

# FIB를 이용한 다이아몬드 기판 위의 나노급 미세 패턴의 형상 가공

송오성<sup>1\*</sup>, 김종률

## Nano-scale Patterning on Diamond substrates using an FIB

Ohsung Song<sup>1\*</sup> and Jongryul Kim

**요약** 필드이온빔(FIB) 가공기를 써서 초고강도의 벌크다이아몬드를 가공하기 위해 이온 소오스의 종류와 가공 조건에 따른 나노급 미세 선폭의 최적조건을 알아보고 이에 근거한 2차원적인 텍스트의 가공과 3차원적인 박막요소의 가공을 시도하였다. 다이아몬드 기판과 실리콘 기판을 Ga와 H<sub>2</sub>O 소오스를 이용하는 FIB를 써서 30 kV 빔 전류를 10 pA ~ 5 nA로 변화시키면서 패터닝하고 이때 각각 20 μm 길이로 생성되는 선형 패턴의 선폭, 깊이, 에치속도, 에치형상, 깊이선폭비 (aspect ratio)를 확인하였다. 다이아몬드도 실리콘 기판과 마찬가지로 나노급 패턴의 형성이 가능하였다. H<sub>2</sub>O 소오스를 채용한 경우가 에치 깊이가 2배 정도 증가하였으며 동일한 가공 조건에서는 실리콘에 비해 다이아몬드의 에치 선폭이 감소는 경향이 있었다. 특히 다이아몬드는 절연성 때문에 차지가 축적되어 가공 중 이온빔이 불안정해지는 문제가 있었으나 차지 중화 모드를 이용하여 성공적으로 sub-100 nm급 선폭의 미세 가공이 가능하였다. 확인된 선폭가공 조건에 근거하여 2차원적으로 0.3carat의 보석용 다이아몬드의 거들부에 300여개의 글자를 FIB를 활용하여 선폭 240 nm정도로 명확히 기록하는 것이 가능하였다. Ga<sup>+</sup>이온과 30 eV-30 pA로 조건에서 비교적 넓은 선폭과 Z축 depth 고정범위에서 많은 개인정보의 기록이 영구적으로 가능하였으며 전자현미경으로 재생이 가능하였다. 3차원적으로 두께 1 μm의 박막요소를 FIB가공과 백금 용접으로 떼어낸 후 FIB가공으로 두께가 100 nm가 되도록 한 후 투과전자현미경을 이용하여 성분 분석을 하는 것이 성공적으로 수행될 수 있었다.

**Abstract** We patterned nano-width lines on a super hard bulk diamond substrate by varying the ion beam current and ion beam sources with a dual beam field ion beam (FIB). In addition, we successfully fabricated two-dimensional nano patterns and three-dimensional nano plate modules. We prepared nano lines on a diamond and a silicon substrate at the beam condition of 30 kV, 10 pA ~ 5 nA with Ga<sup>+</sup> ion and H<sub>2</sub>O assisted ion sources. We measured each of the line-width, line-depth, etched line profiles, etch rate, and aspect ratio, and then compared them. We confirmed that nano patterning was possible on both a bulk diamond and a silicon substrate. The etch rate of H<sub>2</sub>O source can be enhanced about two times than that of Ga source. The width of patterns on a diamond was smaller than that on a silicon substrate at the same ion beam power. The sub-100 nm patterns on a diamond were made under the charge neutralization mode to prevent charge accumulation. We successfully made a two-dimensional, 240 nm-width text of the 300-lettered Lord's Prayer on a gem diamond with 30 kV-30 pA FIB. The patterned text image was readable with a scanning electron microscope. Moreover, three dimensional nano-thick plate module fabrication was made successfully with an FIB and a platinum deposition, and electron energy loss spectrum (EELS) analysis was easily performed with the prepared nano plate module.

**Key words** : diamonds, FIB (field ion beam), nano-scale patterning, gem diamonds, Ga source

### 1. 서론

이 논문은 2006년 서울시 산학연 협력사업 중 서울형 미래도시산업 육성 지원사업 지원에 의해 연구되었음.

<sup>1</sup>서울시립대학교 신소재공학과

\*교신저자: 송오성(songos@uos.ac.kr)

다이아몬드는 산업적으로 매우 중요한 재료이다. 1954년 12월에 미국 제너럴 일렉트릭사가 고온고압

환경에서 최초의 분말형 다이아몬드 합성에 성공한 이후로 합성 다이아몬드는 천연 다이아몬드 생산량의 3 배 정도를 상회하고 있으며 매년 60ton 정도의 다이아몬드가 산업용으로 정밀 기계류의 연마, 절삭 가공에 필수적으로 쓰이고 있다.[1,2]

최근에는 다이아몬드의 우수한 절연 특성과 열전도도, 밴드갭 특성을 이용하여 전자 소자의 속도를 향상시키고, 고온 안정성을 부가시켜 기존 실리콘보다 더 높고 고온 작동성을 갖는 반도체로 이용하는 것이 가능하게 되었다.[3]

최근의 합성 다이아몬드는 특히 기존의 CVD 다이아몬드[4] 외에도 HPHT(high pressure-high temperature) 환경을 쉽게 만들 수 있는 split-sphere 장비를 이용하여 3carat 급 이상의 다이아몬드를 경제적으로 생산하는 기술이 상용화되어 보석용 다이아몬드를 중심으로 전자소자의 기관용이 가능한 대구경 다이아몬드의 생산이 현실화되고 있다. 따라서 전자 소자 생산을 위한 다이아몬드 기관은 이미 현실화되고 있으며 이를 이용한 가능성을 확인하는 연구가 필수적이다.[5]

FIB(field ion beam)는 1990년부터 나노급 패터닝을 이용한 마이크로 머시닝과 에칭과 증착을 이용한 반도체 소자의 제작공정에의 응용과 기존의 기계적 연마에 의한 투과 전자 현미경 샘플 제작을 에칭을 이용하여 쉽게 제작하는데 적용되어 나노급 공정과 분석에 유리한 장비이다. 특히 실리콘 소자에 대해서는 이러한 직접 패터닝과 TEM 시편 제작에 관한 공정이 일반화되어 있는 상황이다.[6]

본 실험에 쓰인 장비는 dual beam FIB로써 SEM이 장착되어 이온빔과 함께 전자빔을 동시에 사용하여 가공 및 측정이 가능하도록 설계되었다. 또한  $Ga^+$ 를 비롯한 여러 이온소스를 가속시켜 전자소자의 측정과 성분분석[7], 에칭과 증착[8] 기능을 하는 첨단장비로써 10 mm까지의 분해능을 가진 나노급 분석장비이다. SEM과 비슷하여 조작이 상대적으로 간단하며 빔에너지는 10 ~ 50 kV, 빔전류는 1 pA ~ 10 nA 정도범위에서 작동한다.

FIB를 이용하여 다이아몬드를 가공하는 방안은 기존의 실리콘에 비해서 다이아몬드의 결합력이 매우 우수하므로 통상의  $Ga^+$ 이온으로는 에치 깊이나 효율이 실리콘 가공 시 보다 낮을 것이 확실하여, 이러한 문제를 해결하기 위해 다른 이온 소오스의 활용이 활발히 연구되고 있다.  $H_2O$ 가스 등을 넣어 에치 효율을 높이거나[9],  $O_2$ ,  $XeF_2$  탄소와의 결합력이 큰 가스를 도입시켜 에치 속도를 향상시키는 연구[10,11]가 진행

된 바 있으나, 대부분 박막형 다이아몬드에 대한 연구이며 보석용 벌크 다이아몬드에 대한 연구는 미미한 실정이다.

실제로 우수한 절연성 소재인 다이아몬드의 FIB가공 중에 생기는 국부적 차징효과 때문에 생기는 이온빔의 뿔림(drifting) 현상에 의해 안정한 패터닝이 되지 못하는 문제로 인해서 가공 시 전자빔을 같이 조사하여 차지를 중성화시키는 방안이 일반적이지만 이러한 방법도 큰 보석용 다이아몬드의 경우 복잡한 3차원적 형상과 큰 면적에 의해 기존의 박막에 비해 더 쉽게 국부적인 차징효과가 커지는 문제가 있어서 이러한 중성화 방안이 벌크형 다이아몬드에도 적절히 응용될 수 있는지는 잘 알려지지 않았다. 즉, 일반적인 마이크로급의 박막형 다이아몬드와 보석용 벌크 다이아몬드는 크기와 형상에 따른 차징효과 때문에 FIB 가공 조건이 매우 달라질 수 있으므로 실제 벌크다이아몬드를 대상으로 한 적절한 가공조건의 확인이 필요한 상황이다.

이러한 문제의 해결을 위해서 통상적으로 많이 쓰는 Ga 이온 외에  $H_2O$  가스를 도입하여 카본을 에치하는 SCE(selective carbon etch)를 도입하는 경우 가공 시에 어떤 최종 선폭과 형상의 변화가 있을 것인가 하는 문제와, 국부적인 차징효과를 저감시키기 위해서 전자빔을 동시에 주입하는 경우 어느 정도까지 차징 효과에 의한 이온빔의 왜곡을 방지할 수 있는지가 확인되어야 한다. 본 연구에서는 먼저 기준이 되는 실리콘과 벌크 다이아몬드에 대해서 30 kV에서 10 nA ~ 50 pA 까지 빔파워를 변화시키면서 Ga 이온과  $H_2O$  이온을 써서 각각 길이 20  $\mu m$ 의 선폭을 제작한 경우 이때의 선폭, 깊이, 형상, 에치속도와 깊이/선폭비를 확인하여 나노급 선폭을 제작하기 위한 최적조건을 확인하였다.

두 번째로는 확인된 나노급 선폭 가공 조건을 이용하여 실제 보석용 다이아몬드에 개인정보를 정밀하게 기록하는 것을 시도하여 보았다. 고품질의 보석용 다이아몬드는 제품 유통 시 품질확인을 위해서 거들부에 약 다섯 자리 정도의 고유 숫자를 기록하는 것이 일반적이며 그 크기는 대략 100  $\mu m$ 정도이다. Nd-YAG 레이저를 써서 다이아몬드의 허리부분인 거들에 각인하는 이 방안은 레이저의 기록 시에 열에너지가 국부적으로 집중되어 열스트레스에 의한 값비싼 다이아몬드에 마이크로 크랙을 발달시킬 우려와, 약  $10^{-4}g$  정도의 중량손실을 가져와서 통상 소수 셋째자리까지의 무게로 평가하는 다이아몬드의 총중량에 감소를 초래할 수 있는 문제가 있었다.

그러나 FIB로 다이아몬드에 가공하면 약 300자를 각인하여도  $10^{-9}g$  정도의 중량 변화만을 가져와서 많은 양의 text, image 정보를 기록하더라도 원래 보석의 중량품질에 영향을 주지 않으며, 혹시 잘못된 기록이나 기록의 수정에서도 FIB로 평탄화를 실시하고 재기록 하는 작업을 1000회 이상하여도 중량손실이 기존 레이저 마킹에 근접하는 수준으로 미미하다. 한편 FIB의 빔에너지는 30 kV를 기준으로 수 nA이하이므로 주입 이온이 다이아몬드의 수백 nm정도의 표면부에만 영향을 주므로 불필요한 열에너지나 내부 크랙의 발생 없이 많은 개인정보를 효과적으로 기록할 수 있는 장점이 있어서 기존의 레이저 각인에 비해 우수한 장점이 있다.

이러한 배경에서 전 세계적으로 가장 많이 보급된 책 중 하나인 「성경」에서 특히 많은 사람들이 알고 있는 영문 주기도문 (Lord's prayer)을 보석용 다이아몬드의 거들에 나노급 각인을 통상의 FIB 조건에서 텍스트의 선폭을 달리하며 실시하면서 가장 적절한 패턴링이 되는 조건을 확인하였다. 주기도문은 영문으로 총 298자로 이루어진 것으로, 가로길이의 1/100이 한 글자의 획을 이루는 선폭이 되도록 하여 많은 양의 텍스트 정보가 실제로 명확히 보석용 다이아몬드에 FIB로 가공될 수 있는지 확인하였다.

앞서의 벌크 다이아몬드의 나노급 이차원적 가공의 가능성을 확인한 후, 더 나아가 벌크다이아몬드의 3차원적 가공의 가능성을 확인하였다. 이러한 시도는 벌크 다이아몬드를 효율적으로 마이크로, 나노급 소재의 기판이나 요소 모듈로 사용하기 위해 필수적인 가공공정으로서 예로 투과전자현미경의 시편을 만드는데도 효과적으로 활용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 FIB를 활용하여 고강도 벌크 다이아몬드의 1차원, 2차원, 3차원적인 나노급 미세가공의 가능성과 이를 산업적으로 활용할 수 있는 가능성을 확인하여 보았다.

## 2. 실험방법

본 실험에 쓰인 장비는 dual beam FIB로써 SEM이 장착되어 이온빔과 함께 전자빔을 동시에 사용하여 가공 및 측정이 가능하도록 설계된 FEI사의 Dual Beam NanoLab 200 모델을 채용하였다. 이온빔과 전자빔을 발생시킬 수 있는 기능을 가진 장비로서 5가지 이온소오스를 가진 모델로서 2, 3차원적인 가공 시에는 모두 Ga 소오스를 이용하였다.

한편 이온빔으로 가공된 면을 in-situ 로 확인할 수 있는 tilt stage와 Zyvyex F100 나노 탐침이 구비되어 four-point probe로 특정한 부분을 들어 올릴 수 있는 기능이 있고 나노급 패턴의 고배율 관찰이 주사전자현미경을 통하여 가능하도록 디자인 되었다. 그림 1에 실제 실험에 사용된 장비 사진을 나타내었다.

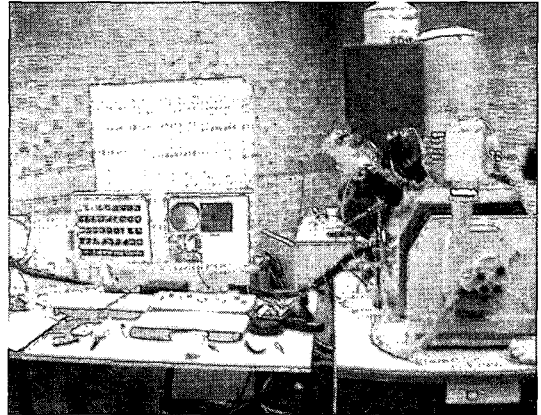


그림 1. 실험에 사용된 FIB장비의 모습.

Type 1b의 직경 1.2 mm의 yellow 합성 다이아몬드를 준비하여 표면을 30 kV- 7 nA 조건으로  $50 \mu m \times 50 \mu m \times 300 nm$ 의 공간을 가공하여 선폭이 생성되는 면에 평탄화를 실시하였다.

완성된 평탄화면에 30 kV 조건으로 dwell time = 1  $\mu s$ , total time = 1min 로 고정하여 20  $\mu m$ 길이의 선을 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000 pA의 9가지 조건으로 바꾸며 평행하게 그림 2 (a)와 같이 제작하였다. 이때 절연재료인 다이아몬드 표면에 축적되는 양이온의 국부적 차장효과를 저감하기 위해서 약간의 전자빔을 동시에 주입하는 차지중성화 모드 로 진행하였다.

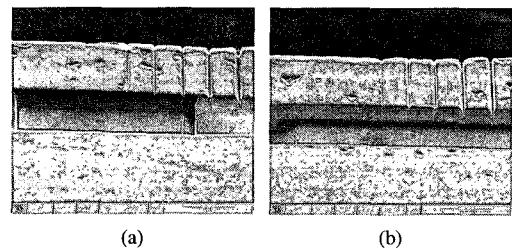


그림 2. 전류에 따른 FIB를 활용한 다이아몬드 위의 미세 선의 제작 (a) Ga 소오스, (b) SCE 소오스. 동일한 방법으로 H<sub>2</sub>O 소오스를 써서 selective

carbon etch (SCE)를 (b)와 같이 실시하였다. 완성된 선들의 하단부에 Ga 소오스로 트렌치를 만들어서 후에 틸팅하여 선의 프로파일을 확인할 수 있도록 하였다.

마찬가지 방법으로 실리콘 기판에 대해서 상기 방법으로 시편을 준비하여 다이아몬드 시편과 비교할 수 있도록 하였다.

완성된 패턴에 대해서 FIB에 장착된 e-beam 모드로 그림 3과 같이 선폭을 측정하여 확인하고 틸팅하여 두께, 프로파일 등을 측정하였다. 그림 3은 0.5 nA인 경우 (a) Ga 소오스와 (b) SCE 소오스로 가공한 경우의 수직 프로파일을 보이고 있으며 다른 조건에서도 이와 같은 확대 이미지로부터 선폭의 물리적 특성을 판단하였다. 이런 이미지로 부터의 측정값을 이용하여 분당 에치속도와 두께/선폭 비를 결정하였다. 동일한 방법으로 실리콘 기판에 대해서도 다이아몬드와 같은 이온 빔의 공정조건과 이온 소오스를 Ga와 SCE로 하여 실시하여 비교하였다.

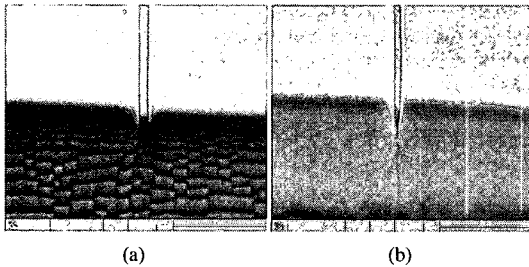


그림 3. FIB로 30 kV-0.5 nA 조건으로 생성된 다이아몬드 위 선폭의 주사전자현미경 이미지 (a) Ga 소오스, (b) SCE 소오스.

벌크다이아몬드의 2차원적인 나노급 패턴 가공의 가능성을 확인하는 실험을 진행하였다. 먼저 보석용 0.33ct의 라운드 브릴리언트형으로 커트된 SI급 (slightly included) 샴페인 칼라의 다이아몬드 나석을 준비하였다. 준비된 다이아몬드를 알콜로 표면을 세척 후 바이스형 시편홀더에 테이블과 큐릿을 잡아주게 하여 거들부가 FIB 컬럼에 수직으로 위치하도록 하였다.

시편이 장입된 후 거들의 수직면을 FIB를 이용하여 평탄부를 만들었다. 평탄부를 가로세로 깊이를 50  $\mu\text{m}$   $\times$  50  $\mu\text{m}$   $\times$  300 nm로 하여 Ga<sup>+</sup>이온을 사용하여 dwell time 1  $\mu\text{s}$ , 30 kV-7 nA 조건으로 진행하였다. 그림 4에는 평탄화와 패턴링이 진행된 위치를 저배율 전자현미경 이미지에 나타내었다. 평탄화가 완료된 거들부에는 그림에서 보이는 거들 중앙부의 사각형 부분과 같이 표면이 균일한 국부적인 평탄부들이 완성되었

다.

평탄부에 글자의 최소선폭이 60~480 nm가 되는 크기로 변화시키고 이때 3 kV-30 pA로 빔파워 조건을 고정시킨 후 Z축 깊이를 50~500 nm로 변화시키면서 주기도문과 기타 패턴을 각인하였다. 이때 조건에 따라 5분에서 20분의 시간이 소요되었다. 다이아몬드는 절연체이기 때문에 모두 전자빔을 소량 주입하는 charge neutralization(CN) 모드에서 실시하였다.



그림 4. 보석용 다이아몬드의 FIB를 활용한 거들부의 평탄화 이미지.

벌크다이아몬드의 3차원적인 가공을 확인하는 실험을 진행하였다. 투과전자현미경의 박막시편을 벌크다이아몬드로부터 FIB를 이용하여 만드는 그림 5에 나타난 공정을 실시하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 Ga<sup>+</sup>이온을 이용하여 박막형 요소를 가공하기 위해서 다이아몬드 기판에 평탄화를 실시하고, 완성된 평탄면에 30 kV-7 nA 조건으로 후공정의 위치확인을 위해서 X표시를 한 후 후속 FIB 가공 시에 박막요소의 표면 보호를 위해서 100 nm두께의 Pt박막을 FIB에 부착된 증착장비로 성막하였다 (a). 이후 1  $\mu\text{m}$ 두께의 간격을 두고 양쪽에 깊이 8  $\mu\text{m}$ 을 목표로 하여 15  $\times$  25  $\mu\text{m}^2$ 의 트렌치를 두 개 가공하였다. 이때의 이온빔의 조건은 30 kV-30 pA를 활용하였다. 두께는 8  $\mu\text{m}$ 을 목표로 가공하였으나 최종적으로는 약 6  $\mu\text{m}$ 의 깊이가 형성되었다 (b). 이후 다시 FIB를 30 kV-1.0 nA 조건으로 남아있는 다이아몬드 벽을 잘라내고 이를 옮길 수 있는 전극을 접근시켰다 (c). 전극 끝과 박막요소를 Pt를 부분적으로 증착하여 용접하고 들어 올려 후속가공이 가능한 위치로 이동 시켜 박막요소의 중심부가 100 nm가 되도록 FIB로 가공하였다. 이를 구리 그리드에 붙여서 투과 전자현미경으로 미세구조와 성분의 확인

이 가능하도록 하였다.

완성된 시편을 JEOL-2100F TEM에 장입하고 여기에 장착된 Gatan ENFINA detection electron-energy loss spectroscopy(EELS)를 이용하여 다이아몬드의 core-energy-loss spectrum을 200~800 eV 범위까지 확인하였다.

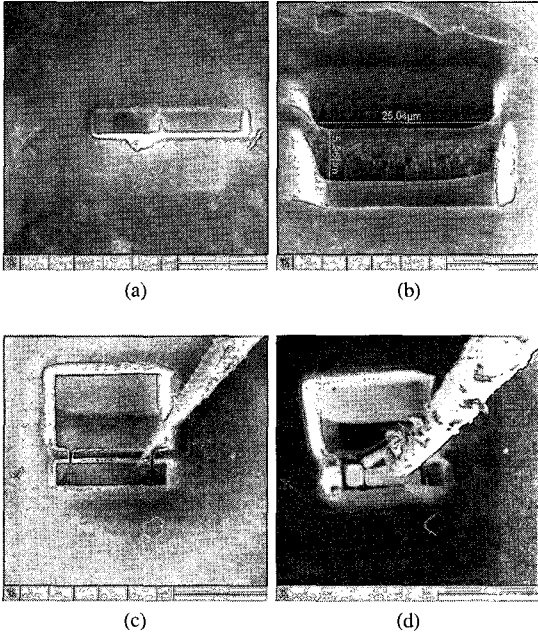


그림 5. FIB와 Pt 증착을 이용한 다이아몬드의 박막 요소 가공 (a) 가공부 기준 표시, (b) FIB 트렌치 가공, (c) 박막요소의 FIB절단, (d) 박막요소의 이동.

### 3. 실험결과 및 토의

그림 6에는 먼저 이온빔 전류증가에 따른 다이아몬드와 실리콘 기판에 대한 소오스의 변화에 따른 선폭, 깊이, 에치속도, 프로파일, 깊이/선폭비를 나타내었다.

그림 6(a)에는 빔 전류의 증가에 따른 다이아몬드 기판과 비교군으로 쓰인 실리콘 기판 위에 형성된 선폭의 변화를 나타내었다. 전류의 값이 증가함에 따라 선폭이 증가하는 일반적인 경향이 나타나며 SCE를 사용한 경우 모든 기판에서 선폭이 증가하는 현상이 발생하였다. 다이아몬드에서는 통상의 Ga 이온을 쓰는 경우 거의 선이 생기지 않다가 0.3 nA 이상에서부터 선폭이 발생함을 알 수 있다. SCE의 경우는 Ga 보다 먼저 생겨서 50 pA 경우부터 생겨서 점차 증가하다가

빔 전류가 50 nA 이상에서는 0.1  $\mu\text{m}$  이상으로 증가함을 알 수 있다. 나노급 선폭은 대부분의 경우 100 nm 이하의 선폭을 의미하는데 다이아몬드 기판인 경우에는 Ga 이온을 써서 빔 전류를 낮게 하는 것이 나노급 패턴을 형성하는데 유리하다고 예상되었다.

같은 전류조건에서 동일한 빔 직경조건에서 강도가 큰 다이아몬드 기판이 오히려 실리콘 기판보다 더 선폭이 커지는 현상은 전체 빔 에너지가 아랫방향보다는 표면부로 산란되어 더 커지는 경향이 있는 것으로 판단되며 이러한 요소를 다이아몬드기판의 가공 시에 고려해야 함을 알 수 있었다.

그림 6(b)에는 마찬가지로 빔전류 증가에 따른 패턴의 깊이를 나타내었다. 전류의 증가에 따라서 SCE가 Ga소오스에 비해서 깊게 파지며, 다이아몬드기판에 비해서 실리콘 기판이 깊게 파지는 경향이 있었다. 앞서 보인 선폭의 경우와 반대의 현상으로써 동일한 에너지의 이온빔인 경우는 실리콘의 경우 깊이 방향으로 더 많은 에너지가 전달되는 것으로 판단된다. 특히 깊이의 모양새도 실리콘인 경우 모두 역삼각형으로 빔의 중심부가 가장 깊게 파지는 특성이 있었지만 다이아몬드의 경우는 역평행 사변형꼴로 나타나서 에칭 조건을 변화시키면 직사각형 형태의 에칭이 가능하다고 예상되었다.

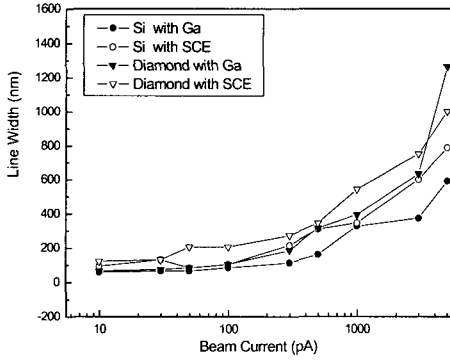
그림 6(c)에는 빔전류증가에 따라 트렌치를 이용하여 선들의 옆 방향을 상단의 양끝에서의 기판면을 기준으로 깎여진 각도를 나타내었다. 일반적인 전자소재용 콘택이나 게이트, 비아를 위한 식각은  $90^\circ$ 가 가장 바람직 하지만 전류밀도가 증가함에 따라 약  $85^\circ$  정도가 보이고 있다. 그러나 이것은 프로파일일 모두 역삼각형으로 마름모가 아닌 경우를 의미하므로 실례 이러한 수직단면 프로파일은 궁극적으로 배선층을 형성하기 위한 가공으로서는 불리하다고 예상된다. 특히 다이아몬드의 경우에는 다른 빔전압과 dwell time등을 조절하여  $90^\circ$ 를 갖는 수직단면을 개발하는 것이 필요하다. 미세선을 여러 번 스캔하는 트렌치의 가공결과를 보면 다이아몬드 기판에서도  $90^\circ$  수직단면을 갖는 조건의 확인을 충분히 가능하다고 판단된다.

그림 6(d)에는 빔전류증가에 따른 1분간의 에치속도를 나타내었다. 예상한 바와 같이 전류가 증가하면 0.3 nA이상에서 에치속도가 증가하여 급속히 증가하는 현상이 보인다. SCE가 Ga소오스에 비해서는 에치속도가 큰 특징이 있었다.

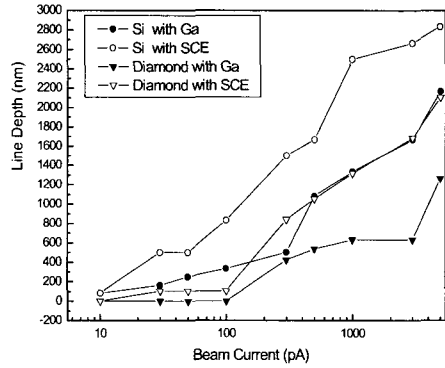
강도가 큰 다이아몬드에서는 실리콘에 비해 현격히 에치 속도가 낮아질 것으로 예상하였으나 결과는 다이

아몬드와 실리콘 모두 비슷한 정도로 나타났다. 이러한 원인은 FIB의 특성상 30 kV정도의 에너지에서는

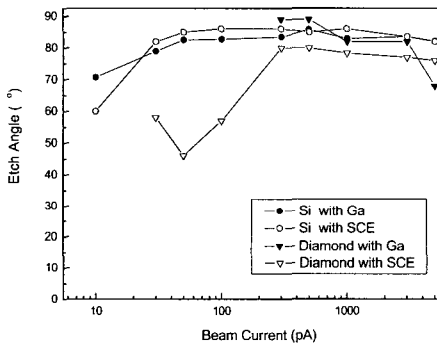
비슷한 정도의 에너지가 재료에 전달되어 궁극적으로 단위시간당 에치 되는 양은 비슷하며, 이때 기판재료



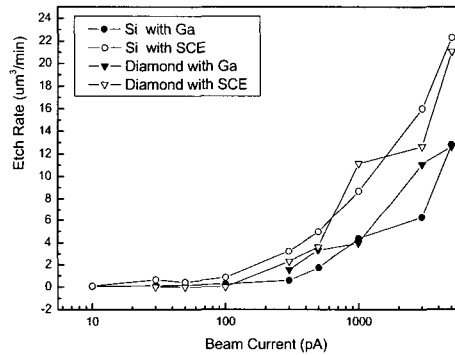
(a)



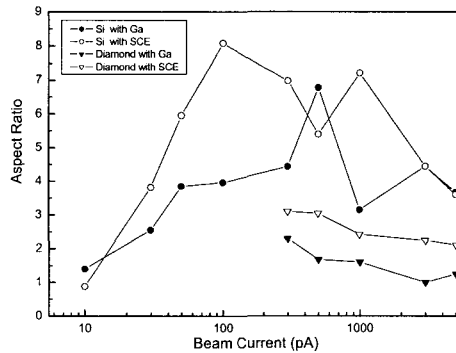
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 6. FIB빔 전류와 기판, 소스에 따른 선평가공도 변화 (a) 선평, (b)패턴 깊이, (c) 에치 프로파일, (d) 에치속도, (e) 깊이/선평비.

의 측성에 따라 선폭과 깊이의 비율이 달라진다는 것을 알 수 있었다.

그림 6(e)에는 빔전류에 따른 깊이/선폭(aspect ratio)의 비를 나타내었다. 일반적으로 미세식각을 위해서는 기생 캐퍼시턴스를 감소시키기 위해서 aspect ratio가 클수록 유리하다. SCE소오스를 쓰는 경우가 Ga에 비해서 기판종류에 관계없이 항상 큰 aspect ratio를 얻는데 용이하였으며, 실리콘기판이 다이아몬드 기판에 비해서 유리하였다.

실리콘인 경우는 건식식각의 경우와 비슷하게 6~8 정도가 가능하였고, 다이아몬드는 2~3정도로 미세식각을 하는데는 불리하다고 예상되었다. 실리콘의 경우 aspect ratio가 커지는 최적점 전류 구간이 있어서 다이아몬드에서도 적절한 빔전류 구간이 필요하다고 판단되었다.

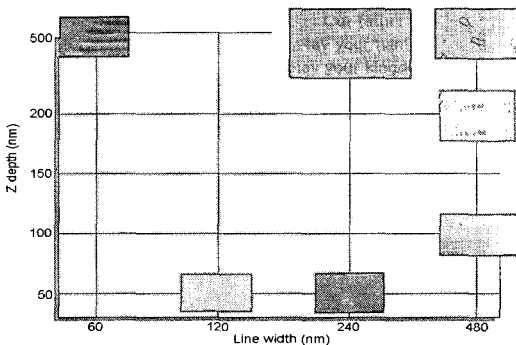


그림 7. FIB 30 kV-7 nA 조건에서 목표 선폭과 깊이변화에 따른 최종 주기도문 패턴의 이미지.

그림 7에는 실제 보석용 다이아몬드의 거들부에 30 kV-7 nA 조건에서 목표 line width를 60~480 nm로 변화시키면서 주어진 선폭에 대해 Z축 depth의 변화 50~520 nm에 따른 실제 각인된 상태의 일부분을 나타내었다.

먼저 Z축 depth(mm)에 대해서는 50 mm에서는 거의 흔적이 나오지 않으므로 다이아몬드의 경우에는 이러한 깊이 목표는 부적절하며 520 mm정도 되어야 전자빔으로 확연히 확인이 가능함을 알 수 있다. Line width는 120 nm 까지는 불분명한 이미지가 나오는데 이는 통상 70 nm인 이온빔의 직경이 패턴의 최소선폭을 만들기 위해 움직이는데 충분한 에너지가 아님을 알 수 있고, 반면에 480 nm 이상이 되면 drifting효과로 글자주변부에 이중선이 생기는 현상이 발생하였다. 이러한 결과로서 빔의 직경이 240 nm정도 일 때가 가장 적절한 효율성을 가짐을 알 수 있고 그 이상이 되

면 중첩하여 각인이 되어 특히 각인 중에 drift현상이 두드러져 결과패턴이 흐릿해지는 문제가 발생함을 확인하였다.

따라서 실험범위 내에서 최적의 각인조건은 240 nm의 선폭으로 500 nm의 Z축 깊이는 목표로 세팅하는 조건이 가장 명확한 확인이 가능하였고 나노급 각인이 가능한 공정 윈도우는 240~480 nm의 선폭범위에서 100~500 nm의 Z축 depth 범위라고 예상되었다.

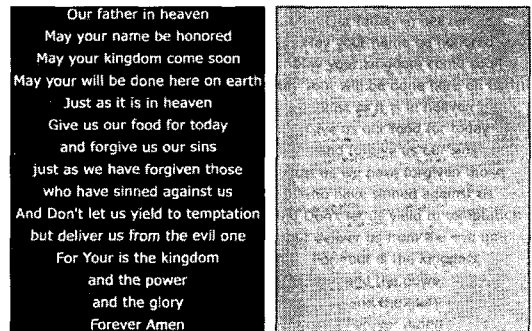


그림 8. 최종적으로 FIB 30 kV-7 nA 조건에서 구현된 선폭 240 nm의 주기도문 패턴(좌: 입력패턴, 우: 결과 패턴).

그림 8에는 완성된 선폭 240 nm의 다이아몬드 위에 구현된 주기도문 패턴 이미지를 나타내었다. 목표선폭 250 nm와 패턴 깊이 500 nm를 선택하였다. 글자 4시 방향으로 차징효과에 의한 미세한 흔들림 현상을 볼 수 있었으나 나노급 이미징임에도 불구하고 명확한 이미지의 관찰이 성공적으로 가능하였다.

따라서 superhard한 다이아몬드 표면에 FIB를 Ga 이온을 써서 나노급 선폭의 기록이 가능하였고 이러한 방안을 보석용 다이아몬드의 품질에 영향을 주지 않으면서도 개인의 소중한 정보를 영구적으로 기록할 수 있는 새로운 산업적 서비스 개발이 가능함을 의미하였다.

그림 9에는 앞서 실험방법에서 설명한 3차원적인 가공법으로 최종적으로 두께 100 nm를 가진 TEM용 시편을 이용하여 부착된 EELS분석기로 Core-energy -loss분석을 실시한 스펙트럼을 나타내었다. 나노 두께를 가진 시편을 통하여 성공적인 분석이 가능하였으며 290, 305, 325 eV의 피크가 Type Ib의 다이아몬드임을 나타내고 있다.

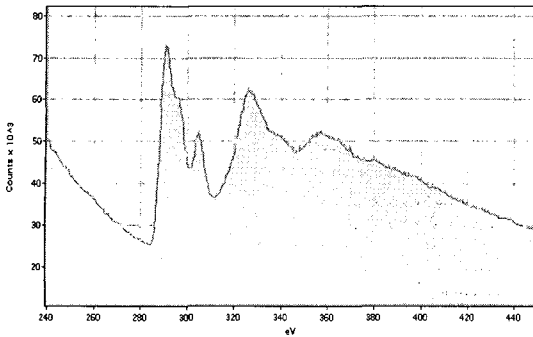


그림 9. TEM용 시편으로 가공된 다이아몬드 박막요소의 core-energy-loss 스펙트럼.

이상에서 알라본 바와 같이 초고강도 다이아몬드를 가공하는데 일반적인 기계적 연마나 절단에 의한 공정에 비해서 FIB를 활용하는 방안은 효과적으로 나노급 미세선과 패턴을 제작하는데 활용될 수 있었고, 더 나아가 나노급 두께를 가지도록 3차원적인 가공도 성공적으로 가능하였다. 이러한 FIB의 활용은 앞으로 진행될 다이아몬드 기판의 반도체 공정에의 도입이나 MEMS분야에서의 다이아몬드 기판의 도입 등 산업적인 응용이 기대되었다.

#### 4. 결론

벌크 다이아몬드 기판에 대해서 기존의 실리콘기판과 비교하여 dual beam 펄드이온빔 가공기를 써서 나노급 선폭을 가진 선형패턴의 형성을 확인하였다. 절연특성이 우수하고 강도가 큰 다이아몬드 기판을 실리콘에 비해서 동일한 공정 하에서 선폭은 크고, 깊이는 더 작게, 에치속도는 비슷한 정도를 보이는 특징이 있었다. 소오스 종류에 따라 SCE가 통상의 Ga이온에 비해서 선폭, 깊이, 에치속도를 향상시키는 특성이 있었다. 통상의 FIB작동 범위인 30 kV에서 다이아몬드 기판에 성공적인 나노급 선형패턴과 트랜치가공이 가능하며 FIB가 다이아몬드 가공에 적합함을 확인하였다. FIB를 이용하여 벌크다이아몬드 기판에 선폭 240 nm의 텍스트 300자와 50~100 nm 최소선폭을 가진 로고의 기록과 재생을 30분 작업시간으로 성공적으로 수행하였다. 기존의 실리콘 기판에 비해서 절연특성에 의한 국부적 차징효과를 상쇄하는 charge neutralization 모드로 통상의 Ga이온을 써서 30 kV -30 pA 조건에서 영구성을 가진 다이아몬드에 나노급 기록과 재생이 성공적으로 가능하였다. 또한 FIB를 활

용하여 3차원적으로 벌크다이아몬드로부터 필요한 요소를 잘라내어 가공하고 나노급 박막요소를 만드는 것이 가능하였다. 이러한 FIB의 활용은 앞으로 진행될 다이아몬드 기판의 반도체 공정에의 도입이나 MEMS 분야에서의 다이아몬드 기판의 도입 등 산업적인 응용이 기대되었다.

#### 참고문헌

- [1] L. S. Pan, Diamond: electronic properties and applications, Kluwer Academic, Boston, 1995, pp20-100
- [2] R. M. Hazen, The diamond makers, Cambridge University Press, New York, 1999, pp10-100
- [3] G. E. Harlow, The Nature of Diamonds, American Museum of Natural History, Cambridge University Press, New York, 1998, pp214-272
- [4] Koji Kobashi, Diamond films : chemical vapor deposition for oriented and heteroepitaxial growth, Elsevier Bostibm 2005, pp
- [5] R. Abbaschian, H. Zhu, C. Clarke, High pressure-high temperature growth of diamond crystals using split sphere apparatus, Diamond and Related Materials 14 (2005) 1916-1919
- [6] Steve Reynjens and R. Puers, J. Micromech. Microeng. II, (2001) 287, A review of focused in beam applications in Microsystem Technology.
- [7] A. A. Tseng, 'Recent developments in micromachining using focused in beam technology', J. Micromech. Microeng. 14(2004) R15
- [8] P. E. Russell, T. J. Stark, D. P. Griffis, J. R. Phillips, and K. F. Jarausch, Chemically and geometrically enhanced focused ion beam machining, J. Vac. Sci. Technol. B 16(4) (1998) pp2494-2498
- [9] D. P. Adams, M. J. Vasile, T. M. Mayer, and V. C. Hodges, Focused ion beam milling of diamond: Effect of H2O on yield, surface morphology and microstructure, J. Vac. Sci. Technol. B 21(6) (2003) pp2334-2343
- [10] A. Datta, Y. Wu, and Y. L. Wang, Gas-assisted focused-ion-beam lithography of a diamond (100) surface, Applied Physics Letters 75, No 17 (1999) pp2677-2679



[11] I. Chyr and A. J. Steckl, GaN focused ion beam micromachining with gas-assisted etching, J. Vac. Sci. Technol. B 19(6) (2001) pp2547-2550

송 오 성(Oh-Sung Song)

[정회원]



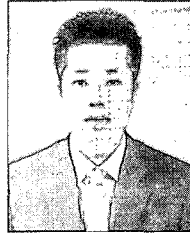
- 1987년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

반도체 재료, 자성 재료, 보석 재료

김 종 료(Jong-Ryul Kim)

[준회원]



- 2006년 2월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학사)
- 2006년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 석사과정

<관심분야>

반도체 재료, 자성 재료, 보석 재료