

◆ 특집 ◆ 초고속 레이저를 이용한 새로운 정밀가공 기술

펨토초 레이저의 원리 및 응용

Ultrafast Femtosecond Lasers: Fundamentals and Applications

김영진^{1,*}, 김윤석^{1,*}, 김승만¹, 김승우^{1,✉}
Young-Jin Kim^{1,*}, Yunseok Kim^{1,*}, Seungman Kim¹ and Seung-Woo Kim^{1,✉}

1 극초단광학 초정밀기술 연구단, KAIST 기계공학과 (Ultrafast Optics for Ultraprecision Group, Department of Mechanical Engineering, KAIST)

✉ Corresponding author: swk@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3217

* These authors contributed equally to this work

Manuscript received: 2010.4.28 / Revised: 2010.5.3 / Accepted: 2010.5.4

Physical fundamentals of ultrashort femtosecond lasers are addressed along with emerging applications for precision manufacturing and metrology. Femtosecond lasers emit short pulses whose temporal width is in the range of less than a picosecond to a few femtoseconds, thereby enabling extremely high peak-power machining with less thermal damages. Besides, the broad spectral bandwidth of femtosecond lasers constructed in the form of frequency comb permits absolute distance measurements leading to ultraprecision positioning control and dimensional metrology.

Key Words: Ultrafast Laser (초고속 레이저), Femtosecond Pulse Laser (펨토초 펄스 레이저), Ultra Precision Metrology (초정밀 측정), Mode-lock (모드잠금), Nano/Micro Fabrication (나노/마이크로 가공)

1. 서론

우리나라의 경제발전을 견인하는 성장동력산업인 차세대 디스플레이, 핸드폰, 반도체, LED 및 태양전지 등의 분야에서는 초미세 형상가공 및 리페어링을 위한 ‘극초단 펨토초 레이저 기반 비열 초미세 녹색 가공기술’에 대한 기술수요가 급증하는 추세이다. 이는 극초단 펨토초 레이저 초미세 가공기술이 환경친화적이며, 비열 공정으로 마이크론 이하의 형상을 갖는 초미세 형상을 재료의 표면 뿐 아니라 투명재료의 내부에도 형성할 수 있는 가능성 역시 제시하고 있기 때문이다.¹

극초단 펨토초 레이저 가공기술은 기존 레이저 기반 마이크로 가공이 레이저와 재료의 상호 반응시 발생하는 열로 인해 정밀도 한계에 도달함에 따라, 이를 극복하기 위해 1990 이후 본격적으로

개발되기 시작하였다. 펨토초 레이저의 높은 첨두출력(peak power)에 의한 비선형 광학효과(nonlinear optical effect)와 이득매질(gain material)의 손상을 방지할 수 있는 처프펄스증폭(CPA: Chirped-Pulse Amplification) 기술의 개발로 고효율 펨토초 레이저 펄스의 생성이 가능해졌으며, 1990년대 후반부터는 선진국을 중심으로 펨토초 레이저 펄스를 이용한 재료가공에 관한 연구가 시작되었다.^{2,3} 이후 비선형 광학현상 기반의 투명재료 가공, 시각교정 및 생체치료에의 응용, 이광자 흡수(TPA: two photon absorption) 기반 삼차원 형상 및 광결정 가공 등의 분야로 응용분야가 확대되었다.⁴

극초단 펨토초 레이저 기술은 2000년을 전후로 초정밀 광주파수 측정 및 분광 분야에서 새로운 극한의 가능성을 제시하기에 이른다.^{5,6} 펨토초 레이저 펄스를 광주파수 영역에서 보면, 동일한

주파수 간격을 두고 수많은 안정화 레이저들이 동시에 존재하는 것으로 이해될 수 있으며, 각 레이저는 마이크로파 영역의 시간/주파수 표준에 소급하여 10^{-15} 이하 수준의 극한의 불확도로 제어가 가능하다. 이러한 펨토초 레이저 광 빔(optical frequency comb)의 제안과 구현에 대한 공로로 2005년 T.W. Hansch 박사와 John L. Hall 박사는 노벨 물리학상을 수상하였다. 이러한 펨토초 레이저 기반 초정밀 광주파수 측정 및 분광기술은 차세대 광시계(optical clock) 개발, 길이/형상 및 기초물리량의 초정밀 측정, 고차 조화파 발생(HHG: High Harmonic Generation)을 통한 가간섭 극자의선 광원의 개발 등 다양한 분야로 확대되어 나가고 있다.

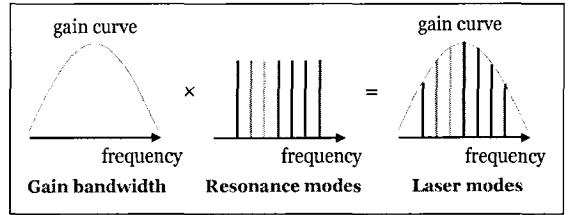
본 기고에서는 이와 같은 극초단 펨토초 레이저 펄스의 생성, 고출력 증폭 및 주파수 안정화의 핵심원리와 대표적 응용분야들을 소개한다. 또한 기존 광결정 기반의 펨토초 레이저와 더불어, 최근 높은 반복률과 높은 평균출력 그리고 우수한 장기 안정성으로 인해 활발한 연구개발이 진행 중인 고출력 광섬유 펨토초 레이저의 원리에 대해서도 소개하고자 한다.

2. 극초단 펨토초 레이저 펄스의 생성

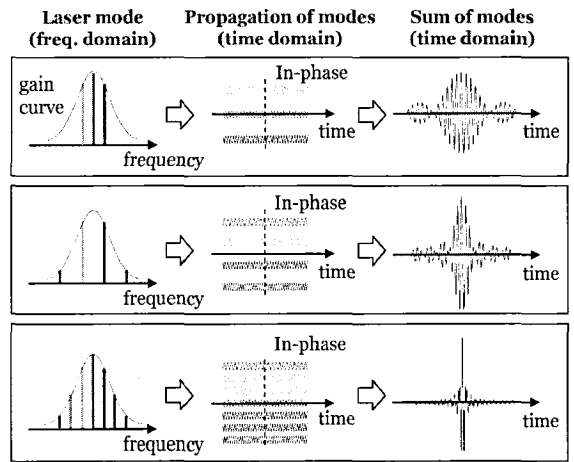
2.1 극초단 펄스의 생성: 모드잠금

현재 정밀가공에 널리 사용되는 나노초 펄스 레이저는 펄스 폭이 20~40 ns 수준으로, 이는 Q-Switching 기반으로 획득할 수 있는 최소 펄스 폭에 해당한다. 이와 달리, 극초단 펨토초 레이저 펄스는 모드잠금(mode-locking) 원리를 기반으로 생성된다.⁷ 일반적으로 레이저는 공진기(cavity)와 광학적 증폭기에 해당하는 이득매질(gain medium)로 구성되며, 이득매질의 증폭대역과 공진기 길이를 조절함으로써, 레이저가 단일모드(mode) 또는 등주파수 간격의 다수의 공진모드(resonance mode)로 발진하도록 할 수 있다. 극초단 펨토초 레이저는 $10^5 \sim 10^6$ 개 수준의 수많은 공진모드를 가지며, 이러한 수많은 공진 모드들은 Fig. 1 과 같이 일정한 순간에 위상이 일치되어 서로 보강간섭을 일으킴으로써 극초단 펄스를 생성한다. 이러한 모드 간 위상이 일치되는 현상을 모드잠금(mode-lock)이라고 한다.⁸

모드잠금을 통해 생성되는 극초단 펄스의 폭은, 보강간섭에 관여하는 주파수 모드의 수가 많아질수록 즉, 파장 대역폭(spectral bandwidth)이 넓어질



(a) Determination of laser longitudinal modes



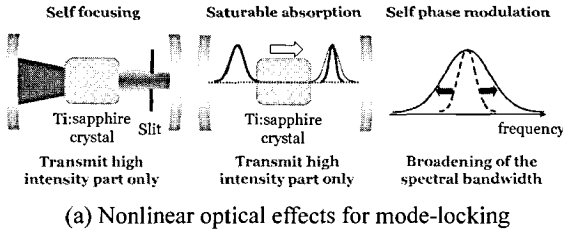
(b) Femtosecond pulse generation via constructive interference of optical modes in mode-locked case

Fig. 1 Generation of ultra-short femtosecond pulses

수록 좁아지게 되며, 일반적으로 800 nm 중심파장에서 100 nm 대역폭을 가지는 Ti:Sapphire 펨토초 레이저의 경우, 가우시안(Gaussian) 펄스를 기준으로 9.41 fs의 극초단 펄스가 생성된다.

2.2 광결정 펨토초 레이저 모드잠금

티타늄 사파이어(Ti:Sapphire)와 같은 광결정을 이득매질로 하는 극초단 펨토초 레이저의 모드잠금은 Fig. 2 와 같이 광결정에서의 비선형 광학 현상들에 의해 일어난다. 커 효과(Kerr effect)는 강한 세기의 빛이 매질을 통과할 때 발생하는 비선형 광학 현상으로 매질의 굴절률이 빛의 세기에 비례하여 증가하는 현상이다. 이와 같은 커 효과에 의해 강한 펄스는 매질 내에서 더욱 강하게 집중되는 자체집속(self focusing) 현상이 발생한다. 이 때, 공진기 내에 약하게 집중된 펄스를 차단할 수 있는 슬릿을 위치시키면, 강한 펄스만이 공진기 내에서 살아남으면서, 살아남은 주파수 모드들 사이에서는 위상이 일치하게 되어, 모드잠금이 완성된다. 시간 영역에서도 커 효과와 유사한 비선형 현



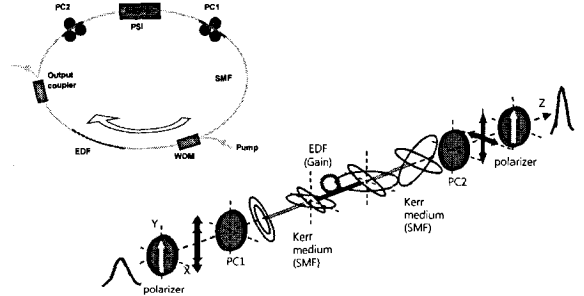
(b) Photograph of mode-locked Ti:Sapphire fs lasers

Fig. 2 Mode-locking of crystal based femtosecond laser

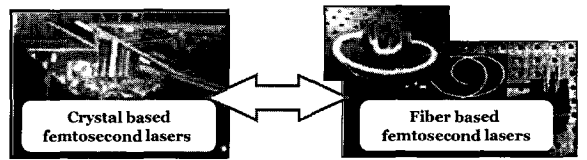
상이 발생하는데, 단일 펄스 내에서도 높은 첨두출력이 해당하는 부분만이 광결정을 쉽게 투과하게 되는 포화흡수(saturable absorption) 현상이 그것이다. 이외에도 광주파수 영역에서는 펄스 내에서 생기는 굴절률의 시간변화에 의해 파장 대역폭이 확대되는 자체위상변조(SPM: self phase modulation) 현상이 발생한다. 모드잠금된 펄스의 경우, 파장 대역폭이 넓어질수록 시간영역에서의 펄스 폭이 좁아지게 되므로, 이러한 여러 비선형 광학 효과의 조합으로 펄스폭의 좁은 펄스 폭의 구현이 가능하다.

2.3 광섬유 펄스 레이저 모드잠금

어븀(Er) 및 이터븀(Yb) 등의 희토류(rare-earth) 원소를 함유한 광섬유는 근적외선 광섬유 레이저의 이득매질로 널리 사용되고 있으며, 각각은 1550 nm 와 1060 nm 의 주요 방출대역을 가진다. 광섬유 기반 극초단 펄스 레이저는 형태에 따라 포화 흡수체(saturable absorber) 기반의 선형 공진기, 8자형(figure of eight) 공진기 및 광섬유 링(ring) 공진기의 세 가지 구조로 대별된다. 이 중 광섬유 링 공진기는 펄스의 세기에 따라 편광의 회전각이 변화하는 비선형편광회전(nonlinear polarization rotation) 효과와 광섬유의 길이를 통해 펄스의 분산을 조절하여 좁은 펄스 폭과 높은 출력을 형성하는 펄스분산보상순환(stretched pulse dispersion compensated ring) 기법을 기반으로 모드잠금을 효과적으로 수행하여 극초단 펄스 레이저를 발생시



(a) Nonlinear polarization rotation for fiber mode-locking



- Advantages of Fiber fs Lasers**
- Ultra-short fs pulse generation based on mode-locking
 - High repetition rate (upto few hundreds of MHz)
 - Long-term intensity and frequency stability
 - Small size, robust to vibration, long life time, easy maintenance

(b) Advantages of fiber based fs pulse lasers

Fig. 3 Mode-locking of fiber based femtosecond laser

킨다(Fig. 3 참조). 광섬유 펄스 레이저는 소형화가 가능하고, 출력 및 광주파수의 안정성이 높으며, 진동 및 외란에 강인한 동시에 유지보수가 용이하여, 다양한 산업적 응용에 매우 적합하다. 광결정 펄스 레이저에 비해 펄스 폭과 주파수 선폰폭이 비교적 넓다는 한계가 존재해 왔으나, 최근 이를 극복한 연구들이 보고되고 있어 그 응용 분야는 더욱 넓어질 것으로 판단된다.⁹

3. 극초단 펄스 레이저 펄스의 고출력 증폭

3.1 극초단 펄스 레이저의 초펄스증폭

1960 년대 레이저 시스템이 개발된 이래, 레이저의 첨두출력의 향상은 과학계의 주요한 목표 중 하나였다. 1960 년 중반 모드잠금을 통해 GW 수준의 첨두출력에 도달한 이후, 증폭매질 내에서의 다양한 비선형 광학현상과 광학적 손상에 의해 펄스의 첨두출력의 향상 속도가 크게 둔화 되었다. 1980 년대 중반 G Mourou 등에 의해 개발된 초펄스증폭 기법에 의해 이러한 한계는 비로소 극복되었다. 초펄스증폭기법은 이전까지 펄스의 첨두출력을 낮추기 위해 빔의 지름을 공간적으로 확

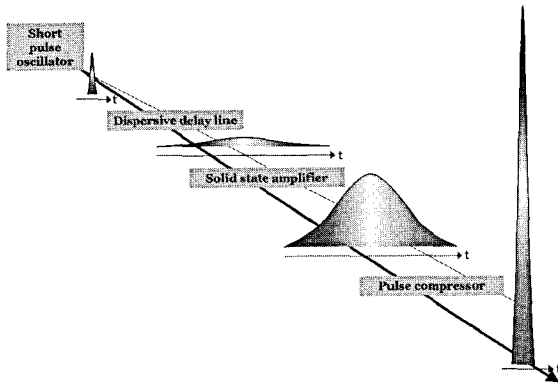


Fig. 4 Concept of the CPA(Chirped-Pulse Amplification)

장하였던 것과 달리, Fig. 4 와 같이 시간영역에서 펄스를 펼쳐 첨두출력을 낮춘 이후 증폭매질에서 고출력 증폭을 수행함으로써, 비선형 광학현상과 광학적 손상을 최소화시킨다. 이후 최종 출력단에서 다시 압축함으로써 획득 가능한 첨두출력을 테라와트(TW, 10^{12} W)에서 페타와트(PW, 10^{15} W) 수준까지 크게 높일 수 있다.¹⁰

3.2 광결정 펨토초 레이저의 증폭

현재 개발되는 거의 모든 극초단 고출력 레이저는 기본적으로 Fig. 5 와 같은 형태의 처프펄스증폭 기술을 적용하고 있다. 극초단 펨토초 레이저는 고출력 증폭단을 통과하기 전에 회절격자 혹은 프리즘 쌍으로 구성된 펄스 펼침기(stretcher)에서 시간영역으로 길게 펼쳐져 첨두출력이 낮아진다. 이후 고출력 증폭단을 통과하면서 과정에서 효과적으로 에너지를 흡수하게 되고, 최종단에서 다시

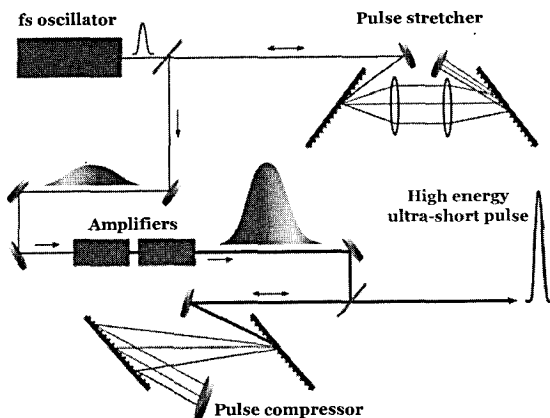


Fig. 5 Chirped-pulse amplification of crystal based fs laser

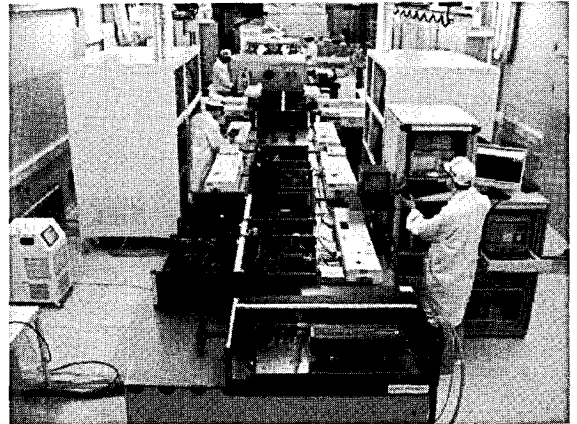


Fig. 6 100 TW Ti:Sapphire fs CPA system (APRI/GIST)

펄스 압축기를 통해 시간영역에서 압축함으로써 높은 첨두출력의 고출력 펄스를 획득할 수 있다.¹¹ 처프펄스증폭 기술이 등장함에 따라 표준 광학테이블 하나 혹은 두 개의 크기에 해당하는 규모의 테라와트급 펨토초 레이저가 등장하기 시작하였다. 2000 년 이후 10 개 내외의 페타와트 레이저 프로젝트가 세계적으로 진행 중이며, 국내 고등광기술 연구소에서도 Fig. 6 과 같이 30 fs, 100 TW 이상 급출력을 달성하여 보고한 바 있다. 이러한 수준의 고출력 레이저는 주로 상대론적 광학현상의 규명과 같은 기초과학분야에 주로 사용되며, 초정밀 재료가공과 같은 산업적 응용분야에는 수십 메가와트(MW, 10^6 W)에서 기가와트(GW, 10^9 W) 급의 첨두출력으로 충분한 것으로 알려져 있다.

3.3 광섬유 펨토초 레이저의 증폭

Ti:Sapphire 펨토초 레이저로 대표되는 광결정 기반 펨토초 레이저는 고출력, 높은 펄스 당 에너지 그리고 좁은 펄스 폭을 구현할 수 있는 우수한 광원이다. 하지만 평균출력의 확장(scalability)이 어렵고, 직접적인 다이오드 레이저 펌핑이 불가능하여 변환효율이 상당히 낮으며, 시스템이 복잡하여 광정렬, 출력 안정성 및 유지보수 등의 측면에서 제한점이 있다. 최근 이득매질에서 발생하는 열에 의한 한계를 극복하기 위해, 얇은 디스크(thin disk)나 슬랩(slab) 형태의 이득매질의 형태도 제안되었으나, 효율이 낮아 추가 증폭을 요구하여 시스템이 추가로 복잡해지는 단점이 있다

이에 반해 광섬유 기반의 고출력 이득매질은 큰 표면적 대 부피 비로 인해 열 발산에 있어서

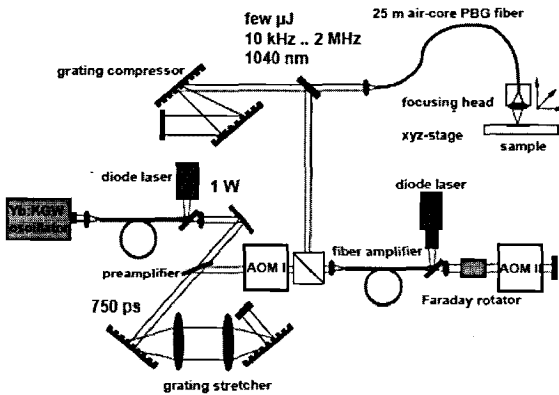


Fig. 7 Chirped-pulse amplification of fiber based fs laser (Friedrich-Schiller-Univ. Jena)

큰 장점을 가지며, 시드(seed) 레이저와 펌프 레이저 간의 상호 작용이 레일리(Rayleigh) 길이에 국한되지 않고 전 광섬유의 길이로 확장되므로 단일투과(single pass)만으로 높은 증폭률을 얻을 수 있다. 이와 더불어 간단한 광학 구성으로 인해 출력이 안정적이며, 진동 등의 환경변화에 둔감한 특성을 가진다. 특히 이터븀(Yb) 첨가 광섬유의 경우, 발진파장인 1030~1070 nm 대역이 펌프 다이오드의 파장인 980 nm 와 가깝기 때문에, 광변환 효율이 최대 80 %를 넘어서며, 이로 인해 낮은 열 발산 특성 또한 동시에 갖는다.¹²

광섬유 펨토초 레이저의 초펄스증폭 과정은 일반적으로 Fig. 7 과 같이 구성된다. 원하는 증폭률에 따라 펄스 펄침기와 압축기로 광섬유 소자 또는 회절격자 쌍을 이용하여 펄스를 압축하게 되며, 고출력 증폭에는 회절격자 쌍을 주로 이용한다. 이를 고려할 때, 광섬유 기반 초펄스증폭의 엄밀한 의미는 고출력 증폭을 위한 이득매질로써 광섬유를 사용함에 있다고 할 수 있다.

비선형 광학현상을 억제하기 위한 노력의 일환으로 광섬유 초펄스증폭 뿐 아니라 광섬유 이득매질의 설계에 있어서도 많은 발전이 있어왔다. 비선형 광학현상은 광섬유 코어에서의 침투출력 및 광섬유 길이와 비례하므로, 코어를 넓히는 동시에 증폭 효율을 높여 광섬유의 길이를 줄이는 방향으로 연구가 진행되어 왔다. 현재 가장 일반적으로 사용되는 낮은 비선형 특성의 광섬유는 LMA (Large Mode Area) 광섬유이며, 완전한 단일모드(single mode)의 전파를 보장하기 위해 최근 Fig. 8 과 같은 구조의 광결정광섬유(PCF: Photonic

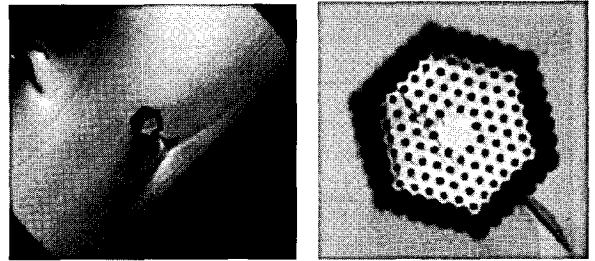


Fig. 8 Yb-doped PCF for suppression of nonlinear effects (Friedrich-Schiller-Univ. Jena)

Crystal Fiber)가 사용되기 시작하였다.

광결정광섬유 기반 초펄스증폭 기법을 이용함으로써, kHz 로부터 최대 수백 MHz 에 달하는 고반복률의 극초단 고출력 펄스를 얻을 수 있으며, 평균출력에 있어서도 수백 W 수준의 높은 출력특성을 보인다. 이는 광결정 기반 펨토초 레이저가 최대 kHz 의 반복률에서 10 W 내외의 평균출력을 보임에 비해, 상당히 다른 수준의 반복률과 평균출력 특성을 가짐을 알 수 있다.¹³ 최근 반도체 비아홀 등의 유전체 가공에 있어서 수~수십 MHz 의 높은 반복률이 유리하다는 연구결과가 보고되고 있음을 고려할 때, 높은 반복률과 평균출력을 가지는 극초단 고출력 펨토초 레이저의 산업적 요구가 급증할 것으로 판단된다.

4. 광주파수 대역에서의 극초단 펨토초 레이저 펄스: 광 빔

4.1 펨토초 레이저 광 빔

극초단 펨토초 레이저의 펄스 열(pulse train)을 광주파수 영역에서 살펴보면, Fig. 9 와 같이 동일한 주파수 간격을 두고 $10^4 \sim 10^6$ 개의 수많은 모드들이 동시에 존재하는 형태로, 이를 머리를 빗는 빗과 유사한 형태라고 하여 광 빔(optical frequency comb)이라 한다. 이러한 시간 영역에서의 펨토초 레이저 펄스 열과 주파수 영역에서의 광 빔의 관계와 특징은 푸리에 변환(Fourier transform)으로 쉽게 설명된다. 푸리에 변환 관계에 의해, 극초단 펨토초 펄스는 주파수 영역에서의 넓은 파장 대역폭에 대응하며, 일정한 간격의 펄스 열은 동일 간격으로 배열된 주파수 모드들에 대응한다.

펨토초 레이저 광 빔을 구성하는 m 번째 주파수 모드의 광주파수, f_m 는, 모드간 간격에 해당하는 반복률, f_r 과 절대 영(zero) 주파수로부터의 차에 해

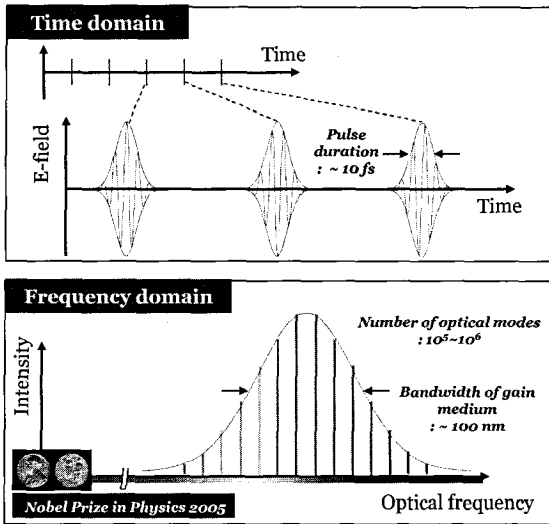
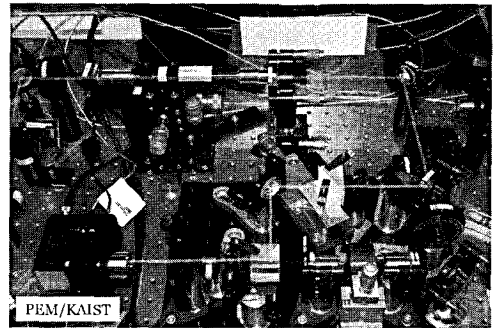


Fig. 9 Optical frequency comb of a fs pulse laser

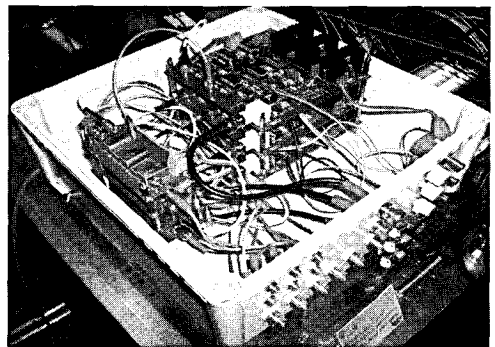
당하는 윗셋 주파수, f_o 에 의해, $f_m = m f_r + f_o$ 로 간단히 정의된다. 이 때, 반복률 f_r 과 윗셋 주파수 f_o 는 마이크로파 영역에 위치하므로, 종래에 측정 및 제어기술이 잘 확립되어 있는 마이크로 전자기술로 시간/주파수 표준에 극한의 불확도로 직접 안정화가 가능하다. 종래의 광주파수 측정기술인 주파수 체인(frequency chain) 기술의 경우, 다수의 주파수 체배 단계를 이용하였으며, 이를 위해서는 두 개의 건물에 3 개의 방, 그리고 3 명의 오퍼레이터에 50 kW의 전력과 수 년의 구현시간이 요구되었던 것에 비해, 광 빔 기술은 광주파수 측정기술의 비약적 발전을 가져왔으며, 이에 2005 년 노벨 물리학상이 수여되었다.^{5,6}

4.2 광결정 펨토초 레이저 광 빔 안정화

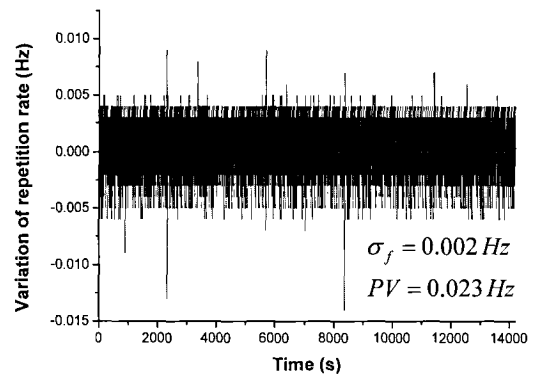
광결정 펨토초 레이저 광 빔의 안정화를 위해서는 f_r, f_o 를 측정하고, 제어신호를 생성한 후, 이를 이용하여 f_r, f_o 를 변화시킴으로써 완성되는 제어루프를 구성해야 한다. 펄스 반복률, f_r 은 광검출기(photo-detector)로 쉽게 검출할 수 있으며, 윗셋 주파수, f_o 는 Fig. 10(a)와 같은 비선형 $f2f$ 간섭계를 구성함으로써 측정할 수 있다. 다음으로 Fig. 10(b)와 같은 마이크로파 위상잠금회로(phase locked loop)를 통해, 측정된 f_r, f_o 를 목표 주파수에 안정화하기 위한 제어신호를 생성한다. 생성된 제어신호는 각각 공진기 길이를 변화시키는 압전소자에 공급되어 f_r 을 제어하는 부분과, 공진기 내부 분산조



(a) Self-referencing f-2f interferometer



(b) Phase-Locked-Loops for frequency stabilization



(c) Exemplary stability of the stabilized repetition rate

Fig. 10 Stabilization of the optical frequency comb

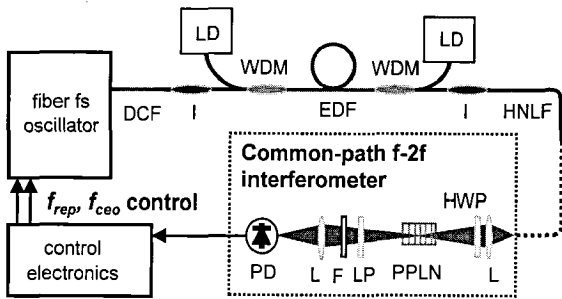
질 목적의 압전소자 또는 펌프 광량을 조절하는 음향광변조기(Acousto-Optic Modulator)를 통해 f_o 를 제어하는 부분으로 나뉘어 인가되어 전체 광 빔의 제어루프가 완성된다. Fig. 10(c)는 이러한 과정을 통해 안정화 된 반복률 f_r 의 예를 보여준다. 반복률 81 MHz 에서 표준편차 2 mHz 이하 수준의 주파수의 떨림이 존재함을 확인할 수 있으며, 이는 상대 불확도 기준으로 2.5×10^{-11} (0.1 s)에 해당한다.¹⁴ 이러한 주파수 안정도는 사용된 시간/주파수

표준의 향상에 따라 10^{-19} 수준까지 추가향상이 가능하다.

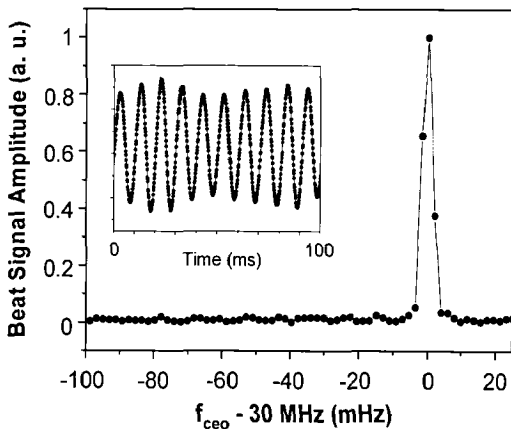
4.3 광섬유 펨토초 레이저 광 빔 안정화

광섬유 펨토초 레이저 광 빔 역시 광결정 펨토초 레이저와 유사한 메커니즘을 통해 안정화 된다 (Fig. 11 참조). 여기에서 주목할 점은, 광섬유 기반의 광학구성으로 인해 광정렬이 용이하고, 주파수 측정 간섭계를 공통경로로 구성함으로써 광 빔 운용의 안정성이 크게 높아졌다는 점이다. 이를 통해, 일반적으로 광결정 기반의 광 빔의 안정화가 하루 이상 지속되기 어려운 반면, 광섬유 기반 광 빔의 경우, 중단 없는 지속적 운용이 가능하다.

광섬유 광 빔은 각 모드의 선폭(linewidth)이 상대적으로 넓다는 한계점이 지적되어 왔으나, 최근 공진기 및 증폭 단계에서의 분산 최적화를 통해 mHz 이하 수준의 선폭의 획득이 보고되었으며, 이는 광결정 광 빔의 선폭에 필적하는 수준이다.



(a) System layout of the fiber comb stabilization



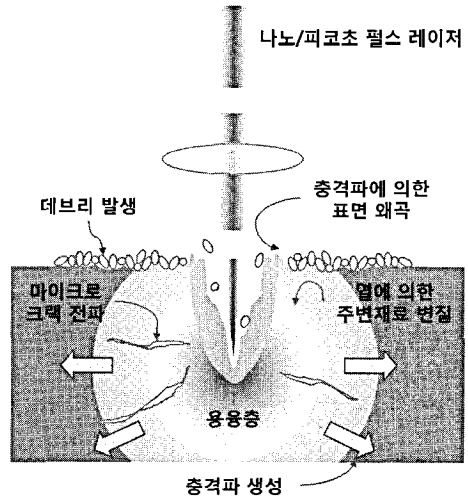
(b) Relative linewidth of the stabilized offset frequency

Fig. 11 Stabilization of the fiber frequency comb

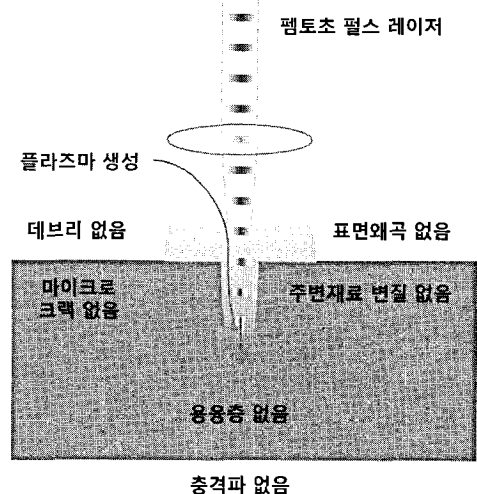
5. 극초단 펨토초 레이저의 응용

5.1 극초단 펨토초 레이저 응용 초미세 가공

극초단 펨토초 레이저 초미세 가공은 Fig. 12와 같이 가공물을 플라즈마(plasma) 상태로 직접 변화시켜 가공하므로, 열로써 피가공물을 제거하는 기존 레이저 가공에 비해 열영향영역(HAZ: heat affected zone), 열손상 및 크랙(crack) 등을 최소화할 수 있어, 차세대 초미세 나노/마이크로 가공을 가능하게 한다. 더불어 극도의 높은 침투출력에 의한 비선형 광학현상인 다광자 흡수(multi-photon absorption) 프로세스에 의해 가공이 이루어지므로, 재료의 광흡수 대역이 광원의 파장대역 내에 존재



(a) Micro machining using nano/picosecond pulse laser



(b) Nano/micro machining using femtosecond pulse laser

Fig. 12 Precision machining using short pulse lasers

하지 않는 경우에도 효과적인 재료 무의존성 초미세 가공이 가능하다. 또한 이러한 비선형 다광자 흡수 프로세스는 임계가공을 통해 레이저 빔의 회절한계보다 미세한 형상의 가공 가능성 역시 제시하고 있다.^{3,4,15}

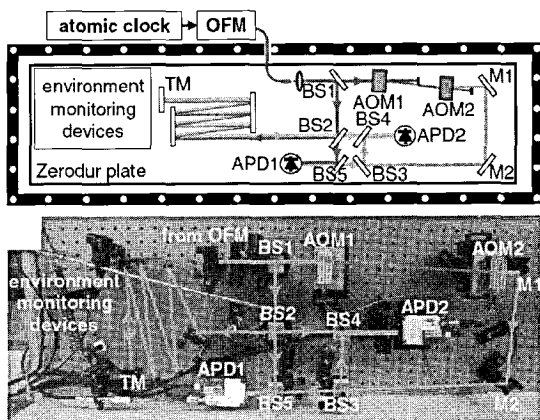
극초단 펨토초 레이저 가공은 기존 레이저 가공의 다양한 한계를 넘어서는 차세대 가공 기법으로, 반도체, 디스플레이, LED 및 태양전지 등 다양한 국가전략산업의 발전에 핵심적 역할을 담당할 것으로 예측된다. 최근 광섬유 펨토초 레이저 광원의 비약적 발전은, 극초단 펨토초 레이저 가공의 시대의 도래를 크게 앞당길 것으로 판단된다.

5.2 극초단 펨토초 레이저 응용 초정밀 측정

극초단 펨토초 레이저 광 빛의 극한의 불확도는 초정밀 광주파수 측정 및 원자/분자의 천이선(transition line)의 측정을 시작으로, 행성의 대기구조 분석을 위한 대형 우주관측 망원경의 정밀분광시스템의 보정, 위성의 편대비행(formation flying)을 기반으로 대형 등가구경(synthetic aperture) 망원경을 형성하기 위한 위성 간 초정밀 절대거리 측정,



(a) Exemplary application fields of fs pulse laser



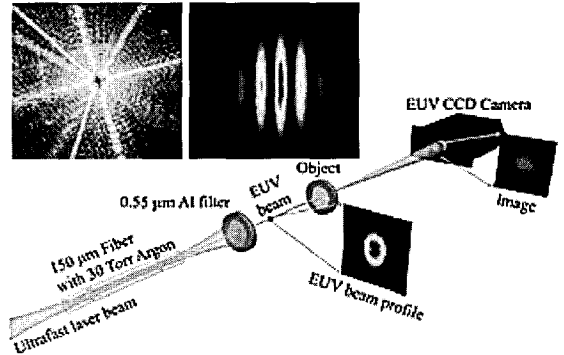
(b) Absolute distance metrology using fs frequency comb
Fig. 13 Femtosecond laser based precision metrology

대형 반도체 및 디스플레이 장비의 초정밀 위치결정 및 형상 측정에 이르는 다양한 분야로 그 적용이 확대되고 있다.¹⁶ 또한 펨토초 레이저의 넓은 파장 대역폭과 시간 영역에서의 극초단 펄스 폭의 특성을 살린 LIDAR(Light Detection and Ranging) 기술 개발 역시 활발히 진행되고 있다.¹⁷

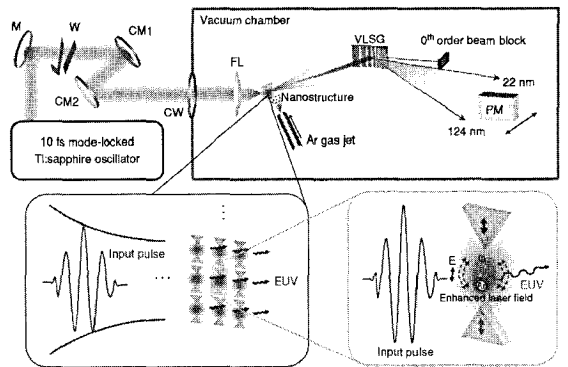
극초단 펨토초 레이저는 좁은 펄스 폭, 넓은 파장 대역폭, 시간/주파수 표준에의 소급성, 높은 불확도, 좁은 주파수 선평, 높은 공간 가간섭성 등 다양한 초정밀 측정분야에서 필요한 광학적 특성을 포함하므로, 차세대 과학기술 및 산업분야에서 핵심적인 광원으로 자리잡을 것으로 판단된다.

5.3 극초단 펨토초 레이저 응용 극자외선 생성

미래형 반도체, 디스플레이와 같은 첨단 산업 분야와 나노, 바이오, 의료분야 등 다양한 학문분야에서 극자외선(EUV: Extreme Ultra-Violet) 및 엑스선(X-ray) 광원의 중요성은 지속적으로 증대되고 있다. 기존 광학 노광기술의 한계를 해결할 수 있



(a) Coherent EUV, Soft X-ray Imaging (KM Labs/JILA)



(a) Plasmon resonance assisted high harmonic generation
Fig. 14 High harmonic generation by intense fs laser pulses

는 극자외선 리소그래피(lithography) 기술을 비롯하여 최근 나노과학 및 생명과학 분야의 발전에 따라 나노미터의 분해능을 가지는 극자외선 현미경의 중요성 역시 크게 증가하여, 이를 위한 자유전자 레이저(FEL: Free Electron Laser)와 같은 극자외선 레이저의 개발이 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

극자외선 및 엑스선 광원으로는 의료용으로 널리 사용되는 엑스선 튜브와 방사광 가속기가 대표적이다. 엑스선 튜브는 생성가능한 파장대역과 공간 분해능에 있어서 한계를 지니며, 방사광 가속기는 설비가 지나치게 대형인 관계로 시간, 공간 및 가격 측면에서 접근성의 제약이 있으며, 결맞음성(coherence) 역시 제한적이다. 이에 최근에는 Fig. 14(a)와 같이 결맞음성이 우수하면서도 단일 실험실 단위에서 구현 가능한 극초단 펨토초 레이저 기반 고차조화파 생성(HHG: High Harmonic Generation)을 중심으로 다양한 연구가 이루어져 왔다. 하지만 펨토초 레이저 고차조화파생성 역시 고출력 레이저 증폭 단계들을 필요로 하기 때문에, 높은 결맞음성과 넓은 파장대역과 같은 우수한 광학 특성에도 불구하고 여전히 산업 및 학문적 응용에 제약이 존재한다. 최근 제안된 플라즈몬공명(plasmon resonance) 기반 고차조화파생성 기술은 Fig. 14(b)와 같이 복잡한 증폭과정 없이 직접 고차조화파를 생성시킴으로써 초소형 극자외선 레이저 광원의 개발을 가능하게 하였다.¹⁸ 이와 같은 극초단 펨토초 레이저 기반 결맞는 극자외선 광원들은 차세대 극초정밀 리소그래피, 고분해능 현미경, 분광학 및 생물학 등 매우 다양한 분야에서 응용될 수 있으며, 또한 펨토초 레이저 광 빔 기술과의 융합을 통해, 극자외선 대역에서의 시간/주파수 및 길이표준의 확립 및 차세대 광시계 개발에 중요한 핵심 광원으로 자리잡을 것으로 기대된다.

6. 결론

극초단 펨토초 레이저의 발전, 증폭 및 제어에 이르는 광원 원천기술과, 이를 기반으로 하는 초정밀 재료가공 및 측정분야의 응용 원천기술은 최근 10 년간 비약적 발전을 이루어 왔다. 극초단 펨토초 레이저 기술은, 국가 첨단산업분야 주력제품 군인 반도체, 디스플레이, LED 및 태양전지의 초미세 청정제조기반기술의 요구에 힘입어, 이제 기초 과학기술의 범위를 벗어나 실질적인 경제-산업분

야에서의 활용을 눈앞에 두고 있다. 세계적으로도 극초단 펨토초 레이저 응용 초정밀 가공 및 측정 기술은 산업적 도입단계에 있으므로, 국가적 차원의 집중적이고 체계적인 지원과, 산학연의 유기적인 연구개발을 통해, 국내 첨단산업분야의 미래 세계 경쟁력을 제고하는 것이 크게 요구되는 시점이라 하겠다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 도약연구지원 사업과 우주기초원천기술 사업의 지원을 받아 한국과학기술원 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Fermann, M. E., Galvanauskas, A. and Sucha, G., "Ultrafast Lasers: Technology and Applications," Marcel Dekker, Inc., pp. 323-358, 2003.
2. Shen, Y. R., "The principles of nonlinear optics," Wiley-Interscience, 1984.
3. Fermann, M. E., Galvanauskas, A. and Sucha, G., "Ultrafast Lasers: Technology and Applications," Marcel Dekker, Inc., pp. 61-88, 2003.
4. Cumpston, B. H., Ananthavel, S. P., Barlow, S., Dyer, D. L., Ehrlich, J. E., Erskine, L. L., Heikal, A. A., Kuebler, S. M., Lee, I.-Y. S., McCord-Maughon, D., Qin, J., Röckel, H., Rumi, M., Wu, X.-L., Marder, S. R. and Perry, J. W., "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication," Nature, Vol. 398, pp. 51-54, 1999.
5. Niering, M., Holzwarth, R., Reichert, J., Pokasov, P., Udem, T., Weitz, M. and Hänsch, T. W., "Measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock," Phys. Rev. Lett., Vol. 84, No. 24, pp. 5496-5499, 2000.
6. Jones, D. J., Diddams, S. A., Ranka, J. K., Stentz, A., Windeler, R. S., Hall, J. L. and Cundiff, S. T., "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis," Science, Vol. 288, No. 5466, pp. 635-639, 2000.

7. Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., "Fundamentals of Photonics," Wiley, pp. 522-525, 1997.
8. 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.
9. Kim, Y., Kim, S., Kim, Y.-J., Hussein, H. and Kim, S.-W., "Er-doped fiber frequency comb with mHz relative linewidth," *Opt. Express*, Vol. 17, No. 14, pp. 11972-11977, 2009.
10. Keller, U., "Recent developments in compact ultrafast lasers," *Nature*, Vol. 424, pp. 831-838, 2003.
11. Strickland, D. and Mourou, G., "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, Vol. 56, pp. 447-449, 1985.
12. Fermann, M. E., Galvanauskas, A. and Sucha, G., "Ultrafast Lasers: Technology and Applications," Marcel Dekker, Inc., pp. 155-218, 2003.
13. Röser, F., Rothhard, J., Ortac, B., Liem, A., Schmidt, O., Schreiber, T., Limpert, J. and Tünnermann, A., "131 W 220 fs fiber laser system," *Opt. Lett.*, Vol. 30, No. 20, pp. 2754-2756, 2005.
14. Jin, J., Kim, Y. J. and Kim, S.-W. "Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser," *Opt. Express*, Vol. 14, No. 13, pp. 5968-5978, 2006.
15. Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., "Fundamentals of Photonics," Wiley, pp. 522-525, 1997.
16. Hyun, S., Kim, Y.-J., Kim, Y., Jin, J. and Kim, S.-W., "Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser," *Meas. Sci. and Technol.*, Vol. 20, No. 9, Paper No. 095302, 2009.
17. Kasparian, J., Rodriguez, M., Méjean, G., Yu, J., Salmon, E., Wille, H., Bourayou, R., Frey, S., André, Y.-B., Mysyrowicz, A., Sauerbrey, R., Wolf, J.-P. and Wöste, L., "White-Light Filaments for Atmospheric Analysis," *Science*, Vol. 301, No. 5629, pp. 61-64, 2003.
18. Kim, S., Jin, J., Kim, Y.-J., Park, I.-Y., Kim, Y. and Kim, S.-W., "High harmonic generation by resonant plasmon field enhancement," *Nature*, Vol. 453, pp. 757-760, 2008.