

## Nd:YAG Laser를 이용한 자성금속막의 패턴 식각에 있어서 에너지 흡수층이 미치는 영향

### The Effect of Energy-absorbing layers on Micro-patterning of Magnetic Metal Films using Nd:YAG Laser

이주현\*, 송재성\*\*, 민복기\*\*, 서영준\*, 채상훈\*, 안승준\*\*\*  
(Ju-Hyeon Lee\*, J. S. Song\*\*, B. K. Min\*\*, Young-Joon Seo\*,  
Sang-Hoon Chae\*, Seung Joon Ahn\*\*\*)

#### Abstract

The laser patterning of sputter-deposited CoNbZr/Cu/CoNbZr multi-layered films had been tried using Nd:YAG laser. However, generally it is very difficult to remove metal films because of their high reflectance of the laser on the surfaces. As a counterproposal for this problem, authors for the first time tried to deposit energy-absorbing layers on the metal films and then irradiated the laser on the surfaces of energy-absorbing layers. Here the energy-absorbing layers consisted of laser energy-absorbing fine powders and binding polymers. Three kinds of powders for the energy-absorbing layers had been used to see the difference in the pattern formation with the degree of laser energy absorption. They were electrically conductive silver powders, insulating BaTiO<sub>3</sub> powder and semiconducting carbon powder. Remarkable differences in width of the formed pattern and the roughness of pattern edge were observed with the characteristic of the powder for the energy-absorbing layer. The pattern width using carbon paste was about three times larger than that using BaTiO<sub>3</sub> paste. It was observed that the energy-absorbing layer with carbon was the most effective on this micro-patterning.

**Keywords** : energy-absorbing layer(에너지 흡수층), laser, micro-patterning, polymer, thermal conductivity

#### 1. 서론

고주파에 이용되는 박형의 자기소자를 제조하는 경우 자성층(코어)/절연층/코일층(Cu) 또는 이들의

반복된 층으로 이루어지는 경우가 많으며, 그 두께가 수~수십  $\mu\text{m}$  정도로 되는 것이 보통이다. 이러한 다층 박막은 두께가 두꺼울 뿐만 아니라 서로 다른 물질들로 이루어져 있기 때문에 습식식각법으로 동일한 etchant를 이용하여 패턴을 형성할 경우 물질에 따라 식각속도가 다르고 기본적으로 등방성식각이 이루어지므로 바람직한 패턴을 형성하는 것이 매우 어렵다.

본 연구에서는 위에서 언급한 문제점을 극복하기 위한 대안으로, 가공하고자 하는 시편의 고정이용이하고 장비를 빨리 설치할 수 있으며 가공 패턴의 디자인을 빠르고 용이하게 변경할 수 있고, 가공한 자국이 작으며 복잡한 모양의 패턴도 쉽게

\* 선문대학교 재료화학공학부  
(충남 아산시 탕정면 갈산리 100 선문대학교,  
Tel: 0418-530-2365(Fax공용),  
E-mail: leejh@omega.sunmoon.ac.kr)

\*\* 한국전기연구소 전기재료연구부

\*\*\* 선문대학교 신소재과학과

2000년 1월 21일 접수, 2000년 4월 21일 심사완료

## 2. 실험방법

가공할 수 있는 장점 때문에 최근에 많이 이용되고 있는, Nd:YAG 레이저를 이용한 전식 패턴형성 방법을 시도했다.<sup>[1]</sup>

일반적으로 적외선인 레이저빔은 평행광선으로서 레이저 source에 의해서 발생되며 반사거울에 의해서 식각 표면까지 전달된다. 식각 대상지점에 이르면 레이저빔은 렌즈에 의해 식각재료의 표면에서 거의 한 점으로 모이도록 집중된다. 집중된 레이저빔은 순간적으로 대상물질을 가열하여 증발시킴으로서 식각이 이루어진다. 레이저 식각이나 절단을 위해서는 고도의 빔강도가 요구되는데 이러한 고도의 빔강도는 식각 하고자 하는 재료의 표면을 순간적으로 급격히 가열시키는 결과를 가져오며 레이저의 에너지가 주위로 확산되기 전에 레이저가 집중된 부분이 가공되어 결국 빠른 식각속도와 식각품질을 유지할 수 있게 한다.

일반적으로 진공증착된 금속박막은 빛의 반사율이 높기 때문에 반사체로 많이 이용되고 있는데, 본 연구에서 식각하고자 하는 자성박막도 진공증착된 금속박막이므로 빛에 대한 반사율이 매우 크다. 예를 들면 본 연구에서 이용되고 있는 구리는 빛의 파장이 0.7  $\mu\text{m}$  이하에서는 에너지 흡수율이 비교적 크지만 본 연구에서 이용된 Nd:YAG(Yttrium Aluminum Garnet doped with Nd<sup>3+</sup>) 레이저의 파장인 1.06  $\mu\text{m}$  근처에서는 반사율이 95% 이상이므로 에너지 흡수율이 5% 이하로 매우 낮다. 따라서 이러한 경우에는 레이저 에너지의 흡수율이 낮기 때문에 레이저를 이용해서 패턴을 형성하는 것이 매우 어렵다.<sup>[2]</sup>

이와 같은 문제를 극복하기 위한 방법으로 두 가지 대안을 고려해 볼 수 있는데, 그 중 하나는 위에서 언급한 바와 같이 레이저빔의 강도를 높이는 것이고 나머지 하나는 레이저 에너지의 흡수율이 높은 에너지 흡수층을 형성함으로써 레이저 에너지를 흡수해서 바로 밑에 있는 금속막에 레이저 에너지를 전달해 주는 역할을 하게 하는 것이다. 본 연구에서는 첫 번째 경우의 대안으로 레이저빔의 강도를 높이기 위해서 레이저의 펄스폭을 짧게 함으로서 레이저를 Q-switching 하였다. 두 번째 경우의 대안으로 본 연구에서는 레이저 에너지의 흡수율이 높은 레이저 에너지 흡수층으로서 여러 가지 종류의 polymer막을 자성박막의 표면에 도포하는 방법을 최초로 시도했다. 특히 레이저 에너지 흡수층의 종류가 레이저 패턴형성에 미치는 영향이 중점적으로 관찰되었다.

실리콘 기판 위에 두께가 2  $\mu\text{m}$  정도인 CoNbZr alloy층, 두께가 12  $\mu\text{m}$  정도인 Cu층, 그리고 다시 두께가 2  $\mu\text{m}$  정도인 CoNbZr alloy층을 sputtering 방법으로 순차적으로 진공증착시킨 시편이 준비되었다. 이렇게 준비된 다층의 자성박막 표면에 레이저 에너지가 가장 효과적으로 흡수될 수 있도록 미세한 탄소분말을 이용하여 에너지 흡수층을 도포하였다. 이때 탄소분말의 입자 크기는 submicron size이다. 탄소(carbon black powder)는 검은 색으로 가시광선이나 적외선 영역의 빛을 가장 잘 흡수하는 물질 중의 하나이다. 이러한 탄소분말을 polymer와 3:1의 무게비율로 잘 혼합해서 paste형태로 만든다. 여기서 레이저 에너지의 흡수율을 높이기 위해서 탄소분말의 밀도를 최대한 크게 하는 것이 바람직하다. 이렇게 만들어진 paste를 screen-printing 방법으로 식각하고자 하는 금속막의 표면에 도포하게 되는데 여기서 paste에 탄소분말의 양이 너무 많으면 점도가 너무 크게 되어서 screen-printing이 어렵게 된다. Paste를 도포한 후에 rotary pump를 이용해서  $10^{-2}$  torr 정도의 진공 건조oven에서 약 100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 10분 정도 건조하게 되면 polymer가 경화되어서 미세한 탄소입자들을 서로 연결시켜주는 binder역할을 하게 된다. 이렇게 해서 균일한 두께를 갖는 레이저 에너지 흡수층이 얻어진다. 여기서 에너지 흡수층의 레이저 에너지 흡수정도에 따른 패턴형성의 차이를 보기 위해서 비교적 레이저의 반사정도가 큰 은(silver)분말과 중간정도인 BaTiO<sub>3</sub> 분말을 각각 위에서 언급한 탄소분말 대신에 에너지 흡수층으로 사용하였다. 그림1은 이렇게 얻어진 에너지 흡수층으로서의 polymer막을 자성박막의 표면에 도포한 시편의 단면모양을 나타내고 있다.

어떤 물질에 전기장(electric field)을 가하면 원자주위에 있는 전자구름이나 이온 혹은 두 가지 모두가 변위를 하게 된다. 인가된 전기장이 진동수  $\omega$ 로 진동할 때 그 진동수가 너무 높아서 전자나 이온이 따라갈 수 없을 정도가 아니라면 전자와 이온의 변위도 진동수  $\omega$ 로 진동할 것이다. 실제로 전자들이  $10^{-11}$ - $10^{-13}$  s의 짧은 시간 동안에 물질의 원자나 다른 전자들과 충돌하므로 진동수가 너무 높아서 전자나 이온이 따라갈 수 없을 정도가 되는 거의 불가능하다. 그래서 어떤 물질이 강한 레이저 즉 electromagnetic radiation에 노출되면

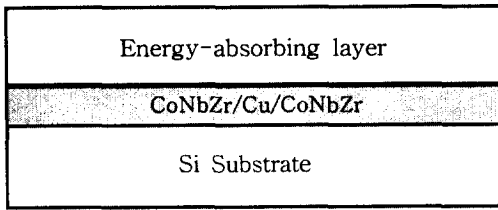


그림 1. 에너지 흡수층을 가지는 sample의 단면구조

Fig. 1. Cross-sectional structure of the sample with an energy-absorbing layer

레이저 에너지가 자유전자, 속박전자(bound electron), 혹은 격자진동 등에 의해서 먼저 흡수되고 이것이 충돌과정에 의해서 열로 변환된다. 결국은 이 열에 의해서 물질이 증발됨으로서 레이저 식각이 이루어진다.<sup>[3]-[6]</sup> 그림2에서 보는 바와 같이 본 연구의 Nd:YAG 레이저 실험장치가 구성되었는데 배율이 10배인 빔확대기(modulator)를 이용하여 레이저빔의 크기를 확대하여 평행광으로 만들었다. Beam splitter와 프리즘을 이용하여 x-y stage위에 놓여있는 시편에 레이저빔을 정렬하고 볼록렌즈로 집속시켰다.

본 실험에서는 펄스폭이 짧은 고출력의 레이저빔을 얻기 위하여 레이저 공진기의 전반사경을 PZT에 부착하여 수 Hz로 진동시켜서 최대 반복율이 25 Hz인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 Q-switching하였다. Piezo Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 - 150 ns이며 peak power는 - 67 Kw까지의 출력을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 위에서 언급한 방법으로 얻어진 세 가지 종류의 에너지 흡수층을 금속의 자성박막 위에 도포한 후에 여러 가지 조건으로 시편에 패턴을 형성하고 이러한 패턴들이 주사형 전자현미경을 이용해서 관찰되었다.

### 3. 결과 및 고찰

그림3은 증착된 자성박막 위에 도포된 은(silver)분말과 polymer(silver paste)로 이루어진 에너지 흡수층의 표면에 Nd:YAG 레이저를 조사해서 얻어진 패턴의 SEM사진을 나타낸 것이다. 여기서 레이저에 의해서 에너지 흡수층이 제거되었는데 제거된 경계부분이 매우 불균일함을 보여

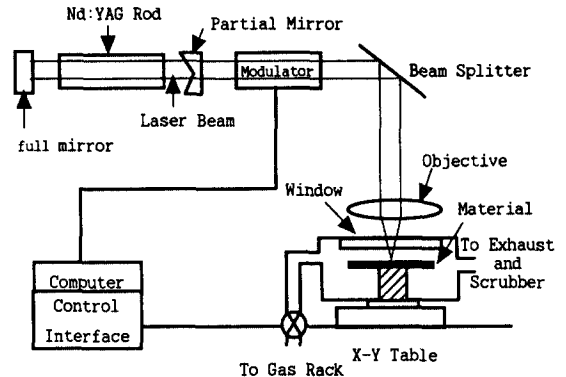


그림 2. micro-patterning system의 도식적 구조

Fig. 2. Schematic diagram of the laser micro-patterning system

주고 있다. 이것은 은이 빛을 반사시키는 성질, 즉 파장이 1.06  $\mu\text{m}$ 인 Nd:YAG 레이저에 대한 반사율이 95%로 매우 높기 때문에 충분한 에너지가 흡수되지 못한 것에 기인한 것으로 생각된다. 한편 BaTiO<sub>3</sub> 분말과 polymer로 이루어진 에너지 흡수층을 이용한 그림4의 경우와 탄소 분말과 polymer로 이루어진 에너지 흡수층을 이용한 그림5의 경우에는 각각 BaTiO<sub>3</sub>는 절연체이고 탄소는 반도체이므로 Nd:YAG 레이저에 대한 반사율이 금속인 은에 비해서 매우 작다. 그래서 이러한 경우에는 제거된 에너지 흡수층의 경계부분이 균일하다. 여기서 매우 흥미로운 것은 세 가지 경우 모두 같은 조건으로 에너지 흡수층의 표면에 레이저를 조사했는데 형성된 패턴의 폭이 크게 차이가 난다는 것이다. 예를 들면 BaTiO<sub>3</sub> paste를 경우는 패턴의 폭이 약 55 $\mu\text{m}$ , 그리고 carbon paste를 이용한 그림5의 경우는 패턴의 폭이 약 100 $\mu\text{m}$ 으로 최고 3배 정도 까지 패턴폭의 차이가 난다. 이러한 현상의 원인으로 각각의 이용한 그림4의 경우는 형성된 패턴의 폭이 약 35 $\mu\text{m}$  이고, silver paste를 이용한 그림3의 에너지 흡수층의 열전도율 차이를 고려해 볼 수 있다. 에너지 흡수층은 분말과 이러한 분말의 binder역할을 하는 polymer로 구성되어 있는데 polymer는 동일한 종류를 사용했으므로 결국 열전도율의 차이는 분말의 열전도율 차이에서 오는 것이다. 그래서 표1에서 보는 바와 같이 열전도율이 제일 낮은 BaTiO<sub>3</sub> paste를 이용한 경우의 패턴 폭은 약 35  $\mu\text{m}$  정도인데 반해서 carbon paste를 이용한 경우의 패턴 폭은 약 100  $\mu\text{m}$  정도로 그 차이가

표 1. Laser patterning한 에너지 흡수층들의 폭과 그들의 열전도도

Table 1. Width of laser-patterned energy absorbing layers and their thermal conductivity.

Energy absorbing layer	Width of patterned energy absorbing layer ( $\mu\text{m}$ )	Thermal conductivity at 300 K ( $\text{w/cm K}$ )
BaTiO <sub>3</sub> paste	35	0.062
Silver paste	55	4.29
Carbon paste	100	9.78*

\* The thermal conductivity of carbon(graphite) is the average value between parallel and perpendicular direction to the structural layer of graphite

약 3배에 해당하며 silver paste를 이용한 경우에는 은의 열전도율이 BaTiO<sub>3</sub>와 탄소의 중간정도에 해당하므로 패턴의 선폭도 중간정도인 약 55  $\mu\text{m}$  정도인 것으로 생각된다.

그림6은 그림3의 패턴에서 레이저가 조사된 부

분을 확대해서 본 SEM사진인데 가해진 에너지가 충분하지 않기 때문에 금속 박막을 증발시켜서 제거하지는 못했다는 것을 알 수 있다. 다만 전달된 에너지에 의해서 금속 박막의 표면에 열팽창에 의한 crack이 발생했음을 보여주고 있다. Silver

그림 3. 에너지 흡수층으로서 silver paste를 도포한 후 laser patterning한 시편의 SEM 평면사진( $\times 100$ ) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 3. SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing silver paste as an energy-absorbing layer ( $\times 100$ ) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 16 W)

그림 4. 에너지 흡수층으로서 BaTiO<sub>3</sub>를 도포한 후 laser patterning한 시편의 SEM 평면사진( $\times 100$ ) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 4. SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing BaTiO<sub>3</sub> paste as an energy-absorbing layer ( $\times 100$ ) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 16 W)

그림 5. 에너지 흡수층으로서 carbon paste를 도포한 후 laser patterning한 시편의 SEM 평면사진 ( $\times 100$ ) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 5. SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing carbon paste as an energy-absorbing layer ( $\times 100$ ) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 16 W)

paste를 이용한 그림6과 BaTiO<sub>3</sub> paste를 이용한 그림7의 경우에 비해서 carbon paste를 이용한 그림8의 경우에 crack이 발생한 면적이 넓고 또한 crack이 크고 선명하다는 것을 알 수 있다. 이것 또한 마찬가지로 carbon paste를 이용한 에너지 흡수층의 열전도율이 다른 두 경우에 비해서 매우 크기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 관점에서 보았을 때 에너지 흡수층으로 carbon paste를 이용하는 것이 가장 유리할 것으로 생각된다.

레이저 식각은 sputtering의 일종으로 볼 수 있는데 크게 4가지로 분류해서 생각해 볼 수 있다. 첫째는 충돌성 sputtering인데 레이저빔과 물체표면의 직접적인 상호작용에 의한 운동량의 전달은 실제로 일어날 수가 없다. 그러나 간접적인 효과는 일어날 수 있는데, 예를 들면 공기중이나 진공에서 레이저빔을 물체의 표면에 조사하게 되면, 포톤이 물체의 표면에 있는 전자에 에너지를 전달하게 되고 이러한 전자는 매우 높은 에너지를 얻게 되어서 물체를 구성하고 있는 격자원자와 충돌해서 이 원자들을 이온화시킴으로서 전자와 이온들이 섞여서 존재하는 플라즈마를 형성하게 된다. 이렇게 해

그림 6. 에너지 흡수층으로서 silver paste를 도포한 후 laser patterning한 시편의 확대한 SEM 평면사진 ( $\times 500$ ) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 6. Enlarged SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing silver paste as an energy-absorbing layer. ( $\times 500$ ) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 1 mm/s, average power: 16 W)

서 플라즈마 내에 있는 높은 에너지를 갖는 이온들이 물체의 표면에 충돌함으로써 표면에서 물질을 제거하게 된다. 둘째는 열적 sputtering인데 이때는 레이저빔이 조사되는 부분의 온도가 순간적으로 녹는점이나 끓는점 이상으로 올라갈 때 표면에서 기화가 되어서 물질이 제거된다. 셋째는 박리성 sputtering인데 이 때는 레이저빔이 조사되는 부분의 표면에서 반복되는 열충격에 의해서 매우작은 파편들이 박리되어 나온다. 이러한 경우는 특히 제거하고자하는 물질의 열팽창계수가 크고 레이저 에너지에 의한 온도가 녹는점에 근접하지만 녹는점을 넘지는 않을 때 발생하며, 열충격이 반복적으로 일어나지만 온도가 낮아서 녹음으로서 이러한 용력이 해소될 수 없기 때문에 결국에는 crack이 발생하게 된다. 넷째는 유체역학적 sputtering인데 이 때는 물질의 표면이 순간적으로 녹음으로서 물질이 제거되는 것이다. 이러한 경우에는 물질이 녹을 때의 체적변화와 이렇게 해서 형성된 액상의 열팽창 때문에 각 레이저 펄스가 조사되는 동안에 액상의 물질표면에서 물질이 튀어나감으로서 물질이 제거된다. 이 때는 제거된 물체의 표면이 매우

그림 7. 에너지 흡수층인 BaTiO<sub>3</sub> paste를 증착한 후 laser patterning한 sample의 확대된 SEM 평면 (×500) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 7. Enlarged SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing BaTiO<sub>3</sub> paste as an energy-absorbing layer. (×500) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 16 W)

거칠게 형성된다.

그림3에서 그림8까지의 SEM 사진에서 보면 본 실험의 경우는 레이저의 평균출력이 16 W인데 이러한 경우에는 레이저 에너지가 낮아서 충분한 에너지가 아래에 있는 금속막에 전달되지 못했으므로 위에서 언급한 레이저 식각 기구(mechanism) 중에서 박리성 sputtering에 해당한다는 것을 알 수 있다.

그림9는 레이저 에너지를 18W로 높여서 레이저 식각을 시도한 것인데 식각된 금속막이 매우 거칠고 불균일하게 제거되었음을 보여주고 있다. 이는 에너지 흡수층을 이용하지 않았기 때문에 레이저 에너지가 효과적으로 금속막에 흡수되거나 전달되지 않아서 열에너지가 측면으로 분산되었기 때문인 것으로 생각된다. 한편 에너지 흡수층을 이용하는 경우에는 그림10에서 보는 바와 같이 에너지 흡수층에 의해서 레이저 에너지가 효과적으로 금속막에 흡수되거나 전달되어서 한정된 부분에서만 금속막이 제거되었음을 보여주고 있다. 여기서 에너지 흡수층은 레이저식각을 한 후에 아세톤을 이

그림 8. 에너지 흡수층인 carbon paste를 증착한 후 laser patterning한 sample의 확대된 SEM 평면 (×500) (레이저 진동수: 40 kHz, 기판 이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 16 W)

Fig. 8. Enlarged SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing carbon paste as an energy-absorbing layer. The sample was 90 degree rotated. (×500) (laser frequency: 40 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 16 W)

그림 9. 에너지 흡수층 없이 laser patterning한 sample의 SEM 평면(×100) (레이저 진동수: 20 kHz, 기판이동속도 : 0.1 mm/s, 평균 출력: 18 W)

Fig. 9 SEM plain view of the sample which was laser-patterned without the energy-absorbing layer (×100) (laser frequency: 20 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 18 W)

용해서 제거되었다.

#### 4. 결론

진공증착된 자성금속막은 레이저의 반사율이 커서 레이저를 이용해서 patterning하는 것이 매우 어렵다. 그래서 본 연구에서는 이러한 문제의 대안으로 빛의 흡수율이 좋은 에너지 흡수층을 금속박막의 표면에 도포하고 이 에너지 흡수층 위에 레이저를 조사해서 금속박막을 식각하는 실험을 최초로 실시하였다

본 실험에서는 에너지 흡수층에 이용된 분말의 특성에 따라서 형성된 패턴의 폭과 모서리부분의 균일도가 매우 다르다는 것이 관찰되었다. 특히 에너지 흡수층에 형성된 패턴의 폭에 있어서는 탄소분말을 포함한 에너지 흡수층을 이용했을 경우에 BaTiO<sub>3</sub> 분말의 에너지 흡수층에 비해서 약 3배 정도 크게 형성되었으며 이것은 탄소분말이 에너지 흡수율이 클 뿐만 아니라 열전도율도 크기 때문인 것으로 생각한다. 은분말의 에너지 흡수층을 이용했을 경우는 레이저의 반사율이 크기 때문에 에너지 흡수층에 형성된 패턴의 모서리가 매우 거칠게 형성되었다. 따라서 에너지 흡수나 패턴의 균일도 측면에서 보면 탄소분말로 구성된 에너지 흡수층이 가장 z효율적인 것으로 관찰되었다. 이러한 에너지 흡수층을 이용하지 않은 경우에는 거의 패턴형성이 일어나지 않았지만, 에너지 흡수층을 이용했을 경우에는 에너지 흡수층에 의해서 레이저 에너지가 효과적으로 금속막에 흡수되거나 전달되어서 한정된 부분에서만 금속막이 제거되었음이 관찰되었으며 에너지 흡수층의 효과가 형성된 패턴에서 확연한 차이가 있음이 확인되었다.

#### 참고문헌

그림 10. 에너지 흡수층인 carbon paste를 증착한 후 laser patterning한 sample의 SEM 평면, 여기서 에너지 흡수층은 patternig한 후 제거 (×100)  
(레이저 진동수: 20 kHz, 기판이동속도: 0.1 mm/s, 평균출력: 18 W)

Fig. 10. SEM plain view of the sample which was laser-patterned after depositing carbon paste as an energy-absorbing layer (×100), where the energy-absorbing layer was removed after patterning. (laser frequency: 20 kHz, substrate moving speed: 0.1 mm/s, average power: 18 W)

- [1] J. F. Ready, Industrial Application of Lasers, Academic Press, p409 (1997)
- [2] American Institute of Physics, Handbook, p.6-112, McGraw-Hill Book Co., New York (1967)
- [3] H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, and W. Viol, J. Appl. Phys., 70, 75 (1991)
- [4] V. Oliveira and R. Vilar, J. Mater. Res.,12, 3206 (1997)
- [5] Y. Arata and I. Miyamoto, Laser Focus, 3, (1977)
- [6] X. Liu, D. Du, and G. Mourou, IEEE. J. of Quantum Electronics, QE-33, 1706 (1997)