

# 배분력의 정량적인 분석을 통한 단결정실리콘의 나노패턴 연성가공법 연구

## Study on Ductile Machining Technology for Manufacturing Nano-Patterns on Single Crystal Silicon through Quantitative Analysis of Thrust Force

최대희<sup>1,2</sup>, 전은채<sup>1,2,✉</sup>, 윤민아<sup>1,2</sup>, 김광섭<sup>1,2</sup>, 제태진<sup>1,2</sup>, 정준호<sup>1,2</sup>  
Dae-Hee Choi<sup>1,2</sup>, Eun-chae Jeon<sup>1,2,✉</sup>, Min-Ah Yoon<sup>1,2</sup>, Kwang-Seop Kim<sup>1,2</sup>,  
Tae-Jin Je<sup>1,2</sup>, and Jun-Ho Jeong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 전공 (Department of Nano Mechatronics, University of Science and Technology)

<sup>2</sup> 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 (Nano-Convergence Mechanical Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials)

✉ Corresponding author: jeonec@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7055

Manuscript received: 2015.6.29. / Revised: 2015.9.23. / Accepted: 2015.10.1.

*Lithography techniques are generally used to manufacture nano-patterns on silicon, however, it is difficult to make a V-shaped pattern using these techniques. Although silicon is a brittle material, it can be treated as a ductile material if mechanically machined at extremely low force scale. The manufacturing technique of nano-patterns on single crystal silicon using a mechanical method was developed in this study. First, the linear pattern was machined on the silicon with increasing thrust force. Then, the correlation between measured cutting force and machined pattern was analyzed. Based on the analysis, the critical thrust force was quantitatively determined, and then the silicon was machined at a force lower than the critical thrust force. The machined pattern was observed using SEM and AFM to check for the occurrence of brittle fractures. Finally, the sharp V-shaped nano-pattern was manufactured on the single crystal silicon.*

KEYWORDS: Ductile machining (연성 가공), Nano-Pattern (나노 패턴), Single crystal silicon (단결정 실리콘), Brittle fracture (취성 파괴)

### 1. 서론

단결정 실리콘은 반도체 산업과 나노포토닉스 산업에서 많이 사용되는 소재이다. 기존에 단결정 실리콘에 패턴을 새기기 위한 방법으로는 리소그래피 공정이 많이 사용되고 있다. 기존의 방법으로는 직사각형 또는 U자 형태의 패턴 단면을 얻기가 쉬운 반면에 날카롭고 다양한 각도의 V자 형태

의 패턴을 만들기 위해서는 복잡한 공정이 요구된다.<sup>1-5</sup> 만약 기계적 가공법을 이용해 단결정 실리콘을 가공한다면 공구모양에 따라서 날카로운 V형태의 패턴을 쉽게 만들 수 있다. 그러나 실리콘 같은 취성재료를 기계적으로 가공하게 되면 취성 파괴가 발생하는 것이 일반적이기 때문에 패턴가공이 매우 어렵다. 이에 실리콘을 취성 파괴 없이 기계적으로 가공(연성가공)하는 기술에 대한 연구들이

수행되었다.<sup>6-12</sup> 이들 연구들의 공통점은 가공 깊이가 매우 작거나 극저하중으로 가공을 하게 되면 연성가공이 가능하다는 것이다. Hung, et al.<sup>6</sup>은 결정 방향이 연성가공에 미치는 영향을 분석했고 Chao, et al.<sup>12</sup>은 결정방향 및 공구모양에 따른 임계 가공 깊이를 분석했다. 이러한 기존 논문에서는 연성가공 여부를 파악하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscope) 이나 AFM(Atomic Force Microscope) 등의 추가적인 측정을 해야만했다. 또한 취성 파괴가 발생하는 현상에 대한 정성적인 분석만 했을 뿐 취성 파괴가 발생할 때의 배분력 및 절삭력에 대한 정량적인 분석은 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 배분력 및 절삭력을 분석함으로써 SEM, AFM 등의 추가적인 측정과정 없이 연성가공 여부를 파악했으며 이를 바탕으로 실리콘 위에 취성 파괴가 없는 V형의 나노패턴을 가공하는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

### 2. 나노스크래치 테스터

앞선 연구들에서 취성 파괴가 일어날 때의 하중을 정량적으로 분석하지 못한 이유는 기존의 가공장비는 정밀도가 나노급에 미치지 못하기 때문이다. 나노스크래치 테스터는 특정 형상의 압입자를 이용하여 소재 표면을 긁으면서 동시에 나노급의 수평, 수직 방향으로의 힘과 변위를 측정하는 장비로서 기존 가공장비의 문제점을 해결할 수 있다. 특정 형상의 압입자를 이용하여 소재 표면을 긁는 것은 가공공구를 이용한 평삭공정과 일치한다. 수평하중은 절삭력, 수직하중은 배분력, 수평 변위는 가공길이 그리고 수직변위는 가공깊이에 해당된다. 본래 나노스크래치 테스터는 박막의 강도나 박막의 접착강도를 측정할 때 사용되는 측정 장비이지만 기존의 일반적인 가공 장비에 비해 하중의 범위가 낮으며 하중과 변위의 측정과 제어가 정밀하기 때문에 나노급의 정밀가공 기술을 연구하는데 사용될 수 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1의 나노스크래치 테스터를 이용하여 단결정 실리콘에 나노패턴을 가공하였다.

### 3. 실험방법

본 연구에 사용한 장비는 Anton Paar Inc.의 나노스크래치 테스터로서 배분력과 패턴 길이를 제어하여 소재 표면을 긁는 기능을 가지고 있다. 크

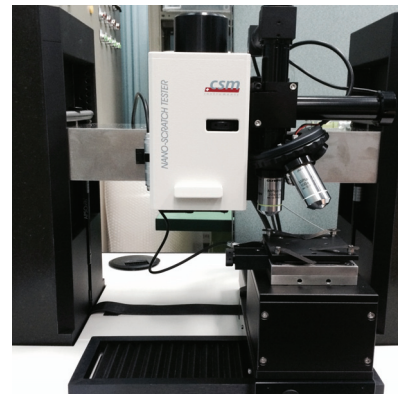


Fig. 1 Nano scratch tester for nano machining

Table 1 Details of experimental conditions

Machine	Nano scratch tester (Anton Paar Inc.)
Workpiece	(100) Single crystal silicon
Cutting tool	90° conical single crystal diamond tool
Cutting direction	[100]
Cutting length	1mm
Cutting speed	1mm/min

게 두 가지 실험방법을 제공하는데 첫 번째는 ‘progressive method’로써 배분력을 0에서부터 특정 힘까지 선형적으로 증가시키면서 가공하며, 두 번째는 ‘constant method’로써 특정 힘을 일정하게 유지하면서 가공한다. 또한 소재를 긁는 동안 절삭력과 가공 깊이를 in-situ로 측정한다. 이를 통해 최종적으로는 가공된 패턴의 모든 위치에서의 배분력, 절삭력, 가공 깊이의 동기화된 정보를 얻을 수 있다. 최초로 취성 파괴가 발생하는 지점 및 하중을 찾기 위해 progressive method로 배분력을 0에서 60mN까지 선형적으로 증가시키면서 길이 1mm의 선형패턴을 가공하였다. 선형패턴 가공을 위해 사용된 공구는 공구반경 1 μm를 갖는 90°의 원뿔형 단결정 다이아몬드 공구이다. 가공 시 경사각(rake angle)은 -45°, 여유각(clearance angle)은 45°이다. 가공된 패턴은 SEM을 이용해 관찰하였고 측정된 절삭력과 동기화하여 힘과 패턴의 변형양상 간의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 최초로 취성 파괴가 발생하는 임계 절삭력(critical cutting force)을 결정 후 이 지점에 대응되는 배분력을 임계 배분력(critical thrust force)으로 지정했다. 이를 바탕으로 연성가공을 할 수 있는 적정하중을 선정하였고 constant method를 이

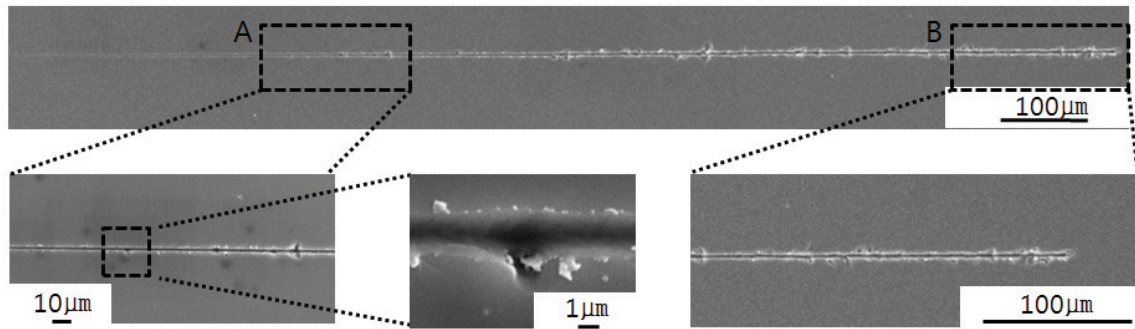


Fig. 2 Machined pattern on the silicon by increasing the thrust force from 0 to 60mN (A: ductile-brittle transition zone, B: brittle fracture zone)

용하여 나노패턴을 가공하였다. 가공 후 절삭력을 분석하여 연성가공이 이루어짐을 파악했으며 SEM, AFM을 통해 패턴표면 및 단면을 관찰함으로써 연성가공이 이루어졌음을 확인하였다. 자세한 가공 조건은 Table 1에 나타냈다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 단결정 실리콘의 취성파괴 현상

Progressive method로 배분력을 0에서 60mN로 증가시키며 선형패턴을 가공한 패턴의 SEM측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 초기의 낮은 하중에서는 취성 파괴가 보이지 않고 연성가공이 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 그러나 하중이 증가함에 따라 Fig. 2의 A영역에서 보는 것과 같이 취성 파괴가 발생하기 시작했고, 하중이 증가함에 따라 취성 파괴의 빈도가 높아졌다. 마지막 60mN 지점에서의 패턴은 Fig. 2의 B영역과 같이 취성 파괴가 많이 발생하여 패턴이 깨져 나가는 것을 볼 수 있다.

##### 4.2 임계 배분력의 정량적인 분석

일반적인 금속의 절삭가공에서 절삭력은 가공 특성을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이다. 나노스크래치 테스터에서의 절삭력은 in-situ 방식으로 얻어지는 수평하중이다. Fig. 3(a)처럼 배분력이 선형적으로 증가함에 따라 절삭력 역시 최초에는 비례하게 증가한다. 그러나 일정 하중 이상에서 절삭력이 Fig. 3(b)의 1, 2, 3 처럼 불안정해지며 배분력이 커질수록 더욱 불안정해 지는 것을 볼 수 있다. 절삭력과 패턴의 변형양상간의 상관관계를 파악하기 위해 절삭력이 불안정한 (1, 2, 3)지점에 해당되는 패턴을 SEM을 이용해 관찰했다. 절삭력

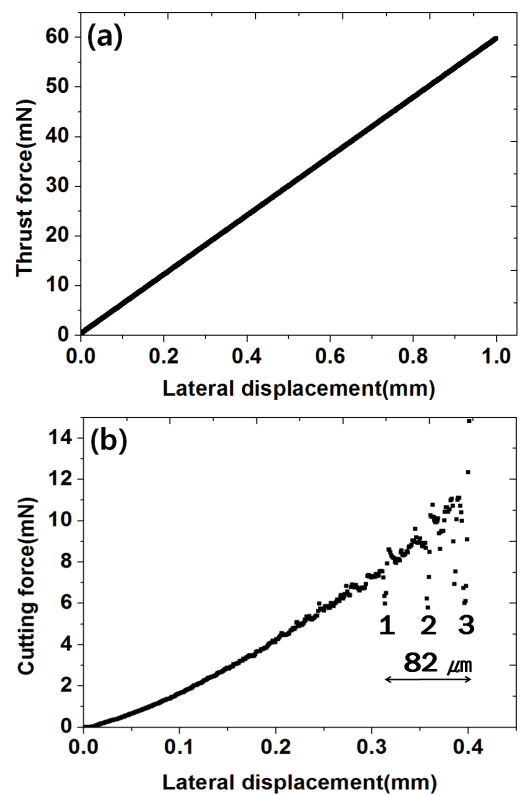


Fig. 3 Variation of (a) thrust force and (b) cutting force versus lateral displacement when machining the silicon as increasing thrust force from 0 to 60mN

이 1, 2, 3처럼 불안정할 때 Fig. 4의 1, 2, 3처럼 정확하게 일치하는 지점에서 취성 파괴가 발생하는 것을 확인했다. 기존 연구에서는 취성 파괴를 확인하기 위해 SEM, AFM 등의 추가적인 측정을 필요로 했다.<sup>11,12</sup> 그러나 본 연구를 통해 in-situ 방식으로 도

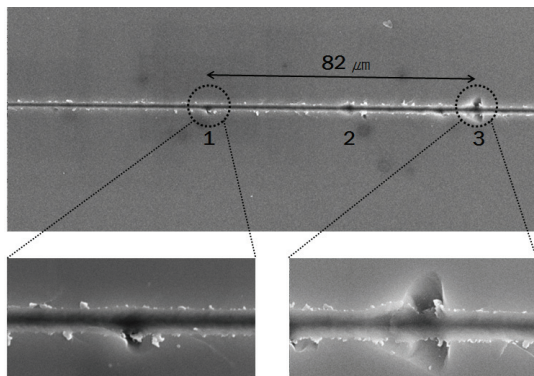


Fig. 4 Ductile-Brittle transition zone when machining the silicon as increasing the thrust force from 0 to 60mN

출되는 절삭력을 분석하기만 함으로써 연성가공을 확인 할 수 있음을 발견했다. 본 연구에서는 처음 취성 파괴가 발생되기 시작할 때(Fig. 2의 A 영역)의 절삭력을 ‘임계 절삭력’, 배분력을 ‘임계 배분력’ 이라고 정의하였다. 본 장비에서 제어할 수 있는 변수는 배분력이므로 본 연구에서는 실리콘을 연성가공하기 위해 임계 배분력의 정량적인 값을 기준으로 제시하였다. 재현성을 확인하기 위해 같은 조건으로 다수의 실험을 반복함으로써 평균 임계 배분력을 구했다. 그러나 Fig. 4의 1지점처럼 임계 배분력 직전의 하중으로 가공된 패턴 주변 역시 연성가공이 이루어 졌다고 판단하기는 무리가 있기에 고품질의 나노패턴을 얻기 위해서는 적절한 배분력을 선정해 줄 필요가 있다.

**4.3 단결정 실리콘의 연성가공**

연성가공을 하기 위해 평균 임계 배분력의 85%에 해당하는 배분력으로 constant method를 사용하여 선형패턴을 가공했다. 실험조건은 Table 1과 동일하다. 가공과 동시에 in-situ 방식으로 얻어진 절삭력을 분석한 결과 절삭력의 편차가 심하지는 않았지만 Fig. 5의 4, 5와 같이 부분적으로 불안정한 부분이 있었다. SEM을 통해 패턴을 관찰한 결과 Fig. 6과 같이 취성 파괴가 발생하지는 않았지만 Fig. 5의 4, 5부분과 같이 절삭력이 불안정한 부분의 패턴 주변에 변형이 일어나는 것을 확인했다. 이에 선명한 고품질의 패턴을 얻기 위해 배분력을 임계배분력의 55%에 해당하는 배분력으로 낮춰서 가공했다. 이때 Fig. 7에서 보는 것과 같이 Fig. 5에 비해 절삭력이 일정하게 늘어났다. SEM을

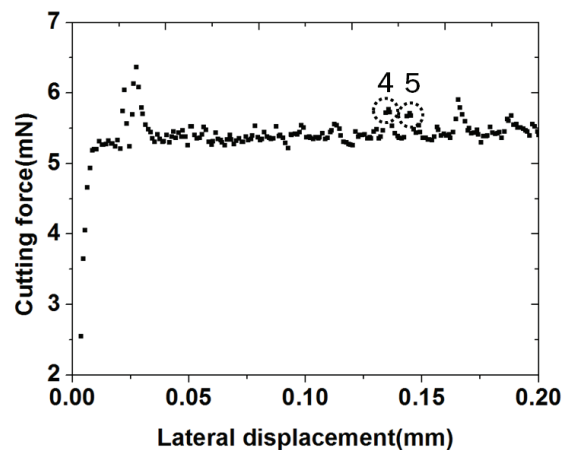


Fig. 5 Variation of cutting force versus lateral displacement when machining the silicon with 85% of critical thrust force at constant method

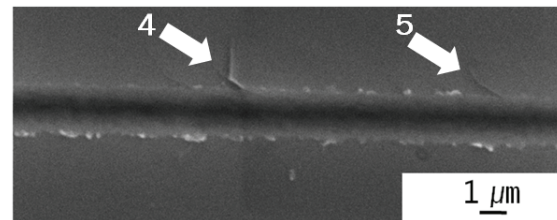


Fig. 6 SEM image of silicon when machining the silicon with 85% of critical thrust force at constant method

통해 패턴을 확인해본 결과 Fig. 8(a)과 같이 취성 파괴가 없고 패턴 주변에 변형이 일어나지 않는 연성가공이 이루어 졌음을 확인 할 수 있었으며 패턴의 폭은 대략 1.6μm, 깊이는 250nm 내외였다. 마지막으로 선명한 V형의 패턴이 얻어졌는지 확인하기 위해 AFM을 통해 패턴 단면을 측정하였다. 패턴의 모양이 Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 공구모양과 같은 날카로운 V형태의 패턴이 가공됨을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 목표한 바와같이 날카로운 V자 패턴을 취성파괴 없이 가공하는데는 성공했으나 패턴 주변에 미세한 버가 발생하는 것을 관찰하였다. 이는 본 연구에서 사용한 공구의 경사각 문제로 판단된다. 기존에 V형 공구를 이용한 절삭가공에서 Fig. 9(a)와 같이 경사각이 양의 값을 갖는 경우에 칩이 연속적으로 발생되며 배출이 용이하다는 연구가 있다.<sup>13,14</sup> 이에 반해, 본 연구에서 사용된 공구는 90°의 원뿔형으로 Fig. 9(b)



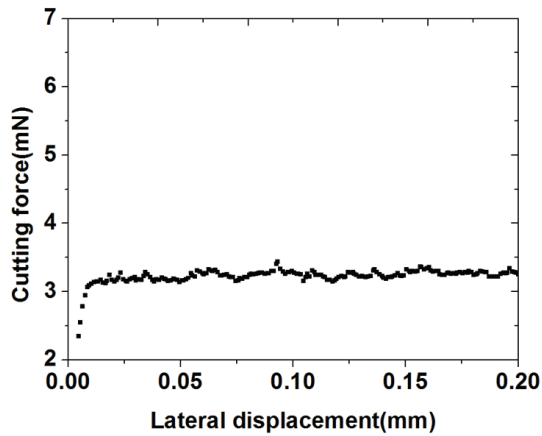


Fig. 7 Variation of cutting force versus lateral displacement when machining the silicon with 55% of critical thrust force at constant method

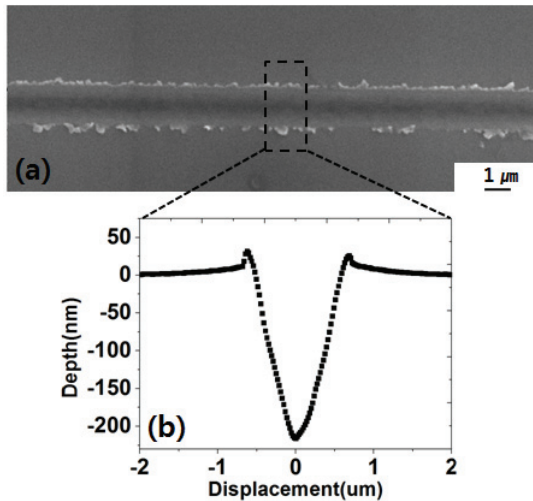


Fig. 8 (a) SEM image and (b) AFM image of silicon when machining the silicon with 55% of critical thrust force at constant method

와 같이 경사각이  $-45^\circ$ 에 해당하여 칩의 배출이 용이하지 않아 버가 발생된 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 공구의 경사각이 버발생에 미치는 영향을 연구할 예정이다.

**5. 결론**

본 논문에서는 단결정 실리콘을 연성가공 하기 위해 임계 배분력을 정량적으로 분석하고 이를 통

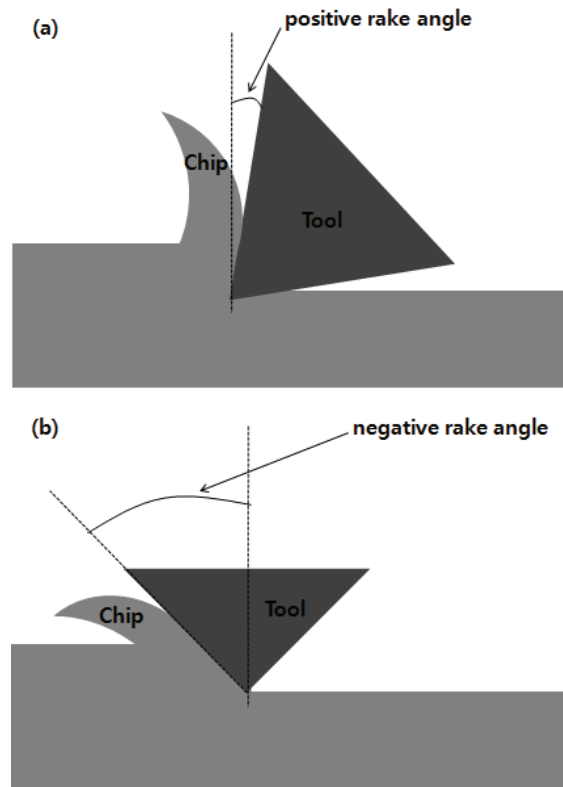


Fig. 9 A schematic diagram of chip formation at (a) positive rake angle and (b) negative rake angle

해 단결정 실리콘 위에 취성 파괴가 없는 나노패턴을 가공하기 위한 연구를 진행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 특정 형상의 압입자로 소재표면을 긁는 나노스크래치 테스터는 나노급의 가공장비로서 사용할 수 있다.
- (2) 단결정 실리콘을 가공한 결과 특정 배분력 이상에서 취성 파괴가 발생했으며 취성 파괴가 발생할 때 절삭력이 불안정한 것을 확인하였다.
- (3) SEM, AFM등의 추가적인 과정없이 절삭력을 분석함으로써 연성가공 여부를 파악할 수 있음을 발견했다.
- (4) 최초 취성 파괴가 발생하는 지점의 배분력을 ‘임계 배분력’ 이라고 정의했으며 임계 배분력의 55%에 해당하는 배분력으로 단결정 실리콘을 가공하여 나노급의 패턴을 제작하였다.
- (5) SEM, AFM을 통해 패턴표면 및 단면에 취성 파괴가 없는 선명한 V형 패턴이 가공되었음을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 글로벌프린티어사업 파동에너지극한제어 연구단(CAMM-2014M3A6B3063707)과 국가과학기술연구회의 한국기계연구원 정부출연금사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Zhang, W. and Chou, S. Y., "Fabrication of 60-nm Transistors on 4-in. Wafer Using Nanoimprint at All Lithography Levels," *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 8, pp. 1632-1634, 2003.
- Bogaerts, W., Wiaux, V., Taillaert, D., Beckx, S., Luysaert, B., et al., "Fabrication of Photonic Crystals in Silicon-on-Insulator Using 248-nm Deep UV Lithography," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 8, No. 4, pp. 928-934, 2002.
- Revzin, A., Russel, R. J., Yadavalli, V. K., Koh, W. G., Deister, C., et al., "Fabrication of Poly(ethylene glycol) Hydrogel Microstructures Using Photolithography," *Langmuir*, Vol. 17, pp. 5440-5447, 2001.
- Choi, Y. K., Zhu, J., Grunes, J., Bokor, J., and Somorjai, G. A., "Fabrication of Sub-10-nm Silicon Nanowire Arrays by Size Reduction Lithography," *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 107, pp. 3340-3343, 2003.
- Ahn, S. W., Lee, K. D., Kim, J. S., Kim, S. H., Park, J. D., et al., "Fabrication of a 50nm Half-Pitch Wire Grid Polarizer Using Nanoimprint Lithography," *Nanotechnology*, Vol. 16, No. 9, pp. 1874-1877, 2005.
- Hung, N. P. and Fu, Y. Q., "Effect of Crystalline Orientation in the Ductile-Regime Machining of Silicon," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 871-876, 2000.
- Leung, T. P., Lee, W. B., and Lu, X. M., "Diamond Turning of Silicon Substrates in Ductile-Regime," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 73, No. 1, pp. 42-48, 1998.
- Tanaka, H., Shimada, S., and Anthony, L., "Requirements for Ductile-Mode Machining Based on Deformation Analysis of Mono-Crystalline Silicon by Molecular Dynamics Simulation," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 53-56, 2007.
- Fang, F. Z. and Venkatesh, V. C., "Diamond Cutting of Silicon with Nanometric Finish," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 45-49, 1998.
- Cheng, J. and Gong, Y. D., "Experimental Study of Surface Generation and Force Modeling in Micro-Grinding of Single Crystal Silicon Considering Crystallographic Effects," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 77, pp. 1-15, 2014.
- Liu, K., Li, X. P., Rahman, M., Neo, K. S., and Liu, X. D., "A Study of the Effect of Tool Cutting Edge Radius on Ductile Cutting of Silicon Wafers," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 7-8, pp. 631-637, 2006.
- Chao, C. L., Ma, K. J., Liu, D. S., Bai, C. Y., and Shy, T. L., "Ductile Behaviour in Single-Point Diamond-Turning of Single-Crystal Silicon," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 2, pp. 187-190, 2002.
- Schroeder, P. T., "Widening Interest in Twist Drills," *Modern Mechanical Shop*, Vol. 71, No. 4, pp. 106-113, 1998.
- Zhang, S. J., To, S., and Zhu, Z. W., "A Review of Surface Roughness Generation in Ultra-Precision Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 91, pp. 76-95, 2015.