

論文2000-37-TE-3-4

SCH 양자우물 레이저 다이오드의 수송기구와 변조응답 특성에 관한 연구

(A Study on the Transport Mechanism of a SCH Quantum-Well Laser Diode and on the Modulation Characteristics)

金 種 基 * , 鄭 載 龍 ** , 徐 征 何 *

(Jong-Gi Kim, Jea-Yong Jeong, and Chung-Ha Suh)

요 약

본 논문에서는 SCH 양자우물 구조를 가진 레이저 다이오드에서의 캐리어 수송기구와 변조응답 특성에 대해 고찰하였다. 캐리어 수송기구 고찰을 위해 캐리어 밀도분포 및 다이오드전류를 계산하였다. 또한 우물 내에서의 캐리어 재결합율을 SCH 길이의 함수로 도출하였다. 변조응답 특성에서는 캐리어와 광자에 대한 3 쌍의 비율 방정식을 도출, 해석하여 SCH 길이에 따른 변조 대역폭과 완화 진동 주파수, 감쇄 비율과 K-factor의 특성에 대하여 고찰하였다.

Abstract

In this paper, carrier transport mechanism and modulation response for SCH(Separate Confinement Heterostructure) SQW(Single Quantum Well) laser diodes were studied. In order to explain carrier transport mechanism, both carrier density and current density were calculated. The recombination current density in the quantum well as a function of the SCH length was also calculated. For the modulation response, linearizing the rate equations, we calculated the bandwidth, relaxation oscillation frequency, damping factor, and the K-factor.

I. 서 론

초기의 동종접합 반도체 레이저인 pn 다이오드 레이저는 문턱전류가 매우 큰 단점을 갖고 있어 실용화에 어려움이 있었다. 이후, 문턱전류의 감소가 가능한 이종구조(DH) 반도체 레이저 다이오드가 개발되어 정밀 계측, 광통신, 광스위치 등 다양한 실용화가 이루어

졌다^[1]. 특히, 광통신 분야에는 고속화가 됨에 따라 변조대역폭이 크게 증가되어 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

반도체 레이저의 특성은 캐리어 밀도에 대한 비율방정식과 cavity 내의 광자밀도에 대한 비율방정식을 이용하여 모델링되었다. 이때, 광이득은 광자밀도에 대해 비선형함수로 표현되는데, 이런 비선형성을 설명하기 위해 이득 억제량 ϵ 의 개념이 도입되었다^[2]. 한편, 감쇄 비율 상수 γ 는 f_r^2 에 비례하고 그 비례상수가 레이저의 특성을 결정하는 또 하나의 중요한 파라미터로 $K = 4\pi^2(\tau_p + \epsilon/v_g g_0)$ 로 표현된다^[3]. K값이 작으면 변조 대역폭은 증가하고, 저주파에서 보다 작은 RIN을 갖는다^[4].

* 正會員, 弘益大學校 電子工學科

(Hongik Univ., Dept. of Electronics Eng.)

** 正會員, 동서울大學 電子科

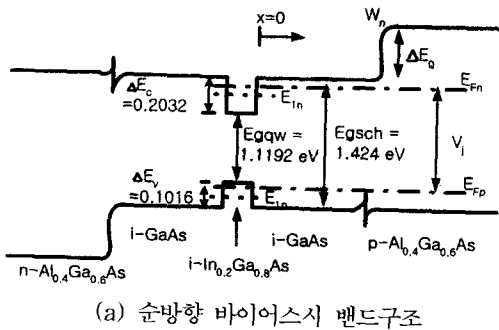
(Dong Seoul College, Dept. of Electronics Eng.)

接受日字: 1999年 12月 17日, 수정완료일: 2000年 3月 17日

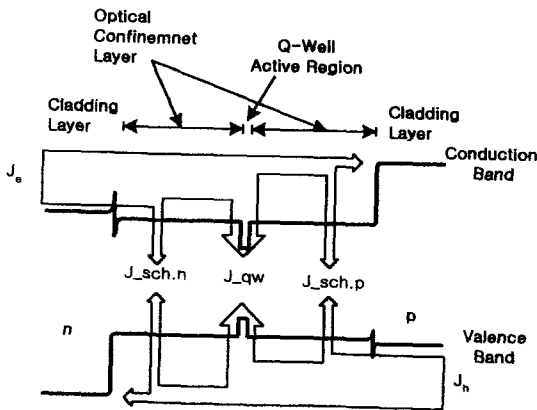
지금까지 SCH 양자우물 LD의 수송기구에 대해 발표된^[7]바 있으나 대부분 계산의 복잡성으로 인하여 표동성분을 무시하여 큰 오차를 가진다. 본 논문에서는 이런 표동성분까지 고려하여 전류성분을 계산하였던 바 표동성분에 의한 전류 성분이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 변조 대역폭을 고찰하기 위해 SCH 영역내의 비울방정식도 포함하였다.

II. SCH 양자우물 LD의 캐리어 수송

본 논문에서 고찰된 레이저 다이오드는 SCH (Sepa-rate Confinement Heterostructure)영역은 GaAs, 양자우물은 In_{0.2}Ga_{0.8}As로 구성된 SCH 양자우물 LD이다. 그림 1(a)는 SCH 레이저 다이오드의 밴드 다이어그램을, 그림 1(b)는 전류의 흐름을 간략하게 표시하고 있다.



(a) 순방향 바이어스시 밴드구조



(b) 주입된 전류 흐름

그림 1. SCH 양자우물 레이저 다이오드에서의 (a) 순방향 바이어스시 밴드구조 (b) 주입된 전류 흐름
Fig. 1. SCH QW LD. (a) Energy band structure. (b) Current injection.

그림의 LD에 순방향 바이어스를 가하면 전자는 오른쪽 덮개층(cladding layer)으로부터 주입되고, 정공은 왼쪽 덮개층으로부터 SCH를 가로질러 주입된다. 이때, p-i-n 다이오드와 달리 주입된 캐리어들이 양쪽 SCH의 중간에 있는 양자우물에서 주로 재결합한다는 것이다. SCH에서의 캐리어 이동은 확산, 표동 및 재결합에 의해 묘사되는 고전적인 전류 연속방정식에 의해 설명될 수 있다. 전자와 정공에 대한 정상상태의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n_p}{\partial x} - U = 0 \tag{1a}$$

$$D_p \frac{\partial^2 p_p}{\partial x^2} + \mu_p p_p \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_p E \frac{\partial p_p}{\partial x} - U = 0 \tag{1b}$$

여기서, U는 알짜 재결합률(net recombination rate)을, E(x)는 위치 x에서의 전계, D_n과 D_p는 각각 전자와 정공의 확산계수를 나타낸다. n_p(x)와 p_p(x)는 과잉 전자와 정공을 나타내며, 첨자 p는 p-덮개층 쪽을 의미한다. n-덮개층 쪽도 위의 두 식과 동일한 형태로 표현되고, 과잉 캐리어의 첨자를 p에서 n으로 바꾸어 줌으로써 얻을 수 있다. 재결합률 U = p_p/τ_p = n_p/τ_n이고, τ_n 과 τ_p는 각각 전자와 정공의 수명(life time)이다. 강한 순방향 바이어스가 가해진 p-i-n 구조에서 i영역(전성영역)은 high level injection 조건하의 일반적인 p-n 접합과 동일하다. 이는 i영역 전체에서 전하 중성조건에 의하여 n ≈ p임을 말해준다. 식 (1a)에 μ_pp_p를 식 (1b)에 μ_nn_p를 곱한 후 다음의 근사식과 D = (kT/q)μ을 이용하여 정리하면

$$p_p \approx n_p, \quad \frac{\partial p_p}{\partial x} = \frac{\partial n_p}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 p_p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{L_a^2} = 0 \tag{3}$$

이다. 식 (3)에서는 표동성분이 사라졌고 여기서 Δn, Δp 는 과잉 캐리어밀도이고 D_a와 L_a는 각각 ambipolar 확산계수와 확산길이로 다음과 같이 주어진다^[5].

$$D_a = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}, \quad L_a = \sqrt{D_a \tau_{aN}} \quad (A)$$

단, τ_{aN} 는 ambipolar 수명이다.

식 (3)의 SCH 영역 ($0 < x < w_n$) 에서의 해는 다음과 같다,

$$n(x) = p(x) = A e^{-x/L_a} + B e^{x/L_a} \quad (5)$$

확산 전류밀도와 표동 전류밀도를 합한 총 전류밀도 J 는 x 에 무관하며 아래와 같이 표현된다.

$$J = q(\mu_p + \mu_n) E_n (A e^{-w_n/L_a} + B e^{w_n/L_a}) + q(D_p - D_n) \frac{1}{L_a} (-A e^{-w_n/L_a} + B e^{w_n/L_a}) \quad (6)$$

한편, 덮개층인 $x > w_n$ 에서의 전자밀도 $n(x)$ 는 다음과 같다.

$$n(x) = C e^{-(x-w_n)/L_a}, \quad p(x) = N_A \quad (7)$$

상수 A, B, C를 계산하기 위해서는 3개의 경계조건이 필요하다. 우물의 끝 부분에서의 전자와 정공의 밀도는 각각 다음과 같다.

$$n(0) = N_c e^{-(\Delta E_c - E_{1n} - E_{1p})/kT} \quad (8a)$$

$$p(0) = N_v e^{-(\Delta E_v - E_{1n} - E_{1p})/kT} \quad (8b)$$

여기서, N_c, N_v 는 각각 SCH에서 전도대와 가전 도대에서의 상태밀도이고, ΔE_c 와 ΔE_v 는 각각 SCH와 양자우물 경계면의 에너지 불연속 크기를 나타내며, E_{1n}, E_{1p} 는 우물 내에서의 전자와 정공의 first sub-band level이고, E_{Fn}, E_{Fp} 는 sub-band level로부터 측정된 전자와 정공의 페르미 레벨이다. 실제 에너지 밴드에서는 우물 근처에 x_0 의 넓이로 δ 크기만큼 밴드가 휘어져 있고 이는 $p \neq n$ 을 나타내고, 일반적으로 $p \gg n$ 의 값을 가진다^[7]. 식 (8a)와 (8b)에 δ 값을 첨가하므로써 p는 감소하고 n은 증가하여 동일한 전자밀도와 정공밀도를 가진다.

$$N_c e^{-(\Delta E_c - E_{1n} - E_{Fn} - \delta)/kT} = N_v e^{-(\Delta E_v - E_{1p} - E_{Fp} + \delta)/kT} \quad (9)$$

식 (8)를 풀면 δ 값을 얻을 수 있다.

$$\delta = kT \ln \left[\frac{N_c}{N_v} \right]^{1/2} + \frac{1}{2} [\Delta E_c - \Delta E_v + E_{Fn} - E_{Fp} + E_{1p} - E_{1n}] \quad (10)$$

식 (8a)나 (8b)에 이 값을 대입하면

$$n(x_0) = p(x_0) = \sqrt{N_c N_v} e^{(qV - E_{\text{scat}})/2kT} \quad (11)$$

이고, $V_j = (E_{gn} + E_{1n} + E_{1p} + E_{FT})/q$, $E_{FT} = E_{Fn} + E_{Fp}$ 이다. x_0 를 계산하면 $x_0 \approx 0$ 이므로 식 (11)을 우물 양쪽에서의 경계조건으로 이용할 수 있다.

$$n_0 = A + B \quad (12)$$

덮개층과 SCH영역 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$(A e^{-w_n/L_a} + B e^{w_n/L_a})^2 = C N_A e^{\Delta E_v/kT} \quad (13)$$

여기서, N_A 는 p-덮개층(cladding)의 어셉터 도핑농도이다. $x = w_n$ 면에서의 조건은 전자전류의 연속성 $J_n|_{x=w_n} = J_n|_{x=w_n}$ 을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$q \frac{D_n}{L_a} (-A e^{-w_n/L_a} + B e^{w_n/L_a}) - q \mu_n E_n (A e^{-w_n/L_a} + B e^{w_n/L_a}) = -q \frac{D_n C L}{L_n C L} C \quad (14)$$

한편, 전계가 E_0 인 $x = 0$ 에서의 총 전류는 식 (6)에서

$$J = q(\mu_n + \mu_p)(A + B)E_0 + q(D_p - D_n) \frac{1}{L_a} (B - A) \quad (15)$$

이고, 우물을 지난 전자 전류밀도는

$$J_{TRn} = -q D_n \frac{dn}{dx} \Big|_{x=0} + q \mu_n n_0 E_0 \quad (16)$$

이다. 식 (15)과 (16)를 이용하면

$$J_{TRn} = \frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} J - q \frac{D_n}{L_a} (B - A) \quad (17a)$$

이 된다. 마찬가지로 방법으로 반대편(N-덮개층)의 우물을 통과한 정공전류는

$$J_{TRb} = \frac{\mu_p}{\mu_n + \mu_p} J - q \frac{D_a}{L_a} (B' - A') \quad (17b)$$

이 되고 여기서 A' 와 B' 은 SCH층 왼쪽(N-덮개층)의 캐리어 밀도를 결정하는 계수이다.

식 (17a)와 (17b)를 이용하여 QW에서의 재결합을 표현할 수 있다.

$$J_{qw} = J - J_{TRn} - J_{TRb} \quad (18a)$$

$w_n = w_p = w$ 이라고 가정하고, 식 (3.2.17), (3.2.18), (3.2.20)-(3.2.22)을 정리하면,

$$J_{qw} = \frac{1}{1 + \frac{w^2}{2L_a^2}} \left(J - \frac{2qwD_a n_0}{L_a^2} \right) \quad (18b)$$

이다. 전체 수송전류를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$J_{TR} = J_{TRn} + J_{TRb} = q \frac{D_a}{L_a^2} (w_n + w_p) n_0 \quad (19)$$

Electrical confinement factor η_e 를 $J_{qw} = \eta_e J$ 로 정의하면^[7] 식 (19)는 다음과 같다.

$$J_{TR} = (1 - \eta_e) J \quad (20)$$

η_e 는 우물에서의 재결합을 결정하는 중요한 요소이다. 식 (19)과 (20)로부터

$$\frac{J}{n_0 q} = \frac{\frac{D_a}{L_a^2} (w_n + w_p)}{1 - \eta_e} \quad (21)$$

을 얻을 수 있고, 식 (6), (12)-(14), (21)를 이용하면 P-덮개층 영역에서의 계수인 A와 B를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A = \frac{n_0}{2} \left(1 - \frac{\frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} \cdot \frac{w_n + w_p}{1 - \eta_e} - w_n}{L_a \left(1 + \frac{w_n^2}{2L_a^2} \right)} \right) \quad (22a)$$

$$B = \frac{n_0}{2} \left(1 + \frac{\frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} \cdot \frac{w_n + w_p}{1 - \eta_e} - w_n}{L_a \left(1 + \frac{w_n^2}{2L_a^2} \right)} \right) \quad (22b)$$

마찬가지의 방법으로 우물의 왼쪽 SCH 영역의 캐리어 밀도에 대한 계수를 얻을 수 있다.

III. 변조응답 특성

비율 방정식은 양자우물과 SCH 영역에서의 캐리어 밀도와 cavity내의 광자밀도를 해석하는데 유용하다. 이 비율 방정식의 소신호 해석을 통하여 변조응답과 변조 대역폭, damping rate, 공진 주파수와 Relative Intensity Noise(RIN)의 특성을 얻을 수 있다.

SCH 구조에서의 비율 방정식은 다음과 같이 세 쌍의 미분 방정식으로 구성되어 있다^[6].

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{qV_{SCH}} - \frac{N_s}{\tau_s} + \frac{\Gamma_q N}{\tau_e} \quad (23a)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_s}{\Gamma_q \tau_s} - N \left[\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_e} \right] - v_g g(N, S) N_p \quad (23b)$$

$$\frac{dS}{dt} = \left[\Gamma v_g g(N, S) - \frac{1}{\tau_p} \right] S + \Gamma R_{sp} \quad (23c)$$

여기서, N_s , N , S 는 각각 SCH에서의 전자밀도, cavity내에서의 전자밀도, 그리고 광자밀도이다. τ_n 은 bimolecular 재결합 수명이고, τ_p 는 광자 수명이고, $\frac{1}{\tau_p}$ 는 전체 손실로써, $\frac{1}{\tau_p} = v_g(\alpha_m + \alpha_i)$ 로 정의된다. 즉 전체 손실은 외부손실 α_m 와 내부손실 α_i 의 합으로 표현된다. Γ 는 optical confinement factor로써 V/V_p , Γ_q 는 V/V_{SCH} 이다. v_g 는 그룹속도, V 는 양자우물의 부피, V_{SCH} 는 SCH 층의 부피이고, V_p 는 photon reservoir의 체적이다. 열전자 방출 수명 $\tau_e = \left(\frac{2\pi m^* d^2}{k_B T} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{E_B}{k_B T}\right)$ 이고, 캐리어 수송시간 $\tau_s = \frac{L_s^2}{2D_a}$ 이다. 이때, 이득 $g(N, S)$ 는 비선형 근사 이득 모델을 이용하였다^{[2],[7]}.

$$g(N, S) = \frac{G_0 + g_0(N - N_0)}{1 + \epsilon S} \quad (24)$$

여기서 ϵ 은 gain suppression factor이고, g_0 는 차동 이득항이다.

유도방출이 시작되면 ΓR_{sp} 값은 정상상태의 값보다 훨씬 작으므로 무시할 수 있고, 여기서 레이저 cavity내의 이득과 손실의 관계를 알 수 있다.

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{\Gamma v_g G_0}{1 + \epsilon S_0} \quad (25)$$

한편, 변조 응답특성은 입력신호 대 출력신호인

$H(\omega) = \frac{s(\omega)}{i(\omega)}$ 이다.

$$H(\omega) = \frac{A_0}{(\gamma_s + j\omega) \left[\left(A_1 + A_2 \frac{A_3 + \omega^2}{\gamma_{SS}^2 + \omega^2} - \omega^2 \right) + j\omega \left(A_4 + \frac{A_5}{\gamma_{SS}^2 + \omega^2} \right) \right]} \quad (26)$$

각각의 계수는 다음과 같다.

$$A_0 = \gamma_{WB}\gamma_{sw}/(qV_{SCH}), \quad A_1 = \gamma_{BB}\gamma_{ww} - \gamma_{BW}\gamma_{WB}, \quad (27)$$

$$A_2 = \gamma_{sw}\gamma_{ws}, \quad A_3 = \gamma_{BB}\gamma_{SS},$$

$$A_4 = \gamma_{BB} + \gamma_{ww}, \quad A_5 = \gamma_{sw}\gamma_{ws}(\gamma_{SS} - \gamma_{BB})$$

$$\gamma_{BB} = \frac{1}{\tau_s}, \quad \gamma_{BW} = \frac{\Gamma_g}{\tau_e} \quad (28a)$$

$$\gamma_{ww} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_e} + v_g \frac{g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0}, \quad (28b)$$

$$\gamma_{WB} = \frac{1}{\Gamma_g \tau_s}, \quad \gamma_{ws} = \frac{v_g G_0}{(1 + \epsilon S_0)^2}$$

$$\gamma_{sw} = \frac{\Gamma_g v_g g_0 S_0}{1 + \epsilon S_0}, \quad (28c)$$

$$\gamma_{SS} = \frac{1}{\tau_p} - \frac{1}{\tau_p(1 + \epsilon S_0)}$$

식 (26)에서 분모의 대괄호 속의 τ_s 와 주파수의 곱항을 무시한다면, 위 식은 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$H(\omega) = \left(\frac{1}{1 + j\omega\tau_s} \right) \frac{A}{\omega_r^2 - \omega^2 + j\omega\gamma} \quad (29)$$

이때 각 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \frac{\Gamma(v_g g_0 / \chi) S_0}{qV(1 + \epsilon S_0)}$$

$$\omega_r^2 = \frac{(v_g g_0 / \chi) S_0}{\tau_p(1 + \epsilon S_0)} \left(1 + \frac{\epsilon}{v_g g_0 \tau_n} \right) \quad (30)$$

$$\gamma = \frac{(v_g g_0 / \chi) S_0}{(1 + \epsilon S_0)} + \frac{\epsilon S_0 / \tau_p}{(1 + \epsilon S_0)} + \frac{1}{\chi \tau_n}$$

식 (30)에서 K-factor를 유도할 수 있다. 원래 K는 $\gamma = Kf_r^2$ 으로 정의되지만, 실제 실험적으로 관찰된 값을 토대로 $\gamma = Kf_r^2 + \gamma_0$ 로 다시 정의할 수 있고 실제로 이 식이 훨씬 더 정확한 값을 가진다.

$$K = 4\pi^2 \left(\tau_p + \frac{\epsilon}{(v_g g_0 / \chi)} \right) \quad (31)$$

이때, $\gamma_0 = 1/\chi\tau_n$ 이다.

IV. 모의실험 결과 및 검토

1. 수송특성

식 (6)과 (14)를 이용하여 η_e 값을 구할 수 있고 그 값을 이용하여 A, B를 구함으로써 캐리어밀도를 구할 수 있다. 캐리어밀도를 이용하여 확산 전류성분과 표동 전류성분을 구하고 마지막으로 이 두 성분을 합친 전체 전류를 구하였다. 본 논문에서는 전자밀도와 전자에 의한 전류성분만 계산하였다. 전자에 의한 값을 구하면 정공에 대한 값은 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 계산에 사용된 값은, 주입된 전류밀도는 $0.5[\text{kA}/\text{cm}^2]$ 이고 ambipolar 확산 계수는 $19.86[\text{cm}^2/\text{s}]$ 이다. 덮개층은 P와 N 모두 $1 \times 10^{10}[\text{cm}^{-3}]$ 으로 도핑되었다.

그림 2는 SCH 길이가 $0.76 \mu\text{m}$ 에서 $0.3 \mu\text{m}$ 까지 변할때의 η_e 의 변화를 나타낸 것이다. SCH길이 짧을수록 η_e 가 증가함을 알 수 있고, 이는 양자우물내의 재결합이 증가함을 의미한다.

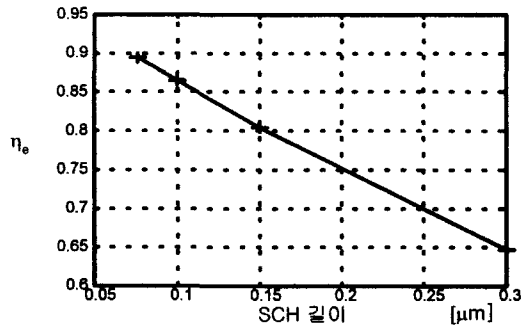


그림 2. SCH 길이에 따른 η_e 값의 변화

Fig. 2. Electrical confinement factor versus SCH length.

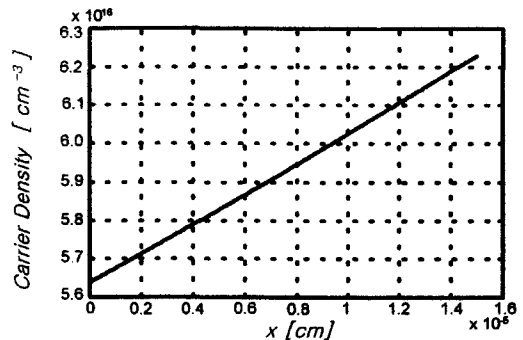


그림 3. $w = 0.15 \mu\text{m}$ 일때의 캐리어 밀도

Fig. 3. Carrier density at $w = 0.15 \mu\text{m}$.

그림 4는 P-뒤틀개층 쪽의 SCH영역에서의 확산에 의한 전류와 표동에 의한 전류를 나타낸 것인데, 표동에 의한 전류값이 더 크음을 알 수 있다.

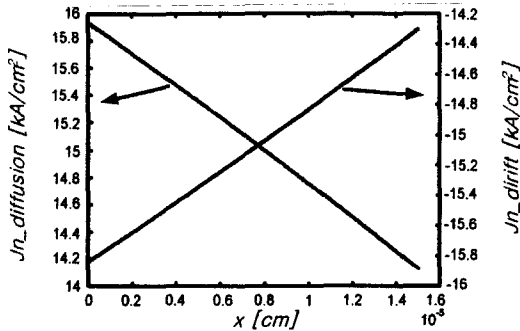


그림 4. $w=0.15\mu\text{m}$ 일 때 표동전류와 확산전류
Fig. 4. Electron diffusion current density and drift current density at $w=0.15\mu\text{m}$.

그림 5는 본 모의실험에서 계산된 전자에 의한 전류와 SimWindows ver.1.5의 결과를 비교한 것이다. SimWindows의 경우 AlGaAs-GaAs 구조를 가진 QW 레이저 다이오드를 모의실험한 것이어서 정확한 비교는 되지 않지만 경향은 동일함을 알 수 있다. 비슷한 방법으로 정공에 의한 전류도 구할 수 있다.

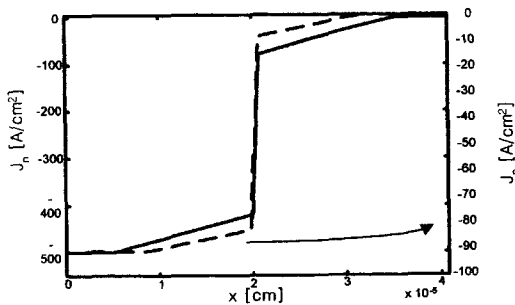


그림 5. $w=0.15\mu\text{m}$ 일때 전자에 의한 전류
Fig. 5. Electron current density at $w=0.15\mu\text{m}$.

2. 변조 응답 특성

표 1은 SCH 길이에 따른 파라미터 값들이다. 이때 동공의 길이(L)는 $300\mu\text{m}$, 폭(Lw)는 $2.5\mu\text{m}$ 이고, 우물의 길이(d)는 80Å 이다.

그림 6과 7은 각각 SCH 길이가 760Å , 3000Å 일 때, 몇몇 출력에 따른 변조응답이다.

표 1. SCH 길이에 따른 소자 파라미터 값
Table 1. Device parameters for various SCH lengths.

Parameter	Value			Dimension
w	0.076	0.15	0.3	$[\mu\text{m}]$
Γ	0.029	0.027	0.019	
τ_s	1.45	5.67	22.66	$[\text{ps}]$
τ_e		0.1967		$[\text{ns}]$
α_i	21.8	11.8	4.3	$[\text{cm}^{-1}]$
G_0	1600	1440	1010	$[\text{cm}^{-1}]$
g_0	6.8×10^{-10}	7.6×10^{-10}	4.9×10^{-10}	$[\text{cm}^2]$

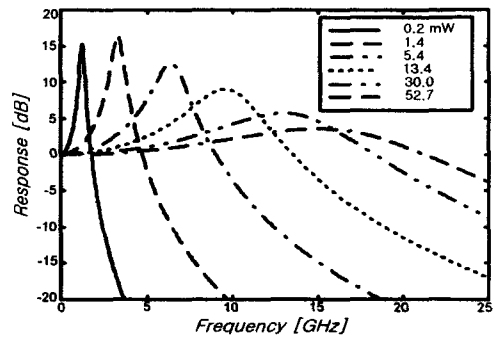


그림 6. $w=0.076\mu\text{m}$ 일 때 변조응답
Fig. 6. Frequency versus modulation responses for various output powers at $w=0.076\mu\text{m}$.

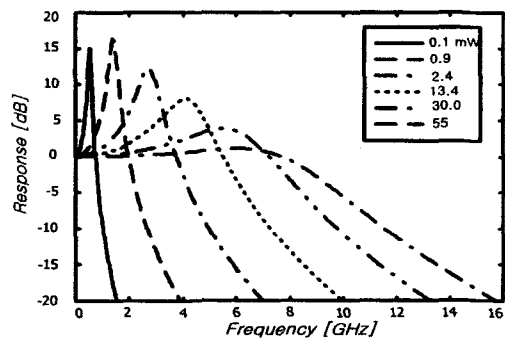


그림 7. $w=0.3\mu\text{m}$ 일 때 변조응답
Fig. 7. Frequency versus modulation responses for various output powers at $w=0.3\mu\text{m}$.

그림 8은 출력에 따른 변조 대역폭을 나타낸 것이고, 그림에서 점으로 표시된 것은 ref^[6]에서 얻은 데이터 값들이다. 그림을 참조하면 실제 데이터와 본 논문의 모의 실험 결과값과 유사함을 알 수 있다.

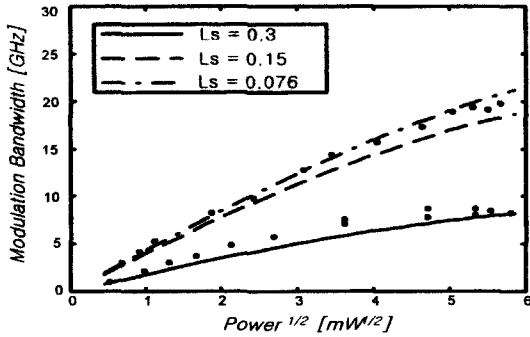


그림 8. P_{out} 에 따른 변조 대역폭
Fig. 8. Output power versus modulation response for various SCH lengths.

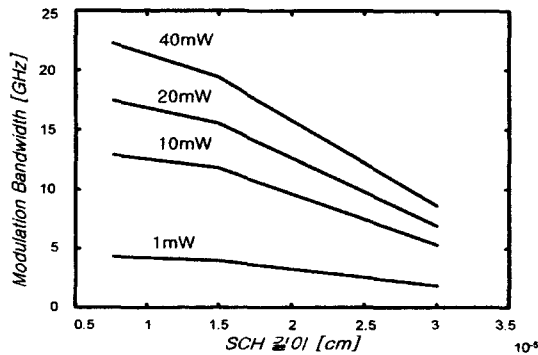


그림 9. SCH 길이에 따른 변조 대역폭
Fig. 9. SCH length versus modulation response for various output powers.

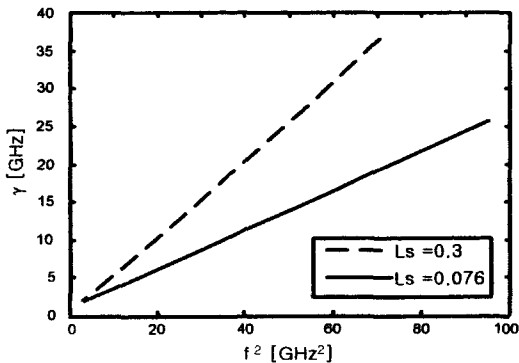


그림 10. f_r 변화에 따른 γ 의 변화
Fig. 10. damping factor for various SCH lengths.

마지막으로 SCH길이에 따른 변조 대역폭과 damping factor와 완화 진동 주파수간의 관계를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 기울기가 K-factor 이다. SCH길이가 짧을수록 변조 대역폭을 나타이 증가함을 알 수 있고, K 값 역시 개선됨을 알

수 있다.

V. 결론

캐리어 수송기구를 고찰하기 위해 확산과 표동성분을 모두 고려하였고, 그 결과 확산에 의한 전류밀도보다 표동에 의한 전류밀도가 더 크음을 알 수 있었다.

SCH길이와 변조 대역폭을 보면 마찬가지로 SCH 길이 w 가 짧을 때 K값이 감소하고 변조 대역폭이 증가하였다. 계산 결과 K값은 SCH길이가 $0.3 \mu\text{m}$ 일 때 $0.38\text{-}0.4[\text{ns}]$ 인 반면에 $0.076 \mu\text{m}$ 일때는 $0.20\text{-}0.21[\text{ns}]$ 로 감소하였다. 그러나 SCH길이 w 가 어느 길이 이하가 되면 차동이득의 감소로 인하여 변조대역폭은 오히려 감소된다.

추가적으로 변조 대역폭을 제한하는 요인은 양자우물에서의 캐리어 포획 시간과 탈출시간, 그리고 캐리어 수송효과가 있다. 비울 방정식에서 이것들을 설명하는 시상수는 실질적인 레이저 구조에서는 잘 알려져 있지 않다. 또한, 변조응답 특성으로부터 측정된 시상수들의 모호한 결정을 일반적으로 사용하기 어렵다. 양자우물에서의 실효 캐리어 탈출시간과 캐리어 수명에 대한 연구가 진행중이다.

참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal, and N. K. Dutta, "Semiconductor Lasers", 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [2] Shun Lien Chuang, "Physic of Optoelectronic Devices", John wiley & Sons, Inc. 1995.
- [3] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera, and W. Powazinik, "Frequency response of $1.3\mu\text{m}$ InGaAs high speed semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, pp. 1410-1418, 1987.
- [4] T. Fukushima, R. Nagarajan, and T. Tanbun-Ek, "Relative intensity noise reduction in InGaAs/Inp multiple quantum well lasers with low nonlinear damping", *IEEE Photon. Technol.*, vol. 3 pp. 691-693, 1991.
- [5] N.R. Howard, and G. W. Johnson, "P+IN+ silicon diodes at high forward current

- densities" *Solid State Electron*, vol. 8, pp. 275-284, 1965
- [6] R. Nagarajan, T. Fukushima, M. Ishikawa, and L. A. Coldren, "Transport limits in high speed quantum well lasers: Experiment and theory", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 121-123, 1992.
- [7] R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima, and R. S. Geels, "High speed quantum-well lasers and carrier transport effects", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, pp. 1990-2007, 1995.

 저 자 소 개

金 種 基(正會員)

弘益大學校 電子工學科

鄭 載 龍(正會員)

동서울대학 電子科

徐 征 何(正會員)

弘益大學校 電子工學科