

◆ 특집 ◆ 미세패턴 가공을 위한 절삭가공공정 원천기술 개발

집속이온빔(Focused Ion Beam)에 의한 단결정 다이아몬드 공구의 마이크로/나노스케일 절삭공구 형상 제작

Fabrication of Micro/nanoscale Cutting Tool Geometry of Single Crystal Diamond Tool by Focused Ion Beam

백승엽^{1,✉}, 장성민²
Seung Yub Baek^{1,✉} and Sung Min Jang²

¹ 인덕대학교 기계설계과 (Department of Mechanical Design, Induk Univ.)

² 조선이공대학교 선박해양 기계과 (Department of Naval Architecture & Mechanics, Chosun College of Science & Technology)

✉ Corresponding author: sybaek@induk.ac.kr, Tel: +82-2-950-7525

Manuscript received: 2014.2.5 / Revised: 2014.2.19 / Accepted: 2014.2.21

A study was carried out to fabricate the cutting tool geometry with micro/nanoscale on the single crystal diamond tool by using the FIB. The FIB technique is an ideal tool for TEM sample preparation that allows for the fabrication of electron-transparent foils. The FIB is appropriate techniques to sample and subsequently define the chemical composition and the structural state of mineral inclusion on the micro/nanoscale. The combination of FIB with a SEM allows for 3D information to be obtained from samples including 3D imaging. Cutting strategies were demonstrated to improve the performance of cutting tool geometry and to generate high aspect ratio micro cutting tool. A finely focused beam of 30keV Ga⁺ ions was used to mill cutting tool shapes for various micro patterns. Therefore FIB sputtering is used to shape a variety of cutting tools with dimensions in the 1-5 μm range and cutting edge radii of curvature of under 50nm.

Key Words: Focused Ion Beam (집속이온빔), Diamond Tool Geometry (다이아몬드 공구 형상), High Aspect Ratio (고세장비), Cutting Edge Width (절삭날 폭)

1. 서론

반도체 기술의 핵심인 전자, 이온 및 광자빔의 사용은 반도체, 디스플레이, 태양전지 및 마이크로 나노 스케일에서의 가공 등에 있어서 핵심 기술로 많은 연구자들에 의해 연구가 되어왔다. 이에 관련 기술 및 장비산업은 활용 범위를 확대하고 있고 급속하게 성장하고 있다.¹ 이온빔은 전자 및 광자빔과는 다른 물리적 특성으로 인하여 특별한 사용 영역을 가지고 있다. 특히 이온빔은 이온원(Ion

source)에서 나온 이온들을 가속하고 원하는 모재(Substrate) 위에 집속하여 충돌시키는 운동량 전달을 통한 스퍼터링(Sputtering)이 가공 원리이므로 모재 위에 포토레지스트(Photoresist) 없이 직접 가공이 가능하다.^{2,3} 대칭 원통형 마이크로 부품의 제작은 시제품 제조측면에서 아주 중요한 과제이다. 프로젝션 리소그래피(projection lithography) 기술을 활용하여 평탄한 형상을 생성하는 것은 특히 어렵다. 그러나 최근의 연구는 종래의 방법의 기하학적인 한계를 극복하는 과정을 보여주고 있다. 비

전통적인 리소그래피 기술을 사용하여 실리콘 기판위에 구형(sphere)의 전자장치가 제작되고 있다.⁴ 후처리 전착 공정을 갖는 원통 표면에 미세 접촉 인쇄술은 서브마이크로급의 해상도를 가지는 소형 3D형상을 생성하고,⁵ 초기의 원통형 형상으로부터 설계가 시작된다.⁶ 몰드 및 마스터(master)의 제작에는 charged particle lithography, deep reactive etching, micro machining 등의 여러 가지 방법이 사용되고 있다.⁷⁻¹⁰ 회절광학 소자, 홀로그램, 3차원 디스플레이는 광정보처리 연구 분야의 근간을 이루는 구성 요소들이다. 회절광학소자는 빛을 적절히 회절시켜 원하는 광 패턴을 만들어 내는 소자이다. 집속 이온빔은 transmission electron microscope(TEM) 등의 응용분야에서 사용되고 direct writing이 가능한 툴(tool)이다.¹¹⁻¹³ 그러나 집속이온빔을 이용하여 3차원 형상을 제작하는 기술은 비교적 연구가 미비하다. 현재 Vsil¹⁴⁻¹⁷과 Fu¹⁸에 의한 두 가지 방법이 연구되었으며, 이들은 3차원 형상의 제작을 위하여 각각 pixel dwell time control 및 2-D slice 방법을 도입하였다. Encyclopaedia Britannica에서 Rayleigh가 회절광학 소자의 개념을 설명하고 있는데, 현실적으로 실현되기는 어려울 것으로 기술하고 있다. 하지만, 현재의 기술 수준에서, 회절광학 소자는 lithography, single-point diamond turning, single-point laser pattern generation 기술 등에 의하여 이미 상용화되었다. Far-field에서 원하는 빛의 세기를 만들어 내도록 회절광학 소자를 설계하는 것은 간단하지 않은 문제로서 iterative Fourier transform algorithm이 쓰이는데, 최적 설계를 위해 genetic algorithm이 적용되며, 보다 빠르고 최적화된 설계를 위한 이론적 연구 논문들이 꾸준히 발표되고 있다.

최근에는 sub-wavelength structure의 회절광학에 대한 연구가 활발하며 이를 이용한 무반사 구조, 편광판, 협대역 필터 등이 제안되고 있다. 또한, 회절광학소자를 이용하여 마이크로 또는 나노 소자를 만들기 위한 연구가 최근 nano-photonics와 관련하여 주목 받고 있다. 이러한 회절광학소자를 만들기 위해서는 초정밀가공기와 공구 및 가공공정이 필수적으로 뒷받침되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 회절광학소자를 만들기 위해서 서브마이크로급 패턴가공용 서브마이크로급 cutting edge width를 가지는 단결정 다이아몬드 절삭공구 제작이 필요하고 이러한 공구를 개발하기 위해서 연삭가공과 집속이온빔(FIB) 가공공정 연구를 수행하였다.

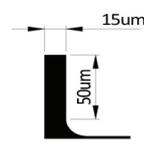
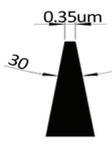
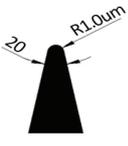
v-type		Factor	Specification
		Angle	a=30° ~ 140° (±10°)
		Roughness&Straightness at Effective Face(E)	Roughness ±5nm
			Straightness ±nm/3mm
Special Face Shape			
			

Fig. 1 Cutting tool geometry for sub-micro pattern



Fig. 2 Schematics of micro patterns for diffractive optical element (DOE)

2. 단결정 다이아몬드 공구 형상

2.1 초정밀 다이아몬드 공구 type

본 연구에서 개발하고자 하는 초정밀 다이아몬드 공구는 3차원 자유곡면 표면에 서브마이크로급 패턴가공을 하기 위한 가공공구로서 STAVAX 재료 표면에 무전해 니켈도금을 한 금형 재료를 이용하여 F-theta lens를 제작하고 그 표면 위에 회절광학소자(diffractive optical element)를 제작하는 것이다. Fig. 1은 서브마이크로급 패턴 가공을 위하여 제작 가능한 공구 형상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 가공하고자 하는 패턴 형상에 따라서 몇 가지 type의 초정밀 절삭공구를 제작하였다.

2.2 서브마이크로급 다이아몬드 공구 모델

광학성능이 우수한 회절광학소자를 만들기 위해서는 패턴에 대한 일정한 피치(pitch)가 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 피치 3um와 절삭깊이는 최소 0.3um 이상의 마이크로 패턴을 가공하기 위해서 최소 1.5um급의 cutting edge width를 가지는 다이아몬드 절삭 공구가 필요하다.

Fig. 2는 회절광학소자를 만들기 위한 마이크로 패턴 형상을 보여주고 있다. 피치(pitch)는 3um이고, 절삭량은 최소 0.3um정도를 목표로 하고 있다.

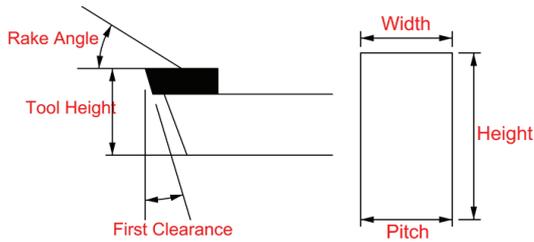


Fig. 3 Schematic illustration of target diamond tool geometry

Fig. 3은 마이크로 패턴을 가공을 할 수 있는 다이아몬드 절삭공구에 대한 형상 정보를 보여주고 있다.

3. 다이아몬드 절삭공구 제작

3.1 실험장치

본 연구에서는 연삭가공과 집속이온빔을 이용하여 서브마이크급 절삭날 폭(cutting edge width)을 갖는 다이아몬드 절삭공구를 제작하였다.

Fig. 4는 서브마이크로급 패턴가공용 초정밀 다이아몬드 공구를 제작할 수 있는 CORBON사의 PG-3B연삭기를 보여주고 있다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 집속이온빔 시스템으로서 FEI사의 NOVA 600 장비이다. FIB는 이온 건과 전자건으로 구성되어 있어 이온 밀링하는 도중에 SE분석을 동시에 수행할 수 있다. 이온 밀링을 위해 이온 소스로는 Ga⁺ 액체 금속 이온원을 사용하며, Ga⁺ 이온으로 인한 시편 표면이 손상되는 것을 막기 위해서 백금(Pt)를 증착하여 시편에 보호층을 형성한다. 가속전압은 30kV이고 최소 빔의 분해능은 7nm이며 배율은 25만배까지 가능하다. 시편은 단결정 다이아몬드를 사용하였으며, 챔버 내의 진공도는 8×10⁻⁵Pa 이하를 유지하고 있다. Table 1은 본 연구에서 사용된 집속이온빔 가공기의 제원을 보여주고 있다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 연삭 작업을 통해서 1.5um급의 절삭날 폭(cutting edge width)을 가지는 다이아몬드 절삭공구를 제작하였다. Fig. 6은 단결정 다이아몬드를 이용하여 1.5um급의 cutting edge width를 갖는 다이아몬드 공구 제작 과정을 보여주고 있다. 단결정 다이아몬드를 인서트에 silver blazing을 한 후 라운드 연삭 휠을 이용하여 가공을 수행한 후 반



Fig. 4 Photograph of planetary grinding system (PG-3B)



Fig. 5 Photograph of focused ion beam system (FEI, NOVA 600 Nanolab)

Table 1 Specification of FIB system (NOVA 600 Nanolab)

SEM	Image resolution (High kV)	1.1nm(30kV)
	Image resolution (Low kV)	2.9nm(30kV)
	kV range	0.1~30kV
	Current	up to 200nA
FIB	Image resolution	7nm(30kV)
	kV range	2~30kV
	Current	1.5pA~60nA

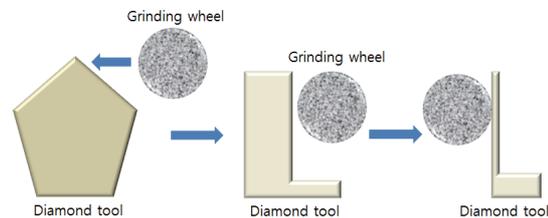


Fig. 6 Schematic diagram of grinding processes with cutting edge width of 1.5um

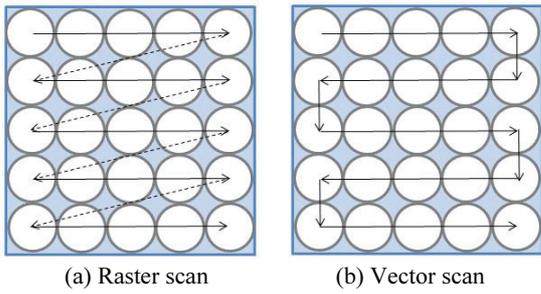


Fig. 7 Focused ion beam path of two types: (a) Raster type (cleaning), (b) Vector type (rectangle)

대 면에서 평면 연삭 휠을 이용하여 가공을 수행하여 다이아몬드 공구를 제작하였다.

Fig. 7은 집속이온빔 가공을 할 때 레스터 스캔 (raster scan) 방식과 벡터 스캔(vector scan) 방식에 대한 원리를 보여주고 있다. 레스터 스캔(raster scan) 방식은 일정한 간격으로 한 방향으로 빔을 이동시키면서 가공하는 공정이고, 벡터 스캔(vector scan) 방식은 이동 경로의 시작점과 끝점을 정의해서 연속적으로 빔이 이동하면서 가공하는 방식이다.¹⁹⁻²² 본 연구에서는 가공시간을 고려하여 빔의 전류 (beam current)를 높여서 벡터 스캔(vector scan) 방식으로 가공을 수행하고 난 후 이온빔을 정밀하게 제어하기 위해서 빔 전류 (beam current)를 낮추고 레스터 스캔(raster scan) 방식으로 FIB 밀링가공을 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연삭 가공에 의한 절삭공구 제작

본 연구에서는 목표로 한 다이아몬드 공구의 형상을 가공한 결과 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다. 공구의 날 부분인 cutting edge width는 대략 1.07um 이고 공구 날의 높이는 14.73um이다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 공구의 형상에 대한 요구사항은 만족을 하지만 공구의 폭 대비 높이가 너무 커서 실제로 이 공구를 가지고 시편을 가공을 할 경우 파손의 우려가 높을 것으로 판단된다. 연삭 가공으로 cutting edge width를 1um 이하로 가공을 하는 것은 현실적으로 한계가 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 FIB 가공을 통해서 cutting edge width를 1um이하로 제작하고 공구의 길이도 폭과 높이의 비를 1:5정도로 제작할 수 있는 공정 연구를 수행하였다.

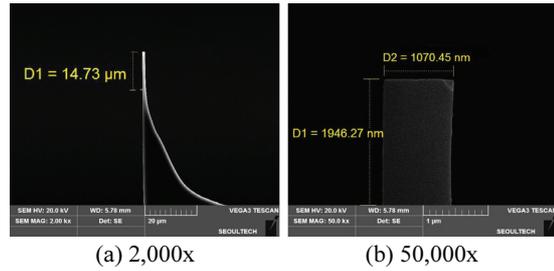


Fig. 8 SEM images of a diamond cutting tool (height: 14.73um, cutting edge width: 1.07um)

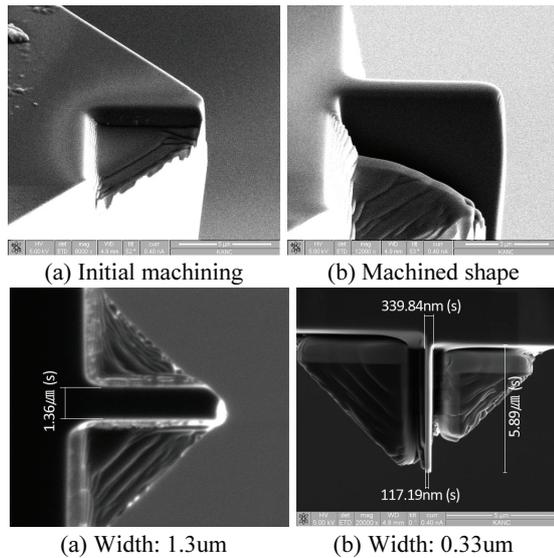
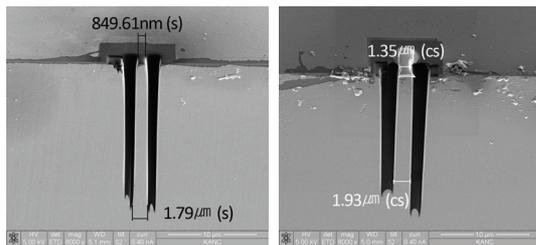


Fig. 9 SEM images of a diamond cutting tool with focused ion beam (beam current: 1nA, tilt angle: 52, voltage: 30kV)

4.2 FIB 가공에 의한 절삭공구 제작

연삭 가공으로 제작된 V-type의 다이아몬드 공구를 이용하여 FIB가공을 수행하였다. Fig. 9는 본 연구에서 목표로 한 다이아몬드 공구의 형상을 가공한 결과이다. 다이아몬드 절삭공구는 가공 패턴에 적합한 형상으로 가공이 되었는지가 중요하다. 또한 절삭날(Cutting edge)이 예리해야 절삭공구로서 사용이 가능하다. 결과에서 보듯이 설계된 형상대로 가공은 잘되지만 절삭날(Cutting edge) 부분이 예리하지 못하고 라운드가 생겼다. 이는 빔의 특성상 가우시안(Gaussian) 형태를 가지고 있기 때문이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 10과 같이 다이아몬드 표면 위에 백금(Pt)을 증착시키고



(a) Without Pt coating (b) With Pt coating

Fig. 10 SEM images of a diamond cutting tool with Pt coating in focused ion beam (beam current: 1nA, tilt angle: 52)

FIB 밀링을 수행하였다. 그 결과 백금(Pt)을 증착시켰을 때가 그렇지 않을 경우보다 공구의 상단 폭과 하단 폭의 두께가 줄어든 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 공정연구를 통해서 충분히 절삭공구의 형상을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 Lift-off 공정을 적용한 FIB 가공

반도체 공정에서 리소그래피(lithography) 기술 중 리프트 오프(lift off) 공정이 있다. 리프트 오프(lift off) 공정은 기판 위에 레지스트 패턴을 먼저 형성하고 잔여층을 제거한 후 이를 증착 마스크로 사용하여 금속을 선택적으로 증착하고 화학용액(chemical solution) 등을 이용해 레지스트만 선택적으로 제거하여 금속패턴을 얻는 방식이다. 리프트 오프(lift off) 공정을 다이아몬드 공구 표면에 적용하여 FIB 밀링(milling) 가공을 수행하였다. 다이아몬드 표면 위에 니켈을 150nm 두께로 코팅하였다. 니켈 코팅을 다이아몬드 표면에 코팅을 할 경우 점착력(adhesion)이 약하기 때문에 니켈 코팅 전에 크롬(chrome)을 10nm 두께로 코팅하였다.

Fig. 11은 다이아몬드 공구 위에 크롬과 니켈을 코팅을 한 후 FIB 밀링 가공 절차를 보여주고 있다. FIB 가공을 할 때 가우시안(Gaussian) 빔 때문에 가공 부 상단에 라운드가 생성된다. 이러한 라운드 생성부분을 크롬과 니켈이 보호층 역할을 하면서 다이아몬드 가공 영역은 예리한 절삭날(Cutting edge)을 얻을 수 있다. FIB 가공이 끝난 후 질산(Nitric acid) 용액을 이용해서 메탈 에칭(metal etching)을 하면 깨끗한 다이아몬드 표면을 얻을 수 있다. Fig. 12는 다이아몬드 공구 위에 코팅을 한 후 FIB 가공 결과를 보여주고 있다. 다이아몬드 표면 위에 코팅된 것을 확인할 수 있다. 또한 코팅층이 보호막 역할을 하고 있기 때문에 가공

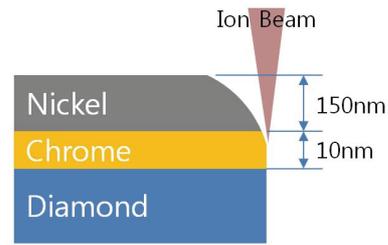


Fig. 11 Procedure of FIB process on the diamond surface with metal coating

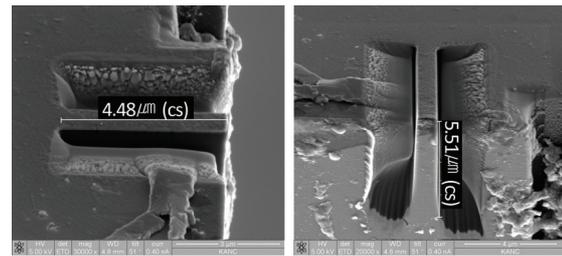


Fig. 12 SEM images of diamond tool with coating procedure after FIB process (tilt angle: 52+1.5, beam current: 3nA, voltage: 30kV)

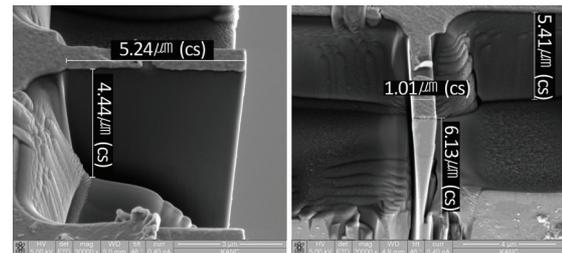


Fig. 13 SEM images of diamond tool with coating procedure after FIB process (tilt angle: 52+6, beam current: 1nA, voltage: 30kV)

후 다이아몬드 공구에는 라운드 형상이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 13은 다이아몬드 공구를 최대한 틸팅(tilt angle: 58)을 하여 FIB 가공을 수행한 결과이다. 다이아몬드 절삭공구로서 가지고 있어야 할 측면 여유량을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 목표로 설정했던 절삭날 폭(Cutting edge width)는 1.01μm 값을 얻었다.

5. 결론

본 연구에서는 회절광학소자를 개발하기 위해

서 서브마이크로급 패턴 가공용 초정밀 다이아몬드 절삭공구를 제작하였다. 연삭가공과 집속이온빔(FIB) 가공을 수행하여 마이크로/나노 스케일을 갖는 단결정 다이아몬드 절삭공구를 제작하였다. 절삭날 폭(Cutting edge width)은 1.5 μ m와 0.3 μ m급의 다이아몬드 절삭공구를 제작하였다. 또한 절삭날의 sharpness가 있어야 절삭공구로서의 역할을 할 수 있다. 하지만 집속이온빔(FIB)은 가우시안(Gaussian) 빔의 형태를 가지기 때문에 다이아몬드 공구의 엣지(edge) 부분이 라운드가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 반도체 공정에서 주로 사용되고 있는 리소그래피 공정 기술 중에서 리프트 오프(lift-off) 공정을 적용하여 다이아몬드 공구 표면에 10nm두께의 크롬과 150nm 두께의 니켈을 e-beam 증착장비를 이용하여 코팅을 하였다. 코팅된 다이아몬드 공구 위에 FIB 가공을 수행한 결과 절삭날(Cutting edge)가 예리한 것을 확인하였다. 또한 다이아몬드 공구의 상단부와 하단부가 거의 균일하게 가공된 것을 알 수 있었다. 향후에는 코팅된 다이아몬드 공구 표면에 수십 마이크로 절삭깊이를 가질 수 있도록 집속이온빔(FIB) 가공을 수행한 후 다시 연삭 가공을 하여 예리한 절삭날(Cutting edge)을 얻을 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술개발사업의 “회절광학소자용 700nm급 이하의 미세패턴 가공을 위한 절삭가공공정 원천기술 개발” 과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Ivor, I. and Julius, J. M., “The Physics of Micro/Nano-fabrication,” Plenum Press, 1992.
- Kaesmaier, R. and Loschner, H., “Ion Projection Lithography: Progress of European MEDEA & International Program,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 53, No. 1, pp. 37-45, 2000.
- Frey, L., Lehrer, C., and Ryssel, H., “Nanoscale Effects in Focused Ion Beam Processing,” *Appl. Phys. A*, Vol. 76, No. 7, pp. 1017-1023, 2003.
- Jackman, R. J., Brittain, S. T., Adams, A., Whitesides, G. M., and Prentiss, M. G., “Design and Fabrication of Topologically Complex, Three-Dimensional Micro-Structures,” *Science*, Vol. 280, pp. 2089-2091, 1998.
- Brittain, S. T., Schueller, O. J. A., Wu, H. K., Whitesides, S., and Whitesides, G. M., “Microorigami: Fabrication of Small, Three-Dimensional, Metallic Structures,” *J. Phys. Chem. B*, Vol. 105, No. 2, pp. 347-350, 2001.
- Maxwell, J., Larsson, K., Boman, M., Hooge, P., Williams, K., and Coane, P., “Rapid Prototyping of Functional Three Dimensional Microsolenoids and Electromagnets by High-Pressure Laser Chemical Vapor Deposition,” *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp.*, pp. 529-536, 1998.
- Tseng, A. A., “Recent Developments in Micromilling using Focused Ion Beam Technology,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No. 4, pp. R15-R34, 2004.
- Orloff, J., “Handbook of Charged Particle Optics,” CRC Press, Boca Raton, pp. 129-160, 2009.
- Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A., and Bertagnolli, E., “Level Set Approach for the Simulation of Focused Ion Beam Processing on the Micro/Nano Scale,” *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 26, pp. 265307-265313, 2007.
- Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A., and Bertagnolli, E., “Full Three-Dimensional Simulation of Focused Ion Beam Micro/Nanofabrication,” *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 24, pp. 245303-245311, 2007.
- Reyntjens, S. and Puers, R., “A Review of Focused Ion Beam Applications in Microsystem Technology,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, No. 4, pp. 287-300, 2001.
- Sugiyama, M. and Sigesato, G., “A review of Focused Ion Beam Technology and its Applications in Transmission Electron Microscopy,” *J. Elec. Microscopy*, Vol. 53, No. 5, pp. 527-536, 2004.
- Tseng, A. A., “Recent Developments in Nanofabrication using Focused Ion Beams,” *Small*, Vol. 1, No. 10, pp. 924-939, 2005.
- Adams, D. P. and Vasile, M. J., “Accurate Focused Ion Beam Sculpting of Silicon using a Variable Pixel Dwell Time Approach,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 24, No. 2, pp. 836-843, 2006.
- Adams, D. P., Vasile, M. J., and Mayer, T. M.,

- “Focused Ion Beam Sculpting Curved Shape Cavities in Crystalline and Amorphous Targets,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 24, No. 4, pp. 1766-1775, 2006.
16. Vasile, M. J., Niu, Z., Nassar, R., Zhang, W., and Liu, S., “Focused Ion Beam Milling: Depth Control for Three-Dimensional Micro Fabrication,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 15, No. 6, pp. 2350-2354, 1997.
17. Nassar, R., Vasile, M. J., and Zhang, W., “Mathematical Modeling of Focused Ion Beam Microfabrication,” *J. Vac. Sci. Tehcnol. B*, Vol. 16, No. 1, pp. 109-115, 1997.
18. Fu, Y. and Bryan, N. K. A., “Fabrication of Three-Dimensional Microstructures by Two Dimensional Slice by Slice Approaching via Focused Ion Beam Milling,” *J. Vac. Sci. Tehcnol. B*, Vol. 22, No. 4, pp. 1672-1678, 2004.
19. Ward, J. W., Utlaut, M. W., and Kubena, R. L., “Computer Simulation of Current Density Profiles in Focused Ion Beams,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 5, No. 1, pp. 169-1743, 2007.
20. Harriott, L. R., “Beam-size Measurement in Focused Ion Beam Systems,” *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 8, No. 2, pp. 899-901, 1990.
21. Ben Assaya, G., Vieu, C., Gierak, J., Sudraud, P., and Corbin, A., “New Characterization Method of Ion Current-Density Profile Based on Damage Distribution of Ga⁺ Focused-Ion Beam Implantation in GaAs,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 11, No. 6, pp. 2420-2426, 1993.
22. Park, J. J. and Kim, S. D., “The Effects of Fib Scan Method on Au Etching Profile,” *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 367-368, 2008.