

광통신용 및 의용 계측을 위한 FSF Laser의 개발

지명훈* · 이영우*

*목원대학교

FSF laser Development for the optical communication diagnosis and medical tomography application

Myung-hoon Ji* · Young-woo Lee*

*Mokwon University

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

요 약

광 공진기내에 음향광학소자(AOM)를 사용하여 FSF(Frequency-shifted feedback) 레이저를 개발하였다. 공진기는 1차 회절광에 의한 feedback loop로 구성된다. FSF 레이저 출력은 수백 PHz/s의 초고속 주파수 chirp을 갖는 "chirped frequency comb"이라 불리는 주파수 출력을 보여준다. FSF 레이저를 광원으로 광거리 계측에서는 chirped 주파수 comb을 이용하여 거리를 알 수 있다.

ABSTRACT

We developed Frequency-shifted feedback laser using AOM inside the cavity. The feedback loop of the laser is formed with the first-order diffracted light of the AOM to output mirror. It is shown that the FSF laser output has spectral output called "chirped frequency comb" with an ultrafast frequency chirp rate of several hundreds of PHz/s. It can know the range using chirped frequency comb in the optical range measurement that is FSF laser as source.

I. 서 론

레이저 발전 과정의 전자적 튜닝을 목적으로한 1970년대에 색소를 이득매질로 하는 레이저가 실현되어졌다[1]. 그 중에서 반도체[2, 3], Ti:Sapphire[4], EDF [5] 등을 이용해서 같은 형태의 연구가 수행되어지고 있다. 1980년대 후반부터 Colorado School of Mines 의 Kowalski 나 Kaiserslautern Univ. 의 Bergmann 등에 의해 펄스 광원 [6, 7]이나 Broadband CW 광원 [8, 9]으로서의 연구되어왔다. 반도체 레이저 여기 Nd:YVO₄를 이득 매질로 한 전고체 FSF 레이저로서 그 출력이 chirped 주파수 comb이라고 하는 특징을 갖는 점을 밝히고[10, 11], 광 계측에의 응용에 적용시켰다[12]. 본 논문에서는 광통신용 계측(Optical frequency-domain reflectometry) 및 의용 계측(Optical Coherence Tomography)을 위한 광원으로서 FSF 레이저에 대해서 서술했다.

II. Frequency-shifted feedback(FSF) Laser

2.1 주파수 shifted 귀환형 동작

FSF 레이저는 그림 1에 보이는 바와 같이 2장의 반사경에 의해서 공진기내의 이득매질 및 음향광학소자(AOM)를 배치하고, AOM의 1차회절광을 이득매질에 귀환한 것으로써 구성되어진다. AOM의 음향광학결정에는 변환기에서 발생한 일정 주파수 또는 일정전력의 음향파가 전파하고 있고, 음향파의 강도 분포에 대응한 굴절률의 격자가 형성되고 있다. 여기에 광파가 입사하게 되면 Bragg 조건을 만족하는 방향에 강한 1차 회절광이 생기고, 이때, 음향 광학 결정중의 굴절률 격자는 음파의 전파와 함께 일정속도로 이동하기 때문에, 1차 회절광의 주파수는 입사광에 대해 Doppler Shift를 받는다. Doppler Shift양은 음향파의 주파수에 동일하고, 일반적인 AOM에서는 100MHz 정도이다. 광파의 주파수는 파장 1 μ m인

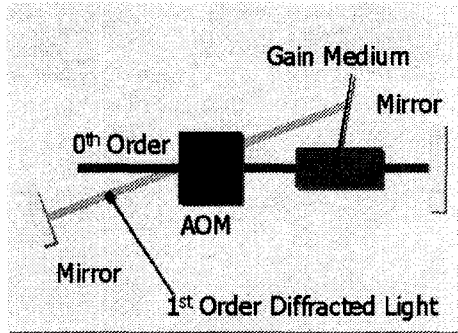


그림 1 FSFL의 공진기 구조

경우 300THz 이므로, AOM이 주는 주파수 shift는 광파의 주파수에 비교하면 극히 작은 값이지만, 주파수 shift 주파수 구환형 동작에 의해 FSF 레이저의 출력은 일반 레이저와는 다른 특징을 갖고 있다.

2.2 FSF 레이저의 chirp 주파수 comb

FSF 레이저에서는 공진기내의 광파에 왕복마다 주파수 shift가 이루어지기 때문에, 정재파는 존재할 수가 없다. 주파수 shift의 존재하에서는 공진기내의 광파가 강하게 간섭하게 되는 광파의 순시주파수를 구해보면, AOM의 구동 주파수를 ν_{AOM} , 광파의 공진기 왕복시간을 τ_{RT} , ν_0 를 광 주파수라 하면, 다음과 같은 식이 주어진다 [11]

$$\nu_{ig}(t) = \frac{2\nu_{AOM}}{\tau_{RT}} t + \frac{q}{\tau_{RT}} + \nu_0 \quad (q : \text{정수}) \quad (1)$$

즉, FSF 레이저 출력에서는 시간에 비례해서 순시주파수가 변화하는(chirping) 성분이 공진기 중모드 주파수마다 결(comb)로 존재하는 것을 알았다[12]. 예를 들면, chirp rate는 구동 주파수가 100MHz의 AOM과 길이 10cm의 공진기로 FSF 레이저를 구성하는 경우, chirp rate는 300PHz/s로 초고속인 값이 된다. 식(1)에 나타나는 출력을 chirped frequency comb이라 부른다. 실제의 발진에서는 공진기의 이득이 주파수에 의존하므로, 주파수 chirping은 일정한 스펙트럼 범위로 제한되어진다[13]. 이 때, 새로운 comb 성분이 생성되는 반복 주파수는 공진기안에서의 주파수 shift와 일치한다. 그림2에서는 chirped 주파수 comb 출력을 시간 순간 주파수 평면에 나타낸 것이고, 그림안에서의 gray scale은 comb 성분의 진폭의 변화를 나타낸 것이다.

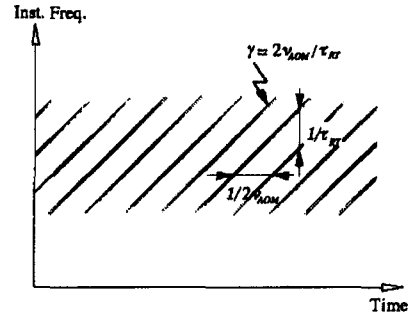


그림 2. 시간-주파수축에서 FSFL의 chirped frequency comb

공진기중의 AOM에서는 굴절률의 격차가 음파의 전파가 함께 이동하고 있기 때문에, 이것은 공진기의 반사경에 귀환한다는 것과 같다고 생각할 수 있다. 레이저 공진기의 반사경을 일정 속도로 귀환했을 때 발진주파수가 chirping하는 것은 알려져 있고, 소형 간섭계에 의한 Optical Spectrum Analyzer(소형 fabry-parot 간섭계)의 원리가 되고 있다. FSF 레이저에서는 주파수가 chirping하는 성분이 주기적으로 생성된다고 생각하는 것이 가능하다.

III. Nd:YAG FSF Laser

반도체 레이저를 여기 광원으로 하는 고체 레이저는 All Solid-State(전 고체형) 레이저로 불리고, 반도체 레이저의 소형이고 긴 수명이라는 장점과 고체레이저의 양호한 Beam pattern과 주파수의 안정성 등의 장점을 결합한 고효율 또는 high coherence 레이저 광원으로서 최근 활발하게 연구가 행해지고 있다[14]. 전 고체형 레이저는 반도체 레이저의 발진파장을 이득매질의 흡수 파장에 일치함으로써 공명적인 여기가 가능해지고, 고효율의 레이저 동작이 가능하다. 그림 4는 반도체 레이저 여기 Nd:YAG 결정을 이득 매질로 한 FSF 레이저의 구성도이다. 이득 매질에는 발진 파장이 1319nm의 Nd:YAG 결정(3mm dia.×10mm length, 1 at.%)를 이용해 파장 809nm, 출력 500mW의 반도체 레이저로 여기한다. 공진기는 Nd:YAG 결정 단면의 HR(고반사) 코팅과 출력 mirror로 구성된다. 음향 광학 소자는 음향 광학 결정이 DFC, 투과율을 포함해서 830nm에서의 회절효율이 85%이다. 음향 광학 결정의 양단면에는 구동 주파수 80MHz에, 1차 회절광이 입사광에 대해 평행하게 밖으로 나와지게끔 각도가 주어져있다.

IV. 4. 광 거리 측정의 응용

4.1 FSF 레이저에 의한 광 거리 측정의 원리

주파수 chirped 빛을 이용해 거리를 beat frequency로 변환해 측정하는 방법은 Optical Frequency Domain Reflectometry(OFDR)[15~18]라고 알려져 있다. FSF 레이저를 광원으로 하면 OFDR의 측정 성능을 비약적으로 향상시킬 수가 있다. 그림 3은 FSF 레이저를 광원으로 하는 광거리 측정의 장치 구성도이다. FSF 레이저의 출력은 Michelson 간섭계에 입사되어 기준용과 측정 대상의 arm으로부터의 반사광은 광 검출기로 검파된다. FSF 레이저 출력은 그림 3에 나타내는 것 같이 chirped 주파수 comb과 같이 되므로, 거기에 시간 지연을 주어 검파하면, 광로차에 비례한 beat frequency가 종모드 주파수마다 복수로 관측된다. 식(1)에서 주어지는 chirped 주파수 comb의 q차와 q'(q'=q-m)차의 성분간의 beat frequency는 간섭계의 광로차를 2z로 하여 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\nu_{Bm} = \frac{4\nu_{AOM}}{c\tau_{RT}} z - \frac{m}{\tau_{RT}} \quad (2)$$

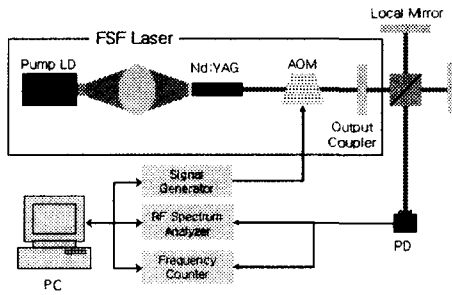


그림 3. FSF 레이저를 광원으로 하는 광거리 측정 장치도

이것은 횡축을 거리(=z), 세로축을 beat frequency로서 plot하면 그림 4가 된다. 식(2)의 m을 beat 차수라고 부른다. 종래의 OFDR에서는 단일 주파수 레이저의 발진 주파수를 chirp 시키는 것으로 beat frequency를 발생해, 0차 beat 밖에 관측되지 않았던 것과 상대된다. 따라서, 측정 거리에 비례해 측정 전자기기의 주파수대역을 넓게 취해야 하고, 기기의 주파수 분해능(resolution)과의 밸런스로부터 측정거리와 측정분해능이 trade-off의 관계에 있다고 하는 문제가 있었다. 한편, FSF 레이저를 광원으로 하는 OFDR에서는 그림4에 나타나듯 고차 beat를 이용해 측정 장치의 주파수대역이 레이저의 종모드 주파수 정도도로 충분해야 측정 거리와 측정 분

해능을 독립해 향상시키는 것이 가능하다. 이 때, beat frequency로부터 거리를 결정하기 위해서는 beat 차수를 판별하는 것이 필요 불가결하다. beat 차수의 판별은 AOM의 구동 주파수와 beat 주파수의 관계로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\nu_{Bm}}{d\nu_{AOM}} = \frac{1}{\nu_{AOM}\tau_{RT}} (m + \nu_{Bm}\tau_{RT}) \quad (3)$$

AOM의 구동 주파수의 변화에 대한 beat frequency의 변화에 대한 beat frequency이 변화량이 beat 차수 m에 비례하는 것을 이용해 차수 판별이 가능해진다.

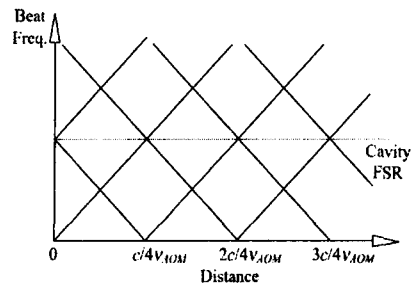


그림 4 FSF 레이저에서 관측된 beat frequency와 거리의 관계

V. 결 론

Frequency-shifted feedback Laser(FSF 레이저)에 대해 그 발진 원리 및 거리 측정의 원리에 대해 연구했다. Nd:YAG FSF 레이저의 발진 특성과 거리 측정 실험의 결과를 나타냈다. FSF 레이저는 AOM을 광 공진기내의 주파수 shifter로 삽입하여 feedback loop를 구성하는 것으로서, chirped frequency comb을 출력한다. 이 출력을 Michelson 간섭계를 이용해 간섭계의 광로차에 비례한 beat frequency를 얻을 수 있다. 실제로 제작한 FSF 레이저를 이용해 광거리 측정의 실험을 실시하였고, 광통신용 측정 및 의용 측정(Optical Coherence Tomography)의 광원으로서 이용 가능하다고 하는 것을 알았다.

참고문헌

- [1] W. Streifer, and J. R. Whinney, "Analysis of a dye laser tuned by acousto-optic filter", Appl. Phys. Lett., vol.17, p. 335, 1970.
- [2] T. Hidaka, and T. Nakamoto, "Electric tuning of semiconductor laser using acousto-optic device", Electron. Lett., vol. 25, p. 1320,

- 1989.
- [3] G.A. Coquin, K.W. Cheung, "Electronically tunable external cavity laser", *Electron. Lett.*, vol. 24, p. 599, 1988.
- [4] S. Wada, K. Akagawa, and H. Tashiro, "Electronically tuned Ti:sapphire laser", *Opt. Lett.*, vol. 21, p. 731, 1996.
- [5] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, and B. Y. Kim, "Electronically tunable, 1.55-mm erbium-doped fiber laser", *Opt. Lett.*, vol. 15, p. 273, 1990.
- [6] F. V. Kowalski, S. J. Shattil, and P. D. Halle, "Optical pulse generation with a frequency shifted feedback laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, p. 734, 1988.
- [7] G. Bonnet, S. Balle, Th. Kraft, K. Bergmann, "Dynamics and self-modelocking of a titanium-sapphire laser with intracavity frequency shifted feedback", *Opt. Commun.*, vol. 124, p. 790, 1996.
- [8] F.V.Kowalski, P.D. Halle, and S. J. Shattil, "Broadband continuous-wave laser", *Opt. Lett.*, vol. 13, p. 622, 1988.
- [9] I.C. M. Littler, S. Balle, and K. Bergmann, "The CW modeless laser: Spectral control, performance data and build-up dynamics", *Opt. Commun.*, vol. 88, p. 514, 1992.
- [10] K. Nakamura, K. Kasahara, M. Sato, and H. Ito, "Interferometric studies on a diode-pumped Nd:YVO₄ laser with frequency-shifted feedback", *Opt. Commun.* vol. 121, p. 137, 1995.
- [11] Koichiro Nakamura, Fumitoshi Abe, Kumio Kasahara, Takefumi Hara, Manabu Sato, and Hiromasa Ito, "Spectral characteristics of an all solid-state frequency-shifted feedback laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, p.103, 1997.
- [12] K. Nakamura, M. Miyahara, M. Yoshida, T. Hara, and H. Ito, "A New Technique of Optical Ranging by a Frequency-Shifted Feedback Laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, p. 1772, 1998.
- [13] K. Kasahara, K. Nakamura, M. Sato, and H. Ito, "Dynamic properties of an all solid-state frequency-shifted feedback laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, p. 190, 1998.
- [14] T.Y. Fan and R.L. Byer, "Diode laser-pumped solid-state lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, p. 895, 1988.
- [15] B. Golubovic, B. E. Bouma, G. J. Tearney, and J. G. Fujimoto, "Optical frequency-domain reflectometry using rapid tuning of a Cr⁴⁺:forsterite laser", *Opt. Lett.*, vol. 22, p. 1704, 1997.
- [16] U. Glombizta and E. Brinkmeyer, "Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides", *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, p. 1377, 1993.
- [17] L. Wang, K. Iiyama, F. Tsukada, N. Yoshida, and K. Hayashi, "Loss measurement in optical waveguide devices by coherent frequency-modulated continuous-wave reflectometry", *Opt. Lett.*, vol. 18, p.1095, 1993.
- [18] W. Sorin, D. Donald, S. Newton, and M. Nazarathy, "Coherent FMCW reflectometry using a temperature tuned Nd:YAG ring laser", *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, p. 902, 1990.