

Attosecond 의 극소 잡음을 갖는 harmonic modelock 반도체

레이저

지상윤, *Peter Delfyett

광주 과학기술원 고등광기술연구소, *CREOL/ University of Central Florida, Orlando, FL

sgee@creol.ucf.edu

본 연구에서는 slab coupled optical waveguide amplifier (SCOWA)를 이용한 active modelock 레이저를 가지고 출력 펄스의 1Hz 에서 1 MHz 까지 timing jitter 잡음이 400 attosecond 이고 Nyquist 진동수까지는 7.5 femtosecond 임을 보고한다.

서론

낮은 잡음을 갖는 modelock 레이저는 광학적 clock 신호 분배나 광전자 analog to digital 변환기, 광학적 frequency 도량형, 광통신을 위한 광학 주파수 기준, 결맞는 광학적 파형 발생, 결맞는 광통신등의 응용에 필요한 광원이다. Slab coupled optical waveguide amplifier (SCOWA)는 포화출력을 1 watt 이상 발생할 수 있도록 고안된 반도체소자이다⁽¹⁾. 최근 들어 SCOWA 를 이용한 저 잡음 modelock 레이저에서 10Hz 에서 10 MHz 사이의 timing jitter 잡음이 8.5 fs 를 기록 하였다⁽²⁾. 본 논문에서는 그 이후의 레이저의 잡음을 줄이려는 계속된 노력의 결과로 1Hz 에서 1 MHz 까지 에서는 400 attosecond, 그리고 Nyquist 진동수인 5 GHz 까지 바깥 늘려졌을 때엔 7.5 fs 의 timing jitter 잡음을 갖는 광학적 펄스들의 발생을 보고한다. 우리가 알고 있는 바에 따르면 이것은 active modelocked 레이저를 통해서 보고된 가장 낮은 값의 잡음 이다. 이러한 향상의 주요 원인들로는 저 잡음의 RF 신호원을 사용한 것과 dispersion compensating fiber (DCF)를 레이저 공진기 속에 삽입하여 공진기 전체 분산이 정상분산을 갖게 한 점이다.

실험

실험에 사용된 레이저의 개략도가 그림 1 에 나타나 있다. 이 레이저는 전기광학 변조기와 외부형 공진기를 이용하여 harmonic actively modelock 이 되었다. 레이저 gain 물질로는 SCOWA 가 사용되었고 bias 전류는 4 A 이었다⁽¹⁾. SCOWA 의 도파관은 이미 반사방지막이 코팅된 facet 과 5° 의 각을 이루어 facet 에서의 빛의 반사를 억제하였다. RF 신호원으로는 Poseidon Scientific 에서 제작한 sapphire loaded crystal oscillator (SLCO)를 이용하였는데 이 공진기는 상업적으로 나와있는 일반적인 RF synthesizer 에 비해 현저히 낮은 잡음을 갖고 있다. 레이저 공진기의 기본 mode 의 간격은 ~9 MHz 이며, modelocking 진동수는 10.24 GHz 이다.

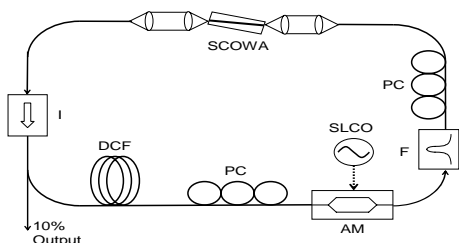


그림1. 레이저 공진기의 개요. I: isolator, DCF: dispersion compensating fiber, PC: polarization controller, SLCO: sapphire loaded crystal oscillator, AM: 전기광학 변조기, F: optical band pass filter

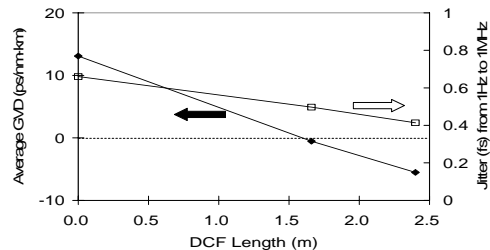


그림2. Timing jitter 잡음(1Hz ~ 1MHz) 과 평균 공진기 분산의 DCF 길이 의존성.

그림 2 는 timing jitter 의 공진기 분산에 대한 의존성을 보여준다. 길이가 다른 DCF 를 공진기 속에 집어넣어 전체 공진기의 평균분산을 각각 비정상 분산인 13.1 ps/nm-km 과 0 의 분산, 그리고 정상분산인 -5.5 ps/nm-km 이 되게 하였다. 그림 2 는 정상분산이 증가함에 따라 잡음이 감소하는 추세를 보여준다.

이와 비슷한 경향이 솔리톤 광섬유 레이저에서도 발표된 바 있다⁽³⁾. 본 실험에 쓰인 레이저의 경우, 반도체 gain 물질의 integrating self phase modulation (ISPM)과 공진기의 분산의 상호작용이 주요원인일 것으로 보고 있다. 예를 들어, active modelock의 경우 ISPM은 down chirp의 광학적 펄스들을 만들어 낸다. 반면에 공진기의 분산은 그것이 정상분산이나 비정상분산이냐에 따라서 각각 down chirp 혹은 up chirp을 일으킬 수 있다. 그림 3과 그림 4는 공진기가 정상분산을 가질 때 상대적 위상 잡음을 측정 한 결과와 광학적 스펙트럼을 보여주고 있다. 첫번째 supermode noise를 포함한 1Hz에서 10MHz까지의 timing jitter 잡음은 770 attosecond이다. 100MHz까지의 측정 결과를 가지고 Nyquist 진동수까지 바깥 둘러졌을 때엔 7.5 fs의 timing jitter 잡음을 가짐을 유추할 수 있다.

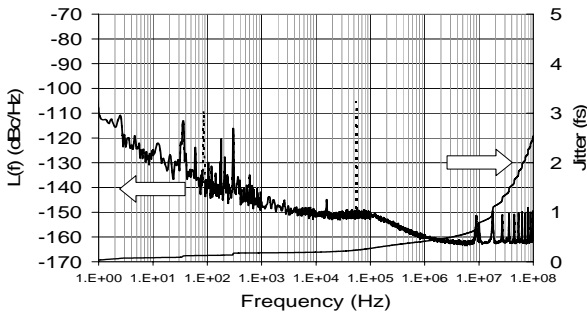


그림3. 공진관에 2.4m의 DCF가 쓰였을 때 상대적 위상 잡음의 스펙트럼과 1 Hz에서부터 적분한 timing jitter 잡음. 2.4 m DCF. Spurs는 점선으로 표시.

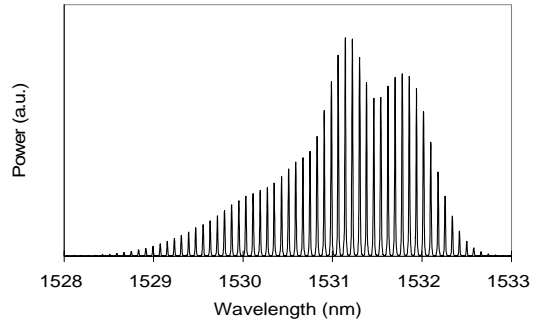


그림4. 공진관에 2.4m의 DCF가 쓰였을 때 광학적 스펙트럼.

레이저 공진기의 분산이 영일 때 약 5 nm의 넓은 광학적 스펙트럼이 얻어졌다 (그림 5). 출력 펄스의 분산을 보상했을 때의 자체상관관계 측정 결과는 900 fs의 펄스 폭을 보여주고 있다 (그림 6).

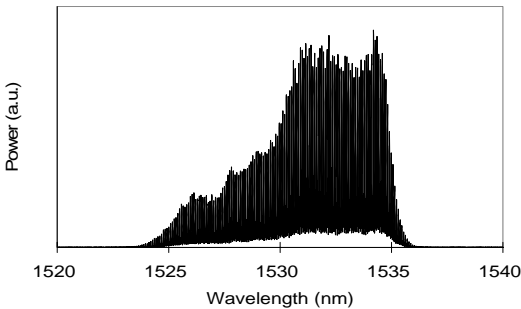


그림5. 공진관의 분산이 0 일 때 광학적 스펙트럼.

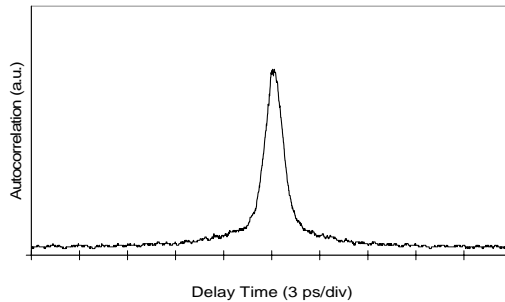


그림6. 공진관의 분산이 0 일 때 자체상관관계 측정결과.

결론

SCOWA를 이용해서 active modelock을 한 레이저의 잡음은 공진기의 분산에 큰 영향을 받음이 관찰되었다. 가장 낮은 잡음은 400 attosecond로 (1Hz~1MHz) 공진기의 분산이 정상일 때 SLCO를 이용해서 레이저를 구동해서 얻어졌다. 이 결과는 우리가 아는 바에 따르면 active modelock 레이저에서 현재까지 보고된 가장 낮은 값의 timing jitter 잡음이다.

참고문헌

1. P. Juodawlkis, J. J. Plant, R. K. Huang, L. J. Missaggia and J. P. Donnelly, "High-Power 1.5- μ m InGaAsP-InP Slab-Coupled Optical Waveguide Amplifier," IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 17, no. 2, pp. 279-281, Feb. (2005).
2. Sangyoun Gee, Franklyn Quinlan, Sarper Ozharar, and Peter J. Delfyett, J. J. Plant, and P. W. Juodawlkis, "Ultralow noise modelocked optical pulse trains from a slab coupled optical waveguide amplifier (SCOWA) based external cavity laser," Optics Letters, vol. 30, no. 20, pp.2742-2744, Oct. (2005)
3. M.E Grein, H.A. Haus, Y. Chen, E. P. Ippen, "Quantum-limited timing jitter in actively modelocked lasers," IEEE J. Quant. Electr., vol. 40, no. 10, pp. 1458-1470, Oct. (2004).