

# 광 강도/위상변조기 및 단일모드 광섬유를 이용한 CW 광원으로부터 10 GHz 초단 펄스발생

## Generation of 10 GHz Short Pulses from Continuous Wave Laser Using Cascaded Intensity and Phase Modulators and a Single Mode Optical Fiber

성현주\*, 서동선\*\*

Hyun-Ju Sung\*, Dong-Sun Seo\*\*

### Abstract

We generate 10 GHz short pulses from a continuous wave laser at 1.5  $\mu\text{m}$  by cascaded intensity and phase modulation, followed by chirp compensation using a single mode fiber. The measured spectral and pulse widths are 0.64 nm and 5.7 ps respectively, resulting in the time-bandwidth product of 0.46.

### 요 약

광 강도 및 위상변조 후에 단일 모드 광섬유로 칩을 보상함으로써 CW 광원으로부터 10 GHz 초단 펄스를 발생시켰다. 발생된 펄스는 0.64 nm의 스펙트럼 폭과 5.7 ps의 펄스폭을 보임으로서 시간대역 곱이 0.46인 준 변환제한된 펄스임을 보였다.

*Key words : optical pulses, spectral comb, phase modulation, chirp compensation*

## 1. 서론

안정된 고속의 초단 펄스열은 초고속 광통신 뿐만 아니라, 광계측, 스펙트로스코피, 마이크로파 광자기술, 등 많은 분야에 응용될 수 있다 [1-4]. 광통신 대역인 1.5  $\mu\text{m}$ 의 10 GHz 초단 광펄스를 발생시키는 방법으로서 능동모드잠금 광섬유레이저가 많이 이용되

어 왔다 [5,6]. 많은 우수한 연구결과에도 불구하고, 모드잠금광섬유 레이저는 공진기의 길이가 수 10 m로 매우 길기 때문에 온도 및 진동의 외부 영향에 취약하며, 이로 인해 시간 및 위상 지터(jitter)가 증가하여 성능개선이 요구된다.

모드잠금 레이저의 단점을 보완하는 방법으로써 외부에서 안정된 광을 주입하여 발생된 스펙트럼 콤(comb)을 잠금시키는 방법 [7-9], 공진기내에 높은 피네스(finesse)를 갖는 웨브리페롯 에탈론(Fabry-Perot etalon)을 삽입하여 발전하는 광 주파수 콤을 FP 에탈론의 주기적인 주파수 통과 특성에 잠금시키는 방법 [10, 11], 수동 광소자를 이용하여 연속(CW) 발전 레이저로부터 안정된 펄스열을 얻는 방법 [12-14], 등이 제안된바 있다. 본 연구에서는 시스템이 간단하고 안정도가 높은 수동광소자를 이용하는 방법을 연구한다. 즉, CW 레이저 출력을 광강도 변조한 뒤, 강도변조된 펄스열에 위상변조기를 이용하여 선형 칩(chirp)을 인가하고, 이를 광섬유의 분산특성을 이용하여 칩

\* Dept. of Electronics Engineering, Myong Ji University  
C.P : 010-5195-7090, E-mail : haha88110@naver.com

\*\* Dept. of Electronics Engineering, Myong Ji University  
+82-31-330-6369, E-mail : [sdsphoto@mju.ac.kr](mailto:sdsphoto@mju.ac.kr)

※ Acknowledgement : This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2012-0008390).

Manuscript received Nov. 19, 2012, accepted Nov. 27, 2012.

보상 및 펄스 압축하는 방법을 연구한다. 제시된 방법은 모드잠금 레이저에 비해 시스템이 간단하게 구성되고 핵심소자의 수동적인 특성에 의해 안정성이 우수한 펄스열 발생이 가능하다는 장점이 있다. 특히, 입력으로 사용하는 CW 레이저의 주파수 안정도가 우수하면 생성된 펄스열의 스펙트럼 폭 주파수 안정도가 매우 우수한 장점이 있다. 또한, 제시된 방법은 변조기의 변조주파수 변환만으로도 쉽게 원하는 속도의 펄스열 발생이 가능하며, 위상 변조기의 RF 구동 전력 조절만으로도 펄스폭까지 임의의 조절이 가능한 장점이 있다. 본 연구는 참고문헌 [12]의 결과를 개선한 연구로써, 고가의 펄스캐턴발생기 대신 정현파 발생기를 사용하여 시스템을 단순화시키고, 보다 넓은 스펙트럼 침을 유기하여 보다 짧은 광펄스를 발생시키고자 했다.

## II. 광 강도/위상 변조에 의한 초단 펄스 발생 원리 및 모사실험

CW 광원으로부터 광펄스를 발생시키기 위해서는 우선 단일스펙트럼 선을 진폭 및 위상 변조에 의해 펄스 주기에 해당하는 간격을 갖는 넓은 광 스펙트럼 선을 발생시키고, 이들을 같은 위상으로 잠금시키는 과정이 필요하다. 이를 시간 영역에서 해석하면 그림 1에 보인바와 같다. 즉, 연속광을 진폭(즉, 강도)변조하여 개략적인 펄스를 발생시킨 후에 위상변조기를 이용하여 펄스 구간에서 선형적인 주파수 침을 유기시킨다. 즉, 그림1에 개략적으로 보인 바와 같이, 펄스의 앞쪽에 낮은 반송파(carrier) 주파수 성분이 존재하고 뒷쪽으로 갈수록 반송파 주파수가 선형적으로 높아지도록 침을 유기시킬 수 있다. 이를 단일모드광섬유(SMF)와 같은 적절한 분산소자를 통과시켜서, 앞 쪽의 낮은 주파수 성분은 천천히 진행하고 뒷쪽의 높은 주파수 성분은 빠르게 진행하도록 하면 침이

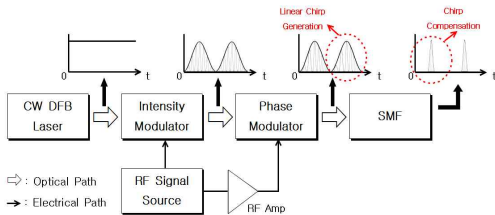


Fig. 1. Conceptual diagram of the pulse train generation from a CW laser by intensity/phase modulation and chirp compensation.

그림 1. 광강도/위상 변조 및 침 보상에 의해 CW 광 으로부터 펄스 발생장치의 개념도

보상되면서 펄스폭은 점점 줄어들게 된다.

이 같이 강도 변조된 펄스에 선형 침을 유기하기 위해서는 위상변조기를 톨니파로 구동하여야하나, 실제 시스템 구현의 편의 및 간략화를 위해 통상 강도 변조기와 위상변조기를 동일한 정현파 신호원으로 구동한다. 이는 필연적으로 선형 침이 발생하는 영역을 줄이게 되어 강도 변조된 신호의 앞쪽과 꼬리에 비선형 침 또는 역방향 침이 유기되어 펄스의 압축효과가 줄어들거나 압축된 펄스에 받침(pedestal)이 나타나게 된다. 이를 방지하기위해 강도 변조된 신호의 폭을 되도록 줄여야하나, 너무 좁으면 유기되는 침의 양이 작아져서 (통상 위상변조기에 인가되는 RF 전력은 최대 값으로 고정됨) 최종 압축된 펄스의 폭이 늘어나게 된다. 펄스 받침이 작고 짧은 펄스폭을 유지하는 최적 조건을 Optisim 프로그램을 이용한 모사실험을 통해 구하고, 그 결과를 그림 2에 보였다. 그림 2에 보인 바와 같이, 강도 변조된 출력 펄스폭이 37 ps 이고, 위상변조에 의해 유기된 스펙트럼 폭이 0.72 nm으로 나타났다. 발생된 침 신호를 보상하기 위한 최적 광섬유의 길이 L은 아래의 수식을 이용하여 쉽게 구할 수 있다 [12].

$$- \frac{1}{D} \frac{\Delta t}{\Delta \lambda} \quad (1)$$

여기서, 음의 부호는 보상을 의미하고, D는 광섬유 분산,  $\Delta t$ 는 펄스폭,  $\Delta \lambda$ 는 스펙트럼 폭을 나타낸다. 17.6 ps/nm/km의 분산 값을 가지는 단일모드광섬유(SMF)

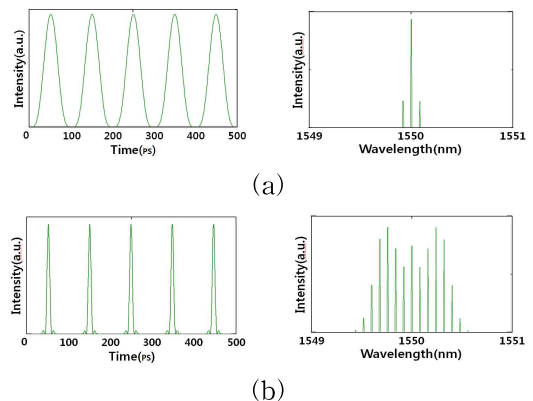


Fig. 2. Waveform (left) and spectrum (right) obtained by simulation; a) after intensity modulation, and b) after phase modulation and chirp compensation.

그림 2. 모사실험을 통해 얻은 파형(좌) 및 광 스펙트럼(우); a) 강도변조 후의 파형 및 스펙트럼, b) 위상변조 및 펄스압축 후의 파형(좌) 및 스펙트럼(우)

를 사용할 경우, 최적의 칩 보상을 위한 광섬유의 길이는 3 km 가 된다. 이 최적 광섬유를 이용하여 압축한 펄스를 그림 2(b)에 나타내었다. 삼각파가 아닌 정현파 위상변조에 의해 펄스 앞과 꼬리 부분에 약간의 비선형 칩이 유기되어 압축된 펄스에 약간의 받침이 보이나 비교적 우수한 펄스가 발생됨을 알 수 있다. 출력 펄스폭은 5.9 ps 로서 시간대역곱(time-bandwidth product)은 0.53이 되어 변환제한급의 펄스를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 실험에서 10 GHz의 최적 초단 광펄스를 발생시키고자한다.

### III. 실험 및 고찰

#### 1. 실험 장치 구성

그림 3은 광 강도변조기와 위상변조기 및 단일모드 광섬유를 이용하여 CW DFB 레이저(LD) 출력으로부터 10 GHz의 초단 광펄스열 발생시키는 장치의 개략도이다. 실험에 사용된 CW 광원은 1550 nm에서 동작하는 DFB LD이며, 이를 마하젠더(Mach-Zehnder) 강도변조기를 이용하여 10 GHz 정현파로 강도변조를 하였다. 강도변조기의 바이어스 점은  $V\pi/2$  전압보다 조금 낮게 인가하여, 그림 4에 보인 바와 같이 출력 펄스폭이 정현파 변조신호의 반주기 50 ps 보다 작도록 조정하였다.

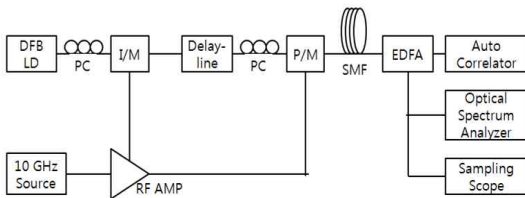


Fig. 3. Schematic diagram of the pulse train generation apparatus using a intensity modulator, phase modulator, and a single mode fiber.

그림 3. 광 강도변조기(I/M)와 위상변조기(P/M) 및 단일모드 광섬유(SMF)를 이용한 광 펄스열 발생 장치의 개략도

샘플링스코프로 관측된 펄스폭은 40 ps 로서, 샘플링스코프의 대역폭 40GHz를 고려하면 약 35 ps로 예측된다. 즉, 관측된 파형 및 스펙트럼은 그림 2의 모사 실험과 매우 유사함을 알 수 있다. 이제, 위상변조기

에 27 dBm의 RF 전력을 인가하여, 강도변조된 신호에 선형의 청색칩을 유기시켰다. 최적의 칩을 유기시키기 위해 광지연기(delay-line)을 이용하여 위상변조기 구동 위상을 조절하였다. 칩이 유기된 신호는 SMF를 이용하여 유기된 칩을 보상해 줌으로서 압축된 펄스출력을 얻을 수 있다.

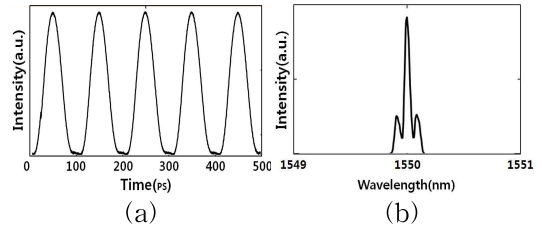


Fig. 4. Intensity modulator output; a) samplingscope trace, and b) the corresponding optical spectrum.

그림 4. 광 강도변조기(I/M) 출력 신호; a) 샘플링스코프 궤적, b) 광 스펙트럼.

#### 2. 실험 결과

그림 5는 그림 4의 강도 변조된 광 신호를 위상변조기를 이용하여 선형 칩을 유기시킨 스펙트럼을 보인다. 유기된 칩에 의해 스펙트럼 폭은 모사실험(그림 2 참조)을 통해 예측된 스펙트럼과 매우 유사하게 0.65 nm (약 80 GHz)로 넓어졌음을 알 수 있다. 유기된 칩 신호를 보상하기 위한 최적광섬유의 길이 L은 식 (1)에 의해 구할 수 있는데, 분산 값이 17.6 ps/nm/km인 SMF를 사용할 경우, 최적의 칩 보상을 위한 광섬유의 길이는 약 3.1 km가 된다. 본 실험에서는 3 km의 SMF를 사용하였다.

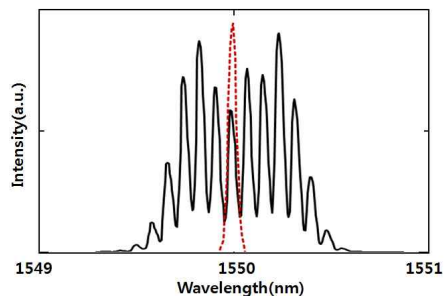


Fig. 5 CW input (dotted line) and phase modulated (solid line) spectra.

그림 5. CW 스펙트럼(점선)과 위상변조된 신호(실선)의 스펙트럼

그림 6은 SMF를 이용한 첩보상 및 펄스압축 전과 후의 펄스 파형을 40 GHz 샘플링 스크로프로 측정한 결과이다. 압축 전의 펄스폭은 약 35 ps이며, 압축 후의 폭은 20 ps 이하로서 샘플링 스크로프의 응답시간에 의해 제한되어 자기상관기를 이용한 정확한 측정이 필요하다.

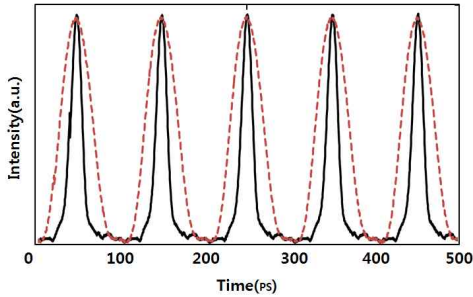


Fig. 6. Sampling scope traces of the waveforms before (dotted line) and after (solid line) the pulse compression.

그림 6. 펄스 압축 전(점선)과 후(실선)의 샘플링 스크로프 파형

그림 7은 압축된 펄스의 자기상관관계를 측정한 결과인데, 대략 5.7 ps의 펄스폭을 가짐을 알 수 있다. 이는 출력펄스의 시간대역폭이 0.46으로서 변환제한급의 펄스가 발생되었음을 의미한다.

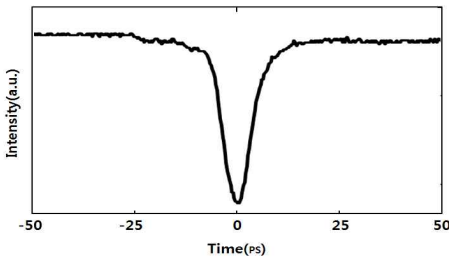


Fig. 7. Autocorrelation trace of the compressed pulses.

그림 7. 압축된 출력 펄스의 자기상관 관계

#### IV 결론

본 논문에서는 광강도변조기와 위상변조기 및 단일모드광섬유를 이용하여 CW 광원으로부터 10 GHz의 초단 펄스를 발생시키는 기술을 연구하였다. 시스템의 간략화를 위해 하나의 10 GHz 정현파 발생기를 사용하였으며, 최종 펄스 파형에 반침이 생기지 않음

면서도 가능하면 짧은 펄스를 얻기 위한 강도변조 및 위상변조 조건을 설정하였다. 발생된 10 GHz 펄스 및 스펙트럼 폭은 각각 5.7 ps 및 80 GHz로서, 시간대역 곱이 0.46인 변환제한급의 펄스를 얻을 수 있었다.

#### References

- [1] P. J. Delfyett, S. Gee, M. T. Choi, H. Izadpanah, W. Lee, S. Ozharar, F. Quinlan, and T. Yilmaz, "Optical frequency combs from semiconductor lasers and applications in ultrawideband signal processing and communications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 7, pp. 2701-2719, Jul. 2006.
- [2] H. Takara, T. Yamamoto, H. Masuda, T. Morioka, M. Abe, H. Takahashi, "Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 6, pp. 2311-2317, Jun. 2006.
- [3] Z. Jiang, D. S. Seo, S.-D. Yang, D. E. Leaird, R. V. Roussev, C. Langrock, M. M. Fejer, and A. M. Weiner, "Four user, 2.5 Gb/s, spectrally coded O-CDMA system demonstration using low power nonlinear processing," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 143-158, Jan. 2005.
- [4] M. Song, C. M. Long, Rui Wu, D. S. Seo, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "Reconfigurable and tunable flat-top microwave photonic filters utilizing optical frequency combs," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 21, pp. 1618-1620, Nov. 2011.
- [5] M. Nakazawa and M. Yoshida, "Scheme for independently stabilizing the repetition rate and optical frequency of a laser using a regenerative mode-locking technique," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 1059-1061, May 2008.
- [6] D.S. Seo, A.M. Weiner, "Ultrashort Optical Pulse Generation at 10 GHz by Pulse Compression of Actively Mode-Locked Fiber Laser Output", *IKEEE*, vol. 9, no. 2, pp. 115-122, Dec. 2005.
- [7] D.S. Seo, "Spectral comb stabilization of a mode-locked semiconductor fiber ring laser by external optical injection," *IKEEE*, vol. 15, no. 4, pp. 53-58, Dec. 2011.
- [8] F. Quinlan, S. Gee, S. Ozharar, and P. J. Delfyett, "Greater than 20-dB supermode noise

suppression and timing jitter reduction via CW injection of a harmonically mode-locked laser," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 16, pp. 1221 - 1223, Aug. 2007.

[9] Y.-H. Lin and G.-R. Lin, "Mode beating noise reduction of mutually injection-locked Erbium-doped fiber laser and laser diode link" IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 8, pp. 1819-1821, Aug. 2004.

[10] I. Ozdur, M. Akbulut, N. Hoghooghi, D. Mandridis, S. Ozharar, F. Quinlan, and P. J. Delfyett, "A semiconductor based 10-GHz optical comb source with sub 3 fs shot noise limited timing jitter and  $\sim$ 500 Hz comb linewidth", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 6, pp. 431-433, Mar. 2010.

[11] M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, "Mode-hop-free, optical frequency tunable 40-GHz mode-locked fiber," IEEE J. Quantum Electron., vol. 43, no. 8, pp. 704-708, Aug. 2007.

[12] S.I. Myong, S.J. Han, D.S. Seo, Y.W. Choi, J.D. Park and M.J. Chu "Optical pulse compression using a phase modulator and a dispersive optical fiber" J. Optical Society of Korea, vol. 10, no. 3, pp. 243-247, Jun. 1999.

[13] R. Wu, V. R. Supradeepa, C. M. Long, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms," Opt. Lett., vol. 35, no. 19, pp. 3234-3236, Oct. 2010.

[14] S. Ozharar, F. Quinlan, I. Ozdur, S. Gee, and P. J. Delfyett, "Ultraflat optical comb generation by phase-only modulation of continuous-wave light," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 1, pp. 36-38, Jan. 2008.

---

## BIOGRAPHY

---

### Hyun-Ju Sung (Student member)



2007 ~ Present : BS degree in Electronics Engineering MyongJi University.

<Research Interest> Optical pulse generation, optical pattern fabrication.

### Dong-Sun Seo (Regular member)



1980 : BS degree in Electronics, Yonsei University

1985 : MS degree in Electronics, Yonsei University

1989 : PhD degree in Electrical Engineering, U. of New Mexico.

1990. Feb ~Present : Professor, Dept. of Electronics MyongJi University, Korea

<Research Interest> Optical pulse sources, optical CDMA, microwave photonics, optical communications, and optical measurements.