

# Ultrafast Laser Processing

Author : Dr. Koji Sugioka, Dr.Prof. Ya Cheng

## 1장

### 초고속 레이저 가공 개요

코지 수기오카<sup>a</sup>와 야첵<sup>b</sup>

<sup>a</sup>레이저 기술 실험실, Riken, 2-1 히로소와, 와코, 사이타마 351-0198, 일본

<sup>b</sup>국립 하이필드 레이저물리학 실험센터

광학 및 정밀 역학 상하이 연구소, 중국 과학아카데미

사서함 800-211, 상하이 201800, 중화인민공화국

[ksugioka@riken.jp](mailto:ksugioka@riken.jp), [ya.cheng@slom.ac.cn](mailto:ya.cheng@slom.ac.cn)

초고속 레이저 (예, 피코 및 펨토 초 레이저)는 재료 가공에 탁월한 성능을 갖는다. 그러므로 초고속 레이저는 현재 기초연구와 실용적 응용에 널리 사용된다. 이 장은 초고속 레이저 가공의 특징을 기술하고 표면 마이크로 기계가동, 마이크로 및 나노구조화, 나노 ablation, 쌍광자 광중합, 투명 재료 내부 변형, 바이오 의학 및 산업 응용을 포함한 다양한 가공 기술에 대해 간단히 소개한다.

-----  
초고속 레이저 가공: 마이크로에서 나노까지의 범위

코지 수기오카와 야첵 편집

저작권 © 2013 팬 스탠포드 발행사

ISBN 978-981-4267-33-5 (정장본), 978-981-4303-69-9(eBook)

[www.panstandford.com](http://www.panstandford.com)

## 1.1 서론

초고속 레이저는 수십 피코 ( $10^{-12}$ )(ps) 초보다 짧은 광 펄스를 방출하는 레이저로 정의되기 때문에 여기에는 펨토( $10^{-15}$ ) (fs)와 ps 레이저가 포함된다. 스리니바산 외 [1], 쿠퍼와 스투크 [2]는 1987년에 처음으로 초고속 레이저를 이용하여 재료 가공을 하였다. 그들은 fs UV 엑시머 레이저를 사용하여 열 영향 존(heat-affected zone=HAZ)에 변형이 거의 없는 폴리메틸크릴산메틸의 클린 ablation을 시험했다. 그들은 ablation 역치가 나노( $10^{-9}$ )(ns) ablation보다 상당히 낮다는 사실을 발견하였다. 또한 초고속 레이저는 다광자 흡수에 의해서 극도로 높은 밀도[3,4]를 생성하기 때문에 NaCl과 폴리테트라플루오르에틸렌(PTFE) 같은 투명한 물질도 깨끗하게 ablation할 수 있음을 시연하였다. 이 실험들의 영향력은 대단하였기에 이 분야에 대한 연구는 1990년대에 급속히 확장되었다. 초고속 레이저는 현재 기초 연구와 다양한 응용 분야 모두에서 통상적인 도구가 되어가고 있는 실정이다. 그러한 신속한 진화는 초고속 레이저 가공의 고유한 특성뿐 아니라 레이저 시스템의 고성능 때문이다.

초고속 레이저 가공의 중요한 특징은 가공 부위 [5] 주변에 열 확산이 적어서 생물학적 조직 [6]이나 반도체와 절연체 같이 단단하거나 부서지기 쉬운 재료에 HAZ 변형을 일으키지 않는다는 것이다. 주변에 열 확산을 억제한다는 사실은 나노 스케일 가공의 공간적 해상도를 개선시키는 것이다.[8] 또한 ablation 역치 근처의 세기에서 초고속 레이저 발산은 다양한 재료들에서 파장보다 훨씬 짧은 주기를 갖는 나노 파상 구조를 형성한다.[9-12] 초고속 레이저의 또 다른 중요한 특징은 이미 언급한 대로 초고속 레이저 빔에 대해서 투명한 물질에서도 비 선형 흡수(즉, 다광자 흡수)는 강한 흡수를 유도할 수 있다는 것이다. [3,4] 다광자 흡수는 유리와 중합체 같은 투명한 물질의 표면 변형뿐 아니라 3차원 내부 마이크로 가공을 가능케 한다. 또한, 다광자 흡수는 그 비선형성에 의한 회절 한도를 넘는 공간 해상도를 갖는다. [17]

또한 초고속 레이저 시스템 성능의 신속한 발전은 초고속 레이저 가공 연구 확장에 상당한 기여를 하고 있다. 펨토초 UV엑시머 레이저는 1980년대에 fs 레이저 가공에 대한 초기 단계 연구에 사용되었다. 증폭 매질에 손상이나 바람직하지 않은 비선형적 효과를 일으키지 않고 에너지를 방출하는 Ti:사파이어 재생 증폭기 [18]의 처프 펄스 증폭 (chirped-pulse amplification, CPA) 생성은 1990년대 초고속 레이저 가공의 기초 연구에 새로운 지평을 열었다. 2000년대[19]에는 아주 소형의 처프 펄스 증폭기 [FCPA]가 개발되어 응용 연구가 증대되었다. 비록 Ti:사파이어 시스템이 생성한 펄스 보다 훨씬 광범위하지만 더욱 최근 희토류 레이저 매질이 다이오드 펌핑을 이용한 소형과 높은 파워의 ultrafast 레이저 시스템을 만드는데 사용되었다 [20,21]. 산업적 응용에 적합한 이 시스템 기반의 ps 레이저는 현재 몇 회사가 상용화하였다.

이 장은 초고속 레이저 가공의 특성을 우선 설명한다. 그리고 표면 미세 기계가공, 표면 마이크로 및 나노 구조화, 나노 ablation, 쌍광자 광중합, 광학 기기, 바이오마이크로 칩, 바이오메디칼,

산업용 응용 제품 제조에 필요한 투명 재료의 내부 가공을 포함한 다양한 가공 기술을 검토한다. 최종적으로는 초고속 레이저 가공의 요약 및 전망을 설명한다.

## 1.2 초고속 레이저 가공의 특성

### 1.2.1 비열적(非熱的) 가공

열적인 공정이 행해지는 ns와 더 긴 펄스에 의한 ablation과 대비하여 초고속 레이저 펄스에 대한 ablation은 고정밀 재료 가공을 실현할 수 있는 비열적 가공으로 이루어 진다. 이 특성은 재질에 신속한 에너지 분배로 귀속된다. 이 가공은 초고속 레이저 발산 후에 전자 분포가 열적인 평형에 도달하는데까지 수백 fs에서 수 ps가 소요된다. [23, 24]. 반면에 열화를 유도하는 전자 서브시스템에서 격자로 에너지의 전달 시간은 재료의 전자-포논 커플링 강도에 따라 1-100ps 단위이다. 이 시간은 전자가 열적 평형에 도달하는 시간보단 훨씬 길다. [24, 25] 따라서 초고속 레이저는 효율적으로 전자를 가열하여 격자와의 평형을 이루지 않는 고온의 전자 가스를 생성한다. 결과적으로 단지 레이저 펄스 에너지의 일부만이 열로서 방출된다. 이는 고정밀 마이크로 가공을 실현시킬 수 있는 비열적 가공을 가능하게 한다.

### 1.2.2 열 영향 존의 억제

초고속 레이저 펄스가 비열적 가공 [참조 1.2.1]을 유도하긴 하지만 여기에서 여전히 열이 발생한다. 단, 초고속 레이저 펄스가 수십 fs부터 수 ps 대역까지의 상당히 파장이 짧은 펄스로 인해 HAZ의 형성을 억제한다. 이는 높은 열전도 금속에서도 고품질의 마이크로 가공을 허용한다.

여기에서 우리는 금속의 fs와 ns 펄스 조사에 대해서 열 확산 길이를 비교한다. 레이저 물질 상호작용중의 전자-포논 커플링 타임 보다 짧은 레이저 펄스 폭에 있어서 대부분의 레이저 에너지는 열확산을 통한 에너지 소비 없이 전자에 의해서 흡수되고 매우 신속하게 결정 격자로 전달된다. [5] 그러므로 레이저 조사 지역의 주변지역으로 열 확산은 거의 무시할 수 있다. 대부분의 금속의 경우, 전자-포논 커플링 시간은 ps 이다 [26], 이는 초고속 레이저의 펄스 폭보다 상당히 긴 것이다. 이러한 상태에서 금속이 초고속 레이저 조사에 의해서 용융점  $T_{im}$ 에 가깝게 가열되었을 때 열확산 길이  $l_d$ 는 다음과 같다.

$$l_d = \left[ \frac{128}{\pi} \right]^{1/8} \left[ \frac{DC_1}{T_{im}\gamma^2 C'_e} \right]^{1/4}, \quad (1.1)$$

D가 열 전도도 일 때  $C_l$ 는 격자의 열용량이고,  $C'_e$ 는  $C'_e = C_e/T_e$  이다 [여기에서  $C_e$ 는 전자 열용량이고  $T_e$ 는 전자의 온도이다].  $\gamma$ 는 전자-포논 커플링 상수이다.[27] 예를 들면, 구리가 그 용융 점인  $T_{im}=1356K$ 까지 가열되면  $l_d$ 는 329nm로 계산된다.[28]

반면에 레이저펄스 폭  $\tau$ 가 전자-포논 커플링 시간보다 훨씬 길면,  $l_d$ 는 대략 다음 값을 갖는다.

$$l_d = \sqrt{\kappa\tau} . \quad (1.2)$$

여기에서  $\kappa$ 는 열 확산도이다. 구리의  $l_d$ 는  $\tau=10ns$ 일 때 1.5  $\mu m$ 이고, 이는 전통적인 ns 레이저[예, 엑시머 레이저]의 전형적인 펄스 폭이다. 그러므로 초고속 레이저의 사용은 가공 영역에서 HAZ를 축소하여 고품질 가공을 할 수 있음을 뜻하는 열확산 길이를 분명히 감소시킬 수 있는 것이다. 그러나 열확산은 초고속 레이저가 열 축적에 의해서 고 반복적으로 사용되는 경우에는 무시될 수 없다. [참조 1.2.6 섹션]

### 1.2.3 플라즈마 쉐딩의 부재

레이저 ablation에 있어서 ablation 플라즈마 (플라즈마 용기)는 레이저 펄스 조사 시작 후 수백 ps 후에 생성된다.[29] 결과적으로 이 용기는 ns 레이저 ablation에서 레이저 펄스의 후반부를 쉐딩하여 레이저 펄스 에너지의 일부는 재질에 인입되지 않아서 소멸하게 된다. 반대로, 펄스 조사는 초고속 레이저를 사용하면 용기가 발달하기 전에 종료된다. 그래서 전체 펄스 에너지는 물질에 의해서 흡수될 수 있고 효율적인 가공이 가능하게 된다.

### 1.2.4 다광자 흡수

초고속 레이저는 비 선형적 다광자 흡수에 기인하여 레이저 주파수에 투명한 물질에 대해서도 강한 흡수를 유도할 수 있다[3]. 그림 1.1은 전자 여기를 유도하는 단광자 및 다광자 흡수 가공을 나타낸다. 일반적으로 흡수는 선형적 단광자 흡수를 포함한다. 광자 에너지가 물질의 밴드갭을 초과하는 빛이 물질에 입사하게 되면 이 빛은 물질에 흡수되어 하나의 전자가 하나의 원자가 광자에 의해서 전자대에서 전도대로 여기하게 된다. 밴드갭보다 작은 광자 에너지를 갖는 빛은 전자들을 여기시키지 못하기 때문에 정지 상태에서 흡수는 일어나지 않는다. 그러나 상당히 고밀도의 광자(즉, 상당히 고밀도의 빛)가 물질에 입사하면 하나의 전자는 다광자에 의해서 광자 에너지가 밴드갭보다 작을지라도 여기가 될 수 있다. 이 현상은 다광자 흡수라고 알려져 있다. 초고속 레이저라는 것은 극초단 펄스에 의해 상당히 높은 최대 파워를 생성하기 때문에 다광자 흡수를 쉽게 유도할 수 있다. 그러므로 초고속 레이저는 투명한 물질에서도 강한 흡수를 유도할 수 있

기에 이로써 유리 같은 투명한 재질의 고품질 마이크로 가공이 가능하게 된다.

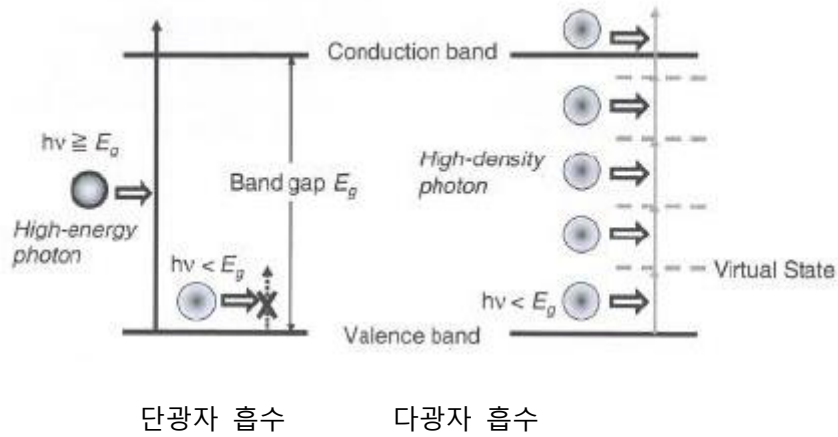


그림 1.1 단광자 및 다광자 흡수에 의한 물질의 전자 여기

### 1.2.5 내부 변화

다광자 흡수는 물질과 펄스 폭에 종속된 임계 값 이상의 강도에서만 효과적으로 유도될 수 있는 비선형 가공이다. 충분히 높은 펄스 에너지를 갖는 초고속 레이저 빔이 렌즈로 투명 물질에 모아지게 되면 [참조 그림 1.2] 흡수는 물질 내에서 레이저 강도가 임계치를 초과하는 초점 근처에 국한된다.

울트라 패스트 레이저 빔

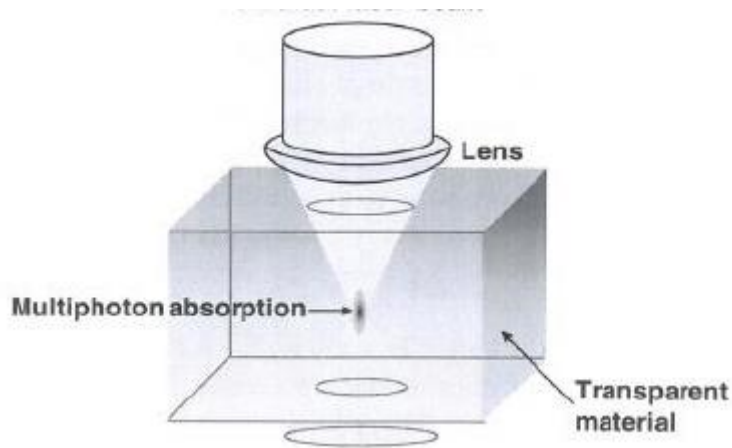


그림 1.2 초고속 레이저를 이용한 다광자 흡수에 의한 투명 물질에서의 내부 변화의 모식도

그러므로 투명 물질의 내부 변형은 초고속 레이저 펄스를 이용하여 이루어 질 수 있다. [13, 14] 내부 변형은 3D 광 웨이브가이드를 그리고 마이크로 광 요소 및 유리에 내재된 마이크로 유체 채널을 가공하는데 사용될 수 있다. [참조 1.3.5 섹션]

### 1.2.6 유전체(誘電體)에서 캐리어 여기

초고속 레이저를 조사하면 유리 같은 유전체에서 전자 여기와 완화 같은 현상이 수반된다. [30] 전자들은 섹션 1.2.4의 설명 또는 레이저 전기장 강도, 파장길이, 물질의 이온화 포텐셜에 의해서 결정되는 Keldysh 파라미터가 1보다 훨씬 작으면 [ $\gamma \ll 1$ ] 터널링 이온화에 의해 초고속 레이저 광선(다광자 이온화)의 다광자 흡수에 의해서 초기에 원자가 전자대에서 전도대로 여기된다. 여기된 전자는 순차적으로 여러 개의 레이저 광자를 흡수하게 되어 자유 캐리어 흡수가 효율적인보다 높은 에너지 상태로 여기하게 된다. 그렇지 않으면 충분히 높은 레이저 강도에 있어서는 여기된 전자가 초고속 레이저 빔의 강한 전기장에 의해서 가속되어 주변의 원자와 충돌하여 이차전자를 생성한다. [아발란체 이온화]. 생성된 자유전자의 일부는 스스로 잡힌 엑사이톤[Self trapped excitons, STE]를 형성하는 전자홀 페어에서 저장된 에너지를 로칼라이즈 하기 위해 완화된다. 이 완화는 레이저 조사가 끝난 후 1ps 내에 시작된다. 어떤 STE들은 수백 ps내에 영구적인 결함 형성을 완화한다. 유리 가열 역시 레이저 조사 후 수십 ps내에 발생하고 조사된 지점은 수십  $\mu$ s 후에 상온으로 복귀하여 변형이나 손상을 가져 온다. 초고속 레이저 펄스가 유리에 임계강도 이상으로 초점을 모으게 되면 가열에 의한 용융이 일어난다.[31,32] 이 용융은 유리 기판을 용접하는데 이용되고 있다.[33-35]. 또한, 수백 kHz 이상으로 반복적으로 레이저를 작동시키면 조절 가능한 방식으로 상당한 열 축적을 가져오는데 이는 원형 단면의 저손실 광 웨이브가이드를 그리기에 유용하다. [31,32]

### 1.2.7 초고속 레이저 가공의 공간 해상도

1.2.2에서 논의 한 대로 초고속 레이저 펄스는 가공 부위 주변에 열 확산을 억제해 가공에 있어서 공간 해상도를 개선한다. 10ns 레이저 펄스가 구리에 레이저 파장[실제적으로 수백 nm 에서 1  $\mu$ m]과 동일한 크기로 조사되면 열확산 길이가 1.5  $\mu$ m이기 때문에 그 지점 크기보다 가공 부위는 보다 크다. 대조적으로 초고속 레이저 조사에 있어서 열확산은 무시할 정도이기 때문에 가공 부위는 스폿 사이즈 이상으로 확장될 확률은 없다.

비선형 다광자 흡수를 이용하면 같은 파장에서 단광자 흡수보다 공간 해상도가 개선된다. 이상적으로는 초고속 레이저 빔의 세기는 그림 1.3에 굵은 점선으로 표시된 것처럼 가우스 공간 프로파일을 갖게 될 것이고 물질에 흡수된 레이저 에너지의 공간 분배는 이 빔 프로파일과 일치한

다. 그러나 다광자 흡수에서 흡수된 에너지 분포는 보다 좁게 될 것이다. 왜냐하면 다광자의 [n]은 n-포톤의 효율적인 흡수 계수가 레이저 강도의 n승에 비례하여 커지기 때문이다. 그러므로 n-포톤에 대한 효율적인 빔 크기  $\omega$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{n}}, \quad (1.3)$$

여기에서  $\omega_0$ 는 초점으로 모인 레이저 빔의 실제 스폿 크기이다. 그림 1.3은 2개(실선)와 3개(가는 점선)의 광자에 의해 투명한 물질에 흡수된 레이저 에너지의 공간 분포를 나타낸다.

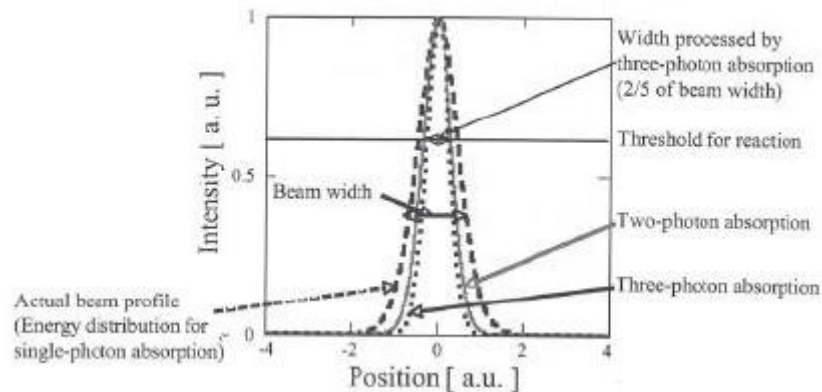


그림 1.3 2개(실선)와 3개(가는 점선)의 광자에 의한 투명한 물질에 흡수된 레이저 에너지의 실제 빔 프로파일(굵은 점선)과 공간 분포. 수평 실선은 반응 역치이다.

식[1.3]에 의하면 공간 해상도는 다광자 흡수에서 기대했던 파장보다 훨씬 작아진다. 흡수 시 반응이 일어나는 임계 레이저 강도가 있는 경우, 레이저 강도를 조정함으로써 제조 해상도를 더욱 향상시킬 수 있다. 예를 들면, 레이저 에너지가 그림 1.3에 수평 실선에 맞추어서 레이저 에너지가 조절되면 가공 해상도는  $(2/5) \times \omega_0$ 로 감소한다. 그러면 비선형 다광자 흡수는 회절한계 이하의 해상도를 실현할 수 있다.[17]

### 1.3 초고속 레이저 재질 가공

#### 1.3.1 표면 마이크로 기계가공

1.2.1과 1.2.2 섹션에서 언급한 바와 같이, 초고속 레이저는 비열적(非熱的) ablation을 하게 되면서 HAZ 형성을 감소시킨다. 그림 1.4(a)와 (b)는 200fs와 3.3ns의 폭을 갖는 레이저 펄스를 사용하여 만든 100  $\mu\text{m}$  두께의 강철 포일에 생긴 홀 드릴의 스캐닝 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)이미지이다.[36] 펨토(fs) 초 레이저 ablation은 날카로운 모서리와 가파른 벽면 형태의 ablation 구멍을 만들어 내어 HAZ가 거의 나타나지 않는다. 대조적으로 ns 레이저 ablation은 ablation 구멍 주변에 큰 용융부위를 생성한다.

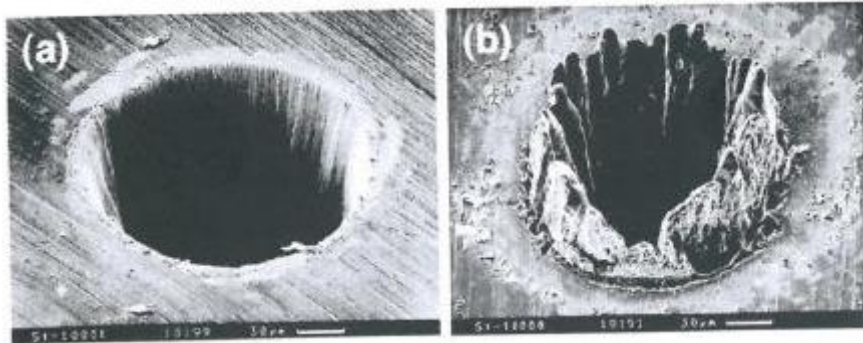


그림 1.4 다음 파라미터로 레이저 펄스를 이용한 ablation에 의한 100  $\mu\text{m}$  두께의 강철 포일에 만들어진 구멍; [a] 펄스 폭:200fs, 펄스 에너지:120  $\mu\text{J}$ , 에너지 束:0.5J/cm<sup>2</sup>, 파장:780nm; [b] 펄스 폭:3.3ns, 펄스 에너지:1mJ, 에너지 束:4.2J/cm<sup>2</sup>, 파장:780nm. 스케일 잣대는 30  $\mu\text{m}$ 이다. A. Ostendorf 제공

초고속 레이저는 유리 같은 깨지기 쉬운 물질에도 고품질의 마이크로 가공이 가능하다. 그림 1.5[a]와[b]는 각각 표면 마이크로 가공의 SEM 이미지와 fs 레이저 ablation에 의한 유리 절단 이미지이다. 양 이미지는 날카로운 에지에 균열이 없는 깔끔한 ablation이 이루어 졌음을 보여 준다.

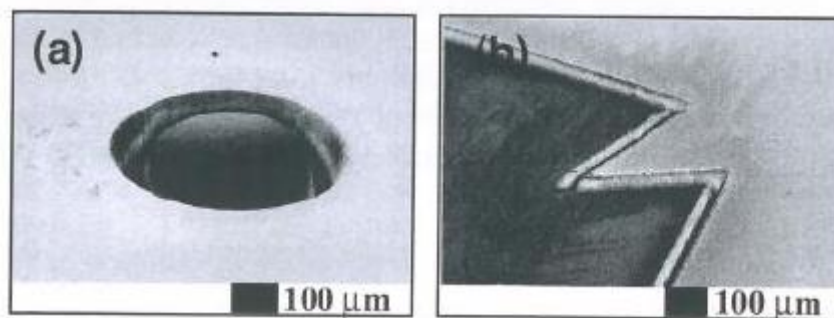


그림 1.5 [a]표면 마이크로 가공의 SEM 이미지 [b] fs 레이저 ablation에 의한 유리 절단 이미지. M. Gower 제공

초고속 레이저 마이크로 기계 가공의 응용 중의 하나는 특별한 모양의 잉크젯 노즐 가공이다. 미국의 파나소닉사는 스테인레스 재질로 된 깔때기 형태의 잉크젯 노즐을 대량 생산하는데 최초로 ps레이저를 사용했다. PC로 조작되는 스캐닝 거울이 장착된 ps레이저에 의한 직접 writing은

그러한 홀을 정밀하고 신속한 가공을 재현성 있게 가능하게 한다.

또 다른 응용 예는 대체혈관 수술의 대안으로 동맥경화에 최소한의 침습적인 치료로 사용되는 동맥 스텐트의 제조이다. 스텐트는 주로 스테인레스 스틸이나 형상기억 합금으로 제조된다. 요구되는 물성을 실현하기 위해서는 이 재질들은 화학적으로 후가공해야 한다. 또한 이 물질들은 재협착과 생체적합성의 제한 같은 위험한 의학적 어려움이 있다. 양호한 생체적합성을 위해서는 Mg 기반의 합금이나 특수한 바이오 중합체가 사용되어야 한다. 그러나 이런 재질 등은 스텐트 제작상의 어려움이 있다. 특히 이런 물질들은 영성한 후가공의 문제와 열 부하에 강하게 반응한다는 문제가 있다. 초고속 레이저 마이크로 기계 가공은 비열적 가공이고 찌꺼기를 거의 남기지 않기 때문에 이러한 문제점들이 해결될 수 있다. 그림 1.6은 후가공 없이 fs레이저 ablation으로 바이오 재흡수성 중합체로 제조된 전형적인 의학적 스텐트이다. [38] 반면에 탄탈륨을 사용하면 보다 확실한 X-레이 가시성이 보장된다. 탄탈륨 같은 연한 재질과 고용점 금속 모두 가공이 가능하다. (참조 그림 5.20 5장) 그러므로 fs 레이저 마이크로 기계가공은 이러한 기능성 재질들 가공에 적합하다.

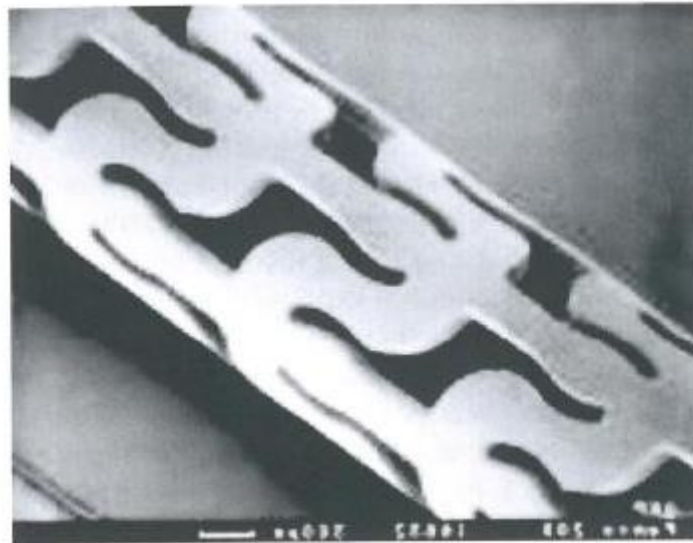


그림 1.6 바이오 재흡수성 중합체로 제조된 의학적 스텐트 시제품.  
Ostendorf 제공

초고속 레이저에 의한 표면 마이크로 기계가공과 패터닝은 5장에서 보다 상세하게 고찰한다.

### 1.3.2 표면 마이크로 및 나노 구조화

다양한 재질들의 표면 조직화는 초고속 레이저 가공에 있어서 중요한 연구 주제이다. 다양한 마이크로 및 나노 조직들은 빔 강도, 공간 및 온도 빔 프로파일, 파장, 편광, 가공 환경 (가스나

액체)같은 가공 파라미터를 조정하여 만들 수 있다.

가장 널리 알려진 조직 구조는 ablation 역치 근처에 초고속 레이저 조사로 형성되는 나노리플(nanoripple)이다. 이는 ns나 보다 긴 펄스로 재질에 조사(照射)하여 형성되는 주기성 그레이팅 구조 [즉, 레이저 유도 주기 표면 구조, laser-induced period surface structures:LIPSS]로 알려져 있다. 그러한 구조들은 반사(산란)광으로 간섭이 일어난 레이저 입사광에 의해서 생긴다고 사료된다. 결과적으로 리플들은 입사 편광에 일반적으로 수직을 이룬다. 가공 구조의 간격은  $\lambda/n[1\pm\sin\theta]$ 이다. 여기에서  $\lambda$ 는 레이저 파장이고,  $\theta$ 는 레이저 입사각,  $n$ 는 물질의 굴절 계수이다.[40,41]. 그러므로 간격(스페이싱)은 파장과 같은 지수 값을 갖거나 그 보다 크다. 반면, fs 레이저 조사로 형성된 주기성 그레이팅 구조는 레이저 파장보다 간격이 훨씬 작다.[42] 나노 스케일 주기성 그레이팅 구조(나노 리플)는 금속[43], 세라믹[11,44], 반도체[45], 절연체[9, 46] 같은 다양한 금속 표면뿐 아니라 유리[9,47] 같은 투명 물질 내에도 형성될 수 있다. 그림 1.7은 파장 800nm의 100fs 레이저 펄스를 Cu에 조사하여 형성된 나노리플 간격의 레이저 influence 종속성을 나타낸다. Cu표면에 형성된 그레이팅 구조는 레이저 fluence와 무관하게 레이저 편광화에 수직 방향을 이룬다. 낮은 ablation 역치[~0.04J/cm<sup>2</sup>] 근처의 fluence에서 그레이팅 구조의 스페이싱은 300nm인데 이는 레이저 파장 800nm보다 훨씬 좁다. 간격은 레이저 influence가 2J/cm<sup>2</sup>까지 증가하면서 증가하지만 파장보다는 좁게 유지된다. fs 레이저 조사로 형성된 나노 조직화 표면은 움직이는 부위 사이의 마찰과 마이크로 및 나노 성분의 접착력을 감소시키고 박막과 의학 임플란트의 접착력을 좋게 한다.

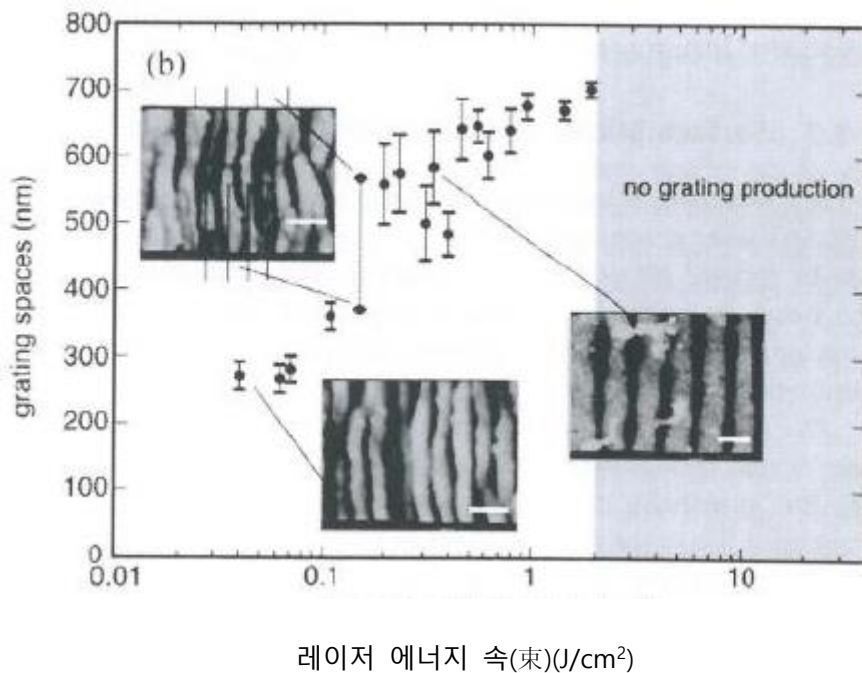


그림 1.7 파장 800nm의 100fs 레이저 펄스를 Cu에 조사하여 형성된 나노리플 스페이싱의 레이저 속(束) 종속성(스케일 바:660nm). M. Hashida 제공

초고속 레이저 조사로 형성된 또 다른 흥미롭고 유용한 구조는 할로겐 환경[즉, SF<sub>6</sub>나 Cl<sub>2</sub>]과 수백의 fs레이저 펄스를 Si에 조사하여 만들어 지는 원추형 마이크로 구조의 일정한 어레이들이다.[49, 50] 생성된 구조는 입사광 반사를 감소시켜 소위 블랙 실리콘이라고 불리는 것을 나타나게 하여 심지어는 적외선[IR] 영역에서도 흡수가 크게 증대된다. 이 기술은 태양광 전지의 효율을 증진시키는데 효과적이다.[53]. 반면 시레인(silane)분자층에 의한 코팅 구조화 표면은 자정 제품(self-cleaning product)[50,54]을 만드는데 사용될 수 있는 연잎효과에 의해 초소수성(superhydrophobic) 표면을 형성한다. 유사한 구조들이 다른 재질에서도 형성 가능하다.[55]

6장에서는 초고속 레이저를 이용한 표면 마이크로 및 나노 구조화를 보다 상세히 설명한다.

### 1.3.3 나노 ablation

HAZ를 감소시키는 초고속 레이저 가공의 탁월한 특성은 작은 파장 해상도에서 나노 ablation이 수행될 수 있게 한다[56,57]. 그림 1.8은 쌍광자 흡수에 기반한 fs 레이저 ablation에 의해서 GaN 표면에 형성된 나노 홀 어레이를 나타낸다. 근 적외선 fs레이저[ $\lambda=387\text{nm}$ ; 펄스 폭:150fs]의 2차 하모닉은 수치 동공(numerical aperture:NA) 0.9인 대물 렌즈를 통해 싱글 크리스털 GaN 기질에 초점을 이루었다. ablation된 샘플은 잔여 찌꺼기를 제거하기 위해 염산[HCl]에 후처리 되었다. Ablation 함몰구의 크기는 200nm였다. 무시할 정도의 HAZ외에도 그 함몰구의 직경은 다광자 흡수[참조 그림 1.3]에서 반응의 비선형성으로 레이저 파장보다 훨씬 작다.

더욱이, fs레이저의 멀티빔 간섭으로 실리카 유리에 놓여진 Au 박막에 새로운 나노 스케일[즉, 나노 범프, 나노벨트, 나노메쉬]구조가 형성되었다[8,58,59]. 이러한 과정에서 가공 영역에서 주변 영역으로 열확산 억제 는 필수적인 것이다. 투과 빔 분산기가 달린 축소 광 시스템이 멀티빔 간섭을 실현하기 위해 fs레이저 빔을 분리 및 상호 연결하려고 사용되었다. 레이저 influence, 간섭 패턴의 주기, Au 막 두께, 기질의 재질 같은 가공 파라미터를 세심하게 조절하여 고유 나노구조들이 형성될 수 있었다. [참조 그림 1.9]

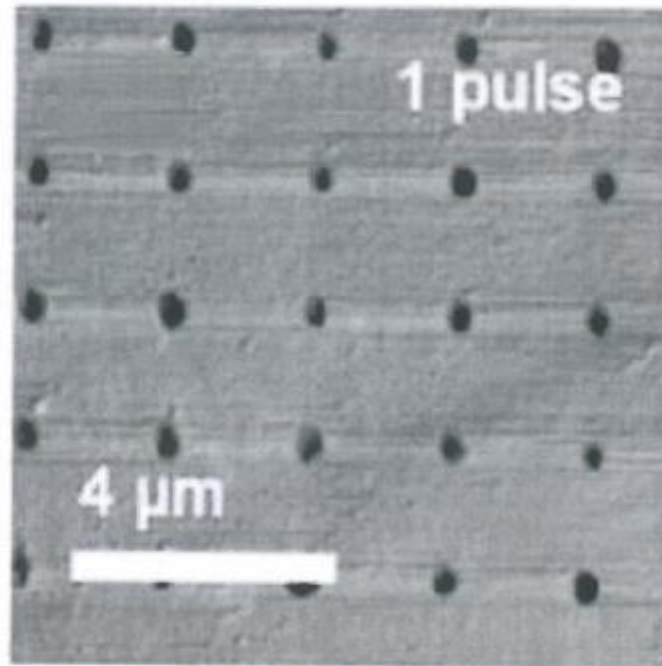


그림 1.8 fs레이저 ablation으로 가공된 GaN 표면상의 2D 나노홀 어레이.  
 파장:387nm, 펄스폭:150fs; 펄스 에너지:10nJ; NA:0.9

사파이어[0001] 위에 10nm 두께의 금 박막에 4 빔 간섭 fs레이저[130fs, 790nm]에서 나오는 싱글 펄스를 조사하였더니 나노물방울이 생성되었다[그림 1.9(a) 와 (b)][60]. 이 간섭 무늬는 1.3  $\mu\text{m}$ 의 주기를 갖는다. 그 구조는 약 800nm 높이이고, 방울과 목 직경은 각각 75와 18nm였다. 넓은 주기 간섭 패턴[3.9 $\mu\text{m}$ ]와 사파이어보다 열전도가 높고 파장 길이에 불투명한 실리콘[100] 기질을 사용하면 나노워터 크라운을 형성하게 된다[그림 1.9(c)와 (d)][61]. 반면에 주기 1.7 $\mu\text{m}$ 와 사파이어[0001] 기질에는 용기 위에 날카로운 상층부와 15nm이하의 곡률반경의 돌기의 나노휘스커가 형성된다[그림 1.9(e) 와 (f)][62]. 그림 1.9에 나타난 스파이크 모양의 구조는 필드 상승을 초래하여 나노기술 응용에 유망하다. 초고속 레이저 가공이 열효과가 최소화되는 비열적 기술임에도 불구하고 열 가공(즉, 용융, 플로우, 구부림 및 인플레이션)은 이러한 고유 나노구조들을 생성해 낸다.

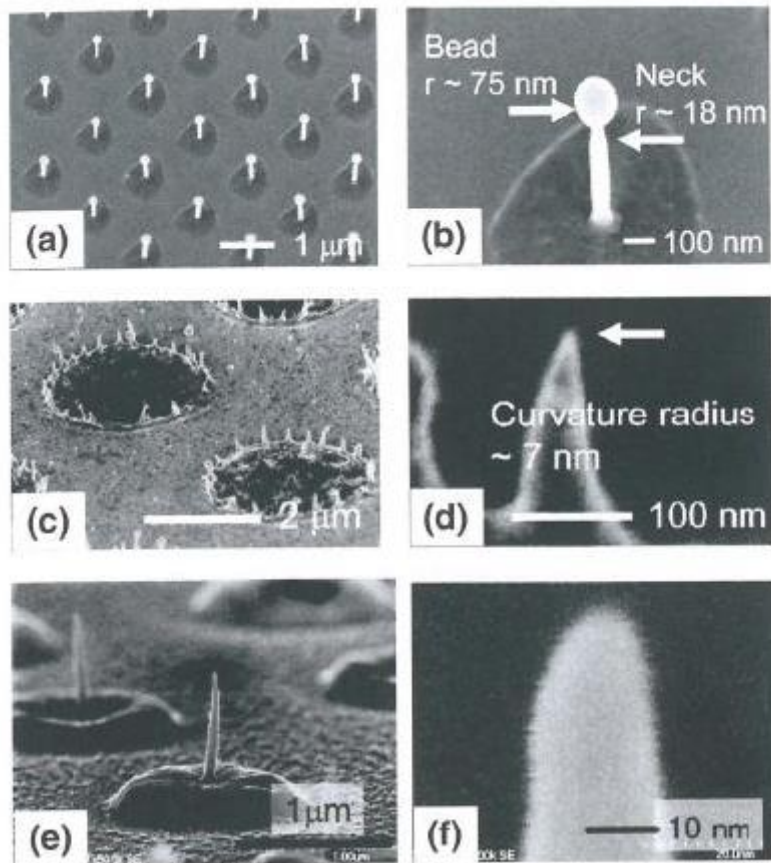


그림 1.9 금박에 생성된 나노 구조들. [a]나노 물방울 어레이 [b] 사파이어(0001) 기질 위에 10nm 두께 박막 상에 나노 물방울의 확대 영상 [c]나노크라운 어레이 [d] 실리콘 위에 50nm 두께 박막에 나노크라운 스파이크 [e]나노휘스커 [f] 사파이어(0001) 기질 위에 50nm 두께 박막 상에 나노 휘스커의 확대 영상. Y. Nakata 제공.

나노가공의 또 다른 시도는 광학적 근거리 장에 의한 초점을 이룬 레이저 빔의 회절 효과를 극복할 수 있는 고급 조사 방법의 개발이다. fs레이저 빔을 스캐닝 근거리 장 광학 현미경[SNOM], 스캐닝 터널링 현미경[STM], 원자력 현미경[ATM] 같은 스캐닝 탐지 현미경의 나노팁과 같이 사용하면 나노스케일 해상도를 갖는 패턴을 얻을 수 있다.[63, 64]. 최근에선 금속과 유전체 나노구를 사용하는 나노 ablation이 광범위하게 연구되었다[65,66]. 서브 파장 구조에 대한 형성 메커니즘은 나노구 근처에서 개선된 근거리 장에 의한 ablation이다. 이 방법은 반도체, 금속, 유전체를 포함한 다양한 재질 표면에 나노홀을 만드는데 사용될 수 있다. 7 장에서는 나노칩과 나노구에 의해 개선된 광 근거리 장에 의한 나노 ablation을 보다 상세히 설명한다.

### 1.3.4 쌍광자 광중합

레이저 스테레오리토그래피(광조형 방식)[즉, 입체 광중합]에 의한 신속한 3D구조 시제품제작

은 디자인 검증, 작업 모델제작, 기능 및 성능 시험, 직접사출 금형 제조, 메디칼 모델 제작에 상업적으로 이용된다.[67]. 이 공정에서 초점을 이룬 자외선 레이저 빔[통상적으로 He-Cd레이저]은 광경화 에폭시 레진에서 상승 단계에 제 1층의 면에서 스캔되어 진다. 이 에폭시 레진은 처음에는 액체이나 단광자 흡수에 의한 레이저 조사로 고화된다. 이 상승 단계는 그 이후 아래로 이동하여 레이저 빔이 2차 층의 면에서 스캔을 한다. 이 과정을 층마다 반복하여 3차원 구조가 만들어 진다.

근거리 적외선 fs레이저가 스테레오리소그래피의 광원으로 사용되면 쌍광자 흡수에 의한 상승 단계로 이동하지 않고 3차원 구조가 직접 형성될 수 있다[참조 그림 1.10]. 근거리 적외선 fs레이저를 사용한 스테레오리소그래피를 쌍광자 광중합(TPP)라 명명한다. TPP의 중요한 특징의 하나는 서브-파장 공간 해상도이다[참조 그림 1.3]. Kawata 외는 기네스북에 등재되어 알려진 TPP에 의한 가장 작은 황소를 만들었다[17]. 이 경우에 폭 공간 해상도는 120nm였다.

고체 resist는 3D 마이크로 구조를 직접 생산하기 위한 에폭시 레진을 대신할 수 있다. Perry 그룹은 fs레이저를 이용하는 쌍광자 흡수로 오가닉 광활성 재질(bis-donor 페닐렌 비닐렌)을 사용하는 복잡한 3D 마이크로 구조와 위상학적으로 복잡한 구조를 만들었다[68-70]. 만들어진 마이크로 구조는 다른 재질로 채워지거나 코팅 될 수 있다. TPP와는 달리 이 가공은 적합한 광 resist를 선택[negative 또는 positive resist]함에 따라서 bottom-up 생산과 top-down생산을 가능하게 한다. 예를 들면, positive tone resist는 재질에 문힌 미세채널 공을 가공하는데 적합하다.

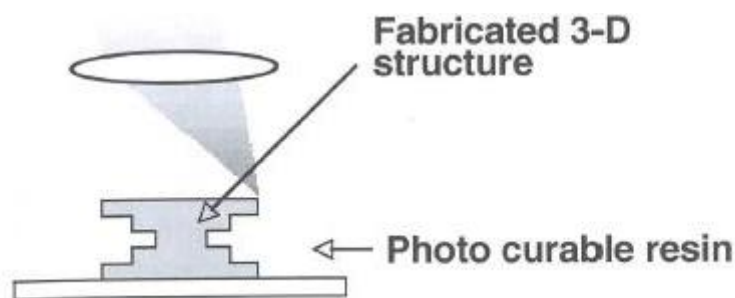


그림 1.10 근거리 자외선 fs레이저와 광경화 레진을 이용한 쌍광자 광중합에 의한 3D 마이크로 구조의 직접 제조에 사용되는 공정의 모식도 설명

fs레이저를 이용한 쌍광자 광중합과 photolithography는 현재 광학 크리스탈 [68,71,72], 마이크로와 나노 시스템[73,75], lab-on-a-chip[LOC] 장치 [76,77], 메디칼 및 티슈 엔지니어링[78,79]의 연구에 광범위하게 이용되고 있다. 그림 1.11은 메디컬 및 조직공학에 사용되는 TPP로 가공된 3D 마이크로 구조들의 예시들이다. 이 기법들은 약 100nm정도의 해상도를 갖는다; 그 해상도는 레이저 파워와 스캐닝 속도를 세심히 조정하여 25nm까지 올릴 수 있다.[80]

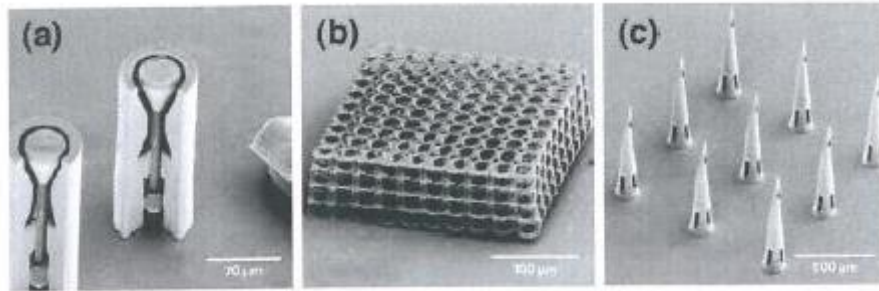


그림 1.11 TPP로 가공된 3차원 마이크로 구조들. [a] 인체 정맥에서 혈류 역류를 방지하기 위해 고안된 마이크로 밸브. 내부가 보이도록 밸브 커버만을 만들었다. [b] 다 기공 티슈 엔지니어링 틀의 스캐닝 전자 현미경 이미지 [c] 경피 약제 전달용 시험 마이크로 바늘 어레이. B. Chichkow 제공

전기 전도성의 3D 금속 마이크로 구조는 광경화 레진을 사용하는 대신 금속이온을 포함하는 수용액을 사용하여 제조할 수 있다[즉, 은 침착용으로는 은화나트륨염[AgNO<sub>3</sub>] 수용액, 금 침착용으로는 사염화금화수소[HAuCl<sub>4</sub>]][81]. 이 과정은 수용액에서 쌍광자로 유도된 금속의 이온감소를 기반으로 한다. 그러한 3D 마이크로 구조는 마이크로 전자기계적 시스템(MEMS), LOC, metamaterial 등에 사용된다.

11장에서는 TPP를 이용한 3D 마이크로 구조 가공과 그 응용에 대해서 보다 상세히 설명한다.

### 1.3.5 투명 물질의 내부 변화

섹션 1.2.5에서 설명한대로 초고속 레이저는 유리의 내부를 변화시키는데 사용될 수 있다. 1996년 Davis외는 초고속 레이저로 굴절율을 영구히 바꾸었고 이는 초고속 레이저에 의한 유리내부에 광 웨이브가이드를 가공으로 적용되었다[13]. 현재 많은 연구자들은 용융 실리카[31, 82], 보로실리케이트 유리 [31, 83], chalcogenide 유리[84, 85]를 포함하는 다양한 유리 내부에 만들어지는 광 웨이브가이드에 대한 연구를 진행 중이다. 만들어진 광 웨이브 가이드는 제작하는데 사용된 파라미터에 따라서 2-25μm 범위의 코어 직경[그 굴절율은 10<sup>-4</sup>에서 10<sup>-2</sup>로 증가함]을 갖는다. 용융된 실리카에 만들어진 광 웨이브가이드는 파장 633nm에서 ~0.2dB/cm 정도의 전파(傳播) 손실을 갖는 것으로 추정된다[86]. 광 웨이브가이드는 또한 투명한 중합체에 만들 수도 있다[15, 16]. 자외선 통과 중합체에 만들어진 광 웨이브가이드, CYTOP는 파장 355와 266에서 각각 0.77, 0.91dB/cm의 전파손실로 자외선을 전달할 수 있다.[16]

굴절률 변경은 광 커플러 및 분리기 [87], 볼륨 Bragg그레이팅[88], 회절 렌즈[89], 레이저[90, 91] 같은 3D 광 마이크로 장치를 가공하는데 사용되었다. 예로서, 초고속 레이저로 활성 재질에

만들어진 광 웨이브가이드 (예, erbium-ytterbium-doped phosphate 유리)는 파장  $1.5\mu\text{m}$ 에서 소형의 효율적인 싱글-수직-모드로 작동하고 55mW까지의 최대 출력을 갖는다[90]. 하나의 간섭된 fs 레이저 펄스를 사용한 만들어진 광 웨이브가이드에서 굴절률 변조 볼륨 그레이팅을 인코딩하여 불화리튬에 사용하는 피드백 레이저가 실현되었다[91]. 9장에서는 초고속 레이저를 사용한 내부 변경에 의한 3D 포토닉 장치의 제작에 대해서 보다 상세히 설명한다.

초고속 레이저에 의한 다광자 흡수는 doped 이온[92]의 원자가 상태 변화, 물질에서 성분을 재배열[93], 원자 침전[94], 입자 결정화[95]를 포함하여 굴절률 변경 외에도 재미있는 공간 선택적 현상을 유도할 수 있다[참조 8장].

초고속 레이저에 의한 다광자 흡수는 물질 내의 레이저 조사 지역의 화학적 성질을 변경시킬 수 있다. 초고속 레이저의 직접 가공 후 묽은 HF산에서 화학적 습식 에칭은  $10\mu\text{m}$  직경의 3D 마이크로 유체 채널, 채널 사이의 각과 높은 aspect ratio를 포함하여 3D 마이크로 hollow를 만들었다. 은과 광센싱 유리인 세리움 추적량으로 doped된 리튬 알루미늄실리케이트는 습식 에칭[97, 98]이전에 열처리가 필요하긴 하지만 고효율이고, 처리량이 높고, 에칭면이 깔끔하기 때문에 이러한 응용에 있어서 보다 흥미로운 물질이다. 이 기법은 3D 마이크로 fluidics 제조뿐 아니라 마이크로미러[99]와 마이크로렌즈[100]같은 유리 내에 동공 구조에 기반한 마이크로옵틱스를 제조하는데 응용된다. 또한, 제조된 3D 마이크로 구조물은 초고속 레이저로 만들어진 광 웨이브가이드와 광 필터 같은 광학적 요소와 쉽게 통합되어 optofluidic, LOC 장치들이 화학적 생물학적 응용에 구현될 수 있도록 한다[101-103]. 그림 1.12[a]는 fs레이저의 직접 가공으로 제조된 광인식 유리에서 광 웨이브가이드로 결합된 3D microfluidics의 도식적인 설명이다; 이는 물속의  $\text{CO}_2$  농도를 정량적으로 분석하는데 사용될 수 있다. 분석을 위해서 microfluidic 채널은 브로모티몰 블루(BTB)용액이 포함된 액체 샘플이 채워지고 백색광은 웨이브가이드 I의 한 면과 결합된다. 웨이브가이드 I에 의해 전달된 백색광은 액체 샘플로 채워진 microfluidic 채널을 통과해서 전파되어 웨이브가이드 II에 결합된다. 분광기의 탐지 헤드는 웨이브가이드 II에 의해서 투과된 백색광의 스펙트럼을 측정하기 위해 웨이브가이드 II의 마지막 면에 위치한다. 그림 1.12[b]의 녹색 선은 BTB용액을 포함한 순수한 물의 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 다양한  $\text{CO}_2$  농도의 탄소수 샘플들은 pH가 달라 서로 다른 흡수 스펙트럼을 생성한다. BTB용액을 포함한 순수한 물의 광학적 흡수 스펙트럼은 약  $620\text{nm}$ 의 파장에서 고흡수를 나타낸다.

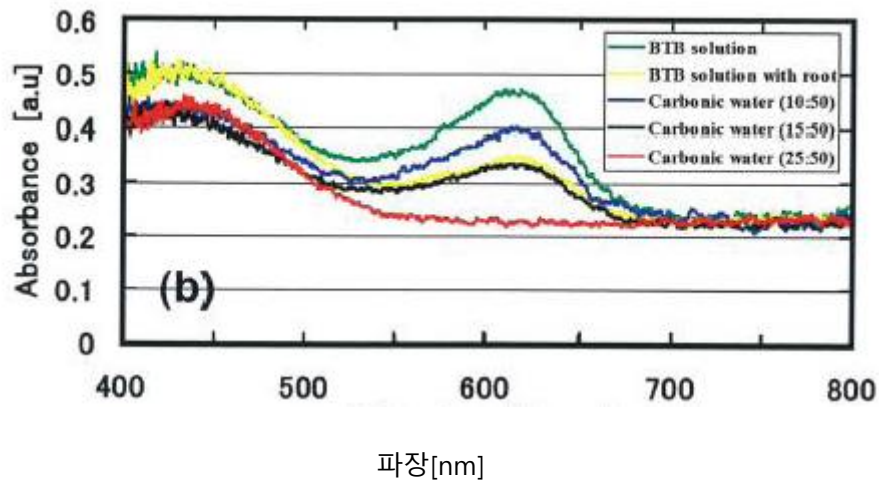
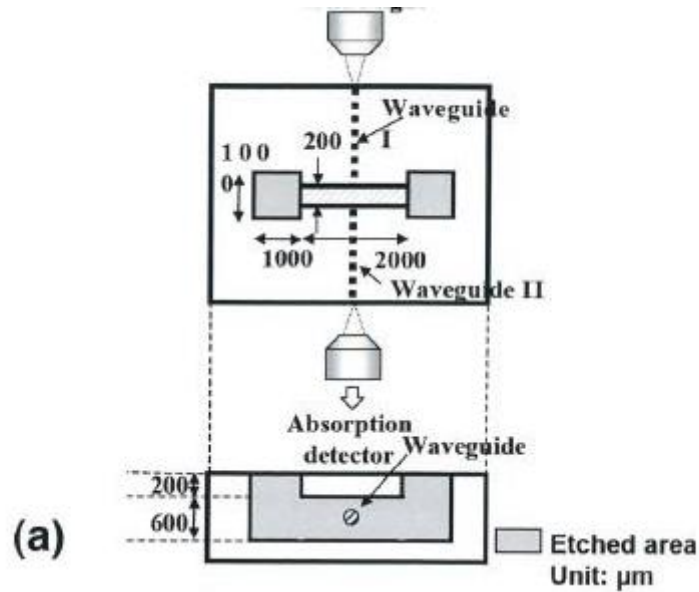


그림 1.12 [a] 물속에 포함된  $\text{CO}_2$  농도의 정량적 분석을 위해 fs레이저의 직접 writing에 의한 광센싱 유리에서 광 웨이브가이드가 결합된 3D microfluidics의 모식적 설명  
 [b] 파종 뿌리[황색]와  $\text{CO}_2$  가 다른 탄소수 ([청색] [10mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O], 흑색 [15mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O], 적색 [25mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O])에 의한 BTB 용액[녹색]을 포함한 물의 광학적 흡수 스펙트럼.

이 피크는  $\text{CO}_2$  농도가 감소하면서 pH가 줄어들면 약간 낮아지고[10mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O] 보다 농축된 탄소수가 유입되면 더욱 낮아진다[15mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O]. 이 피크는 가장 높은  $\text{CO}_2$  농도 [25mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O]의 탄소수에서는 완전히 사라진다. 그림 1.21[b]의 황색선은 식물 파종 뿌리와 BTB용액을 포함한 순수물의 흡수 스펙트럼을 보여준다; 이는 15mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O의 탄소수의 흡수 스펙트럼과 거의 같다. 이는 뿌리의 호흡에 의해 생성된  $\text{CO}_2$  농도는 15mLCO<sub>2</sub>:50mLH<sub>2</sub>O의 탄소수의 농도와 비교할 수 있음을 보여주는 것이다. 이 실험은 식물 성장을 촉진하는 미생물인 Phormidium의 글라이딩 움직임을 유도하는데 필요한  $\text{CO}_2$  응집 재료가 필요하다는 것을 보여준다. 10장에서는 초고속 레이저에 의한 유리에서의 optofluidics와 biochip의 가공에 대해서 보다 상

세히 설명한다.

### 1.3.6 바이오 메디칼 응용

근거리 적외선 fs레이저는 상호작용 지역을 작은 3D 볼륨으로 제한 시킬 수 있기 때문에 세포와 티슈의 이미징과 프로세싱에 좋은 도구이다[104]. fs레이저가 초점을 이루면 티슈, 세포, 세포 외 구조의 절개[105], 해부[106], 세포도입[107]을 포함한 나노 수술을 시행할 수 있다. fs레이저로 금속 나노입자를 사용하는 광 근거리장의 개선에 대해서는 1.3.3 섹션에서 설명한다; 이 또한 유용한 나노수술 기법이다[108].

fs 레이저 빔을 액체에 쪼이면 충격파와 버블이 생성된다.[109]. 이 fs레이저 유도 현상은 중합체 결정화[110], 단백질 큐브와 셀 패터닝[111], 세포 속에 나노입자 주사[112], 배양 세포의 국부적 자극[113], 단 배양 세포의 격리[114]에 사용된다.[110]

바이오 의학에서 fs 레이저의 실용적인 하나의 응용 사례는 레이저를 사용하여 근시, 원시, 난시 교정에 사용되는 굴절 수술인 현상 라식이다.[115] 그림 1.13은 fs레이저가 각막 내에 컷을 만들어 플랩과 렌즈체를 만든 영장류 각막의 SEM 이미지이다. 각막 플랩을 만들기 위한 fs레이저 시스템[펨토-라식]은 현재 시장에서 구매할 수 있다. 이는 종래의 기계식 라식 보다 정밀하고 예측성이 높다.[116]

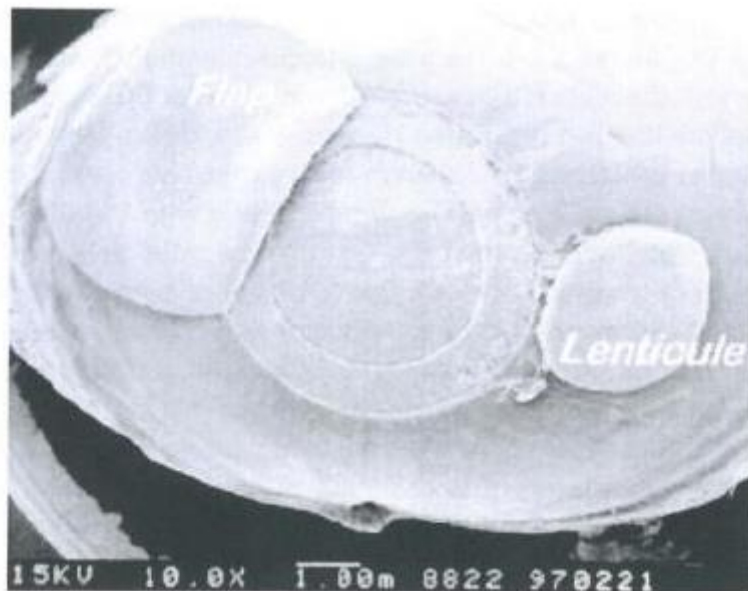


그림 1.13 fs레이저가 각막 내에 컷을 만들어 플랩과 렌즈 체를 만든 영장류 각막의 SEM 이미지. F. Dausinger 제공

### 1.3.7 산업 및 상업적 응용

반도체 제조 분야에서 초고속 레이저 가공의 응용 중에 하나는 심층 자외선 photolithography ablation에 의한 크롬 용융 실리카 포토마스크의 정비이다. 266nm 파장의 100fs 펄스는 100nm 보다 우수한 공간 해상도를 구현하였다. [117] 초고속 레이저 기반의 포토마스크 정비 도구 IBM의 마스크 제조 설비에 사용되었다.[37]

초고속 레이저를 대량 생산 공정에 최초로 사용한 것은 ps레이저 ablation에 의한 특정 모양의 잉크젯 노즐의 드릴링이었다 [참조 1.3.1 섹션][37]. 현재 ps레이저는 그 고출력, 효율, 신뢰성, 안정성 때문에 산업적 응용에 있어서 fs레이저 보다 우수하다.

약 10년전에 초고속 레이저 가공은 미니어처 만들기, 고정밀, 고품질, 다양한 재질에 응용성, 파생품 다양화, 소형 면적, 가격효율성을 포함한 자동차 산업의 다양한 요구를 만족시키는 가능성을 보여 주었다[118]. 2007년 이후 ps레이저 트리밍은 독일 밤베르크의 보쉬 공장에서 배출 가스 센서를 생산하는데 사용되었다[참조 그림 1.14]. 특수 세라믹 층으로 전통적인 센서보다 배출 가스의 성질을 보다 신속하고 정밀하게 측정이 가능했다. 이는 연소 조절을 최적화하여 배출을 감소시킬 수 있었다. 또한, 2009년 이후, ps레이저는 디젤 엔진 인젝터에서 고압 통로 주변에 미세 구조화된 드레인 홈을 가공하는데 사용되었다[12장 그림 12.4 참조]. ps레이저로 만든 배출 홈은 2000bar에 달하는 압력에서도 견뎌내는 시스템을 가능하게 한다. 결과적으로 디젤 인젝션 시스템은 보다 우수한 신뢰성, 출력 및 환경 친화성을 갖게 되었다.

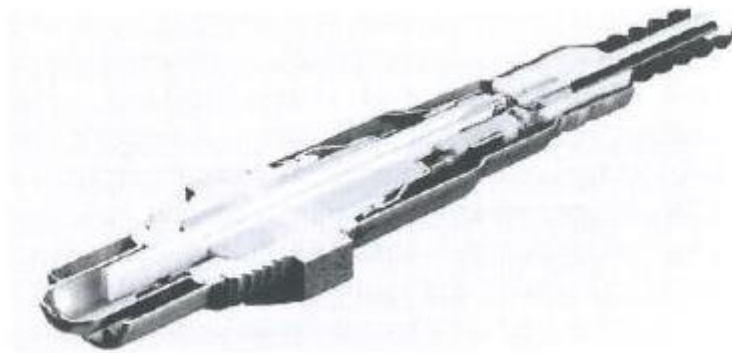


그림 1.14 ps레이저 트리밍으로 생산된 배출 가스 센서의 단면

ps레이저는 Cu-Id-Ga [di]selenide[CIGS]나 CIS 기반의 태양광 전지 제조에 있어서 새김과 패턴 만들기에 유용한 도구이다[119]. 패턴 만들기에 있어서는 셀[P1]과 후면접촉[M0]을 분리시키고 윗 부분으로부터의 선택적으로 CIGS층[P2]을 제거하고, 선택적으로 흡수체와 전면접촉[투명한 전도성 산화제: transparent conductive oxide:TCO][P3]을 제거할 필요가 있다. 종래의 P2, P3 공정이 기계

적 새김 도구를 사용하여 이루어지는 반면에 ns레이저는 P1공정에 광범위하게 사용된다. 이는 CIGS 태양광 전지의 구조물 때문이다. 구체적으로는 CIGS 태양광 전지를 제조할 때 금속 후면 접착부는 유리 기질에서 첫 번째로 증착되고 모듈의 뒷면에 넓은 반사층을 형성한다. 이 흡수기와 앞면 접착 TCO 층은 위에 증착되고 이 레이저들은 금속으로 된 후면접착부 손상을 방지하기 위해서 앞부분부터 가공되어야 한다. ps레이저 가공은 밑에 있는 층에 열적 손상을 거의 일으키지 않기 때문에 P2와 P3의 기계적 새김을 대체할 수 있는 것이다. 그러나 이 채택은 공정이 미완성이고 종래의 ns레이저 가공보다 비싸기 때문에 현재로서는 제한적이다.

12장에서는 초고속 레이저 가공의 산업 및 상업적 응용에 대해서 보다 상세히 설명한다.

## 1.4 요약 및 전망

초고속 레이저 가공은 ns나 더 긴 펄스 레이저를 사용하는 전통적인 레이저 가공보다 장점이 있기에 1987년에 처음 실험한 이후로 재료 가공에 새로운 장을 열었다. 이러한 장점들에는 비열적 가공, HAZ 억제, 플라즈마 실딩의 부재, 다광자 흡수에 의한 투명 물질 가공, 투명 재질의 내부 변경, 나노 가공성들이 포함된다. 초고속 레이저는 현재 기초 연구와 실용 응용 모두에 공통적인 틀이 되고 있다. 초고속 레이저는 금속, 연성재질(중합체와 바이오 티슈), 깨지기 쉬운 재질(예, 유리)을 포함한 다양한 재질에 고품질, 고정밀 표면 마이크로 기계가공을 수행할 수 있다. fs 레이저 조사로 생성된 나노 및 마이크로 구조 표면은 마찰, 접착, 광학적 흡수, 소수성의 관점에서 고유하고 유용한 특성을 갖는다. 또한, 서브 파장 나노스케일 ablation이 가능하고 나노범프, 나노벨트, 나노메쉬, 나노물방울, 나노워터크라운 나노휘스커 같은 나노 구조물들을 레이저 조사 조건과 타겟 재질의 구조를 최적화하여 생성할 수 있다. 100nm 공간 해상도는 포토닉 크리스탈, 마이크로 및 나노 시스템, LOC 장치를 제조하기 위해 TPP를 사용하는 경우 구현될 수 있다; 25nm보다 우수한 해상도가 구현되었다. 투명 재질의 내부 변형은 초고속 레이저를 사용해야만 가능하다; 이는 3D 광 마이크로 장치와 optofluidic 및 LOC장치를 제조하는데 광범위하게 사용된다. 유리 기질에 마이크로 웰딩은 초고속 레이저에 의한 내부 변형에 있어서 새로운 주제이다.

초고속 레이저 펄스의 공간 및 시간 프로파일을 변경하는 것은 마이크로 및 나노 가공에 있어서 매우 흥미 있는 일이고 이는 이 분야에서 가장 관심 있는 주제 중의 하나이다. 공간 조작은 높은 처리량, 고에너지 효율 레이저 가공을 구현하는데 효과적이다[120-122]. 초고속 레이저 펄스의 시간적 조작은 투명 물질[123-125]의 고품질 ablation과 나노스케일 ablation을 구현하는데 사용된 이동 자유전자 밀도[123]의 조절 가능성을 제공한다. 4장에서는 초고속 레이저 펄스의 조작에 대해서 보다 상세히 설명한다.

이 책에서 설명은 하지 않았지만 초고속 레이저는 재질에 상당한 고온과 고압을 생성할 수

있기 때문에 metastable 재질을 합성할 가능성이 있다. fs 레이저에 의한 충격은 철의 고압의  $\epsilon$  위상을 생성하는데 사용된다. fs 레이저 펄스가 시발한 마이크로 폭발은 사파이어 내에서 380Gpa 이상의 압력을 생성하여  $\sim 18 \pm 2 \text{nm}$ 이 결정격자 크기의 bcc-Al을 생성한다[127, 128]. 초고속 레이저 가공의 이러한 고유한 특성은 미래에 초고속 레이저에 특별한 새로운 공정을 개발할 수 있는 가능성을 제공한다.

초고속 레이저, 특히 ps 레이저는 현재 산업 및 실제적 응용에 사용하기에 적합하다. 나노 스케일 해상도로 포토마스크의 정비와 잉크젯 노즐 공 가공은 이미 실현되었다. 또한 초고속 레이저는 자동차 생산 및 전자 산업에 사용될 충분한 잠재성이 있다. 태양광전지에 새김과 패턴 만들기에 더불어 활성 매트릭스 유기 엘이디[AMOLED] 디스플레이에 패터닝과 Si와 IC의 3차원 조립을 위한 [TSV]를 통한 Si 가공은 전자산업에 응용 가능하다. fs 레이저의 의학적 응용으로서 각막 플랩을 형성하는 펨토-라식 시스템은 현재 상업적으로 사용된다.

fs 레이저의 성능은 산업적 응용으로는 충분하지 않지만 가까운 장래에 좋아질 것이다. 초고속 레이저 시스템 성능이 신속히 개선되면 초고속 레이저 가공의 연구와 실용적 응용이 더욱 확대될 것이다.

## References

1. Srinivasan R., Sutcliffe E., and Braren B. (1987). Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160fs) ultraviolet (308nm) laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1285-1287.
2. Küper S. and Stuke M. (1987). Femtosecond UV excimer laser ablation, *Appl. Phys.*, **B44**, 199-204.
3. Küper S. and Stuke M. (1989). Ablation of polytetrafluoroethylene (Teflon) with femtosecond UV excimer laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 4-6.
4. Küper S. and Stuke M. (1989). Ablation of UV-transparent materials with femtosecond UV excimer laser pulses, *Microelectron. Eng.*, **9**, 475-480.
5. Momma C., Chichkov B. N., Nolte S., Alvensleben E., Tünnermann A., Welling H., and Wellegehausen B. (1996). Short-pulse laser ablation of solid targets, *Opt. Commun.*, **129**, 134-142.
6. Yanik M. E, Cinar H., Cinar H. N., Chisholm A. D., Jin Y. 1., and Ben-Yakar A. (2004). Neurosurgery: Functional regeneration after laser axotomy, *Nature*, **432**, 822.
7. Barsch N., Korber K., Ostendorf A., and Tönshoff K. H. (2003). Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses, *Appl. Phys.*, **A77**, 237-242.
8. Nakata Y., Okada T., and Maeda M. (2002). Fabrication of dot matrix, comb, and nanowire structures using laser ablation by interfered femtosecond laser beams, *Appl. Phys. Lett.*, **81**,

4239-4241.

9. Reif J., Costache F., Henyk M., and Pandelov S. V. (2002). Ripples revisited: non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics, *Appl. Surf. Sci.*, **197198**, 891-895.
10. Wu Q., Ma Y., Fang R., Liao Y., Yu Q., Chen X., and Wang K. (2003). Femtosecond laser-induced periodic surface structure on diamond film, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1703-1705.
11. Rudolph P. and Kautek W. (2004). Composition influence of non-oxidic ceramics on self-assembled nanostructures due to fs-laser irradiation, *Thin Solid Films*, **453-454**, 537-541.
12. Miyaji G. and Miyazaki K. (2006). Ultrafast dynamics of periodic nanostructure formation on diamondlike carbon films irradiated with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 191902 .
13. Davis K. M., Miura K., Sugimoto N., and Hirao K. (1996). Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, **21**, 17291731.
14. Glezer E. N., Milosavljevic M., Huang L., Finlay R. J., Her T. H., Callan J. P., and Mazur E. (1996). Three-dimensional optical storage inside transparent materials, *Opt. Lett.*, **21**, 2023-2025.
15. Watanabe W., Sowa S., Tamaki T., Itoh K., and Nishii J. (2006). Threedimensional waveguides fabricated in poly(methyl methacrylate) by a femtosecond laser, *Jpn.J. Appl. Phys.*, **45**, L765-L767.
16. Hanada Y., Sugioka K., and Midorikawa K. (2010). UV waveguides light fabricated in fluoropolymer CYTOP by femtosecond laser direct writing, *Opt. Express*, **18**, 446-450.
17. Kawata S., Sun H. B., Tanaka T., and Takada K. (2001). Finer features for functional microdevices, *Nature*, **412**, 697- 698.
18. Rudd J. V., Korn G., Kane S., Squire J., Mourou G., and Bado P. (1993). Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti-A1203 regenerative amplifier, *Opt. Lett.*, **18**, 2044-2046.
19. Arai A., Bovatsek J., Yoshino F., Liu Z., Cho G. C., Shah L., Fermann M. E., and Uehara Y. (2006). Fiber chirped pulse amplification system for micromachining, *Proc. SPIE*, **6343**, 63430S .
20. Kleinbauer J., Eckert D., Weiler S., and Sutter D. H. (2008). 80 W ultrafast CPA-free disk laser, *Proc. SPIE*, **6871**, 68711B.
21. Marchese S. V., Baer C. R. E., Engqvist A. G., Hashimoto S., Maas D. J. H. C., Golling M., Suedmeyer T., and Keller U. (2008). Femtosecond thin disk laser oscillator with pulse energy beyond the 10-microjoule level, *Opt. Express*, **16**, 6397-6407.
22. Fan W. S., Storz R., Tom H. W. K., Bokor J. (1992). Electron thermalization in gold, *Phys. Rev.*, **B46**, 13592-13595.
23. Sun C. K., Vallée F., Acioli L. H., Ippen E. P., and Fujimoto J. G. (1994). Femtosecond-tunable measurement of electron thermalization in gold, *Phys. Rev.*, **B50**, 15337-15348.
24. Wellershoff S., Hohlfeld J., GÜdde J., and Matthias E. (1999). The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals, *Appl. Phys.*, **A69**, S99-S107.
25. Hohlfeld J., Wellershoff S., GÜdde J., Conrad U., Jähne V., and Matthias E. (2000). Electron

- and lattice dynamics following optical excitation of metals, *Chem. Phys.*, **251**, 237-258.
26. Anisimov S. I. and Rethfeld B. (1997). Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal, *Proc. SPIE*, **3093**, 192-203.
  27. Corkum P. B., Brunel E, Sherman N. K., and Srinivasan-Rao T. (1988). Thermal response of metals to ultrashort pulse laser excitation, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 2886-2889.
  28. Fujita M. and Hashida M. (2004). Applications of femtosecond lasers, *Oyo Buturi*, **73**, 178-185 (in Japanese).
  29. Hanada Y., Sugioka S. V., Miyamoto 1., and Midorikawa K. (2005). Double-pulse irradiation by laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) and mechanisms study, *Appl. Surf. Sci.*, **248**, 276-280.
  30. Mao S. S., Quere E, Guizard S., Mao X., Russo R. E., Petite G., and Martin P. (2004). Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics, *Appl Phys.*, **A79**, 1695-1709.
  31. Eaton S. M., Zhang H., Herman P. R, Yoshino E, Shah L, Bovatse K. J and Arai A. Y (2005). Heat accumulation effects in femtosecond laser\_ written waveguides with variable repetition rate, *Opt. Express*, **13**, 4708-4716.
  32. Eaton S. M., Zhang H., Ng M. L., Li J., Chen W. J., Ho S., and Herman P. R (2008). Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical Waveguides, *Opt. Express*, **16**, 9443-9458.
  33. Tamaki T., Watanabe W, Nishii J., and Itoh K. (2005). Welding of transparent materials using femtosecond laser pulses, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, L687-L689.
  34. Miyamoto 1., Horn A., and Gottmann J. (2007). Local melting of glass material and its application to direct fusion welding by ps-laser pulses, *J. Laser Micro/Nanoeng.*, **2**, 7-14.
  35. Horn A., Mingareev 1., and Werth A. (2008). Investigations on melting and welding of glass by ultra-short laser radiation, *J. Laser Micro/ Nanoeng.*, **3**, 114-118.
  36. Chichkov B. N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben E, and Tunnermann A. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys.*, **A63**, 109-115.
  37. Sugioka K., Gu B., and Holmes A. (2007). The state of the art and future prospects for laser direct-write for industrial and commercial applications, *MRS Bull.*, **32**, 47-54.
  38. Tönshoff H. K., Ostendorf A., Nolte S. Korte E, and Bauer T. (2000). Micromachining using femtosecond laser, *Proc. SPIE*, **4088**, 136-139.
  39. Emmony D. C., Howson R. P., and Willis L. J. (1973). Laser mirror damage in germanium at 10.6 um, *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 598-600.
  40. Jain A. K., Kulkarni V. N., sood D. K., and Uppal J. S. (1981). Periodic surface ripples in laser-treated aluminum and their use to determine absorbed power, *J. Appl. Phys.*, **52**, 4882-4884.
  41. Keilmann F. and Bai Y. H (1982). Periodic surface structures frozen into CO2 laser-melted quartz, *Appl. Phys.*, **A29**, 9-19.
  42. Sakabe S., Hashida M., Tokita S., Namba S., and Okamuro K (2009)' Mechanism for self-formation of periodic grating structures on a metal surface by a femtosecond laser pulse,

*Phys. Rev.*, **B79**, 033409.

43. Hashida M., Fujita M., Tsukamoto M., Semerok A. F., Gobert O., petite G., Izawa Y., and Wagner J. F. (2002). Femtosecond laser ablation of metals: Precise measurement and analytical model for crater profiles, *Proc. SPIE*, **4830**, 452-457.
44. Yasumaru N., Miyazaki K., and Kiuchi J. (2003). Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on hard thin films of TiN and DLC, *Appl. Phys.*, **A76**, 983-985.
45. Borowiec A. and Hauge H. K. (2003). Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4462-4464.
46. Costache F., Henyk M., and Reif J. (2003). Surface patterning on insulators upon femtosecond laser ablation, *Appl. Surf. Sci.*, **208**, 486491.
47. Shimotsuma Y., Kazansky P. G., Qiu J. R., and Hirao K. (2003). Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 247405.
48. Hashida M., Nagashima K., Fujita M., Tsukamoto M., Katto M., and Izawa Y. (2003). Femtosecond laser ablation of metals: Characterization of new processing phenomenon and formation of nano-structures, *Proc. 9th Sym. Microjoining Assembly Technol. Electron.*, **9**, 517-522.
49. Her T. H., Finlay R. J., Wu C., Deliwala S., and Mazur E. (1998). Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1673-1675.
50. Baldacchini T., Carey J. E., Zhou M., and Mazur E. (2006). Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser, *Langmuir*, **22**, 4917-4919.
51. Carey J. E., Crouch C. H., Shen M., and Mazur E. (2005). Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes, *Opt. Lett.*, **30**, 1773-1775.
52. Younkin R., Carey J. E., Mazur E., Levinson J. A., and Friend C. M. (2003). Infrared absorption by conical silicon microstructures made in a variety of background gases using femtosecond-laser pulses, *J. Appl. Phys.*, **93**, 2626-2629.
53. Wang F., Chen C., He H., and Liu S. (2011). Analysis of sunlight loss for femtosecond laser microstructured silicon and its solar cell efficiency, *Appl. Phys.*, **A103**, 977-982.
54. Zorba V., Stratakis E., Barberoglou M., Spanakis E., Tzanetakis P., Anastasiadis S. H., and Fotakis C. (2008). Biomimetic artificial surfaces quantitatively reproduce the water repellency of a lotus leaf, *Adv. Mater.*, **20**, 4049-4054.
55. Naya B. K., Gupta M. C., and Kolasinski K. W. (2007). Spontaneous formation of nanospiked microstructures in germanium by femtosecond laser irradiation, *Nanotechnology*, **18**, 195302.
56. Nakashima S., Sugioka K., and Midorikawa K. (2010). Enhancement of resolution and quality of nano-hole structure on GaN substrates using the second-harmonic beam of near-infrared femtosecond laser, *Appl. Phys.*, **A101**, 475-481.
57. Nakashima S., Sugioka K., Ito T., Takai H., and Midorikawa K. (2011). Fabrication of high-aspect-ratio nanohole arrays on GaN surface by using wet-chemical-assisted femtosecond

- laser ablation, *J. Laser Micro/Nanoeng.*, **6**, 15-19.
58. Nakata Y., Okada T., and Maeda M. (2003). Nano-sized hollow bump array generated by single femtosecond laser pulse, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L1452-L1454.
  59. Nakata Y., Okada T., and Maeda M. (2004). Lithographical laser ablation using femto-second laser, *Appl. Phys.*, **A79**, 1481-1483.
  60. Nakata Y., Miyanaga N., and Okada T. (2007). Effect of pulse width and fluence of femtosecond laser on the size of nanobump array, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 6555-6557.
  61. Nakata Y., Tsuchida K., Miyanaga N., and Furusho H. (2009). Liquidly process in femtosecond laser processing, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 97619763.
  62. Nakata Y., Momoo K., Hiromoto T., and Miyanaga N. (2011). Generation of superfine structure smaller than 10 nm by interfering femtosecond laser processing, *Proc. SPIE*, **7920**, 79200B.
  63. Chimmalgi A., Choi T. Y., Grigoropoulos C. P., and Komvopoulos K. (2003). Femtosecond laser apertureless near-field nanomachining of metals assisted by scanning probe microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1146-1148.
  64. Lin Y, Hong M. H., Wang W. J., Law Y Z., and Chong T. C. (2005). Sub-30 nm lithography with near-field scanning optical microscope combined with femtosecond laser, *Appl. Phys.*, **A80**, 461-465.
  65. Atanasov P. A., Takada H., Nedyalkov N. N., and Obara M. (2007). Nanohole processing on silicon substrate by femtosecond laser pulse with localized surface plasmon polariton, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 83048308.
  66. Eversole D., Luk'yanchuk B., and Ben-Yakar A. (2007). Plasmonic laser nanoablation of silicon by the scattering of femtosecond pulses near gold nanospheres, *Appl. Phys.*, **A89**, 283-291.
  67. See, for example, <http://www.cmet.co.jp/en/index.html>.
  68. Cumpston B., Ananthavel S., Barlow S., Dyer D., Ehrlich J., Erskine L., Heikal A., Kuebler S., Lee I.-Y., McCord-Maughon D., Qin J., Röckel H., Rumi Me, Wu X.-L., Marder S., and Perry J. (1999). Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication, *Nature*, **398**, 51-54.
  69. Kuebler S. M., Braun K., Zhou W., Cammack J., Yu T., Ober C., Marder S., and Perry J. (2003). Design and application of high-sensitivity two-photon initiators for three-dimensional microfabrication, *J. Photochem. Photobiol.*, **158**, 163-170.
  70. <http://gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/3dmicrostructures.htm>.
  71. Sun H. B., Matsuo S., and Misawa H. (1999). Three-dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 786-788.
  72. Serbin J., Ovsianikov A., and Chichkov B. (2004). Fabrication of woodpile structures by two-photon polymerization and investigation of their optical properties, *Opt. Express*, **12**, 5221-5228.
  73. Maruo S. and Inoue H. (2006). Optically driven micropump produced by three-dimensional

- two-photon microfabrication, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 144101.
74. Maruo S. and Inoue H. (2007). Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 084101.
  75. Tian Y, Zhang Y. L., KuJ. E, He Y, Xu B. B., Chen Q. D., Xia H., and Sun H. B. (2010). High performance magnetically controllable microturbines, *Lab Chip.*, **10**, 2902-2905.
  76. wang J., He Y, Xia H., Niu L. G., Zhang R., Chen Q. D., Zhang Y L., Li Y E, Zeng S. J., Qin J. H., Lin B. C., and Sun H. B. (2010). Embellishment of microfluidic devices via femtosecond laser micronanofabrication for chip functionalization, *Lab Chip.*, **10**, 1993-1996.
  77. Wu D., Chen Q. D., Niu L. G., wang J. N., wang J., wang R., Xia H., and Sun H. B. (2009). Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices, *Lab Chip.*, **9**, 2391-2394.
  78. OvsianikovA., Malinauskas M., Schlie S., ChichkovB., Gittard S., Narayan R., Löblerc M., Sternbergc K., Schmitzc K. P., and Haverich A. (2011). Three-dimensional laser micro- and nano-structuring of acrylated poly(ethylene glycol) materials and evaluation of their cytotoxicity for tissue engineering applications, *Acta Biomater.*, **7**, 967-974.
  79. Farsari M. and Chichkov B. (2009). Two-photon fabrication, *Nature Photon.*, **3**, 450-452.
  80. Tan D. E, Li Y, Qi F. G., Yang H., and Gong Q. H. (2007). Reduction in feature size of two-photon polymerization using SCR500, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 071106.
  81. Tanaka T., Ishikawa A., and Kawata S. (2006). Two-photon-induced reduction of metal ions for fabricating three-dimensional electrically conductive metallic microstructure, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 081107.
  82. Chan J. W., HuserT. R., Risbud .S. H., and Krol D. M. (2003). Modification of the fused silica glass network associated with waveguide fabrication using femtosecond laser pulses, *Appl. Phys.*, **A76**, 367-372.
  83. Dharmadhikari J. A., Dharmadhikari A. K., Bhatnagar A., MallikA., Singh P. C., Dhaman R. K. and Mathur D. (2011). Writing low-loss waveguides in borosilicate (BK7) glass with a low-repetition-rate femtosecond laser, *Opt. Comm.*, **284**, 630-634.
  84. Efimov O. M., Glebov L. B., Richardson K. A., Van Stryland E., Cardinal T., Park S. H., Couzi M., and Bruneel J. L. (2001). Waveguide writing in chalcogenide glasses by a train of femtosecond laser pulses, *Opt. Mater.*, **17**, 379-386.
  85. LeCoqD, MasselinP., Przygodski C., and BychkovE. (2009). Morphology of waveguide written by femtosecond laser in AS2S3 glass, *J. Non-Crystal. Solids*, **355**, 37-42.
  86. Zhang H., Eaton S. M., and Herman P. R. (2006). Low-loss type II waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses, *Opt. Express*, **14**, 4826-4834.
  87. Watanabe W., Asano T., Yamada K., Itoh K., and Nishii J. (2003). Wavelength division with three-dimensional couplers fabricated by filamentation of femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.*, **28**, 2491-2493.
  88. Florea C. and Winick K. A. (2003). Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses, *J. Lightwave Technol.*, **21**, 246-253.

89. Bricchi E., Mills J. D., Kazamsky P. G., Klappauf B. G., and Baumberg J. J. (2002). Birefringent Fresnel zone plates in silica fabricated by femtosecond laser machining, *Opt. Lett.*, **27**, 2200-2202.
90. Vella G. D., Taccheo S., Osellame R., Festa A., Cerullo G., and Laporta P. (2007). 1.5 gm single longitudinal mode waveguide laser fabricated by femtosecond laser writing, *Opt. Express*, **15**, 3190-3194.
91. Kawamura K., Hirano M., Kurobori T., Takamizu D., Kamiya T., and Hosono H. (2004). Femtosecond-laser-encoded distributed-feedback color center laser in lithium fluoride single crystals, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 311-313.
92. Miura K., Qiu J., Fujiwara S., Sakaguchi S., and Hirao K. (2002). Threedimensional optical memory with rewriteable and ultrahigh density using the valence-state change of samarium ions, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2263-2265.
93. Luo F. E., Qian B., Lin G., Xu J., Liao Y, song J., Sun H. Y, zhu B., Qiu J. R., Zhao Q. Z., and Xu Z. Z. (2010). Redistribution of elements in glass induced by a high-repetition-rate femtosecond laser, *Opt. Express*, **18**, 6262-6269.
94. Hongo T., Sugioka K., Niino H., Cheng Y., Masuda M., Miyamoto 1., Takai H., and Midorikawa K. (2005). Investigation of photoreaction mechanism of photosensitive glass by femtosecond laser, *J. Appl. Phys.*, **97**, 063517.
95. Miura K., Shimotsuma Y., Sakakura M., Kanehira S., Hamabe M., and Hirao K. (2006). Three-dimensional deposition of silicon from silicate glass with dispersed metallic aluminum by a femtosecond laser, *Proc. SPIE*, **6413**, 64130K.
96. Marcinkevicius A., Juodkazis S., Watanabe M., Miwa M., Matsuo S., Misawa H., and Nishii J. (2001). Femtosecond laser-assisted threedimensional microfabrication in silica, *Opt. Lett.*, **26**, 277-279.
97. Sugioka K., Cheng Y., and Midorikawa K. (2005). Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture, *Appl. Phys.*, **A81**, 1-10.
98. Sugioka K., Hanada Y., and Midorikawa K. (2010). Three-dimensional femtosecond laser micromachining of photosensitive glass for biomicrochips, *Laser Photon. Rev.*, **3**, 386-400.
99. Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K., Masuda M., Toyoda K., Kawachi M., and Shihoyama K. (2003). Three-dimensional Micro-optical components embedded in photosensitive glass by a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, **28**, 1144-1146.
100. Wang Z., Sugioka K., and Midorikawa K. (2007). Three dimensional integration of microoptical components buried inside photosensitive glass by femtosecond laser direct writing, *Appl. Phys.*, **A89**, 951-955.
101. Wang Z., Sugioka K., and Midorikawa K. (2008). Fabrication of integrated microchip for optical sensing by femtosecond laser direct writing of Foturan glass, *Appl. Phys.*, **A93**, 225-229.
102. Crespi A., Gu Y., Ngamsom B., Hoekstra H. J. W. M. Dongre C., Pollnau M., Ramponi R., van den Vlekkert H. H., Watts P., Cerullo G., and Osellame R. (2010). Three-dimensional Mach-

- Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free detection, *Lab Chip*, **10**, 1167-1173.
103. Hanada Yo, Sugioka K., Ishikawa I. S., Kawano H., Miyawaki A., and Midorikawa K. (2011). 3D Microfluidic chips with integrated functional microelements fabricated by femtosecond laser for studying the gliding mechanism of cyanobacteria, *Lab Chip*, **11**, 2109-2115.
  104. Watanabe S. (2010). Laser Precision Microfabrication, eds. Sugioka K., Meunier M, and Pique A., Chapter 6 Laser Nanosurgery, Manipulation, and Transportation of Cells and Tissues (Springer, Heidelberg) 145161.
  105. König K., Riemann I., and Fritzsche W. (2001). Nanodissection of human chromosomes with near-infrared femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.*, **26**, 819-822.
  106. Guo S. X., Bourgeois E, Chokshi T., Durr N. J., Hilliard M. A., Chronis N., and Ben-Yakar A. (2008). Femtosecond laser nanoaxotomy lab-on-a-chip for in vivo nerve regeneration studies, *Nat. Meth.*, **5**, 531-533.
  107. Tirlapur U. K. and König K. (2002). Cell biology—Targeted transfection by femtosecond laser, *Nature*, **418**, 290-291.
  108. Csaki A., Garwe F., Steinbruck A., Maubach G., Festag G., Weise A., Riemann I., König K., and Fritzsche W. (2007). A parallel approach for subwavelength molecular surgery using gene-specific positioned metal nanoparticles as laser light antennas, *Nano Lett.*, **7**, 247-253.
  109. Juhasz T., Kastis G. A., Suarez C., Bor Z., and Bron W E. (1996). Time-resolved observations of shock waves and cavitation bubbles generated by femtosecond laser pulses in corneal tissue and water, *Laser Surg. Med.*, **19**, 23-31.
  110. Nakamura K., Sora Y., Yoshikawa H. Y., Hosokawa Y., Murai R., Adachi H., Mori Y., Sasaki T., and Masuhara H. (2007). Femtosecond laser-induced crystallization of protein in gel medium, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 64256429.
  111. Kaji T., Ito S., Miyasaka H., Hosokawa Y., Masuhara H., Shukunami C., and Hiraki Y. (2007). Nondestructive micropatterning of living animal cells using focused femtosecond laser-induced impulsive force, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 023904.
  112. Yamaguchi A., Hosokawa Y., Louit G., Asahi T., Shukunami C., Hiraki Y., and Masuhara H. (2008). Nanoparticle injection to single animal cells using femtosecond laser-induced impulsive force, *Appl. Phys.*, **A93**, 39-43.
  113. Kuo Y. E., Wu C. C., Hosokawa Y., Maezawa Y., Okano K., Masuhara H., and Kao F. J. (2010). Local stimulation of cultured myocyte cells by femtosecond laser-induced stress wave, *Appl. Phys.*, **A101**, 597-600.
  114. Hosokawa Y., Takabayashi H., Miura S., Shukunami C., Hiraki Y., and Masuhara H. (2004). Nondestructive isolation of single cultured animal cells by femtosecond laser-induced shockwave, *Appl. Phys.*, **A79**, 4-6.
  115. Dausinger F. (2002). Femtosecond pulses for medicine and production technology - overview of a German national project, *Proc. SPIE*, **4426**, 9—16.
  116. <http://www.amo-inc.com/products/refractive/ilasik/intralase-fslaser>.

117. Haight R., Wagner A., Longo P., and Lim D. (2005). Femtosecond laser ablation and deposition of metal films on transparent substrates with applications in photomask repair, *Proc. SPIE*, **5714**, 24-36.
118. Bauer Th. and König J. (2010). Applications and perspectives of ultrashort pulsed lasers, Technical Digest of LPM 2010, *JSPS*, 127.
119. Booth H. (2010). Laser processing in industrial solar module manufacturing, Proc. LPM 2010, *JSPS*, #10-02.
120. Hasegawa S. and Hayasaki Y. (2009). Adaptive optimization of hologram in holographic femtosecond laser processing system, *Opt. Lett.*, **34**, 22-24.
121. Obata K., Koch J., Hinze U., and Chichkov B. N. (2010). Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation, *Opt. Express*, **18**, 17193-17200.
122. Sakakura M., Sawano T., Shimotsuna Y., Miura K., and Hirao K. (2010). Fabrication of three-dimensional 1 x 4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam, *Opt. Express*, **18**, 12136-12143.
123. Englert L., Rethfeld B., Haag L., Wollenhaupt M., Sarpe-Tudoran C., and Baumert T. (2007). Control of ionization processes in high band gap materials via tailored femtosecond pulses, *Opt. Express*, **15**, 17855-17862.
124. Stoian R., Boyle M., Thoss A., Rosenfeld A., Korn G., Hertel I. V., and Campbell E. E. B. (2002). Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 353-355.
125. Wollenhaupt M., Englert L., Horn A., and Baumert T. (2009). Control of ionization processes in high band gap material, *J. Laser Micro/Nanoeng.*, **4**, 144-151.
126. Sano T., Mori H., Sakata O., Ohmura E., Miyamoto I., Hirose A., and Kobayashi K. F. (2005). Femtosecond laser driven shock synthesis of the high-pressure phase of iron, *Appl. Surf. Sci.*, **247**, 571-576.
127. Juodkazis S., Vaalions A., Gamaly E. G., Mizeikis V., Yang W., and Rode A. (2011). Micro-explosions triggered by femtosecond laser pulses: new tool of nano-structuring, Technical Digest of LPM 2011, *JSPS*, 127.
128. Vaalions A., Gamaly E. G., Mizeikis V., Yang W., Rode A. V., and Juodkazis S. (2011). Evidence of superdense aluminium synthesized by ultrafast microexplosion, *Nat Comm.*, **2**, 445.