

연속 파장 가변시 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 다전극 DBR 레이저의 변조 특성에 미치는 영향

이 석 · 박노현 · 박홍이

연세대학교 물리학과

최원준 · 한일기 · 이정일 · 강광남

한국과학기술연구원 광전자연구실

(1993년 8월 2일 받음)

현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 연속 파장 가변시 다전극 DBR 레이저의 변조 특성에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 수동 부분에 전류 주입의 증가에 따라 FM효율, 3 dB 대역폭, 공명 주파수는 감소하지만, flat FM응답은 증가한다. 비 선형 이득 포화 효과는 FM/IM응답, 3 dB 대역폭, 공명 주파수, chirping-to-modulation-power ratio 등 변조 특성에 커다란 영향을 미치지만, 연속 파장 가변에 의한 변조 특성에는 영향을 미치지 않는다.

I. 서 론

앞으로 다가오는 코히런트 광통신(Coherent Communication)의 국부 발진기(local oscillator)와 송신기 광원에 사용될 레이저 다이오드(LD)는 넓은 파장 가변 영역(tuning range), 단모우드 발진, 좁은 선폭(narrow linewidth), 큰 FM 응답(Frequency Modulation response)과 넓은 대역폭(bandwidth)을 가져야 한다. 이와 같은 필요조건을 만족하는 LD 중의 하나가 다전극 DBR(Distributed Bragg Reflector)레이저이다.^[1,2]

다전극 DBR LD는 하나의 활성 부분(active region)과 하나 또는 두개의 수동 부분(passive region)으로 이루어졌으며 전기적으로 절연되고 광학적으로는 결합된 구조로 수동 부분에 전류를 주입하면 넓은 파장 가변 영역을 얻을 수 있는 동시에 전류변조를 하면 쉽게 높은 FM응답을 얻을 수 있으나 수동부분의 전하 수명(carrier lifetime)에 의해 차단 주파수(cutoff frequency)가 제한을 받는 단점이 있다.^[3]

최근에 다전극 DBR LD의 정적(static)특성,^[4] 변조특성^[5]과 잠음특성^[6]에 대해서 실험뿐만 아니라 이론적으로도 매우 활발히 연구되어지고 있으나, 비 선형 이득 포화가 파장가변시 다전극 DBR LD의 변조 특성에 미

치는 영향에 대해서는 상대적으로 연구가 미진한 편이다. Spectral hole burning에 기인한 비 선형 이득 포화 효과가 그 물리적 원인에 대해 많은 논란이 있으므로,^[7] 본 논문에서는 현상론적인 모델을 사용하여 비선형 이득 포화 효과가 수동 부분의 주입 전류에 의한 연속 파장 가변시 다전극 DBR LD의 변조 특성에 미치는 효과를 이론적으로 분석하였다. 이미 참고문헌^[5]에서 현상론적인 비 선형 효과를 고려한 다전극 DBR LD의 비율 방정식을 유도하여 FM/IM 응답특성 함수를 구했으므로, 이론적 배경에서는 이 유도된 수식들을 간단히 기술하고, 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 다전극 DBR LD의 변조 특성에 미치는 영향에 대해서 체계적으로 논의하기 위해서 lateral diffusion과 spatial hole burning 효과는 고려하지 않았다.

II. 이론적 배경

그림 1은 다전극 DBR LD의 전형적 구조이며, 능동 부분인 활성층(active medium)과 수동 부분인 위상 조정 부분(phase control section)과 DBR 부분으로 이루어졌으며, 수동 부분에 전류를 주입하면 넓은 파장 가변을 얻을 수 있다. 그림 1의 $z=0$ 에서 왼쪽으로 진행하는

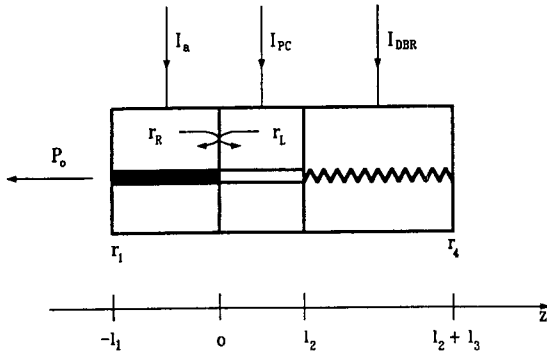


그림 1. Schematic diagram of the multi-electrode DBR laser.

빛의 유효 반사 계수는 아래와 같이 표현되어 진다.

$$r_L(\omega, S, N_1) = r_1 \exp[-2jk_1(\omega, S, N_1)l_1] \quad (1)$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$, r_1 은 왼쪽 단면($z = -l_1$)에서의 반사 계수, S 는 광자수, N_1 은 활성층의 전하 밀도, ω 는 실제 각 주파수이며, (1)식의 파수 k_1 은 다음과 같다.

$$k_1(\omega, S, N_1) = \omega n_1(\omega, N_1)/c + j[g(\omega, S, N_1) - \alpha_1]/2 \quad (2)$$

여기서, c 는 빛의 속도, n_1, g, α_1 은 각각 활성층의 굴절률, 모우드 이득(modal gain), 내부 흡수계수이다. 공진기 내부의 광자수(S)에 의해 모우드 이득이 감소하는 현상론적인 비 선형 이득 포화 모델은 아래와 같다.^[6,7]

$$g(\omega, S, N_1) = g(\omega, N_1)(1 - \mu S) \quad (3)$$

여기서, 모우드 이득 $g(\omega, N_1)$ 은 참고 문헌^[5]에 표현되어 있으며, μ 는 현상론적인 비 선형 이득 포화 정도를 나타내는 매개변수이다.

$z=0$ 에서 오른쪽으로 진행하는 빛의 유효 반사 계수는 아래와 같이 표시 되어지며,

$$r_R(\omega, N_2, N_3) = r_{DBR}(\omega, N_3) \exp[-2jk_2(\omega, N_2)l_2] \quad (4)$$

N_2 와 N_3 는 위상 조정 부분과 DBR 부분의 전하 밀도이고, r_{DBR} 은 $z=l_2$ 에서의 DBR 부분의 반사 계수이며, r_{DBR} 의 수식적 표현은 참고 문헌^[5]에 있다. 수동 부분에서의 파수는 아래식으로 나타난다.

$$k_i(\omega, N_i) = \omega n_i(\omega, N_i)/c - j\alpha_i(N_i)/2, \text{ for } i=2,3 \quad (5)$$

여기서, n_i 와 α_i 는 수동 부분의 굴절률과 흡수 계수를 나타내며, 수동 부분의 주입전류가 증가함에 따라 자유 전자의 플라즈마 효과(free carrier plasma effect)와 자유

전자 흡수(free carrier absorption)효과에 의해 굴절률은 감소하고 흡수 계수는 증가하게 된다. 이와같은 효과에 의해 발진 파장은 짧은 쪽으로 가변되며, 광출력은 감소한다.

변조 특성에 대한 이론적 모델은 위상조정 DFB(Distributed FeedBack) LD의 비울 방정식을 유도한 전송선 이론(Transmission Line Theory)^[8]으로, 이 모델을 다전극 DBR LD에 적용하였다.^[5] 이 레이저 구조의 발진 조건은 다음 식을 만족한다.

$$r_L(\omega, S, N_1)r_R(\omega, N_2, N_3) = 1 \quad (6)$$

여기서, (ω, N_1, N_2, N_3) 값에서 발진하는 주모우드(main mode)는 식 (6)을 만족하는 N_1 중 임계 전하 밀도가 가장 작은 모우드이며, N_2 와 N_3 는 수동 부분의 주입전류에 의해 독립적으로 결정되어지며 참고 문헌^[5]에 잘 나타나있다. 또한 본 논문에서는 주모우드 발진만을 가정한다. 식 (6)을 주 발진 모우드 부근에서 Taylor 확장하고, 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과를 고려하여, 광자수 $S(t)$ 와 위상 $\phi(t)$ 에 대한 비울 방정식을 얻으면 다음과 같이 표현되어 진다.^[5]

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln S(t) + j \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \left\{ \frac{\partial \ln r_L}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial \ln r_L}{\partial N_1} \Delta N_1 + \frac{\partial \ln r_{pc}}{\partial N_2} \Delta N_2 + \frac{\partial \ln r_{DBR}}{\partial N_3} \Delta N_3 \right\} \quad (7)$$

여기서 $\Delta N_i = N_i - N_{is}$ ($i=1, 2, 3$)이며,

$$\tau_1 = j \frac{\partial \ln r_L}{\partial \omega}, \quad (8a)$$

$$\tau_2 = j \frac{\partial \ln r_{pc}}{\partial \omega}, \quad (8b)$$

$$\tau_3 = j \frac{\partial \ln r_{DBR}}{\partial \omega}, \quad (8c)$$

이며, 여기서, τ_1, τ_2, τ_3 는 각각 활성층, 위상 조정 부분(PC)과 DBR부분의 유효 왕복 시간(effective round-trip time)이고, r_L, r_{pc}, r_{DBR} 은 각각 $z=0$ 에서의 유효 반사 계수이다.

일반적인 전자 밀도 N (carrier density)에 대한 비울 방정식은 아래와 같으며,

$$\frac{d}{dt} N_1(t) = \frac{I_a(t)}{eV} - R_1(N_1) - G(\omega, S, N_1) \frac{S(t)}{V_1}, \quad (9a)$$

$$\frac{d}{dt}N_2(t) = \frac{I_{pc}(t)}{eV} - R_2(N_2), \quad (9b)$$

$$\frac{d}{dt}N_3(t) = \frac{I_{DBR}(t)}{eV} - R_3(N_3), \quad (9c)$$

$R_i(N_i)$ 는 각 부분의 자발적 재결합율이며, $G(\omega_s, S, N_1) = v_g g(\omega_s, S, N_1)$ 이고, v_g 는 군속도이다. 식 (7), (9a), (9b)와 (9c)를 소 신호 분석(small signal analysis)한 후 푸리에 변환하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} (j\Omega - 2S_0 C_{4r}) & 1 & -2S_0 C_{1r} & -2S_0 C_{2r} & -2S_0 C_{3r} \\ -C_{4i} & 1 & -C_{1i} & -C_{2i} & -C_{3i} \\ \left(\frac{G_s}{V_1} + \frac{\partial G}{\partial S} \frac{S_0}{V_1}\right) & 0 & (j\Omega + \frac{1}{\tau_R}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (j\Omega + \frac{1}{\tau_{S2}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (j\Omega + \frac{1}{\tau_{S3}}) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \delta S(\Omega) \\ 2\pi\delta f(\Omega) \\ \delta N_1(\Omega) \\ \delta N_2(\Omega) \\ \delta N_3(\Omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\delta I_a(\Omega)}{eV_1} \\ \frac{\delta I_{pc}(\Omega)}{eV_2} \\ \frac{\delta I_{DBR}(\Omega)}{eV_3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $G_s = G(\omega_s, S_0, N_{1s})$ 이고,

$$C_1 = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \left\{ \frac{\partial \ln r_L}{\partial N_1} \right\} = C_{1r} + jC_{1i}, \quad (11a)$$

$$C_2 = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \left\{ \frac{\partial \ln r_{PC}}{\partial N_2} \right\} = C_{2r} + jC_{2i}, \quad (11b)$$

$$C_3 = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \left\{ \frac{\partial \ln r_{DBR}}{\partial N_3} \right\} = C_{3r} + jC_{3i}, \quad (11c)$$

$$C_4 = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \left\{ \frac{\partial \ln r_L}{\partial S} \right\} = C_{4r} + jC_{4i}, \quad (11d)$$

이며, C_4 는 비선형 이득 포화 효과를 나타내며, 현상론적인 비선형 이득 포화 효과를 고려했기 때문에 전자 농도 변화에 의한 비 선형 굴절률 효과는 무시되므로 식 (2)와 식 (11d)에서 알수 있듯이 $C_{4i} = 0$ 이다. 완화 시간 상수와 PC와 DBR부분의 전자 수명시간은 다음과 같다.

$$\tau_R = \left[\frac{dR_1}{dN_1} + v_g g_N \frac{S_0}{V_1} \right]^{-1}, \quad (12a)$$

$$\tau_{S2} = \left[\frac{dR_2}{dN_2} \right]^{-1}, \quad (12b)$$

$$\tau_{S3} = \left[\frac{dR_3}{dN_3} \right]^{-1}, \quad (12c)$$

여기서, $g_N = \partial g / \partial N$ 이다. 통상 광자수 보다 광출력에 대한 표현이 일반적이므로, 광출력 $P(t)$ 가 $P(t) \propto S(t)$ 인 관계를 이용하면 (10)식으로부터 다음과 같은 변조 응답 항을 얻을 수 있다.

$$\delta P(\Omega) = 2P_s \left[\frac{C_{1r}}{eV_1} H_1(\Omega) \delta I_a(\Omega) + \frac{C_{2r}}{eV_2} H_2(\Omega) \delta I_{pc}(\Omega) + \frac{C_{3r}}{eV_3} H_3(\Omega) \delta I_{DBR}(\Omega) \right], \quad (13a)$$

$$\delta f(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \left[\left\{ \frac{1}{eV_1} C_{1i} H_4(\Omega) \right\} \delta I_a(\Omega) + \frac{1}{eV_2} \{ C_{2i} H_7(\Omega) + C_{1i} H_5(\Omega) \} \delta I_{pc}(\Omega) + \frac{1}{eV_3} \times \{ C_{3i} H_8(\Omega) + C_{1i} H_6(\Omega) \} \delta I_{DBR}(\Omega) \right], \quad (13b)$$

$$\delta N_1(\Omega) = \frac{1}{eV_1} H_4(\Omega) \delta I_a(\Omega) + \frac{1}{eV_2} H_5(\Omega) \delta I_{pc}(\Omega) + \frac{1}{eV_3} H_6(\Omega) \delta I_{DBR}(\Omega), \quad (13c)$$

$$\delta N_2(\Omega) = \frac{1}{eV_2} H_7(\Omega) \delta I_{pc}(\Omega), \quad (13d)$$

$$\delta N_3(\Omega) = \frac{1}{eV_3} H_8(\Omega) \delta I_{DBR}(\Omega), \quad (13e)$$

여기서, $\delta P(\Omega)$ 와 $\delta f(\Omega)$ 는 다전극 DBR LD의 IM변조(Intensity Modulation)와 FM변조 응답 함수이며, 능동

부분(δI_a), 위상 조정 부분(δI_p) DBR 부분(δI_{DBR}) 각각에 대해 변조할 수 있다. 또한, 각 변조 주파수 $\Omega = 2\pi f_m$ 이며, $\Omega = 0$ 에서의 $\delta P(0)$ 와 $\delta f(0)$ 값을 IM/FM 효율이라 하며, 결과 부분에서 비 선형 이득 포화 효과에 의한 영향을

$$H_s(\Omega) = \frac{1}{[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \quad (14a)$$

$$H_d(\Omega) = \frac{j\Omega + \frac{1}{\tau_R}}{(j\Omega + \frac{1}{\tau_2})[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \quad (14b)$$

$$H_3(\Omega) = \frac{j\Omega + \frac{1}{\tau_R}}{(j\Omega + \frac{1}{\tau_3})[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \quad (14c)$$

$$H_4(\Omega) = \frac{j\Omega - 2C_v S_v}{[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \quad (14d)$$

$$H_5(\Omega) = -\frac{\omega_{nk}^2}{(j\Omega + \frac{1}{\tau_2})[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \times \frac{C_2}{C_1} \quad (14e)$$

$$H_6(\Omega) = -\frac{\omega_{nk}^2}{(j\Omega + \frac{1}{\tau_3})[-\Omega^2 + \frac{j\Omega}{\tau_R} + \omega_{nk}^2 - 2C_v S_v(j\Omega + \frac{1}{\tau_R})]} \times \frac{C_3}{C_1} \quad (14f)$$

$$H_7(\Omega) = \frac{1}{j\Omega + \frac{1}{\tau_2}} \quad (14g)$$

$$H_8(\Omega) = \frac{1}{j\Omega + \frac{1}{\tau_3}} \quad (14h)$$

여기서, 비 선형 이득 포화 효과를 포함한 공명 주파수는 아래식으로 표시되어 진다.

$$\omega_{nk}^2 = 2S_0 C_V \frac{G_S}{V} (1 - \mu S_0) = (2\pi f_R)^2 \quad (15)$$

위 (15)식에서 알 수 있듯이 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과는 공명 주파수에 많은 영향을 미치며, 이 영향으로 인해 3 dB 대역폭이 제약을 받게된다.

III. 결과 및 논의

비 선형 이득 포화 효과가 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 변조특성에 미치는 영향에 대해서 논의하기 전에, 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 정적특성^[4]과 변조 특성^[5]을 알아보는 것이 중요하며, 이때 쓰인 수식과 상수값들은 참고 문헌^[5]와 동일하다. 그림 1의 수동 부분에 전류가 주입되면 수동 부분의 흡수 계수는 증가하며, 굴절률은 감소하고 발진 파장은 짧은 쪽으로 이동한다. 이로 인해 임계 전류는 증가하고, 광출력은

감소한다. 연속 파장 가변은 위상 조정 부분과 DBR 부분의 전류비가 $I_{pc} = 3I_{DBR}$ 이 되도록 수동 부분 주입전류 I_p 를 주입하고,^[4] 위상 조정 부분의 주입전류 I_{pc} 를 0 mA에서 100 mA까지 변화시켜 366 GHz의 연속 파장 가변 범위를 얻었다.^[5]

위 정적 특성에 의해 연속 파장 가변시 파장 가변 DBR 레이저의 FM/IM 변조 응답 특성을 그림 2의 (a)와 (b)에 나타냈으며, δI_a 와 δI_p 는 각각 활성 부분과 수동 부분의 변조 전류를 나타낸다. δI_p 인 경우, 수동 부분의 주입전

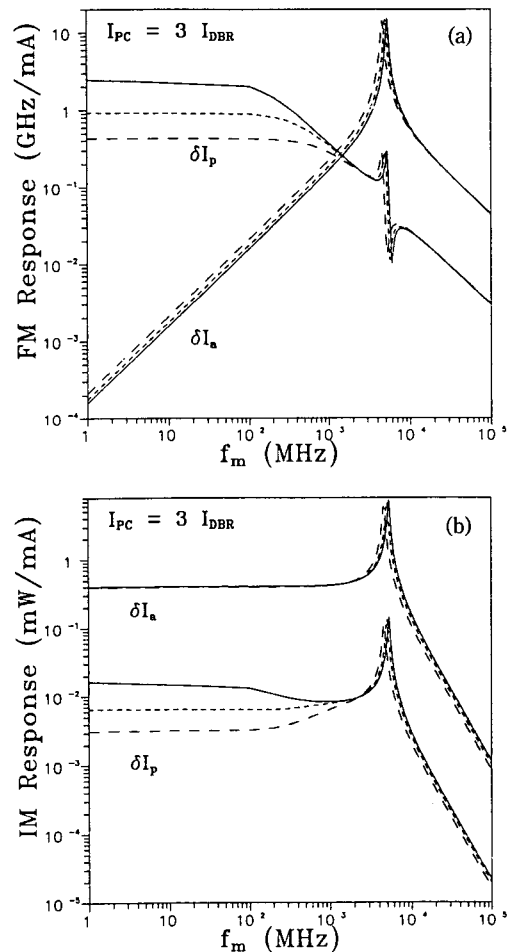


그림 2. Modulation response versus modulation frequency at three different phase control currents. $I_p = 6$ mA (solid curves), $I_{PC} = 30$ mA (dotted curves) and $I_{PC} = 100$ mA (dashed curves) at $I_{ao} = 30$ mA. δI_a and δI_p indicate the modulation of active section and passive section, respectively: (a) FM response and (b) IM response.

류가 증가함에 따라 도파로의 흡수가 증가하고 광자수는 적어지므로 FM 효율은 1.5에서 0.45 GHz/mA로 감소하며, 이에 따라 전자 수명은 감소하고 반대로 flat FM 응답은 고주파수쪽으로 확장되며 공명 주파수는 5.3에서 4.6 GHz로 감소한다. 그림 2의 (b)에서 보듯이 δI_p 인 경우, IM응답은 매우 작지만 무시할 수 없는 정도이며, 이는 뒤에서 논의할 CPR(chirping-to-modulation-power ratio)에 많은 영향을 미친다.

변조 특성에 커다란 영향을 미치는 비 선형 이득 포화 효과를 고려한 FM, IM응답 특성은 그림3의 (a)와 (b)에 나타냈으며, 이때 위상 조정 주입전류는 $I_p = 30$ mA이다.

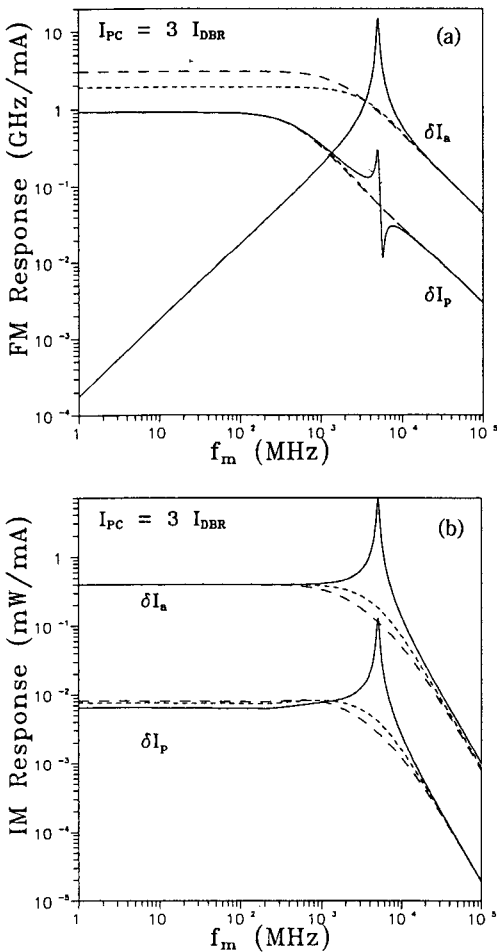


그림 3. Modulation response versus modulation frequency with $\mu=0$ (solid curves), $\mu=1.03 \times 10^{-6}$ (dotted curves), and $\mu=1.54 \times 10^{-6}$ (dashed curves) at $I_{pc}=30$ mA: (a) FM response and (b) IM response.

비 선형 이득 포화 효과가 커짐에 따라 (C_4 의 절대값이 커짐) 공명피크(resonance peak)는 현저히 감소한다. 식 (14a)-(14f)의 분모에서 볼수 있듯이 감소를 또한 커지며 이 효과는 3 dB대역폭에 영향을 준다.^[9] FDM(frequency-division-multiplexed)나 FSK(frequency-shifted-keyed) 시스템은 수 GHz까지 FM응답의 크기와 위상이 변화 없이 일정한 파장 가변 레이저가 필요하며, 이는 FM응답의 위상 변화는 FSK시스템에서 변조 대역폭을 제한하기 때문이다.^[10] 비 선형 이득 포화 상수 μ 가 증가함에 따라 FM응답의 위상이동이 현저히 줄어들지만,^[5] 우리가 고려한 비 선형 이득 포화 모델이 현상론적이어서 식 (2)와 (11d)에서 보듯이 $C_4=0$ 이므로 비선형 이득 포화 효과가 FM의 위상에 미치는 영향은 본 논문에서는 논의하지 않았으며, 비 선형 굴절률 효과($C_4 \neq 0$)를 고려해야만 FM의 위상에 미치는 영향을 더 잘 이해할 수 있게되며, 이에 대한 연구가 진행 중이다.

수동 부분에 주입전류를 증가시키면 도파로의 손실이 증가하고, 이에 따라 광자수와 출력은 감소하게 되며, 그림 4의 (a), (b)는 수동부분의 전류 증가에 따른(연속 파장 가변시) FM/IM 효율의 변화를 나타냈다. FM과 IM 효율은 일반적으로 $\Omega=0$ 에서 $\mathcal{S}(0)$ 와 $\delta P(0)$ 로 정의되지만, δI_a 인 경우 식 (14d)에서 보듯이 $C_4=0$ 인 경우 FM효율은 영이다. 따라서 본 논문에서는 1 MHz에서 파장 가변 다전극 DBR LD의 FM효율을 구하였다. 주입 전류가 증가함에 따라 $\mu=0$ 인 경우 FM효율은 약간 증가하나 $\mu \neq 0$ 인 경우 반대로 조금 감소하였다. δI_p 인 경우에는 FM효율이 비 선형 이득 포화의 영향을 거의 받지 않으며 주입 전류가 증가함에 따라 감소한다. 이 이유는 FM효율이 파장 가변 변화율에 관계가 있으며, 주입 전류가 증가함에 따라 Auger효과가 커져 파장 가변 변화율이 감소하는 것에 기인한다.^[8] 그림 4(b)의 IM효율은 δI_a 인 경우 주입전류나 비 선형 이득 포화 효과의 영향을 거의 받지 않으나, δI_p 인 경우에는 주입전류가 증가함에 따라 IM효율은 감소하고 같은 주입전류일 때 비 선형 이득 효과가 커짐에 따라 IM효율은 증가한다.

공명 주파수 f_R 이 출력의 제공근에 의존하는 경향을 그림 5에 나타냈다. $\mu=0$ 인 경우 f_R 의 제공은 출력에 선형적으로 비례하지만, 식 (4)에서 보듯이 $|r_{DBR}|$ 의 주파수 의존성^[4] 때문에 약간 벗어남을 보인다. 또한 C_{1r} 이 주입전류가 증가하면 감소하고 f_R 이 감소하므로, 비 선형 이득 포화 효과에 의해 f_R 이 포화되는 현상이 나타나며 같은 주입전류에 대해 μ 가 증가 할수록 포화되는 현상이 크게 나타난다.^[11] 이 포화되는 현상은 다전극 DBR 레

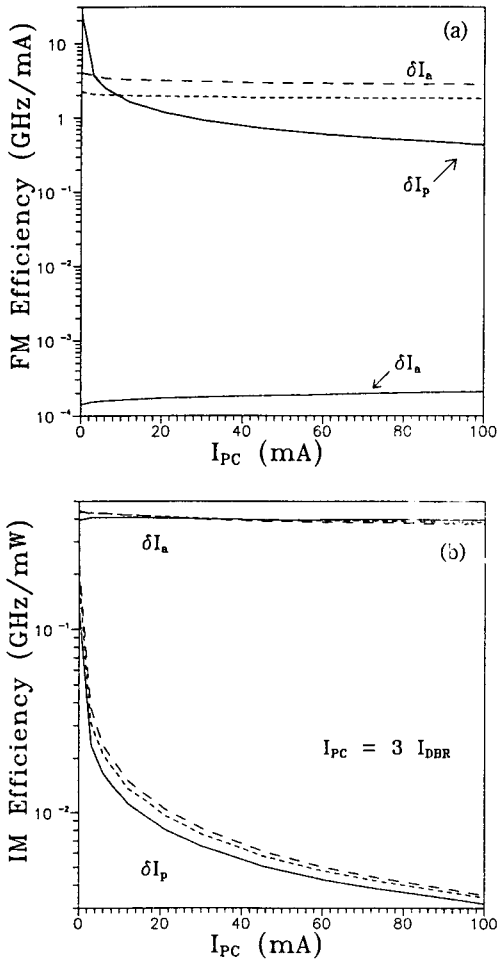


그림 4. Modulation efficiency as a function of the phase control current with $\mu=0$ (solid curves), $\mu=1.03 \times 10^{-6}$ (dotted curves), and $\mu=1.54 \times 10^{-6}$ (dashed curves): (a) FM efficiency at 1 MHz and (b) IM efficiency.

이저의 출력이 증가하더라도, 공명 주파수 f_R 이 같이 비례해서 증가하는 것이 아니라 어떤 최대치가 존재함을 뜻한다.

3 dB 대역폭(bandwidth)은 소자가 작동할 수 있는 주파수 대역을 결정하는 변수로 다음과 같이 정의 되어진다.

$$\left| \frac{\delta P(x)}{\delta P(0)} \right| = \frac{1}{2} \quad (16)$$

여기서 (16)식을 만족하는 x 를 3 dB 대역폭이라 하며 그림 6은 출력에 대한 3 dB 대역폭을 나타낸다. $\mu=0$ 인

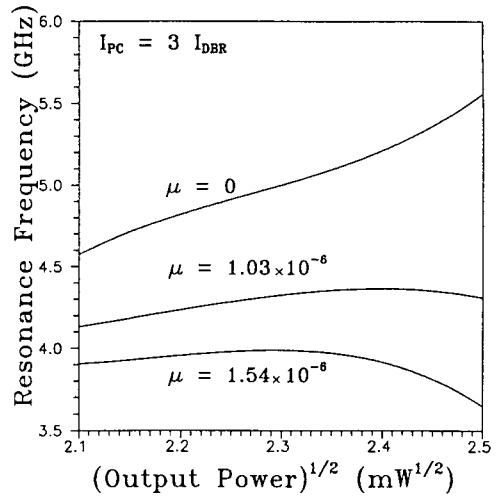


그림 5. Dependence of resonance frequency on the square root of the output power.

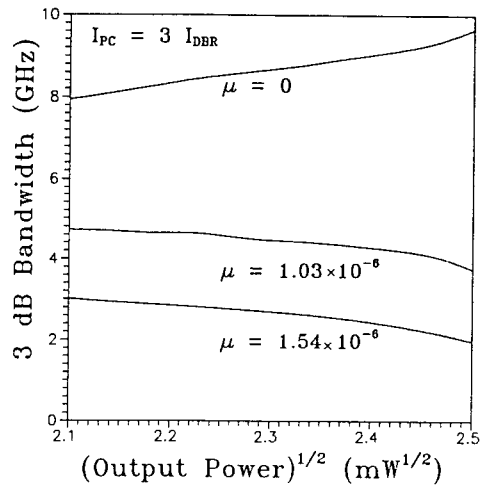


그림 6. Dependence of 3 dB bandwidth on the square root of the output power.

경우 3 dB 대역폭은 출력이 증가함에 따라 증가하지만 앞에서 논의한 것처럼 비 선형 이득 포화 효과에 의해 공명 주파수가 감소하므로 3 dB 대역폭도 감소함을 볼 수 있다. 주입전류가 증가하면 출력이 감소하는 것이 다전극 DBR LD의 정적 특성이기 때문에, 이는 그림 2에서 보듯이 주입전류가 증가함에 따라 FM효율은 감소하지만 flat FM응답은 고주파 쪽으로 확장되는 사실과 일치한다.

비선형 이득 포화 효과가 FM응답에 영향을 미치는 정도를 이해하고 기생효과(parasitic effect)에 무관하기

때문에 실험적 결과와 비교하는데 유용한 양 중의 하나가 CPR이며, 이 CPR은 공진기 길이나 구속계수(confinement factor)처럼 레이저 구조에는 의존하지 않고 고주파수 영역에서는 변조 주파수, 출력, 선폭 증가계수(line-width enhancement factor)에 비례하므로 선폭 증가계수를 측정하는데 매우 유용하다. CPR은 IM에 의한 chirping의 양으로 표시되며 다음과 같이 정의된다.^[9]

$$CPR = \frac{\delta f(\Omega)}{\delta P(\Omega)} \quad (17)$$

그림 7의 (a)와 (b)는 파장 가변시 비 선형 이득 포화

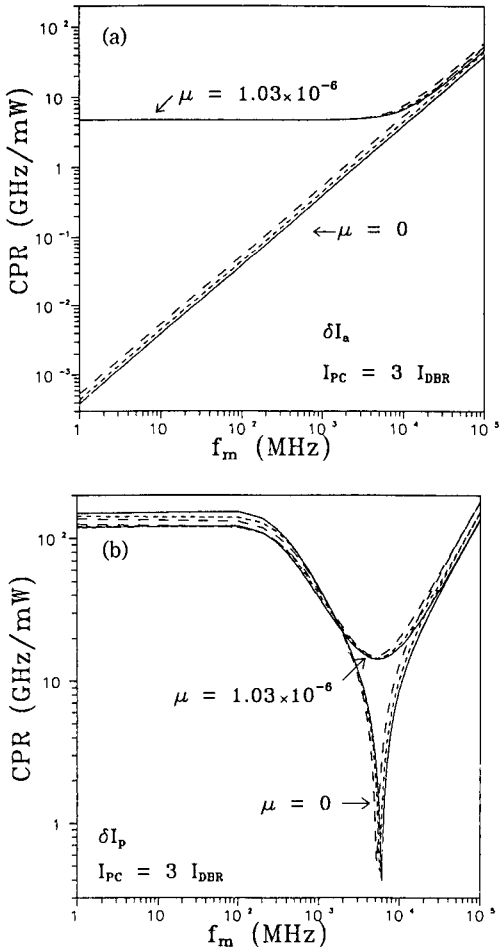


그림 7. CPR versus modulation frequency at three different phase control currents. $I_{PC}=6$ mA(solid curves), $I_{PC}=30$ mA(dotted curves) and $I_{PC}=100$ mA(dashed curves) at $I_{ao}=30$ mA.: (a) the modulation of active section and (b) the modulation of passive section.

효과에 의한 CPR특성을 나타낸다. 수동 부분의 주입전류 증가시 δI_a 인 경우 그림 2(a)와 (b)에서 보듯이 FM 응답은 증가하고 IM 응답은 감소하므로 CPR은 증가하며, δI_p 인 경우 FM응답의 감소 폭이 IM응답의 감소 폭보다 더 크기 때문에 CPR은 감소한다. 그러나 그림 3의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 $\mu \neq 0$ 인 경우 비 선형 이득 포화 효과로 인하여 δI_a 인 경우 CPR은 증가하며,^[12] δI_p 인 경우 CPR은 감소한다. 또한 CPR은 공명 주파수 이하에서 비 선형 이득 포화 효과를 크게 받음을 알 수 있다.

IV. 결 론

현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 연속 파장 가변시 다전극 DBR 레이저의 변조 특성에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 비 선형 이득 포화 효과가 커짐에 따라 FM/IM의 공명 피크는 현저히 감소하며, FM 효율은 δI_a 인 경우 조금 감소하나 δI_p 인 경우는 거의 영향을 받지 않는다. IM효율은 δI_a 인 경우 영향이 없으며 δI_p 인 경우에는 약간 증가한다. 또한 출력의 제곱근에 선형적으로 비례하는 공명 주파수 f_R 는 비 선형 이득 포화 효과가 커짐에 따라 포화되는 현상이 크게 나타나며, 3 dB 대역폭은 감소율의 증가로 인하여 감소한다. δI_a 인 경우 CPR은 증가하지만 반대로 δI_p 인 경우는 CPR이 감소하며 이는 FM/IM 변조 특성이 비 선형 이득 효과에 크게 영향을 받는다는 것을 나타내며, 공명 주파수 이하에서 CPR은 비 선형 이득 포화 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

현상론적인 비 선형 이득 포화 효과는 FM/IM응답 특성, 효율, 공명 주파수, 3 dB대역폭 등 파장 가변 다전극 DBR레이저의 변조 특성을 대부분 잘 설명하지만 FM 위상과 CPR특성을 이해하는데는 불충분하다. G. P. Agrawal^[7]이 제시한 비선형 굴절률 효과를 포함한 비 선형 이득 모델을 이용하면, FM위상과 CPR특성에 미치는 비 선형 굴절률 효과가 존재하게 된다. 우리의 모델에서도 비선형 굴절률 효과를 나타내는 C_4 항이 존재하므로 이항을 포함한 새로운 비 선형 이득 포화 모델에 대해서 연구 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. Kobayashi and I. Mibo, J. Lightwave Technol. LT-6, 1623 (1988).
- [2] T. L. Koch and U. Koren, J. Lightwave Technol. LT-8, 274 (1990).

- [3] S. Murata, I. Mito, and K. Kobayashi, IEEE J. Quantum Electron. **QE-23**, 835 (1987).
- [4] X. Pang, H. Olesen, and B. Tromborg, IEEE J. Quantum Electron. **QE-24**, 2423 (1988).
- [5] S. Lee, S. Y. Lee, H. L. Park, W. J. Choi, J. I. Lee, and K. N. Kang, J. Korean Phys. Soc., **26**, 328 (1993).
- [6] M.F. Ferreira, J. F. Rocha, and J. L. Pinto, IEEE J. Quantum Electron. **QE-28**, 833 (1992).
- [7] G. P. Agrawal, IEEE J. Quantum Electron. **QE-26**, 1901 (1990).
- [8] X. Pang, H. Olesen, and B. Tromborg, IEEE J. Quantum Electron. **QE-25**, 1254 (1989).
- [9] R. S. Tucker, J. Lightwave Technol. **LT-3**, 1180 (1985).
- [10] O. Nilsson, L. Gillner, and E. Goobar, Electron. Lett., **23**, 1372(1987).
- [11] J. E. Bowers, Solid-St. Electron. **30**, 1 (1987).
- [12] M. F. Ferreira, I. F. Rocha, and J. L. Pinto, IEEE Proc, J, **137**, 361 (1990).

Phenomenological Nonlinear Gain Saturation Effect on the Modulation Characteristics of a Multi-electrode DBR Laser with Continuous Frequency Tuning

S. Lee, N. Park and H. L. Park

Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

W. J. Choi, I. K. Han, J. I. Lee and K. N. Kang

Optical Electronics Laboratory, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

(Received: August 2, 1993)

Phenomenological nonlinear gain saturation effect on the modulation characteristics in a multi-electrode DBR laser, when the lasing wavelength changes, continuously is analyzed theoretically. FM efficiency, 3 dB bandwidth, and resonance frequency decrease with increasing bias current to the passive section, except increasing the flat FM response. It is found that the nonlinear gain saturation effect severely affects the modulation characteristics such as FM/IM response, 3 dB bandwidth, resonance frequency and CPR, but hardly affects the behavior of continuous frequency tuning.