

# 집속이온빔의 공정조건이 실리콘 가공에 미치는 영향

김준현\*, 송춘삼<sup>+</sup>, 김주현<sup>++</sup>, 김종형<sup>+++</sup>, 장동영<sup>++++</sup>

(논문접수일 2006. 11. 23, 심사완료일 2007. 2. 2)

## The Parametric Influence on Focused Ion Beam Processing of Silicon

Joon-Hyun Kim\*, Chun-Sam Song<sup>+</sup>, Joo-Hyun Kim<sup>++</sup>, Jong-Hyeong Kim<sup>+++</sup>, Dong-Young Jang<sup>++++</sup>

### Abstract

The application of focused ion beam(FIB) technology has been broadened in the fabrication of nanoscale regime. The extended application of FIB is dependent on complicated reciprocal relation of operating parameters. It is necessary for successful and efficient modifications on the surface of silicon substrate. The primary effect by Gaussian beam intensity is significantly shown from various aperture size, accelerating voltage, and beam current. Also, the secondary effect of other process factors - dwell time, pixel interval, scan mode, and pattern size has affected to etching results. For the process analysis, influence of the secondary factors on FIB micromilling process is examined with respect to sputtering depth during the milling process in silicon material. The results are analyzed by the ratio of signal to noise obtained using design of experiment in each parameter.

**Key Words** : Focused ion beam(집속이온빔), Ion etching(이온식각), Micro milling(초정밀가공), Silicon(실리콘), Design of experiment(실험계획법)

## 1. 서론

오늘날 초정밀 가공기술은 이미 나노영역에 이르러 반도체나 LCD와 같은 제품군에 실리콘의 식각에 의한 MEMS 기술의 활용으로 크게 기여하고 있으며 최근의 이러한 기술들은 생산되는 조립부품에 높은 생산수용효율을 유지하기

위해 구성부품의 장치나 시스템이 나노크기의 공정기반에서 이루어지기 위해 더욱 더 주력되고 있다.

집속이온빔(Focused ion beam, FIB)은 이러한 나노크기의 구조로 이루어지는 조립부품 제작에 다양한 적용을 위한 도구로써 거의 이십여 년 전부터 본격 활용되기 시작했으며, 집속이온빔에 의한 가공기는 주로 반도체 가공생산 및 검사

\* 성균관대학교 기계공학부  
+ 국민대학교 대학원  
++ 교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부 (kim@kookmin.ac.kr)  
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉3동  
+++ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부  
++++ 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

를 목적으로 개발이 이루어져 오고 있으며, 현재활용의 범위는 더욱더 확대되고 있다<sup>(1)</sup>.

집속이온빔은 Scanning electron microscope(SEM)과 유사한 원리로써 작동하지만 전자빔 대신에 갈륨액체이온(Ga+)을 고전압(30kV)으로 가속시키고 그것을 전기적인 방법으로 집속시켜 얻은 빔을 시료에 충돌시킴으로써 시료로부터 방출되는 2차 이온을 검출하여 표면이미지를 얻는 방법으로 주사이온현미경(SIM: Scanning Ion Microscope)으로도 불리어 지고 있다. 또한, Ga+ 이온은 전자에 비해 무겁기 때문에 이러한 점을 이용해 시료표면을 집중 식각할 수 있는 점과 적절한 보조 가스를 통하여 증착을 할 수 있는 점 때문에 오늘날 나노치리 가공분야와 재료분석에 뛰어난 능력을 보여주고 있다<sup>(2)</sup>.

이온이 고에너지를 가지고 시료에 충돌하여 고체원자들이 방출되는 식각과정에는 많은 영향을 줄 수 있는 인자들이 다양하게 존재하는데, 그 중에서도 Fig. 1과 같이 빔의 세기가 가우시안(Gaussian) 밀도분포와 유사하게 시료의 표면을 식각하게 되는 과정에서 관여하는 빔의 전류밀도(beam current density), 가속전압(accelerating voltage), 그리고 조리개 크기(aperture size)가 식각의 정도에 크게 영향을 미치는 주요 인자들이다.

그러나 Fig. 2에서 도시한 것처럼 순수 이온 스퍼터링에 의하여 식각되는 정도는 빔을 직접 제어하는 인자들이 일정하더라도 다르게 나타날 수가 있다. 즉, 이러한 주요 인자 외에도 픽셀에 대하여 일정한 가공시간인 드웰 시간(dwel time), 스캔 방법(raster scan, blankingless scan 등), 빔이 조사하게 되는 디지털 제어위치 간격(픽셀과 픽셀의 간격 -

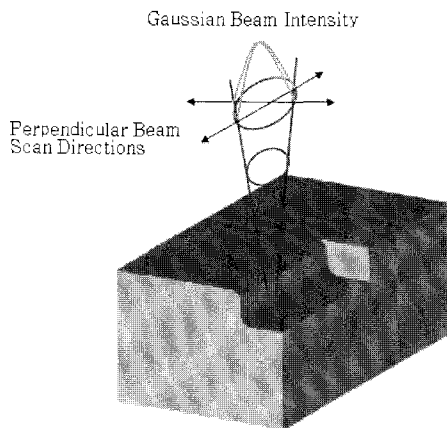


Fig. 1 Schematic view of rectangular trench milled by FIB

pixel interval(=process view scale/800 window pixels per width)), overlap 모드, 가공패턴 크기(milling pattern size) 등에 의한 영향도 최종 시료 표면의 식각에 큰 변화를 준다<sup>(3)</sup>. 따라서 본 논문에서는 Fig. 2처럼 이온 빔을 지배하는 요인과 스테이지를 제어하는 요인들로 구분하여 드웰시간, 패턴크기, 픽셀 간격 등과 같은 스테이지 제어 관련 인자들이 FIB의 스퍼터링 공정에서 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 빔을 제어하는 요인의 영향력은 커서 이미 많은 논문<sup>(1,2,4)</sup>에서 그 결과가 제시되어 있으며 또한 여러 연구<sup>(5-7)</sup>에서 드웰 시간과 같은 인자는 비중 있게 많이 다루어져 있는 상태이므로 관련된 자료를 토대로 이 들 인자들에 의한 영향성을 포괄적으로 판단하기 위해 또한 항 후 추가적인 인자와 높은 수준으로 분석이 가능하다는 점을 위해 실험계획법을 이용하여 실험 횟수를 최소화하고 각각의 인자에 대한 SN(Signal to Noise)비를 통해 이루어지게 된다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

모든 실험은 Seiko사에서 제작한 갈륨(Gallium) 액체 이온소스를 사용하는 SMI3050 FIB장비를 사용하였다. 이 시스템은 30kV 가속전압과 2mA 이온소스 축출전류로써 가동되며, 2개의 렌즈를 통하여 빔을 재료 표면에 집속하여 표면의 형상을 식각 변형시키는 장비이다. 본 실험에서는 731 pA probe 빔 전류와 호환되는 빔 크기 60nm만을 사용하여 총 소요되는 실험시간을 줄이고, 주요인자인 빔의 세기와 관련된 사용조건을 배제하고 스테이지 제어 작업조건만을 사용하여 나타나는 비교 가능한 결과를 얻고자 했다.

요구되는 가공의 식각정도(폭과 깊이)를 얻기 위해서 Fig. 2에서 보여주고 있는 것처럼 가장 먼저 밀링가공 조건을 지배하는 주요 인자(빔의 세기 또는 크기)를 선택하게 되는데 그것에 따라 데이터베이스화 되어 있는 추가 가공조건(ion dose량, 가공 시간 등)을 산출하게 된다. 여기에 가장 직접적

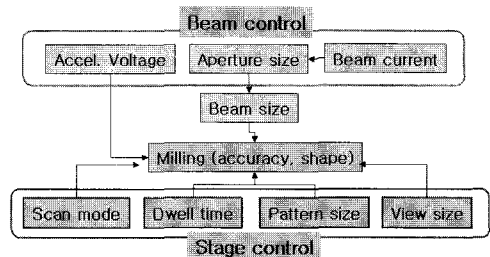


Fig. 2 Operating parameters for micromilling

이고 큰 영향을 주는 빔의 크기(세기)에 관여하는 가속전압과 이온 빔의 전류 등 실험에서 사용된 주요 가공인자 값을 Table 1에 정리하였다. 가공공정상 이러한 주요 인자(빔의 세기 및 크기 조건과 관련 된 인자) 외에 기타 인자들(드웰시간, 패턴크기, 픽셀 간격)에 의해 발생하는 영향을 시료 표면(silicon substrate)의 가공깊이와 형상변화로 파악하고자 공정변수로 작용하는 기타 인자들을 조정하면서 스퍼터링 깊이와 가공형상으로써 나타나는 결과를 위해 가공을 반복 수행을 하였다. 이온빔에 의해 식각되는 정도를 보다 더 정밀 측정하기 위해 FIB 자체의 측정도구를 대신에 AFM을 사용하여 Fig. 3과 같이 가공 깊이, 폭(위쪽/아래쪽), 표면 거칠기를 측정하였다. 시편재료는 P 타입의 실리콘(100) 웨이퍼가 사용되었다.

Table 2에 정리해 놓은 실험에 사용한 기타 가공인자를 본 실험에 적용하여 각각의 가공조건 설정이 가공 형상과 정도(거칠기 포함)에 얼마나 더 효율적으로 적용되는지의

여부와 주어진 조건범위 내에서 적합한 방향으로 접근하기 위해 다구찌 실험계획법을 사용하여 고찰하였다. 제한된 회수로 가공 깊이, 폭(위쪽/아래쪽), 표면 거칠기를 외배열로 하고 나머지 각 인자에 대한 4수준을 부여하여 실험계획법을 설계한 결과, Table 3과 같이  $L_{16}(4^3)$ 의 직교배열표로 완성되었다. Fig. 4는 실리콘 웨이퍼상에 실험계획법에 따라 배열하여 얻은 식각된 전체 SIM 이미지이다. 높은 배율(낮은 view size)에 의한 식각된 웨이퍼상 표면 손상을 피하기 위해 최대한 낮은 배율에서 관찰을 했다.

실험 가공조건에 따른 가공 깊이, 폭(위쪽/아래쪽), 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인을 분석하였고, 각각의 인자에 대한 SN비를 분석하여 좋은 경향에 있는 가공조건을 선정하였다. 이때 가공 깊이/폭(위쪽/아래쪽)의 오차와, 표면 거칠기는 값이 작을수록 좋으므로 망소특성에 대한 공식을 적용하여 각 실험번호별 신호 대 잡음비로 전환시켰다. 아래의 식 (1)은 망소특성에 대한 공식이다. 여기서  $n$ 은 실험반복횟수이고,  $y_i$ 는 측정 데이터의 값이다.

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Table 1 Confined primary beam parameters for experiment

Aperture no.	No. 1
Accelerating voltage	30kV
Extracting current	2mA
Beam current	731 pA
Beam diameter	60nm
Etching depth	1 $\mu$ m
Ion dose	3427.592 $\times$ 1015ions/cm <sup>2</sup>
x-pixel, y-pixel	Window 800 $\times$ 800 pixel
Substrate material	P type Silicon wafer(100)

Table 2 Variable micromilling parameters for experiments

Factor(s)	value
Dwell time( $\mu$ s)	20, 50, 100, 200
Scan mode	Raster
View size( $\mu$ m)	24, 60, 80, 120
Pattern size ,W $\times$ H, ( $\mu$ m <sup>2</sup> )	1 $\times$ 1, 3 $\times$ 3, 6 $\times$ 6, 10 $\times$ 10

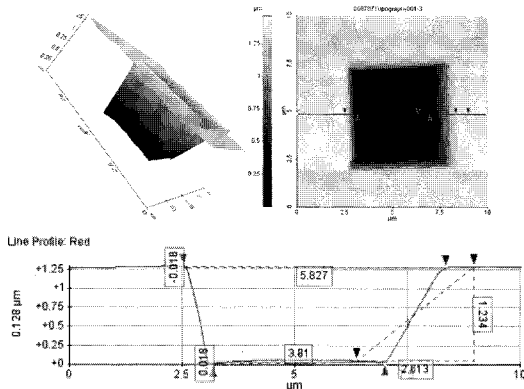


Fig. 3 AFM image of 6 $\mu$ m $\times$ 6 $\mu$ m $\times$ 1 $\mu$ m trench pattern milled by FIB(No. 3)

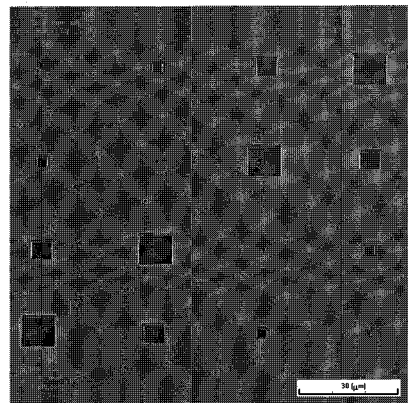


Fig. 4 Si wafer SIM image milled by 30kV Ga+ FIB (30° tilted view for the experimental design method)

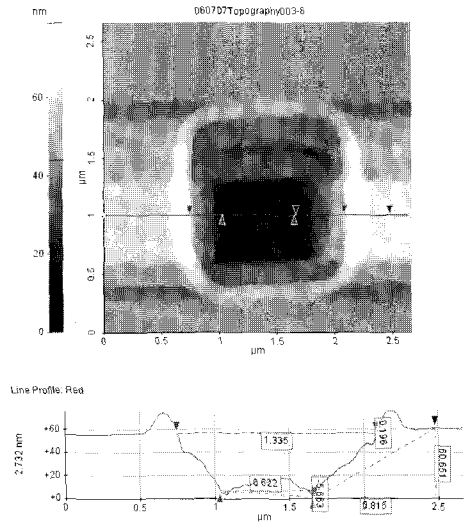
**Table 3 Beam sputtering conditions by secondary parameter**

No	View size ( $\mu\text{m}$ )	Dwell time ( $\mu\text{s}$ )	Pattern size, $W \times H (\mu\text{m}^2)$
1	24	20	1×1
2	24	50	3×3
3	24	100	6×6
4	24	200	10×10
5	60	20	3×3
6	60	50	1×1
7	60	100	10×10
8	60	200	6×6
9	80	20	6×6
10	80	50	10×10
11	80	100	1×1
12	80	200	3×3
13	120	20	10×10
14	120	50	6×6
15	120	100	3×3
16	120	200	1×1

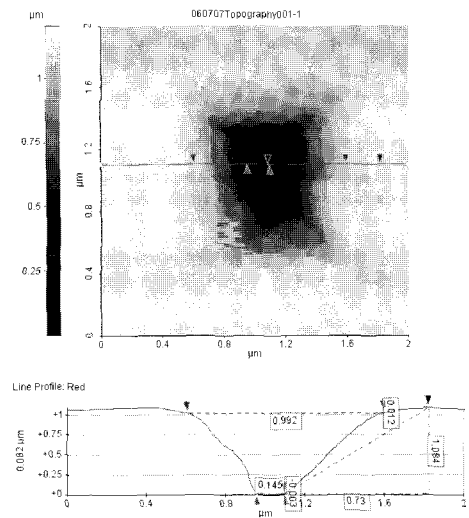
### 3. 실험결과 및 고찰

Table 3은 실험순서에 따른 실험 조건을 나타낸 직교배열 표이다. 모든 실험은 이 직교 배열표에 따라 진행되었다. Fig. 5는 동일한 형상 크기인  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ , 깊이  $1\mu\text{m}$ 로 각기 다른 드웰시간과 view size의 조건으로 식각된 결과를 AFM으로 측정하여 나타낸 단면이다. 매우 좁은 가공폭을 위해 각각 주어진 조건에 의해 식각되어진 가공물이 V형에 가까운 형상을 보여준다. 여기서 보여주는 형상들은 대체적으로 좌우 상부 끝단에 용기(bur)를 형성하는지 여부와 좌우 경사진 가공측면 여러 형태는 드웰(dwell)시간과 view size(pixel 간격)와 같은 인자의 영향으로 달리 나타난 것들이다.

이온빔에 의해 충돌되어 나오는 가공물량의 일부가 좁은 가공 영역을 벗어나지 못하고 재 증착되어 나온 결과로써, 바깥쪽 용기뿐만 아니라 홈 안쪽 벽면부분에서도 발생하는 것으로 보인다. 그러나 근본적으로 빔이 조사(照射)되는 픽셀들 간의 거리가 빔의 직경(60nm)에 비해 커질수록 실제 스캔위치에 해당되는 픽셀의 수가 현저하게 줄어 빔의 중첩 정도(Fig. 5 (a)는 -20% 중첩도 그리고 Fig. 5 (b)는 50% 중첩도)가 크게 낮아지게 된다. 중첩도가 크게 떨어지는 경우 빔의 형상에 따른 영향이 가공 표면에 두드러지게 나타나



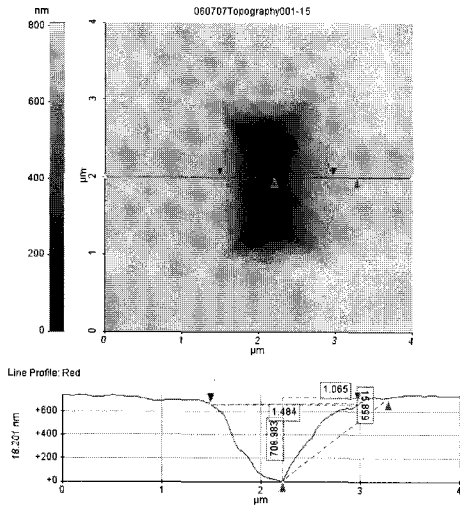
(a) No. 6, view size  $60\mu\text{m}$ , dwell time  $50\mu\text{s}$



(b) No. 1, view size  $24\mu\text{m}$ , dwell time  $20\mu\text{s}$

**Fig. 5 AFM image of  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  square pattern milled by FIB with different factors**

고 그것에 따른 영향이 재증착에 의해 표면 손상에 미치는 영향보다 더 심각한 상태이다. 그로인해 Fig. 5 (a)는 Fig. 5 (b)와 달리  $1\mu\text{m}$ 의 요구 스퍼터링 깊이에도 훨씬 못 미치는 매우 불량한 가공정도를 보여주고 있다. 형상 크기를  $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ 로 늘리고, 깊이  $1\mu\text{m}$ 로 하여 재증착 영향을 줄였음에도 불구하고 Fig. 6의 결과처럼 픽셀간격이 큰 경우는 가공에



**Fig. 6** AFM image of  $3\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$  square pattern milled by FIB with different factors, (No. 15, view size  $120\mu\text{m}$ , dwell time  $100\mu\text{s}$ )

여전히 악영향을 미치고 있다. 따라서 미세한 크기( $1\mu\text{m}$  이하)에 가까운 형상을 가공할 경우는 픽셀간 거리를 적어도 빔의 직경과 동등한 크기로 그리고 적절한 드웰 시간의 조건으로 가공해야 하는 것을 시사해준다.

또한 가공 바닥면의 형상에 미치는 영향은 Table 4에 정리되어 있는 것처럼 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)로 간단히 판단할 수가 있다. 일반적인 절삭가공으로부터 얻어지는 sk값은 0 그리고 ku값은 3으로 나타나지만 방전가공과 빔 가공 시에는 sk값은 0보다 크고 ku값은 3보다 작은 것이 일반적이다. 나타난 결과에서 빔에 의해 스퍼터링되는 거칠기 형상은 패턴 크기가 작을수록 그리고 픽셀간 거리가 클수록 상대적으로 양의 sk값과 ku값이 3에 가까워지는 거친 가공의 경향으로 진행된다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 가공되는 좁은 면에서의 재증착과 같은 문제와 과도하게 넓은 픽셀간의 거리로 충분한 빔의 중첩의 효과를 갖지 못하고 빔의 특성에 상당히 영향을 받는 것으로 설명된다.

다구찌 실험계획법에 따라 나타난 실험결과는 다음과 같이 요구되는 형상에 각각의 인자가 미치는 영향을 분석하기 위하여 스퍼터링 가공깊이와 상/하단부 가공 패턴 정도 그리고 가공 표면 거칠기로서 정리, 분석되어진다.

### 3.1 스퍼터링 가공깊이

각각 스테이지 제어변수별로 요구가공 깊이( $1\mu\text{m}$ )에 대한

**Table 4** Roughness shape on the milled wafer surface

No	skewness	kurtosis
1	1.023	2.542
2	0.386	1.329
3	0.081	1.103
4	0.103	1.104
5	2.067	1.013
6	0.281	1.577
7	-0.372	1.269
8	-0.271	1.268
9	-0.305	1.304
10	0.172	1.128
11	0.572	2.61
12	2.319	7.311
13	0.189	1.215
14	0.332	1.358
15	1.436	3.58
16	0.968	2.799

실제 측정된 최소가공깊이의 오차에 미치는 영향을 분석한 결과를 Fig. 7 (a)에 나타내었다. 그래프에서와 같이 가공깊이는 패턴크기에 가장 많은 영향을 받고 있으나 측정 차원상의 상대적인 오차가 크게 반영된 이유로 풀이되고 실제적으로 패턴크기가 클수록 재증착과 같은 표면 손상의 요인을 줄일 수가 있다. 그리고 view size(시료표면에 빔이 위치하게 되는 픽셀 사이의 실제 간격과 관련)이 작을수록 빔의 높은 중첩도에 의하여 정확한 형상 가공에 유리하며 드웰 시간이 바닥면에 직접적인 재증착 형태로 영향을 주는 스캔횟수와 관련되어 형상가공에 영향을 주는 것으로 분석이 된다.

### 3.2 상단부 가공 패턴 정도

상단부 가공 폭 오차에 미치는 영향을 분석한 결과는 Fig. 7 (b)에 나타내었다. 그림에서와 같이 상단부 폭에 미치는 가공결과는 세 개의 인자에 비슷한 영향을 받았고 view size와 드웰시간 그리고 패턴크기 모두 값이 작을수록 상단부 가공오차가 준다는 결과를 얻었으나, 그 중 패턴크기는 앞서서 언급한대로 측정되는 값에 차원적인 상대적 오차가 반영되어 있다.

그러나 패턴 크기가  $1\mu\text{m}$ 처럼 깊이(D)에 대한 폭(W)의 비율(D/W)이 높아지는 경우에는, Fig. 8에서 도시한 것처럼 이온빔의 1차 및 2차에 걸친 스퍼터링 및 재증착의 영향이 바닥면이나 벽면에 나타나게 된다. 그러나 보조가스를 이용

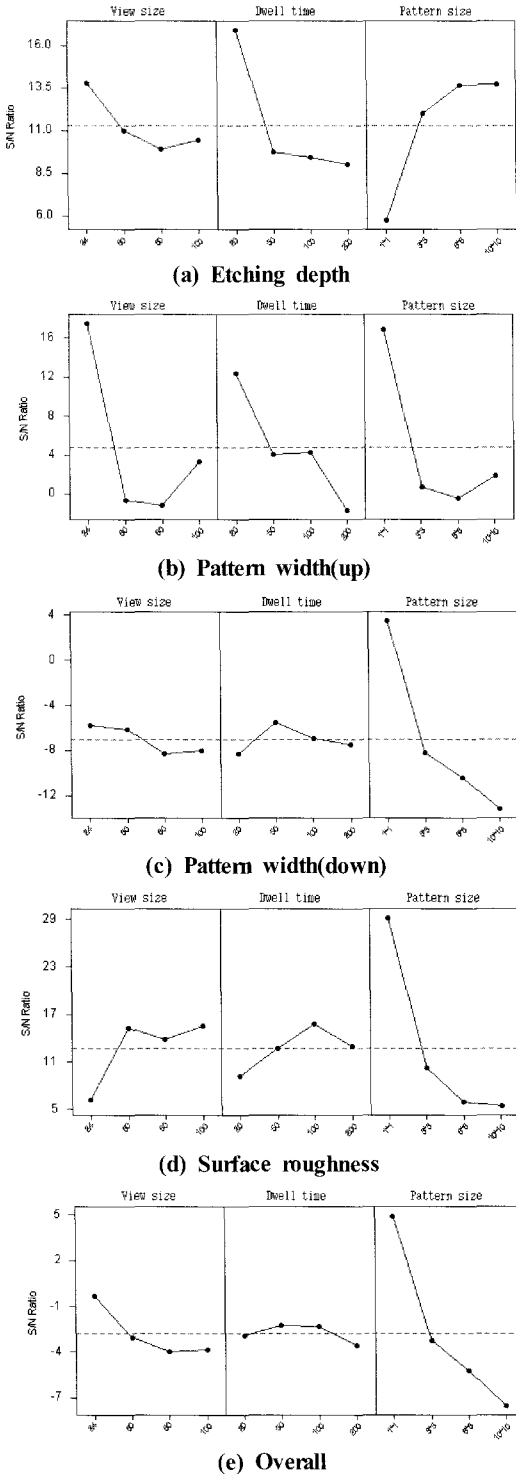


Fig. 7 Comparison of SN ratios

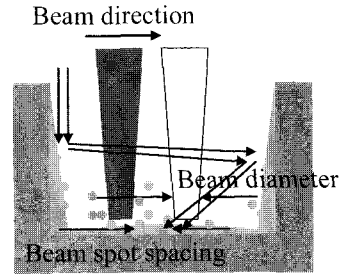


Fig. 8 Schematic drawing of redeposition process

한 식각이나 증착과는 달리 스퍼터링 된 물질이 물리적 및 화학적인 반응에 의하여 증착되는 바닥층의 두께는 대체로 20nm 이내로 그리 두텁지 못하다. 따라서 순수 스퍼터링으로 인한 표면에 미치는 영향은 패턴의 형태에 따라 미미한 차이가 있다고 볼 수 있다. 그러나 픽셀의 간격을 크게 할 경우는 재증착의 효과 보다 픽셀 수의 감소로 인한 빔의 낮은 중첩이 가지는 거친 가공의 영향이 더 지배적이다. D/W 비율이 높은 경우인 스퍼터링 된 물질의 진행방향과 관련된 재증착 효과와 픽셀크기에 따른 낮은 중첩도를 동시에 가지는 경우 가장 두드러진 가공표면 손상을 보여주며 뿐만 아니라 양 끝단의 용기(bur)까지 크게 형성될 정도로 가공물의 형상에 크게 영향을 끼치게 된다. 이는 Fig. 5 (a)와 6처럼 요구되는 뚜렷한 가공면을 형성하지 못한 결과에서 보여진다. 드웰 시간은 20 $\mu$ s일 때가 비교적 오차가 적은 것으로 분석이 된다. 이는 일정한 이온 dose량을 가지고 정해진 면적을 밀링하기 위해 필요한 스캔의 횟수와 밀접한 드웰시간의 증가가 스퍼터링 라인을 확대하는 데서 기인한다고 볼 수가 있다.

### 3.3 하단부 가공 패턴 정도

하단부 가공 오차에 미치는 영향을 분석한 결과는 Fig. 7 (c)에서 보여진다. 분석은 하단부 가공은 패턴크기에 가장 많은 영향을 받았고 view size와 패턴크기는 작을수록, 드웰시간은 50 $\mu$ s일 때 하단부 가공오차를 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 패턴크기에 지배되는 이유는 앞서서 언급한바와 같이 측정의 차원적인 상대적인 오차가 불가피한 이유가 크다. 상단부와 마찬가지로 이유로 픽셀의 간격을 크게 할 경우, 가공 깊이뿐만 아니라 하부 양 끝단의 폭 형성에 크게 영향을 끼치게 된다. 전체적으로 가공형상은 빔 형태가 가우시안으로 이루어지는 관계로 하단 폭이 줄어들며, view size가 120 $\mu$ m 그리고 드웰시간 100 $\mu$ s의 조건을 주었을 때 결과인 Fig. 6을 보면 앞서 언급한 여러 이유로 인해 하단부 가공이 불량해짐을 알 수 있다.

### 3.4 가공 표면 거칠기

표면거칠기로서 나타나는 영향을 분석한 결과는 Fig. 7 (d)에 나타내었다. 여기서 표면거칠기는 중심선 평균 거칠기 (Ra)를 측정하였다. 그림에서와 같이 표면거칠기 크기는 패턴크기에 가장 많은 영향을 받았고 드웰시간은 100 $\mu$ s 일 때, 그리고 패턴크기는 작을수록 표면거칠기를 작게 할 수 있다. 이는 Hung<sup>(8)</sup>등에 의해서 유사하게 언급된 바가 있다. 그들

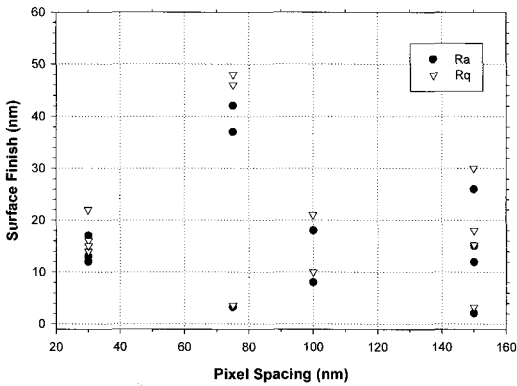


Fig. 9 Effect of the beam pixel spacing on the surface finish after micromilling

은 픽셀간의 간격에 대한 가공표면에 대한 실험적 결과에 예측실험식과 비교를 했으며, 픽셀 간 간격의 증가와 함께 미세하게 가공표면의 Ra값이 증가함을 보였다.

Fig. 9는 가혹 조건으로 인하여 요구된 결과에 훨씬 미달 되는 Fig. 5 (a)와 같은 경우를 제외한 나머지 결과를 픽셀거리에 따른 표면 거칠기값으로 표현하였다. 픽셀간의 거리가 작은 경우는 다른 인자(드웰시간 및 패턴 크기)에 영향을 덜 받으면서 편차가 적지만 대체로 픽셀간의 거리가 증가할수록 편차가 조금씩 커짐을 볼 수가 있다. 그러나 대체로 같은 픽셀 간 크기 조건에서 측정된 Ra값들을 분석해볼 때 픽셀 간격이 적은 경우 다른 조건에 영향이 상대적으로 낮다. 픽

Table 5 Better conditions obtained through experimental method

	View size ( $\mu$ m)	Dwell time ( $\mu$ s)	Pattern size, W×H( $\mu$ m <sup>2</sup> )
etching depth	24	20	10×10
pattern size(up)	24	20	1×1
pattern size(down)	24	50	1×1
surface roughness	60	100	1×1
overall	24	50	1×1

Table 6 Result of experiment

View size ( $\mu$ m)	Dwell time ( $\mu$ s)	Pattern size ( $\mu$ m <sup>2</sup> )	Pattern size(up) ( $\mu$ m)	SN1	Pattern size (down) ( $\mu$ m)	SN2	Etching depth ( $\mu$ m)	SN3	Ra ( $\mu$ m)	SN4	SN
24	20	1×1	0.992	41.938	0.145	1.361	1.084	21.514	0.332	9.577	6.735
24	50	3×3	2.823	15.041	1.240	-4.910	1.332	9.577	0.547	5.240	0.533
24	100	6×6	5.827	15.239	3.810	-6.809	1.234	12.616	0.567	4.928	-1.141
24	200	10×10	8.679	-2.418	5.655	-12.760	1.267	11.470	0.570	4.883	-7.206
60	20	3×3	1.598	-2.935	0.102	-9.242	0.851	16.536	0.173	15.239	-4.156
60	50	1×1	1.335	9.499	0.622	8.450	0.060	0.537	0.020	33.979	5.455
60	100	10×10	8.540	-3.287	5.701	-12.667	1.200	13.979	0.517	5.730	-7.185
60	200	6×6	4.072	-5.702	2.444	-11.019	1.225	12.956	0.504	5.951	-6.198
80	20	6×6	4.138	-5.400	2.246	-11.490	1.196	14.155	0.479	6.393	-6.490
80	50	10×10	8.679	-2.418	5.262	-13.512	1.200	13.979	0.539	5.368	-7.875
80	100	1×1	1.370	8.636	0.120	1.110	0.049	0.436	0.013	37.721	3.430
80	200	3×3	1.101	-5.571	0.112	-9.212	0.722	11.119	0.518	5.713	-4.876
120	20	10×10	9.836	15.703	5.165	-13.688	1.168	15.494	0.518	5.713	-7.727
120	50	6×6	4.052	-5.792	1.936	-12.179	1.179	14.943	0.483	6.321	-7.113
120	100	3×3	1.484	-3.614	0.103	-9.239	0.708	10.692	0.182	14.799	-4.317
120	200	1×1	1.441	7.111	0.291	2.987	0.061	0.547	0.017	35.391	4.036

셀 간 거리가 증가됨에 따라 다른 인자들의 영향이 조금씩 표면거칠기에 증가 또는 감소로 가는 이유가 픽셀로 제어되는 빔의 경로가 충분히 중첩 되어 가공되는 효과가 지배적으로 나타나거나 반대로 높은 경우에는 다른 인자들에 의해 미치는 영향이 더 큰 것으로 분석된다.

### 3.5 주어진 조건 범위 내에서 최적 빔 밀링조건 선정

실험 계획법을 통해 가공깊이, 가공 패턴정도(상/하), 그리고 표면거칠기를 외측배열로 하여 분석한 결과 네 조건의 오차를 모두 줄일 수 있는 결과를 Fig. 7 (e)에 나타내었다. 그림에서와 같이 가공 전반적으로 패턴크기에 가장 많은 영향을 받았고 드웰시간은 50 $\mu$ s일 때, view size와 패턴크기는 작을수록 가공오차와 표면거칠기를 좋게 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이 분석을 통하여 주어진 실험조건 범위 내에서 인자들 모두 고려한 경향이 좋은 가공조건은 Table 5에 나타내었고, 모든 결과를 종합적으로 정리한 결과는 Table 6에 나타내었다.

## 4. 결론

FIB 가공은 빔의 세기 또는 크기의 초기설정 에 따라 좌우되고 있으나 나노급의 가공을 위해선 그 외의 스테이지 제어 인자의 영향도 중요하다. 그 중에서도 드웰 시간, 패턴 크기, 픽셀에 의한 디지털 제어 위치 등에 의한 인자들의 상호영향을 가공되는 형상 정도(精度) 및 거칠기로서 비교하였다.

빔의 크기(60nm)를 제한 선택하고 여러 인자별로 가공을 통하여 스퍼터링 깊이와 가공된 패턴의 상하부 크기를 측정 한 결과 드웰시간 뿐만 아니라 기타 인자(패턴 크기, 픽셀 간거리)의 영향도 큰 편이었다. 특히 D/W 비율이 큰 경우 과도한 view size에 크게 좌우되었다. 이 영향은 가공면의 표면손상과 관련되며 이의 해결을 위해서는 빔의 크기와 거의 동등한 크기 수준이상의 픽셀간격을 유지해야 한다.

또한 주로 가공 밑바닥과 벽면쪽에 미치는 재증착의 영향은 순수 스퍼터링 가공에서는 영향이 미미하나 이러한 영향을 줄이기 위해서는 충분한 수의 빔 위치 확보와 적절한 드웰시간의 채택이 중요하다.

## 후 기

본 연구는 서울산업대학교의 산업자원부 “차세대 Micro-system packaging 인력양성사업”에 의해 구축된 FIB장비

를 사용하였음을 알려드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Tseng, A. A., 2004, “Recent Developments in Micromilling using Focused Ion Beam Technology,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. R15~R34.
- (2) Tseng, A. A., 2005, “Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams,” *Small* Vol. 1, No. 10, pp. 924~939.
- (3) Hung, N. P., Fu, Y. Q. and Ali, M. Y., 2002, “Focused ion beam machining of silicon,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, pp. 256~260.
- (4) Orloff, Jon, 1993, “High-resolution focused ion beam,” *Review Science Instrument*, Vol. 64, No. 5, pp.1105~1130
- (5) Fu, Y. Q., Bryan, N. K. A., Shing, O. N. and Wyan, H. N. P., 2000, “Influence Analysis of Dwell Time on focused Ion Beam Micromachining in Silicon,” *Sensors and Actuators*, Vol. 79, pp. 230~234.
- (6) Choi, H. Z., Kang, E. G., Hong, W.P., Lee, S. W., 2005, “Nano and Micro Manufacturing Technology using Focused Ion Beam and Its Application,” *Proceedings of Nanoengineering Symposium*, pp. 59~63.
- (7) Hausmann, S., Bischoff, J., Teichert, D., Grambole, F. Hermann and Moller, W., 1998, “Investigation of Dwell-Time Effects on the Cobalt Disilicide Formation Using Focused Ion Beam Implantation,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 41/42, pp. 233~236.
- (8) Hung, N. P., Fu, Y. Q. and Ali, M. Y., 2002, “Focused ion beam machining of silicon,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, pp. 256~260.
- (9) Song, C. S. and Kim, J. H., 2005, “Cutting characteristics of dry turning using compressed air,” *KSMTE*, Vol. 14, No. 1, pp. 8~14.