

◆ 특집 ◆ 첨단레이저 응용 미세가공기술

극초단 펄스 레이저 응용 미세가공기술

Ultrafast Laser Micro-machining Technology

이제훈^{1,✉}, 손현기¹
Jae Hoon Lee^{1,✉} and Hyonkee Sohn¹

¹ 한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부 (Korea Institute of Machinery & Materials)
✉ Corresponding author: Jaholee@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7471

Manuscript received: 2009.10.28 / Revised: 2009.11.20 / Accepted: 2009.12.15

Due to the extremely short interaction time ($< 10 \times 10^{-12}$ sec) between laser pulse and material, which enables the minimization of heat affection, ultrafast laser micro-machining has rapidly widened its applications. In this paper, the characteristics of ultrafast laser micro-machining have been reviewed and experimentally demonstrated in laser drilling of silicon wafer and in laser cutting of rigid PCB.

Key Words: Ultrafast Lasers (극초단 펄스 레이저), Laser Micro-drilling (레이저 미세 드릴링), Laser Micro-cutting (레이저 미세 절단)

1. 서론

전세계 반도체, 디스플레이, 휴대폰 등 첨단 전자산업분야 전반에 걸쳐 제품의 고정세화/고집적화/대면적화 경향이 뚜렷해짐에 따라 기존의 기계적·화학적 미세가공기술로는 대응 어렵거나, 비효율적인 상황에 도달했다(Fig.1 참조).

현재 에칭공정 위주의 가공기술을 대체하기 위한 미세가공기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 레이저 미세가공기술은 친환경·청정 가공기술로 가장 유력한 대체기술의 하나로 인식되고 있다. 레이저 미세가공기술은 세계적으로 약 10 여 개국에서만 상용화 기술을 보유하고 있는 첨단 미세가공기술로써 레이저 빔이 가지고 있는 우수한 재료가공 특성으로 인해 기존의 미세가공기술을 기술적·경제적 측면에서 효율적으로 대체하여, 그 응용분야가 급속하게 확대되고 있다. 최근 고출력 나노초(ns; nanosecond) UV 레이저, 극초

단(ultrafast) 펄스 레이저 등의 첨단레이저가 양산에 적용할 수준으로 개발되어 수 마이크로급-서브마이크로급의 미세가공이 가능하게 되었다.

첨단레이저 미세가공기술이 주로 적용되는 치수영역은 기존 노광공정(lithography) 기반의 반도체

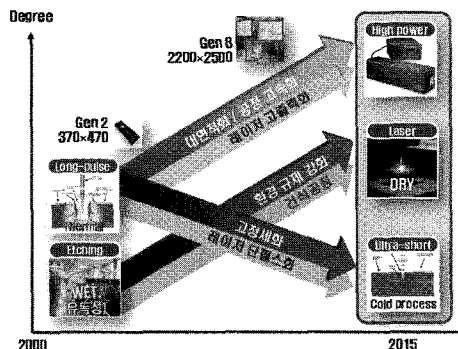


Fig. 1 Recent trend forecast in micro-machining in the electronics industry

체 공정기술과 나노메카트로닉스(nano mechatronics) 기술을 적용하기에는 공정비용과 장비 의존도가 지나치게 높은 문제점이 있으며, 적외선(infrared) ns 레이저 기반의 기존 레이저 가공기술을 적용하기에는 가공 분해능(resolution)과 치수정밀도가 낮아 어려운 상황이다(Fig. 2 참조).

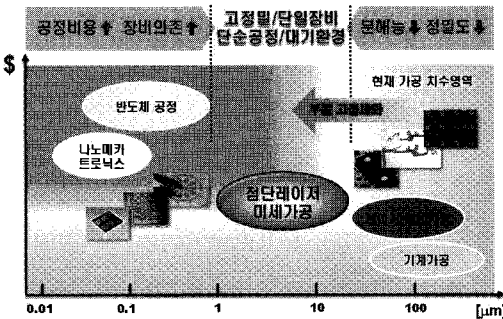


Fig. 2 Target dimension range of advanced laser micro-machining technology

본 논문에서는 극초단 펄스 레이저의 특징을 살펴보고, 반도체 산업과 전자 산업분야에서 각각 널리 활용되는 실리콘 웨이퍼 드릴링과 경성 인쇄 회로기판(rigid PCB) 미세 절단 공정에서 나타나는 극초단 펄스 레이저의 특징을 간략하게 보고한다.

2. 극초단 펄스 레이저

레이저 빔이 재료 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자(lattice)로 전달되어 재료에 열이 발생하게 된다. 이 현상을 열확산(thermal relaxation)이라고 한다. 극초단 펄스 레이저는 그 펄스 폭(pulse duration)이 재료의 열확산 시간보다 짧기 때문에 레이저 빔이 조사되는 부분만 제거되어 초정밀 가공이 가능하게 된다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 현재까지 개발된 극초단 펄스 레이저는 Nd:YVO₄ 를 매질로 사용하는 피코초(ps; picoseconds) 레이저와 Ti:Sapphire 를 매질로 사용하는 펨토초(fs; femtosecond) 레이저 등이 있다. ps 는 시간의 단위로서 1 조분의 1 초(10⁻¹²)이며, fs 는 1000 조분의 1 초(10⁻¹⁵)에 해당한다. 이것은 극도로 짧은 시간으로, 예를 들면, 100 fs 는 빛이 머리카락 두께의 반도 진행하지 못하는 시간이다. 또한, fs 레이저는 극도의 높은 출력을 가지는데 순간적으로 펄스 당 수백 GW 까지의 첨두출력(peak power)을 방출한다. 한국전력의 2003 년도

통계에 의하면 우리나라의 모든 발전소가 동시에 생산할 수 있는 최대전력이 47 GW 라는 사실과 비교해 보면 fs 레이저의 펄스가 경이로운 첨두출력 값을 가진다는 것을 알 수 있다.¹

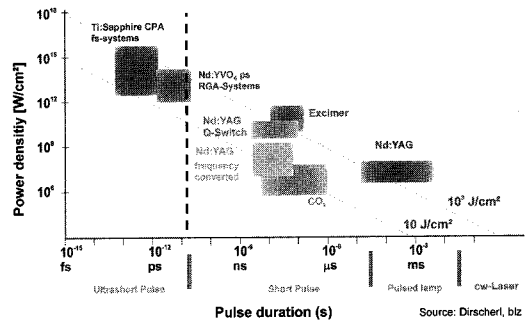


Fig. 3 Classification of lasers according to pulse duration and power density

기존 펄스 레이저의 여기(pumping)방식은 램프 여기방식, Q-스위칭(switching)방식이 있다. 이에 반해 ps 와 fs 레이저는 모드잠금방식(mode-locking)을 사용하고 있다.² 모드잠금방식은 공진기 내부에서 발생하는 수많은 무질서한 종축방향 모드들을 규칙적으로 재배열하여 서로 보강 및 상쇄간섭과정을 거쳐 펄스 폭이 짧고, 첨두출력이 큰 펄스를 생산하는 방식이다. 1990 년대 초 Kerr 렌즈 모드잠금방식이 개발되면서 Ti:Sapphire 를 매질로 사용하는 고체 펨토초 레이저 기술이 등장하였고,² 반도체 포화 흡수거울(SESAM; semiconductor saturable absorber mirror)을 이용한 새로운 모드잠금방식이 개발되면서 극초단 펄스 레이저의 출력 및 안정성이 크게 향상되었다. 또한, 극초단 레이저 펄스를 손실없이 효율적으로 증폭시키는 CPA(chirped-pulse amplification) 기술의 개발은 Ti:Sapphire 기반 fs 레이저가 측정이 아닌 미세가공공정에 적용되는데 주요한 역할을 하였다.³ 최근에는 Cr 및 Yb 매질을 이용한 다이오드 여기(diode-pumping) 방식을 채택한 간결하고 효율적인 fs 레이저가 개발되었다.

Ti:Sapphire 기반 fs 레이저는 구성 광학계의 특성상 평균출력(average power)이 기존의 레이저에 비해 낮은 편이다. 즉 첨두출력은 수백 GW 이지만 평균출력은 일반적으로 수 W 급의 값을 가진다. 평균출력이란 첨두출력에 초당 펄스 수(Hz)와 펄스 폭(s)을 곱한 값으로서, 이는 재료의 가공량을 나타내는 지표가 되므로 금속, 세라믹과 같이 결합력이 강한 재질을 가공할 때 중요한 변수로 작

용한다.

이러한 fs 레이저의 단점을 보완하기 위하여 Nd:YVO₄ 를 매질로 사용하는 ps 레이저가 개발되어 상용화되었다. 이는 fs 레이저에 비하여 고출력 특성을 나타낼 뿐만 아니라 내부 구성 광학계가 fs 레이저에 비하여 간략하며, 비선형 매질(SHG, THG, 및 FHG)을 이용하여 고조파를 발생시키므로 자외선도 비교적 쉽게 발진(irradiation)할 수 있다. ps 레이저의 경우 최근 UV(355nm) 파장 영역에서 평균 출력 15W 의 레이저 빔 발진이 가능하며, 금속가공에서 열반응을 최소화하는 범위 내에서 fs 레이저에 비해 가공속도가 뛰어난 장점이 있다.

3. 재료 반응 메커니즘

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저 빔과 재료 간의 상호반응 시 발생하는 열이 주위로 전파(확산)되는 시간보다 레이저 빔의 펄스 폭이 짧아서 가공 시 열확산이 발생하지 않는다는 것이다.

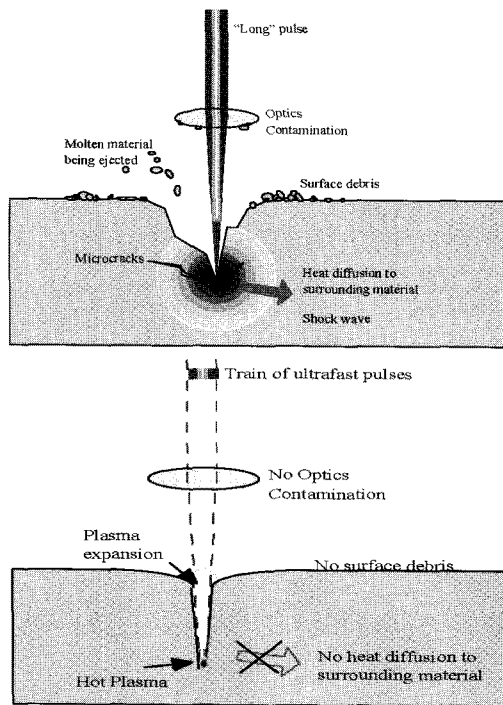


Fig. 4 The comparison between long pulse laser and ultrashort pulse laser

열확산은 재료의 취성이 높은 경우 가공부 및

그 주위에 미세크랙(micro-crack)을 유발하므로 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료 가공에도 유리하다고 할 수 있다. 극초단 펄스 레이저는 열확산을 방지하는 효과 외에 가공물의 주변에 용융물(melt) 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있다(Fig. 4 참조).

금속재료 가공의 경우 극초단 펄스 레이저 빔의 에너지가 준자유전자(quasi-free electron), 원자, 분자 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10ps 가량의 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다.⁴ 다시 말하면, 레이저 빔이 조사되고 난 후 재료내부에 열이 발생하는데 까지 걸리는 시간이 약 10×10^{-12} sec 라는 의미이다. 전자온도와 격자온도를 이용하여 레이저 펄스의 열전달을 설명하는 Two-temperature 모델을 이용하여, 1 ps 레이저 펄스와 1 ns 레이저 펄스가 알루미늄(Al)에 조사되었을 때 열전달을 수치적으로 해석한 것을 Fig. 5 에 나타내었다. 1 ps 레이저 펄스와 1 ns 레이저 펄스의 에너지 밀도는 각각 10mJ/cm², 100mJ/cm² 로써 알루미늄의 표면에서 발생하는 어블레이션(ablation)은 무시할 수 있다. 1 ps 레이저 펄스의 경우에는 레이저 펄스가 재료 표면에 조사되는 동안 전자의 온도가 격자의 온도에 비해 급격히 상승하게 된다.

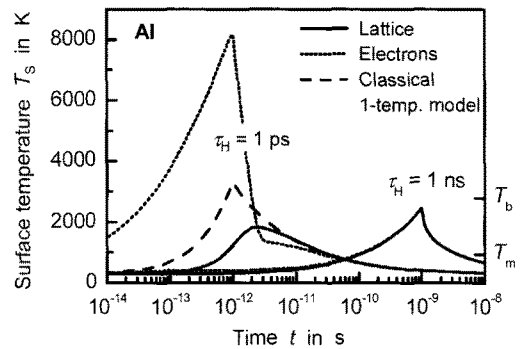


Fig. 5 Temporal evolution of the surface temperature of aluminum when absorbing a laser pulse of 1 ps or 1 ns duration (τ_H : pulse duration, ps: picoseconds, ns: nanosecond, T_b : boiling temperature, T_m : melting temperature)

격자는 펄스가 조사된 후 수백 fs-수 ps 후에 온도가 상승하기 시작한다. 레이저 빔이 조사된 지 약 100ps 후에 전자와 격자의 온도가 평형을 이루게 된다. 기존의 One-temperature 모델을 이용하여 계산한 결과도 함께 표시하였다. 이 경우에

전자와 격자 간의 열평형 이전에는 격자의 온도를 높게 계산하는 것을 볼 수 있다. ns 레이저 펄스의 경우에는 One-temperature 모델을 이용하여 계산한 모든 곡선들이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 금속의 정밀가공을 위해서는 레이저 빔의 펄스 폭이 레이저 에너지가 전자에서 격자로 전이되는 시간보다 짧아야 한다. 그러나, 레이저 빔의 펄스 폭을 더욱 짧게 하는 것은 레이저 빔과 재료의 반응 메커니즘 상 가공정밀도 향상을 저해하는 경우가 발생할 수 있다. 펄스 폭을 더욱 줄이게 되면 레이저 빔의 초점 영역에서 극초단파 펄스와 주변 가스와의 상호작용에 의해서 비선형 효과(nonlinear effects)가 나타나게 된다. 즉, 레이저 빔의 선단(wave front)의 붕괴, 가공형상 왜곡, 레이저 빔의 발산 증가 등의 현상이 나타나게 되는데 이것은 fs 레이저 펄스의 경우에 더욱 심각하게 나타난다. Fig. 6 에 펄스 폭에 따른 가공정밀도의 양상을 개략적으로 나타내었다.

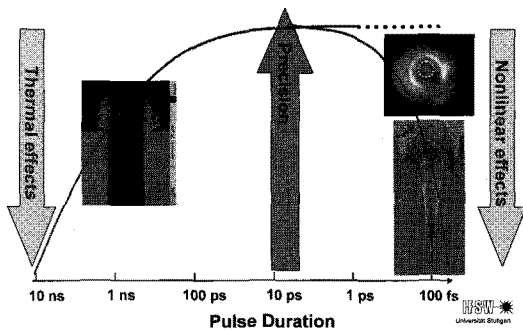


Fig. 6 Nozzle of an injection mold machined with picosecond laser

극초단 펄스 레이저는 서브 마이크론급 초정밀 가공이 가능하다는 특징이 있다. 레이저 미세가공 공정에서 레이저 빔의 스폿 직경(spot diameter)은 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 변수들 중 하나이다. 실제 가공에서 레이저 빔이 광학계를 이용하여 재료 표면까지 이송되기 때문에 레이저 빔의 직경은 광학적인 한계에 의해 제한된다. 즉, 파장이 $0.8\mu\text{m}$ 이라면 레이저 빔을 이용하여 재료를 가공하는 경우에 스폿의 최소 직경을 파장 이하로 만들기 어렵다. 또한 레이저 빔에 의한 열영향부를 고려하면 기존의 레이저를 이용하는 경우에는 서브 마이크론급 초정밀가공은 어렵다고 할 수 있다. 그러나 극초단 펄스 레이저의 경우에는 임계치 가

공(threshold process) 특성을 이용하면 이것이 가능하다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이, 가우시안(Gaussian) 에너지 분포를 갖는 레이저 빔의 에너지 밀도는 레이저 빔의 중심 부분에서 상대적으로 매우 높다. 따라서 재료 표면에 초점을 위치시켰을 때 실제 가공이 일어나는 부분은 레이저 빔의 에너지가 임계값 이상인 부분으로 국한된다. 경우에 따라서 초점 직경의 1/5 이 될 수도 있다. 즉 파장이 800nm 인 fs 레이저를 이용하여 160nm 의 직경을 가지는 홀을 가공할 수 있다는 의미이다.⁵

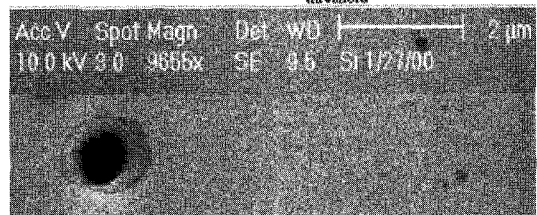
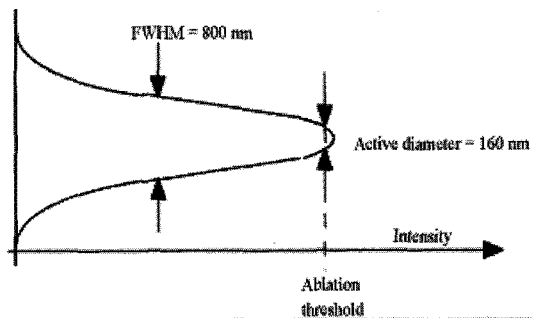


Fig. 7 Sub-micron hole machined in silicon using femtosecond laser

4. ps 레이저와 ns 레이저 가공 특성 비교

4.1 실리콘 웨이퍼 드릴링⁶

Fig. 8 은 ps 및 ns 레이저를 각각 이용하여 실리콘 웨이퍼에 가공한 미세 홀의 단면 SEM 사진을 보여 준다. 각 레이저 별 가공조건은 table 1 에 정리하였다.

Table 1 Laser conditions for micro-drilling in silicon

	Pulse duration (sec)	Pulse energy (μJ)	Pulse cycle (time)	Input energy (μJ)
ps laser	15×10^{-12}	2	5	10
ns laser	110×10^{-9}	20	10	200

상대적으로 높은 에너지가 주입된 ns 레이저의 경우 열영향으로 인하여 미세 홀 내벽에 용융층이 두껍게 형성되었다는 것을 볼 수 있다. 반면 ps 레이저의 경우 미세 홀 내벽에 부분적으로 얇게 열영향층이 형성되어 있다. ns 레이저의 경우 200 μ J의 높은 에너지가 주입된 반면, ps 레이저의 경우 5%에 해당하는 10 μ J의 낮은 에너지의 주입만으로 가공이 가능하였다. 이것은 가공을 위한 임계 에너지값의 차이로서 ps 레이저는 적은 에너지로 가공이 가능하며, 미세 홀의 직경을 줄이기 더욱 용이하다는 점을 보여 준다.

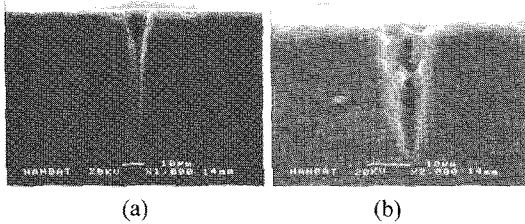


Fig. 8 SEM images of cross sectional views of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser

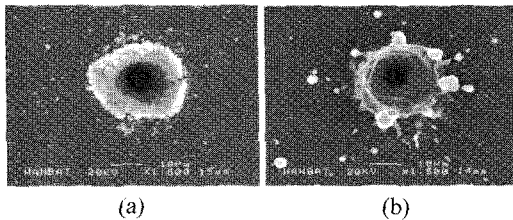


Fig. 9 SEM images of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser

주입된 총 에너지는 200 μ J로서 동일하게 하여 드릴링한 후 미세 홀의 상면을 살펴보았다. ns 레이저의 경우 상부에 용융물이 다량 발견된 반면, ps 레이저의 경우 분말 형태의 잔유물들이 산포되어 있다. 용융물은 레이저 빔이 재료에 조사되었을 경우 열이 축적되어 생기는 현상이며, 분말 형태의 잔유물은 공유결합 구조의 실리콘이 광화학적인 반응에 의해 분해되어 주변에 분포된 것으로 판단된다.⁶ 이는 ps 레이저를 이용한 가공은 광화학 반응이 추가 되는 것을 의미하고 있어 고정밀 가공은 ps 레이저가 더 적합하다는 것을 보여 준다.

4.2 경성 인쇄회로기판 정밀 절단⁷

진자제품에 필수적으로 사용되고 있는 경성 (rigid) 인쇄회로기판(PCB; printed circuit board)을 절단하는데 레이저가 적용되고 있으며, 현재는 주로 단파장(355nm) ns 레이저가 사용되고 있다.

Fig. 10은 ps 레이저(532nm)와 ns 레이저(355nm)를 이용하여 두께 0.8mm의 경성 PCB를 절단한 후 그 단면의 SEM 이미지를 보여 준다. ps 레이저의 경우 ns 레이저를 이용하여 절단한 경우에 비해 전체적으로 용융물이 적게 형성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 경성 층 내의 유리섬유 형상이 선명히 나타나도록 절단된 부분은 ps 레이저의 경우 열영향이 상대적으로 매우 적다는 것을 보여 주고 있다.

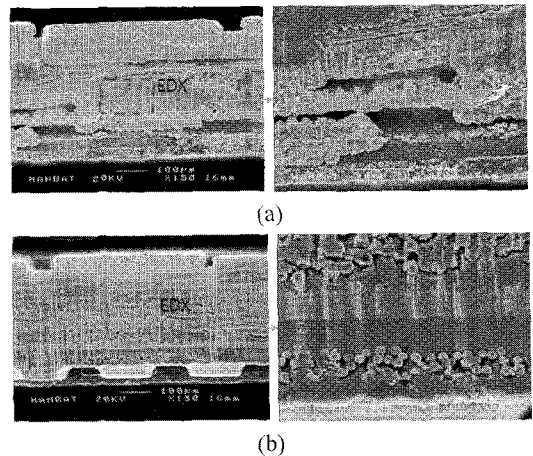


Fig. 10 SEM images of cross-sections of rigid PCB cut by (a) nanosecond laser (80ns, 355nm, 8W) and (b) picosecond laser (12ps, 532 nm, 3.8 W)

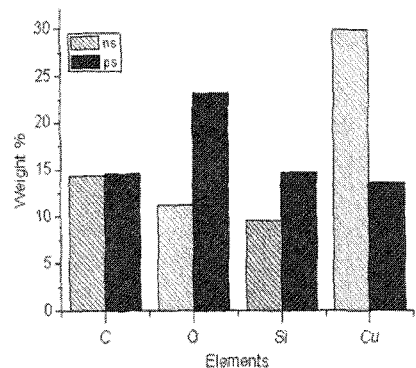


Fig. 11 Results of EDX analysis of the cross-sections in Fig. 10

Fig. 11 은 Fig. 10 에서 점선으로 표시된 부분(동일위치)의 성분분석(EDX)결과로서, ps 레이저를 이용한 가공결과는 모재 성분인 실리콘(Si)과 산소(O)의 함량이 높게 나오는 반면, ns 레이저의 가공 결과에서는 단자에서 볼 수 있었던 구리(Cu) 성분이 높다는 것을 보여주고 있다. 이는 ns 레이저의 경우 다층 FPCB 의 경우 단락의 위험이 높아진다는 것을 보여준다.

5. 결론

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공기술은 레이저 빔과 재료 간의 반응시간이 재료의 열확산 시간보다 짧은 비열적(non-thermal) 공정으로, 레이저 빔에 의한 열영향부(heat affected zone)가 거의 발생하지 않으므로, 현재 초미세/정밀 가공기술이 요구되는 관련 첨단산업에 적합한 기술로 향후 응용분야가 급격히 확대될 것이 확실시 되고 있다.

펨토초 레이저와 피코초 레이저 발진기는 그동안 낮은 평균출력, 복잡한 내부 광학계(optical system)와 높은 가격으로 응용분야가 제한적이었으며, 양산용 레이저 미세가공기에 적용하기가 현실적으로 어려웠으나, 최근 내부 광학계 및 가격이 현저하게 개선된 고효율 발진기가 시장에 출시되어 수년 내에 양산 장비에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 논문은 지식경제부 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제(산업원천기술개발사업, 과제번호 : 10030224)의 지원으로 작성되었음.

참고문헌

1. KEPCO, <http://www.kepco.co.kr>
2. Spence, D. E., Kean, P. N. and Sibbett, W., “60-fsec pulse generation from a self mode-locked Ti:Sapphire laser,” *Opt. Lett.*, Vol. 16, No. 1, pp. 42-44, 1991.
3. Strickland, D. and Mourou, G., “Compression of amplified chirped optical pulses,” *Opt. Commun.*, Vol. 56, No. 3, pp. 219-221, 1985.
4. Breitling, D., Ruf, A. and Dausinger, F., “Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses,” *Proc. of SPIE*, Vol. 5339, pp.

49-63, 2004.

5. Clark-MXR, Inc., <http://www.cmrx.com>
6. Shin, D. S., Suh, J., Lee, J. H. and Kim, K. H., “Fabrication of Through Silicon Via using Laser Drilling Process,” *J. of KSPE*, Vol. 26, No. 12, pp. 41-46, 2009.
7. Shin, D. S., Lee, J. H., Sohn, H. and Paik, B. M., “FPCB cutting process using ns and ps laser,” *J. of KSLP*, Vol. 11, No. 4, pp. 29-34, 2008.