

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.3.224

FIB를 이용한 DLC소재의 가공공정에 관한 연구

홍원표[†] · 최병열* · 강은구* · 이석우* · 최헌종*

(2008년 11월 21일 접수, 2009년 2월 24일 수정, 2009년 2월 25일 심사완료)

A Study on the Machining Characteristic of DLC Coated Mold Material Using FIB

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

Key Words: Sputtering(스퍼터링), DLC(Diamond-like Carbon), Waveguide Mold(웨이브가이드금형)

Abstract

FIB has been commonly used as a very powerful tool in the semiconductor industry. It is mainly used for mask repair, device correction, failure analysis and IC error correction, etc.

Currently, FIB is not being applied to the fabrication of the micro and nano-structured mold, because of low productivity. And also sputtering rate has been required to fabricate 3D shape.

In the paper, we studied the FIB-Sputtering rate according to mold materials. And surface roughness characteristics had been analysed for micro or nano mold fabrication. Si wafer, Glassy Carbon, STAVAX and DLC that have been normally considered as good micro or nano mold materials were used in the study.

1. 서론

FIB는 매우 짧은 파장과 높은 에너지를 이용하여 100nm 이하 크기의 구조물을 직접 제작하는 것이 가능하다. 또한 높은 성능의 마이크로 구조물 제작으로 반도체 산업 등에서 매우 유용한 도구로 이용되고 있다. 그러나 그 용도가 아직은 TEM 시편 제작 및 반도체 패턴 검사 등에 국한되어 있어 아직 가공장비로서의 기능보다는 측정 검사 장치로서의 역할이 보다 큰 것이 현실이다.

최근 다양한 응용 분야를 찾기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.^(1~5) 그러나

FIB의 가장 큰 단점으로 낮은 생산성이 지적되고 있어 이를 극복할 수 있는 방안으로 금형 제작과 같은 대량생산 가공체계를 갖추거나 또는 부품 가공시 기존의 기계가공 및 전기화학적 가공기술을 통한 1차 가공 후 미세가공 및 표면가공 분야에 적용하는 형태로서 가능하다. 미세 금형의 대상 제품으로는 DVD금형, 웨이브가이드금형 등이 있으며, 이는 2.5차원 형상으로서 마이크로/나노 패턴화가 요구된다. 특히 가공수율, 표면조도, 재증착 등은 FIB을 이용한 마이크로/나노 금형 가공 공정시 큰 문제점으로 지적된다.

본 논문에서는 FIB의 장점인 10nm이하 집속이 온빔을 이용하여 마이크로/나노 금형 제작을 위한 기반기술에 목적을 두고 있다. 이에 미세금형 제작을 위하여 금형재료로 Si Wafer, GC(Glassy Carbon), STAVAX, DLC(Diamond-like Carbon)를 선정하였고, 각각의 금형재료에 대한 가공 후 표면조도 및 FIB-Sputtering Rate에 대한 기초연구를 수행하였다.

[이 논문은 2008년도 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2008.6. 4-5. 제주오리엔탈호텔) 발표논문임]

[†] 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부
E-mail : wonpyodr@kitech.re.kr
TEL : (031)436-8056 FAX : (031)436-8050

* 한국생산기술연구원 디지털협업지원센터



Fig. 1 Focused ion beam (SMI8800, SEIKO, Japan)

2. 실험 장치

Fig. 1은 본 논문의 가공실험에 사용된 일본 SEIKO사의 SMI880 FIB 장비이다. 이온 소스는 Ga⁺를 이용하고 있으며, 렌즈는 상하 두 개를 가지고 있다. 또한 하부에 있는 Aperture는 5개의 직경으로 자동조절이 가능하며, 배율은 80,000배까지 가능하다. 최소 분해능은 0.03 μ m정도이며, 이때의 적정가속도는 30keV 이다.

FIB 가공공정 후 측정은 PSIA사의 XE-100 AFM장비를 사용하였다. AFM 측정을 통해 FIB에서 가공한 3차원 구조물의 이미지 및 2차원 프로파일을 얻고 정량적인 측정을 수행하였다.

3. 금형재료에 따른 FIB-Sputtering 특성 실험

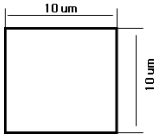
금형 재료에 따른 FIB-Sputtering Rate의 가공특성에 관한 실험으로 이온빔 주입 패턴 층수(The number of the ion dose pattern layer)에 변화를 주어 수행하였다.⁽⁸⁾

금형재료는 Si Wafer, GC, STAVAX, DLC를 사용하였다.

DLC 금형재료는 탄소의 결합구조를 가지고 있는 비정질재료로 고상 탄소 박막의 하나이며 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 내마모성, 윤활성, 전기절연성, 화학적 안정성 및 광학적 특성을 가진 재료이다. 이러한 DLC박막의 응용은 광학재료의 보호 및 무반사 코팅, 저마찰 오버코팅 등에 응용되고 있다.⁽⁶⁾

GC는 비정질재료로 일본 AIST에서 많은 연구가 진행되고 있으며, 높은 내열성 및 화학적인

Table 1 Experimental conditions

Pitch	0.005 μ m
Tilt Angle	0 degree
Dwell Time	0.0004 ms
Unit Area Ion Dose	480 μ As/cm ²
Substrate	Si, GC, STAVAX, DLC
Number of Ion Dose Pattern Layer	100, 200, 300
Pattern Shape	

안정성, 높은 경도 등의 특징을 가지고 있어 공정상 여러 가지 가혹 조건을 가지는 엠보싱 몰드로서의 재료적인 특성이 적합한 것으로 알려져 있다.^(3~5)

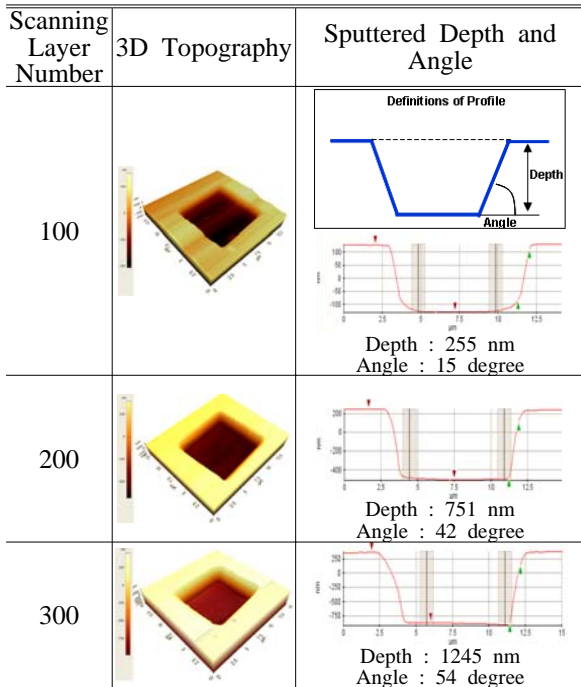
STAVAX(크롬 합금 스테인리스 금형강)는 일반적으로 사출금형강으로 많이 활용되고 있으며, 최근 LCD 백라이트 유니트용 도광판제조 금형 등에 많이 응용되고 있다. 내부식성, 내마모성, 경면성 그리고 금형의 냉각장치에 큰 효과를 가진 재료이다.

그리고 Si Wafer는 일반적으로 많이 알려져 있는 반도체 제조공정의 주재료이며, 마이크로/나노 패턴제작을 위한 공정기술의 기초연구에 많이 활용되고 있는 재료이다.

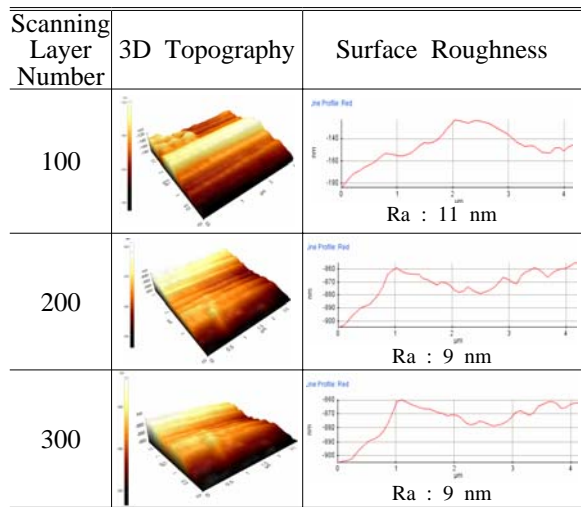
본 논문에서는 4종류의 금형재료에 대한 FIB의 마이크로/나노 금형가공 특성중 FIB-Sputtering rate 및 가공표면거칠기에 관한 기초연구를 수행하였다.

FIB가공조건을 Table 1에 나타내었다. 이온주입 패턴크기는 100 μ m²의 사각패턴으로 선정하였다. 이온빔 주입 패턴층수 변화는 100번, 200번, 300번으로 하였으며, 이때 가공패턴의 이온빔 주입량은 480 μ As/cm²이다.

Fig. 2-5는 각각 금형재료의 조건에 따른 패턴 가공 실험결과이다. 실험결과의 분석은 AFM을 사용하였으며, 가공 깊이에 대한 측정 기준은 표면 평균높이에 대한 최대 깊이를 가공 깊이로 하여 FWHM 값을 이용하였다. 또한 표면거칠기는 사각패턴가공 후 3 μ m² 가공면적에 대한 중심선 평균거칠기를 분석하여 나타내었다.



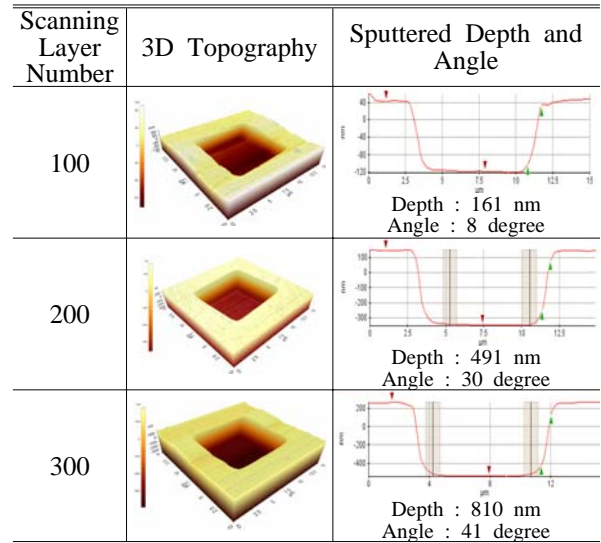
(a) Measurement results of sputtered pattern



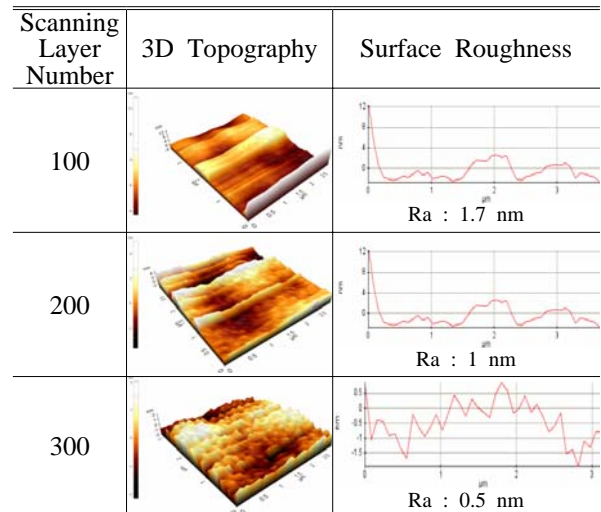
(b) Surface roughness results

Fig. 2 FIB-sputtering test for Si Wafer

Fig. 4(a), (b)는 STAVAX 금형재료의 이온빔 주입 패턴 층수에 따른 실험결과이다. 측정결과를 통하여 가공깊이변화는 274, 787, 1306nm로 다른 금형재료와 비교하여 깊게 가공되는 특성을 지니고 있음을 확인하였다. 그러나 Fig. 4(b)와 같이 표면거칠기는 일정한 변화없이 관찰되나 중심선 평균거칠기 값이 84.3nm로 Si Wafer, GC, DLC재료와 비교하여 매우 좋지 않은 특징이 관찰되었



(a) Measurement results of sputtered pattern

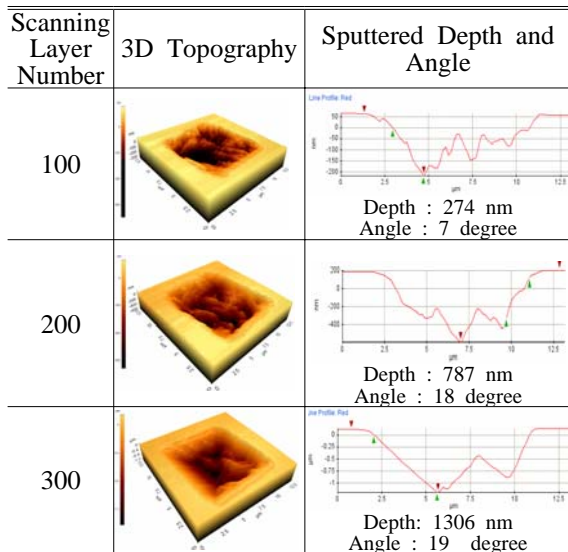


(b) Surface roughness results

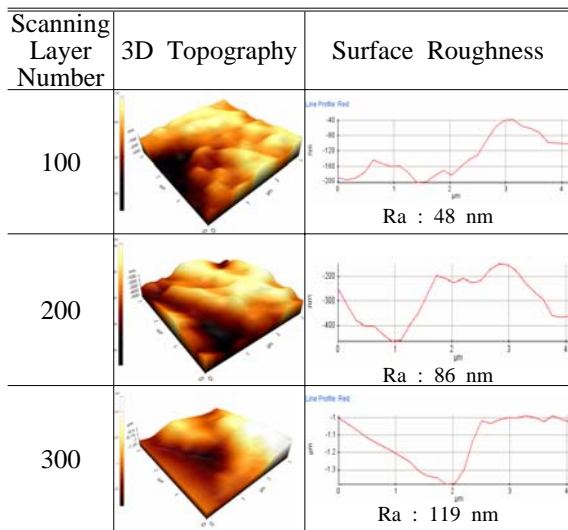
Fig. 3 FIB-sputtering test for Glassy Carbon

다. 이는 STAVAX 금형재료가 FIB가공시 비금속 금형재료와 비교하여 가공표면에 재증착이 많이 발생하기 때문이며,⁽¹⁰⁾ 따라서 STAVAX 금형재료는 가공표면거칠기를 고려한다면 FIB가공의 미세 금형재료로 적당하지 않음을 확인하였다.

또한 Si wafer, GC, DLC는 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 5에 나타내었다. 이온빔 주입 패턴 층수의 변화에 따른 깊이 변화를 살펴볼 경우 이온빔 주입 패턴 층수가 100, 200, 300번으로 증가함에 따라 Sputtering rate도 일정하게 증가함을 확인하였다. 가공성은 Si Wafer가 가장 뛰어나고 GC, DLC 순서로 우수함을 알 수 있었다. 또한 표면거칠기



(a) Measurement results of sputtered pattern



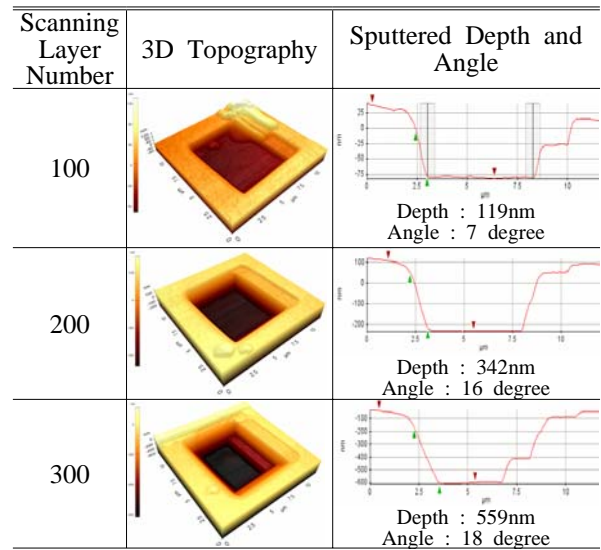
(b) Surface roughness results

Fig. 4 FIB-sputtering test for STAVAX

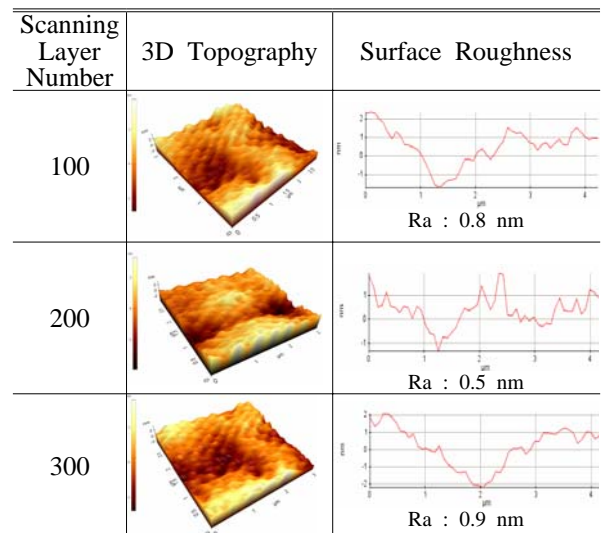
측면에서는 DLC가 가장 우수하고 GC, Si Wafer 순서로 좋은 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

Fig. 5(a)는 DLC 재료의 FIB가공 결과이다. DLC재료의 가공특성을 고려해볼 때 FIB가공시 비정질 구조를 갖는 재료는 Sputtering된 원자가 쉽게 떨어져 나오는 특성이 있는 것으로 판단되며, 이러한 특성으로 인하여 가공표면 품질이 향상됨을 확인하였다.

그리고 금형가공시 여러가지 요인들에 의하여



(a) Measurement results of sputtered pattern

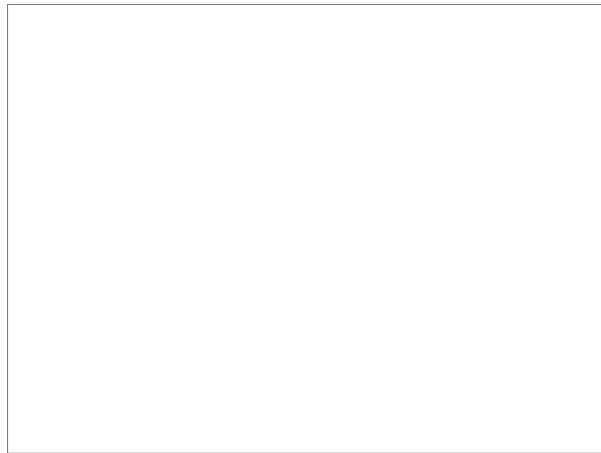


(b) Surface roughness results

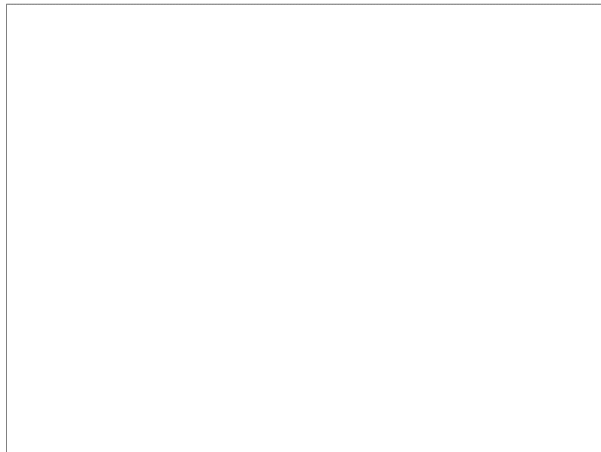
Fig. 5 FIB-sputtering test for DLC

이상적인 패턴의 가공은 실제 어려운 실정이며, 특히 재증착과 Charging현상이 가공 정밀도 저하에 가장 큰 영향을 미친다.

이에 패턴층수 300에 대한 Angle 값 비교 결과 DLC 18degree, STAVAX 19degree로 Si Wafer 54degree, GC재료 41degree와 비교할 때 아주 낮은 값을 나타내었다. 이를 통해 DLC와 STAVAX 재료는 특성상 많은 재증착과 Charging현상을 수반하며 이로 인해 Sputtering Rate이 낮아짐을 확인할 수 있었다.



(a) FIB-Sputtering rate



(b) Surface roughness

Fig. 6 FIB-Sputtering rate and surface roughness according to mold materials

결과적으로 Fig. 6(a)와 같이 이온빔 주입 패턴 층수가 증가함에 따라 가공깊이가 비례적으로 증가함을 확인하였으며, 이때 FIB-Sputtering rate를 구할 수 있었다. STAVAX, Si wafer, GC, DLC 각각의 경우 2.58, 2.48, 1.62, 1.10 nm/Unit Area Ion Dose로 FIB-Sputtering rate이 STAVAX가 가장 크고 DLC가 가장 작음을 재 확인하였다.

Fig. 6(b)은 각각 금형재료에 대한 가공면의 중심선 평균거칠기이다. 이때 Si wafer, GC, DLC는 일정한 변화를 보이고 있으나 STAVAX재료는 증가되는 결과를 얻었다.

중심선 평균거칠기를 비교하면 STAVAX, Si wafer, GC, DLC 각각의 경우 84.3, 9.7, 1.1, 0.7 nm(Ra) 수준으로 STAVAX가 가장 나쁜 특성을

보이며, 반면 DLC가 매우 좋은 특성을 보임을 확인하였다. 이는 Fig. 4의 결과와 동일하게 금속 재료간의 재증착이 원인이며, STAVAX는 이온주입 패턴 층수가 증가할 때마다 중심선 평균거칠기가 증가되는 특성이 있음을 확인하였다.

그리고 Fig 6(b)로부터 각각 재료에 대한 최고 최저차이(peak-to-valley) 계산결과 STAVAX, Si wafer, GC, DLC 각각의 경우 294, 5.17, 5.9, 3.8 nm 수준이었다. 가공표면의 최고최저차이가 가장 큰 값은 STAVAX재료였으며, 가장 낮은 값은 DLC임을 확인하였다.

이러한 결과들을 종합해볼 때 STAVAX는 이온빔 주입 층수의 변화에 따른 가공깊이와 FIB-Sputtering rate이 높은 특성을 가지고 있으나 가공표면의 중심선 평균거칠기와 최고최저차이 및 재증착을 측면에서 FIB가공을 위한 금형재료로 적당하지 않음을 확인하였다.

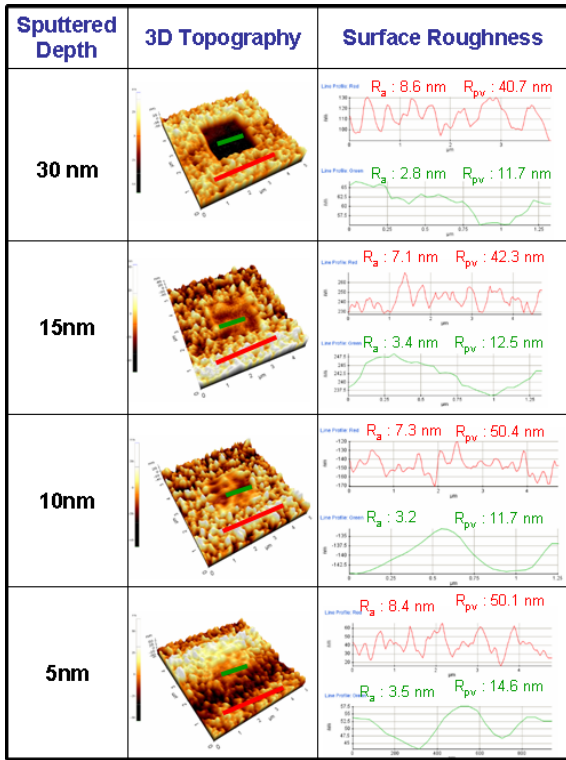
Si Wafer는 취성이 매우 강해 잘 깨어지는 특성이 있어 금형재료로서 활용성이 적으나 가공수를 측면에서는 우수하고 가공면 표면거칠기는 GC재료보다 낮은 특성을 보여 활용성이 크다.

마이크로/나노금형의 표면품위향상 측면에서 고려해 볼 때 FIB가공을 위한 재료로는 DLC가 우수한 특성을 지닌 금형재료로 판단된다.

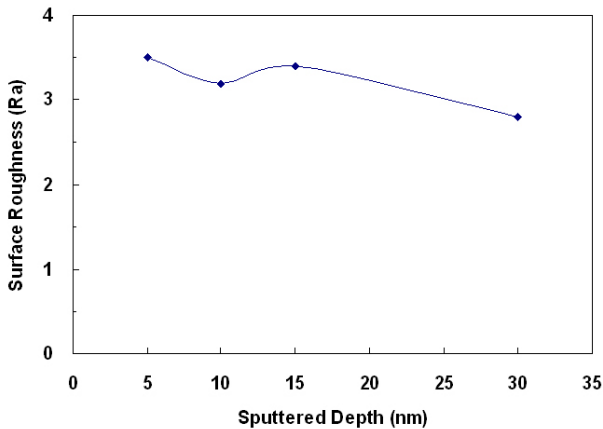
4. DLC 재료의 표면거칠기 특성 분석

마이크로/나노 금형에의 적용성을 검토하고자 우선적으로 DLC 소재의 표면거칠기 특성에 대한 실험을 수행하였다. 표면거칠기 특성이 우수할수록 성형품과의 분리특성인 이형성이 좋기 때문이다.

Fig. 7은 가공 깊이에 따른 FIB 가공면과 비가공면의 표면거칠기 비교 결과로 가공 깊이가 증가할수록 표면거칠기가 우수함을 확인할 수 있었다. FIB 가공전 중심선 평균거칠기가 8.8nm(Ra)였으나, FIB 가공 후에는 중심선 평균거칠기가 3.2nm(Ra)로 가공면의 표면거칠기가 향상됨을 확인하였다. 특히 가공 깊이가 30nm일 경우 중심선 평균거칠기가 2.8nm(Ra)로 가장 우수하였다. 이와 같이 표면거칠기가 향상되는 것은 DLC재료의 경우 다른 재료에 비해 FIB 가공시에 재증착 현상이 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Results of surface roughness



(b) Surface roughness according to sputtered depth

Fig. 7 Surface roughness characteristic of DLC film

4. 결론

본 논문에서는 FIB 가공공정기술을 나노 금형 가공에 응용하기 위한 기반기술 확보에 목적을 두고 Si Wafer, GC, STAVAX, DLC 재료에 대한 표면조도, FIB-Sputtering rate에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 금형재료에의 이온빔 주입 패턴 층수 증가에 따라 가공깊이가 비례적으로 증가하였다. FIB Sputtering rate는 STAVAX, Si wafer, GC, DLC 각각 2.58, 2.48, 1.62, 1.10 nm/Unit Area Ion Dose임을 알 수 있었다.

(2) 가공면 표면거칠기는 가공깊이가 증가함에 따라 Si wafer, GC, DLC는 일정한 값을 가지나 STAVAX는 오히려 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 가공표면의 재증착 현상이 원인이며, STAVAX는 FIB가공을 통한 미세금형재료로 적당하지 않음이 확인되었다.

(3) 이때 중심선 평균거칠기는 STAVAX, Si wafer, GC, DLC 각각 84.3, 9.7, 1.1, 0.7 nm(Ra) 수준이며, 최고최저차이(peak-to-valley)는 각각 294, 5.17, 5.9, 3.8 nm 수준이었다.

(4) DLC 재료는 FIB 가공을 통한 표면거칠기 향상이 가능하며, 이를 위해서는 가공 깊이에 대한 표면조도 향상 메커니즘 및 DB구축에 대한 추가 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원의 “디지털 인쇄 기법을 이용한 광전소자의 직접제작 기술 개발” 과제 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Dubner, A. D., 1990, "Mechanism of Ion Beam Induced Deposition," *Doctoral Thesis*, Massachusetts Institute of Technology
- (2) Noriko, N. and Masafumi, T., 2007, "Nano-Fabrication Utilizing Point Defects Induced by Ion-Implantation," *Surface and Coatings Technology*, Vol.201, pp. 8521~8525.
- (3) Youn, S. W., Takahashi, M., Goto, H. and Maeda, R. 2007, "Fabrication of Micro-Mold for Glass Embossing Using Focused Ion Beam, Femto-Second Laser, Eximer Laser And Dicing Techniques," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.187~188, pp. 326~330.
- (4) Youn, S. W., Takahashi, M., Goto, H. and Maeda,

- R., 2006, "Microstructuring of Glassy Carbon Mold for Glass Embossing-Comparison of Focused Ion Beam, Nano/Femtosecond-Pulsed Laser and Mechanical Machining," *Microelectronic Engineering*, Vol.83, pp. 2482~2492
- (5) Kuhnke, M., Lippert, T., Ortelli, E., Scherer, G. G. and Wokaun, A., 2004, "Microstructuring of Glassy Carbon: Comparison of Laser Machining and Reactive Ion Etching," *Thin Solid Films*, Vol.453-454, pp. 36~41.
- (6) Jeong, J. I, Yang, J. H., Park, Y. H., Lee, K. H. and Kim H. K., 2007, "Effect of the Ion Beam Conditions and Interlayer on the Formation of Diamond-Like Carbon Films," *RIST Research Report*, Vol.21, pp. 49~56.
- (7) Lee, S. W., Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P. and Choi, H. Z., 2007, "Analysis of FIB-Sputtering Characteristics on Glassy Carbon," *KSPE Spring Conference*, pp. 767~768.
- (8) Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P., Lee, S. W. and Choi, H. Z., 2007, "Nano-Patterning Characteristics Using FIB-Sputtering Technology for DVD Molds," *J. of Industrial Technology*, Vol.16, pp. 158~169.
- (9) Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P., Lee, S. W. and Choi, H. Z., 2006, "FIB Processing Technology for Nano Stamp," *KSPE Autumn Conference*, pp. 539~540.
- (10) Hong, W. P., Kang, E. G., Choi, B. Y., Lee, S. W. and Choi, H. Z., 2006, "Development of the Process to Minimize the Redeposition Effect for FIB Technology," *J. of Industrial Technology*, Vol.15, pp. 56-67.