

論文98-35D-2-12

반도체 레이저의 변조특성에서 비선형 이득에 관한 연구

(Analysis of Nonlinear Gain in Modulation Characteristics of Semiconductor Lasers)

嚴 震 燮 * , 金 昌 俸 **

(Jin-Seob Eom and Chang-Bong Kim)

요 약

본 논문에서는 반도체 레이저의 변조특성에서 비선형 이득이 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하기 위하여 비선형 이득을 포함하는 비율방정식에 소신호 해석을 적용하여 반도체 레이저의 변조특성을 분석 한다. 그리고 반도체 레이저의 변조 특성을 결정하는 공진 주파수 및 감쇄정수에 대한 분석이 이루어지며, 또한 공진주파수와 감쇄정수의 비례상수인 K 인자에 대해서 정의하며, K 인자의 감소는 differential gain의 증가에 기인 하고 비선형 이득과는 아무런 관계가 없음을 보였다.

Abstract

In this paper we analyze the effect of nonlinear gain on laser modulation characteristics applying a small-signal analysis to the rate equation which includes a nonlinear gain term. Also we analyze the resonance frequency and the damping factor which determine laser modulation characteristics, define K factor which is the proportionality factor between resonance frequency and damping factor, and conclude that the decrease in K factor is due to increases in differential gain and no correlation between K factor and nonlinear gain is identified.

I. 서 론

광통신기술의 발전으로 기존의 음성통신에 의존해오던 통신기술이 음성 및 영상등의 다양한 정보를 전달할수 있는 광대역 종합정보통신망(B-ISDN)을 목표로 발전하게 되었다. 따라서 광통신 기술의 핵심이 되는

반도체 레이저의 역할은 대단히 중요하다. 반도체 레이저는 소형이며, 변조가 용이한 직접변조가 가능하고 가격이 저렴하다는 장점을 갖고, 광섬유의 색분산이나 손실이 최소가 되는 파장대에서 사용이 가능하므로 광통신의 광원으로서 널리 사용되고 있다. 특히 초고속 광통신에 있어서 반도체 레이저의 변조특성을 연구하는 것은 초고속 반도체 레이저의 개발에 필요한 과제이다. 광대역 종합정보통신망을 구성하기 위한 초대용량 광전송시스템에 있어서 반도체 레이저의 변조 대역폭을 넓히는 문제는 얼마나 많은 정보를 전달하느냐를 결정하기 때문에 반도체 레이저의 변조특성에 관한 연구는 매우 중요한 과제이다. 반도체 레이저의 변조특성에서 공진주파수와 감쇄정수는 변조 대역폭을 결정하는 중요한 역할을 한다. 이때 변조특성에서 반도체 레이저의 비선형 이득 현상은 대단히 중요한 역할

* 正會員, 江原大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Kangwon National University)

** 平生會員, 公州大學校 電氣電子情報工學部

(Dept. of Electrical, Electronics, and Information & Communication Eng., Kongju National University)

※ 본 연구는 한국 과학재단의 핵심전문연구(951-0916-118-1) 지원에 의한 것임.

接受日字:1997年5月12日, 수정완료일:1998年1月17日

을 하며 그 예로써 그림 1은 비선형 이득을 포함시켰을 경우와 포함시키지 않을 경우의 레이저 주파수 응답곡선을 보여주고 있다. 그림 1의 상단에 있는 그래프에서 비선형 이득을 포함시키지 않은 경우의 계산된 주파수 응답곡선은 점선으로 표시 되었고, 실지로 측정된 주파수 응답곡선은 점들로 표시되었으며, 비선형 이득을 포함시켜서 예상되는 주파수 응답곡선은 실선으로 나타나있다. 실제로 측정된 주파수 응답 곡선은 비선형 이득을 포함시켜 얻은 주파수 응답곡선과 잘 일치하는 반면, 비선형 이득을 포함시키지 않은 경우의 계산된 주파수 응답 곡선과 공진주파수에서 약 20 dB의 크기 차가 남을 알수 있다. 따라서, 비선형 이득을 반도체 레이저의 변조특성에 포함시켜서 분석하는 연구가 필요하다. 이에 관한 여러 연구가 되어왔고, 그 이론을 기초로 Bowers^[1]는 변조 대역폭 26.5 GHz를 갖는 초고속 반도체 레이저를 만들었고, Su^[2]는 변조 대역폭 15 GHz를 갖는 레이저를 제작 발표하였다.

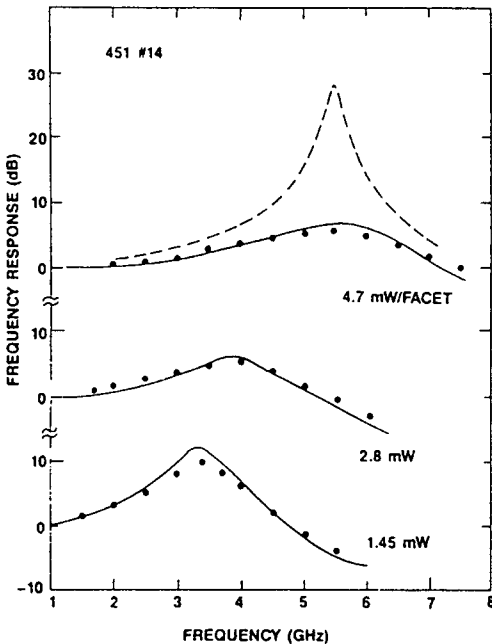


그림 1. 주파수 응답의 예상치와 측정치^[2]
Fig. 1. The predicted and the measured frequency responses^[2].

기존의 음성통신에 의존하던 통신방식은 음성 및 영상등의 다양한 정보전달을 위해서 보다 넓은 주파수 대역폭을 요구하게 되었고 이에따라 광통신 기술의 발

달로 보다 넓은 주파수대역폭을 이용 가능케 하였다. 광통신 시스템에 있어서 주파수대역폭은 반도체 레이저, 광섬유, 광검출기의 각각의 대역폭에 따라서 제한을 받게 되는데, 본 연구에서는 반도체 레이저의 변조특성을 연구하므로써 변조 대역폭을 제한하는 요소들을 검토하고, 그 중에서도 반도체 레이저의 비선형 이득에 의해서 생기는 영향등을 분석하여 궁극적으로는 보다 넓은 변조 대역폭을 갖는 반도체 레이저의 개발에 목적을 두고 있다. 본 논문에서는 반도체 레이저의 변조특성을 고찰하기 위하여 캐리어밀도와 광자밀도의 상호작용을 기술하는 비율방정식으로부터 시작하여 이 두 방정식으로부터 소신호 해석(small-signal analysis)을 적용하여 일반적인 반도체 레이저의 변조특성을 구하고, 가능한 최대 변조대역폭을 얻기 위하여 변조특성을 결정하는 각각의 파라미터에 대해서 분석한다.

본 논문의 구성은 II장에서 반도체 레이저의 소신호 변조특성에 대해서 기술하였으며, 제 III장에서는 최대 변조대역폭을 얻기 위하여 변조대역폭을 결정하는 differential gain, 비선형이득 파라미터, 공진주파수 및 감쇄정수에 대해서 고찰하였으며, 감쇄정수와 (공진주파수)²의 비례관계를 결정하는 K 인자에 대해서 정의하였으며, K 인자와 비선형이득 파라미터, differential gain 및 활성영역에 있어서의 도우핑 레벨과의 관계를 규명하므로써 초고속 반도체 레이저의 제작에 필요한 조건들을 제시하였고, IV장에서는 결론을 맺었다.

II. 소신호 변조특성

반도체 레이저의 변조특성을 연구하기 위하여는 캐리어밀도와 광자밀도를 기술하는 비율방정식(rate equation)이 필요하다. 보통 비율방정식은 오로지 캐리어밀도의 함수인 선형이득(linear gain) $G(N)$ 만을 사용하여 표현되지만, 반도체 레이저의 변조 특성에서 선형 이득만을 사용하여 얻은 이론적인 주파수 응답곡선은 실지로 측정되는 주파수 응답곡선과 커다란 차이를 보이고 있다. 이러한 차이점은 앞의 그림 1에서도 언급이 되었다. 즉 실제의 측정치와 잘 들어 맞는 주파수 응답곡선을 구하기 위해서는 비율방정식에서 오로지 캐리어밀도만의 함수인 선형이득 $G(N)$ 을 사용하는 대신 캐리어밀도만의 함수일 뿐만 아니라 광파워

의 함수인 비선형 이득항을 포함시켜야 한다. 반도체 레이저의 변조특성을 연구하기 위하여 일반화된 다중 모드 비율방정식(multimode rate equation)이 고찰되어야 하며 단일모드인 경우는 일반화된 다중모드 비율방정식으로부터 쉽게 구할수 있다. 일반화된 다중모드 비율방정식은 다음과 같이 주어진다^[3].

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - v_g \Gamma \sum_i g_i S_i \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = v_g (\Gamma g_i - \alpha_T) S_i \quad (2)$$

여기서 N 은 캐리어밀도, I 는 주입전류, e 는 전자의 전하량, V 는 활성영역의 체적, $R(N)$ 은 총재결합률로서 $R(N) = A_m N + B(N)N^2 + CN^3$ 이고^[4], v_g 는 광자의 군속도, Γ 는 광집속계수, S_i 는 모드 i 의 광자밀도, g_i 는 모드 i 의 순이득(net gain)이고, α_T 는 총광손실이다. 위의 식에서 문턱영역을 넘어서 고찰하였기 때문에 자연방출은 무시되었다. 순이득 g_i 는 선형이득 $G(N) = \alpha(N - N_0)$, α 는 이득계수이고, N_0 는 transparency을 위한 캐리어 밀도이고^[4], 포물선 인자 ΔG ^[3] 및 비선형항 $\sum_j \epsilon_{ij} S_j$ 의 함으로 표시되며 다음과 같이 주어진다^[3].

$$g_i = G(N) - \Delta G i^2 - \sum_j \epsilon_{ij} S_j \quad (3)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 비선형이득 파라미터이고, ϵ_{ij} 의 현상학적인 식은^[5]

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_0 \frac{1 + \alpha \tau (\omega_i - \omega_j)}{1 + [(\omega_i - \omega_j) \tau]^2} \quad (4)$$

와 같이 주어지며, α, τ 및 ϵ_0 는 케맞추기 파라미터(fitting parameter)이고, ω_i 및 ω_j 는 i 와 j 모드의 광 주파수이다.

소신호 해석을 비율방정식에 적용하기 위하여

$$\begin{aligned} N(t) &= N_0 + \delta N e^{i\omega t} \\ S_i(t) &= S_{0i} + \delta S_i e^{i\omega t} \\ I(t) &= I_0 + \delta I e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

이고, N_0, S_{0i}, I_0 는 dc 바이어스 조건이며, $\delta N, \delta S_i, \delta I$ 는 소신호 크기이다. 소신호 해석을 캐리어 밀도에 관한 비율방정식 (1)에 적용하면 다음과 같이 주어진다.

$$(i\omega + \gamma_\beta) \delta N + (v_g \alpha_T - \gamma_n) \delta S = \frac{\delta I}{eV} \quad (6)$$

여기서 $\gamma_\beta = \frac{1}{\tau_c} + v_g \Gamma \frac{dG}{dN} S$, $\gamma_n = v_g \Gamma \sum_{i,j} \epsilon_{ij} S_i \frac{dS_j}{dS}$ 이고, $\tau_c = (\frac{\partial R}{\partial N})^{-1}$ 는 differential 캐리어 수명시간이며, 포물선 인자 ΔG 는 [6], [7]에 의해서 생략되었다.

소신호 해석을 광자밀도에 관한 비율방정식 (2)에 적용하면 다음과 같이 주어진다.

$$(i\omega + \gamma_n) \delta S = v_g \Gamma \frac{dG}{dN} S \delta N \quad (7)$$

식 (6)과 (7)로 부터 총광자밀도에 대한 변조응답 $\delta S(\omega)$ 는

$$\delta S(\omega) = \frac{v_g \Gamma \frac{dG}{dN} S \frac{\delta I}{eV}}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma} \quad (8)$$

이고, 주파수가 영일 때의 변조응답 $\delta S(0)$ 에 대하여 정규화된 주파수응답은

$$\left(\frac{\delta S(\omega)}{\delta S(0)} \right)^2 = \frac{\omega_0^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (9)$$

이다. 여기서 공진주파수 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 는

$$\omega_0^2 = v_g^2 \Gamma \alpha_T \frac{dG}{dN} S \quad (10)$$

이며, $\frac{dG}{dN}$ 은 differential gain, $S = \sum_i S_i$ 이다. 감쇄정수 γ 는

$$\gamma = \gamma_\beta + \gamma_n = \frac{1}{\tau_c} + \frac{\omega_0^2}{v_g \alpha_T} + v_g \Gamma \sum_{i,j} \epsilon_{ij} S_i \frac{dS_j}{dS} \quad (11)$$

이며, S 는 총광자밀도이다. 식 (9)로부터 3dB 대역폭을 구하면

$$\omega_{3dB}^2 = \frac{2\omega_0^2 - \gamma^2 + [(2\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\omega_0^4]^{1/2}}{2} \quad (12)$$

이며, 3dB 대역폭은 공진주파수 ω_0 와 감쇄정수 γ 에 의존함을 알수있기 때문에 반도체 레이저의 변조특성에서 공진주파수와 감쇄정수의 역할은 대단히 중요하다. 식 (12)에서 공진주파수 ω_0 를 증가시키면 반도체 레이저의 변조 대역폭은 증가하고, 감쇄정수 γ 를 증가시키면 변조 대역폭은 감소한다. 식 (12)에서 단일모드 레이저인 경우 최대 3dB 대역폭은 $d\omega_{3dB}^2/dS = 0$ 에서 구할수 있으며

$$\omega_{\max}^2 = \frac{2(v_g \alpha_T \frac{dG}{dN})^2}{\epsilon_{00}^2} \quad (13)$$

으로 주어지며, differential gain을 증가시키므로써

최대 3dB 대역폭을 증가시킬수 있고 비선형 이득계수를 감소시키면 3dB 대역폭을 증가시킬수 있다. 위의 식(12)에서 알수 있듯이 반도체 레이저의 변조특성은 공진주파수와 감쇄정수에 의해서 결정되기 때문에 공진주파수와 감쇄정수에 영향을 미치는 파라미터에 관한 연구는 중요하다. 첫째, 공진주파수 ω_0 를 결정하는 요소들을 분석하기 위하여 식(10)에서 광자밀도를 광 파워어의 식으로 변환시키기 위해서 다음의 $P_b = v_g \hbar \nu S d W L a_m$ 를 적용하면 식 (10)은

$$\omega_0^2 = \frac{v_g}{\hbar \nu} \frac{\Gamma}{dW} \frac{1}{L} \frac{a_T}{a_m} \frac{dG}{dN} P_b \quad (14)$$

와 같이 되고, 여기에서 a 는 활성영역층의 두께, L 은 공진기의 길이, $\hbar \nu$ 는 활성영역층의 폭, a_m 은 거울면의 손실이며 P_b 는 바이어스 광 파워어이며, $a_T = \text{총광손실} = a_e (\text{내부손실}) + a_m (\text{거울면손실})$ 이다. 위의 식 (14)에서 알수 있듯이 공진주파수 ω_0 를 증가시키기 위해서는 공진기의 길이 L , 공진기의 폭 $\hbar \nu$, 바이어스 광 파워어들을 조정 파라미터로 사용 할수있다. 공진주파수를 증가시키기 위하여 두가지 방법을 이용한, 즉 i) 공진기의 길이 L 을 짧게 하여 광자 수명시간을 감소시키는 방법^[8] ii) differential gain을 증가시키기 위해서 도우핑 level을 증가시키는 방법^[2] 과 양자우물 구조를 이용한 방법^[9] 에 관한 연구가 발표되었다. 다음으로 감쇄정수 γ 에 대한 영향을 고찰하면, 감쇄정수 γ 를 적게하면 주파수 응답곡선에서 공진주파수에서의 최고치가 증가하게 되고 따라서 주파수 응답곡선이 전체적으로 평평하지 못하여 비탄직하지 못하며, 감쇄정수 γ 를 증가시키면 주파수 응답곡선에서 공진주파수에서의 최고치가 감소하게 되므로써 전체적인 주파수 응답곡선이 평평한 그림을 보이므로써 주파수 대역폭을 감소시킨다. 다중모드 레이저와 단일모드 레이저를 비교하였을때 바이어스 광 파워어를 증가시킬때 단일모드 레이저가 더 쉽게 변조 대역폭이 포화상태에 이루기 때문에 다중모드 레이저가 더 넓은 3dB 대역폭을 얻을수 있다^[3]. 3dB 대역폭을 증가시키기 위해서 양자 우물구조를 사용하여 감쇄정수 γ 를 감소시키는 연구가 수행되었고, 그 결과로써 이론적으로 50 GHz의 주파수 대역폭을 얻을수 있다는 연구가 발표되었다^[10]. 식 (11)에서 감쇄정수 γ 에는 비선형 이득 파라미터를 포함하는 감쇄정수 γ_n 가 있는데, γ 에서 γ_n 과 나머지 항들의 크기를 비교한 측정 데이터^[2] 를 보면,

바이어스 광파워어가 1.45 mW/facet일때 γ_n 은 $6.8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 이고 $1/\tau_c + \omega_0^2/(v_g a_T)$ 의 크기는 약 $1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ (이때 $\tau_c = 0.8 \times 10^{-9} \text{ s}$ [11] 와 $a_T = 200 \text{ cm}^{-1}$ 일때) 으로서 γ_n 이 감쇄정수 γ 에서 큰 부분을 차지하고, 그 실례로서 앞의 I장의 그림 1에서 상단의 점선으로 표시한 주파수 응답곡선은 비선형 이득 파라미터를 포함하는 감쇄정수 γ_n 을 고려하지 않을 경우(즉, $\gamma_n = 0$)의 주파수 응답곡선을 나타낸다. 앞의 I장에서도 언급이 되었지만 그림 1에서 비선형 이득을 고려하지 않은 경우의 주파수 응답곡선은 실제의 측정치와 큰 차이가 남을 알수 있고, 비선형 이득을 고려한 주파수 응답곡선은 실제의 측정치와 잘 일치됨을 알수 있다. 따라서 반도체 레이저의 변조 특성을 고찰하기 위해서는 반도체 레이저의 비선형 이득항이 반드시 포함되어야 하는 것을 알수있다.

III. K 인자와 도우핑 레벨

앞의 II장에서 반도체 레이저의 변조 특성을 분석하기 위해서는 비선형 이득이 포함되어야 하며 비선형 이득이 주파수 응답곡선에서 최대 3dB 대역폭 ω_{max} 와 감쇄정수 γ 에 영향을 미친다는 것을 알수 있었다. II 장의 식(11)에서 공진주파수와 감쇄정수는 비례관계에 있다는 것을 알수 있었는데, 본 장에서는 공진주파수와 감쇄정수의 관계를 고찰하여 최대 3dB 대역폭을 얻을수 있는 방법을 모색하고, 반도체 레이저의 비선형 이득이 변조특성에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하고자 한다. 공진주파수와 감쇄정수는 비례상수 K 인자에 의해서 $\gamma = K f_0^2$ 와 같이 정의되며, 일반적으로 반도체 레이저의 가능한 최대의 3dB 대역폭은 $f_{3dB}^{max} = 8.8/K$ 의 관계^[10]가 있다는 결과가 있었다. 따라서 최대의 3dB 대역폭을 결정하는 K 인자에 대한 분석은 최대 3dB 대역폭을 얻을수 있는 방법을 제시하므로 이에 대한 고찰을 하고자 한다. 식 (10)과 (11)로부터 감쇄정수 γ 에 대한 일반적인 식은

$$\gamma = \left(\frac{-4\pi^2}{v_g a_T} \frac{\partial g / \partial S}{\partial g / \partial N} + \frac{4\pi^2}{v_g a_T} \right) f_0^2 + \frac{1}{\tau_c} \quad (15)$$

와 같이 주어진다. K 인자는 팔호속에 있는 항들이며, 팔호속의 항중에서 첫번째항, 즉 $\frac{\partial g}{\partial S}$ 와 differential gain $\frac{\partial g}{\partial N}$ 을 포함하는 항(K_{NL})과 두번째항(K_L)의 합으로 표시하면

$$K = K_{NL} + K_L \quad (16)$$

와 같이 표시된다.

pump-probe 레이저에 의한 광 변조방법을 사용하여 기존의 전기적인 기생효과(electrical parasitic effect)를 배제하므로써 반도체 레이저의 정확한 주파수 응답곡선을 측정 할수있을 뿐만 아니라, 중요한 동특성 파라미터 값들을 측정할수 있다. 광 변조방법을 사용하여 p 도우핑 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP arrow-head V groove 레이저에서 측정된 데이터값들^[12]을 표 1에 나타내었다. 이때 표 1.에서 나타나 있듯이 K 의 값들은 0.20 ns 에서 0.36 ns 일때 K_{NL} 의 값들은 0.15 ns 에서 0.26 ns 이다. 즉, K 의 값을 결정하는 것은 K_{NL} 의 값이고, K_{NL} 의 값을 결정하는 요소는 differential gain 과 비선형 이득계수이다. 단일모드 레이저의 경우 이득 g 가 문턱영역을 넘어서 광자밀도가 증가하므로써 ϵS 만큼 감소한다고 할때(즉, $g = g_0 - \epsilon_1 S$, g_0 는 선형이득) K_{NL} 은

표 1. 광 변조방법을 이용하여 얻은 데이터
Table 1. Datas from the optical modulation technique.

Diode	P0 10^{18} cm^{-3}	K ns	KNL ns	dg/dN 10^{-16} cm^2	ϵ 10^{-18} cm^3	ϵ/Γ 10^{-18} cm^3
223	undoped	0.36	0.26	2.6	4.7	14
224	undoped	0.35	0.26	2.1	3.6	10.6
293	1	0.31	0.23	3.2	4.6	15.1
284	1	0.3	0.21	2.8	3.9	11.8
245	2	0.24	0.18	3.2	4.5	11.7
244	2	0.20	0.14	3.3	3.2	8.4
412	2.3	0.28	0.18	3.1	3.4	11.3
411	2.3	0.28	0.18	3.2	3.5	11.7
425	2.6	0.28	0.22	3.2	5.8	14
423	2.6	0.22	0.15	3.9	4.9	11.8
295	3	0.2	0.15	4.3	4.0	13.3

$$K_{NL} = \frac{4\pi^2 \epsilon_1}{v_g \alpha_T \partial g / \partial N} \quad (17)$$

으로 주어지며, $g = g_0 / (1 + \epsilon S)$ 의 공식을 적용하면, K_{NL} 은

$$K_{NL} = \frac{4\pi^2 \epsilon}{v_g \Gamma \partial g / \partial N} \quad (18)$$

으로 주어진다.

식 (17)과 식 (18)에서 알수 있듯이 도우핑 레벨에 따른 K_{NL} 의 감소는 비선형 이득계수 또는 differential gain, 혹은 비선형 이득계수와 differential gain 두가지 동시에 관계가 있다는 것을 알수 있다.

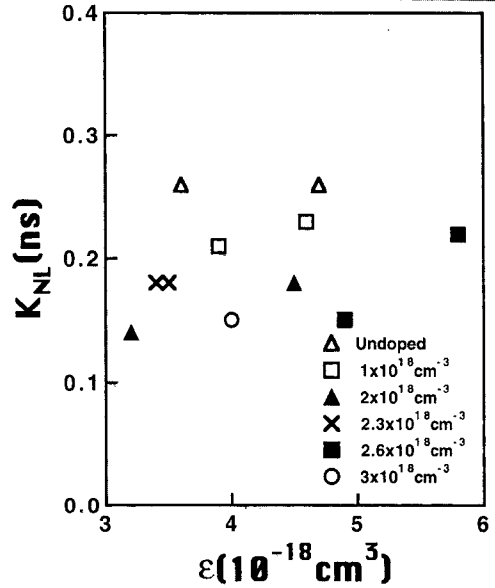


그림 2. K_{NL} 과 ϵ
Fig. 2. K_{NL} versus ϵ .

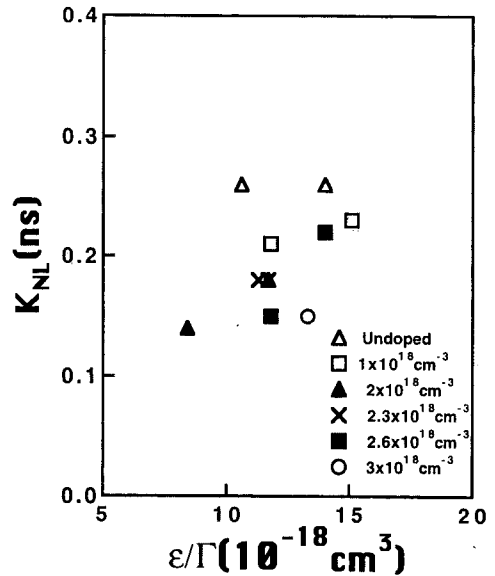


그림 3. K_{NL} 과 ϵ/Γ
Fig. 3. K_{NL} versus ϵ/Γ .

그림 2와 그림 3은 표 1에서 주어진 데이터를 이용

하여 도우핑 레벨에 따른 K_{NL} 을 ϵ 과 ϵ/I 의 함수로써 그래프로 그린 그림이다. 그림 2와 그림 3에서 보듯이 K_{NL} 과 ϵ 또는 ϵ/I 과는 아무런 관계가 없음을 알수있다. 마찬가지로 K_{NL} 은 ϵ_1 또는 ϵ_1/a_T 과는 아무런 관계가 없음을 보여준다. 그러나, 그림 4에서 알 수 있듯이 K_{NL} 을 differential gain, dg/dN 의 함수로써 그래프를 그리면 K_{NL} 은 도우핑 레벨에 따라 선형적으로 감소함을 알수있다. 따라서 본 연구에서는 K_{NL} 의 변화는 differential gain 변화에 기인하며, 이미 수행된 연구결과^{[13]-[15]}에서도 밝혀졌듯이 differential gain 은 도우핑 레벨이 증가함에 따라 증가한다는 사실을 K 인자의 관계를 도입하여 재확인 할수 있었다.

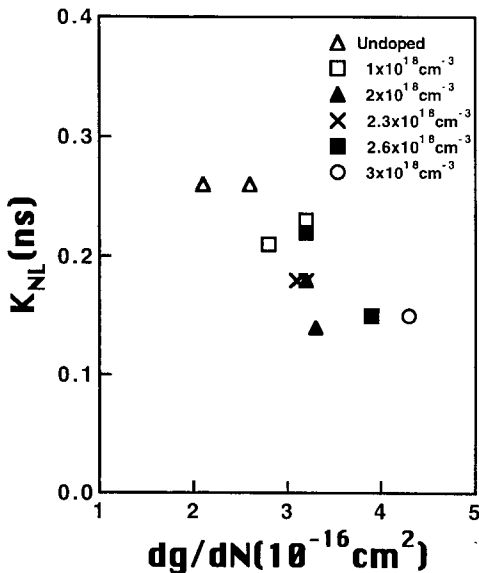


그림 4. K_{NL} 과 differential gain
Fig. 4. K_{NL} versus differential gain.

또한, 본 논문에서는 도우핑 레벨에 따른 K 의 값이 감소하는 것은 반도체 레이저의 비선형 이득계수의 변화에 기인되는 것이 아니고, differential gain의 증가에 기인한다는 것을 알수 있었다. 그러나, 다른 연구^[16]에서는 GaAs-based MQW 레이저의 p 도우핑 증가는 비선형 이득을 감소 시키므로써 K 인자가 감소 하며, 비선형 이득의 감소는 p 도우핑에 따른 intraband relaxation 시간의 감소에 기인한다는 결과가 있었으며, 또 다른 연구^[17]에서는 p 도우핑에 따라 differential gain의 증가와 비선형 이득의 감소

로 인하여 K 인자가 감소 한다는 연구 결과가 있었다. 따라서 본 논문의 결과와 상반되는 연구가 있었으나 앞으로 여러 실험 데이터의 수집 및 이론 정립을 위한 더 많은 연구가 있어야 할것으로 생각된다. 그러나, 위에 언급된 여러 연구 및 본 논문의 공통적인 결과로서는 도우핑 레벨이 증가함에 따라 K 가 감소하므로 도우핑 레벨에 따라서 최대 변조 대역폭을 얻을수 있고, 실례로서 $K=0.20 \text{ ns}$ 일때 얻을수 있는 최대 3dB 대역폭은 44 GHz 이고, $K=0.38 \text{ ns}$ 일때 얻을수 있는 최대 3dB 대역폭은 24 GHz 이다. 따라서 K 인자가 differential gain과 선형관계가 있다는 결과를 이용하여 f_{3dB}^{max} 을 최대로 늘릴수 있는 방법을 제시하며, 초고속 반도체 레이저를 설계할때 유용하게 적용 될수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 반도체 레이저의 변조특성에서 비선형 이득을 포함시킨 비율방정식에 소신호 해석을 적용하여 최대 3dB 대역폭을 얻기 위한 공진주파수 및 감쇄정수의 조건에 대해서 고찰하였으며, 그 결과로서 반도체 레이저의 변조 특성을 분석하기 위해서는 비선형 이득이 포함되어야 하며 비선형 이득이 주파수 응답곡선에서 최대 3dB 대역폭 ω_{max} 와 감쇄정수 γ 에 영향을 미친다는 것을 알수 있었다. 공진 주파수와 감쇄정수의 관계를 고찰하여 최대 3dB 대역폭을 얻을수 있는 방법을 모색하고, 반도체 레이저의 비선형 이득이 변조특성에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하기 위하여 공진주파수와 감쇄정수의 비례상수인 K 인자를 구하였다. K 인자는 $\frac{\partial g}{\partial S}$ 와 differential gain $\frac{\partial g}{\partial N}$ 을 포함하는 항 K_{NL} 과 나머지 항 K_L 의 합으로 구성되고, 반도체 레이저의 가능한 최대의 3dB 대역폭은 $f_{3dB}^{max} = 8.8/K$ 이므로 K 인자의 값은 최대의 3dB 대역폭을 결정하는 중요한 역할을 한다. 따라서 K 인자의 값을 결정하는 K_{NL} 에 대해서 분석한 결과는 비선형 이득과는 아무런 선형관계가 없으며, 반도체 레이저의 활성영역층의 도우핑 레벨에 따른 differential gain과 선형관계가 있으며, K 인자의 감소는 differential gain의 증가에 기인한다는 결과를 얻을수 있으며 이러한 결과는 초고속 반도체 레이저의 제작시 중요한 이론이 된다.

참 고 문 헌

- [1] J.E.Bowers, B.R.Hemenway, A.H.Gnauck, and D.P.Wilt, "High-speed InGaAsP constricted-mesa lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, pp. 833, 1986.
- [2] C.B.Su, and V.A.Lanzisera, "Ultra-high speed modulation of 1.3 μm InGaAsP diode lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, pp. 1568, 1986.
- [3] R.Olshansky, D.M.Fye, J.Manning, C.B. Su, "Effect of nonlinear gain on the bandwidth of semiconductor lasers," Electron. Lett., vol. 21, pp. 721, 1985.
- [4] G.P.Agrawal and N.K.Dutta, "Long-Wavelength Semiconductor Lasers, New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- [5] J.Eom and C.B.Su, "Determination of the gain nonlinearity time constant in 1.3 μm semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 58, no. 3, pp. 234, 1991.
- [6] M.Yamada and Y.Suematsu, "Analysis of gain suppression in undoped injection lasers," J. Apply. phys., vol. 52, pp. 2563, 1981.
- [7] M.Yamada, "Transverse and longitudinal mode control in semiconductor injection lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-19, pp. 1365, 1983.
- [8] K.Y.Lau, N.Bar-Chaim, I.Ury, Ch. Harder and A.Yariv, "Direct amplitude modulation of short-cavity GaAs lasers up to X-band frequencies," Appl. Phys. Lett., vol. 43, pp. 1, 1983.
- [9] K.Uomi, N.Chinone, T.Ohtoshi and T. Kajimura, "High-relaxation oscillation frequency(beyond 10 GHz) of GaAlAs multiquantum well lasers," Jpn.J. Appl. Phys. vol. 24, pp. L539, 1985.
- [10] K.Uomi, N. Chinone, "Proposal on reducing the damping constant in semiconductor lasers by using quantum well structure," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 28, no. 8, pp. L1424, 1989.
- [11] R.Olshansky, C.B.Su, J.Manning, and W.Powazinik, "Measurement of radiative and nonradiative recombination rates of InGaAsP and AlGaAs light sources," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-20, pp. 838, 1984.
- [12] C.B.Su, J.Eom, C.H.Lange, C.B.Kim, Robert B. Lauer, and William C. Rideout, "Characterization of the dynamics of semiconductor lasers using optical modulation," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-28, pp. 118, 1992.
- [13] C.B.Su and V.Lanzisera, "The effect of doping level on the gain constant and modulation bandwidth of InGaAsP semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 45, pp. 1302, 1984.
- [14] M.Sugano, H.Sudo, H.Soda, T.Kusunoki, and H.Ishikawa, "Effects of zinc doping in DFB lasers emitting at 1.3 and 1.55 micron," Electron. Lett., vol. 26, pp. 95, 1990.
- [15] C.E.Zah, R.Bhat, S.G.Menocal, F.Favire, N.C.Andreaddkis, M.Koza, C.Caneau, S. Schwarz, Y.Lo, and T.P.Lee, "Cavity length and doping dependence of 1.5 micron GaInAs/GaInAsP multiple quantum well laser characteristics," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 231, 1990.
- [16] J.D.Ralston, S.Weisser, I.Esquivias, E.C. Larkins, J.Rosenzweig, P.J.Tasker, and J.Fleissner, "Control of differential gain, nonlinear gain, and damping factor for high-speed application of GaAs-based MQW lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, pp. 1648, 1993.
- [17] M.Aoki, K.Uomi, T.Tsuchiya, M.Suzuki, and N.Chinone, "Enhanced relaxation oscillation frequency and reduced nonlinear K-factor in InGaAs/InGaAsP MQW $\lambda/4$ -shifted DFB lasers," Electron. Lett., vol. 26, pp. 1841, 1990.

저 자 소 개

金 昌 俸(平生會員) 第 34卷 D編 第 9號 參照
현재 공주대학교 전기전자정보공학
부 조교수

嚴 震 變(正會員) 第 34卷 D編 第 9號 參照
현재 강원대학교 전자공학과 조교수