| Astigmatic Correction | 8 pole electrostatic                          |
| XY deflection         | Electrostatic                                 |
| Blanking              | Electrostatic                                 |
| Aperture              | Adjustable(5 settings)                        |
| Accelerated Voltage   | by 5kV steps<br>(20kV-50kV)<br>(30kV recomm.) |
| Magnification         | 100× - 8000×                                  |
| Resolution            | 0.03μm<br>(with acc. vol. at 30kV)            |

Table 2 Specifications of system

|                   |              |  |
|-------------------|--------------|--|
| Evacuation System | Main Chamber | 1000l/sec Magnetic levitation TMP<br>340(50Hz)/410(60Hz)l/min RP                                       |
|                   | Ion Source   | 200l/sec Magnetic levitation TMP<br>340(50Hz)/290(60Hz)l/min RP  |
|                   | Sub Chamber  | 50l/sec Noncontact levitation TMP  |
| Ultimate Vacuum   | Main Chamber | $5 \times 10^{-7}$ torr or less<br>( $3 \times 10^{-7}$ torr or less using liquid N <sub>2</sub> trap) |
|                   | Ion Chamber  | $5 \times 10^{-7}$ torr or less  |
|                   | Sub Chamber  | $5 \times 10^{-6}$ torr or less  |

### 3. 마이크로 전극 가공

#### 3.1 실험 조건

마이크로 플라즈마용 전극제작을 위해 기존 레이저 및 초음파와 같은 가공법의 문제점인 가공표

면이나 최소 크기제약을 극복하고자 FIB를 이용한 미세 형상을 제작하고자 하였다. 사용하고자 하는 전극은 ITO 재질이며, 베이스로 Glass를 사용하였다. 가공 사이즈는  $2 \times 50 \mu\text{m}$ 이며, Table 3에 FIB의 작동에 필요한 기본 조건에 대한 측정값을 나타내었으며, Table 4는 마이크로 전극제작을 위한 실험 조건들을 나타내었다.

Table 3 Operating conditions of FIB

|                     |   |
|---------------------|---|
| Ion beam source     | Ga <sup>+</sup>   |
| Accelerated Voltage | 20kV  |
| Vacuum              | Ion chamber : $1 \times 10^{-7}$ Torr<br>Main chamber : $1 \times 10^{-6}$ Torr |
| Aperture size       | Φ 100 μm  |
| Magnification       | 1000×   |

Table 4 Scan speed and time conditions

|          | Scan speed (sec/frame) | Scanning time (second) |
|----------|------------------------|------------------------|
| Test I   | 0.2                    | 600                    |
| Test II  | 0.2                    | 1200                   |
| Test III | 0.2                    | 1800                   |

#### 3.2 마이크로 전극 제작

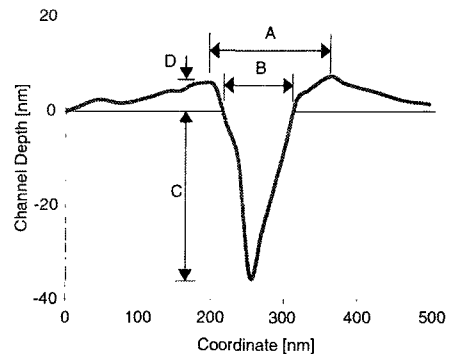


Fig. 2 The profile estimated and feature definitions

일반적으로 알려져 있는 FIB sputtering후의 단면 형상은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 V형상을 나타낸다. 여기서 B영역이 빔이 주사된 영역이며, C영역이 실제로 가공되는 형상의 깊이이다. 기타 D영역은 재증착되는 최대 깊이를 나타내며, 이 지점의 폭이 A영역이 된다.

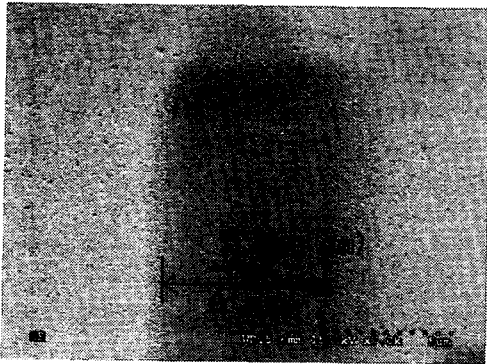


Fig. 3(a)Photograph of FE-SEM (Test I)

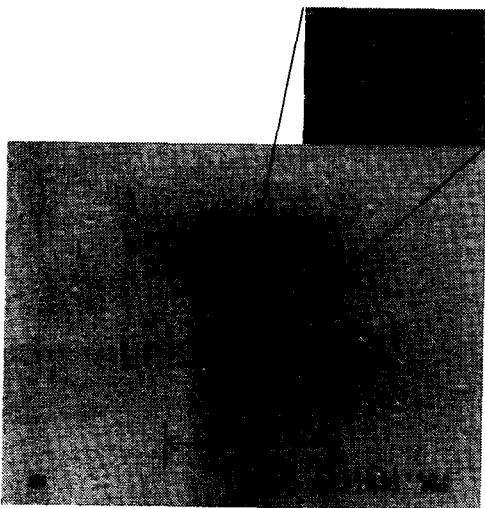


Fig. 3(b)Photograph of FE-SEM (Test II)

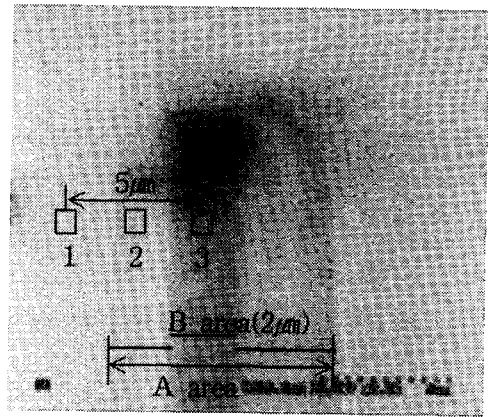


Fig. 3(c)Photograph of FE-SEM (Test III)

Fig. 3은 FIB를 이용한 sputtering 가공 결과이다. Fig. 3에 sputtering시 주요 관심 영역인 A, B영역에 대한 표시가 되어있으며, B영역의 크기는 2µm 정도이다. Fig. 3의 경우 Test I에서 Test III으로 갈수록 가공 깊이(C영역)가 깊어짐을 FE-SEM이미지를 통해 예측 가능하다. 또한 A영역이 상대적으로 넓어지고 있으며, 이는 이온빔의 주사량에 따라 sputtering량이 많아지며, 이에 따라 sputtering 깊이의 증가 및 재증착량의 증가에 따른 A영역의 증가로 판단된다. 그러나 A영역의 증가는 D영역의 결과와 상대적인 비교 평가를 수행하여, 재증착과정의 메커니즘 규명이 필요한 것으로 판단된다. Fig. 3(c)의 경우 좌우측이 비대칭적인 것을 확인할 수 있으며, 이는 이온빔 주사 방향과 시편 설치 방향의 얼라인 오차로 인한 것으로 판단된다. Fig. 3(b)의 경우 중앙부위에 불룩하게 튀어나온 물질이 존재함을 확인할 수 있었으며, 주사되는 Ga<sup>+</sup>의 재증착 영역을 확인하기 위해 Fig. 3(c)에 표시된 3곳을 EDX 분석하였다. 실험결과가 Table 5에 나타나 있다. 실험결과 1번 지점에서는 Ga<sup>+</sup>이 거의 발견되지 않았으며, 2번과 3번지점에서는 5%정도의 Ga<sup>+</sup>이 관찰되었다. 결과적으로 Ga<sup>+</sup>의 재증착 영역은 A영역에 국한되는 것으로 판단된다.

Table 5 EDX measurement results

| Element | 1<br>Weight(%) | 2<br>Weight(%) | 3<br>Weight(%) |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| O       | 68.23          | 67.28          | 66.51          |
| Si      | 24.54          | 25             | 25.79          |
| Ga      | -0.79          | 5.36           | 5.6            |
| In      | 5.39           | 0.5            | 0.3            |
| Sn      | 2.64           | 1.86           | 1.8            |

Fig. 4는 재증착 영역을 확인하기 위하여 EDX 측정된 결과이다. 이는 ITO전극 위에 베이스 재료인 Glass가 재증착될 경우 전극의 성능을 저하시키기 때문이다. Test III의 B영역 폭이 2 $\mu$ m임에도 불구하고 Si과O의 양이 30 $\mu$ m정도에서 주변보다 상당히 많이 측정된 것으로 볼 때 Glass 재증착이 있는 것으로 판단된다. ITO 전극에는 Si가 존재하지 않으나 Si이 나타난 것은 FE-SEM의 전자가 ITO를 투과하기 때문인 것으로 판단된다.

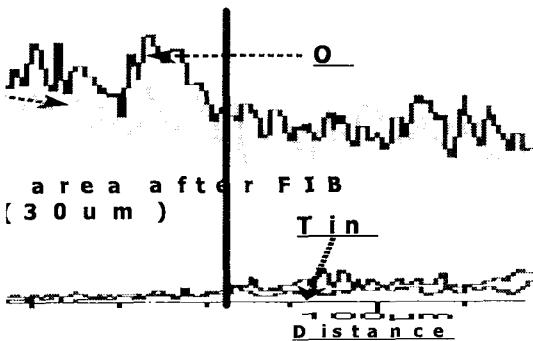


Fig. 4 Element distributions according to locations by EDX (Test III)

Fig. 5는 구리 플라즈마 전극을 FIB를 통해 제작한 사진이다. 전극의 폭은 100 $\mu$ m이며, 가공 조건으로 Scan Cycle Time은 0.033 (sec/frame)이다. 가공된 패턴의 폭은 10 $\mu$ m이며, 두께는 20 $\mu$ m이다. 가공 소요 시간은 10시간 정도 걸렸으며, 제작된 전극을 이용한 플라즈마 특성을 향후 연구할 예정이다. 이를 통해 Ga<sup>+</sup>의 재증착 현상이 플라즈마 전극의 특성에 미치는 영향을 분석할 수 있을 것으로 예상된다

다.

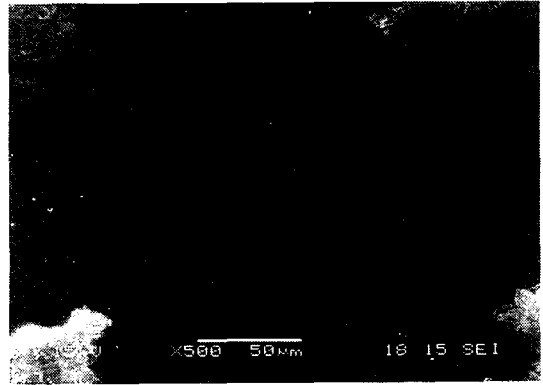


Fig. 5 Photograph of FE-SEM of micro plasma electrode consisting of copper

#### 4. 결론

FIB 기술은 아직 다른 반도체 제작 공정에 비해 상대적으로 여전히 연구가 미흡한 상황이다. 이에 기존의 FIB sputtering시 관찰되는 재증착 현상에 대한 분석과 마이크로 플라즈마 전극개발을 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 이온주입량(주사시간)에 따라 가공깊이의 증가 및 재증착으로 인한 주변 영향영역도 증가됨을 알 수 있었다.

둘째, 이온소스(Ga<sup>+</sup>)의 재증착에 의한 영향은 시편에 의한 영향에 비해 상대적으로 좁은 영역에서 관찰되었다.

셋째, FIB sputtering에 의한 재증착 현상을 검증하기 위해 EDX측정을 실시하였으며, 효과적인 분석이 가능하였다. 따라서 향후 AFM측정과 동시에 수행한다면 좋은 분석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

넷째, FIB sputtering를 이용한 구리 플라즈마 전극을 제작하였고, 전극 가공까지 소요된 시간은 10시간정도 걸렸다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업

“이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Yamaguchi, H., Shimase, A., Haraichi, S. and Miyauchi, T., "Characteristics of Silicon Removal by Fine Focused Gallium Ion Beam," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 3, No. 1, pp. 71-74, 1985.
2. Melngailis, J. and Musil, C., "The Focused Ion Beam as An Integrated Circuit Restructuring Tool," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 4, No. 1 pp. 176-180, 1987.
3. Harriott, L., Scotti, R., Cummings, K. and Ambrose, A., "Micromachining of Optical Structures with Focused Ion Beams," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 5, No. 1, pp. 207-210, 1987.
4. Sudraud, P. and Ben Assayag, G., "Focused Ion Beam Milling, Scanning Electron Microscopy, and Focused Droplet Deposition in a Single Microcircuit Surgery Tool," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 6, No. 1, pp. 234-238, 1988.
5. Vasile, M., Niu, Z., Nassar, R., Zhang, W. and Liu, S., "Focused Ion Beam Milling: Depth Control for Three-Dimensional Microfabrication," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 15, No. 6, pp. 2350-2354, 1997.
6. Santamore, D., Edinger, K., Orloff, J. and Melngailis, J., "Focused Ion Beam Sputter Yield Change as a Function of Scan Speed," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 15, No. 6, pp. 2346-2349, 1997.
7. Brodie, I. and Muray, J. J., "Particle beams: sources, optics, and interactions," New York: Plenum, chapter 2, 1992.