

집속이온빔의 증착제어요건을 고려한 미세 패턴 형성 연구

A fine pattern formation by controlling deposition parameters of the FIB

*.#김준현¹, 김종형², 장동영³

*.#J. H. Kim(joonk61@hanafos.com)¹, J. H. Kim², D.Y.Jang³

¹ 서울테크노파크 마이크로패키징센터, ² 서울산업대 기계설계자동화공학부, ³ 서울산업대 산업정보시스템공학과

Key words : Deposition, FIB, Micro-manufacturing, Patterning, Re-deposition, Wafer

1. 서론

집속이온빔 장치는 최근 다양한 마이크로/나노 응용을 위한 뚜렷한 해결책으로 기여해오고 있다. 특히 금속 또는 절연물의 부분적 마스크 없는 증착의 용도는 시대적인 기술적 요구에 크게 부응하고 있다 [1].

일반적으로 집속이온빔에서 갈륨이온 조사 과정에서 밀링, 증착, 주입 등의 일련의 효과가 동시에 유발된다. 이 중에서 증착의 효과가 주된 결과로 나타나기 위해서는 조사되는 이온이 화학적 결합을 이루고 있는 결합분자를 분해하는 반응으로써 기판(웨이퍼) 상에서 증착의 효과로 나타난다. 지금까지 이루어진 일부 연구를 통하여 적절한 증착을 유도하기 위한 다양한 공정조건을 다루어 왔었다 [2-4]. 최근의 증착기술은 사전에 증착시켜 놓은 구조물위에 다시 미세증착하는 방법으로 복잡한 3 차원 구조물을 제작할 수 있는 단계에까지 이르렀다 [2].

집속이온빔을 이용한 증착과정에서 일정하게 미세 관을 통하여 가스(C, W, Pt 성분을 포함)가 유입되고 샘플 표면위로 흡착의 과정을 거친다. 동시에 입사된 갈륨이온은 목표 지점 위에서 이러한 가스와 반응하여 분해를 하게 되고 동시에 휘발성 물질은 배출되고 비휘발성 물질은 표면에 잔류함으로써 증착 과정을 거친다. 이러한 화학반응은 빔이 조사되는 지역 및 주변에서 균형적인 분해와 직접 관련된다. 따라서 증착 기술은 이러한 화학적 반응도를 조절하여 정확한 형태의 패턴을 얻어내는데 있다. 그러기 위해서 빔의 초기설정 (전류세기 및 전압 등)과 목표 지점에서 빔을 최종적으로 조절하는 드웰시간, 재충진 시간, 스캔방법, 빔의 중첩도와 같은 제어인자를 적절히 사용하는데 달려있다.

집속이온빔의 폭넓은 적용과 함께 이러한 제어인자들의 적절한 상호 영향은 목표 지점에서 표면 변형을 줄 수 있는 의미 있는 수단이 될 수 있다. 이러한 제어조건을 상호 고려하여 실행한 테스트는 주로 초기 빔의 설정 조건과 드웰시간과 같은 주요인자에 국한되어 있었다 [2-4].

현재 연구는 갈륨이온(30kV)과 빔의 직경(20-100nm)의 초기 빔 설정하고 빔을 이차적으로 제어 가능한 인자들의 상호 보완적인 관계를 증착되어진 패턴의 크기와 형태를 통해 정립하고자 한다. 그리고 적절한 최적의 작업 범위를 도출하여 멀티 패턴을 증착 공정으로 적용하여 나타나는 추가적인 문제점을 분석하고 해결 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험적 접근

실험에 사용된 장비는 SMI 3050 FIB 시스템이며 단결정 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. 사용된 갈륨이온은 30kV 가속 전압 및 1.9mA의 축출전류로써 작동되었다. 빔의 유효 직경은 20-100nm이며 주입가스는 phenanthrene, C₁₄H₁₀ 분말을 가열하여 공급했다. 일반적으로 C 층의 축적되는 두께는 이온 도스량에 비례적으로 변하기 때문에 여기에서는 두 가지 (555.5 × 10¹⁵ ions/cm² 와 1111.1 × 10¹⁵ ions/cm²)가 적용되었다. 모든 증착과정은 두 전류세기(92.33pA 와 269.531pA)를 적용하여 수행했다. 실험적 작업범위를 위해 Fig. 1 에서 도시된 것과 같은 3 인자(드웰시간, 가스 재충진 시간, 그리고 빔의 중첩간격)와 인자별 3 ~ 5 실험수준으로 설계하여 실시했다.

실험적 결과는 정밀측정 결과 대신 이미지와 나타난 형태로써 판별하여 분석했다. 단일 형태의 패턴을 위해 적용된 체적은 1x1x0.5μm³이며, 빔의 영향권에 들지 않는 간격을 두어 연속적인 작업으로 가공했다. 빔의 중첩도는 5 수준 (-150%, -100%, -70%, -50%, and -30%)으로 했으며 드웰시간은 0.5μsec ~ 5μsec 을 적용했으며, 재충진 시간은 0 ~ 10msec 으로 설정했다.

빔의 목표지점에서 제어 가능한 주요 인자들의 실험적 수준은 단일 패턴 결과에서 선정되고 그 수준값은 다시 멀티패턴 증착과정에 적용된다. 이온은 물리적인 스퍼터링을 통하여 흡착가스와 화학적 반응과 제거를 하게 되는데 순수 변화량(dQ)은 식(1)과 같이 표현 정리된다.

$$dQ = C_1 \Phi dt_1 - C_2 I S dt_2 \quad (1)$$

또한 증착에 미치는 순수 영향은 식(1)의 변화량이 형태 비율 (AR)과 스캔모드(M)에 최종적으로 달려있다.

$$d\delta = f(dQ, AR, M) \quad (2)$$

여기서 C₁ 과 C₂ 는 상수이며, 재충진 시간과 관련된 시간 증가분(dt₁) 동안 흡착되는 가스량은 Φ 에 비례한다. 이온 빔은 드웰시간과 관련되는 시간증가분(dt₂) 동안 스퍼터링 생성량 S 과 전류밀도 I 에 비례적으로 작용한다.

3. 결과 및 토론

증착 또는 분화구 형태의 스퍼터링된 가공표면은 SIM 이미지(30° 로 틸팅)로 관측했다. 인자별로 다양하게 상호 관련하여 적용하여 증착을 시도한 결과 중에서 대표적으로 Fig. 2 에 도시된 형태별 분류를 보면 전류세기와 드웰시간 그리고 재충진시간의 수준별로 정리하였다.

목표물(1 x 1 x 0.5 μm³)을 -100%의 중첩으로써 20 과 40nm 의 빔의 크기를 사용했다. 증착 성공으로 판명할 수 있는 경우는 0.5 μ sec 의 드웰시간 유지와 재충진시간 2.0msec 를 적용했을 경우이었다. 또한 269.531pA 전류세기가 적용되었을 때, 짧은 가스 재충진 시간의 경우에는

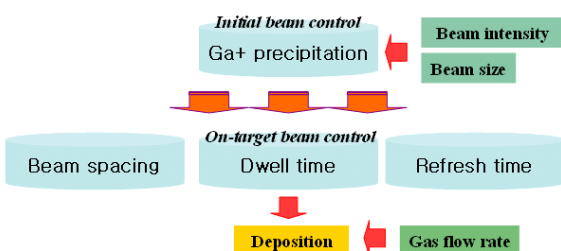


Fig. 1 Block diagram of influence of parameters for deposition processing.

| Current Intensity | | 92.33 pA | | 269.531 pA | |
|---------------------|-----|----------|---|------------|---|
| Dwell time (μsec) | | 0.5 | 1 | 0.5 | 1 |
| Refresh time (msec) | 0 | | | | - |
| | 0.1 | | - | | |
| | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | - | - | | - |
| | 5 | - | - | - | |

Fig. 2 SIM images of target volumetric shape (1 μ m x 1 μ m x 0.5 μ m) for various deposition conditions and overlap -100% beam spacing.

에칭의 과정이 두드러져 중앙부위부터 오목한 현상이 발생되기 시작함을 볼 수 있다. 이는 식(1)에서 표현한대로 이온의 분해능력과 이와 반응하기 위한 가스 공급량의 균형으로부터 재충진시간 (dt₁)의 부족함에 기인할 수 있다.

따라서 프로브 전류의 증가에 따라 빔이 조사되는 픽셀이 위치하는 증착 표면에 충분한 가스를 흡착시키기 위한 재충진 시간의 연장이 불가피하다. 0.5 μ sec 드웰시간과 2msec 재충진 시간이 최상의 증착을 유도할 수 있는 사실로 확인 될 수 있다.

드웰시간, 빔 중첩도 그리고 재충진 시간의 상호 관계를 고려하는 또 다른 결과에서 20nm의 미세 빔 크기 사용은 적절한 가공시간 (현재 적용하고 있는 목적 크기에서는 2분 미만)을 제공해주고 있으며 정확한 가공 형태를 줄 수가 있었다. 또한 0.5 μ sec의 드웰시간과 재충진 시간 1.0msec를 적용하고 빔 중첩이 -50%일 때 두드러진 에칭의 효과가 발생했으나 재충진 시간 2.0msec을 적용하고 빔 중첩도가 -30% 일 때는 여전히 어느 정도 균형된 반응을 유지하고 있는 것으로 보여졌다. 증착의 부족현상이 중앙부분에서 두드러지는데 이는 스캔이 라스트(Raster) 방식으로 이루어짐에 따라 중앙부위에서 흡착되는 가스층이 주변으로 활용되는 비율이 높아지는 것으로 기인된다. 다른 결과인 -150%의 빔을 집중했을 때 가공높이가 목표 높이 (0.5 μ m)보다 10~20% 정도 상승한 것은 이온빔에 의해 분해되어 비휘발성으로 증착되는 비율이 높은 것으로 사료된다. 기타 결과를 분석하여, 최적조건은 드웰시간, 재충진 시간 그리고 빔의 중첩 조건은 각각 0.5~1.0 μ sec, 1~2msec, 그리고 -100 ~ -70% 범위 내로 나타났다.

상기 최적조건을 이용하여 멀티패턴 가공을 실시한 결과 종종 재증착 효과 때문에 표면 손상이 야기 됨을 알 수 있다. 단일 패턴을 연속작업으로 제작했으며 목표 체적은 1 x 2 x 1 (또는 0.5) μ m³ 로써 0.5~1 μ m 간격을 유지하여 전체적으로 1:1 ~2:1의 형태 비율을 가지게 했다. 사용된 조건은 0.5 μ sec의 드웰시간, 1.0msec의 재충진 시간, 그리고 -70% 중첩이 적용되었다. Fig. 3은 기 형성된 증착패턴 옆에 각각 0.5, 0.7 그리고 1.0 μ m 떨어진 곳에 동일한 패턴을 새로이 증착했을 때 결과이다. 이 결과는 형상비율에 좌우된다는 사실과 적어도 스퍼터링된 물질 중에서 일부가 진공 챔버 내에서 외부로 유출되는 과정에서

| Height (H) μm | | 0.5 | 1.0 |
|---------------|-----|------------------|--------------|
| Gap (G) μm | 0.5 | AR (H/W=1:2) | AR (1:1) |
| | 0.7 | - | AR (1:1) |
| | 1.0 | - | AR (1:1) |

Fig. 3 SIM images of multi-target volumetric shape (L x W x H = 2 μ m x 1 μ m x H μ m) for various deposition conditions, adjacent distance 0.5 μ m, beam spacing -70%, dwell 0.5 μ sec, refresh time 1.2msec, and probe current 92.33 pA.

기존 구조물이 방해요소로 작용함에 따라 나타나는 문제점이 파악되었다. 높이 0.5 μ m과 1.0 μ m 그리고 0.5 μ m의 간격을 유지하는 패턴 형성의 직접적 비교에서 45° 방사각으로 부터 자유롭기 위해선 높이와 멀티패턴 사이 간격이 최소한 동일해야 한다는 결과가 도출되었다. 이러한 문제점 해결 방안의 하나로 비트맵을 이용한 빔 스캔 방법으로 전체를 하나의 패턴으로 하여 진행할 수 있다. 그 결과 20nm의 빔 직경 사용 시 100nm의 접근까지 가능한 것으로 나타났다.

4. 결론

빔의 초기 설정뿐만 아니라 샘플의 표면 위에서 빔을 제어하는 FIB 가공변수는 초미세 구조제작에서는 매우 효과적인 증착 변형을 제공한다. 이러한 가공변수들이 초미세 구조가공에서 증착 변형효과를 갖기 위한 상호적인 영향을 분석하였다.

샘플의 가공 목표에서 빔의 조사량과 샘플표면에 흡착되는 가스량을 제어하는 인자들의 상호 관계에 따른 조건 범위와 멀티 패턴 형성 과정에서 나타나는 이차적인 증착 영향도를 패턴크기와 형태에 따라 조사하였다. 또한 20~40nm 나노 빔의 직경으로 미세구조물이 매우 밀집해 있거나 높은 비례형태로 이루어져 있을 때 비트맵으로 이루어지는 빔의 스캔 방식으로 적어도 100nm 밀집도를 허용할 수 있음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 서울산업대학교의 서울시 산학연협력사업 (10890)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. Tseng, A. A., "Recent Developments in Nanofabrication using Focused Ion Beams," J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. R15-R34, 2004.
2. Fu, Y. Q., Bryan, N. Y. K., Shing, O. N., and Hung, N. P., "Influence of the Redeposition Effect for Focused Ion Beam 3D Micromachining in Silicon," Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, pp. 877-880, 2000.
3. Kim, J. H., Boo, J-H., and Kim, Y-J., "Effect of Stage Control Parameters on the FIB Milling Process," Thin Solid Films, Vol. 516, pp. 6720-6714, Nov. 2008.
4. Prestigiacomo, M., Roussel, L., Houël, A., Sudraud, P., Bedu, F., Tonneau, D., Safarov, V., and Dallaporta, H., "Studies of Structures Elaborated by Focused Ion Beam Induced Deposition," Microelectronic Engineering, Vol. 76, pp. 175~181, 2004.