초고속 레이저를 이용한 초정밀 동기화 기술

DOI: 10.3938/PhT.19.033

김 정 원

Ultraprecise Synchronization Using Ultrafast Lasers

Jungwon KIM

In recent years, ultrafast mode-locked lasers are finding more applications in high-precision time and frequency measurement and control beyond their traditional applications in time-resolved spectroscopy. In this article, I review the recent progress toward attosecond-precision timing synchronization techniques enabled by ultralow-noise, ultrafast lasers.

머리말

올해(2010년)는 레이저가 발명된 지 50주년이 되는 뜻깊은 해이다. 레이저가 처음 발명된 지 몇 해 지나지 않아 이미 1960년대부터 모드 잠금(mode-locking) 기술에 의한 극초단 광 펄스(ultrashort optical pulse)를 레이저로부터 발생시키는 분야의 연구가 활발하게 이루어졌다. 1960년대의 피코초(10^{-12} 초) 펄스 생성에서 시작하여 1970년대에는 색소 레이저(dye laser)를 이용한 피코초 이하의 펨토초(10^{-15} 초) 영역의 펄스 생성이 가능해졌고, 1987년에는 외부 압축(external compression)에 의해 6펨토초 펄스가 만들어졌다.^[1] 1980년대 말부터 티타늄 사파이어(Ti:sapphire)로 대표되는 고체 모드 잠금된 레이저(solid-state mode-locked laser)와 어븀(Erbium, Er) 혹은 이터븀(Ytterbium, Yb)이 첨가된 광섬유 모드 잠금된 레이저(fiber mode-locked laser)의 기술 발전과 더불어, 초고속 레이저(ultrafast laser)는 이전에 불가능하던 매우 짧은 펄스폭, 넓은 광 대역폭, 높은 피크 세기를 가능하

게 하였다. 각종 초고속 레이저의 개발은 이제 실험실 단계를 벗어나 세계 여러 레이저 회사들에서 이루어져 고성능 초고속 레이저들이 성공적으로 상용화되고 있으며, 이를 통한 여러 가지 응용 분야들의 급격한 확산이 이루어지고 있다.

초고속 레이저에서 발생하는 극초단 광펄스는 전통적으로 피코초와 펨토초 시간대에서 일어나는 초고속 현상(ultrafast phenomena)의 시분해 분광학(time-resolved spectroscopy)에 사용되어 왔으며, 지금도 초고속 레이저의 가장 중요한 응용 분야이다. 그 대표적인 예로서 캘리포니아공과대학의 Ahmed Zewail이 초고속 레이저를 이용한 시분해 해석 실험 기술에 대한 공로를 인정받아 1999년 노벨 화학상을 수상한 바 있다. 2000년대에 접어들면서 모드 잠금된 레이저에서 발생하는 극초단 광 펄스 열(optical pulse train)의 주파수 특성에 관한 이해와 더불어 광 주파수 빔(optical frequency comb)^[2]을 이용한 초정밀 광 주파수 측정 및 분광 기법과 같은 새로운 응용 분야들이 탄생하고 있다 [광 주파수 빔을 이용한 주파수 측정 기술에 관한 공로로 미국표준과학연구소(NIST)의 John Hall과 독일 막스플랑크연구소의 Ted Hänsch가 2005년 노벨 물리학상을 공동수상한 바 있다. 이와 더불어 고에너지, 위상 안정화된 수사이클 광 펄스(high-energy, phase-stabilized few-cycle optical pulse)를 이용한 고차조 화파생성(high-harmonic generation, HHG)에 의한 극자외선/연X-선 아토초(10^{-18} 초) 펄스 생성 기술은 시분해 분광학을 아토초 영역까지 가능하게 만들었으며, 이는 소위 아토초 과학(attosecond science)^[3]이라 불리는 연구 분야를 형성하고 있다.

초고속 레이저에서 발생하는 광 펄스 열의 또 다른 흥미롭고 중요한 특성은 바로 뛰어난 잡음 특성이다. 앞서 언급된 광 주파수 빔이나 극자외선 아토초 펄스 생성 분야가 최근 10여 년간 급격한 발전을 이룰 수 있었던 데에는 펨토초 초고속 레이저의 뛰어난 잡음 특성이 중요한 역할을 하였다. 초

저자약력

김정원 교수는 미국 매사추세츠공대(MIT) 전기 및 컴퓨터공학과에서 박사 학위를 받은 후 현재 한국과학기술원(KAIST) 기계항공시스템학부 조교수로 재직 중이다. 현재 초저잡음, 초고속 레이저의 개발과 이를 응용한 초정밀 신호 측정, 분산 및 제어에 관한 연구를 수행하고 있다.
(jungwon.kim@kaist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] R. L. Fork *et al.*, Opt. Lett. **12**, 483 (1987).
- [2] Th. Udem *et al.*, Nature **416**, 233 (2002).
- [3] P. B. Corkum and F. Krausz, Nature Phys. **3**, 381 (2007).

고속 레이저는 시간 상에서 펨토초 펄스폭을 갖는 광 펄스들을 레이저 공진기 길이에 의해 결정되는 일정한 시간 간격(마이크로초에서 나노초 영역)으로 생성하며, 이 펄스열은 매우 안정된 세기, 위상 및 타이밍(timing) 잡음 특성을 갖는다. 이 중에서 특히 펄스열의 뛰어난 타이밍 지터(timing jitter) 특성은 초고속 레이저를 이전에 불가능하던 정밀도의 신호 발생, 분산(distribution), 측정 및 동기화(synchronization)에 사용할 수 있게 해준다.

이 글에서는 초고속 레이저의 매우 낮은 타이밍 지터 특성에 기반을 둔 초정밀 동기화 기술에 대하여 소개하고자 한다. 초고속 레이저의 타이밍 지터 특성이 어떻게 아토초 영역으로까지 스케일링될 수 있는지에 대해 살펴본 후, 초고속 레이저의 타이밍 특성을 이용한 레이저와 레이저 간, 그리고 레이저와 마이크로파 발진기 간의 아토초 정밀도 동기화 기술에 대하여 소개할 것이다. 또한 이러한 광-마이크로파 타이밍 특성의 원거리 전송과 이를 이용한 대규모 과학시설의 동기화에 대해 살펴보겠다.

초고속 레이저의 타이밍 특성

초고속 레이저의 잡음 특성에 관한 이론은 1990년대에 Haus와 Mecozzi에 의해 솔리톤 섭동이론(soliton perturbation theory)에 기반하여 연구되었다.^[4] 최근에는 Haus-Mecozzi 모델을 솔리톤 효과와 관계없이 일반적으로 적용 가능하다는 것을 보였으며^[5] 그동안 여러 종류의 고체 및 광섬유 모드 잠금된 레이저의 잡음 특성이 실험적으로 측정되었다.

여기서는 마이크로파 발진기의 경우와 비교하여, 초고속 레이저에서 발생하는 광 펄스열의 타이밍 지터 특성이 어떻게 스케일링되는지에 대하여 간단한 시간영역 모델^[6]을 이용하여 살펴보려고 한다. 그림 1은 광 펄스열과 사인 모양(sinusoidal) 마이크로파 신호가 각각 초고속 모드 잠금된 레이저와 마이크로파 발진기의 앙상블(ensemble)로부터 발생할 때 시간이 지남에 따라 펄스 위치와 마이크로파의 영점 위치가 완전하게 주기적인 위치로부터 어떻게 벗어나는지를 보여준다. 펄스 위치와 마이크로파 영점 위치는 신호 발생 과정에서의 잡음원들에 의해 막걸기(random walk) 과정을 거치게

Fig. 1. Random walk of the pulse position and the microwave phase when emitted from an ensemble of mode-locked lasers and microwave oscillators, respectively. The formula show the timing jitter scaling property when transitioning from microwave oscillators to ultrafast mode-locked lasers. Figure is modified from Ref. [6].

되며, 더해지는 잡음원이 백색잡음(white noise)인 경우는 타이밍 지터의 분산(variance)이 시간에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 모드 잠금된 레이저와 마이크로파 발진기의 경우 가장 근원적인 백색잡음원이 되는 에너지는 각각 자발방출에 의한 광자 에너지($\hbar\omega_c$)와 열평형 상태에서의 열에너지(kT)이다. 이 경우 그림 1에서 보여지는 식들과 같은 타이밍 지터 확산 계수(diffusion coefficient)를 얻을 수 있다. 이들 식에서 볼 수 있듯이, 모드 잠금된 레이저의 경우 광자 에너지가 열에너지에 비하여 수십 배 이상 큰 단점에도 불구하고, 펄스폭을 100펨토초 혹은 그 이하로 줄임으로써 마이크로파 발진기에 비하여 1000배 이상 타이밍 지터를 줄일 수 있는 가능성이 있다.

통상적인 어븀 첨가된 광섬유 모드 잠금된 레이저의 구동 조건들(1550 nm 파장, 수 nJ 펄스 에너지, 50 MHz 반복률, 100 fs 펄스폭)을 사용하여 과잉잡음인자(excess noise factor)가 1인 이상적인 조건 하에서의 양자잡음한계를 계산하면 0.1초 동안 100아토초 미만의 타이밍 지터만이 있음을 알 수 있다. 고성능 전자시계(electronic clock)의 타이밍 지터가 1 밀리초 동안 100펨토초 이상이라는 것과 비교해볼 때, 초고속 레이저를 사용하면 전자시계를 사용할 때보다 1000배 이

REFERENCES

- [4] H. A. Haus and A. Mecozzi, IEEE J. Quantum Electron. **29**, 983 (1993).
- [5] R. Paschotta, Appl. Phys. B **79**, 163 (2004).
- [6] J. Kim and F. X. Kärtner, Laser Photon. Rev. **4**, 432 (2010).

상 향상된 타이밍 성능이 가능함을 알 수 있다. 물론 이는 이상적인 경우이고, 실제로는 자발방출 광자 이외에도 진동 잡음이나 펌핑 레이저의 세기 잡음 등 다른 잡음원들과의 결합(coupling)에 의해 타이밍 지터는 증가하게 된다. 현재까지 실험적으로는 어븀 첨가된 광섬유 모드 잠금된 레이저와 Cr:LiSAF 고체 모드 잠금된 레이저로부터 0.1밀리초 동안 각각 5펨토초와 0.2펨토초의 타이밍 지터를 측정할 수 있다.^[7,8] 이러한 성능은 이미 최고 성능의 마이크로파 발진기들보다 우수한 잡음 특성이나 아직 양자잡음한계와는 상당한 차이를 보인다. 따라서 향후 기술적 잡음원(technical noise source)들을 억제하고, 잡음원들과의 결합을 최소화하는 레이저 구동 조건들을 찾으며, 펄스폭은 줄이면서 펄스 에너지를 증가시키는 레이저의 설계와 구현, 그리고 이러한 성능을 확인하고 개선하기 위한 아토초 분해능의 초정밀 타이밍 측정기술이 중요할 것이다.

초고속 레이저를 이용한 초정밀 동기화 기술

1. 초고속 레이저 간의 동기화

타이밍 지터가 작은 자유흐름 발진기(free-running oscillator)들은 피드백 제어에 의하여 잔류 타이밍 지터(residual timing jitter)가 작은 고성능 동기화가 가능하다. 앞서 살펴본 바와 같이 초고속 레이저는 단시간(예컨대 0.1 ms) 동안 축적되는 타이밍 지터가 펨토초 이하일 수 있기 때문에 잠금 대역폭(locking bandwidth)을 10 kHz 이상으로 충분히 크게 하면 펨토초 이하의 아토초 정밀도 동기화가 가능하다. 통상적인 동기화 방식인 고속 광다이오드와 마이크로파 혼합기(microwave mixer)를 이용한 기술로도 펨토초 이하의 잔류 타이밍 지터를 갖는 동기화가 가능함이 보여졌으나,^[9] 광다이오드와 회로 내에서의 전기신호의 위상 표류(phase drift)로 인하여 이같은 동기화 성능을 수초 이상 유지할 수 없는 문제가 있었다. 이의 해결을 위하여 균형 광 상호상관기(balanced optical cross-correlator)^[10]를 사용할 수 있다. 이 방식은 비선형광학 현상을 이용하여 타이밍 측정 감도(sensitivity)가 높을 뿐 아니라 광 영역에서 타이밍을 검출하기 때문에 전자 방식보다 높은 안정도를 보인다. 이를 이용하여 모드 잠금된 Ti:sapphire 레이저와 Cr:forsterite 레이저 간에 0.4펨토초 정밀도의 동기화를 12시간 이상 유지함을 실험적으로 보인 바 있다.^[11]

2. 초고속 레이저와 마이크로파 신호 간의 동기화

초고속 레이저에서 발생하는 광 펄스열의 펄스 반복률은

RF/마이크로파 주파수에 해당하기 때문에, 광검출 시 펄스 반복률과 그 조화파 성분들의 주파수를 갖는 마이크로파 신호를 얻을 수 있다. 초고속 레이저의 광 펄스열이 아토초 영역의 타이밍 지터를 가질 수 있으므로 이를 이용하면 위상 잡음이 매우 낮은 마이크로파 신호를 발생시키는 것을 기대할 수 있다. 하지만 광검출 및 전기신호 증폭 시 발생하는 초과 위상 잡음(excess phase noise)에 의해 초고속 레이저와 광검출된 마이크로파 신호 간의 타이밍에 오차가 생기게 된다. 특히 장시간에 걸친 위상 표류는 발생된 마이크로파 신호의 위상 안정도를 떨어뜨려, 광 원자시계의 매우 높은 시간 안정도를 전자신호 영역으로 옮기는 데 주요한 장애 요인이 되고 있다. 이의 해결을 위하여 광 영역에서의 위상 검출에 바탕을 둔 동기화 기술을 사용할 수 있다. 외부 마이크로파 발진기와 동기화를 위한 위상동기루프(phase-locked loop, PLL)나 마이크로파 신호의 초과위상 표류를 제거하기 위한 지연동기루프(delay-locked loop, DLL) 방식을 사용할 수 있으며, 후자의 방식을 사용하여 최근 0.84 펨토초 정밀도로 초고속 레이저와 마이크로파 신호 간의 동기화를 10시간 이상 유지함을 실험적으로 보였다.^[12]

3. 초고속 레이저를 이용한 원거리 타이밍 동기화

저잡음 광 펄스열은 광섬유망을 이용하여 원거리로 전송될 수 있다. 이때 온도 변화와 진동 등에 의하여 광섬유 전송 시 군지연(group delay)에 초과 잡음이 생성되는데 (km당, 분당 수 피코초 이상의 군지연 변동이 있을 수 있음), 이러한 잡음을 제거하기 위한 능동 타이밍 안정화 시스템을 앞서 설명한 균형 광 상호상관기를 이용하여 구현할 수 있다. 최근 실험적으로 초고속 레이저에서 발생된 광 펄스열을 반으로 나누어 두 개의 독립적으로 안정화된 300미터 길이의 광섬유를 통하여 전송시켜, 출력 광 펄스열들 사이를 0.4펨토초(1초 이내)와 7펨토초(72시간 동안) 정밀도로 동기화시킬 수 있음을 보였다.^[11]

앞서 살펴본 바와 같이 저잡음 초고속 레이저를 주발진기(master oscillator)로 사용하고 안정화된 광섬유망을 통하여 원거리에 있는 초고속 레이저나 마이크로파 발진기로 전송 후 동기화시키면, 넓은 영역에 걸쳐 흩어져있는 다수의 레이

REFERENCES

- [7] J. Kim *et al.*, Opt. Lett. **32**, 3519 (2007).
- [8] U. Demirbas *et al.*, Paper CTuDD6, CLEO/QELS 2010.
- [9] R. K. Shelton *et al.*, Opt. Lett. **27**, 312 (2002).
- [10] T. R. Schibli *et al.*, Opt. Lett. **28**, 947 (2003).
- [11] J. Kim *et al.*, Nature Photon. **2**, 733 (2008).
- [12] J. Kim and F. X. Kärtner, Opt. Lett. **35**, 2022 (2010).

저와 마이크로파 신호원들을 펨토초, 혹은 아토초 정밀도로 동기화시킬 수 있다. 이는 기존의 고성능 동축케이블이나 위성을 이용한 동기화 시스템이 수십 피코초에서 나노초 정도의 정밀도를 보이는 것과 비교하면 1000배 이상의 동기화 성능 향상이 가능함을 보여준다. 이러한 대규모 초정밀 동기화 시스템은 특히 천체관측용 대규모 위상배열 안테나(phased-array antenna)^[13]나 차세대 X-선 자유전자레이저(free-electron laser, FEL)^[14]의 건설과 운영에 매우 중요하게 요구되는 기술이다. 그림 2에서는 어떻게 초고속 레이저 기반 타이밍 동기화 시스템이 차세대 FEL의 동기화에 사용될 수 있는지 보여주고 있다. 이 글에서 소개된 동기화 시스템은 현재 건설 중인 독일 DESY의 European XFEL과 이탈리아 FERMI@Elettra에 실제로 설치되고 있으며, 앞으로 더 많은 가속기와 차세대 광원들에서 사용될 것으로 기대된다.

맺음말

이 글에서는 초고속 모드 잠금된 레이저들이 전통적인 시분해 분광학에서의 응용을 넘어, 우수한 잡음 특성을 바탕으로 한 초정밀 신호 생성과 동기화에 사용될 수 있음을 소개하였다. 초고속 레이저를 이용한 동기화 기술은 불과 몇 년의

Fig. 2. Schematic outline of the large-scale timing synchronization system for future free-electron lasers. Figure from Ref. [6].

역사를 지닌 초기 단계이지만, 차세대 FEL의 대규모 펨토초 정밀도 동기화 시스템에서 볼 수 있듯이 이전에 불가능하던 정밀도의 동기화를 가능하게 해주었다. 향후 통신, 계산, 신호 처리, 측정 등 많은 분야에서 더 높은 정밀도와 낮은 잡음을 갖는 신호원을 필요로 할 것이며, 초고속 레이저에 기반한 기술들은 더욱 폭넓게 사용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [13] For example, ALMA (almaobservatory.org) or SKA (www.skatelescope.org).
- [14] For example, LCLS (SLAC) or European XFEL (DESY).