

주파수 이동 되먹임 레이저에서 발생하는 Comb의 대역폭

지명훈* · 황대석* · 김규식* · 이영우*

*목원대학교

Comb Bandwidth generating in Frequency-shifted Feedback Laser

Myung-hoon Ji* · Dae-Seok Hwang* · Kyu-Sik Kim* · Young-woo Lee*

*Mokwon University

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

요 약

공진기내에 음향광학소자(AOM)를 사용하여 FSF(Frequency-shifted feedback) 레이저를 수치해석 하였다. 출력 스펙트럼의 Comb 대역폭은 첨두 스펙트럼 세기에서의 순간 발진 주파수와 내부공진기 전계의 Wigner-Ville 분포로부터 유도된 순간 스펙트럼 세기의 식을 이용하여 분석한다. Comb 대역폭은 포화-확산된 대역폭과 FSF 동작에 유도되는 전체 공진 모드의 곱으로 정의된다.

ABSTRACT

We simulated Frequency-shifted feedback laser using AOM inside the cavity. We analyze instantaneous oscillation frequency at peak spectral intensity and Comb bandwidth of output spectrum from Wigner-Ville distribution of intracavity electric field. The Comb bandwidth is defined as the product of the saturation-broadened bandwidth and the total resonant modes contributing to FSF operation.

I. 서 론

주파수 이동 되먹임 레이저에 의해서 발생하는 주파수 comb의 대역폭은 레이저를 분석하는데 사용한다. 주파수 이동 되먹임 동작은 오랜 동안 과학자들에게 관심을 끈 주제이다[1]. FSF 구조는 기초과학과 고출력, 광 대역 레이저 광원의 설계가 포함되는 고도의 기술을 사용하는 다양한 응용에서 반영된다[2],[3].

FSF의 연구는 여러 가지의 레이저에 의해서 연구되어왔다. 초기에는 색소 레이저에 관심을 가졌으나, 최근에 반도체 레이저, 광섬유 레이저, 반도체 여기 전 고체 레이저가 FSF 영향으로 실험 되고 있다[4]-[12].

FSF 레이저에 의해서 발생하는 주파수의 comb 대역폭을 분석하기 위해 [12]에서 사용한 방법을 이용하였고, 울방정식의 해와 Wigner-Wille의 내부공진기 전계 분포로부터 유도된 순간 스펙트럼의 세기의 공식을 이용하여 분석한다. 그 결과로 이득에 따라 포물선

형태의 주파수 값을 갖는 것을 예상했다.

II. FSF Laser에서 스펙트럼의 세기

일반적으로 주파수 이동 되먹임은 변조 주파수 Ω 에 동작하는 음향광학 변조기(AOM)에 의해서 발생한다. 빛의 주파수 ν_i 가 레이저로부터 방출된다면, 공진기의 매 왕복마다 주파수 이동 Ω 의 가중은 주파수 $\nu_{i+1} = \nu_i + \Omega$ 로 되돌아온 빛이 발생된다. 되돌아온 빛의 세기는 여러 가지의 실험 파라미터의 수에 의해 결정되지만, AOM의 효율에 의해서도 결정된다. 일반적으로 단일 파라미터 η 는 주파수 이동 빛의 세기를 결정하는 통합된 효과에 이용된다. 주파수 comb은 공진기를 통해서 연속적으로 통과하여 발생된다. 특히, 주파수 성분의 진폭은 이들 주파수의 유용한 광학 이득

$$\nu_m = (\nu_c - \nu_0)/3 + \sqrt{\{[(2\nu_c + \nu_0)/3]^2 - 1/3[\nu_c(2\nu_c + \nu_0) - \nu_a^2(g_{\neq t}/3g_\nu)]\}} \quad (5)$$

에 의해서 결정된다. 본 연구는 comb의 침두 주파수의 경우 표현으로 얻는 것, 즉 순간 발진 주파수를 얻어서, 이 간단한 표현은 주파수 comb의 대역폭으로 유도된다.

분석하기 위해 출발점은 반도체 여기 전고체 레이저[12, eqs. 26]의 경우에서 나타난 FSF 레이저의 스펙트럼 세기 $I(\nu)$ 의 표현을 수정한 것이다.

$$I(\nu) = \{\eta G^{\neq t}(\nu)\}^{2(\nu - \nu_0)/\Omega} \quad (1)$$

ν_0 는 레이저의 방출 주파수이고, Ω 는 공진기의 매 왕복마다 가중되는 주파수 이동이다. η 는 AOM의 효율과 FSF 빛이 레이저를 돌아오는데 갖는 효율을 결정하는 거울 반사율의 효과를 포함한다.

net 이득은

$$G^{\neq t}(\nu) = \exp([\alpha_c(\nu) - \alpha_c]\tau_\epsilon)$$

α_c 는 광학 손실이고, τ_ϵ 은 레이저 공진기의 왕복 시간이다.

비록 식 (1)이 [12]에서 주어진 식을 간단하게 일반화한 것일지라도, 이득의 주파수 의존에서 출발한다. 포물선 주파수 의존은 매질의 이득을 얻을 수 있다.

$$g(\nu) = g_0(1 - g_\nu[\nu_c - \nu]^2/\nu_a^2) \quad (2)$$

comb의 침두 주파수를 결정하기 위해서 [12]에서 보여주는 것처럼 간단한 요건은 $dI/d\nu = 0$ 인 경우 주파수 ν_m 에 위치한다. 스펙트럼 세기 I_m 을 나타낸다. 식 (1)에서 주어진 스펙트럼 세기의 경우, 아래와 같이 결정된다.

$$\ln[\eta] + [g(\nu) - \alpha_c]\tau_\epsilon + [\nu - \nu_0]\tau_\epsilon dg/d\nu = 0 \quad (3)$$

결과를 간단하게 다시 표현하면, net 이득 $g_{\neq t}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$g_{\neq t} = 1 - \alpha_c/g_0 + \ln[\eta]/(\tau_\epsilon g_0) \quad (4)$$

식 (2)로 정의된 포물선 이득을 이용하여 위의 식

(5)와 같은 형태로 유도된다.

초기의 레이저 방출이 이득의 중심 파장에서 위치할 경우, 즉 $\nu_0 = \nu_c$ 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$\nu_m = \nu_c + \nu_a(g_{\neq t}/3g_\nu)^{1/2} \quad (6)$$

III. Comb Bandwidth

Comb 대역폭은 [12, eq. 55]에서 보여지는 것처럼 침두 세기의 반에서 스펙트럼 대역으로 정의된다.

$$\nu_s = \nu_+ + \nu_- \quad (7)$$

ν_+ 와 ν_- 는 다음의 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} I_-(\nu) &\equiv I(\nu_m - \nu_-) = I(\nu_m)/2 \\ &= I(\nu_m + \nu_+) \equiv I_+(\nu) \end{aligned} \quad (8)$$

수식 표현을 쉽게 하기 위해 위의 식은 다음과 같이 다시 쓰여진다.

$$\ln(I_\pm) = \ln(I_m) - \ln(2) \quad (9)$$

$$\alpha\nu_-^2 + \beta\nu_- + \gamma = \alpha\nu_+^2 + \beta\nu_+ + \gamma = 0$$

의 경우

$$\alpha = 3(\nu_m - \nu_c) \quad (10)$$

$$\beta = \{2\nu_a(\nu_m - \nu_0)(g_{\neq t}/3g_\nu)^{1/2}\} - \{2\nu_a^2 g_{\neq t}/3g_\nu\} \quad (11)$$

$$\gamma = \nu_a^2 \Omega \ln(2)/(2g_0 g_\nu \tau_\epsilon) \quad (12)$$

그래서, comb 대역폭은

$$\nu_s = \nu_+ + \nu_- = \beta/\alpha\sqrt{(1 + 4\alpha\gamma/\beta^2)} \quad (13)$$

$\nu_0 = \nu_c$ 인 경우 표현의 더 근접한 계산은 $\beta \rightarrow 0$ 이라는 것을 보이며, 쉽게 계산하면

$$\nu_s^2 = \nu_s \Omega \ln(2) / [2g_0 \tau \epsilon (3g_{\nu} g_{\neq t})^{1/2}] \quad (14)$$

$$\nu_s = \sqrt{\{2\nu_s \Omega \ln(2) / [g_0 \tau \epsilon (3g_{\nu} g_{\neq t})^{1/2}]\}} \quad (15)$$

위 식에서처럼 [12, eqs. (58), (60)]에서도 같은 결과를 얻을 수 있다.

IV. 수치해석 결과

본 연구에서는 수치해석에 이용된 파라미터 값으로는 여기 파워가 500mW이고, 매질의 길이가 0.5mm이고, 회절 효율은 77%이고, 전체 공진기 길이는 100mm이며, 공진기 왕복시간은 0.67ns이다. AOM에 145MHz로 구동하면 공진기 왕복에 의해서 구동 주파수의 2배 즉 $\Omega = 290\text{MHz}$ 가 적용된다.

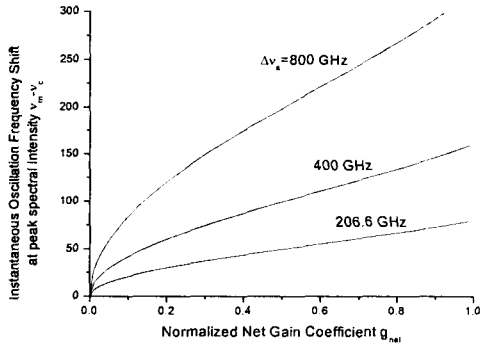


그림 1 net 이득 변화에 따른 순간 발진 주파수

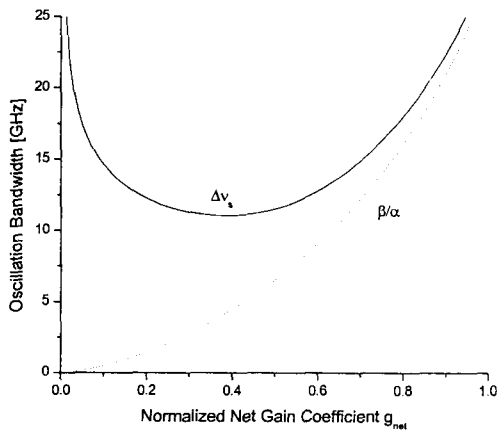


그림 2 net 이득 계수 변화에 따른 공진 모드수와 Comb 대역폭

첨두 스펙트럼 세기에서 순간 발진 주파수 ν_{mv} 은 그림. 1에서 보이는 것과 같이 net 이득 계수의 변화에 따른 결과 값이 식 (6)을 통해서 얻어진다. $g_{\neq t} = 0.35$ 일 때 첨두 스펙트럼의 세기에서 순간 발진 주파수는 공진기에 142 왕복에 일치하여 41.2GHz가 된다.

Comb 대역폭은 일반화된 전체 net 이득 계수 $g_{\neq t}$ 이 0.4에서 최소값을 갖는다. $g_{\neq t} > 0.4$ 영역의 경우, [12, eqs. 43]에 나타난 내부세기의 증가 때문에 포화된 이득 계수는 줄어들고, 그래서 Comb 대역폭은 증가한다. 반면에 $g_{\neq t} < 0.4$ 영역의 경우, 회절에 의해 발생하는 높은 광 손실이 문턱치 근처에서 주파수 이동 되먹임 동작에 기여하는 전체 공진 모드를 증가시킨다. 식 (13)은 그림 2에서 보이는바와 같이 이해될 수 있다: 곡선 β/α 는 이득 포화로 인해 선 형태 함수의 확산에 일치하고, 곡선 $\sqrt{1 + 4\alpha\gamma/\beta^2}$ 는 주파수 이동 되먹임 동작에 기여하는 전체 공진 모드에 일치한다. 즉, Comb 대역폭은 포화-확대된 대역폭과 주파수 이동 되먹임 동작에 기여하는 전체 공진 모드의 곱으로 정의되고, 그 최소값은 된다.

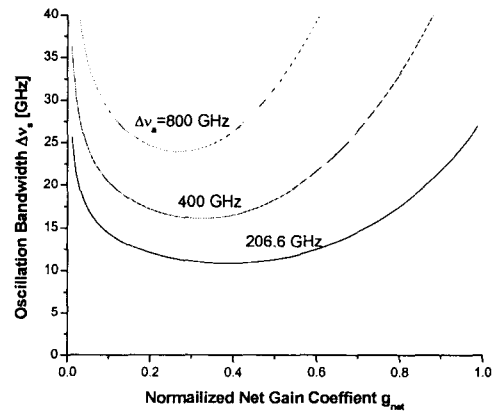


그림 3 net 이득 변화에 따른 Comb 대역폭

Comb 대역폭은 그림. 3에서 보이는 바와 같이 $g_{\neq t} = 0.4$ 에서 11.1GHz이다.

Comb 대역폭은 AOM의 회절효율 (η), 이득 매질의 손실계수 (α_c)에 의존한다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

주파수 이동 되먹임 반도체 여기 Nd:YVO4 레이저

의 동작 특성을 분석적이고 수치 해석적으로 연구 했다. FSF 동작을 울방정식의 해와 Wigner-Wille의 내부공진기 전개 분포로부터 유도된 순간 스펙트럼의 세기의 공식을 이용해 분석하였다. 이득 매질이 균질하게 넓어지고, 연속적으로 chirp된 주파수 성분을 갖는다 할지라도 주파수 이동 되먹임 레이저는 많은 주파수 성분을 제공한다. Comb 대역폭은 포화된 넓어진 대역폭과 FSF 동작에 기여하는 전체 공진 모드의 곱으로서 정의된다. 이러한 수치해석 결과로서 net 이득 계수값이 0.4 정도에서 11.1GHz 정도의 Comb 대역폭을 갖는 실험 결과값을 예상할 수 있으며, 시스템에 최적값으로 예상된다. 이와 동등한 동적인 특성을 갖는 FSF 레이저는 다양한 분야에 유용하게 응용될 것이다.

참고문헌

- [1] F. V. Kowalski, P. D. Hale, and S. J. Shattil, "Broadband continuous wave laser", *Opt. Lett.*, vol. 13, pp. 622-624, 1988.
- [2] I. C. M. Littler, S. Balle, and J. Eschner, "The CW modeless laser: Model calculations of an active frequency shifted feedback cavity", *Opt. Commun.*, vol. 87, pp. 44-52, 1992.
- [3] 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, pp. 514-522, 1992.
- [4] W. Strifer and J. R. Whinnery, "Analysis of a dye laser tuned by acousto-optic filter", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 335-337, 1970.
- [5] P. D. Hale and F. V. Kowalski, "Output characterization of a frequency shifted laser: Theory and experiment", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 1845-1851, 1990.
- [6] S. Balle, I. C. Littler, K. Bergmann, and F. V. Kowalski, "Frequency shifted feedback dye laser operating at a small frequency shift", *Opt. Commun.* vol. 102, pp. 166-174, 1993.
- [7] P. I. Richter and T. W. Hansch, "Diode lasers in external cavity with frequency shifted feedback", *Opt. Commun.*, vol. 85, pp. 414-418, 1991.
- [8] J. Martin, Y. Zhao, S. Balle, K. Bergmann, and M. P. Fewell, "Visible-wavelength diode lasers with frequency-shifted optical feedback", *Opt. Commun.*, vol. 112, pp. 109-121, 1994.
- [9] A. P. Willis, A. I. Ferguson, and D. M. Kane, "External cavity diode lasers with frequency shifted feedback", *Opt. Commun.* vol. 116, pp. 87-93, 1995.
- [10] K. W. Benoist, "The influence of external frequency shifted feedback on a DFB semiconductor laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 8, pp. 25-27, 1996.
- [11] H. Sabert and E. Brinkmeyer, "Pulse generation in fiber lasers with frequency shifted feedback", *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1360-1368, 1994.
- [12] 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, pp. 190-203, 1998.
- [13] K. A. Shore and D. M. Kane, "Comb generation bandwidth for frequency-shifted feedback semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, pp. 1053-1056, 1999.