

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.3.209

빔 위치 관련 제어인자가 집속이온빔 패턴 증착공정에 미치는 영향

김준현* · 송춘삼** · 김윤제†

(2007년 4월 16일 접수, 2008년 2월 13일 심사완료)

The Influence of Parameters Controlling Beam Position On-Sample During Deposition Patterning Process with Focused Ion Beam

Joon Hyun Kim, Chun-Sam Song and Youn-Jea Kim

Key Words: Focused Ion Beam(집속이온빔), Deposition(증착), Micro-Machining(마이크로 가공), CVD-Chemical Vapor Deposition(화학 기체 증착), Wafer(웨이퍼)

Abstract

The application of focused ion beam (FIB) depends on the optimal interaction of the operation parameters between operating parameters which control beam and samples on the stage during the FIB deposition process. This deposition process was investigated systematically in C precursor gas. Under the fine beam conditions (30kV, 40nm beam size, etc), the effect of considered process parameters - dwell time, beam overlap, incident beam angle to tilted surface, minimum frame time and pattern size were investigated from deposition results by the design of experiment. For the process analysis, influence of the parameters on FIB-CVD process was examined with respect to dimensions and constructed shapes of single and multi- patterns. Throughout the single patterning process, optimal conditions were selected. Multi-patterning deposition were presented to show the effect of on-stage parameters. The analysis have provided the sequent beam scan method and the aspect-ratio had the most significant influence for the multi-patterning deposition in the FIB processing. The bitmapped scan method was more efficient than the one-by-one scan type method for obtaining high aspect-ratio (Width/Height > 1) patterns.

기호설명

- A : 수준계
- AR : 폭에 대한 높이 또는 깊이 비율
- Lm(An): 직교 배열 함수
- m : 실험의 크기
- n : 배치 가능한 최대 인자수

1. 서론

오늘날 제품의 초소형화를 추구하기 위한 시도는 이미 나노기술이 접목된 초정밀 가공기술로써 반도체나 LCD의 생산 공정에 적용되고 있다. 이러한 초소형화 추세는 최근 기능의 복잡화, 재료와 에너지 사용의 최소화, 폐기물 저감과 환경적인 문제, 그리고 생산성 향상과 맞물려 있다.⁽¹⁾

집속이온빔(Focused ion beam, FIB)은 이러한 초소형화를 향한 나노크기의 구조물 제작과 검사과정에서 중요한 역할을 하는 도구로써 70년 대 후반부터 개발되어 최근까지 활용의 폭이 점차 확대되고 있는 추세이다.⁽²⁾ 집속시킨 빔을 시료에

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@skku.edu
TEL : (031)290-7485 FAX : (031)290-5889
* 성균관대학교 기계공학부
** 국민대학교 대학원

충돌시켜 얻는 밀링방법과 시료로부터 방출되는 2차 이온을 검출하여 표면 이미지를 얻는 방법 등 주로 마스크 없는 식각 절연도료 노출 같은 공정과 재료분석에 주로 사용되어 왔으나 최근에는 시료표면을 집중 식각하고 적절한 보조 가스를 통하여 증착할 수 있는 방법으로 3차원 나노 구조물까지 제작하는 수준까지 이르고 있다.^(3,4)

Fig. 1에 도시한 것과 같이 샘플의 목표지점 주변에서 고에너지 이온빔은 미세관을 통해 일정 주입되는 가스분자와 반응한다. 이때 비휘발성 물질은 샘플의 목표 위 표면에 화학 반응으로 증착되고 나머지 유기휘발성 물질은 일부 스퍼터링 된 물질과 함께 배출되는 과정의 증착방법으로 3차원 구조물 제작에 큰 역할을 하고 있다. 증착되는 층은 주입요소가스 및 갈륨(Ga^+)으로부터 탄소와 산소 그리고 갈륨 요소의 결합체로써 이루어진다.

이와 같이 표면에 흡착한 기체상태의 화학적 요소물질과 시료표면에 충돌하는 이온빔이 내부 반응하여 일부 고체원자들을 방출하고 시료 표면에 비휘발성 물체만을 증착시키는 과정에서 실제 공정작업과 관련하여 제어할 수 있는 인자들은 다양하다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 시료 표면에 흡착된 요소가스를 분해하는 속도 또는 스퍼터링 되는 정도는 갈륨이온의 조사량에 가장 큰 영향을 받는다. 이것은 빔의 전류밀도($beam\ current\ density$), 가속전압($accelerating\ voltage$), 그리고 조리개 크기($aperture\ size$) 등으로 빔의 조건을 초기 설정으로 제어하게 된다.

그러나 이러한 주요($primary$) 설정인자 외에도 스테이지에 놓인 샘플위에 도달하게 되는 빔과 기타 부분을 2차적으로 제어하여 최종 시료 표면에 형성되는 구조물에 변화를 줄 수 있다. 여기에 해당되는 인자들은 픽셀에 대한 일정한 가공시간인 드웰 시간($dwell\ time$), 스캔 방법($raster\ scan$), 빔의 중첩도, 가공형상 및 크기 등이다. 또한 요소 물질인 기체 종류와 투입되는 양과 이것에 대응하는 한 픽셀에서 다른 픽셀로 이동하면서 갖는 최소 프레임시간 ($refresh\ time$) 설정과 가스 유입량 제어 등도 2차적으로 제어 가능한 부분이다.

이 분야에 관한 연구는 제어가능 한 분야별로 오래전부터 공정에 적용시켜 많은 주제(드웰시간, 패턴 형상크기, 픽셀 중첩도, 증착시키고자하는 금속을 포함한 요소가스 재료, 가스노출과 관련되는 최소프레임 시간)들이 다루어져 왔다.⁽⁵⁻⁹⁾ 특히

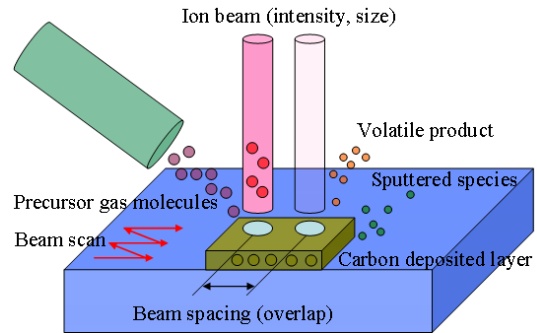


Fig. 1 Schematic drawing of FIB induced deposition process

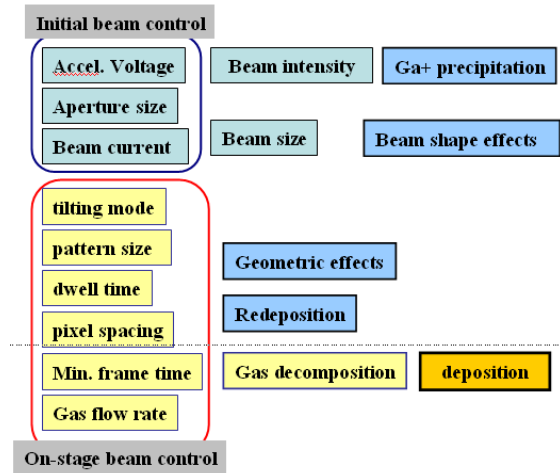


Fig. 2 Influence of parameters for deposition processing

적용 가능한 가공 재료 외에 다양한 물성을 가진 재료에도 사용 확대되고 있는 추세이다.⁽¹⁰⁾

본 논문에서는 이러한 증착과정에서 빔의 초기 조건(이온 조사량과 빔의 크기 그리고 가스유입률)을 동일한 조건으로 설정하고 2차적으로 영향을 주는 인자들 위주로 제어하면서 나타나는 현상을 분석하여 빔과 관련하여 제어되는 인자가 집속이온빔의 증착 공정에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

우선 단일 형태의 증착 가공에 적용하여 이들 인자들 간의 상호 연관성을 포괄적으로 판단하여 얻은 최적 범위에서 연속 패턴을 가공하여 나타나는 결과를 분석한다. 그 결과를 통해 수십 나노 크기 빔을 사용하여 나노-마이크로급 크기의 연속 패턴 구조물 제작 시 나타나는 추가 증착과 같은 문제점과 그 해결을 위해 사용되는 인자들의 사용 범위와 각각의 분석을 하고자 한다.

Table 1 Used beam control parameters for experiments

Aperture No.	No. 3
Accelerating Voltage	30kV
Extracting current	2.2mA
Beam current	283.8pA
Beam diameter	40nm
Deposition height	0.5 μ m- single pattern 1~3 μ m- multi-pattern
Ion dose	555.5×10^{15} ions/cm ²
Substrate material	P type Si wafer (1 0 0)

Table 2 Variable micro-deposition parameters for experiments

Parameter(s)	value
Dwell time (μ s)	0.5, 5, 10, 20
Scan mode (fixed)	Raster
Beam overlap (%)	-100, -70, -50, -20
Tilting angle (degree)	0, 10, 20, 30
Minimum frame time (ms)	1.2, 2, 5, 10
Pattern size ,W×H, (μ m ²)	0.5×0.5, 1×1, 2×2, 4×4

2. 실험장치 및 실험방법

갈륨 액체 이온소스를 사용하는 Seiko사의 SMI3050TB FIB-SEM장비를 사용하여 실험을 실시하였으며, 사용된 시스템은 30kV 가속전압과 2.2mA 이온소스 축출전류로써 가동되었다. 작업시간을 줄이고 미세 구조물의 증착을 위해 최대 가능한 빔의 선택을 위해 283.8pA probe 빔 전류와 여기에 호환되는 3번 빔 조리개 (빔 크기 40nm)만을 사용하였다. 증착과정에서 사용되는 요소물질은 C₁₄H₁₀가 사용되었다.

요구되는 가공의 증착정도(폭과 높이)를 얻기 위해 사용되어진 초기 설정 빔 제어와 관련한 주요 인자(빔의 세기 또는 크기), 이온 도스(dose)량 및 가공 시간 등과 여기에 관여되는 가속전압과 이온 빔의 전류 값들은 Table 1에 정리했다.

실험에서는 이러한 초기 설정 인자들을 이용한 FIB의 증착공정을 통하여 스테이지 위 샘플 가공 부위에 최종적으로 도달하는 빔 관련 인자들을 추가적으로 제어하여 주어진 일정 가공조건 범위

Table 3 FIB deposition conditions based on the design of experiment for single patterns

No	Beam overlap (%)	Dwell time (μ s)	Min. frame time (ms)	Pattern size, W×H (μ m ²)	Tilting angle (degree)
1	-100	0.5	1.2	0.5 × 0.5	0
2	-100	2	5	1 × 1	10
3	-100	10	10	2 × 2	20
4	-100	30	-	4 × 4	30
5	-70	0.5	5	2 × 2	30
6	-70	2	1.2	4 × 4	20
7	-70	10	-	0.5 × 0.5	10
8	-70	30	10	1 × 1	0
9	-50	0.5	10	4 × 4	10
10	-50	2	-	2 × 2	0
11	-50	10	1.2	1 × 1	30
12	-50	30	5	0.5 × 0.5	20
13	-20	0.5	-	1 × 1	20
14	-20	2	10	0.5 × 0.5	30
15	-20	10	5	4 × 4	0
16	-20	30	1.2	2 × 2	10

내에서 나타나는 영향을 분석하였다. 주로 시료 표면(silicon substrate)에 증착되는 형상과 크기 변화를 분석하여, 단일 패턴의 가공에 최적으로 적용되는 공정변수를 선정하고 연속 패턴 증착가공에 이들 선정된 수준값들을 적용하였다. 이에 나타나는 결과에 대하여 분석이 이루어졌으며, 증착가공되는 정도는 FIB-SEM 자체 이미지로 판별하였다.

단일 패턴 증착가공에 사용된 변수와 거기에 적용된 사용값 범위와 수준 값들은 Table 2에 정리하였다. 여기서 가공물에 나타나는 결과로부터 각각의 가공조건 설정이 가공 형상과 정도에 얼마나 효율적으로 적용되는지의 여부와 주어진 조건범위 내에서 적합한 방향으로 접근하는 경향을 모색하기 위해 실험횟수와 여러 변수의 존재를 효율적으로 처리하는데 유리한 실험계획법의 설계 배치에 따라 각 인자에 대한 4수준을 부여하여 Table 3 과 같이 L₁₆(4⁵)의 직교배열표로 완성하여 실험횟수를 정하였다.

Fig. 3은 실리콘 웨이퍼 상에 증착가공을 실험 계획 배치에 따라 실시하여 얻은 전체 SEM 이미지이다. 여기서 얻은 최적의 조건 값들은 연속패턴 증착가공에 다시 적용하여 연속 패턴 제작 시 재증착과 같은 영향과 전술한 인자들과의 연관성을 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 패턴 증착 가공

실험은 목표 높이 $0.5\mu\text{m}$ 인 단일 박스형 구조물을 증착으로 가공하기 위해 Table 3에 나열된 조건으로 진행하였다. 전체적으로 각각의 조건에 따라 증착 또는 식각과정을 거친 이미지는 Fig. 3에 나타내었다.

이 중에서 증착되어진 No. 1, 2, 5, 6, 9, 그리고 14의 결과를 보면 공통적으로 적용되는 점은 적용된 드웰 시간이 적어도 $2\mu\text{m}$ 이하인 점이다. 중간 형태에 속하는 강한 빔의 초기조건에서 $2\mu\text{m}$ 이상의 드웰 시간을 갖는 경우는 여타 추가적인 조건과 상관없이 갈륨의 물리적인 스퍼터링에 의한 표면식각의 영향이 지배적으로 작용했음을 알 수 있다. 또한 빔의 중첩도를 낮추고 스캔간의 유틸스캔 시간(minimum frame time, or wait time)을 설정하여 $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ 가스가 표면에서 갈륨이온과 상호작용할 수 있는 환경을 제공해 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, C-gas 흡착률이 낮으면 최적의 증착률을 얻을 수 없으며 오히려 식각률이 높아지게 된다. 이와는 반대로 너무 많은 C-gas가 흡착되면, FIB는 시료표면이 증착되기 전에 초과된 요소물질을 먼저 제거하게 되고, 이때 최적 증착률에 비해 나타나는 증착률은 낮아진다.

Fig. 3에서 No. 13과 14의 증착 이미지를 비교해보면 빔의 중첩도가 $-1.2 \times$ 빔의 직경인 -20% 인 공통의 조건을 가지고 각각 $1\mu\text{m}$ 과 $0.5\mu\text{m}$ 폭을 가진 단일 패턴 가공을 실시한 결과이다. 이 경우에는 최소 플레임 시간(잉여 시간)을 주고 C-gas가 증착할 조건을 주는 경우와 아닌 경우의 명확한 차이점을 보여주고 있다. No. 14의 경우는 동일한 -20% 의 중첩도이지만 드웰 시간이 상대적으로 길어 증착물의 저하 가능성이 No. 13보다 높았으나 공정 작업 프레임 내에서 빔이 픽셀간 이동하면서 휴식기를 갖는 최소프레임 스캔시간을 설정해줌으로써 Ga, C-Gas, Si의 원만한 내부반응을 위해 시료표면에 흡착한 C-gas 양을 충분히 확보한 결과로 증착률이 높아졌음을 알 수 있다.

Fig. 3(a)와 (b)는 No. 6과 No. 9의 증착된 결과를 SEM 확대이미지로 보여주고 있다. No. 6 조건을 적용한 Fig. 3(a)과 No. 9의 조건을 적용한 Fig. 3(b)의 결과 이미지를 비교하여 보면, -70% 의 낮은 빔 중첩도를 이용하여 1차적으로 전달되는

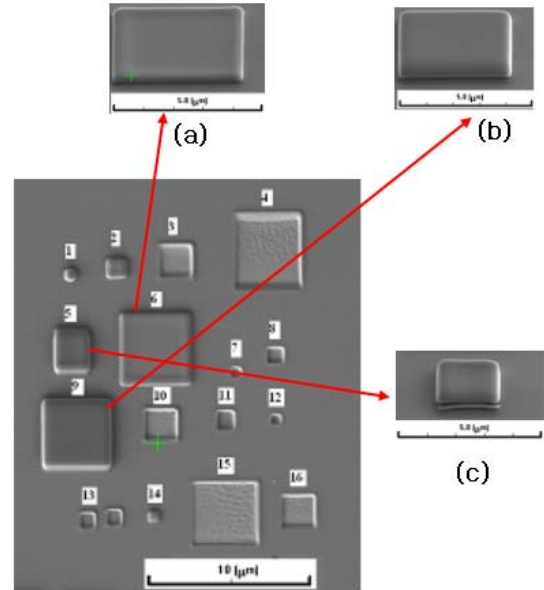


Fig. 3 Deposited carbon by 30kV Ga^+ FIB-CVD with different operating conditions (upright view), SEM micrograph of $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ carbon film patterns by FIB-CVD with different conditions, (a) No. 6, -70% beam overlap, dwell time $2\mu\text{s}$, min. frame time 1.2ms and (b) No. 9, -50% beam overlap, dwell time $0.5\mu\text{s}$, min. frame time 10ms , (c) $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ carbon film patterns by FIB-CVD with No. 5, -70% beam overlap, dwell time $0.5\mu\text{s}$, min. frame time 5ms and 30° tilted angle

갈륨과 표면에 흡착된 C-gas와의 내부반응도 즉, 증착률을 높이고자 했으나 Fig. 3(a)에서 보이는 것처럼 가장자리를 중심으로 내부 쪽으로 최적(균일분포 두께)에 접근하지 않음을 알 수 있다. 이는 낮은 빔의 중첩도 ($-50\% \rightarrow -70\%$)를 이용하여 갈륨 이온 스퍼터링의 집중적인 식각효과를 줄이고 표면위에 흡착되어 있는 C-gas와의 적절한 내부반응 효과를 기대했으나 가공 패턴위에 적용되는 짧은 드웰 시간과 스캔 유틸스캔 시간에 의한 C-gas 양의 공급 및 사용량의 차이에서 오는 차이로 판단된다.

따라서 주요 제어 변수로써 샘플 위에서 갈륨 이온과의 내부반응을 위해 가용한 C-gas 물질의 양에 의해 결정되는데 첫째, 스캔영역에 공급되는 C-gas 물질의 양은 절대적으로 영향을 주지만 이미 시스템마다 세관을 통해 최적 공급 조건으로 설정되어 있다. 둘째, 샘플 위로 전달되는 갈륨 이온과의 반응정도에 따른 C-gas 물질을 모으기 위

한 적절한 시간에 좌우된다. 이를 위해 드웰 시간이나 최소 프레임 스캔 시간 등이 적절하게 상호 연관되어 있다. 셋째, 흡착된 C-gas 물질 분자의 최적 사용은 이온빔의 전류와 이온 유량에 달려 있다. 이들의 적절한 선택에 좌우된다고 할 수 있다.

Fig. 3(a)와 3(b)에서 보여주는 또 다른 결과로써 경사진 시편에서 이루어지는 증착 자체에는 큰 영향이 없는 것으로 보이나 기울기 정도에 따라 앞쪽 벽면 쪽의 성장과정에서 장애적인 요소가 보인다. 증착 두께(0.5 μm)에 비해 기울기가 과도하면 No. 5의 결과인 Fig. 3(c)과 같이 증착되고자 하는 구조물 크기의 기울기, $\theta = \tan^{-1}(\text{높이}/\text{폭} = 0.5/2)$ 가 스테이지 경사 30° 보다 작기 때문에 경사진 면에서 이루어지는 균일한 증착 면을 만들어 내기가 어렵다.

실험적 설계에 의해 얻은 SEM 이미지만으로 분석해 본 결과 단일 패턴 증착가공실험을 위해 선정된 빔의 세기와 전류크기에 근거로 한 최적 조건을 보면 빔 전류 283.8pA와 빔의 크기 40nm를 사용할 때 최소한의 요구조건은 2 μs 이하의 드웰 시간이 절대적으로 요구되고 있으며 -20 ~ -50% 중첩도에서는 적어도 Fig. 4에 도시한 바와 같이 최소 프레임 스캔 시간이 10ms가 필요함을 알 수 있다. 그러나 -70% 중첩도 이하에서는 최소 프레임 스캔 시간이 5ms에서도 증착과정이 가능하다. 따라서 단일 패턴 증착을 위해 요구되는 가능조건은 빔의 중첩도가 -50 ~ -100%에서는 2 μs 이하의 드웰 시간 사용이 필요하고 중첩도가 밀접해지고 드웰 시간이 길어질수록 거기에 따라 최소 프레임 스캔 시간이 1.2ms 이상 필요하다.

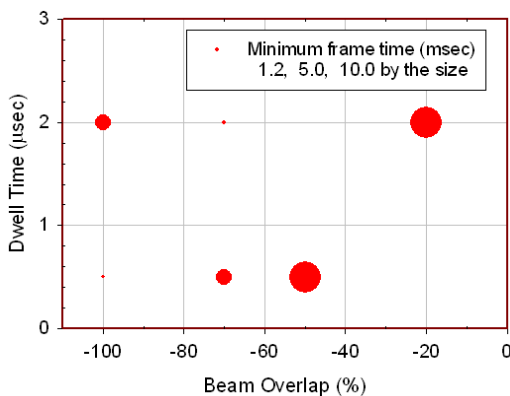


Fig. 4 Minimum frame time applied from relationship between the beam overlap and the dwell time

3.2 연속 패턴 증착 가공

현재 집적 칩들은 선폭이 미세하여 폭에 대한 높이(또는 깊이)의 비율(aspect ratio: AR)이 높고, 이웃하고 있는 가공물에 어떠한 손상 없이 노출되거나 보호되어야 할 경우가 종종 요구된다. 그러한 미세 패턴 가공에서 인접한 가공벽에 재증착하는 문제 등으로 원하는 가공형상을 획득하기가 힘들다. 따라서 단일 패턴 증착을 위해 선정된 변수 값(0.5 μs 의 드웰 시간, 1.2ms의 최소 프레임 스캔시간 그리고 -70% ~ -100% 범위에서의 빔 중첩도)들을 연속된 패턴증착 가공을 위해 적용하였다. 가공에서 1:1 ~ 2:1 AR의 패턴을 선택하고 Si 시편위에 폭 1 μm 너비 3 μm 높이 1 μm 의 카본층으로 이루어진 구조물을 0.5 μm 또는 1 μm 간격으로 Fig. 5에서 묘사한 것과 같이 비트맵 방식과 하나씩 순차적으로 증착하는 방식으로 가공하였다.

Fig. 6(a)는 $1 \times 3 \times 1\mu\text{m}^3$ 단일 패턴 가공과 동일한 $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ (카본) Gas를 사용하고, 제어 변수값으로 0.5 μs 의 드웰 시간, 1.2ms의 최소프레임 스캔 시간 그리고 -100% 빔 중첩도를 적용하여 얻은 이미지이다. Fig. 6(b)는 똑같은 가공조건으로 기가공된 구조물(A)로부터 0.5 μm 왼쪽으로 떨어진 곳에 반복 증착가공(B)한 결과의 SEM 이미지이다. 일련의 가공 과정을 거치면서 나타나는 연속 패턴 형성은 단일 패턴 형성 때와 다르다. 우선 열 가공물의 벽면에 증착되는 부분과 기존 구조물에 2차 스퍼터링 되는 이온과 벽면에 남아있는 요소가스와 반응하여 증착이 추가적으로 발생하였음을 볼 수 있다. 따라서 거리가 가까울수록 그 벽면에 추가 증착되는 부분이 많음을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 같은 조건에서 가공물 사이(A*-B*)의 간격을 1 μm 로 늘렸을 때의 결과이다. 우측에 이미 존재하는 구조물 좌측 벽면에 미세

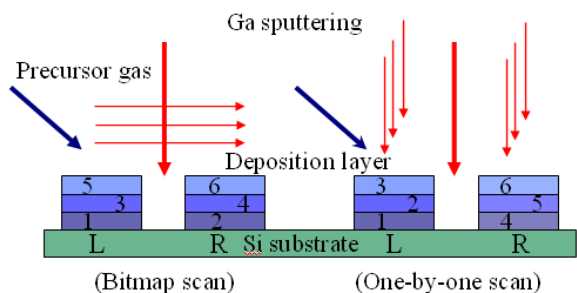


Fig. 5 Pattern scanning types

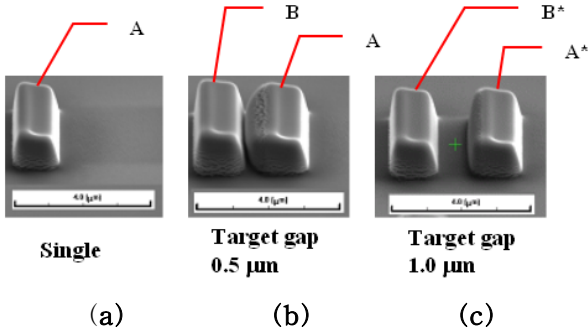


Fig. 6 SEM images of the rectangular patterns ($1 \times 3 \times 1 \mu\text{m}^3$) deposited on the Si surface at the dwell time of $0.5 \mu\text{s}$, the minimum frame time of 1.2ms and -100% beam overlap, (a) single pattern, (b) multi-patterns with the gap of $0.5 \mu\text{m}$, and (c) the gap of $1.0 \mu\text{m}$

한 수준의 추가증착과 표면 손상이 일어난 것을 알 수 있다.

패턴 구조형태와 그리고 선폭과 높이 같은 AR에 따라 나타나는 손상정도 차이를 최소화하기 위해서 1:1 이하의 AR를 가지는 패턴의 구조물에서 가공물 폭에 준하는 거리를 유지하였을 때 일부물질의 재증착을 감소가 현저하게 낮아짐을 볼 수 있다. 그러나 1:1 이상인 AR 패턴에서 인접거리가 선폭에 준할 경우 1차적으로 방사되는 일부 이온에 의하여 2차적으로 가공불량 문제로 이어지는 문제는 근본적으로 빔의 크기를 줄여 단위 면적당 조사되는 이온 도스량을 감소시켜 측면 벽에 증착으로 인한 손상을 줄일 수밖에 없다. 또 다른 가능한 간접적인 방법은 가공물 크기나 패턴사이의 거리 축소에 비례하여 드웰시간을 $0.375 \mu\text{s}$ 로 단축하거나 최소프레임 스캔시간의 축소보정으로 어느 정도 가능하다.

Fig. 7(a)는 $0.5 \times 3 \times 1 \mu\text{m}^3$, $1 \times 3 \times 1 \mu\text{m}^3$ 그리고 $2 \times 3 \times 1 \mu\text{m}^3$ 패턴 가공을 $1 \mu\text{m}$ 의 간격으로 연속 가공형상을 나타낸 이미지이고, Fig. 7(b)는 내부 단면을 보기위해 밀링 가공을 추가로 하여 얻은 이미지이다. 동일한 $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ (카본)-gas를 사용하여 가공하였으며, 제어 변수값으로 $0.5 \mu\text{s}$ 의 드웰 시간, 1.2ms 의 최소프레임 스캔시간과 -70% 빔 중첩도를 적용하였다. 가공은 우측구조물부터 시작하여 좌로 일정간격 $1 \mu\text{m}$ 을 두고 순차적으로 이루어졌다.

Fig. 7(a)는 우측 1:2 AR 구조물에서 $1 \mu\text{m}$ 유지하여 다시 1:1 AR 구조물을 형성하고 다시 같은 거리 떨어진 곳에 2:1 AR 구조물을 증착 가공했

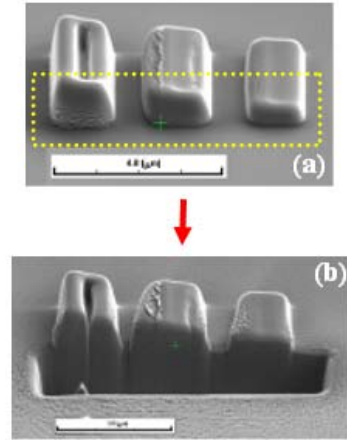


Fig. 7 SEM images of the different AR patterns deposited on the Si surface at the dwell time of $0.5 \mu\text{s}$, the minimum frame time of 1.2ms and -70% beam overlap, (a) different AR patterns with the gap of $1.0 \mu\text{m}$, (b) cross-sectional image by FIB cross-sectional milling with $5 \mu\text{m}$ depth

을 때 나타나는 전체형상과 손상 부위를 보여주고 있다. AR이 높은 형상 가공으로 진행될수록 인접한 구조물의 측면에 입는 손상정도가 높게 나타났다. 이것은 일부 이온이 방사되어 2차 스퍼터링되는 지점인 우측 구조물 측면에 흡착되어 모여 질 수 있는 잔량 C-gas의 양과 면적이 점점 늘어난 것으로 사료된다.

$2 \mu\text{m}$ 높이로 2:1 AR 증착가공을 했을 때 중앙 부위에 대하여 증착 효과가 떨어짐을 Fig. 7(b)의 밀링가공을 통한 내부단면에서 볼 수 있다. 가장자리 주변에서 원활하게 C-gas를 확보하여 우월한 증착효과를 줄 수 있는 것과는 달리 내부로 진행됨에 따라 C-gas 확보가 부족하여 식각 효과가 크게 작용하여 나타난 현상으로 보인다.

여기에는 40nm 빔이 -70% 중첩도로써 적용되어 $2 \mu\text{m}$ 높이 구조물을 단계적으로 증착해 나갈 때 이온이 시편을 스퍼터링하기 전에 가스와의 내부 반응하여 C-gas를 분해하여 소비해 나가는 비율을 따라가기 위해서는 1.2ms 로 설정된 최소프레임 스캔 시간에 의한 가스 흡착을 위한 잉여시간 제공이 짧은 것으로 사료된다. 따라서 증착 높이가 높을수록 최소 프레임 스캔 시간을 늘려 주어야 하지만 이 또한 구조물 사이 간격에 제한되어 있기 때문에 샘플 주변에서 빔을 2차적으로 제어하기에는 한계가 있기 때문에 빔의 세기나 크기를 줄여 갈륨 이온 dose량을 제어해야 한다.

3.3 Bitmap 스캔 방식의 증착 가공 영향

Fig. 8은 1:3 AR 패턴을 연속적으로 증착한 FIB 자체 이미지이며, 드웰 시간, refresh 시간과 조사되는 빔의 스캔 방식에 따른 각각의 결과를 보여주고 있다. Fig. 8(a)와 (c)는 동일한 조건에서 Fig. 5와 같이 각각 비트맵 스캔 방식과 순차적인 스캔 방식으로 연속패턴에 따라 증착되어진 가공물이다. 가공되는 동안 이웃한 가공물의 영향을 줄이고자 비트맵 패턴 스캔 방식을 채택한 Fig. 8(a)의 결과를 앞서 얻은 Fig. 6(c)의 결과와 비교해 보면 가공된 상태에서 여전히 재증착과 같은 2차 조사의 영향이 있는 것으로 보여 진다. 이것은 비트맵 채용에서 빔의 중첩모드를 설정하는 방식의 차이에서 우선 기인되며 또한 더 가혹한 조건을 적용했기 때문이다.

그러나 샘플 가공표면에서 내부 반응 후 이웃하는 가공물의 존재에 따라 형성되는 가공물에 미치는 영향은 빔이 패턴을 스캔하는 방법에 따라 결과가 다르다. 이것은 동일한 빔 관련 제어조건에서 Fig. 8(a)와 같이 비트맵 방식에 따라 전체 패턴을 스캔하는 경우와 Fig. 8(c)와 같이 순차적으로 하나씩 패턴을 스캔하는 경우를 직접 비교하여 볼 수 있다. 적어도 수 나노급 빔 크기를 채택하거나 빔의 중첩도를 상당히 낮추지 않는 이상 Fig. 8(c)에서 보는 것처럼 가장자리 주변을 제외한 곳에서 충분한 증착효과를 기대할 수 없다. 사용된 제어 관련 값 차원에서 살펴보면 이 결과는 Fig. 7(a)에서와 같이 -70% 빔의 중첩도를 적용했을 때 나타난 결과와 유사하다.

따라서 증착 높이가 높을수록 기본적으로 최소 프레임 스캔 시간을 늘려 주어야 하지만 비트맵 패턴 채택에서도 선폭이나 패턴사이의 간격에 따른 제한이 따름으로 인해 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 과잉의 증착 효과가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 복잡한 패턴 형성 시 비트맵 패턴 채용은 공정상 이점을 제공하고 있으나 빔의 크기와 중첩도와의 최적의 관계를 유지할 필요가 있다.

Fig. 8(d)는 단일 패턴을 연속 사용하는 증착방법으로 최적조건인 중첩도 -100%를 사용하여 얻은 결과이다. 그러나 A-R이 높거나 미세화 정도가 높을 경우 샘플에서 2차적으로 빔 관련하여 제어하는 변수보다 근본적으로 빔의 세기나 크기를 줄여 갈륨 이온 dose량을 제어해야 한다.

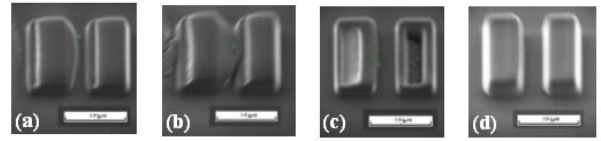


Figure	Pattern scan	Dwell time	Minimum frame time	Beam spot spacing
(a)	bitmap	0.5 μ s	1.2ms	100nm
(b)	bitmap	0.37 μ s	4.0ms	100nm
(c)	one by one	0.5 μ s	1.2ms	100nm
(d)	one by one	0.5 μ s	1.2ms	Overlap:-100%
Beam current : 291 pA, Gap : 1 μ m				

Fig. 8 FIB scanning images of multi-patterns

4. 결 론

FIB 가공은 1차적으로 빔을 제어하는 초기설정 에 따라 절대 좌우되고 있으나, 본 연구에서 고려한 증착가공에서는 샘플 가공부위에 2차적으로 빔을 위치적, 시간적으로 추가 제어함으로써 효율적으로 가공 정도를 높일 수 있음을 알 수 있었다.

이를 위해 설정 빔을 중간 세기 정도인 283.8pA으로 제한 선택하고 증착과정 C-gas 물질의 흡착과 관계되는 2차적 제어인자들인 드웰 시간, 최소 프레임 스캔 유지시간, 빔 중첩도, 생성 패턴과 크기, 빔 입사각이 갖는 영향을 파악하기 위해 단일 패턴에 적용하여 사용한 수준값 범위 내에서 선정하였다. 이는 샘플 표면에서 빔의 dose량과 C-gas 흡착량의 최적 내부반응을 유지하여 적정 단일패턴 형성하는 접근성을 연속 패턴에서도 적용하기 위해서였다.

그러나 연속 패턴에서는 샘플 가공면에서 1차 발생되는 물질들의 이웃하는 벽면에 2차적으로 이루어지는 재증착 문제가 구조물의 패턴크기와 배치에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 이러한 점으로 볼 때 특히 AR이 높은 패턴이나 세밀한 패턴 제작 시에는 이온 dose량을 낮추고 낮은 빔의 중첩도, 낮은 드웰 시간의 선택 그리고 비트맵 방식의 채택으로 어느 정도 극복 가능함을 알 수 있다. 그러나 미세 빔을 채택은 가공시간의 급격한 상승으로 인하여 새로운 접근법이 요구된다.

참고문헌

- (1) Tseng, A. A., 2004, "Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams," *J. Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. R15~R34.
- (2) Gamo, Kenji, 1997, "Recent Advances of Focused Ion Beam Technology," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 121, pp. 464~469.
- (3) Shin, Y-H., Yoon, Y-H., Lee, E-S., Han, C-S., 2007, "Improvement of the Carbon Nanotube Tip by Focused Ion Beam and its Performance Evaluation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, pp. 139~144.
- (4) Fu, Y. Q., Bryan, N. K. A., Shing, O. N. and Hung, N. P., 2000, "Influence of the Redeposition Effect for Focused Ion Beam 3D Micromachining in Silicon," *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 877~880.
- (5) Heuvel, F. C. van den, Overwijk, M. H. F., Fleuren, E. M., Laisina, H. and Sauer, K. J., 1993, "Focused-ion-beam-induced Tungsten Deposition for IC Repair," *Microelectronic Engineering*, Vol. 21, pp. 209~212.
- (6) 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.
- (7) Kim, H. B., 2005, "A Concept of Variable Dwell Time in Focused Ion Beam Nano Fabrication," *Conference of the KSMTE*, pp. 51~56.
- (8) Hausmann, S., Bischoff, L., Teichert, J., Grambole, D., Hermann, F. 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.
- (9) Prestigiacomo, M., Roussel, L., Houël, A., Sudraud, P., Bedu, F., Tonneau, D., Safarov, V. and Dallaporta. H., 2004, "Studies of Structures Elaborated by Focused Ion Beam Induced Deposition," *Microelectronic Engineering*, Vol. 76, pp. 175~181.
- (10) Cairney, J. M. and Munroe, P., 2003, "Redeposition effects in Transmission Electron Microscope Specimens of FeAl-WC Composites Prepared using a Focused Ion Beam," *Micron*, Vol. 34, pp. 97~107.