

FIB-CVD의 가공 공정 특성 분석

강은구*, 최병열, 홍원표, 이석우, 최헌종 (한국생산기술연구원)

The Analysis of Chemical Vapor Deposition Characteristics using Focused Ion Beam

E.G. Kang, H.Z. Choi, B.Y. Choi, W.P. Hong and S.W. Lee (KITECH)

ABSTRACT

FIB equipment can perform sputtering and chemical vapor deposition simultaneously. It is very advantageously used to fabricate a micro structure part having 3D shape because the minimum beam size of Φ 10nm and smaller is available. Currently FIB is not being applied in the fabrication of this micro part because of some problems to redeposition and charging effect of the substrate causing reduction of accuracy with regards to shape and productivity. Furthermore, the prediction of the material removal rate information should be required but it has been insufficient for micro part fabrication.

The paper have the targets that are FIB-CVD characteristic analysis and minimum line pattern resolution achievement for 3D micro fabrication. We make conclusions with the analysis of the results of the experiment according to beam current, pattern size and scanning parameters. CVD of 8 pico ampere shows superior CVD yield but CVD of 1318 pico ampere shows the pattern sputtered. And dwell time is dominant parameter relating to CVD yield.

Key Words : FIB(focused Ion Beam), 나노패턴(Nano Patterning technology), FIB-CVD(집속이온빔 화학적증착), Chemical Vapor Deposition(화학증착), Taguchi Analysis(다구찌 분석)

1. 서론

일반적으로 CVD 증착과 Sputtering에 대한 많은 연구를 진행하고 있다. FIB 장비는 이러한 CVD 증착과 Sputtering이 한 개의 장치 내에서 동시에 가능하기 때문에 국부적으로 마스크나 집적화된 회로를 교정하는데 매우 유리하게 이용되고 있다. 하지만 실제로 TEM 시편 제작 및 마이크로 칩의 분석용으로 그 이용이 매우 제한적이다.

FIB-CVD는 IBID(Ion beam induced deposition)라고도 하며, 실제 이온 빔이 $0.05\mu\text{m}$ 크기 이하로 집속될 수 있기 때문에 교정용으로 상용화되고 있다. 특히, 재료의 증착 및 제거를 이용하여 포토마스크, 집적회로 및 x-ray 리소그래피 마스크의 수정 등에 이용되고 있다.

본 연구는 FIB의 기능 중 FIB를 이용한 CVD증착

에 관한 내용으로 구성되어 있으며, 특히 3차원 구조물의 제작 및 수정에 FIB를 적용하기 위하여 다양한 실험을 수행하고 결과 분석을 통한 FIB-CVD 가공공정의 응용기술 확보를 목표로 하고 있다.

현재 국내에서도 FIB-CVD에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Precursor의 종류 및 가공공정의 최적화 등에 관한 실험적 연구가 보고되고 있으나, 측정기술의 어려움으로 인해 간접적인 분석결과가 보고되었다.

본 논문에서는 FIB-CVD를 3차원 구조물 제작에 적용하기 위해서 증착량과 더불어 증착시의 정밀도를 목표로 최적의 증착 조건을 선정하고자 한다.

따라서 증착량의 증가와 증착량의 예측에 관한 세부적인 연구내용을 포함하고 있으며, 이온 조건의 선정과 이온빔 주사영역에 대한 세부적인 연구결과를 포함하고 있다.

Precursor로는 $C_{14}H_{10}$ 을 이용하였으며, 여기서 실제 증착되는 재료는 Carbon이 대부분이다. 실험 후 이온빔의 조건과 이온빔의 주사영역에 따른 특성 분석을 위해 SIM 이미지와 AFM 3차원 형상을 이용하여 보다 정량적인 FIB-CVD 특성 분석을 수행하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 다구찌 기법 이용 특성분석

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 FIB 장비 제작사는 SII Nanotechnology Inc.에서 제작된 제품이며, 모델명은 SMI 2050이다. FIB 장치의 주요 사양으로는 두 개의 빔 렌즈(CL Lens와 OL Lens)가 사용되고 있다. 진공도는 이온 챔버와 메인 챔버 각각 1×10^{-5} pa or lower, 8×10^{-5} pa 정도로 유지되고 있다. 이온 소스로는 Ga^+ 액체 금속 이온원이 이용되고 있으며, 가속전압은 30keV이다. 최대 배율은 $\times 250,000$ 이 가능하며, 최소 빔 분해능은 5nm정도이다. 사용되는 증착가스는 $C_{14}H_{10}$ (Phenanthrene)과 $W(CO)_6$ (Hexacarbonyl)의 두 종류가 가능하며, 본 연구에서는 $C_{14}H_{10}$ 을 사용하였다.



Fig. 1 FIB Photograph made by SII Nanotechnology Inc.(Model : SIM2050)

기법을 활용한 FIB-CVD 특성분석 FIB-CVD의 수율 측면에서 Taguchi 분석을 수행하여 Scanning method에 관련된 파라미터인 dwell time, tilt angle, overlap의 3인자 4수준에 대한 가공 실험 및 특성을 분석하였다. 실험 후 AFM 측정을 통해 가공된 3D형상의 체적을 측정 후 이를 이용하여 다구찌 분석을 수행하였다.

Fig. 2는 다구찌 분석결과를 나타내고 있으며, 결과적으로 3인자 4수준의 다구찌 분석결과 CVD Yield에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터는 Dwell Time임을 알 수 있었으며, Dwell Time이 작을수록 CVD Yield가 증가함을 알 수 있다. Tilt Angle의 경우 각도가 커질수록 CVD Yield가 커짐을 알 수 있었

으며, 최대 45 degree에서 최대 값을 얻을 있었다. Overlap에 따른 CVD yield 측정 결과 10% 정도의 overlap에서 가장 큰 결과를 얻을 수 있었으며, -10%에서 최소의 값을 얻을 수 있었다. 따라서 최대 CVD yield의 조건은 Tilt angle 45도, dwell time 0.375 μ sec, overlap 10%일 경우로 나타났다.

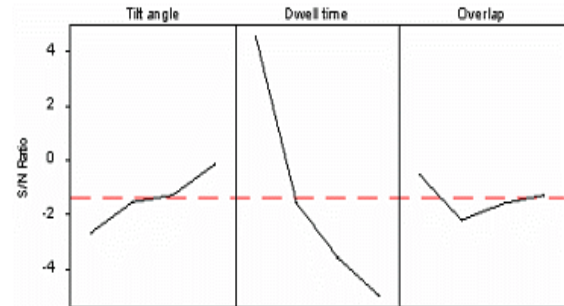


Fig. 2 Main Effects Plot of S/N Ratios by Taguchi analysis for FIB-CVD Yield

3 실험 결과 및 고찰

3.1 라인 패턴 실험

라인패턴 FIB-CVD의 실험 목적은 가능한 최소 선폭과 ion beam current density와 패턴 크기의 변화에 따른 증착 특성을 분석하기 위하여 실시되었다.

진공 챔버내 진공도는 10-7torr 이하를 유지하고 있으며, 사용 precursor로는 $C_{14}H_{10}$ 이며, substrate는 Si wafer를 이용하고 있다.

Table 1은 라인 패턴 가공실험 조건을 나타내고 있다. FIB-CVD 라인패턴 실험 변수는 이온빔 전류량(Ion Beam Current)과 패턴 폭이다. 실험 변수로 사용된 전류량은 각각 8, 48, 1318(pico ampere)이며, 폭은 30nm, 100nm, 200nm, 500nm, 1 μ m의 변화에 따른 실험을 실시하였다. 이온빔 전류량은 단위시간당 주입되는 이온 수를 의미하나 이때 단위면적당 주입량 또한 고려가 필요하다. 따라서 각각의 전류량에 대한 빔 직경은 각각 13, 23, 100nm이며, 계산된 ion beam current density(pico ampere/nm²)는 각각 0.06(8pico), 0.116(48pico), 0.168(1318pico)이다.

Fig. (3)-(7)은 FIB-CVD 라인패턴 실험결과이며, 측정은 SIM 이미지와 AFM을 이용하였다. 본 측정에 사용된 AFM의 최소 분해능은 Lateral resolution이 0.15nm, Vertical resolution이 0.05nm정도이다.

Table 1 Experimental Conditions

| | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Dwell Time | 0.375 usec | | | | |
| Tilt Angle | 0 degree | | | | |
| Ion Dose(NO./cm ²) | 222.222 x 10 ¹⁵ | | | | |
| OverLap | 0% | | | | |
| Pattern Shape | Rectangular (Length=5μm) | | | | |
| pattern width | 30nm | 100nm | 200nm | 500nm | 1μm |
| Ion Beam Current | | | | | |
| 8 (pico Amp.) (Dia=Φ 13nm) | Fig.3(a) | Fig.4(a) | Fig.5(a) | Fig.6(a) | Fig.7(a) |
| 48 (pico Amp.) (Dia=Φ 23nm) | Fig.3(b) | Fig.4(b) | Fig.5(b) | Fig.6(b) | Fig.7(b) |
| 1318 (pico Amp.) (Dia=1318nm) | Fig.3(c) | Fig.4(c) | Fig.5(c) | Fig.6(c) | Fig.7(c) |

Ion beam current의 변화에 따른 분석결과 8pico ampere일 경우 비교적 CVD가 잘 증착되었으나, 1318 pico ampere의 경우는 CVD 형상이 관찰되지 않으며, Sputtering이 발생하는 것이 이미지상 관찰되었다. 이는 ion beam current가 클 경우 단위 면적당 ion beam density도 상대적으로 크기 때문에 precursor의 반응에 의한 CVD Yield 보다 Ga⁺이온에 의한 Sputtering Yield가 상대적으로 많아진 이유로 판단되어진다. 이러한 결과는 AFM 3차원 형상 측정결과 및 2차원 단면 측정결과를 통해서도 확인이 가능하였으며, 정량적으로 수십nm 정도의 sputtering 결과를 재확인 할 수 있었다.

또한 AFM 측정을 위해 대기 중에 장기간 노출될 경우 다양한 오염에 노출되어 예상치 못한 측정결과가 발생되기 때문에 Pattern의 세심한 관리가 요구되며, 일부 그러한 특징이 관찰된다.

Fig. 7(a)은 라인 패턴 FIB-CVD 측정결과 패턴의 폭, 높이 및 체적에 대한 정량적인 측정결과를 나타내고 있다. 실험 결과를 검토해 보면 최소 패턴 폭은 48 pico ampere current beam을 이용할 경우 1.1μm 정도를 얻을 수 있었다. 이는 실제 지령패턴 폭에 비해 1μm 정도의 오차가 비례적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 화학적 증착과정에서 빔 주사 영역 이외의 영향력 부분을 나타내는 것으로 비교적 선형성을 보이고 있기 때문에 이를 통한 패턴폭의 예측에 비교적 수월하게 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)은 라인패턴 FIB-CVD의 패턴 높이에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 실험조건에서 패턴상의 단위 면적당 일정한 Ion Dose량(22.222x10¹⁵)이 주입되었기 때문에 실제 일정한 CVD 패턴의 높이가 기대되었으나, 측정결과 Beam Current와 패턴 폭의 변화에 따라 패턴 높이의 변화가 발생됨을 알 수 있었다. 결과적으로 Beam Current가 작을수록, 패턴 폭

이 클수록 증착물이 증가되는 경향을 보였다. 따라서 최대 CVD 수율은 8pico ampere beam과 1.0μm의 패턴 폭의 지령시에 얻을 수 있었다.

Fig. 7(c)는 라인패턴의 체적에 대한 측정결과를 나타내고 있으며, 주어진 ion beam current에 대해 선형적인 변화를 보이고 있다.

결론적으로 ion beam current가 작을수록 패턴 수율이 증가되는 이유로서 ion beam density가 작기 때문에 증착과정에서 발생하는 sputtering의 양이 상대적으로 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 또한 ion beam 에너지와 ion beam density와의 적정한 분석을 통한 최적조건을 기대할 수 있으나, 본 FIB 시스템의 특징상 ion beam 에너지가 30keV로 제한적이다.

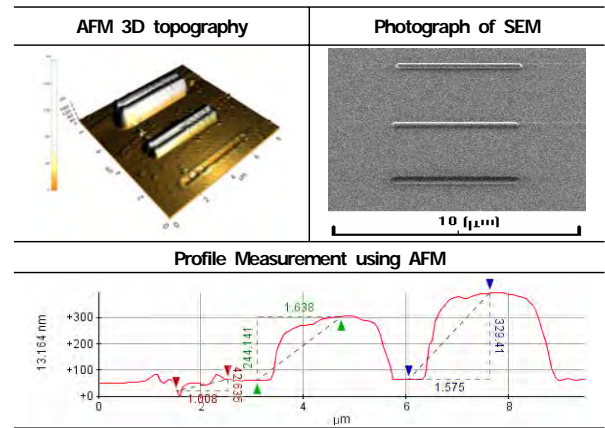


Fig. 3 Result of line pattern of 30nm width with respect to ion beam current

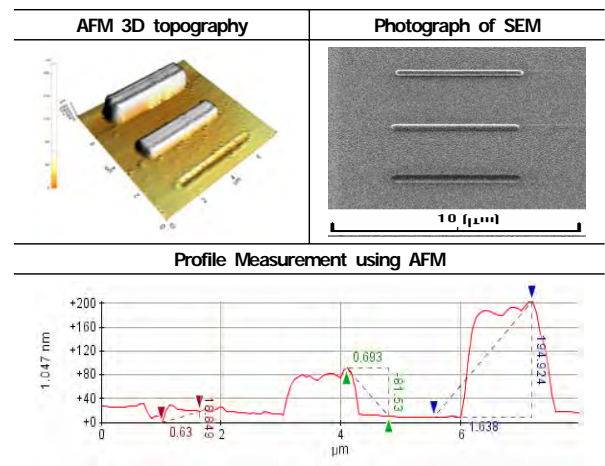


Fig. 4 Result of line pattern of 100nm width with respect to ion beam current

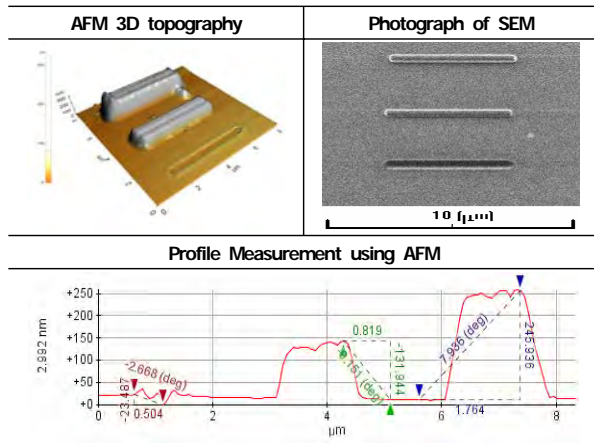


Fig. 5 Result of line pattern of 200nm width with respect to ion beam current

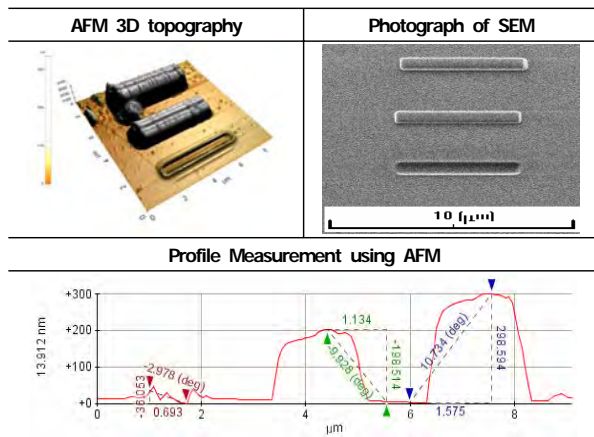


Fig. 6 Result of line pattern of 500nm width with respect to ion beam current

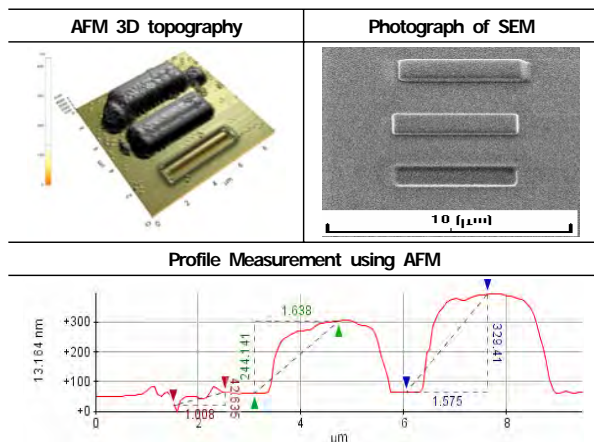


Fig. 7 Result of line pattern of 1 μm width with respect to ion beam current

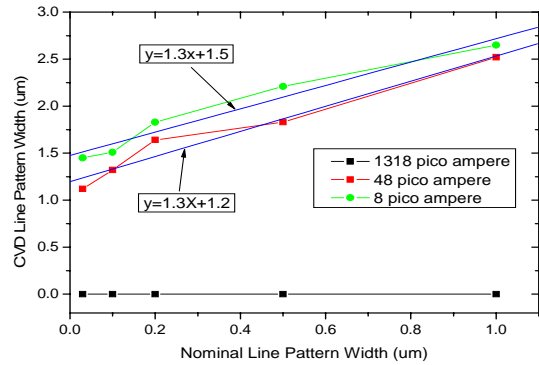


Fig 8(a) AFM results of the width of CVD line pattern

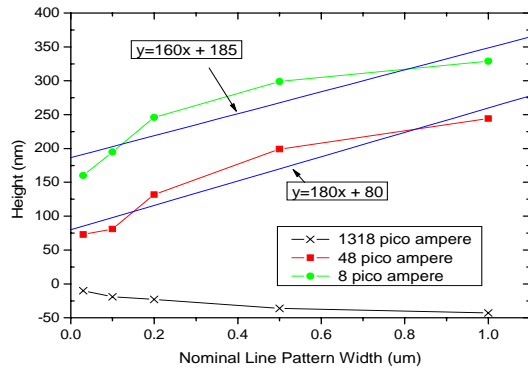


Fig 8(b) AFM results of the height of CVD line pattern

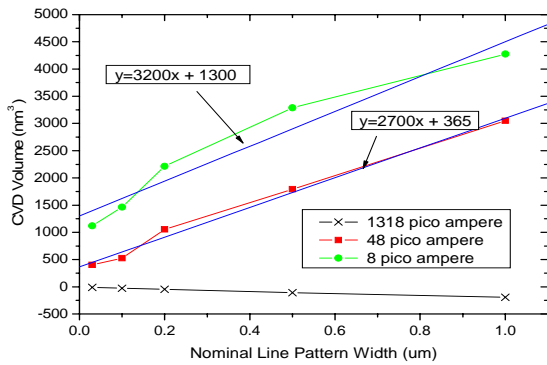


Fig 8(c) AFM results of the volume of CVD line pattern

4 결론

본 연구는 FIB-CVD 증착에 관한 내용으로 3차원 구조물 제작 및 수정에 FIB-CVD를 적용하기 위해 다양한 이온빔 및 주사 조건에 따른 가공 공정에 대한 실험 및 분석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 다구찌 기법을 활용한 3인자 4수준의 분석결과 CVD Yield에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터는 Dwell Time 임을 알 수 있었다. 또한 최대 CVD yield의 조건은 Tilt angle 45도, dwell time 0.375 μ sec, overlap 10%인 경우로 나타났다.
- (2) Beam Current에 따른 실험결과 Beam Current가 8pico ampere일 경우 비교적 CVD가 잘 증착되었으나, Beam Current가 1318pico ampere의 경우 CVD 형상이 관찰되지 않고, Sputtering이 발생하는 것이 이미지 상 관찰되었으며, AFM 측정결과를 통해 재확인이 가능하였다.
- (3) Beam Current에 따른 CVD의 역학적인 원인으로 Ion Beam Density(Pico Ampere/nm²)의 차이로 인함을 알 수 있었으며, 계산된 값은 0.06(8 Pico Amp), 0.116(48 Pico Amp), 0.168(1318 Pico Amp)으로 1318 Pico Amp. 빔의 경우 단위면적당 이온빔 주사량이 많아 증착량 보다는 Sputtering 량이 많기 때문으로 판단된다.
- (4) 3D 구조물제작을 위해서는 FIB-CVD 패턴 형상에 대한 CVD 형상 예측 정보의 DB화가 요구되어진다. 이를 위해 선폭, 높이 및 체적에 대한 선형 회귀 분석결과를 얻을 수 있었으며, 이에 대한 활용 방안 및 추가 정보 확보에 대한 다양한 연구 수행결과를 필요로 하고 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. S. Ro, C. V. Thompson, and J. Melngailis, 1994, "Mechanism of ion beam induced deposition of gold," J. Vac. Sci. Technol. B 12(1), pp.73-77.

2. J. Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito, S. Matsui, 2003, "Growth of three-dimensional nano-structures using FIB-CVD and its mechanical properties," Nucl. Inst. and Methods in Physics Res., B206, pp.472-477.
3. K. Watanabe, T. Morita, and R. Kometani, 2004, "Nanoimprint using three-dimensional microlens mold made by focused-ion-beam chemical vapor deposition," J. Vac. Sci. Technol. B22(1), pp.22-26.
4. R. Kometani, T. Morita, and K. Watanabe, 2004, "Nanomanipulator and actuator fabrication on glass capillary by focused-ion-beam-chemical vapor deposition," J. Vac. Sci. Technol., B22(1), Jan/Feb., pp.257-263.
5. T. Morita, K. Watanabe et al., 2002, "Three-Dimensional Nanoimprint Mold Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.41, pp.4425-4426.
6. A. D. Dubner, "Mechanism of Ion Beam Induced Deposition," Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1990.
7. H.Z Choi, E.G. Kang, S.W. Lee, W.P. Hong, " 최현중, 강은구, 이석우, 홍원표, 2004, “FIB를 이용한 나노가공공정 기술 개발”, 한국공작기계학회 2004 춘계학술대회논문집, pp.482-486.