

반도체 레이저의 주파수변조 특성에 대한 등가회로 모델 (Circuit Model for Frequency Modulation Characteristics for Semiconductor Lasers)

蘇俊鎬,***宋宇永,**金成煥,*洪玩憲*

(Joon Ho So, Woo Young Song, Sung Hwan Kim and Woan Hue Hong)

要 約

본 논문은 반도체 레이저의 주파수변조 응답특성에 대한 새로운 회로모델링 방법을 제시하였다. 특히 본 등가회로 모델은 캐리어농도의 변조효과 뿐만 아니라 온도효과에 따른 변조특성을 고려하였다. 본 모델에서 예상된 이론치는 기존에 발표된 CSP형 레이저의 정현파변조 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Abstract

This paper describes a new circuit modeling technique for the directly frequency modulated semiconductor laser. Especially this model accounts for not only the carrier density effect but also the temperature effect.

The simulation results with this model are compared with published experimental results of sinusoidal frequency modulation in the range from DC to 3 GHz, and show good agreements.

I. 서 론

오늘날 반도체 레이저(semiconductor laser diode: LD)는 광섬유 시스템과 집적 광학시스템의 발광원

으로써 중요한 위치를 차지하게 되었다. 특히 LD의 주입전류를 직접 변조시켜 직접 주파수변조가 가능하게 됨에 따라서, 이것을 코히어런트 광전송시스템에 사용하고자 하는 연구가 수차례 발표되었으며, 중계기의 전송거리와 전송용량의 증가가 기대되고 있다.⁽¹⁻³⁾

LD를 직접 주파수변조시 유기되는 주파수편이와 칩(chirp) 등의 효과는 광섬유 통신에서 중계기 거리와 전송용량등에 상당한 제약을 준다. 이러한 특성의 개선을 위한 일환으로, LD의 변조전류에 대한 주파수편이를 예견하고자 하는 연구가 활발히 연구되고 있다.^(4,5) 근간 LD의 직접변조응답에 대한 모델링

*正會員, ***準會員 서울市立大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)

**正會員, 淸州大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chongju Univ.)

接受日字: 1989年 2月 15日

(※본 연구는 한국과학재단의 연구비로 수행되었음.)

이 수치해석적 방법뿐만 아니라 전기회로적 방법으로도 연구되어져 왔다.^{6,7)} LD의 변조특성은 강도변조(intensity modulation : IM)와 주파수변조(frequency modulation : FM) 특성으로 구분되며, 그중 주파수변조 특성은 다음의 두가지 효과에 의해 결정된다. 10MHz 이하의 변조주파수 대역에서 온도변조효과가 지배적이며, 그 이상의 변조주파수 영역에서는 캐리어농도 변조효과에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

그러나 지금까지 발표된 주파수변조응답에 대한 회로모델은 단지 비율방정식(rate equation)을 선형화하여 모델링하였기 때문에 100MHz 이상의 주파수대역에서는 실험치와 그 특성이 잘 일치하지만, 온도특성이 지배적인 구간인 저주파대역에서는 심각한 제약을 받고 있다.⁶⁾ LD의 직접변조시 일어나는 주파수변조응답에 대한 등가회로 모델을 구현함에 있어 이제까지 해결하지 못하였던 온도변조효과를 고려하여 전변조주파수 대역에 걸친 주파수 응답의 새로운 전기회로 모델을 제시하였다.

II. 반도체 레이저의 주파수변조 특성과 시스템 모델링

LD를 직접변조시키면, 변조응답 특성은 변조전류에 대하여 주파수편이가 나타나고, 특히 FM변조시 이것은 심각한 문제를 야기시킨다. CSP 레이저의 전형적인 FM 응답특성을 보면,⁷⁾ 10MHz 이하의 변조주파수 대역에서는 저역필터특성을 가지며, 그 이상의 중간대역에서는 평탄한 특성을 갖는다. 그리고 2GHz에서 3GHz 사이에서는 LD의 변조특성에서 나타나는 공진피크를 볼 수 있다.^{8,9)}

이러한 FM응답은 크게 두가지 효과에 의해 결정된다. 먼저 LD의 열적반응이다. LD의 바이어스전류에 변조신호가 중첩되면 LD의 저항열이 변화한다. 전류가 증가함에 따라 온도가 올라가며 이러한 온도 증가에 따른 에너지갭의 축소, 공진기 크기의 증가 및 굴절지수등의 변화로 인하여 공진기의 공진파장이 증가한다.^{7,9,10)}

온도변조응답과 더불어 변조특성을 결정하는 또 다른 하나의 특성은 캐리어농도 변조응답이다. 바이어스전류가 증가되면 능동층의 평형캐리어농도가 증가한다. 이 캐리어농도 변화에 의해 공진기의 굴절율이 감소되며, 공진파장이 감소하게 된다.⁷⁾

이러한 두가지 변조효과가 전체 변조응답시스템을 결정한다고 가정할 수 있다. 즉 전체 응답시스템은 온도응답시스템과 캐리어농도 응답시스템으로 이루어졌다고 볼 수 있다. 이 두가지 응답시스템을 블럭도로 나타내면 그림 1 및 식(1)과 같다. 여기서

$R(w)$ 는 입력, $C(w)$ 는 출력, $H_t(w)$ 는 온도응답시스템, $H_c(w)$ 는 캐리어농도 응답시스템이다.

$$C(w) = R(w) (H_t(w) + H_c(w)) \quad (1)$$

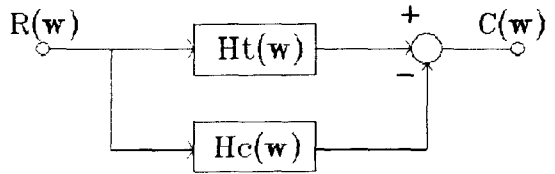


그림 1. LD의 FM 응답에 대한 시스템모델
Fig. 1. The system model for the FM response of LD.

III. 온도변조 응답시스템의 회로모델

10MHz 이하의 주파수대역에서 주파수응답은 주로 온도효과에 의해 결정된다. 온도가 LD의 변조특성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 가장 기본적인 CSP 레이저(channeled substrated planner)의 구조모델을 그림 2에 보였다.^{5,7,9)}

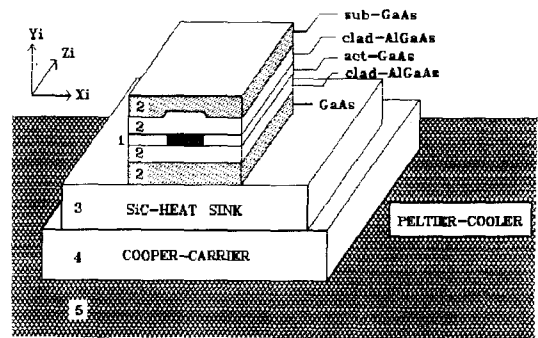


그림 2. 온도변조특성을 위한 CSP레이저의 구조모델
Fig. 2. The structural model of a CSP laser for the temperature modulated response.

능동영역, 칩의 나머지영역, SiC방열판(heat sink), 동판캐리어, 펄티에냉각소자 등 5개의 층으로 CSP-LD를 근사화하여 각층을 번호로 구분하였다. 잘 식

계된 LD라고 한다면 바이어스전류가 균일하게 능동 영역을 통해 흐르며, 좁은 능동영역으로 밀집되게 된다. 따라서 밀집된 전류에 의하여 저항열이 발생되므로 능동층을 열원(heat source)으로 볼 수 있다. 능동층의 부피가 작고 균일하므로 능동층에서 발생하는 열도 균일하다고 가정할 수 있으므로 회로모델링할 때 능동층의 열저항은 생략하였다. 능동층을 제외한 층들은 능동층의 열을 흡수전달하는 방열판으로 생각하였다. 따라서 열의 흐름은 주로 능동층에서 방열판으로 열전달된다고 가정할 수 있다.

그림 2에서 능동층으로 부터 펠티에냉각소자에 이르기까지 각각의 영역에 해당되는 열저항(thermal resistor)과 열용량(heat capacity)을 구하여, 이 두개의 값의 곱으로서 열시정수를 얻을 수 있다. 각 층에서 구한 열저항과 열용량은 등가전기저항과 전기캐패시턴스로 대치된 직병렬등가회로를 구성한다.

열저항은 각 층의 폭(Xi), 두께(Yi), 길이(Zi), 열전도도(thermal conductivity) 등의 함수이다. 열용량은 각 층의 부피, 밀도, 비열(specific heat capacity) 등의 함수로써 다음과 같이 계산된다.

$$R_i = Y_i / (A_i * K_{ci}) \quad (2)$$

$$C_i = K_{hi} * Y_i * A_i * D_i / M_i \quad (3)$$

$$T_i = R_i * C_i \quad (4)$$

여기서 Ri, Ci, Ti는 각 층의 열저항, 열용량과 열시정수, Ai와 Yi는 각 층의 단면적과 두께, Kci와 Khi는 각 층의 열전도도와 비열, Di와 Mi는 각 층의 밀도와 원자량이다. 여기서 각 층의 단면적 Ai는 각 층의 폭(Xi)과 길이(Zi)의 곱이다. 그림 3의 블록(A)에 저주파 영역에서 LD의 주파수변조 특성을 결정하는 온도변조 효과에 대한 등가전기회로 모델을 제시하였다.

IV. 농도변조응답 시스템의 회로모델

LD의 바이어스전류가 변조될 때 능동영역의 캐리어농도가 변하며, 이러한 변화가 굴절율을 변화시키고, 공진기모드(mode)의 스펙트럼의 위치를 변조시킨다. 따라서 비율방정식(rate equation)을 이용하면 LD의 소신호전기회로 모델링이 가능하고, 이 회로모델에 의해 레이저의 주파수변조 특성을 구할 수 있다.^[6,11-13]

R.S.Tucker는 다음과 같은 광전계에 의존하는 이득포화항을 포함하는^[11] 한쌍의 단일모드비율방정식을 선형화하여 캐리어농도변조 효과에 대한 등가회로 모델을 구하였다.^[11,12]

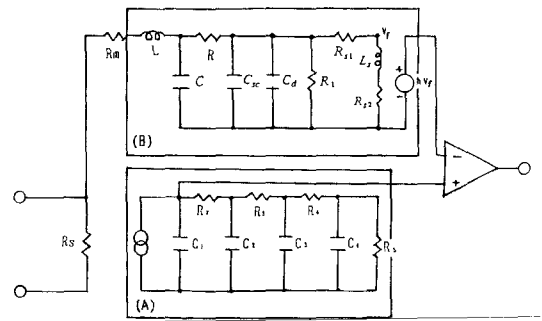


그림 3. LD의 주파수변조 응답시스템의 등가회로 모델

- (a) 온도변조효과의 회로모델
- (b) 캐리어농도효과와의 회로모델

Fig. 3. The equivalent circuit model for the FM response of LD.

- (a) The circuit model of the temperature effect.
- (b) The circuit model of the carrier density effect.

$$\frac{dS}{dt} = \{G(N)[1 - \epsilon S] - I / \tau_p\} S + \beta \frac{N}{\tau_n} \quad (5)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{\alpha} - \frac{N}{\tau_n} - G(N)[1 - \epsilon S] S \quad (6)$$

여기서 S와 N는 광자와 전자의 농도, τ_p 와 τ_n 은 광자와 전자의 수명시간, α 는 전자전하량과 능동층부피의 곱, β 는 자연방출계수, $(1 - \epsilon S)$ 는 이득포화를 나타내주는 요소, G(N)은 광이득으로서 $G(N) = \gamma(N - N_g)$, γ 는 이득상수, I는 구동전류이다.

능동층의 가로방향접합전압의 소신호에 대한 최대변이는 매우 작기 때문에 평균접합전압은 다음과 같다.^[11]

$$V = 2kT \ln(N/N_e) / q \quad (7)$$

여기서 V는 평균접합전압, k와 T는 볼츠만상수와 절대온도, N_e 는 평형상태의 전자농도밀도, q는 전자의 전하량이다.

고주파 변조주파수에 대한 소신호 전기회로모델은 시변변수들을 AC, DC성분으로 다음과 같이 나누어서 식(5), (6)을 선형화시키면 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= I_0 + i e^{j\omega t} \\ N &= N_0 + n e^{j\omega t} \\ V &= V_0 + v e^{j\omega t} \\ G &= G_0 + g e^{j\omega t} \\ S &= S_0 + s e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식을 (5), (6), (7)식에 대입하고 소신호성분들간의 곱을 무시한다면, 식(9), (10)과 같은 소신호회로모델을 얻을 수 있는 회로방정식이 얻어진다.

$$v_j = i_s (R_{s1} + R_{s2} + j\omega L_s) \quad (9)$$

$$i = v_j (1/R_1 + j\omega C_1) + i_s \quad (10)$$

여기서 $R_1 = R_d(1 + \gamma \tau_n S_0)^{-1}$, $R_d = 2\tau_n kT/q\alpha N_0$, $C_1 = C_d + C_{sc}$, $C_d = \tau_n/R_d$, $L_s = R_d/G_0(\beta + \gamma \tau_n S_0)$, $R_{s1} = \epsilon G_0 S_0 L_s$, $R_{s2} = \beta N_0 L_s / \tau_n S_0$, $i_s = \alpha G_0 s$ 이다. 이것을 전기회로로 모델링한 것을 그림 3의 블록(B)에 보였으며, 여기서 주파수변조 응답은 L_s 와 R_{s2} 의 전압강하 v_f 이다.^[11]

V. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서 구현하고자 하는 회로모델의 대상은 CSP레이저(Hitachi사 HLP 1400)이다. HLP 1400레이저에 대한 제원과 매개변수는 각각 표 1, 표 2와 같다. 그림 1과 같이 LD의 주파수변조 응답은 온도변조 시스템과 캐리어농도변조 시스템으로 구성되었다고 가정할 수 있으므로 LD의 주파수변조 응답에 대한 온도등가회로와 캐리어등가회로 응답의 합으로 그림 3과 같이 모델링할 수 있다. 그림 3의 블록(A)의 온도등가회로는 식(2), (3)과 표 1의 제원을 이용하여 LD의 5개층에 대한 각각의 열저항과 열용량인 소자값 R_i , C_i 를 구할 수 있다.

산출한 각 영역의 열저항(R_i)과 열용량(C_i)을 살펴보면 능동영역의 열저항(R_1)은 45[K/W], 열용량(C_1)은 1.0E-9[J/K], 열시정수(T_1)는 45[nsec]이다. LD칩의 나머지층에 대한 R_2 , C_2 는 각각 3.8[K/W], 100E-9[J/K], T_2 는 0.38[m sec]이다. SiC방열판은 LD칩의 열을 동판캐리어로 전달시켜 준다. R_3 , C_3 는 각각 3.3[K/W], 1.02E-3[J/K], T_3 는 3.388

표 1. 온도변조효과의 소자값 결정을 위한 제반상수들^[16]

Table 1. The parameter values to determine the element of temperature modulation effect.

Layers	Kci W/m K	Khi J/K-mol	Di g/cm ³	Mi g	Xi μm	Yi μm	Zi μm
1st	45	46.4	5.32	144.6	10	0.2	300
2nd	45	46.4	5.32	144.6	250	110	300
3rd	90.2	26.9	5.1	40.1	1.E3	300	1.E3
4th	398	24.5	8.94	63.5	2.E4	2.E4	2.E4

표 2. CSP형 LD의 매개변수 값

Table 2. Parameter values for lasers HLT 1400.

Parameter	Unit	Ith = 57mA	Ith = 69mA
α	Am ³ s	5.2E-35	6.23E-35
β	----	1.0E-3	1.0E-3 ^[15]
ϵ	m ³	4.5E-23	4.5E-23
γ	m ³ /s	2.07E-12	2.07E-12
N_s	m ⁻³	9.0E+23	9.2E+23
τ_n	ns	1.2	1.2
τ_p	ps	1.5	1.5

[m sec]이다. 동판캐리어의 R_4 , C_4 는 각각 1.25[K/W], 2.77[J/K], T_4 는 3.469[sec]이다. 제일 아래층의 펠티에 열전소자는 전체 LD의 온도안정을 시키기 위한 수냉식 냉각기로서 등가적으로 단순한 열저항(R_5)으로 볼 수 있으며, 0.005[J/W]의 열저항 값을 갖는다. 그림 3의 등가회로에서 R_s 는 직접변조 인가전원의 내부저항으로 50Ω이다.

캐리어농도변조 효과에 대한 회로모델인 그림 3의 블록(B)의 능동층은 식(9), (10)과 표 2의 매개변수에 의해 구할 수 있으며, 문턱전류와 바이어스전류에 따른 각각의 소자값은 표 3과 같다.^[15, 6, 15]

표 3. 능동층의 회로소자값

Table 3. The element values of the active layer.

Ith mA	I/Ith	Csc nF	Cd nF	R1 Ω	Rs1 mΩ	Rs2 mΩ	Ls pF
57	1.30	1.0	1.23	0.7	17.0	4.5	4.9
69	1.11	1.0	1.77	0.44	10.4	9.6	1.67
69	1.16	1.0	1.77	0.38	10.5	4.6	1.20
69	1.25	1.0	1.78	0.31	10.7	2.25	0.83

LD의 내부정합소자와 기생소자는 기존 발표된 논문으로부터 구하였으며^[6], LD와 직렬정합저항은 47Ω, 배선인덕턴스 L은 1nH, 접촉용량 C는 10pF, 접합과 능동층사이의 저항 R은 8Ω이다.

그림 3과 같이 구성된 LD의 주파수변조 응답에 대한 소신호등가회로 모델에서 OPAMP의 출력이 전체 변조응답이며, 표 3과 같이 문턱전류와 바이어스전류에 따른 소자값에 대하여 각기 SPICE-II 프로그램

램으로 시뮬레이션하면 그림 4와 같은 주파수변조 응답을 얻는다. 이 때 입력전압은 $V_m \sin(w_m t)$ 로 인가하고 w_m 에 대한 주파수편이 값이 출력전압으로 얻어지게 된다.¹¹⁾

그림 4의 (a)는 Ith가 57mA인 CSP 레이저(HLP 1400)의 바이어스전류를 1.3Ith로 하였을 경우의 시뮬레이션결과이다. 실험치와 비교고찰하기 위하여 변조전류의 진폭 1mA인 정현파에 대하여 200MHz에서 2.5GHz까지 주파수를 가변시켜 실험하였으며, 출력주파수 특성은 Fabry-Perot 간섭계(burleigh RC-110)를 사용하여 측정하였다. 변조주파수에 의한 사이드피크를 관측하기 위해 간섭계의 자유스펙트럼 영역을 1.5GHz에서 10GHz로 변화시키면서 관측하였다. 얻어진 실험치와 시뮬레이션값을 비교하여 보면 공진피크를 중심으로 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

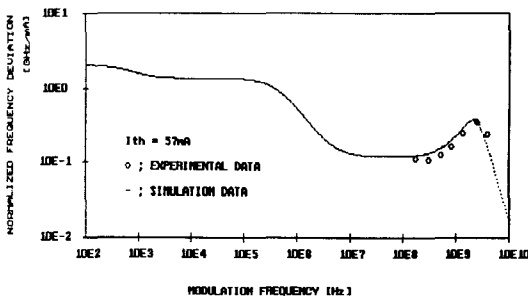
또한 본 모델의 온도특성을 평가해 보기 위하여 기존의 발표된 실험데이터를 이용하였으며,¹⁶⁾ 이 경우 Ith가 69mA인 CSP 레이저를 사용하였으므로 소자값을 표 3과 같이 다시 산출한 후 1.1Ith, 1.16Ith, 1.25Ith에 대하여 시뮬레이션한 바 그림 5의 (b)와 같이 얻어졌다. 그림 4의 (b)에서 볼 수 있듯이 10MHz 이하의 저주파대역에서 보여주는 온도변조 특성에서 시뮬레이션결과와 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 그러나 참고문헌¹⁶⁾에 발표된 실험데이터는 1GHz까지만 발표되어 있으므로 공진피크에 대해서는 실험치와 비교할 수 없었으나, 바이어스전류의 증가에 따른 공진피크의 감소 및 공진피크주파수가 고주파쪽으로 이동하고 있음을 기존발표¹⁷⁾에서와 같이 볼 수 있었다.

VI. 결 론

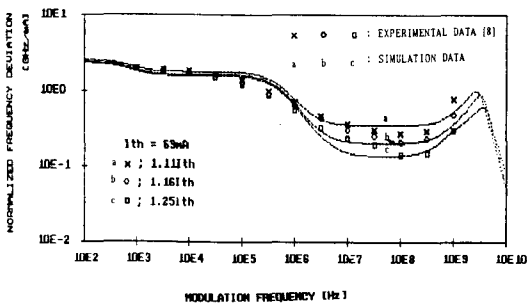
LD의 구동전류에 신호를 중첩시키는 직접변조방식은 그 변조방법이 간단해서 널리 연구되어 왔다. 이 때 얻어지는 저주파대역에서의 주파수변조 응답은 온도특성이 지배적이다. 캐리어농도변조 특성이 지배적인 고주파대역에 대해서는 비율방정식을 선형화하여 회로모델링한 연구결과들이 발표되었으며, 대체적으로 실험치와 잘 일치하는 것으로 알려졌다. 그러나 온도변조 효과가 지배적인 저주파변조 영역에 대해서는 아직 회로모델링하고자 하는 시도가 없었으며, 더우기 전 변조주파수 대역에 걸친 회로모델은 아직 제시된바 없다. 본 논문에서는 LD의 주파수변조에 기여하는 메커니즘을 온도변조 응답시스템과 캐리어농도변조 응답시스템의 병렬응답으로 이루어 졌다고 가정하였다.

온도변조 응답시스템은 능동영역에서 발생하는 열원이 칩의 나머지영역, SiC방열판, 동판캐리어, 펠티에 냉각소자 등을 통하여 전달된다고 생각하여 각각의 열용량과 열저항을 구하여 등가적인 R-C적병렬회로로 등가회로를 구성하였다. 캐리어농도변조 응답시스템은 기존발표된 연구결과를 인용하여 등가회로를 얻었으며, 전 변조주파수 대역에 걸친 등가회로는 얻어진 두 등가회로의 변조응답을 중첩하여 구하였다.

특히 본 연구에서는 CSP 레이저(HLP 1400)를 대상으로 회로모델링을 시도하였고 전 주파수대역에 걸쳐 얻어진 CSP 레이저의 주파수변조응답 등가회로 모델은 SPICE-II에 의하여 시뮬레이션한 결과와 실험치 및 기존발표된 실험데이터와 비교한 바 잘 일치하였다.



(a)



(b)

그림 4. CSP-LD의 FM응답의 시뮬레이션 결과
(a) Ith가 57mA일 경우
(b) Ith가 69mA일 경우

Fig. 4. The simulation results of a CSP-LD for the FM response systems.
(a) for Ith=57mA.
(b) for Ith=69mA.

参 考 文 献

[1] J. Salz, "Coherent lightwave communications," *AT&T Technical Journal*, vol. 64, no. 10, pp. 2153-2209, Dec. 1985.

[2] T. Okoshi, "Recent advances in coherent optical fiber communication systems," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. 5, no. 1, pp. 44-52, 1987.

[3] R. Noe et al, "New FSK phase-diversity receiver in a 150 Mbit/s coherent optical transmission system," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 567-568 April 1988.

[4] A.J. Lowery, "New dynamic semiconductor laser model based on the transmission-line modeling method," *IEE Proceedings J.*, vol. 134, no. 5, pp. 281-289, Oct. 1987.

[5] L. Hafskiaer and A.S. Sudbo, "Modeling of the frequency modulation response of semiconductor diode lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 4, pp. 625-634, April 1988.

[6] M.C. Carvalho and A.J. Seeds, "Simple model for frequency modulation characteristics of semiconductor laser," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 24, pp. 428-429, March 1988.

[7] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, and T. Kimura, "Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 4, pp. 582-595, April 1982.

[8] H. Olesen and G. Jacobsen, "A theoretical and experimental analysis of modulated laser fields and power spectra," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 12, pp. 2069-2080, Dec. 1982.

[9] Minoru Ito and Tatsuya Kimura, "Stationary and transient thermal properties of semiconductor laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 5, pp. 787-795, May 1981.

[10] L. Goldberg, H.F. Taylor, and J F. Weller, "Time-dependent thermal effects in current-modulated semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, vol. 17, pp. 497-499, June 1981.

[11] R.S. Tucker and D.J. Pope, "Circuit modeling of the effect of diffusion on damping in a narrow-strip semiconductor laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 7, pp. 1179-1183, July 1983.

[12] R.S. Tucker and I. Kaminow, "High-frequency characteristics of directly modulated InGaAsP ridge waveguide and buried heterostructure lasers," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-2, no. 4, pp. 385-393, Aug. 1984.

[13] R.S. Tucker, "High speed modulation of semiconductor lasers," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-3, no. 6, pp. 1180-1192, Dec. 1985.

[14] Kazuhito Furuya, Yasuhara Suematsu, and Tchanghee Hong, "Reduction of resonance-like peak in direct modulation due to carrier diffusion in injection laser," *Appl. Optics*, vol. 17, no. 12, pp. 1949-1952 June 1978.

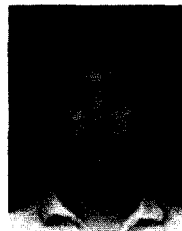
[15] 이창희, 윤태훈, 신상영, "다이오드 레이저의 대신평변조특성," *대한전자 공학회 논문집*, vol. 23, no. 1, pp. 91-100, 1984년 1월.

[16] "Handbook of chemistry and physics," CRC PRESS, 68th Edition, 1987-1988. *

著 者 紹 介



蘇 俊 鎬(准會員)
 1965年 2月 21日生. 1988年 2月
 서울시립대학교 전자공학과 졸업.
 1988年 3月~현재 서울시립대학
 교 석사과정. 주관심분야는 광통
 신 등임.



宋 宇 永(正會員)
 1954年 6月 3日生. 1977年 2月
 연세대학교 전자공학과 졸업. 1988
 年 2月 연세대학교 대학원 전자
 공학 박사학위 취득. 1982年~현재
 청주대학교 이공대학 전자공학과
 조교수. 주관심분야는 광파전자 및
 초고주파 배열 안테나 등임.

洪 玩 憲 (正會員) 第25卷 第2號 参照
 현재 서울시립대학교 전자공
 학과 부교수

金 成 煥 (正會員) 第25卷 第2號 参照
 현재 서울시립대학교 전자공
 학과 부교수