

## DPSS UV laser와 습식 식각을 이용한 금형강 미세 가공

민경익, 김재구, 조성학, 최두선, 황경현

한국기계연구원

### Micromachining for plastic mold steel using DPSS UV laser and wet etching

Kyoungik Min, Jaegu Kim, Sunghak Cho, Doosun Choi, Kyunghyun Whang

Korea Institute of Machinery and Materials

#### Abstract

This paper describes the method for the fabrication of micro dot array on a plastic mold steel using DPSS (diode pumped solid-states) UV laser and wet etching process. We suggest the process of the ablation of a photoresist (PR) coated on plastic mold steel and wet etching process using solutions of various concentrations of  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  in water as etchant. This method makes it possible to fabricate metallic roller mold because the microstructures are directly fabricated on the metal surface. In the range of operating conditions studied, 17  $\mu\text{J}$  laser pulse energy and 50 ms laser exposure time, an etchant containing 40wt%  $\text{FeCl}_3$ , 5wt%  $\text{HNO}_3$  and etch time for 45 s gave the 10  $\mu\text{m}$  of micro dot pattern on plastic mold steel.

**Key Words:** DPSS UV Laser, Laser ablation, Wet etching, Stainless steel, Micro lens array

#### 1. 서 론

마이크로 렌즈 어레이(micro lens array)는 통신, 의료기기, 멀티미디어기기, 전자기기분야 등의 부품에 다양하게 응용되고 있는 중요한 광학 소자이다. 마이크로 렌즈는 반도체 레이저와 광섬유와의 연결 부분에서 레이저의 퍼짐을 막는데 사용되며,<sup>1</sup> 광감지 센서의 효율을 증대시켜 디스플레이의 성능 향상 등을 가능하게 한다.<sup>2</sup> 현재 연구되어지고 있는 마이크로 렌즈의 제작법은 thermal reflow,<sup>3,4</sup> gray-scale photolithography,<sup>5,6</sup> 레이저 펄스를 이용한 에칭 방법,<sup>7,8</sup> hot embossing,<sup>9</sup> 폴리머의 레이저 증착과 이온빔 가공법,<sup>10,11</sup> 잉크젯 기술,<sup>12,13</sup> 건식 식각 방법<sup>14,15</sup> 등 매우 다양하다. 이러한 마이크로 렌즈 어레이를 포함한 몰드 재료로 폴리머, 유리, 금속 등 다양한 물질이 사용되고 있으며, 제품의 소형화, 공정의 간편화, 그리고 연속 생산 공정이 요구되는 추세에 따라 롤 금형의 미세가공에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 롤 금형의 표면에 마이크로 패턴을 포함하기 위한 방법으로 modified LIGA process, thin mold wrapping, 그리고 soft mold casting 등이 있으나 이러한 대부분의 방법들은 공정이 복잡하게

나 내구성이 약하고, 비용이 많이 드는 단점이 있다. 또한 thin mold wrapping method는 최근 많이 사용되는 방법이지만, 종종 몰드(mold)와 롤 사이의 약한 접착력으로 인해서 몰드의 미끄러짐 현상이나 뒤틀림 현상 등의 문제가 발생되고 있다.

본 연구에서는 기존의 방법들에서 나타난 공정의 복잡성과 여러 문제점을 보완하기 위해 금형강 표면에 직접 미세 패턴을 가공하는 방법을 연구하였다. 금형강에 직접 미세가공을 위한 방법으로 기계가공, 레이저 어블레이션 등이 사용될 수 있으나, 기계 가공을 통한 금형강 가공시 가공 툴(tool)의 수명과 수  $\mu\text{m}$  크기의 마이크로 패턴 제작에 어려움이 따른다. 레이저 가공의 경우 작업의 자동화가 용이하며, 작업속도가 빨라 대량 생산에 유리하고, 마스크가 필요 없이 수  $\mu\text{m}$  정도의 크기로 빔을 집속 시킬 수 있어 복잡하고 정교한 부품의 정밀가공이 가능하여 최근 각광받고 있는 기술 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 롤 금형강에 적용시키기 위한 기초 가공실험으로 금형강 표면 위에 포토레지스트를 도포하여 레이저와 습식 식각을 통해 직경 10  $\mu\text{m}$ 의 dot 어레이를 가공하는 방법을 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험장치

금형강 미세 가공을 위해 사용된 레이저는 Coherent사의 AVIA laser로써 파장 355 nm, 출력 1.5 W, 반복률 15 kHz 의 Q-switched DPSS UV laser를 사용하였다. 출력된 빔은 대물렌즈(20x, N.A. 0.4)에 의해 가공물에 집중되었다.

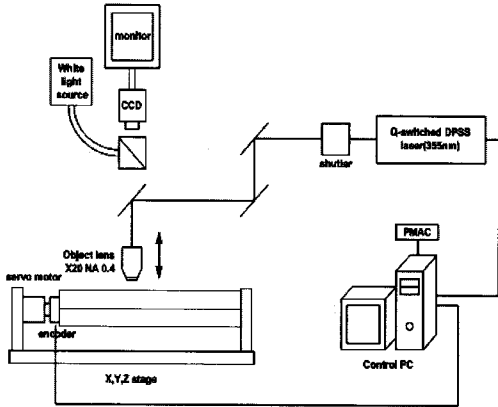


Fig. 1 Experimental set-up for laser ablation.

Table 1 Specifications of Laser and stage system

		Specification
Laser	Type	Q-switched DPSS UV Laser (Coherent. Co.)
	Wavelength	355 nm
	Average power	1.5 W at 15 kHz
	mode	TEM <sub>00</sub>
Object lens		20x, NA 0.4
Stage	Resolution of X, Y axis	0.5 μm
	Resolution of Z axis	1.25 μm
Controller		PMAC (DELTA TAU)

Fig. 1에서 보는 바와 같이 금형강 가공을 위해 분해능 0.5 μm의 X, Y축, 그리고 1.25 μm의 Z축 스테이지를 장착하였으며, DELTA TAU사의 PMAC(programmable multi-axis controller)을 이용하여 레이저와 스테이지를 제어하였다.

### 2.2. 실험방법

가공 물질로써 Clariant사의 AZ-4620 포토레

지스트(photoresist)를 10 μm 두께로 도포한 가로세로 길이 20 mm 인 크롬합금강 재질의 STAVAX-ESR(UDDEHOLM, USA, 1.40-1.60 C, 0.40 Si, 0.60 Mn, 0.03 S, 11.0-13.0 Cr, 0.80-1.20 Mo, 0.20-0.50 V) 금형강을 사용하였다. 금속 표면에 미세 패턴 가공을 위해 PMAC 프로그램을 통해 레이저의 조사시간과 파워를 조절하여 일정한 피치(pitch) 간격의 닷 어레이를 제작하였다. 또한 가공된 금속을 40wt% FeCl<sub>3</sub> 식각 액에 담가 초음파세척기 내에서 수 초간 식각하였다.(Fig. 2참조) 식각을 한 후, 가공된 형상을 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 측정하였다.

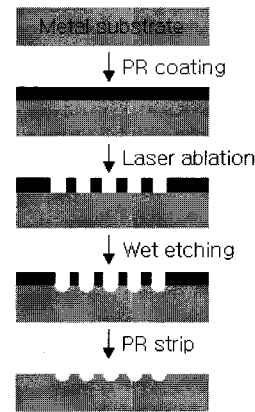


Fig. 2 Fabrication schematic diagram of micro lens array on plastic mold steel.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 금속의 직접 레이저 어블레이션

일반적으로 UV laser를 이용하여 금속 물질을 직접 어블레이션하는 경우 비교적 낮은 에너지에서 가능하고, 공정이 간단한 장점이 있지만 가공 부위의 열적 손상과 이에 따른 찌꺼기(debris)의 발생, 그리고 형상 재현의 어려움 등의 단점이 있다. Fig 3은 펄스에너지(pulse energy) 17 μJ, 레이저 조사시간 100 ms, 빔 직경(spot size) 3 μm에서 가공한 결과이며, 열적 손상으로 인해 찌꺼기의 발생과 형상이 고르지 못한 것을 보여주고 있다.

이러한 가공부위의 열적 손상을 방지하기 위하여 포토레지스트를 코팅한 후 같은 조건에서 레이저를 조사하였다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 레이저 조사를 통하여 직경 2 μm 크기의 dot 모양으로 포토레지스트를 가공하였다.

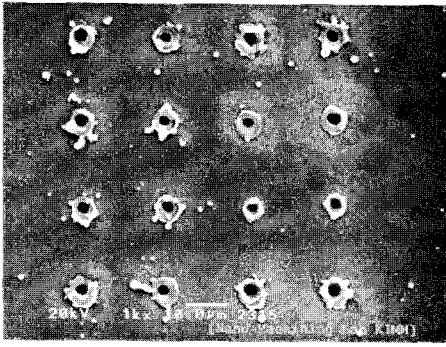


Fig. 3 SEM image of direct laser ablated metal surface.

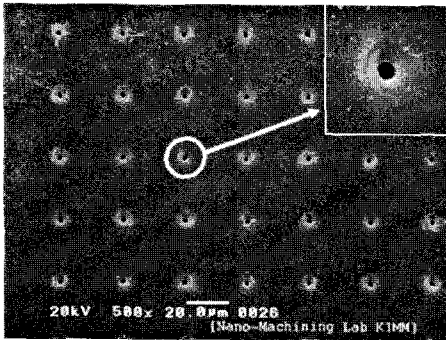


Fig. 4 SEM image of photoresist pattern on metal substrate.

### 3.2. 습식 식각 및 표면처리

금형강 표면에 포토레지스트를 도포한 후 레이저로 가공하여 Fig. 4와 같이 직경 2  $\mu\text{m}$ 의 닷 어레이를 가공하였고, 레이저에 의해 가공된 시편을 40wt%  $\text{FeCl}_3$  식각 액에 넣어 초음파세척기 내에서 60초간 식각하였다. 식각 후 포토레지스트의 표면이 Fig. 5(a)에 보이는 바와 같이 금속 표면과 포토레지스트 사이에 얼룩이 관찰되었다. Fig. 5(b)는 식각 후 포토레지스트를 제거한 금속 표면이다. Fig. 5(b)에 보이는 바와 같이 식각 액에 노출되지 않은 부분까지 모두 식각 되는 것을 확인하였다. 이것은 포토레지스트와 금속 기판과의 접착성이 약하기 때문이며, 이것을 해결하기 위해 포토레지스트 공정 전에 포토레지스트와 금속기판과의 접착성 향상을 위한 전처리 공정을 추가하였다. 일반적으로  $\text{SiO}_2$  또는 금속 표면은 공기 중의 습기 때문에 극성의  $-\text{OH}$ 를 형성하여 친수성 성질을 보이며, 이것은 비극성의 포토레지스트와 젖음성과 접착력을 감소시킨다.

금속표면을 HMDS(Hexamethyldisilazane,  $(\text{CH}_3)_3\text{SiNHSi}(\text{CH}_3)_3$ )로 코팅할 경우, HMDS의 Si 원자가 금속 표면의 산소원자( $-\text{OH}$ 작용기)와 결합하면서

표면을 메틸기로 감싸기 때문에 금속표면은 친수성에서 소수성으로 전환되며, 포토레지스트와의 접착성이 증가하게 된다.<sup>17</sup> 표면처리공정이 추가된 시편의 표면에 같은 조건의 레이저와 식각공정을 통해 Fig. 6에 보이는 것처럼 포토레지스트로 보호된 부분이 식각되지 않는 것을 확인하였다.

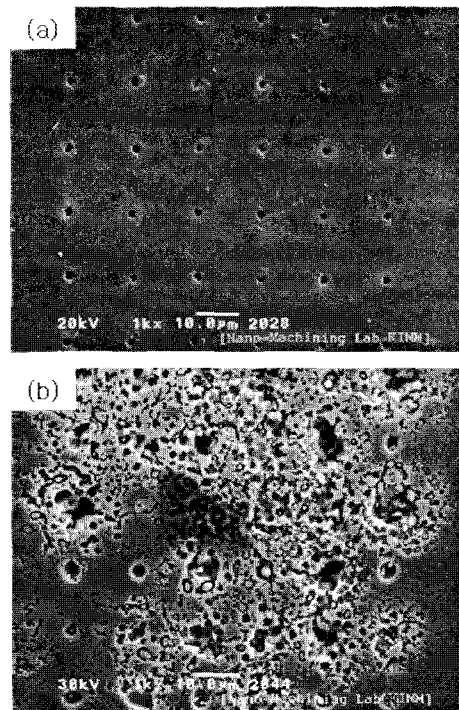


Fig. 5 SEM image of wet etched surface (a) before and (b) after photoresist strip.

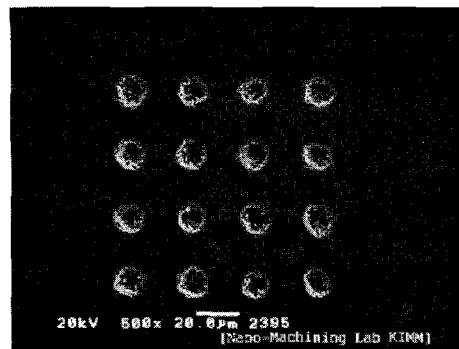
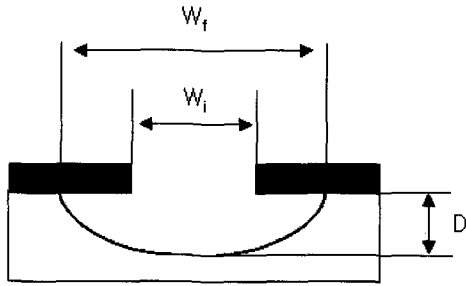


Fig. 6 SEM image of wet etched metal substrate after HMDS treatment.

### 3.3. 가공변수

금형강의 가공형상은 레이저의 파워, 레이저의 조사시간, 식각 액의 비율, 에칭 시간 등의 영향을 받으며, 각각의 변수에 의해 직경과 깊이, 거칠기(roughness) 등이 달라진다.



$W_i$  = initial width of PR opening on metal  
 $W_f$  = final width of etched pattern at the top  
 $D$  = depth

Fig. 7 Schematic of etched metal.

Fig. 7은 식각에 의한 금속의 언더컷(undercut)과 부식계수(etch factor)에 관해 나타내었으며, 다음과 같이 각각 정의된다.

$$\text{Undercut, } U = (W_f - W_i)/2 \quad (1)$$

$$\text{Etch factor} = D/U \quad (2)$$

부식계수는 금속이 식각에 의한 특성, 식각 액의 종류, 식각 시간, 식각 방법, 노출된 직경 등에 따라 달라진다.

Fig. 8(a)는 펄스에너지 17  $\mu\text{J}$ 에서 조사시간별로 레이저 가공 후 40wt%  $\text{FeCl}_3$  식각 액으로 60초간 식각한 결과이다. 가공시간이 증가할수록 어블레이션되는 포토레지스트의 양이 많아져 식각 액에 노출되는 부위가 증가하기 때문에 가공형상이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8(b)는 펄스에너지 17  $\mu\text{J}$ 에서 50 ms 동안 레이저 조사 후 40wt%  $\text{FeCl}_3$  식각 액에서 시간별로 식각하였다. 식각되는 시간이 길어질수록 노출부위에 식각 액에 의한 언더 컷 현상으로 가공부위가 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8(c)는 펄스에너지 17  $\mu\text{J}$ 에서 50 ms 동안 가공한 시편을 60초 동안  $\text{FeCl}_3$ 의 농도별로 식각하여 비교하였다. Fig. 8(c)에서 보이는 바와 같이 식각 액의 주성분인  $\text{FeCl}_3$ 의 농도가 증가할수록 식각 속도(etching rate)가 증가되어, 단위시간당 식각량은 많아지나 노출부위에 언더 컷 현상이 심하게 진행되어 가공형상을 알아볼 수 없게 되었다.

한편, 식각 액에 의한 가공부위 표면의 거칠기를 조절하기 위하여 식각 액에 질산을 첨가하였다.<sup>16</sup>

Fig. 8(d)는 펄스에너지 17  $\mu\text{J}$ 에서 50 ms 동안 가공한 시편을 40wt%  $\text{FeCl}_3$  식각 액에  $\text{HNO}_3$  비율별로 혼합하여 60초 동안 식각한 결과를 나타내었다. Fig. 8(d)에서 보이는 것처럼 질산의 첨가로 인해 가공부위 표면의 거칠기가 좋아지는 것을 볼 수 있다. Rao 연구팀은  $\text{HNO}_3$ 이 다음의 반응식에 따라 천천히 반응이 일어난다고 발표하였다.<sup>16</sup>

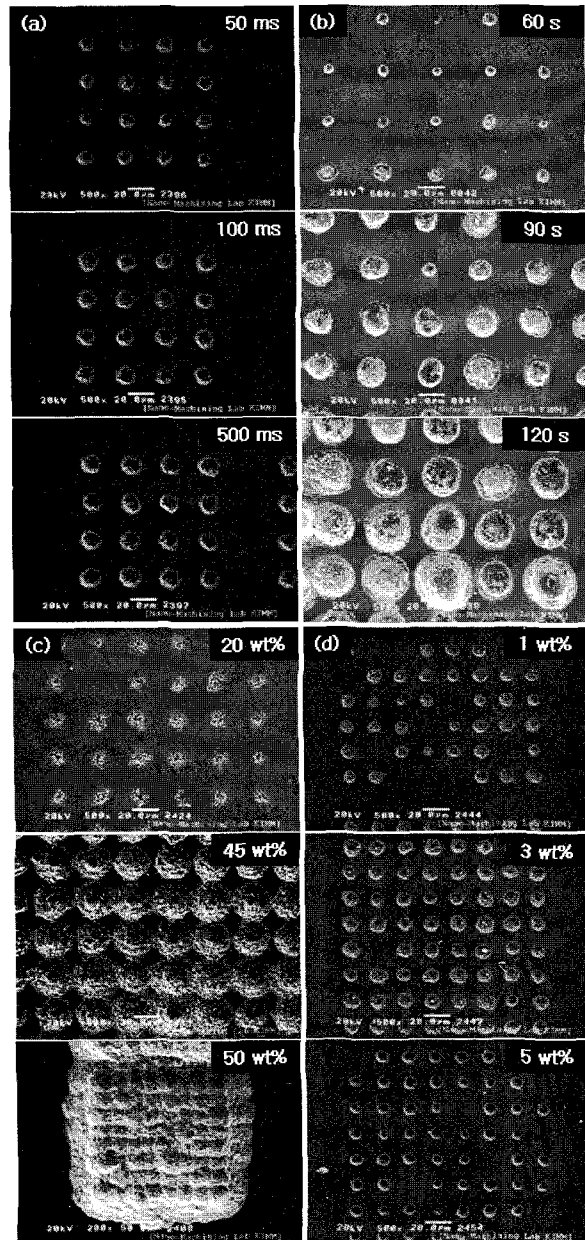
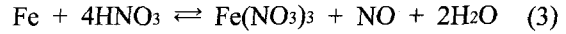


Fig. 8 SEM image at different parameters ; (a) exposure time, (b) etch time, (c) concentration of  $\text{FeCl}_3$  and (d)  $\text{HNO}_3$ .

질산의 첨가로 인해 초기에 부식계수(etch factor)가 크지만, 식각 시간을 급격히 감소시키고, 시간이 길어질수록 부식계수가 일정해진다고 보고하였다. 즉, 질산의 첨가로 인해 금형강이 측면 식각보다 깊이가 깊어지게 식각되며, 시간이 지날수록 그 값이 일정하므로 식각부위의 거칠기를 조절할 수 있다.

각 가공 변수들의 결과를 토대로 레이저에 의한 가공부위를 2  $\mu\text{m}$ 로 패터닝한 후 40wt%  $\text{FeCl}_3$  + 5wt%  $\text{HNO}_3$  + 55wt%  $\text{H}_2\text{O}$ 의 비율로 혼합한 식각 액에 45초간 초음파 세척기내에서 식각하였을 때, Fig. 9에 나타난 것과 같이 10  $\mu\text{m}$  크기의 반구형 dot 모양을 얻었다.

그러나 실험결과 금형강재질에 레이저를 이용하여 포토레지스트를 패터닝한 후 식각공정을 거쳤을 때, 첨가물인 질산만으로는 금형강 몰드 가공형상의 거칠기를 매끄럽게 하는 것에 한계가 있으며, 추후 몰드의 표면 코팅이나 증착 공정을 통하여 표면의 거칠기를 향상시키거나, 몰드와 수지(resin)와의 전사(replica) 공정 중 압력 또는 reflow 법을 이용하여 패턴의 형상을 조절하는 연구가 필요하다.



Fig. 9 SEM image of micro dot array patterned plastic mold steel.

#### 4. 결론

본 연구에서는 몰 금형에 마이크로 렌즈 어레이를 가공하기 위한 기초가공 실험으로 DPSS UV laser와 습식식각을 이용하여 금형강에 마이크로 렌즈 어레이 패턴을 가공하였다. 금형강에 직접 레이저를 조사하였을 때의 열적 손상을 피하기 위하여 포토레지스트를 코팅하였고, 포토레지스트와 금속기판과의 접착성 향상을 위해 HMDS를

이용한 표면처리를 하였다. 표면에 일정한 세기와 패턴으로 레이저 가공을 하기 위해서 PMAC 프로그램을 이용하였으며, 가공된 시편을 식각액에 넣어 초음파세척기 내에서 식각하였다. 펄스에너지 17  $\mu\text{J}$ , 50 ms 의 가공조건으로 레이저 어블레이션 후 40wt%  $\text{FeCl}_3$  + 5wt%  $\text{HNO}_3$  + 55wt%  $\text{H}_2\text{O}$ 의 비율로 혼합한 식각 액에서 45초간 식각하였을 때, 직경 10  $\mu\text{m}$  인 dot 어레이를 금형강에 가공할 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1) A. Tuantranont, V. M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J. A. Neff, Y. C. Lee, "Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array," Sens. Actuators A, Vol. 91, pp. 363-372, 2001.
- 2) L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan Jr, "The kinoform: A new wavefront reconstruction device," IBM J. Res. Develop., Vol. 13, pp. 150-155, 1969.
- 3) D. Daly, R.F. Stevens, M.C. Hutley, N. Davles, "The manufacture of microlenses by melting photoresist," Meas. Sci. Technol., Vol. 1, pp. 759-766, 1990.
- 4) Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. Neville Connell, "Technique for monolithic fabrication of microlens array," Appl. Opt., Vol. 27, pp. 1281-1284, 1988.
- 5) K. Totsu and M. Esashi, "Gray-scale photolithography using maskless exposure system," J. Vac. Technol. B, Vol. 23, pp. 1487-1490, 2005.
- 6) T. J. Suleski and D. C. O'Shea, "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers," Appl. Opt., Vol. 34, No. 32, pp. 7507-7517, 1995.
- 7) S. Mihailov and S. Lazare, "Fabrication of refractive microlens arrays by excimer laser ablation of amorphous Teflon," Appl. Opt., Vol. 32, pp. 6211-6218, 1993.
- 8) M. Kubo and M. Hanabusa, "Fabrication of micro-lenses by laser chemical vapor deposition," Appl. Opt., Vol. 29, No. 18, pp.

- 2755-2759, 1990.
- 9) N.S. Ong, Y.H. Koh and Y.Q. Fu, "Microlens array produced using hot embossing process," *Microelectron. Eng.* Vol. 60, pp. 365-379, 2002.
  - 10) Y. Fu, N. K. Bryan, "Semiconductor Microlenses Fabricated by One-Step Focused Ion Beam Direct Writing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 15, No. 2, pp.229-231, 2002.
  - 11) Y. Fu, and B. K. A. Ngoi, "Investigation of diffractive-refractive microlens array fabricated by focused ion beam technology," *Opt. Eng.*, Vol. 40, No. 4, pp. 511-516, 2001
  - 12) D. L. MacFarlane, V. Narayan, W. R. Cox, T. Chen, and D. J. Hayes, "Microjet fabrication of microlens array," *IEEE Photonics Technology Letter*, Vol. 6, No. 6, pp.1112-1114, 1994.
  - 13) D. J. Hayes and W. R. Cox, "Micro-jet printing of polymers for electronics manufacturing," *Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing*, pp. 168-173, 1998.
  - 14) M. B. Stern, T. R. Jay, "Dry etching for coherent refractive microlens array," *Opt. Eng.*, Vol. 33, pp. 3547-3551, 1994.
  - 15) R. Steingraber and M. Fers, "Three-dimensional microstructure elements fabrication by electron beam lithography and dry etching technique," *Microelectron. Eng.*, Vol. 53, pp. 539-542, 2000.
  - 16) P. N. Rao and D. Kunzru, "Fabrication of microchannels on stainless steel by wet chemical etching," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, pp. 99-106, 2007.
  - 17) I. Yagi, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, "Modification of the electric conduction at the pentacene/SiO<sub>2</sub> interface by surface termination of SiO<sub>2</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, pp. 103502, 2005.