

Passively Mode-Locked 1.93- μm All-Fiberized Femtosecond MOPA Laser Using a Gold-Deposited Side-Polished Fiber

Minwan Jung, Joonhoi Koo, and Ju Han Lee[†]

School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

(Received August 20, 2014; Revised manuscript October 2, 2014; Accepted October 2, 2014)

We experimentally demonstrate the use of a gold-deposited side-polished fiber as a 2- μm -band polarizing device to produce mode-locked pulses from a thulium/holmium-codoped fiber ring cavity. The mode-locking effect was induced by nonlinear transmission caused by the gold-deposited side-polished fiber, due to nonlinear polarization rotation of the oscillated beam within the fiberized cavity. It is also shown that ~558-fs pulses with a peak power of ~6.7 kW could readily be produced at a wavelength of 1935 nm through subsequent thulium/holmium-codoped fiber amplification, due to the higher-order soliton compression effect.

Keywords: Mode-locked laser, Fiber Laser, Thulium-doped fiber

OCIS codes: (140.4050) Mode-locked lasers; (060.3510) Lasers, fiber; (140.7090) Ultrafast lasers

금 증착 측면연마 광섬유를 이용한 1.93 μm 모드잠금 펨토초 전광섬유 MOPA 레이저

정민완 · 구준희 · 이주한[†]

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
④ 130-743 서울특별시 동대문구 서울시립대로 163

(2014년 8월 20일 받음, 2014년 10월 2일 수정본 받음, 2014년 10월 2일 게재 확정)

본 논문에서는 금이 증착된 측면연마 광섬유를 2 μm 대역 편광기로 이용하여 Thulium/Holmium 첨가 광섬유 기반 링 캐비티로부터 모드 잠금 레이저를 구현할 수 있음을 실험적으로 보였다. 모드 잠금 현상은 광섬유로 구성된 공진기 내부에서 진행하는 빔이 겪는 Nonlinear Polarization Rotation 현상에 기반하여 삽입된 금 증착 측면연마 광섬유에서 발생되는 Nonlinear Transmission 반응에 의해 유도되었다. 또한 공진기로부터 발생되는 출력 1.93 μm 파장의 광펄스를 Thulium/Holmium 첨가 광섬유 증폭기를 통과시켜 Higher Order Soliton Effect를 통해 압축시킴으로써 최대 첨두 출력 ~6.7 kW를 갖는 펄스폭 ~558 fs의 고출력 펨토초 펄스를 얻을 수 있음을 실험적으로 보였다.

Keywords: 모드 잠금 레이저, 광섬유 레이저, 툴륨 첨가 광섬유

OCIS codes: (140.4050) Mode-locked lasers; (060.3510) Lasers, fiber; (140.7090) Ultrafast lasers

I. 서 론

Thulium 첨가 광섬유를 기반으로 하는 레이저는 기존의 산업에서 사용되고 있는 고체형 2 μm 레이저를 대체할 수 있는 대안으로서 최근 의료용 및 군사용 응용분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. Thulium 첨가 광섬유 레이저의 경우 고체형 레이저 대비 광섬유 레이저가 갖고 있는 고유의 장점인 높은 빔품질, 안정성, 유지보수편의성에 더하여 높은 펌핑광 효율을 지니고 있어 현재 광섬유 레이저 분야에서 주요한 연구 주제가 되고 있다.^[1-3]

일반적으로 펄스 레이저를 구현하는 방법으로는 크게 Q-스위칭 과 모드 잠금 원리를 사용하는 두 가지의 방법이 존재하며 이 방법들은 외부에서 동기화 구동 신호를 넣어 주느냐 여부에 따라 능동형^[4-9] 과 수동형^[10-14]으로 나뉜다. 그 중 펨토초 레벨의 극초단 펄스 레이저를 구현하기 위해서는 수동형 모드잠금 방법을 사용하여야 하는 것으로 알려져 있다. 특히 펨토초 극초단 펄스를 생성하기 위해서는 일반적으로 반응시간이 극히 짧은 수동형 포화흡수체의 비선형 흡수 현상을 이용하거나 펌핑기를 공진기 내부에 삽입하여 공진하는 빔이 광섬유내에서 Kerr 비선형 현상으로 인해 펌핑이

[†]E-mail: j.h.lee@ieee.org

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

회전하는 현상인 Nonlinear Polarization Rotation (NPR)에 의해 유도되는 비선형 Transmission modulation 효과를 이용한다.^[15-22] 최근 $2\text{ }\mu\text{m}$ 대역에서 동작하는 포화흡수체에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 반도체,^[15, 16] Carbon Nanotube,^[17] Graphene,^[18-21] Topological Insulator^[22] 등의 물질을 기반으로 하는 포화흡수체들이 개발되어 발표되었다. 이러한 포화흡수체를 사용하는 다양한 형태의 안정된 광섬유 기반의 펨토초 레이저들이 제안되었으며 실험적으로 우수한 성능을 지닌 광섬유 기반의 $2\text{ }\mu\text{m}$ 펄스레이저들이 발표되었다. 반면, NPR 현상을 기반으로 하는 $2\text{ }\mu\text{m}$ 대역의 펨토초 레이저에 대한 연구는 그다지 활발히 진행되어 오지 않았으며 현재 까지 고가의 Polarization Sensitive Isolator을 공진기 내에 삽입하는 구조를 갖는 수 피코초 정도의 펄스폭을 가지는 초단 펄스 레이저만이 발표되었다.^[23, 24]

본 연구에서는 좀더 수월하게 $2\text{ }\mu\text{m}$ 대역의 모드잠금 광섬유 레이저를 구현하는 방법의 하나로서 금이 증착된 측면연마 광섬유를 고가의 장파장 대역 마이크로 광학 편광기의 대체 하는 방법을 제안하고 이를 Thulium/Holmium이 첨가된 광섬유 Ring Cavity에 삽입함으로써 전광섬유 구조로 된 안정적인 모드잠금 레이저를 구현할 수 있음을 실험적으로 보이고자 한다. 또한, 공진기로부터 출력된 모드잠금 펄스를 증폭하여 증폭기 광섬유 내에서 Higher order soliton compress 효과를 이용하여 압축함으로써 최대 첨두 출력 6.7 kW (평균 출력 75 mW)를 갖는 펄스폭 $\sim 558\text{ fs}$ 의 안정된 극초단 펄스를 발생시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

II. 본 론

Figure 1은 Thulium/Holmium 첨가 광섬유 기반 수동형 모드 잠금 Mater Oscillator and Power Amplifier (MOPA) 레이저 구성도이다. 구현된 레이저 캐비티는 링 구조를 갖고 있으며, 1 미터의 Thulium Holmium co-doped Fiber (Coractive, TH512)를 이득 물질로 사용하였다. 그 외 Isolator, 90:10 Coupler, Polarization Controller (PC), Wavelength Division Multiplexer (WDM) 1550/2000 nm, Gold D-shaped Fiber 를 사용하여 캐비티를 구성하였다. 링 캐비티 내부 이득 물질인 Thulium Holmium co-doped Fiber는 1550 nm에서 약 13 dB/m 의 흡수도를 가진다. 펨프 레이저는 250 mW 파워를 가지는 1550 nm 레이저 다이오드를 사용하였으며 WDM Coupler를 통해 순방향으로 입사하였다. 90 : 10 커플러를 이용하여 캐비티로부터 공진되는 빔의 10%를 외부로 출력하여 출력 단을 구성하였다. 캐비티 내부 모든 소자는 스플라이싱을 통해 전부 광섬유 기반으로 구성하였으며 캐비티 총 길이는 10 m로 측정되었다. 구성된 캐비티의 총분산 (β_2)은 측정파장 1950 nm 에서 -0.5 ps^2 정도로 측정되었다. 펨프 파워가 250 mW일 때 10% coupler로 출력되는 펄스 레이저 출력 파워는 $\sim 0.5\text{ mW}$ 이다. 레이저 캐비티 내부 Isolator, WDM, 90:10 Coupler의 삽입손실은 각각 ~ 1.2 , ~ 0.5 , $\sim 0.8\text{ dB}$ 으로 측정되었다.

본 연구에서 사용된 금 증착 측면연마 광섬유의 구조는 Fig. 1과 같다. 길이 5 mm 인 Quartz Block 위에 표준 단일모드 광섬유(SMF28)를 고정 후 코어 위 클래딩을 $6\text{ }\mu\text{m}$ 남긴 채 식각한 후 평편한 평면 위에 금을 Sputtering 방법으로 증착하였다. 증착된 금의 두께는 15 nm 정도로 측정되었으며 공진하는 빔과의 반응 길이는 대략 1 mm로 추정되었다. 제작된 금 증착 측면 연마 광섬유의 삽입 손실은 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $\sim 6\text{ dB}$, PDL은 $\sim 4\text{ dB}$ 로 측정되었다.^[21] 금 입자가 증착된 측면 연마 광섬유의 역할은 금의 Metal 성질을 이용하여 Surface Plasmon Polaritons을 유도시켜 측면연마 광섬유에 Polarization Dependent Loss를 유발시키고자 하는 것이다.^[25]

구현된 레이저의 출력 특성은 오실로스코프, Optical Spectrum Analyzer, RF Spectrum Analyzer 등으로 측정하였다. Figure 2(a)는 15 GHz Photodetector (ET-5000F, EOT) 와 16 GHz Real-time Oscilloscope (DSA71604C, Tektronix)의 조합을 사용하여 펨프파워가 250 mW 일 때 측정한 오실로스코프 파형이다. 오실로스코프 파형 상 펄스의 주기는 $\sim 49.4\text{ ns}$, 반복률은 $\sim 20.1\text{ MHz}$, 레이저펄스 폭은 $\sim 60\text{ ps}$ 정도로 측정되었다. 출력 펄스 폭은 실험에 사용된 Real Time Oscilloscope (DSA71604C, Tektronix)의 최소 측정 가능한 펄스 폭이며, 실제 펄스 폭은 이보다 좁을 것으로 예상된다. 레이저 캐비티의 Fundamental Resonance Frequency 와 측정된 펄스 반복률이 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 각각의 반복되는 주된 펄스 사이로 작은 펄스들이 주기적으로 나타나는 것을 관측하였다. 이는 Photodetector 와 Oscilloscope 사이에서 반사되는 전자기파 신호로 확인 되었으며, 광 신호 펄스는 아닌 것으로 확인되었다.

Figure 2(b)에서는 레이저 출력의 광 스펙트럼을 보여주고 있으며, 이 때 Spectral Bandwidth는 약 $\sim 5.5\text{ nm}$, 중심 파장은 $\sim 1935\text{ nm}$ 으로 측정되었다. 이때 출력된 펄스가 Transform Limited Soliton Pulse 라 가정할 때, 식 (1)과 같이 펄스의 폭과 Spectral Bandwidth 관계식이 성립된다. 이때 $\Delta\tau$ 는 Pulse

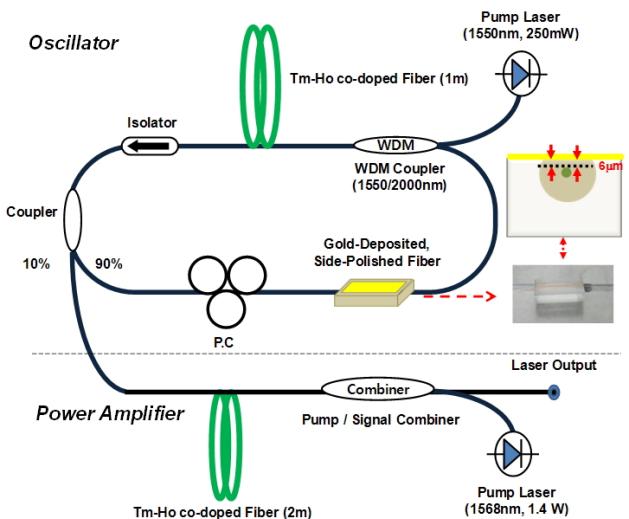


FIG. 1. The experimental schematic of our MOPA laser system.

Width 이며, $\Delta\nu$ 는 Spectral Bandwidth이다. 이를 통해 출력 펄스의 폴스 폭을 추정할 때 최소 폴스 폭은 ~ 730 fs 정도로 예측된다.

$$\Delta\nu \cdot \Delta\tau \approx 0.314 \quad (1)$$

공진기 출력 펄스의 시간 축 크기를 정확히 측정하기 위하여 오토콜릴레이션 측정을 시도하였다. 하지만 현재 본 연구 그룹의 실험실에 보유 중인 2 μm 용 상용 오토코릴레이터 (FR-103HS(XL)/IR, Femtochrome)의 경우 입력 신호 세기에 대한 민감도가 예상보다 낮아 증폭되지 않은, 평균 파워 0.5 mW의 광펄스에 대한 시간축 폭 측정은 불가하였다.

출력 레이저의 RF spectrum analyzer로 측정한 결과는 Fig. 2(c)와 같으며, 이 측정은 Resolution Bandwidth를 30Hz로 고정한 채 수행되었다. 구현된 공진기의 Fundamental Resonance Frequency인 20.1 MHz에서 매우 강한 신호가 관찰되었으며 신호 대 백그라운드 비율은 약 50 dB 이상으로 관측되었다. 이를 통해 노이즈 성분이 극히 낮은 깨끗한 모드잡금 레이저가 구현되었음을 확인할 수 있었다.

다음으로, 공진기에서 발생한 모드잡금 펄스들은 효율적으로 증폭하고 압축하여 고출력 펨토초 펄스들을 얻기 위하여 2 미터의 Thulium-Holmium 첨가 광섬유를 기반으로 하는 전체 길이 8 m의 증폭기를 Fig. 1과 같이 공진기 출력단에 연결하였다. 이는 추가로 연결한 광섬유 증폭기를 통하여 공진기에 발생된 펄스를 증폭함과 동시에 Anomalous Dispersion과 Kerr Nonlinearity의 조합을 통하여 Higher Order Soliton 효과에 의한 펄스압축 현상을 유도하고자 함이었다. 본 증폭기의 펌핑광으로는 1568 nm의 DFB 레이저 출력광을 Erbium/Ytterbium 첨가 광섬유 증폭기로 증폭한 빔을 사용하였다. 펌핑광의 최대 세기는 ~ 1430 mW로 측정되었으며, 펌프 광원은 WDM Coupler를 통해 역방향으로 Erbium/Ytterbium 첨가 광섬유에 입사하였다.

Figure 3(a)는 증폭기 이후 펌프 파워에 따른 증폭된 펄스의 광 스펙트럼이며, Fig. 3(b)는 그에 따른 오토코릴레이터 측정 결과이다. 펌프 파워 250mW 일 경우부터 본 실험실에서 보유한 오토코릴레이터로 폴스 폭 측정이 가능하였으며 이 경우 측정된 폴스 폭은 ~ 2.4 ps였다. 공진기 출력 펄스의 광스펙트럼과 비교하여 펌프 파워 250 mW로 증폭한 펄스의 광스펙트럼 상 눈에 띠는 대역폭 변화는 없었으며 Spectral Modulation 또한 관찰되지 않았다. 증폭기의 충분산 ($\beta_2 = -0.514$ ps²)를 고려할 때 공진기 출력 펄스의 폭은 ~ 2.4 ps 보다 더 좁을 것이라 생각되며 대략 ~ 1.2 ps로 추정된다. Figure 3(b)에서 보듯 Pump Power가 0.25W인 경우 Autocorrelation Trace가 Detector 노이즈로 인해 불안정해 지고 펄스 모양이 약간 일그러지는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 본 실험실에서 보유하고 있는 Autocorrelator 내장 Detector의 2um 대역 반응도가 낮아 신호의 증폭도가 낮은 경우 Autocorrelation 신호의 신호대잡음비가 나빠지는 현상에 기인하는 것으로

여겨진다.

점차적으로 펌프 파워를 증가시킴에 따라 출력 펄스 스펙

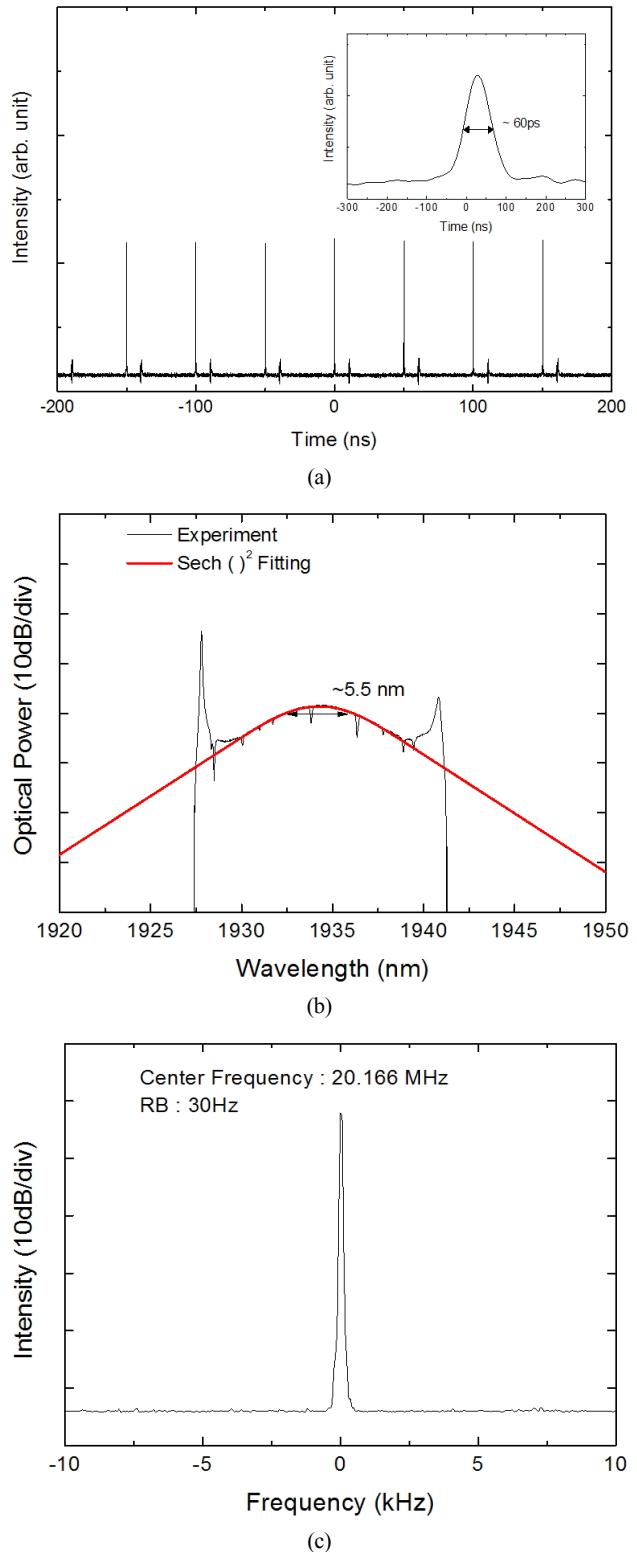


FIG. 2. Measured (a) oscilloscope trace, (b) optical spectrum, and (c) RF spectrum of the output pulses from the oscillator.

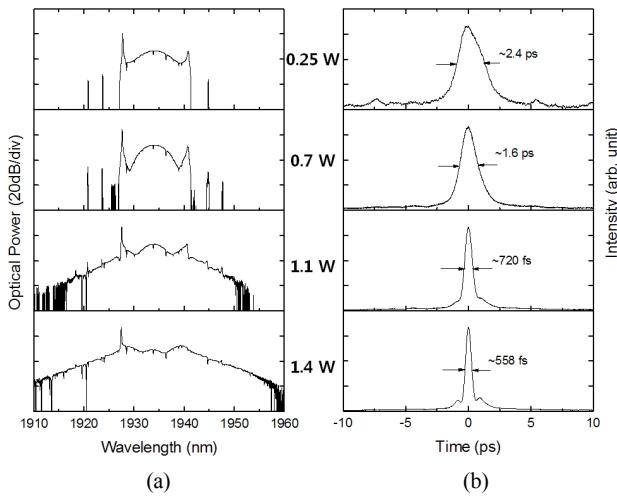


FIG. 3. Measured (a) optical spectra and (b) autocorrelation traces of the output pulses from the Thulium/Holmium-codoped fiber amplifier for various pump powers.

트럼이 확연히 변형됨을 알 수 있으며, 펨프 파워가 700mW 일 때 Self-Phase Modulation (SPM)으로 인하여 Spectral Bandwidth가 $\sim 4.2\text{ nm}$ 으로 중폭 전 폴스 스펙트럼 보다 대략 1.3 nm 감소됨을 알 수 있다. 여기서 주목해야 될 것은 SPM 현상이 일어나는 경우 바로 스펙트럼의 폭이 커지는 것이 아니라 초기에는 폭이 약간 줄어들다가 커지는 경향으로 돌아선다는 것이다. 이 현상은 흔히 알려져 있는 SPM의 경향성 중의 하나이다.^[26] 이 때 오토코릴레이터로 측정된 폴스 폭은 $\sim 1.6\text{ ps}$ 로 관찰되었다. 펨프 파워를 더욱 증가함에 따라 출력 폴스의 스펙트럼 변형이 커지는 것을 볼 수 있으며, 폴스 폭 또한 감소하여 최대 펨프 파워 ($\sim 1430\text{ mW}$) 일 때 폴스 폭은 $\sim 0.558\text{ fs}$ 로 나타난다. Figure 3의 광 스펙트럼과 Autocorrelation 파형에서 보듯이 중폭기의 펨핑광 세기를 증가시킴에 따라 폴스의 모양이 Fundamental Soliton이 아닌 Higher Order Soliton으로 변해 가는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 High Order Soliton으로 진행해 갈에 따라 Fundamental Soliton의 폴스 폭 보다 더 감소 될 수 있다는 사실은 널리 알려져 있으며,^[27] 구현된 레이저에서도 동일한 현상이 발생됨을 확인하였다. 식 (2)는 일반적인 Higher Order Soliton 차수에 관한 식이다. 여기서 N 은 Soliton Order이며, L_D 와 L_{NL} 은 분산과 비선형 길이를 의미한다. 또한 P_0 는 폴스의 첨두치이며, T_0 는 폴스의 폭, β_2 는 Group Velocity Dispersion Parameter이다.^[27]

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2)$$

광섬유 중폭기를 통과하는 폴스들의 Soliton 차수는 최대 펨핑광의 경우 대략 3으로 예측되었다.

Figure 4는 중폭된 폴스의 평균 출력 파워 및 폴스 폭을 정

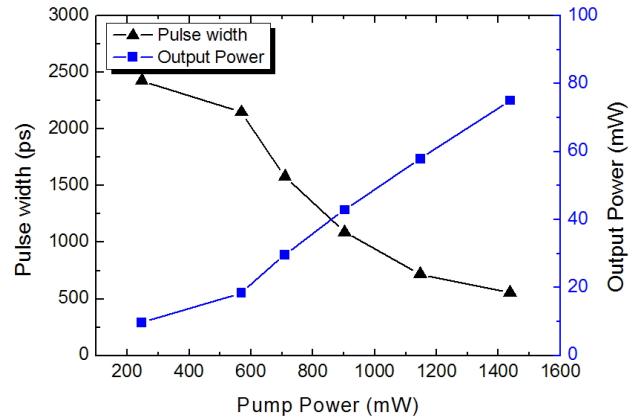


FIG. 4. Measured temporal width and average output power of the output pulses from the Thulium/Holmium-codoped fiber amplifier as a function of the amplifier pump power.

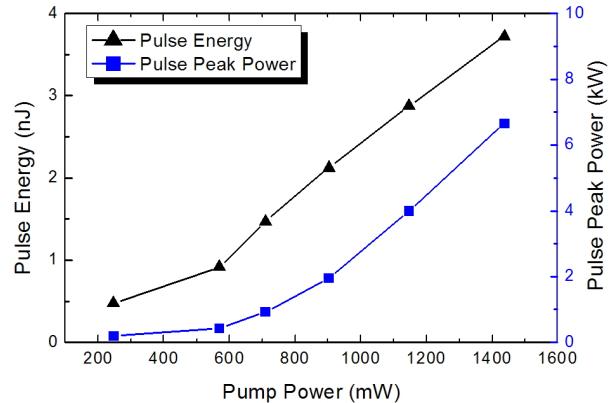


FIG. 5. Measured pulse energy and pulse peak power of the output pulses from the Thulium/Holmium-codoped fiber amplifier as a function of the amplifier pump power.

리한 그래프이다. 펨프 세기가 $\sim 250\text{ mW}$ 일 경우 출력 폴스의 평균 파워는 $\sim 10\text{ mW}$ 정도였으며 펨프 세기를 증가시킴에 따라 출력 폴스의 평균 파워는 대체로 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 최대 평균 출력파워는 $\sim 75\text{ mW}$ 으로 측정되었다. 반면에 폴스 폭은 펨프 파워를 증가함에 따라 비선형적으로 감소 하는 것을 보이며, 펨프파워가 $\sim 1440\text{ mW}$ 일 때, 중폭된 폴스의 최소 폴스 폭은 $\sim 0.558\text{ fs}$ 로 나타난다. 앞서 말했듯이 Higher Order Soliton 현상이 발생함으로써 폴스 폭이 좁아지는 것으로 이해할 수 있다. 폴스에너지와 폴스 첨두 세기를 정리한 그림은 Fig. 5와 같으며, 최대 출력 폴스의 에너지는 3.8 nJ 이고 최대 폴스 첨두 세기는 $\sim 6.7\text{ kW}$ 으로 측정되었다.

출력 폴스의 안정도를 측정하기 위하여 1시간 정도 레이저 및 중폭기를 동작시키며 출력 폴스의 폭, 파워 등의 변화를 관찰하였으며 실험실 온도를 25°C 로 유지했을 경우 출력 특성의 변화없이 안정되게 작동됨을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 측면연마 광섬유 위에 금을 증착한 편광 소자를 사용하여 Thulium/Holmium첨가 광섬유 기반의 수동형 모드 잠금 레이저를 구성하고 공진기 출력단을 Thulium/Holmium 첨가 광섬유 증폭기에 연결한 Master Oscillator Power Amplifier (MOPA)의 고출력 펨토초 펄스레이저 시스템을 실험적으로 데모하였다. 본 시스템을 통하여 펄스폭 ~558 fs, 최대 첨두출력 ~6.7 kW 특성을 갖는 1.93 μm 고출력 극초단 펄스를 얻을 수 있음을 보였으며 출력 펄스의 특성을 오실로스코프, 광스펙트럼, 전기적 스펙트럼 측정을 통하여 분석하였다.

본 논문을 통하여 제시된 측면연마 광섬유 위에 금을 증착한 편광 소자는 2 μm 중적외선 대역에서 NPR현상에 기반한 모드잠금 광섬유 레이저를 구현하기에 적합한 유용한 소자로서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 서울시립대학교 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- G. D. Spiers, R. T. Menzies, J. Jacob, L. E. Christensen, M. W. Phillips, Y. Choi, and E. V. Browell, "Atmospheric CO₂ measurements with a 2 μm airborne laser absorption spectrometer employing coherent detection," *Appl. Opt.* **50**, 2098-2111 (2011).
- K. D. Polder and S. Bruce, "Treatment of melasma using a novel 1,927-nm fractional thulium fiber laser: A pilot study," *Dermatol Surg.* **38**, 199-206 (2012).
- R. J. De Young and N. P. Barnes, "Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system," *Appl. Opt.* **49**, 562-567 (2010).
- M. Jung and J. H. Lee, "Actively Q-switched, Thulium-Holmium-codoped fiber laser incorporating a silicon-based variable optical attenuator-based Q switch," *Appl. Opt.* **52**, 2706-2710 (2013).
- Y. M. Chang, J. Lee, and J. H. Lee, "Active mode-locking of an erbium-doped fiber laser using an ultrafast silicon-based variable optical attenuator," *Japanese Journal of Applied Physics* **51**, 072701 (2012).
- Y. Joeng, Y. Kim, A. Liem, K. Moerl, S. Hoefer, A. Tuennermann, and K. Oh, "Q-switching of Yb³⁺-doped fiber laser using a novel micro-optical waveguide on micro actuating platform light modulator," *Opt. Express* **13**, 10302-10309 (2005).
- R. J. Williams, N. Jovanovic, G. D. Marshall, and M. J. Withford, "All-optical, actively Q-switched fiber laser," *Opt. Express* **18**, 7714-7723 (2010).
- H. D. Lee, J. H. Lee, M. Y. Jeong, and C.-S. Kim, "Characterization of wavelength-swept active mode locking fiber laser based on reflective semiconductor optical amplifier," *Opt. Express* **19**, 14586-14593 (2011).
- W. Seitz, R. Ell, U. Morgner, T. R. Schibli, F. X. Kärtner, M. J. Lederer, and B. Braun, "All-optical active mode locking with a nonlinear semiconductor modulator," *Opt. Lett.* **27**, 2209-2211 (2002).
- J. Koo and J. H. Lee, "Passive Q-switching of a fiber laser using a side-polished birefringent fiber with index matching gel spread on the flat side," *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* **112**, 61-65 (2013).
- S. Y. Choi, D. K. Cho, Y.-W. Song, K. Oh, K. Kim, F. Rotermund, and D.-I. Yeom, "Graphene-filled hollow optical fiber saturable absorber for efficient soliton fiber laser mode-locking," *Opt. Express* **20**, 5652-5657 (2012).
- J. Koo, Y.-W. Song, and J. H. Lee, "A carbon nanotube-embedded fiber-optic tunable coupler for flexible repetition rate control of a passively Q-switched fiber laser," *Laser Phys.* **24**, 045105 (2014).
- Y. Zhang, V. Petrov, U. Griebner, X. Zhang, S. Y. Choi, J. Y. Gwak, F. Rotermund, X. Mateos, H. Yu, H. Zhang, and J. Liu, "90-fs diode-pumped Yb:CLNGG laser mode-locked using single-walled carbon nanotube saturable absorber," *Opt. Express* **22**, 5635 (2014).
- H. Yang, H. Kim, J. Shin, C. Kim, S. Y. Choi, G. H. Kim, F. Rotermund, and J. Kim, "Gigahertz repetition rate, sub-femtosecond timing jitter optical pulse train directly generated from a mode-locked Yb:KYW laser," *Opt. Lett.* **39**, 56 (2014).
- A. Wienke, F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner, J. Neumann, and D. Kracht, "Ultrafast, stretched-pulse thulium-doped fiber laser with a fiber-based dispersion management," *Opt. Lett.* **37**, 2466-2468 (2012).
- L.-M. Yang, P. Wan, V. Protopopov, and J. Liu, "2 μm femtosecond fiber laser at low repetition rate and high pulse energy," *Opt. Express* **20**, 5683-5688 (2012).
- M. A. Chernysheva, A. A. Krylov, P. G. Kryukov, N. R. Arutyunyan, A. S. Pozharov, E. D. Obraztsova, and E. M. Dianov, "Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber," *Opt. Express* **20**, B124-B130 (2012).
- J. Liu, S. Wu, J. Xu, Q. Wang, Q.-H. Yang, and P. Wang, "Mode-locked 2 μm thulium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber," in Proc. CLEO, JW2A.76 (2012).
- M. Zhang, E. J. R. Kelleher, F. Torrisi, Z. Sun, T. Hasan, D. Popa, F. Wang, A. C. Ferrari, S. V. Popov, and J. R. Taylor, "Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite," *Opt. Express* **20**, 25077-25084 (2012).
- M. Jung, J. Koo, P. Debnath, Y.-W. Song, and J. H. Lee, "A mode-locked 1.91 μm fiber laser based on interaction between graphene oxide and evanescent field," *Appl. Phys. Express* **5**, 112702 (2012).
- M. Jung, J. Koo, J. Park, Y.-W. Song, Y. M. Jhon, K. Lee,

- S. Lee, and J. H. Lee, "Mode-locked pulse generation from an all-fiberized, Tm-Ho-codoped fiber laser incorporating a graphene oxide-deposited side-polished fiber," *Opt. Express* **21**, 20062-20072 (2013).
22. M. Jung, J. Lee, J. Koo, J. Park, Y.-W. Song, K. Lee, S. Lee, and J. H. Lee, "A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator," *Opt. Express* **22**, 7865-7874 (2014).
23. R. Kadel and B. R. Washburn, "All-fiber passively mode-locked thulium/holmium laser with two center wavelengths," *Appl. Opt.* **51**, 6465-6470 (2012).
24. X. He, A. Luo, Q. Yang, T. Yang, X. Yuan, S. Xu, Q. Qian, D. Chen, Z. Luo, W. Xu, and Z. Yang, "60 nm bandwidth, 17 nJ noiselike pulse generation from a thulium-doped fiber ring laser," *Appl. Phys. Express* **6**, 112702 (2013).
25. R. B. Dyott, J. Bello, and V. A. Handerek, "Indium-coated D-shaped-fiber polarizer," *Opt. Lett.* **12**, 287-289 (1987).
26. R. H. Stolen and C. Lin, "Self-phase-modulation in silica optical fibers," *Phys. Rev. A* **17**, 1448 (1978).
27. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic, 2007).