

미세가공분야의 극초단 펄스 레이저 응용 현황



이 제 훈

한국기계연구원,
정보장비연구소



서 정

한국기계연구원,
정보장비연구소



손 현 기

한국기계연구원,
정보장비연구소



신 동 식

한국기계연구원,
정보장비연구소

1. 극초단 펄스 레이저

레이저빔(laser beam)이 재료 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자(lattice)로 전달되어 재료에 열이 발생하게 된다. 이 현상을 열확산(thermal relaxation)이라고 한다. 재료에 따라 열확산 시간이 다르지만, 금속재료의 경우에는 수십~수 피코초(picosecond) 사이

에서 열확산 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 극초단(ultrashort) 펄스 레이저는 그 펄스폭(pulse duration)이 재료의 열확산 시간보다 짧기 때문에 레이저빔이 조사되는 부분만 제거되어 초정밀 가공이 가능하게 된다.

현재까지 개발된 극초단 펄스 레이저는 Nd:YVO₄를 매질로 사용하는 피코초 레이저와 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 펨토초(femtosecond) 레이저가 있다. 여기서 피코초는 시간의 단위로서 1조분의 1초(10^{-12})이며, 펨토초는 1000조분의 1초(10^{-15})에 해당한다. 이것은 극도로 짧은 시간으로, 예를 들면, 100 펨토초는 빛이 머리카락 두께의 반도 진행하지 못하는 시간이다(Fig. 1). 또한, 펨토초 레이저는 극도의 높은 출력을 가지는데 순간적으로 펄스 당 수백 GW까지의 첨두출력(peak power)을 방출한다. 한국전력의 2003년도 통계에¹⁾ 의하면 우리나라의 모든 발전소가 동시에 생산할 수 있는 최대전력이 47 GW라는 사실과 비교해 보면 펨토초 레이저의 펄스가 경이로운 첨두출력 값을 가진다는 것을 알 수 있다(Fig. 2).

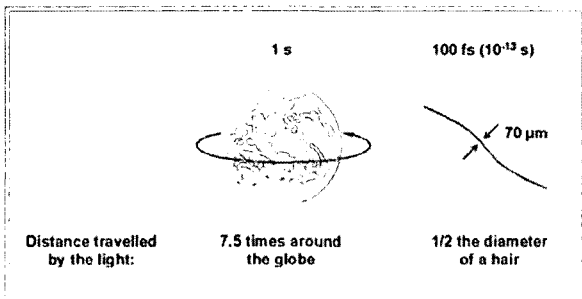


Fig. 1 The shortness of a femtosecond is illustrated by the distance light travels during the pulse duration.

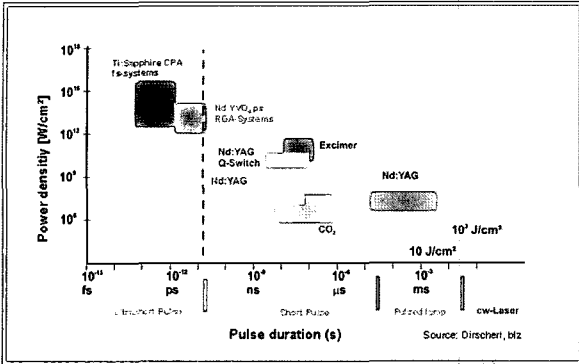


Fig. 2 The lasers according to pulse duration and power density.

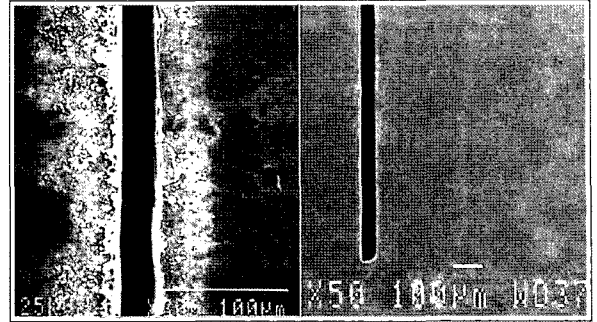


Fig. 4 Slots machined in INVAR with nanosecond pulse laser (left) and with ultrashort pulse laser (right).

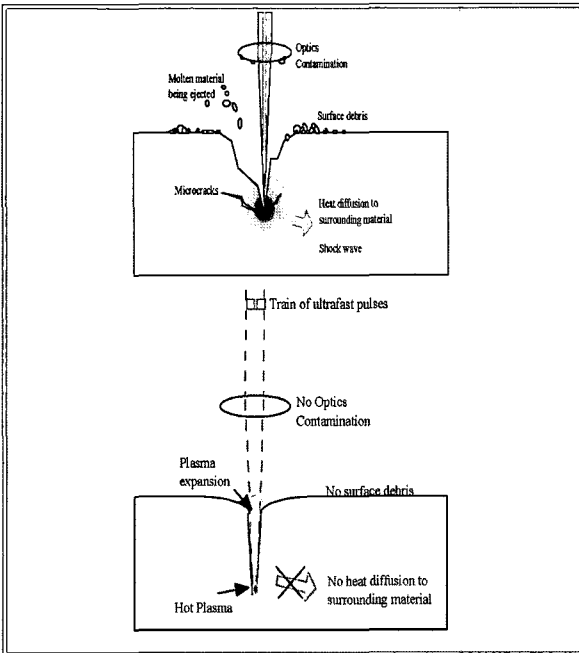


Fig. 3 Schematic of the interaction of material with nanosecond laser (up) and with ultrashort pulse laser (down).⁽²⁾

2. 재료 반응 메커니즘

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저빔과 재료 간의 상호반응 시간 즉, 펄스폭이 재료의 열확산 시간보다 짧기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는다는 것이다. 다시말해, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적

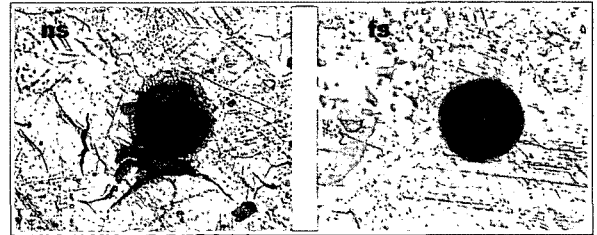


Fig. 5 110-μm diameter hole drilled in 100-μm thick Rhenium plate with nanosecond pulse laser (left) and with ultrashort pulse laser (right).

인 레이저 가공에서 나타나는 열확산 현상은 거의 발생되지 않는다. 열확산은 취성이 높은 재질인 경우 미소크랙(micro-crack)을 유발하므로 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료가공에도 유리하다고 할 수 있다. 극초단 펄스 레이저는 열확산을 방지하는 효과 외에 가공물의 주변에 형성되던 용융물(melt) 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고, 발생된다 하더라도 매우 미세한 분말형태이므로 쉽게 제거할 수 있다 (Fig. 3).

Fig. 4에서 나노초(nanosecond) 레이저와 펨토초 레이저를 이용하여 초내열강(INVAR)을 가공한 예를 나타내었다. 나노초 레이저에 의한 초내열강의 가공은 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공과 비교하면 용융물 및 잔유물에 의한 재료 표면의 오염이 심각한 것을 볼 수 있다. 또한 열 영향부가 넓게 형성되었으며 재용고된 용융물 층이 가공면을 따라 존재한다. 이러한 이유로 정밀가공을 위해서는 잔유물 제거를 위한 후처리 공정이 필요 없는 극초단 펄스 레이저가 필요하다는 것을 알 수 있다.⁽³⁾ Fig. 5에서는 나노초

레이저와 극초단 펄스 레이저를 이용하여 두께가 100 μm 인 레늄(Rhenium)판에 직경 110 μm 인 구멍을 드릴링한 것을 나타내었다.

극초단 펄스 레이저는 sub- μm 급 초정밀 가공이 가능한 특징이 있다. 레이저 미세가공공정에서 렌즈를 이용하여 집속(focusing)된 레이저빔의 스폿크기(spot size)는 가공정밀도에 직접적인 영향을 미치는 인자들 중 하나이다. 실제 가공에서 레이저빔이 반사경, 렌즈 등의 광학계를 거쳐 재료 표면까지 이송되기 때문에 레이저빔의 스폿크기는 광학적인 한계에 의해 제한된다. 즉, 파장이 0.8 μm 라면 레이저빔을 이용하여 재료를 가공하는 경우에 스폿의 최소 크기를 파장이하로 만들기 어렵다. 또한 레이저빔에 의한 열영향부를 고려하면 기존의 장펄스 레이저를 이용하는 경우에는 sub- μm 급 초정밀가공은 어렵다고 할 수 있다.

그러나, 극초단 펄스 레이저의 경우에는 임계치(threshold) 가공 특성을 이용하면 sub- μm 급 초정밀 가공이 가능하다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 가우시안(Gaussian) 에너지 분포를 갖는 레이저빔은 빔의 중심 부분에서 에너지 밀도가 상대적으로 매우 높다. 따라서 재료 표면에 초점(focus)을 위치시켰을 때 실제 가공이 일어나

는 부분은 레이저빔의 에너지가 임계값 이상인 부분으로 국한된다. 경우에 따라서 초점직경의 1/5이 될 수도 있다. 즉, 파장이 800 nm인 펄스 레이저를 이용하여 160 nm 의 직경을 가지는 홀을 가공할 수 있다는 의미이다.⁽⁸⁾

3. 금속재료 반응 메커니즘⁽²⁾

금속재료 표면에 조사된 레이저 에너지가 금속 내부로 전달되는 메커니즘은 다음과 같다. 준자유전자(quasi-free electron)에 에너지를 전이시킨다. 이것은 레이저 빔의 표면에 조사됨과 거의 동시에 이루어지며, 이후 순차적으로 원자, 분자 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10 피코초 가량의 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다. 다시 말해, 레이저 빔이 조사되고 난 후 재료내부에 열이 발생하는데 까지 걸리는 시간이 약 10 피코초라는 의미이다.

전자온도와 격자온도를 이용하여 레이저 펄스의 열전달을 설명하는 Two-temperature 모델을 이용하여, 1 피코초 펄스와 1 나노초 펄스가 알루미늄에 조사되었을 때 열전달을 수치적으로 해석한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 1 피코초 펄스와 1 나노초 펄스의 에너지 밀도는 각각 10 mJ/cm^2 , 100 mJ/cm^2 로써 알루미늄의 표면에서 발생하는 어블레이션(ablation)은 무시할 수 있다. 1 피코초 펄스의

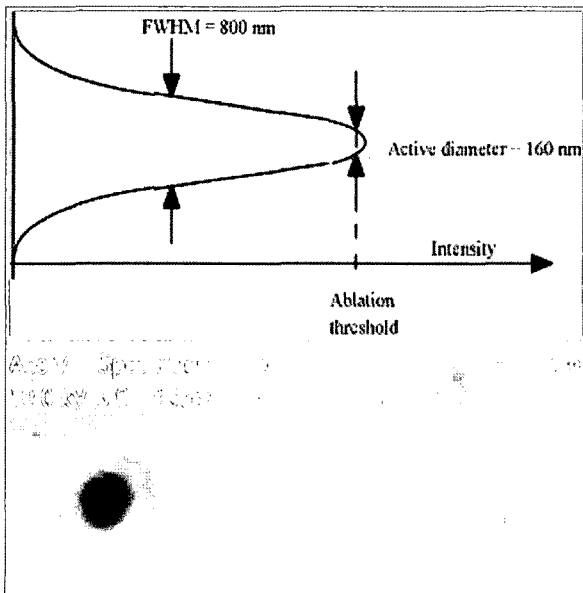


Fig. 6 Submicron hole machined in silicon.

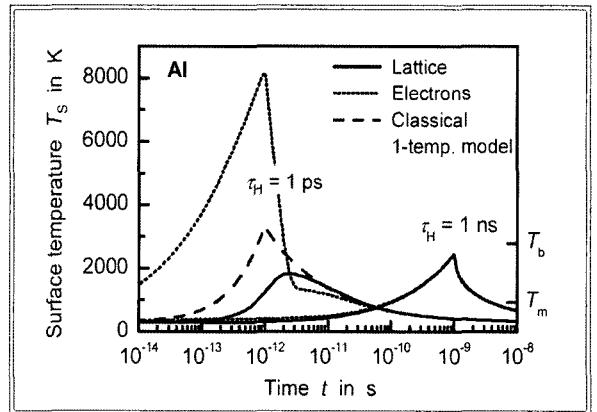


Fig. 7 Temporal evolution of the surface temperature of aluminum when absorbing a laser pulse of 1 ps (absorbed energy density $AH = 10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) or 1 ns duration ($AH = 100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$).

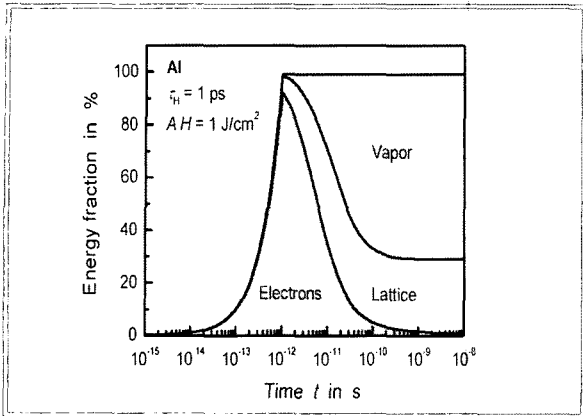


Fig. 8 Development of the energy fractions stored in the electronic and lattice systems as well as in the vapor during absorption of a laser pulse of 1 ps duration ($AH = 10 \text{ mJ/cm}^2$).

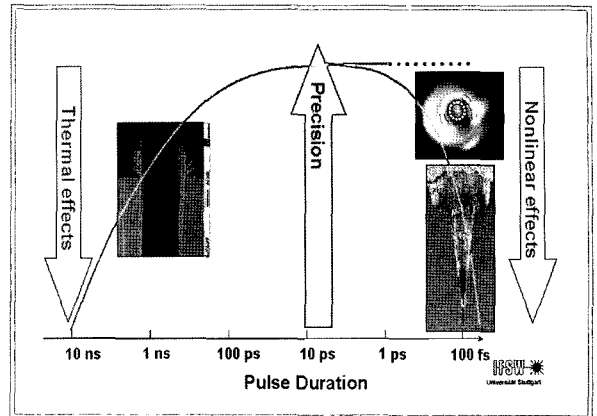


Fig. 9 Nozzle of an injection mold machined with a picosecond laser (Source: R. Giedl, GFH).

경우에는 레이저 펄스가 재료 표면에 조사되는 동안 전자의 온도가 격자(lattice)의 온도에 비해 급격히 상승하게 된다. 격자는 펄스가 조사된 후 수백 펨토초-수 피코초 후에 온도가 상승하기 시작한다. 레이저 빔이 조사된 지 약 100 피코초 후에 전자와 격자의 온도가 평형을 이루게 된다. 기존의 One-temperature 모델을 이용하여 계산한 결과도 함께 표시하였다. 이 경우에 격자의 전자와 격자 간의 열평형 이전에는 격자의 온도를 높게 계산하는 것을 볼 수 있다. 나노초 펄스의 경우에는 One-temperature 모델을 이용하여 계산한 모든 곡선들의 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

1 피코초 펄스가 알루미늄에 조사되었을 때 시간에 따라 흡수되는 에너지의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 초기에는 전체 에너지가 전자에 흡수되며, 수 피코초 후에 격자로 에너지 전달되는 것을 볼 수 있다. 동시에, 증발이 시작되어 나노초 영역까지 계속된다. 이때는 이미 전자와 격자간에는 서로 열평형에 도달하게 되며, 전자에 비해 이온들의 열용량(heat capacity)이 크기 때문에 대부분의 에너지가 격자에 저장된다. 수 나노초 후에 증발이 정지되었을 때, 전자와 격자의 에너지 합이 열전도에 의한 금속 내부의 순열 손실이 된다.

이와 같이 금속의 정밀가공을 위해서는 레이저 펄스폭이 레이저 에너지가 전자에서 격자로 전이되는 시간보다 짧아야 한다. 그러나, 레이저빔의 펄스폭을 더욱 짧게 하는 것

은 레이저빔과 재료의 반응 메커니즘 상 가공정밀도에 도움에 되질 않는다. 펄스폭을 더욱 줄이게 되면 레이저 빔의 초점 영역에서 극초단파 펄스와 주변 가스와의 상호작용에 의해서 비선형 효과(nonlinear effects)가 나타나게 된다. 즉, 레이저빔의 선단(wave front)의 붕괴, 가공형상 왜곡, 레이저빔의 발산 증가 등의 현상이 나타나게 되는데 이것은 펨토초 펄스의 경우에 더욱 심각하게 나타난다. Fig. 9에 펄스폭에 따른 가공정밀도의 양상을 개략적으로 나타내었다.

금속가공의 경우에 결정격자의 열반응은 펄스폭에 의해 결정이 되는 것이 아니고 재료의 열확산 시간에 의해 정해진다. 이는 금속가공에 있어서는 펄스폭이 열확산 시간보다 짧은 경우에는 동일 출력의 피코초 레이저와 펨토초 레이저의 가공 품질은 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 그러나 펨토초 레이저의 경우 광학적 한계로 인하여 피코초 레이저 보다 높은 출력특성을 가지기 힘들다. 재료가공시간 및 가공량은 평균출력에 의해 좌우되므로 금속재료를 가공하는 경우에는 상대적으로 높은 평균출력을 가진 피코초 레이저가 다소 유리하다고 볼 수 있다.

4. 투명재료 내부 반응 메커니즘

유리, 폴리머 등의 투과재료의 내부가공에는 주로 펨토

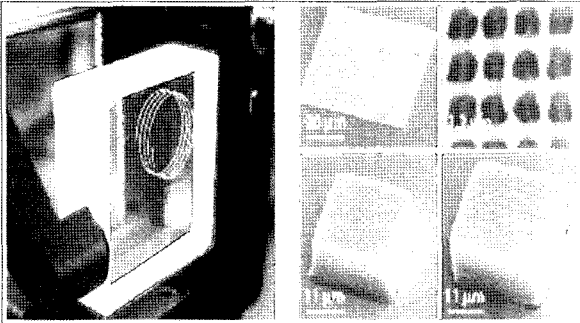


Fig. 10 Three-dimensional waveguide written in bulk glass (left) and photonic crystal waveguide written in bulk lattice.⁽³⁾

초 레이저가 사용된다. 800nm의 파장을 가지는 Ti:Sapphire 펄스 레이저빔은 일반유리 및 수정(crystal)을 투과하나, 다광자 흡수(multi-photon absorption) 및 터널이온화 등의 비선형 광학현상이나 양자현상이 유기되어 다수의 운반매체가 극히 짧은 시간영역에서 생성하고, 조사부위에 남겨진 정전하를 갖는 핵이 쿨롱(Coulomb)폭발을 일으키는 빠른 프로세스가 공간형성에 기여한다.⁽⁴⁾ 이와 같은 방법은 300 nm 이하의 미소공간에서 굴절률 변화를 유기하거나 발광성 결함을 생성하여 1.2 Tbit/cm²의 기록밀도를 가지는 고밀도 3차원 광메모리(optical memory)도 제작할 수 있다.

펄스 레이저를 이용하여 광도파로(optical waveguide), 3차원 광결정(photonic crystal) 등과 같은 광통신 소자를 제작할 수 있다. Fig. 10는 펄스 레이저를 이용하여 제작된 광도파로에 녹색광을 조사하여 가시화한 사진으로서 유

리의 내부에 3차원 형상가공이 용이하다는 것을 보여주고 있다.⁽³⁾ 또한 펄스 레이저를 이용한 투과물질 내의 3차원 형상가공은 무기물뿐만 아니라 폴리머와 같은 유기물에도 적용할 수 있다. 펄스 레이저를 이용한 폴리머 가공의 대표적인 예로서 단량체(monomer)가 함유된 레진(resin) 내부에 레이저빔의 초점이 맺히게 하면 이광자 공정(two-photon process)이 유도되는 것이다. 이를 이용하면 국부적으로 폴리머(polymer)를 형성시킬 수 있다.⁽⁵⁾ 이러한 이광자 공정에 의해 생성된 선폭은 200 nm로서 해상도 한계보다 작은 치수영역에서 광결정 격자를 제작할 수 있다. 또한, Fig. 11에서는 Fused Silica 판재 내부에 그레이팅(grating) 구조를 패터닝한 예이다. 백색광을 조사하면 분광된 스펙트럼(spectrum)을 볼 수 있다.

5. 미세가공분야 응용 동향

역사적으로 1990년대 후반부터 펄스 레이저를 이용한 재료가공에 대한 연구가 선진국의 일부 국립연구소에서 진행되었다.

미국에서는 Purdue 대학, MIT, Harvard 대학, LLNL 등을 중심으로 레이저 미세가공기술에 대한 연구가 진행되어 왔다. Harvard 대학의 E. Mazur 그룹은 광메모리 소자 개발을 목표로 파장이 800 nm, 펄스폭이 100 펄스초인 펄스 레이저 펄스를 유리 내부에 집광시킴으로써 비선형(non-linear) 현상인 자기집속현상(self-focusing)을 이

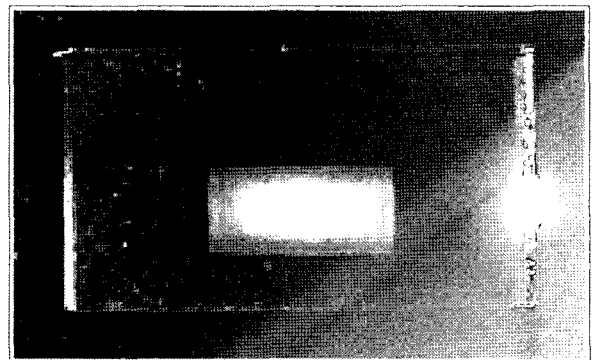
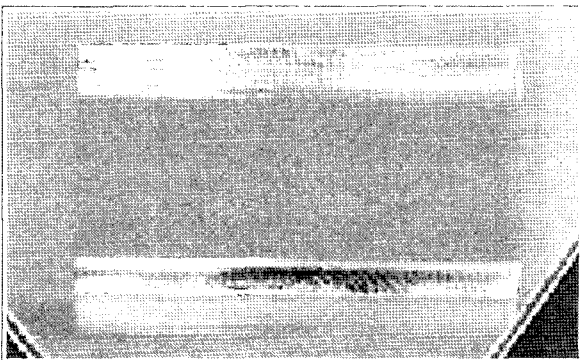


Fig. 11 Grating fabricated inside a fused silica plate: line width 500 nm and pitch 2 μm.

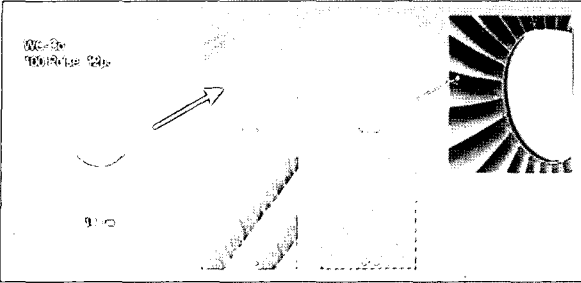


Fig. 12 Ripplets on metal surfaces for friction reduction generated with picosecond laser (Source: Frank Siegel, LZH).

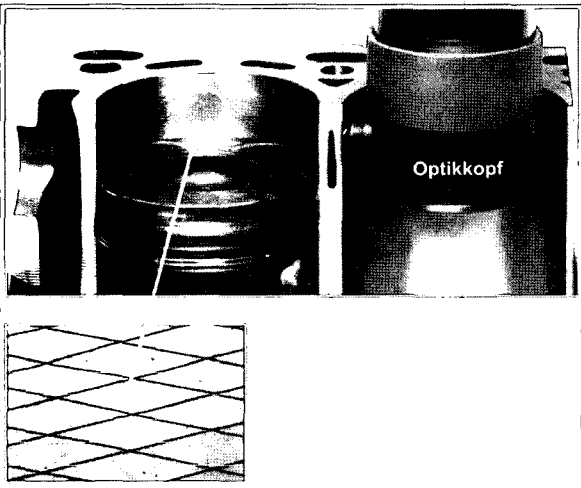


Fig. 13 Structuring of the hone cylinder walls with micro pockets for lubricants (Source: Gehring).

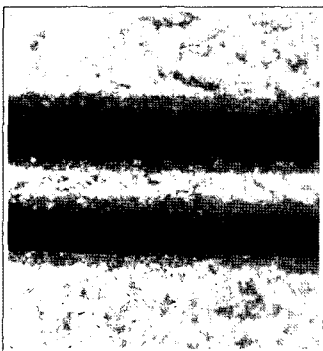


Fig. 14 Patterning of Aluminum with a picosecond laser: Line width 15 μm and pitch 25 μm.

용하여 직경이 200 nm인 구조개질을 얻었다. 이는 차세대 광메모리로 제작에 응용이 기대되나 집적도를 더욱 높일

수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다. Michigan 대학의 Ultrafast optical science 센터의 Mourou 교수진을 비롯하여 Los Alamos Laboratory, UC Berkeley, UCLA, UC Santa Barbara, UC San Diego, Stanford, CREOL, Illinois 대학 등지에서 NSF 과제로 펨토초 레이저와 관련한 다양한 분야에 대해 많은 연구를 수행하고 있으며, 국가차원에서 이 분야의 중요성을 일찍부터 인식하여 많은 투자가 이루어지고 있어 상당한 기술 진척이 이루어진 것으로 알려져 있다. 그 가운데 펨토초 레이저를 시각 교정 및 생체치료에 응용하는 연구도 진행되고 있다.

Tokushima 대학의 Misawa 그룹에서는 레이저 미세가공공정을 화학 에칭공정과 결합하여 사파이어에 10-50 μm의 미세 채널을 형성하였다. 이러한 투명재료 내부에 3차원 마이크로 채널을 형성하는 기술은 향후 바이오칩 및 μ-TAS(Total Analysis System) 등에 응용이 가능하다.

한편 독일에서는 Max-Born 연구소, Siemens 사, IFSW, LZH(Laser Zentrom Hanover) 등에서 극초단 펄스 레이저 응용에 대한 연구가 진행되고 있다. LZH에서는 고융점 난삭재인 WC-Co로 제작된 터빈 날개의 표면에 잔물결 형상을 가공하여 유체와 터빈 날개 사이의 마찰력을 줄임으로써 연료소비를 절감하는 연구가 수행되었다(Fig. 12).

디젤기관의 hone cylinder의 내벽에 윤활유가 스며들 수 있는 미세형상(깊이 5-25 μm)을 가공함으로써 내벽과 실린더 헤드 사이의 마찰력이 3-7배 감소되어 연료절감 효과를 얻은 연구도 수행되었다(Fig. 13). 이 공정은 기존에 나노초 레이저를 이용하였으나, 레이저빔-재료 사이의 열적반응으로 내벽 표면에 발생하는 burr를 제거하기 위한 후처리 공정이 필요하다는 문제점이 있었다.

피코초 레이저를 이용하여 알루미늄, 스테인레스강, 금속 복합재 등의 다양한 bulk 금속소재의 패터닝 및 절단에 대한 연구가 진행되고 있다. Fig. 14에서 알루미늄을 패터닝한 사례를 보여주고 있다. 패터닝의 선폭은 15 μm이며, 패터닝 간격은 10 μm이다. Fig. 15에서 피코초 레이저를 이용한 금속재료에 구멍 가공한 예를 나타내었다.⁶⁾

극초단 펄스 레이저를 이용하여 투명재료 내부의 조직을 변화시키고, 에칭공정을 통해 내부가공이 가능하다. Fig.

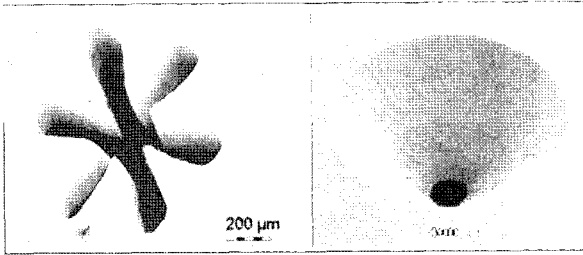


Fig. 15 Metal nozzles ablated with a picosecond laser.⁽⁶⁾

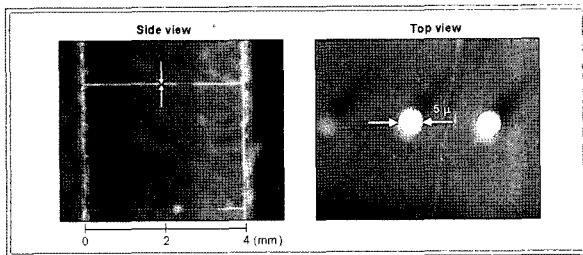


Fig. 16 Drilling of a hole with a high aspect ratio in a fused silica plate. Internal structure is modified by a femtosecond laser.

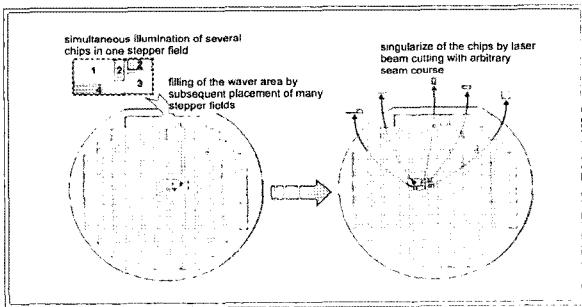


Fig. 17 Laser based flexible separation of semiconductor substrates (Source: Xsil Ltd., Ireland).⁽⁷⁾

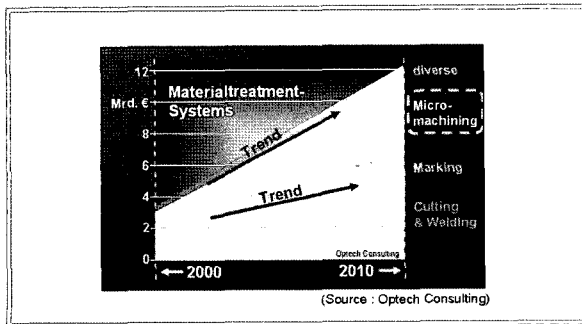


Fig. 18 Market scale forecast in laser micromachining.

16에서 보는 바와 같이 펨토초 레이저를 이용하여 Fused Silica 판재 내부에 직경 5 μm 의 단면을 갖는 선을 패터닝 하면, 레이저빔이 조사된 부분에 일종의 결함(defect)이 생겨 조직이 약화된다. 이 판재를 에칭하면 에칭률(etch rate)의 차에 의해 구멍이 가공된다.

이외에도 기계가공이 어려운 알루미늄, 실리콘 카바이드 등과 같은 세라믹, 및 반도체의 미세가공에도 많이 사용된다. 특히 웨이퍼 절단의 경우 열영향이 없고 잔유물이 없기 때문에 여러 공정을 거쳐 패턴이 형성된 마이크로 칩을 정밀하게 분리하기에 용이하다고 판단된다. Fig. 17은 웨이퍼 상에 복잡하게 형성된 마이크로 칩의 절단 예를 보여주고 있다. 이러한 경우 휠 커터를 사용하는 방법에 비하여 다양한 자유도의 이동경로를 가지고 있으므로 복잡한 형상의 모양도 쉽게 자를 수 있는 장점도 있다는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾

8. 결론

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공은 비열적(non-thermal) 가공이다. 즉, 펄스폭이 극단적으로 짧기 때문에 레이저빔에 의한 열영향부를 최소화할 수 있어 sub- μm 급 가공도 가능하다. 또한, 극초단 펄스 레이저의 비선형(non-linear) 광학현상으로 인한 재료 무의존성(independency)을 가지고 있기 때문에 어떠한 재료도 가공할 수 있는 장점이 있다.

이러한 장점을 가진 극초단 펄스 레이저를 첨단산업분야인 IT/BT/NT 분야의 초정밀 핵심부품제작에 응용하고자 하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있어, 광통신 분야, 전자, 반도체, 바이오 관련 산업 등의 광범위한 첨단 산업분야에서 고부가가치 초정밀 핵심부품제작에 폭넓게 응용될 것으로 전망된다(Fig. 18).

후 기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 핵심기술개발사업의 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

1. www.kepco.co.kr
2. Breitling, D., Ruf, A. and Dausinger, F., "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses", SPIE 5339, pp. 49?63, 2004.
3. www.cmxr.com
4. 오기동, "펨토초 레이저를 이용한 재료의 미세가공", KISTI 기술동향, 2004.
5. Powell, Y. C., "Two-photon process cures hybrid polymers into photonic-crystal lattices", laser focus world, p. 32, 2004.
6. www.lumera-laser.com
7. 이종민, "펨토 과학기술 연구개발 현황", 레이저기술, p. 28, 2003.