

## 연속 파장 가변시 현상론적인 비선형 이득포화효과가 다전극 DBR 레이저의 잡음특성에 미치는 영향

이 석 · 최원준 · 한일기 · 김희중 · 우덕하 · 김선호 · 이정일 · 감광남

한국과학기술연구원 정보전자연구부

박 홍 이

연세대학교 물리학과

(1994년 10월 24일 받음)

현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 연속 파장 가변시 다전극 DBR 레이저의 잡음 특성에 미치는 영향을 이론적으로 연구하였다. 광전송선 모델에 종 방향으로의 자발적 방출 분포에 의한 향상계수  $K$ 와 비 선형 이득 포화 효과를 고려하여, 연속 파장 가변시 출력의 감소에 따른 상대적 세기 잡음(RIN)과 주파수 잡음 특성을 분석하였다. 수동부분의 주입전류의 증가에 따라 자발적 방출률은 증가하며, 이에 비례하여 상대적 세기 잡음, 주파수 잡음 및 선폭은 증가한다. 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과는 상대적 세기 잡음 및 주파수 잡음 특성에 큰 영향을 주지만, 선폭은 오히려 감소한다.

### I. 서 론

차세대 걸맞은 광통신(Coherent Communication)의 국부 발진기(Local Oscillator)와 송신기 광원에 사용될 레이저 다이오드(LD)는 단모드 발진, 적은 선폭(linewidth), 넓은 파장 가변 영역(tuning range), 큰 FM 응답(Frequency Modulation response)과 적은 잡음(noise) 특성을 가져야 한다. 이와 같은 필요 조건을 만족하는 LD 중의 하나가 다전극 DBR(Distributed Bragg Reflector) 레이저이다.<sup>[1,2]</sup>

레이저가 일단 정상상태(steady state)에 도달하면 출력과 발진 파장은 시간에 대해 무관하다고 가정하지만, 실제로는 빛의 세기와 위상이 요동(fluctuation)한다. 따라서 이러한 현상을 이해하기 위해서는 가장 근본적으로는 비율 방정식(rate equation)에 빛의 양자적 성질이 고려되어야 한다.<sup>[3]</sup> 일반적으로 빛의 세기 잡음은 레이저의 임계 발진 영역에서 그 크기가 최대이며, 임계 전류 이상의 동작 전류를 흘려주면 점점 빛의 세기 잡음이 작아진다.<sup>[4]</sup> 빛의 세기 잡음 스펙트럼은 레이저의 근본적인 공명 현상 때문에 공명 주파수 근처에서 그 크기가 최대이다. 주어진 주파수에서 빛의 세기 잡음으로 정의되는 상대적 세기 잡음 RIN(Relative Intensity Noise)은 코히런트 광통신의 송신부와 국부 발진기로 사용되는

레이저의 중요한 특성 요소이다. 특히 수신부의 민감도는 국부 발진기로 사용되는 빛의 세기 잡음에 의해 크게 떨어진다.<sup>[5]</sup> 레이저의 세기 잡음에 의해 생기는 광전류 요동은 국부 발진기의 과잉 잡음이라 하며,<sup>[6]</sup> 이러한 국부 발진기의 과잉 잡음으로부터 유발되는 민감도의 저하는 특히 레이저의 고주파수 영역에서의 잡음 스펙트럼에 크게 의존한다.<sup>[7]</sup> 위상의 변화는 또한 주파수 이동을 수반하며, 연속 단모드 발진 하에서 선폭의 증가는 레이저 안에서 일어나는 이러한 위상의 변화 때문이다. 하지만 코히런트 광통신에서 보면 특히 중요하게 고려할 사항은 저 주파수 영역에서의 값인 선폭이 아니라 위상 변화의 전 영역인 주파수 잡음 스펙트럼(Frequency Noise Spectrum)이다.<sup>[8]</sup>

최근에 다전극 DBR LD의 잡음 특성에 관한 실험<sup>[9,10]</sup> 및 이론<sup>[11,12]</sup>이 매우 활발히 연구 되어지고 있으나, 비 선형 이득 포화 효과가 파장가변시 다전극 DBR LD의 잡음 특성에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미진한 편이다. 본 논문에서는 반고전적(semi-classical) 방법인 랑제방 함수를 포함한 광전송선 모델<sup>[13]</sup>을 사용하여 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 잡음 특성을 연구하였다. 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 상대적 세기 잡음 스펙트럼과 주파수 잡음 스펙트럼특성에 미치는 효과와 연속 파장 가변을 위하여 수동부분의 주입전류 증가에

다른 출력의 감소시의 잡음 특성을 조사하였다. 특히 발진모드가 이득정점에서 벗어나 발진하는 detuning 효과와 실제 주파수 의존성 및 활성층의 종 방향으로의 자발적 방출 분포에 의한 영향을 고려하였다.

### 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 빛의 유효 반사 계수는 아래와 같이 표현되어 진다.

$$r_L(\omega, S, N_1) = r_1 \exp[-2j k_1(\omega, S, N_1) l_1] \quad (1)$$

여기서,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $r_1$ 은 왼쪽 단면( $z = -l_1$ )에서의 반사계수,  $S$ 는 광자수,  $N_1$ 은 활성층의 전하 밀도,  $\omega$ 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,  $n_1$ ,  $g$ ,  $\alpha_1$ 은 각각 활성층의 굴절률, 모드 이득(modal gain), 내부 흡수계수이다. 공진기 내부의 광자수( $S$ )에 의해 모드 이득이 감소하는 현상론적인 비 선형 이득 포화 모델은 아래와 같다.<sup>[11]</sup>

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

여기서, 모드 이득  $g(\omega, N_1)$ 은 참고 문헌<sup>[14]</sup>에 표현되어 있으며,  $\mu$ 는 현상론적인 비 선형 이득 포화 정도를 나타내는 매개변수이다.

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

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

$N_2$ 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<sup>[14]</sup>에 있다. 수동 부분에서의 파수는 다음과 같이 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  $\alpha_i$ 는 수동 부분의 굴절률과 흡수 계수를 나타내며, 수동 부분의 주입전류가 증가함에 따라 자유전자의 플라즈마 효과(free carrier plasma effect)와 자유전자 흡수 효과(free carrier absorption)에 의해 굴절률은 감소하고 흡수 계수는 증가하게 된다. 이와같은 효과에 의해 발진 파장은 짧은 쪽으로 가변되며, 광출력은 감소한다.

잡음 특성에 대한 이론적 모델은 위상조정 DFB(Distributed Feed Back) LD의 비율 방정식을 유도한 광전송선 이론(Transmission Line Theory)<sup>[13]</sup>으로, 이 모델을 다전극 DBR LD에 적용하였다.<sup>[11]</sup> 이 레이저 구조의 발진조건은 다음 식을 만족한다.

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

여기서, 식 (6)을 만족하는  $(\omega, N_1, N_2, N_3)$  값에서 주모드(main mode)는  $N_1$  중 임계 전하 밀도가 가장 작은 모드이며,  $N_2$ 와  $N_3$ 는 수동 부분의 주입전류에 의해 독립적으로 결정되어지며 참고문헌<sup>[14]</sup>에 잘 나타나 있다. 본 논문에서는 주모드 발진만을 가정한다. 식 (6)을 주 발진 모드 부근에서 Taylor 확장하고, 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과와 detuning 효과  $V$ 를 고려하면, 다전극 DBR 레이저의 광자수(photon number)  $S(t)$ , 위상(phase)  $\phi(t)$ , 활성층의 운반자(excited carrier) 수  $N(t)$ 에 대한 비율 방정식<sup>[11]</sup>은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} S(t) &= V_1 G_n \delta N_c(t) S(t) / V_1 + V_1 G_s \delta S(t) S(t) \\ &+ 2Re[2f_d [\sigma_{rL} A^-(t)(A^+(t))^* - S(t)]] + R_s + F_s(t) \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi(t) &= V_1 G_n \delta N_c(t) / 2V_1 \\ &+ Im[2f_d [\sigma_{rL} A^-(t)(A^+(t))^* - S(t)] / S(t)] + F_\phi(t) \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N_c(t) &= I_1(t)/e - V_1 R(N_1) - G_0 S(t) - G_n \delta N_c(t) S(t) / V_1 \\ &- G_s \delta S(t) S(t) + F_N(t) \end{aligned} \quad (7c)$$

여기서  $V_1$ 은 활성층의 부피이고,  $N_c(t) = N_1(t) V_1$ 은 활성층의 여기된 운반자 수이며,  $A^-(t)$ 와  $A^+(t)$ 는 그림 1의

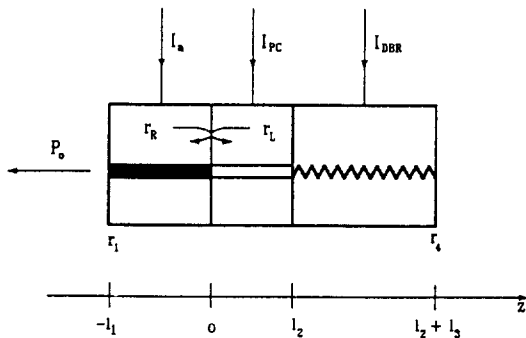


그림 1. Schematic diagram of a three-section DBR laser.

$z=0$ 에서 왼쪽과 오른쪽으로 진행하는 전기장의 포락선 함수이고  $\sigma=S(t)/|A^+(t)|^2$ ,  $G_0=v_g g(w_s, S_0, N_s)$ ,  $G_n=v_g \frac{dg}{dN}$ ,  $G_s=v_g \frac{dg}{dS}$ 이고,  $G_s$ 는 비 선형 이득 포화 효과를 고려한 항이며,  $v_g$ 는 군속도,  $F_s(t)$ ,  $F_o(t)$ ,  $F_N(t)$ 는 랑제방 함수<sup>[8]</sup>이다.

이득의 정점으로부터 얼마나 벗어나 있는가의 정도 (detuning effect)를 고려한  $V$ 는 다음과 같다.

$$V = [1 + j\alpha] / [1 + jG_w/2] = V_r + jV_i \quad (8)$$

여기서  $\alpha$ 는 선폭 향상 계수이고,  $G_w = v_g \frac{dg}{d\omega}$ 이다. 발진모드에 속하는 자발적 방출율  $R_s$ 는 아래식으로 표현된다.

$$R_s = \eta_{sp} v_g g_0 K \quad (9)$$

여기서,  $\eta_{sp}$ 는 자발적 방출요소이며, 활성층의 종방향으로 분포된 자발적 방출에 의한 효과를 나타내는 향상계수  $K$ 는 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$K = [(r_1 + |r_R|)(1 - r_1|r_R|) / \{2r_1|r_R| \ln(r_1|r_R|)\}]^2 \quad (10)$$

식 (7a)~(7c)을 소신호 분석(small signal analysis)하고 푸리에 변환하면 다음과 같은 형태의 방정식을 얻는다.

$$\begin{vmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & O & H \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta S(s) \\ \delta \phi(s) \\ \delta N(s) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_s(s) \\ F_o(s) \\ F_N(s) \end{vmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$A = j\Omega + f_c + R_s/S_0 - V_r G_s S_0 \quad (12a)$$

$$B = 2S_0 f_s \quad (12b)$$

$$C = -V_r G_N S_0 / V_1 \quad (12c)$$

$$D = -f_0 / 2S_0 \quad (12d)$$

$$E = j\Omega + f_0 \quad (12e)$$

$$F = -V_i G_N / 2V_1 \quad (12f)$$

$$G = G_0 \quad (12g)$$

$$H = j\Omega + \lambda_c \quad (12h)$$

$$f_c = j\Omega + \bar{A} \quad (12i)$$

$$f_s = j\Omega \bar{B} / V_1 \quad (12j)$$

$$\bar{A} = -Im[f_a \frac{\partial \ln r_R}{\partial \omega}] \quad (12k)$$

$$\bar{B} = V_i Re[f_a \frac{\partial \ln r_R}{\partial \omega}] \quad (12l)$$

$$\lambda_c = \lambda + G_N S_0 / V_1 \quad (12m)$$

$$\lambda = dR_1(N_1) / dN_1 \quad (12n)$$

$$f_a = [j \frac{\partial \ln r_R}{\partial \omega}]^{-1} \quad (12o)$$

이며, 식 (11)의  $s=j\Omega$ 이고,  $\bar{A}$ 와  $\bar{B}$ 는 수동부분에 의한 optical feedback 효과를 나타내는 항들이다. 식 (11)에서 상대적 세기잡음(RIN)과 주파수 잡음의 스펙트럼 식을 유도하면 다음과 같다.<sup>[14]</sup>

$$RIN(\Omega) = R_s \{ (2S_0 + 1) |EH|^2 + |BH|^2 / 2S_0 + 2(S_0 + \lambda N_s / R_s) |BF - CE|^2 - 4S_0 R_r [EH(BF - CE)^*] / (S_0 |Y|^2) \} \quad (13a)$$

$$S_o(\Omega) = (R_s \Omega^2 / |Y|^2) \{ (2S_0 + 1) |FG - DH|^2 + 2(S_0 + \lambda N_s / R_s) |CD - AF|^2 + |AH - CG|^2 / 2S_0 - 4S_0 Re[(FG - DH)(CD - AF)^*] \} \quad (13b)$$

여기서,  $Y$ 는 식 (11)의 행렬식을 나타내며 다음과 같다.

$$|Y| = |AEH - B(DH - FG) - CEG| \quad (14)$$

### III. 결 과

비선형 이득포화효과가 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 잡음특성에 미치는 영향에 대해서 논의하기 전에, 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 정적특성<sup>[14]</sup>과 변조 특성<sup>[15]</sup>을 알아보는 것이 중요하며, 자발적 방출요소  $n_{sp} = 2.7$ <sup>[11]</sup>을 제외하고는 이때 쓰인 수식과 상수값들은 참고 문헌<sup>[14,15]</sup>와 동일하다. 그림 1의 수동부분에 전류가 주입되면 수동부분의 흡수 계수는 증가하며, 굴절률은 감소하고 발진 파장은 짧은 쪽으로 이동한다. 이로 인해 임계 전류는 증가하고, 광출력은 감소한다. 연속 파장 가변(continuous wavelength tuning)은 위상 조정 부분과 DBR 부분의 전류비가  $I_{pc} = 3I_{DBR}$ 이 되도록 수동 부분 주입전류  $I_b$ 를 주입하고<sup>[14]</sup> 위상 조정 부분의 주입전류  $I_{pc}$ 를 0 mA에서 100 mA까지 변화시켜 366 GHz의 연속 파장 가변 범위를 얻었다.<sup>[15]</sup> 또한 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 변조특성에 미치는 영향에 대해서는 참고문헌<sup>[17]</sup>에 자세히 기술되어 있다. 그림 2는 연속 파장 가변시 파장 가변 다전극 DBR 레이저의 수동부분의 주입전류에 대한 발진 모드에 속하는 자발적 방출률  $R_s$ 을 계산한 것이다. 가는 점선은 향상계수  $K$ 를 고려하지 않은 경

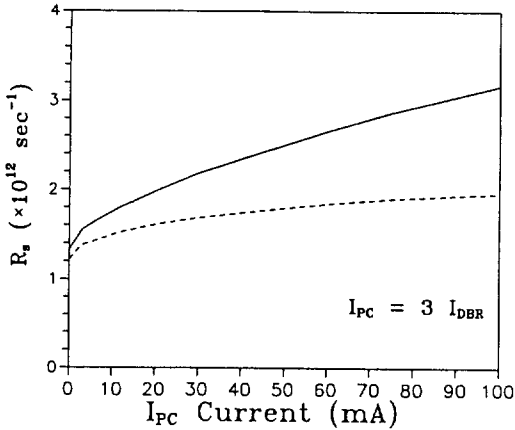


그림 2. The spontaneous emission rate into the lasing mode against the phase control currents for a three-section DBR laser: with including K (solid curve) and not including K (dotted curve).

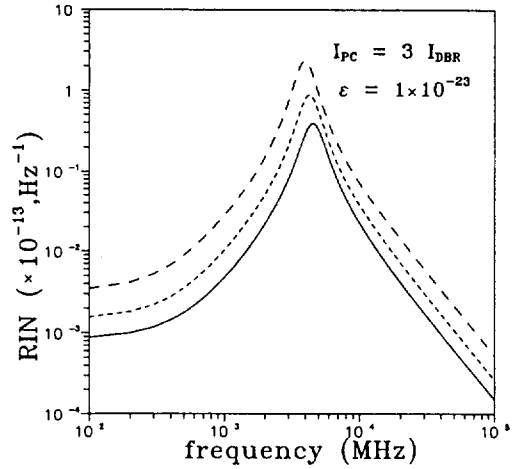


그림 4. The power dependence on the RIN spectra versus frequency at three different PC bias currents:  $I_{PC} = 6 \text{ mA}$  (solid curve),  $I_{PC} = 30 \text{ mA}$  (dotted curve), and  $I_{PC} = 100 \text{ mA}$  (dashed curve) at  $I_{a0} = 30 \text{ mA}$ .

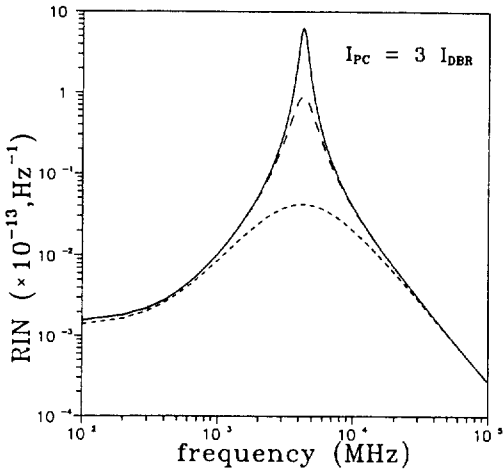


그림 3. The effect of nonlinear gain saturation on the relative intensity noise spectra versus frequency:  $\epsilon = 0$  (solid curve),  $\epsilon = 1 \times 10^{-23} \text{ m}^3$  (dashed curve), and  $\epsilon = 6.7 \times 10^{-23} \text{ m}^3$  (dotted curve) at  $I_{PC} = 30 \text{ mA}$ .

우며, 실선은 K값을 고려했을 경우이다. 파장 가변을 위해 수동부분에 전류가 주입되면 수동부분의 흡수계수는 증가하고, DBR 부분의 반사계수  $|r_{DBR}|$ 은 감소하며 이로 인하여 식 (4)의 유효반사계수  $|r_R|$ 은 감소하여 식 (10)의 종방향으로의 자발적 방출에 의한 향상계수 K는 1.08에서 1.62로 증가한다.  $R_s$ 는 수동부분의 주입전류가 증가함에 따라 식 (9)에서 알 수 있듯이 문턱 순 이득

$g_0$ 가 증가함에 따라 증가한다.

### 1. 상대적 세기 잡음(Relative Intensity Noise)

Woodward 그룹<sup>[9]</sup>은 최근에 two-section 파장 가변 DBR 레이저에 대한 상대적 세기 잡음의 실험적 결과를 발표하였다. 즉 레이저가 일정하게 출력을 내는 동안에는 상대적 세기 잡음은 파장가변을 위한 수동부분의 주입 전류에 무관하다는 결론을 내렸지만, 이 그룹이 사용한 DBR부분의 결합상수가 매우 큰 값이며, 이로 인해 DBR 부분의 유효반사계수  $|r_{DBR}|$ 을 실제 주파수 의존성을 무시한 상수로 취급하였다. 본 연구에서는 결합상수가 이들 그룹이 사용한 값보다 매우 작아 실제 주파수 의존성을 고려한  $|r_{DBR}|$ 을 사용하고, 파장가변시 출력의 감소에 의한 출력의존성을 고려하였기 때문에 다음과 같은 다른 결과를 보인다.

그림 3은 비 선형 이득 포화 효과의 증가가 상대적 세기 잡음 스펙트럼에 미치는 영향을 나타냈다. (3)식의 비선형 이득포화의 정도를 나타내는 매개변수  $\mu$ 는  $\mu = \epsilon/V_1$ 의 관계를 갖으며, 이때  $V_1$ 은 활성층의 부피이다. 실선은  $\epsilon = 0$ , 굵은 점선은  $\epsilon = 1 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ , 가는 점선은  $\epsilon = 6.7 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ 이다. 이때 위상 조정부분의 주입전류  $I_{PC} = 30 \text{ mA}$ 이며, 비 선형 이득 포화 효과가 커질 수록 상대적 세기 잡음의 크기는 약간 작아지며, 참고문헌<sup>[17]</sup>의 식 (15)에서 보듯이 공명 주파수  $f_R$  근처에서 비선형 이득포화 효과는 공명 피크의 크기와 모양에 커다란

영향을 미친다. 연속 파장 가변시 수동부분의 전류 주입에 따라 출력은 감소하며 이 출력의존성에 대한 상대적 세기 잡음 스펙트럼을 그림 4에 나타냈다. 위상 조정부분의 주입전류  $I_{PC}=6\text{ mA}$ ,  $I_{PC}=30\text{ mA}$ ,  $I_{PC}=100\text{ mA}$ 로, 각각 실선, 가는 점선, 굵은 점선으로 표시했으며, 비 선형 이득 포화 효과는  $\epsilon=1\times 10^{-23}\text{ m}^3$  값을 사용하였다. 일정한 출력에 대해, 상대적 세기 잡음의 크기는  $f\ll f_R$  일 때는 상대적으로 매우 낮지만, 서론에서 언급하였듯이 레이저의 근본적인 공명현상 때문에  $f\ll f_R$  부분에서는 매우 커짐을 알 수 있다. 주어진 주파수에서 보면, 상대적 세기 잡음은 수동부분의 주입전류 증가에 의한 출력의 감소에 대해서, 그림 2의  $R_s$  값이 증가함으로 상대적 세기 잡음의 크기가 증가함을 알 수 있다. 그림 5는 활성층의 종방향으로 분포되어 있는 자발적 방출의 영향을 나타내는 향상 계수 K가 상대적 세기 잡음에 미치는 영향을 나타냈다. 향상계수 K는 그림 2에서 보듯이  $R_s$ 의 크기를 증가시키므로, 이에 따라 상대적 세기 잡음의 크기를 약간 증가시킨다.

위의 결과에서 보듯이 반도체 레이저의 상대적 세기 잡음의 크기를 줄이기 위해서는 낮은 문턱 송이득  $g_0$ 를 얻어야 하므로, 이를 위해서는 광도파로의 흡수계수를 줄이고 광구속계수를 크게하는 광도파로 구조가 필요하다. 광통신용 파장 가변 레이저에서 보면 파장가변시 급격한 출력의 감소는 예상치 않은 상대적 잡음의 증가를 초래할 수 있으며, 파장가변시 출력의 감소가 적은 파장 가변 레이저가 필요함을 알 수 있다.

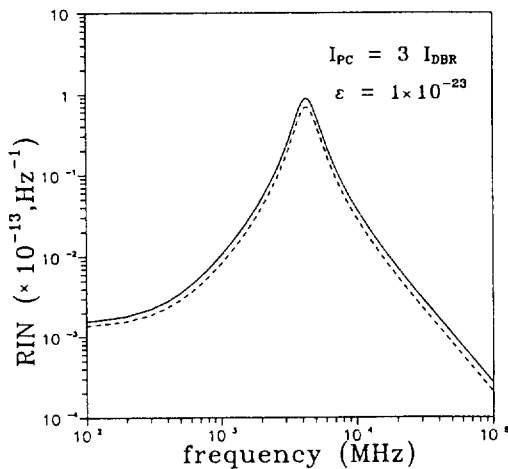


그림 5. The effect of the enhancement factor K on the RIN versus frequency: including K (solid curve) and not including K (dotted curve) at  $I_{PC}=30\text{ mA}$ .

## 2. 주파수 잡음 스펙트럼 및 선폭

Two-section 파장 가변 DBR 레이저의 주파수 잡음 스펙트럼 특성에 대한 실험적 결과가 최근에 발표되었지만,<sup>[10]</sup> 주파수 잡음 스펙트럼의 저 주파수 값인 선폭은 수동부분의 주입전류의 증가에 따라 선폭이 증가하는 현상에 대해 실험적 결과와 이론적 결과의 불일치가 존재하며, 이 불일치를 설명하는 하나의 사실이 광도파로의 흡수계수의 증가에 기인한다고 여기지만, 최근에는 종 방향의 자발적 방출에 의한 것이라는 주장이 M. Ferreira 그룹에 의해 제안되었다.<sup>[11]</sup> 이 그룹은 출력이 일정할 때 DBR 부분의 결합상수를 매개 변수로 하여, 주파수 잡음 특성에 대한 이론적 해석을 했다. 본 연구에서는 연속 파장 가변시 즉 출력의 감소에 따른 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과를 고려하여 주파수 잡음 스펙트럼 특성에 대해서 연구하였다. 그림 6은 위상 조정부분의 주입전류  $I_{PC}=30\text{ mA}$ 일 때 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 주파수 잡음 스펙트럼에 미치는 영향을 나타냈다. 상대적 세기 잡음과 마찬가지로 현상론적인 비 선형 이득 포화 효과에 의해 공명 주파수  $f_R$ 이 영향을 받으므로 공명주파수 부근에서 주파수 잡음 스펙트럼의 크기가 매우 감소하며, 저 주파수 값인 선폭도 이 효과에 의해 조금 감소한다. 그림 7은 주파수 잡음 스펙트럼의 출력 의존성을 나타냈으며, 위상 조정부분의 주입전류  $I_{PC}=6\text{ mA}$ ,  $I_{PC}=30\text{ mA}$ ,  $I_{PC}=100\text{ mA}$ 로, 각각 실선, 가는 점선, 굵은 점선으로 표시했다. 그림 7에서 알 수 있듯이

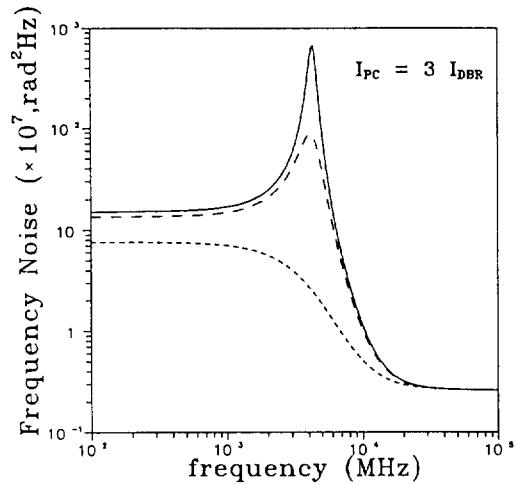


그림 6. The effect of nonlinear gain saturation on the frequency noise spectra versus frequency:  $\epsilon=0$  (solid curve),  $\epsilon=1\times 10^{-23}\text{ m}^3$  (dashed curve), and  $\epsilon=6.7\times 10^{-23}\text{ m}^3$  (dotted curve) at  $I_{PC}=30\text{ mA}$ .

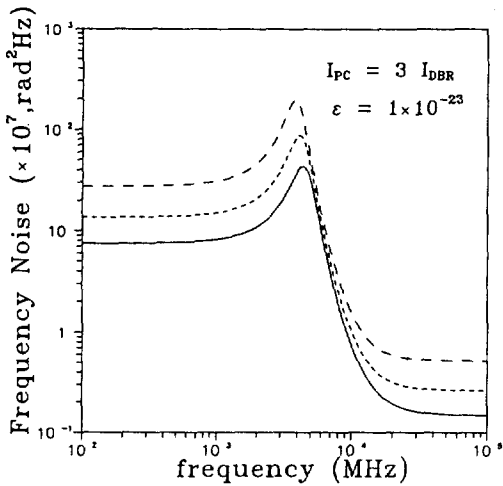


그림 7. The power dependence on the frequency noise spectra versus frequency at three different PC bias currents:  $I_{PC}=6$  mA (solid curve),  $I_{PC}=30$  mA (dotted curve), and  $I_{PC}=100$  mA (dashed curve) at  $I_{\omega 0}=30$  mA.

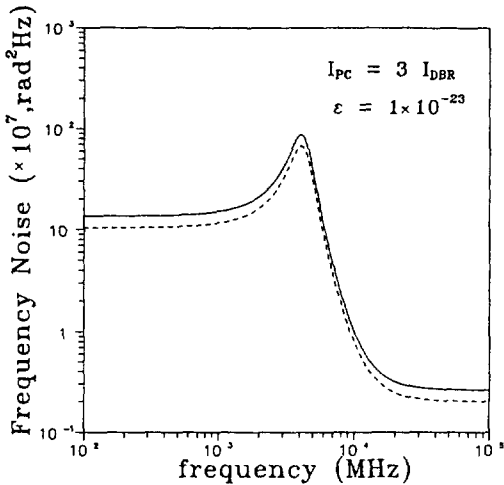


그림 8. The effect of the enhancement factor K on the frequency noise spectra versus frequency: including K (solid curve) and not including K (dotted curve) at  $I_{PC}=30$  mA.

전체 주파수 잡음 스펙트럼은 수동부분의 주입전류에 커다란 영향을 받으며, 수동부분의 주입전류가 커짐에 따라 출력이 감소하므로 주파수 잡음은 점점 증가함을 보인다. 저 주파수 영역인 값 선폭은 수동부분의 전류가 커짐에 따라 증가하지만 실험적 결과<sup>18)</sup>에서 보이는 증가

폭의 약 반배 정도이다. 그림 8은 활성층의 증방향으로 분포되어 있는 자발적 방출의 영향을 나타내는 항상 계수 K가 주파수 잡음 스펙트럼에 미치는 영향을 표시하였다. 항상계수 K는 전 주파수 영역에서 주파수 잡음 스펙트럼을 약간 증가시킨다. 하지만 이 증가 폭은 실험적 결과에 비추어 보면 불충분하며, 이 수동부분의 주입전류에 대한 선폭 증가 현상에 대한 좀 더 물리적 고찰이 필요함을 알 수 있다. 따라서 선폭 증가 현상은 비선형 이득 효과에 물리적 원인이 있는 것이 아니며, 또 다른 물리적 원인에 기인하며 이에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있는 상태이다.

#### IV. 결 론

현상론적인 비 선형 이득 포화 효과가 연속 파장 가변시 다전극 DBR 레이저의 잡음 특성에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 증 방향으로의 자발적 방출 분포에 의한 항상 계수 K를 고려한 자발적 방출률과 출력 의존성 및 현상론적인 비 선형 이득 포화효과를 고려하여 상대적 세기 잡음과 주파수 잡음 특성을 조사하였다. 자발적 방출률  $R_s$ 는 수동부분의 주입전류가 증가함에 따라 증가하며, 비 선형 이득 포화 효과는 상대적 세기 잡음 스펙트럼의 공명 주파수  $f_R$  근처에서 커다란 영향을 미친다. 일정한 출력에 대해, 상대적 세기 잡음의 크기는  $f \ll f_R$ 일 때는 상대적으로 매우 낮지만,  $f=f_R$ 부분에서 매우 커짐을 알 수 있었다. 주파수가 일정한 경우, 상대적 세기 잡음은 수동 부분의 주입전류 증가에 의한 출력의 감소에 대해서,  $R_s$  값이 증가함으로 상대적 세기 잡음의 크기가 증가함을 알 수 있다. 항상 계수 K는  $R_s$ 의 크기를 증가시키므로, 이에 따라 상대적 세기 잡음의 크기를 증가시킨다. 비 선형 이득 포화 효과에 의해 공명주파수 부근에서 주파수 잡음 스펙트럼의 크기가 매우 감소하며, 저 주파수 값인 선폭도 조금 감소한다. 전체 주파수 잡음 스펙트럼은 수동부분의 주입전류에 커다란 영향을 받으며, 저 주파수 영역에서의 값 선폭은 수동부분의 전류가 커짐에 따라 증가하지만 실험적 결과에서 보이는 증가 폭의 약 반배 정도로 불충분하다. 항상 계수 K의 고려는 전 주파수 영역에서 주파수 잡음 스펙트럼을 약간 증가시킨다. 수동부분의 주입전류에 대한 선폭 증가 현상에 대한 물리적 고찰이 필요함을 알 수 있다. 특히 선폭 증가 현상은 비 선형 이득 효과에 그 물리적 원인이 있는 것이 아니며, 또 다른 물리적 원인에 기인하며 이에 대한 연구가 매우 필요함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] T. L. Koch and U. Koren, *J. Lightwave Technol.*, **LT-8**, 274(1990).  
 [2] T. P. Lee, *IEEE J. Proc.* **79**, 253(1991).  
 [3] H. Haug, *Phys. Rev.*, **184**, 338(1969).  
 [4] T. L. Paoli, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15**, 807 (1979).  
 [5] J. Shapiro, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**, 237 (1985).  
 [6] V. Chan, T. Yee and G. Abbas, *J. Lightwave Technol.*, **LT-3**, 1110(1985).  
 [7] R. Gross, P. Meissner and E. Patzak, *J. Lightwave Technol.*, **LT-6**, 521(1988).  
 [8] C. H. Henry, *J. Lightwave Technol.*, **LT-4**, 298 (1986).  
 [9] S. L. Woodward, T. L. Koch and U. Koren, *IEEE Photon. Lett.*, **2**, 104(1990).  
 [10] E. Gobar and R. Schatz, *Electron. Lett.*, **27**, 289

(1991).  
 [11] M. Ferreira, J. R. Rocha and J. L. Pinto, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-28**, 833(1992).  
 [12] M. Ferreira, J. R. Rocha and J. L. Pinto, *Opt. Quantum Electron.*, **23**, 1017(1991)  
 [13] B. Tromborg, H. Olesen, X. Pan and S. Saito, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23**, 1875(1987).  
 [14] X. Pan, H. Olesen and B. Tromborg, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24**, 2423(1988).  
 [15] 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).  
 [16] P. Spano, S. Piazzolla and M. Tamburrini, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, 350(1984).  
 [17] 이석, 박노현, 박홍이, 최원준, 한일기, 이정일, 강광남, *한국광학회지*, **4**, 301(1993).  
 [18] Y. Kotaki and H. Ishikawa, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25**, 1340(1989).

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

S. Lee, W. J. Choi, I. K. Han, H. J. Kim, D. Woo, S. H. Kim, J. I. Lee and K. N. Kang  
*Division of Electronics & Information Technology, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea*

H. L. Park  
*Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

(Received: October 24, 1994)

Phenomenological nonlinear gain saturation effect on the noise characteristics of a multi-electrode DBR laser, when the lasing wavelength changes continuously, is presented theoretically. Using the optical transmission line theory, noise characteristics reliant on output power are analyzed by taking into account both the spontaneous enhancement factor K due to the distribution of the spontaneous emission along the active cavity and the nonlinear gain saturation effect. Spontaneous emission rate was increased due to an increase in injected current into the passive section, which in turn lead to increase in relative intensity noise (RIN) and frequency noise. Phenomenological nonlinear gain saturation was found to have significant effect on RIN and frequency noise characteristics. However, linewidth was found to decrease due to a phenomenological nonlinear gain saturation effect.