

펨토초 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼 표면 미세가공 특성

김재구[#], 장원석^{*}, 조성학^{*}, 황경현^{*}, 나석주^{**}

Micromachining of the Si Wafer Surface Using Femtosecond Laser Pulses

Jae Gu Kim[#], Won Seok Chang^{*}, Sung Hak Cho^{*}, Kyung Hyun Whang^{*}, Suck Joo Na^{**}

ABSTRACT

An experimental study of the femtosecond laser machining of Si materials was carried out. Direct laser machining of the materials for the feature size of a few micron scale has the advantage of low cost and simple process comparing to the semiconductor process, E-beam lithography, ECM and other machining process. Further, the femtosecond laser is the better tool to machine the micro parts due to its characteristics of minimizing the heat affected zone(HAZ). As a result of line cutting of Si, the optimal condition had the region of the effective energy of 2mJ/mm-2.5mJ/mm with the power of 0.5mW-1.5mW. The polarization effects of the incident beam existed in the machining qualities, therefore the sample motion should be perpendicular to the projection of the electric vector. We also observed the periodic ripple patterns which come out in condition of the pulse overlap with the threshold energy. Finally, we could machined the groove with the linewidth of below 2 μ m for the application of MEMS device repairing, scribing and arbitrary patterning.

Key Words : Laser micromachining(레이저 미세가공), Femtosecond laser(펨토초 레이저), Silicon wafer(실리콘 웨이퍼), Periodic ripple(주기적 줄무늬)

1. 서론

최근 정밀기계, 자동차, 항공우주 분야 및 반도체, 통신 분야 기술발전은 기계요소 및 반도체 설계, 가공에 있어서 초정밀화를 요구하고 있으며 이러한 첨단 정밀가공기술의 확보를 위한 연구가 여러 각도에서 진행되고 있다¹. 이러한 기술은 요구되는 부품의 크기, 형상 및 기능에 따라 매우 다양한 방법에 의해 접근되고 있지만, 크기 및 정밀도

가 작아질수록 고가의 장비 사용 및 공정의 복잡성에 의해 구현에 다소 어려움이 있다.

예를 들면, 반도체 공정을 이용하는 정밀가공 기술(MEMS : Micro Electro-Mechanical Systems)은 여러 가지 응용에서 매우 다양하게 사용되고 있지만 다단계의 마스크 공정을 필요로 하는데 현재 대부분의 경우에 상용되고 있는 광 리소그래피 기술은 제품의 양산화에 유리하며 미세가공에 적합함에도 불구하고 별도의 청정실과 레이저, X선 등

¹ 접수일: 2005년 6월 14일; 게재승인일: 2005년 10월 7일

[#] 교신저자: 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

E-mail gugu99@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7141

^{*} 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

^{**} 한국과학기술원 기계공학과

의 광원, 그리고 정렬(Alignment)등을 위한 고가설비를 필요로 하여 다품종 소량생산에는 불리하다는 단점이 있다.

특히 실리콘 기반의 제작 기술에 있어 패턴 설계 또는 공정설계에 문제가 있었을 경우 최종 소자의 수정에 어려움을 겪는다.

본 논문에서는 펨토초 레이저를 이용하여 실리콘표면에 수 마이크로 선폭으로 직접 가공을 수행하여 표면 가공 특성을 알아보았다. 펨토초 레이저는 수 ~ 수백 fs의 극히 짧은 펄스폭을 가지므로 잘 알려진 대로 가공부에 조사된 에너지는 매질 내에서 주변으로의 열전달이 발생하기 전에 가공을 끝내게 되어 열적인 손상이 극히 적은 정밀가공을 구현할 수 있다². 아울러 펨토초 레이저의 높은 침투출력은 유전체 매질 내에서 다광자 흡수(Multiphoton Absorption)를 일으켜^{3,4} 이론적으로는 파장에 관계없이 모든 재료를 가공 또는 고분자경화⁵를 할 수 있어 응용분야가 넓어지고 있다.

레이저를 이용한 실리콘 직접 가공은 앞서 기술한 MEMS 소자의 수정에 응용할 수 있고, 반도체 칩이 작아짐에 따른 미세 마킹에도 적용 가능하다. 또한 기계적 다이싱에서 나타나는 공구와 실리콘의 직접 접촉에 의한 칩핑 또는 공구마모 등의 문제점을 보완할 수 있고 패턴 형성 역시 자유로이 구현할 수 있어 많은 장점을 가지고 있다.

2. 펨토초 레이저 펄스와 실리콘 재료반응

일반적으로 레이저에 의해 재료를 제거하는 경우 재료는 고체에서 액체로, 액체에서 기체로 변화하는 상변화에 의해 가공된다. 하지만 레이저 강도가 충분히 큰 경우 고체에서 직접 기체로 변하며 어블레이션 된다. 펨토초에 대해 밴드갭을 가진 재료 가공 메커니즘은 가전자대(Valence Band)에서 전도대(Conduction Band)로의 전자 이동이 다광자흡수에 의한 광 이온화(Photoionization)에 의해 일어나고, 충격 이온화(Impact Ionization)에 의해 전도대 전자의 이온화가 활발해져 재료변형 또는 미세가공이 일어난다.

반도체인 실리콘의 경우 다광자 흡수가 아닌 경우, 순수 실리콘 결정의 경우의 에너지 밴드갭 이상온에서 1.107eV 정도이므로 전자 여기에 필요한 파장은 1.116 μm 이 되어 Nd:YAG(λ :1,064 μm)를 사용하면 싱글포톤에 의한 여기가 이루어지지만, 이

이상의 파장에서는 열적인 반응이 주로 되며 열적으로 활성화 된 전자는 전자-포논 스캐터링에 의해 주변 래티스로 빠르게 전달이 되면서 가공에 영향을 주게 된다.

펄스당 어블레이션 깊이(d)는 광학적 침투 깊이(δ)를 나타내는 $\delta = 1/\alpha$ 와 열적 침투 깊이(l)를 나타내는 $l = (D\tau_a)^{1/2}$ 에 따라 다르고 이는 재료에 입사되는 에너지에 의존하며 결과적으로 다음과 같이 주어진다.

$$d \approx \delta \ln \left(\frac{F}{F_{th}^\delta} \right) \quad (\delta \gg l) \quad (1)$$

$$d \approx l \ln \left(\frac{F}{F_{th}^l} \right) \quad (\delta \ll l) \quad (2)$$

여기서 α 는 흡수계수, D 는 열확산 계수, τ_a 는 열침투 시간, F_{th}^δ 은 광학적 어블레이션 임계에너지 밀도, F_{th}^l 는 열적 어블레이션 임계에너지 밀도이다.

하지만 매우 강한 침투출력을 가진 레이저 빔의 경우 흡수계수가 비선형성을 가지므로, 정확한 값들은 알고 실제 산업에 적용하기 위해서는 실험적으로 접근하는 것이 매우 실용적이다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험을 위한 펨토초 레이저 소스는 800nm의 파장을 가진 Ti:sapphire 증폭 시스템을 사용하였으며, 펄스폭은 220fs 이내이고 100 kHz의 반복율로 사용 되었을 때 최종 출력은 460mW이다. 대물렌즈를 통한 빔의 출력이 최대가 되면서 시편에 직각으로 조사될 수 있도록 빔을 정렬하였고, 가공용 렌즈는 NIR 용 대물렌즈를 사용하였으며 10배(NA 0.8)와 20 배(NA 0.4)를 사용하였다. 레이저 출력단에 ND 필터를 설치하여 레이저 파워를 조절하였고, 4/f 과장관으로 원편광을 만들었다. 시편은 Boron 도핑된 실리콘으로 XYZ 스테이지 위에 진공척 장치를 이용하여 고정 시켰으며, 0.1 μm 분해능을 갖는 스테이지 운동으로 미세 패턴을 가공 할 수 있도록 하였다. 이러한 가공은 CCD를 통하여 모두 관찰할 수 있도록 시스템을 구성하였다. Fig. 1은 실험 장치 레이아웃이며 Table 1은 가공시편 물성치이다.

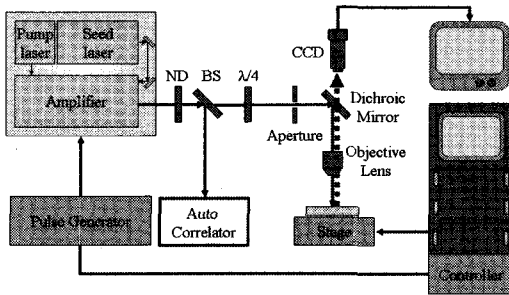


Fig. 1 System layout of the Si micromachining using femtosecond laser

Table 1 Properties of wafer sample

Type / Orientation	p-type / <100>
Dopant	BORON
Resistivity	1 ~ 10Ω cm
Thickness	500 ~ 550 μm
Optical property(@1.6eV)	n=3.714 k=8x10 ⁻³

n: Index of refraction, k: Extinction coefficient

실험 방법으로는 다양한 가공 조건을 도출하기 위해 가공 품질에 영향을 끼치는 주요변수들을 정의하였다. 패턴 가공의 기본인 점 및 직선을 기본으로 가공하였고, 보호가스나 진공상태가 아닌 환경에서 적절한 품질과 생산성을 얻을 수 있는 가공조건을 찾으려 하였다. 주요 가공 변수로는 레이저 출력, 가공 속도로 한정 시켰으며 초점변화에 따른 가공 조건을 배제하기 위해 영상관찰시스템의 CCD 초점과 대물렌즈 가공 초점을 일치 시켜 CCD 초점을 맞춤으로 가공 초점을 항상 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 가공시 발생하는 입자는 가공 후 초음파 크리닝을 함으로서 거의 제거가 이루어졌고, 각각의 가공 변수 변화에 따른 시편의 표면 가공현상 변화를 관찰하여 가공 특성을 살펴 보았다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 실험을 수행함에 있어서 가장 중점을 둔 것은 가공 품질이 우수한 가공 조건을 찾기 위한 것으로 점 및 직선 가공실험을 통하여 특성을 광학현미경 및 전자주사현미경으로 관찰 후 분석하였다.

먼저, 시편 고정 후 에너지와 펄스 수를 조절하여 20 배 렌즈를 이용하여 가공한 결과 일반적으로 알 수 있는 것처럼 어블레이션 직경과 주변 영향부가 에너지가 커질수록 또한 펄스수가 증가할수록 커짐을 알 수 있었다. 한 예로 867nJ의 에너지에서 단일 펄스와 1000 펄스의 가공의 비교한 것이 Fig. 2에 있다. 단일 펄스에 의한 가공은 에너지가 실리콘 표면에 입사되고 열적인 상변화를 거치면서 어블레이션 되고 일부 용융물은 반충압력에 의해 주변으로 밀려들어간 현상을 보여준다. 하지만 펄스수가 누적될수록 레이저 빔 조사 주위의 열적 영향은 점점 커지며 미세입자, 용융물 재부착 등의 현상을 관찰 할 수 있다. 1000 펄스 조사에 의한 주변으로의 열영향 크기를 출력에 따라 살펴보면 Fig. 3과 같다. 크기는 광학식 현미경의 의해 관찰 되었으며 SEM에 의해 관찰하는 것과는 정량적으로 다를 수 있지만 오차범위는 그리 크리 않을 것이다.

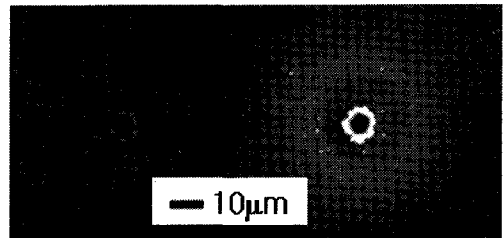


Fig. 2 Comparison of the ablation and heat affected zone(HAZ) size with the pulse energy 867nJ and one pulse(a) and 1000 pulses(b)

Fig. 3에서 보면 초기 에너지가 커질수록 어블레이션 직경이 커지다가 400nJ 근방에서부터 거의 증가하지 않지만 열영향부 크기는 계속적으로 증가함을 볼 수 있다. 이는 에너지가 커지면서 어블레이션에 필요한 에너지를 갖는 빔의 크기가 커지면서 나타나지만, 어블레이션 크기는 에너지가 계속 증가한다 하더라도 많은 에너지가 중심에 있는 가우시안 형상을 가지므로 중첩에 의한 효과는

그리 크지 않다. 하지만 열 영향부 크기는 선행된 펄스에 의해 주변으로의 열전도가 일어나고 계속된 펄스에 의해 열의 중첩이 증가되어 그 크기가 커지지만 중첩된 열이 어블레이션에는 기여하지 못하는 것으로 보인다.

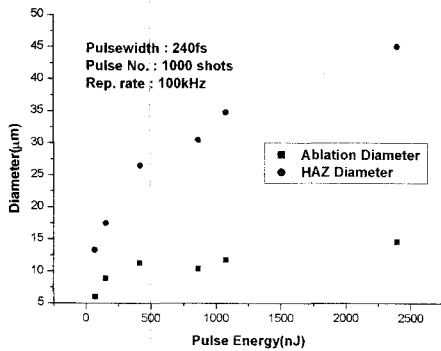


Fig. 3 Ablation and HAZ diameter with the function of pulse energy

한편, 직선가공시 가장 두드러진 특징은 레이저 출력과 속도의 관계에서 주어지는 유효 에너지의 값에 따라 어블레이션 되지 않고 부풀어 오르며 표면에 융착 되는 부풀음 현상이며, 출력에 따라 부풀음 현상이 나타나는 유효 에너지 값이 다소 변함을 관찰 하였다. Fig. 4 는 출력과 속도에 따라 부풀음 현상이 나타나기 시작한 유효 에너지 값에서의 SEM 사진이며, 주어진 출력에서 보다 높은 속도 즉 유효 에너지가 상대적으로 작은 경우에는 발생하지 않았다. SEM 사진에서 볼 수 있듯이 출력이 작으면 낮은 속도에서 부풀음 현상이 나타나고 출력이 높으면 상대적으로 높은 속도에서 현상이 나타나기 시작하지만 그 유효 에너지는 다름을 보였다. 출력이 높은 경우((c) 조건이상) 부풀음 현상이 나타나기 시작한 유효 에너지보다 적은 값을 갖도록 속도를 변경하여 가공한다 하더라도 부풀음 현상을 완전히 제거 하지는 못하고 부풀음과 어블레이션이 혼합되는 현상을 보였다.

다른 조건에 의한 현상과의 상대적인 비교를 통해 부풀음 현상이 최소화 되면서 수 마이크로미터 선폭의 가공에 적절한 영역을 찾으면 다음 Fig. 5 와 같다. 단위길이당 에너지가 과도하게 입사되면 그 에너지가 완전한 어블레이션에 기여하지 못하고 에너지를 축적하고 부풀음 현상을 야기하는

것으로 보여지므로, 부풀음 현상이 최소화되는 가공을 위해서는 적절한 출력 및 유효 에너지 값이 필요함을 알 수 있다. 즉 1.5mW 이하의 낮은 파워에서 유효 에너지 2.5mJ/mm 이하의 속도 조건에서 가공하면 부풀음 현상 없는 양호한 가공을 할 수 있으며, 그 영역에서 가공된 몇 가지 예를 Fig. 6 에 보였다.

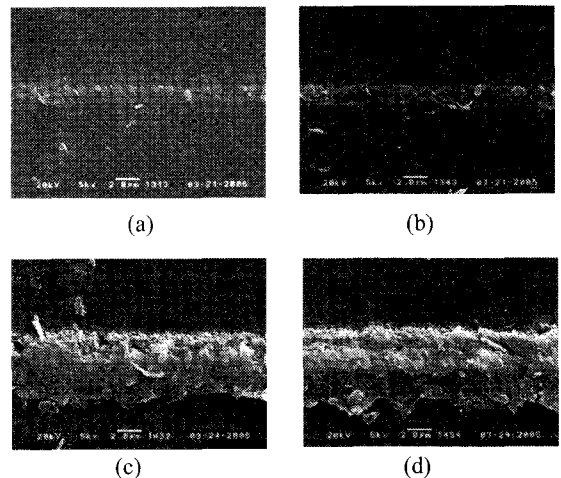


Fig. 4 SEM image of the hump on the Si surface, which begins to appear with the following conditions (a) 0.10mW, 0.05mm/s (2.0mJ/mm) (b) 0.19mW, 0.03mm/s (6.3mJ/mm) (c) 1.4mW, 0.1mm/s (14mJ/mm) and (d) 4.3mW, 0.2mm/s (21mJ/mm)

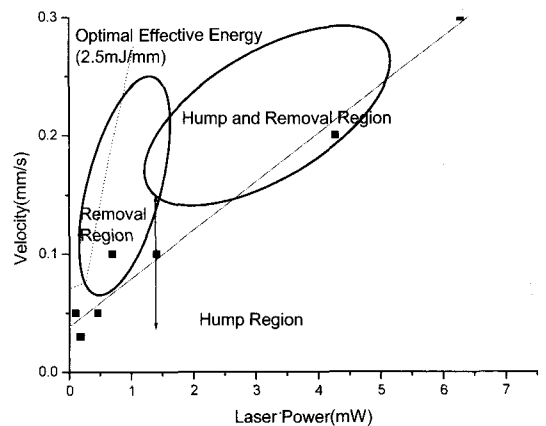


Fig. 5 Classification of the machining region and the onset condition of the hump (solid line)

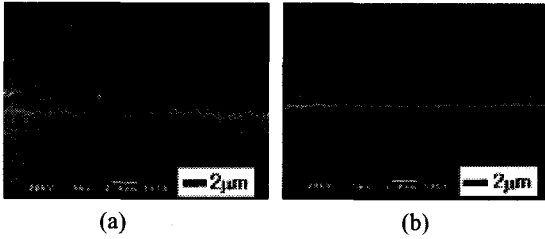


Fig. 6 SEM image of line machining without the hump on the Si surface (a) 0.19mW, 0.1mm/s (1.9mJ/mm) (b) 2.92mW, 0.3mm/s (2.3mJ/mm)

또 다른 가공 특징은 편광에 따른 가공현상이 다. 일반적으로 직선 가공시 고려되어야 할 사항은 재료의 결정 방향과 빔의 편광상태이지만 재료의 결정방향 보다는 편광 상태가 가공 품질에 중요하게 작용한다. 그 이유로는 s-pol. 과 p-pol. 에 의한 반사도 차이와 편광방향에 수직으로 나타나는 리플에 기인한다. 반사도 차이의 경우는 재료가 가공되면서 테이퍼가 형성되는데 이 때 뒤따르는 빔의 편광이 테이퍼 면에 평행인 즉 s-pol. 인 경우 반사도가 커 재료가공에 사용되는 빔의 효율이 떨어진다고 볼 수 있다. 반사도는 잘 알려진 프레넬 공식으로 다음과 같이 표현되고 그림으로 나타내면 다음 Fig. 7 과 같다⁶.

$$r_s = \frac{E_{r,s}}{E_{0,s}} = \frac{\left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} - \cos \phi - \cos \phi\right)^2}{n^2 - 1} \quad (3)$$

$$r_p = \frac{E_{r,p}}{E_{0,p}} = \frac{n^2 \cos \phi - \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{n^2 \cos \phi + \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}} \quad (4)$$

여기서, r_s , r_p 는 각각 재료에 입사되는 에너지 $E_{0,s}$ 및 $E_{0,p}$ 에 대해 반사되는 $E_{r,s}$ 에너지 및 $E_{r,p}$ 의 반사계수이며, ϕ 는 입사각, n 은 굴절율이다. 반사율 R_s 및 R_p 은 다음과 같이 정해진다.

$$R_s = |r_s|^2, \quad R_p = |r_p|^2 \quad (5)$$

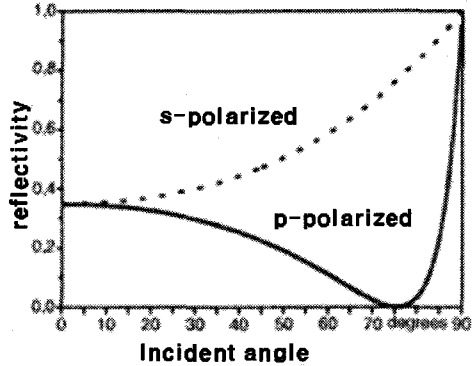


Fig. 7 Reflectivity for crystalline silicon⁶

편광의 영향을 받는 또 하나의 현상은 리플 패턴인데 이는 편광에 수직인 방향으로 규칙적인 공간적 주기 무늬를 형성하는 것이다. 이 현상은 가공하고자 하는 재료의 임계값 근처의 에너지에서 다중 펄스 조사에 의해 나타나며, 금속, 반도체 및 유전체 거의 모두에서 일어난다⁷. 원인은 입사파와 반사파의 간섭에 의한 것 또는 광학적으로 표면전자기파를 이루어 형성되는 것으로 알려져 있으며 간격(Λ)은 파장(λ) 및 입사각(ϕ)에 의존하며 편광에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{1 \pm \sin \phi} \quad (\text{p-pol.}) \quad (6)$$

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{\cos \phi} \quad (\text{s-pol.}) \quad (7)$$

본 실험에서는 $4/\lambda$ 파장판을 이용하여 원편광을 만들었으나 Fig. 8(a)에서와 같이 리플이 형성된 것을 보면 원편광된 빔이 대물렌즈에 입사하기 전 미러를 지나면서 미러의 편광에 따른 반사도 차이에 의해 s 편광 성분이 큰 타원편광이 되고, 이로 인해 리플이 형성되는 것으로 유추된다. Fig. 8(b)는 대물렌즈로 빔이 전송되는 구간 사이 미러를 제거하고 편광판을 통과한 빔이 직접 렌즈에 입사하도록 한 후 나타난 사진으로, 선편광에서처럼 주기적 리플이 형성되지 않고, 각 성분이 혼합되어진 모습을 보여준다. Fig. 9 는 선편광으로 평균출력 5.6mW, 시편 이송속도 25mm/s 의 조건으로 x20 배 렌즈(NA 0.4)를 이용하여 가공된 시편으로 편광방

향에 수직으로 약 400nm 정도 간격을 가진 리플이 형성되는 것을 알 수 있었다.

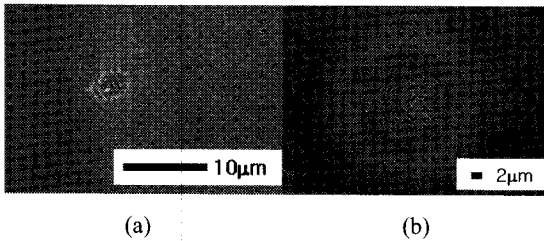


Fig. 8 SEM image of the ripple pattern by circular polarized beam passing through several mirrors(a) and no mirror(b) on the way to the objective lens

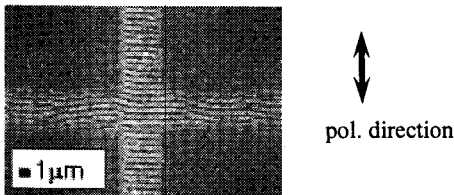


Fig. 9 Ripple pattern aligned perpendicular to the electric vector

5. 결론

Wafer 표면 가공에 대한 최적 조건을 찾고자 출력과 가공 속도를 변화 시켜 가공 품질에 대한 영향을 고찰한 결과 유효 에너지의 크기에 따라 부풀음 현상이 발생하였고, 그 값은 출력이 낮을수록 적은 값을 가졌다. 부풀음 현상 없이 직접가공에 적절한 가공영역은 2mJ/mm-2.5mJ/mm 영역이며, 같은 유효 에너지에서도 0.5mW-1.5mW 의 출력이 양호한 결과를 가져왔다. 선폭은 출력에 따라 다르지만 전체적으로 2 µm이하의 선폭을 얻을 수 있었다. 또한 편광의 영향이 가공에도 영향을 미쳐 편광방향과 수직인 방향으로 가공시편 또는 빔을 이송시키는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

향후 가공 깊이 및 형상에 대한 측정과 고찰, 리플에 관한 연구가 더 필요하지만, 본 연구 결과는 다른 부가 장치 없이 고배율의 대물렌즈만을 이용하여 실리콘 웨이퍼 표면에 약 1~2 µm 정도의 선폭 가공이 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Madow, M. J., "Fundamentals of microfabrication," 2nd ed. CRC Press, 2001.
2. Rethfeld, B., Sokolowski-Tinten, K., Von der linde, D., Anisimov, S. I., "Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation," Appl. Phys. A 79, pp. 767-769, 2004.
3. Rosenfeld, A., Lorenz, M., Stoian, R., Ashkenasi, D., "Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation," Appl. Phys. A 69, pp. 373-376, 1999.
4. Schaffer, C. B., "Interaction of femtosecond laser pulse with transparent materials," Ph.D. thesis, Harvard University, 2001.
5. Park, S. H., Lim, T. W., Yang, D. Y., Kong, H. J., "Directly Nano-precision Feature Patterning on Thin Metal Layer using Top-down Building Approach in nRP Process," J. of KSPE, Vol. 21, No. 6, pp. 153-159, 2004.
6. Barsch, N., Korber, K., Ostendorf, A., Tonshoff, K. H., "Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses," Appl. Phys. A 77, pp. 237-242, 2003.
7. Bauerle, D., "Laser processing and chemistry," 3rd ed. Springer, pp. 574-586, 2000.