

논문 2006-43SD-10-2

대신호 등가회로 모델을 이용한 850nm Oxide VCSEL의 저전류 동작 특성 연구

(A Study on Low-Current-Operation of 850nm Oxide VCSELs Using a Large-Signal Circuit Model)

장민우*, 김상배**

(Min-Woo Jang and Sang-Bae Kim)

요약

850nm oxide VCSEL의 저전류 동작 가능성을 확인하기 위하여 off 전류와 on 전류를 최대한 낮은 상태에서 VCSEL의 특성을 살펴보았다. Oxide VCSEL의 모델링을 위해 비율 방정식을 이용하여 대신호 등가회로를 만들었고, 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 각각의 계수와 특성변수를 추출하였다. 동특성에 큰 영향을 주는 커패시턴스 성분은 C-V 미터로 측정, 분석하였다. 완성된 대신호 등가회로 모델을 이용하여 커패시턴스 성분, 그리고 on 전류와 off 전류가 turn-on 특성과 turn-off 특성, eye-diagram에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 지금까지는 무시해왔던 요소인 depletion 커패시턴스가 turn-on 특성에 큰 영향을 미치고, eye-diagram에도 큰 영향을 준다는 사실을 확인하였다. 그러므로 VCSEL의 고속 동작과 저전류 동작을 동시에 구현하기 위해서는 depletion 커패시턴스를 감소시키는 공정이 필요하다.

Abstract

We have studied the characteristics of oxide VCSELs when their off-current and on-current are kept small in order to find out the possibility of low current operation. A large signal equivalent circuit model has been used. By comparing measured data and simulation results, the parameters of the large signal models are obtained including the capacitances. Using the large signal model, we have investigated the effects of capacitance and on/off currents upon the turn-on/turn-off characteristics and eye diagram. According to the experiment and simulation, the depletion capacitance, which has been neglected, is found to have significant influence on the turn-on delay and eye-diagram. Therefore, for high speed and low current operation, the reduction of the depletion capacitance is essential.

Keywords : 반도체 레이저, 수직 공진기 레이저, 등가회로, turn-on delay, eye-diagram

I. 서론

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)은 축방향으로는 단일 모드 동작을 하고, 문턱전류가 낮으며, 방사각이 작은 레이저 빔이 기판 표면에 수직 방향으로 방출되기 때문에 별도의 광 유도장치 없이도 다른 소자나 광섬유 등과의 커플링을 쉽게 할 수 있다는

장점이 있다. 또, 웨이퍼 상태에서 테스트가 가능하여 대량 생산할 때 비용절감 효과도 크다. 850nm 파장의 VCSEL은 장거리 통신을 담당하는 1550nm, 중거리 통신을 담당하는 1310nm의 소자와는 달리 광섬유에서의 손실과 분산의 영향으로 단거리 데이터 전송으로 그 용도가 제한되지만 저렴한 가격과 낮은 동작 전류 등의 장점 때문에 여러 분야에서 응용되고 있다.^[1]

최근 들어, mobile 시장이 크게 발전하면서 기존의 여러 기술들이 mobile 기기에 적용되고 있다. Mobile 기기에 적용하기 위해 선결되어야 할 과제는 전력 소모를 줄이는 일이다. on 전류와 off 전류를 낮춤으로써 VCSEL의 저전류 동작을 가능하게 할 수는 있지만, 결

* 학생회원, 삼성전자 메모리 사업부
(Memory Division, Samsung Electronics)

** 정회원, 아주대학교 전자공학부
(School of Electrical and Computer Engineering,
Ajou University)

접수일자: 2006년1월13일, 수정완료일: 2006년9월13일

과적으로는 turn-on 지연이 크게 증가하는 문제점이 나타난다.

레이저 다이오드를 비롯한 모든 소자에서 turn-on 지연에 영향을 미치는 요소는 커패시턴스 성분이다. oxide VCSEL의 커패시턴스는 크게 diffusion 커패시턴스, pad 커패시턴스, package 커패시턴스, 그리고 depletion 커패시턴스로 구성된다. 이 4가지 커패시턴스 중 지금까지는 depletion 커패시턴스의 영향은 거의 무시되어 왔다. 그렇지만, 연구 결과, off 전류가 문턱전류 이하로 인가될 때 나타나는 turn-on 지연에 depletion 커패시턴스가 상당한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다.

이 연구에서는 비율 방정식을 이용하여 VCSEL의 등가회로 모델을 보이고, 이를 이용하여 저전류 동작에 영향을 미치는 요소들을 살펴보았다. 특히 depletion 커패시턴스의 영향에 주목하였다. 이를 위해 C-V 측정기를 사용하여 소자의 실제 커패시턴스 값을 측정 한 후, 간단한 모델링을 통해 인가전압에 따라 변화하는 depletion 커패시턴스 값을 구하였다. 이렇게 완성된 등가회로를 바탕으로, turn-on, turn-off 특성을 살펴보고, eye-diagram을 시뮬레이션하여, 낮은 동작 전류가 인가될 때의 depletion 커패시턴스의 영향을 알아보았다.

II. 비율 방정식과 대신호 등가회로

그림 1은 SCH (Separate Confinement Heterojunction) 구조 양자 우물 활성 영역의 에너지 밴드 그림을 나타낸 것이다. 이 구조에서 각각 비발광성 재결합, 발광성 bi-molecular 재결합, Auger 재결합을 나타내는

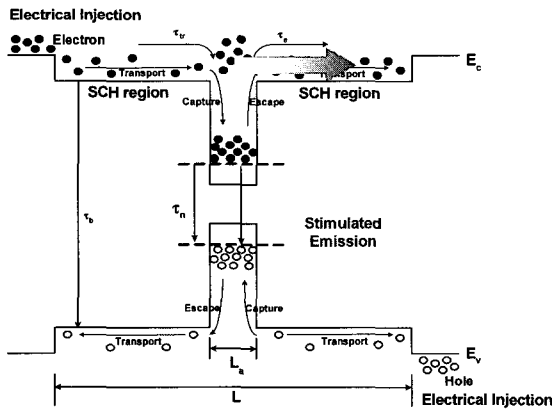


그림 1. 양자우물 구조의 활성영역 에너지 밴드 그림
Fig. 1. Energy-band diagram for a quantum well structure.

A, B, C 계수를 사용한 비율 방정식은 아래처럼 3개의 식으로 나타낼 수 있다.^[2,3]

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma L_a}{L} \left(\frac{v_g g(N_w) S}{1 + \epsilon S} \right) - \frac{S}{\tau_p} + B\beta \frac{L_a}{L} N_w^2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = \frac{I}{q V_{SCH}} - \frac{N_b}{\tau_{tr}} - \frac{N_b}{\tau_b} + \frac{N_w}{\tau_{es}} \frac{V_w}{V_{SCH}} \quad (2)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_b}{\tau_{tr}} \frac{V_{SCH}}{V_w} - \frac{\Gamma v_g g(N_w) S}{1 + \epsilon S} - \frac{N_w}{\tau_{es}} - AN_w - BN_w^2 - CN_w^3 \quad (3)$$

위 식에서 S는 1-λ cavity 내의 평균 광자밀도, N_b는 SCH 영역의 평균 전자밀도, N_w는 양자우물 영역의 평균 전자밀도, V_{SCH}는 SCH 영역의 부피, V_w는 양자우물 영역의 부피, v_g는 활성층에서의 그룹속도, g(N_w)는 이득을 나타내는 함수, 그리고 I는 주입 전류를 나타낸다. 나머지 특성 변수는 표 2와 3에 나타내었다.

이 비율 방정식을 등가회로로 구현하기 위해서는 전자밀도와 광자밀도 모두 전류로 변환시켜야 하는데 그 관계식은 다음과 같다.

$$I_b = q V_{SCH} \frac{N_b}{\tau_{tr}} \quad (4)$$

$$I_w = q V_w A N_w \quad (5)$$

$$I_{st} = q V_w \frac{\Gamma v_g g(N_w) S}{1 + \epsilon S} \quad (6)$$

위의 식은 전자밀도와 광자밀도를 SCH 영역의 전류 성분, active 영역의 전류 성분, 그리고 유도 방출 전류 성분으로 표현한 것이다. 이 식을 이용하여 식 (1)~(3)을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$I = I_b + \frac{\tau_{tr}}{\tau_b} I_b - \frac{\tau_n}{\tau_{es}} I_w + \tau_{tr} \frac{dI_b}{dt} \quad (7)$$

$$I_b = \tau_n \frac{dI_b}{dt} + I_w + \frac{\tau_n}{\tau_{es}} I_w + I_{st} + bI_w^2 + cI_w^3 \quad (8)$$

$$I_{st} = C_{ph} \frac{dS_n}{dt} + \frac{S_n}{R_{ph}} - \beta B I_w^2 \quad (9)$$

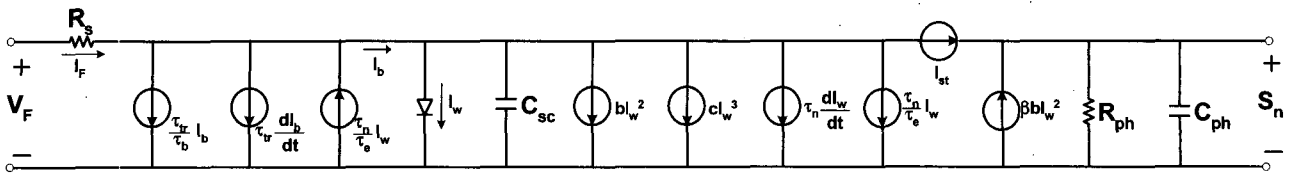


그림 2. 비율 방정식을 이용하여 구성한 Oxide VCSEL의 대신호 등가회로
Fig. 2. The large signal equivalent circuit of oxide VCSELs using rate equations.

이 식들을 등가회로로 나타내면 그림 2와 같으며,

$$b = B/(A^2 q V_w), c = C/(A^3 q^2 V_w^2), R_{ph} = \frac{L_a \tau_p}{q V_w L S_c}$$

그리고 $C_{ph} = S_c \frac{L}{L_a} q V_w$ 로 정의된다. 한편 광자밀도를 정규화시키는 광자밀도 S_c 는 출력전압 S_n 이 1 V일 때 평균 광출력이 1mW로 조정하기 위해 $S = S_c \times S_n$

$$\text{으로 정의하였으며, } S_c \equiv \frac{10^{-3} \lambda}{h c v_g \alpha_m V_{SCH}} \text{ 이다.}$$

III. 비율 방정식의 특성변수 추출

그림 2의 대신호 등가회로는 정특성과 동특성을 동시에 해석할 수 있는 장점이 있다. 저전류 동작 특성을 정확히 시뮬레이션하기 위하여 실제 VCSEL의 정특성과 동특성을 측정 후, simulation 결과와 비교하여 특성변수를 추출하는 방법을 사용하였다. 그림 3에 특성변수 추출 과정을 순서도로 나타내었다.

1. 정특성 비교

그림 2의 대신호 등가회로는 활성 영역에서의 전자와 광자의 거동을 나타낸 회로이다. 그러나 실제의 레이저 다이오드는 활성 영역이 아닌 곳에서도 전자와 광자의 상호작용이 존재한다. 실험에 사용된 oxide VCSEL에서는 oxide 층 밑으로 흐르는 누설 전류 성분이 존재한다.

그림 4에 활성 영역과 oxide 아래 영역을 모두 포함한 VCSEL의 등가회로를 나타내었다. I_{oxr} 과 I_{oxnr} 은 각각 레이저의 발진에 직접 관계하지 않고 oxide 층의 밑으로 흐르는 발광성 전류 성분과 비발광성 전류 성분을 나타내고, R_L 은 수평방향 전류가 흐르는 oxide 아래 층의 등가 수평저항을 나타낸다. 그림 4에 보인 등가회로의 전류 성분들은 다음과 같이 다이오드 기본식으로 나타낼 수 있다.

$$I_D = I_s \left(\exp \frac{V_j}{n V_T} - 1 \right) \tag{10}$$

한편, 그림 2에 보인 다이오드의 직렬저항 R_s 는 전류-전압 특성이 비선형적이어서 전류와 전압의 크기에 따라 변화하게 된다. 이에 따라 선형 저항과 비선형 저항의 합으로 주어지는 것으로 가정하였다.

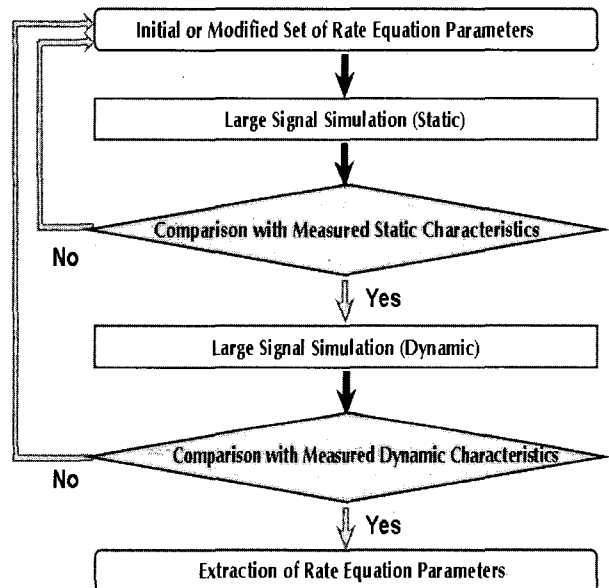


그림 3. VCSEL의 특성변수 추출 과정
Fig. 3. Parameter extraction process of VCSELs.

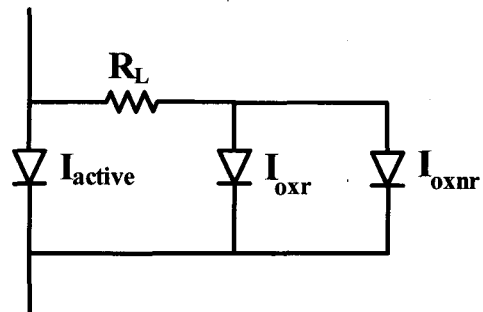
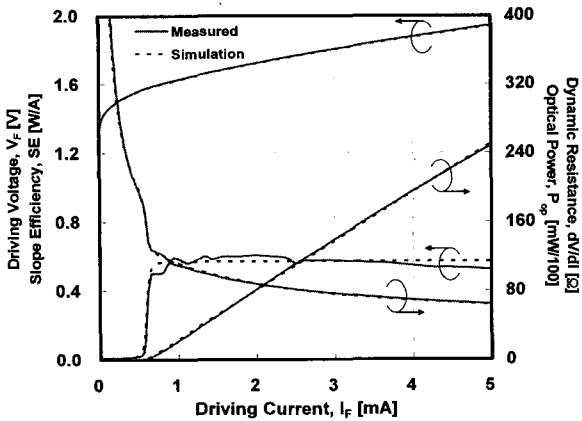
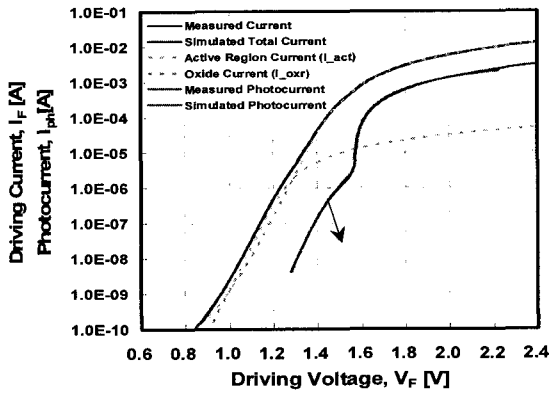


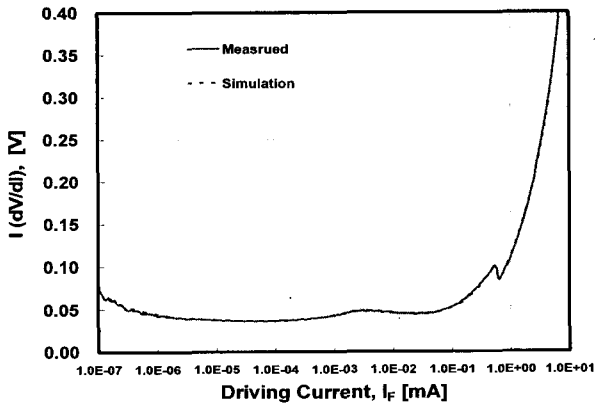
그림 4. 활성 영역과 oxide층 아래 영역을 포함한 oxide VCSEL의 등가회로
Fig. 4. Used equivalent circuit of oxide VCSELs including active and peripheral regions.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 전기적 광학적 특성 비교: (a) L-I-V 특성과 미분 특성, (b) V-log I, V-log L 특성, (c) log I-(dV/dI) 특성

Fig. 5. Electrical and optical characteristics comparison of measured and simulation results: (a) L-I-V and their derivative characteristics, (b) V-log I, V-log L characteristics, and (c) log I-(dV/dI) characteristics.

$$R_s = R_{tr} + R_{nonlr} = R_{tr} + \frac{R_{no}}{1 + I/I_{no}} \quad (11)$$

표 1. 전류 성분 분석에 사용된 변수

Table 1. Variables used in the current component analysis

$I_{active,rad}$	$I_{0,act} (A)$	3.80×10^{-22}	
	n_{act}	1.39	
I_{oxr}	$I_{0,r} (A)$	3.82×10^{-22}	
	n_r	1.35	
I_{oxnr}	$I_{0,nr} (A)$	7.52×10^{-21}	
	n_{nr}	1.99	
R_s	$R_{tr} (\Omega)$	49	
	R_{nonlr}	$R_{no} (\Omega)$	116
		$I_{no} (A)$	0.0027
R_L	(Ω)	20000	

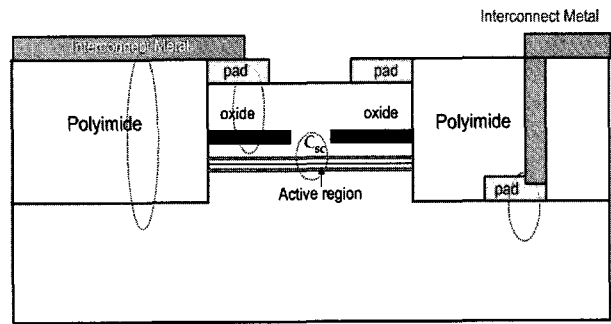


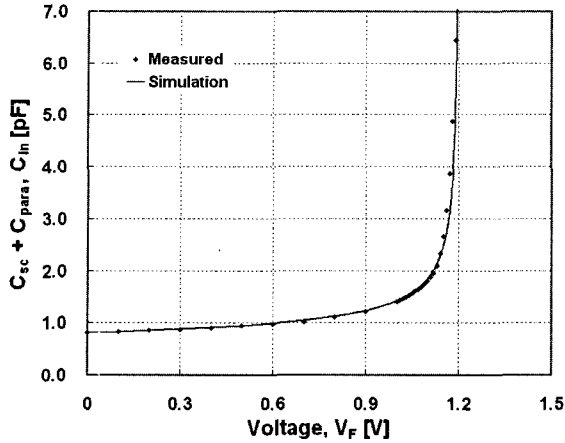
그림 6. oxide VCSEL의 커패시턴스 성분들

Fig. 6. Schematic of an oxide VCSELs for capacitances.

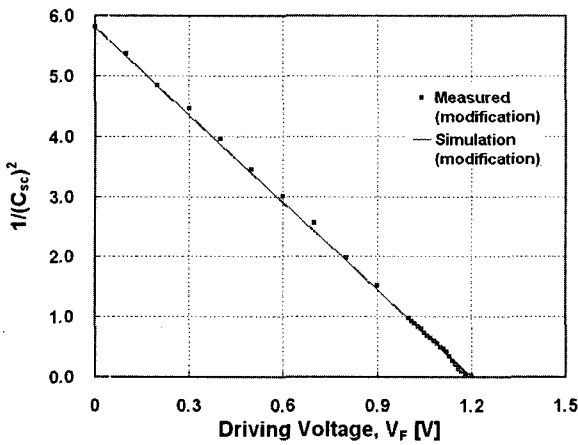
다이오드와 저항성분의 변수 값들을 표 1에 나타내었다.

이 변수들을 사용하여 시뮬레이션 한 결과와 측정 결과를 그림 5에 함께 나타내었다. L-I-V 특성과 미분 특성을 나타낸 그림 5 (a)를 보면 전기적 특성은 완전히 일치하고 있다. 전류가 증가하면서 소자의 내부 온도가 증가함에 따라 광출력이 감소하는 부분과 다중 공간 모드 발진에 의해 slope efficiency가 변화하는 것을 제외하고는 광학적 특성도 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 저전류 영역에서의 전기적 광학적 특성을 나타낸 그림 5 (b)에서도 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치하고 있다.

Log I-I(dV/dI)를 나타낸 그림 5 (c)에서도 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 완전히 일치하고 있다. 이 특성 곡선은 발진이 일어나기 전에는 누설 전류 성분이 전체 전류를 결정하는 주도적인 성분이지만, 발진 이후에는 활성 영역에 흐르는 전류가 주도적인 성분임을 보여주고 있다. 전류 0.003mA 부근의 bump는 그 전류에서 주도적인 전류 성분이 oxide 층 밑으로 흐르는 누설 전류에서 활성영역에 흐르는 전류로 바뀌고 있음을 보여준다.^[4] 한편 그림 5로부터 이 연구에 사용된 VCSEL



(a)



(b)

그림 7. VCSEL의 내부 커패시턴스 : (a) depletion 커패시턴스와 기생 커패시턴스 (b) 전압 변화에 따른 $1/(C_{sc}^2)$

Fig. 7. Internal capacitances of VCSEL (a) depletion capacitance and parasitic capacitance, and (b) driving voltage vs $1/(C_{sc}^2)$.

모듈의 발진 문턱 전류는 $0.615mA$, slope efficiency는 $0.59mW/mA$ 임을 알 수 있다.

2. 내부 커패시턴스의 측정

동특성의 측정 및 분석에 앞서, 동특성에 큰 영향을 주는 내부 커패시턴스를 알아보기 위해 Agilent사의 C-V meter 4279A를 사용하여 전압에 따른 커패시턴스를 측정하였다.

그림 6은 oxide VCSEL의 내부 커패시턴스 구성 성분을 나타낸 것이다.^[1] Depletion 커패시턴스인 C_{sc} 는 전압에 따라 변화하지만 나머지 커패시턴스들은 전압에 따른 변화는 기대할 수 없다. 그리고 C_{sc} 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{sc} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - V_j/V_{bi}}} \tag{12}$$

여기서 C_{j0} 는 0V 에서의 depletion 커패시턴스를 나타내고, V_j 는 접합 전압, V_{bi} 는 built-in potential을 의미한다. 전체 내부 커패시턴스를 기생 커패시턴스와 depletion 커패시턴스의 합으로 놓고, 시뮬레이션 한 결과를 측정결과와 함께 그림 7 (a)에 나타내었다. 또, 그림 7 (b)에는 기생 커패시턴스를 제외한 $1/(C_{sc}^2)$ 이 구동 전압에 실제로 비례하는지를 나타낸 그래프이다. 식 (12)에 따르면 다음 관계가 성립한다.

$$\frac{1}{C_{sc}^2} = \frac{2(V_{bi} + V_R)(N_a + N_d)}{q\epsilon_s N_a N_d} \tag{13}$$

그림 7(b)의 결과는 식 (12), (13)의 관계가 잘 성립함을 보여준다. 이 과정을 통하여 찾아낸 0V에서의 depletion 커패시턴스는 $0.415pF$, 기생 커패시턴스는 $0.400pF$ 이었다.

3. 동특성 비교

동특성 측정을 위한 실험 장치는 그림 8과 같다. 동특성 측정을 위하여 펄스 파형을 입력하고 그에 따른 relaxation oscillation 주파수와 turn-on 특성, 그리고 turn-off 특성의 세 가지 방향에서 살펴보았다. 펄스 파형 입력을 구현하기 위해 pulse pattern generator의 주파수를 매우 낮게 조절하여, 50MHz 즉 입력파형의 on과 off가 20ns 간격으로 나타나도록 하였다. 등가회로 해석에 사용한 software는 Agilent사의 ADS이다.

그림 9는 on 전류와 off 전류를 모두 문턱 전류 이상으로 인가하고, turn-on 특성을 측정한 결과이다. 앞에서 구한 레이저 다이오드의 내부 커패시턴스 값을 사용한 시뮬레이션 결과를 함께 보였다. 두 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 측정값의 첫 번째와 두 번째

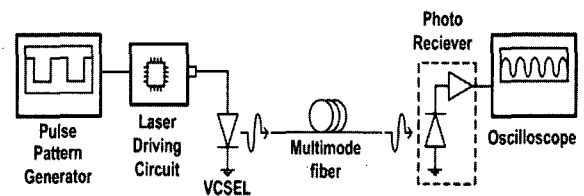


그림 8. oxide VCSEL의 동특성 측정을 위한 실험 장치
Fig. 8. Experimental setup for measuring the dynamic characteristics of oxide VCSELs.

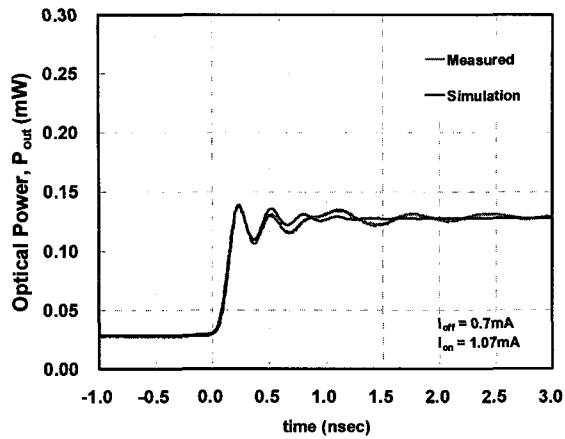


그림 9. relaxation oscillation 주파수의 비교
Fig. 9. Comparison of relaxation oscillation frequency

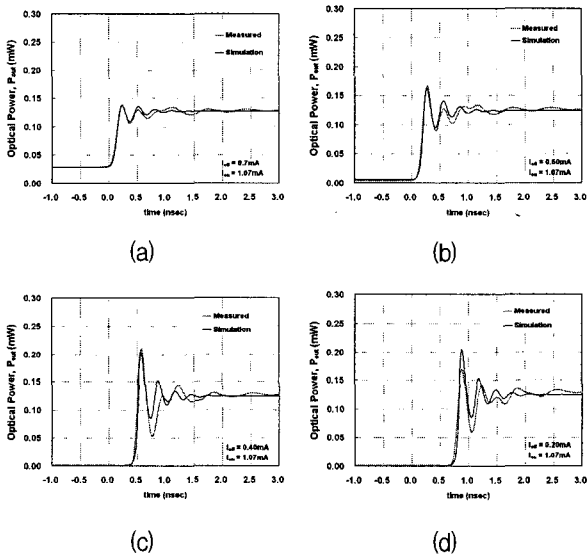


그림 10. off 전류 변화에 따른 turn-on 지연의 비교
(a) $I_{off} = 0.7mA$ (b) $I_{off} = 0.6mA$ (c) $I_{off} = 0.4mA$
(d) $I_{off} = 0.2mA$
Fig. 10. Comparison of turn-on delay depending on the off-current (a) $I_{off} = 0.7mA$, (b) $I_{off} = 0.6mA$, (c) $I_{off} = 0.4mA$, and (d) $I_{off} = 0.2mA$.

peak의 주기는 규칙적으로 나타나고 있지만, 세 번째 peak 부터는 규칙성이 사라지는 것을 볼 수 있다. 이는 oxide VCSEL이 다중모드로 동작하기 때문에 나타나는 현상이다.

그림 10은 on 전류는 $1.07mA$ 로 고정하고 off 전류를 변화시켜가면서 turn-on 지연을 나타낸 그래프이다. 문턱 전류 이상의 off 전류가 인가됐을 때 turn-on 되는 지점을 기준으로 보면, off 전류가 감소함에 따라 turn-on 지연이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

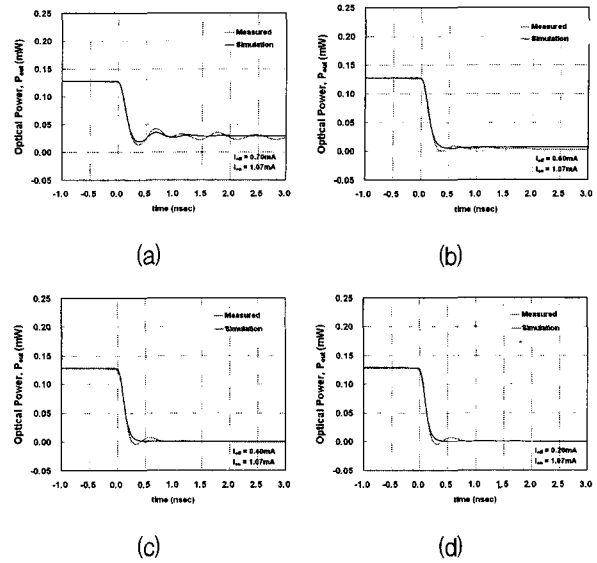


그림 11. off 전류 변화에 따른 turn-off 특성의 비교
(a) $I_{off} = 0.7mA$ (b) $I_{off} = 0.6mA$ (c) $I_{off} = 0.4mA$
(d) $I_{off} = 0.2mA$
Fig. 11. Comparison of turn-off characteristics depending on the off-current: (a) $I_{off} = 0.7mA$, (b) $I_{off} = 0.6mA$, (c) $I_{off} = 0.4mA$, and (d) $I_{off} = 0.2mA$.

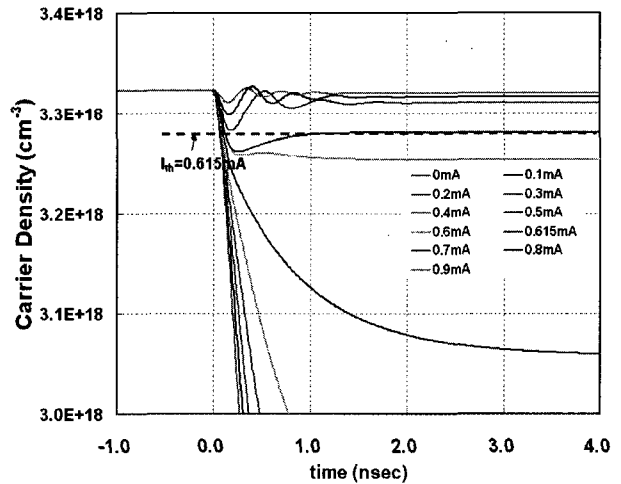


그림 12. off 전류 변화에 따른 캐리어 밀도의 변화
Fig. 12. Time evolution of the carrier density depending on the off-current.

한편, 비율 방정식으로부터 재결합되는 전자 수명과 turn-on 지연, off 전류와 on 전류, 문턱 전류와의 관계를 나타낸 식은 다음과 같다.^[5,6]

$$t_d = \tau \cdot \ln\left(\frac{I_{on} - I_{off}}{I_{on} - I_{th}}\right) \quad (14)$$

측정 결과, $I_{off} = 0.2mA$ 에서 캐리어 수명 $\tau = 1.05ns$ 의 값을 보이고 있는데, 이 값은 기존의 문헌에서 보고한, τ 값 $0.5ns$ 에서 $2.0ns$ 사이에 있다.^[7,8,9] 따라서 측정된

turn-on 지연시간은 신뢰할 수 있는 값이다.

그림 11은 on 전류가 1.07mA로 고정되었을 때, off 전류의 변화에 따른 turn-off 특성을 나타낸 그래프이다. turn-on 지연과는 달리 off 전류에 따른 큰 지연시간의 변화는 보이지 않는다. 다만 문턱전류 이상의 off 전류가 인가된 경우에는 공간 주파수를 가진 파형이 보이고 있지만, 문턱전류 이하의 전류가 인가된 경우에는 거의 보이지 않고 있다. 이러한 특성들은 off 전류 변화에 따른 캐리어 밀도의 변화를 나타낸 그림 12로 설명할 수 있다. 유도 방출의 기준이 되는 문턱 전류에 해당하는 캐리어 밀도에 도달하는 시간이 off 전류에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그림 11에서 off 전류에 따른 turn-off 지연이 거의 나타나지 않은 이유가 여기에 있다. 또한 문턱 전류 이상의 off 전류를 인가한 경우, 캐리어 밀도가 진동하는 모습을 볼 수 있지만, off 전류가 문턱전류 이하 일 때는 진동하는 모습을 보이지 않고 있는 것도 그림 11의 현상을 잘 설명하고 있다. 한편 그림 11에서 문턱전류 이하의 off 전류가 인가된 경우, 시뮬레이션 결과와는 달리 측정 결과는 off 전류의 크기와는 관계없이 동일한 주파수, 동일한 크기의 광출력 변화가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 문턱전류 이하가 되면 활성영역의 캐리어가 줄고, oxide 밑에 있던 캐리어들이 확산하여 그 자리를 채우게 되면서 나타나는 현상이다.^[10]

4. 추출한 특성변수

전기적 특성 그리고 광학적 특성의 측면에서 살펴본 정 특성, 그리고 relaxation oscillation 주파수와 turn-on 및 turn-off 특성의 측면에서 살펴본 동특성이 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 일치하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 대신호 등가회로 모델의 특성 변수를 표 2에, 그리고 다른 특성 변수들을 구하기 위한 식을 표 3에 각각 정리하였다. 표 2에서 $g_{th, TMM}$ 은 전달행렬 방법으로 구한 문턱이득이며,^[11] 비울 방정식에 들어가는 다른 변수들은 비울 방정식 (1), (2), (3) 과 표 2, 3의 설명을 통하여 그 의미를 찾을 수 있다.

IV. depletion 커패시턴스의 영향

앞에서 구한 대신호 등가회로와 특성변수를 사용하여 depletion capacitance의 값을 변화시켜가면서 그에 따른 동특성의 변화를 시뮬레이션 결과를 이용하여 살펴본다.

표 2. 대신호 등가회로 모델에 사용된 계수와 특성 변수

Table 2. Parameters of the large signal model.

변수명	변수	값	단위
1-λ cavity 길이	L	250	nm
축방향 양자우물 길이	L_a	24	nm
양자우물 부피	V_w	1.46E-12	cm ³
SCH 영역 부피	V_{SCH}	1.521E-12	cm ³
gain 계수	g_o	1100	cm ⁻¹
transparency 전자농도	N_{tr}	1.525E+18	cm ⁻³
fitting parameter	N_s	1.1E+18	cm ⁻³
문턱 이득	$g_{th, TMM}$	558	cm ⁻¹
내부 광학 손실	α_i	20	cm ⁻¹
그룹 속도	v_g	0.75E+10	cm/s
이득 포화 계수	ϵ	1.5E-17	cm ³
활성층 광집속계수	Γ	1.76076	
SCH 캐리어 수명	τ_b	30	ns
양자우물 통과시간	τ_{tr}	10	ps
SCH로 방출되는시간	τ_{es}	500	ps
비발광성 재결합계수	A	3.33E+7	s ⁻¹
발광성 재결합계수	B	1.2E-10	cm ⁻³ /s
Auger 재결합계수	C	6.0E-30	cm ⁻⁶ /s

표 3. 대신호 등가회로의 시뮬레이션에 사용된 계수와 특성변수를 구하기 위한 식

Table 3. Equations for deriving the parameters of the large signal model.

변수명	식
mirror 손실	$\alpha_m = \Gamma \left(\frac{L_a}{L} \right) g_{th, TMM}$
문턱 캐리어 농도	$N_{th} = N_{tr} \exp \left[\left(\frac{L}{L_a} \right) \frac{\alpha_m + \alpha_i}{\Gamma g_o} \right]$
정규화 광자 농도	$S_c = \frac{0.001 \times \lambda}{hcv_g \alpha_m V_{SCH}}$
광자의 수명	$\tau_p = \frac{1}{v_g (\alpha_m + \alpha_i)}$
gain	$g(N_w) = g_o \ln \left[\frac{N_w + N_s}{N_{tr} + N_s} \right]$

1. turn-on 특성의 변화

그림 13은 on 전류를 1.0mA로 고정하고, off 전류를 0.1mA씩 변화시켜가면서 시뮬레이션한 결과이다. 점선으로 표시한 부분은 전체 turn-on 지연시간을 나타내며, 실선은 depletion 커패시턴스만의 영향을 나타낸 것이다.

지연시간을 유발하는 다른 요소는 diffusion 커패시턴스, 기생 capacitance, 패키지 capacitance 등이다. off

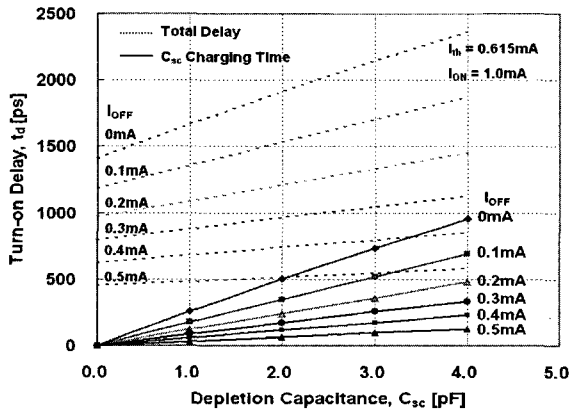


그림 13. Depletion 커패시턴스에 따른 turn-on 지연시간 (off 전류 변화)

Fig. 13. Dependence of the turn-on delay on the depletion capacitance and off-current.

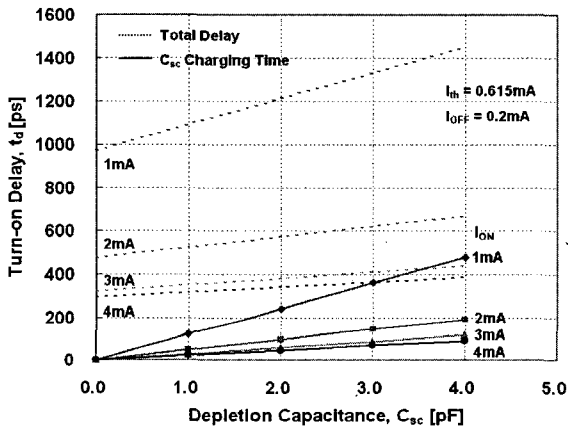


그림 14. Depletion 커패시턴스에 따른 turn-on 지연시간 (on 전류 변화)

Fig. 14. Dependence of the turn-on delay on the depletion capacitance and on-current.

전류가 낮을수록 turn-on delay가 커지는 것을 확인할 수 있고, 전체 turn-on 지연 시간에 미치는 depletion 커패시턴스의 영향도 상당히 커진다는 것을 알 수 있다. TO package에 본딩된 여러 oxide VCSEL의 depletion 커패시턴스를 측정된 결과 0.3pF에서 1.7pF 사이에 있음을 확인할 수 있었다. 또한 거의 동일한 정특성을 갖는 소자도 C_{sc} 의 차이가 약 0.5pF 정도인 경우도 있었다.

depletion 커패시턴스에 영향을 주는 요소는 이론상 크게 도핑 농도와 p-n 접합 면적을 들 수 있는데, 이 두 가지 요소는 정특성에도 영향을 준다. 즉 도핑 농도와 p-n 접합 면적을 제외한 다른 요소도 depletion 커패시턴스에 영향을 준다는 사실을 시사하고 있다.

그림 14는 off 전류를 0.2mA로 일정하게 두고, on 전

류를 변화시켜 가면서 depletion 커패시턴스에 따른 turn-on 지연시간의 변화를 살펴본 그래프이다. on 전류가 증가할수록 depletion 커패시턴스가 turn-on 지연시간에 미치는 영향은 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 off 전류가 낮아서 발생하는 C_{sc} 의 영향은 on 전류를 증가시킴으로써 크게 줄일 수 있다. 이렇게 하면 전력 소모는 크게 늘어나게 된다.

2. turn-off 특성의 변화

그림 15, 16은 각각 off 전류와 on 전류에 따라 depletion 커패시턴스가 turn-off 특성에 미치는 영향을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 정전용량이 크면 방전되는 시간이 오래 걸리기 때문에, falling time이 약간 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 캐리어 밀도 변화도 정전용량의 영향을 받기 때문에 정전용량이 커지면 공진 주파수도 낮아지고, 진폭도 다소 증가하는 것을 확인할

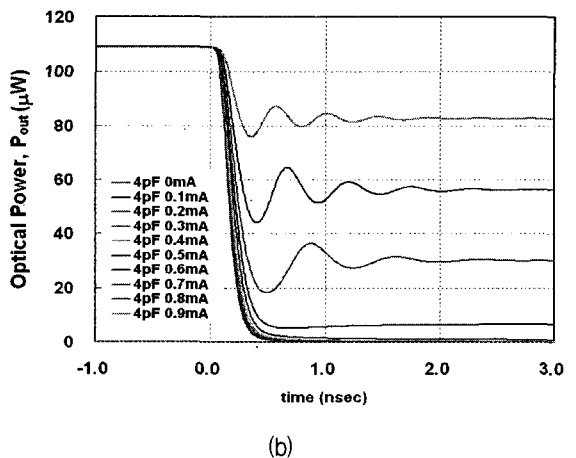
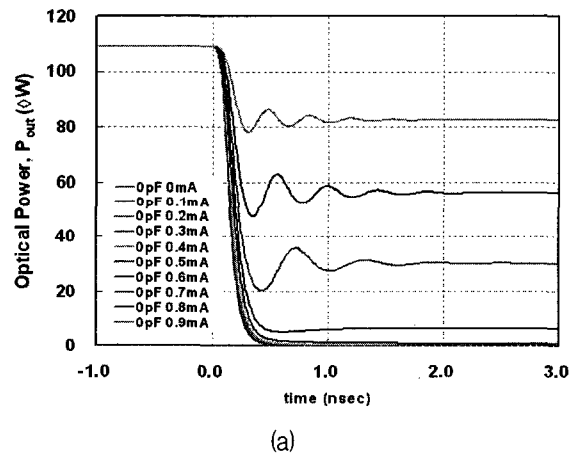
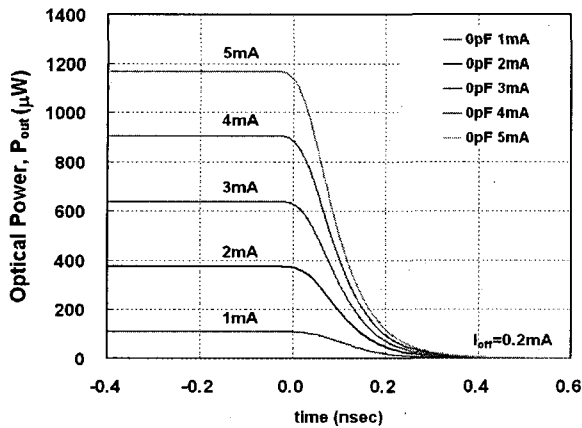


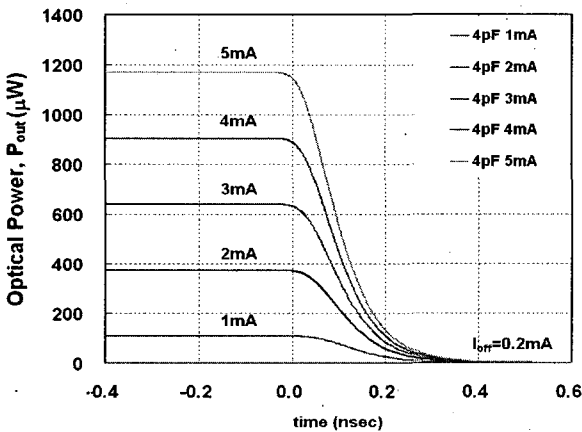
그림 15. off 전류 변화에 따른 turn-off 특성 변화

(a) $C_{jo} = 0pF$ (b) $C_{jo} = 4pF$

Fig. 15. turn-off characteristics depending on the off-current: (a) $C_{jo} = 0pF$, and (b) $C_{jo} = 4pF$.



(a)



(b)

그림 16. on 전류 변화에 따른 turn-off 특성 변화

(a) $C_{jo} = 0pF$ (b) $C_{jo} = 4pF$

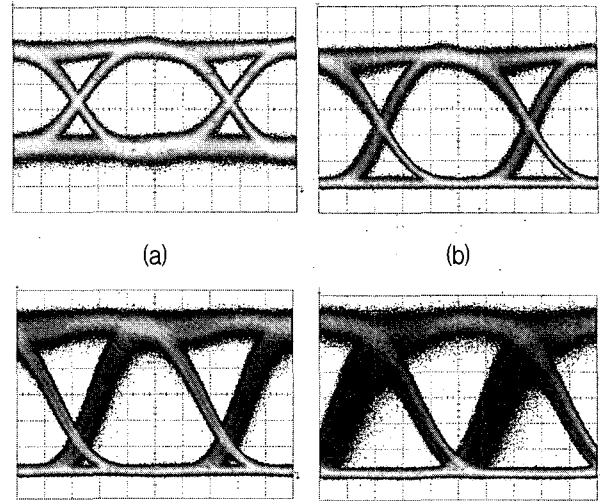
Fig. 16. turn-off characteristics according to on-current:

(a) $C_{jo} = 0pF$ and (b) $C_{jo} = 4pF$.

수 있다. 그렇지만 앞에서 밝혔듯이 on 전류와 문턱전류에서의 캐리어 밀도차가 아주 작기 때문에, turn-off 특성처럼 depletion 커패시턴스에 따른 큰 시간지연은 보이지 않고 있다.

3. Eye-diagram

실제 송신기로 사용할 수 있는지를 판별할 수 있는 eye-diagram을 직접 측정하고, 그 결과를 simulation 결과와 비교하였다. 먼저 on 전류를 1.07mA로 고정하고, off 전류를 변화시키면서 eye diagram을 측정하였다. 입력 pulse의 주파수는 1.25Gbps, word length는 $2^{31} - 1$ 로 설정하였고, 수신기에 Gaussian 필터를 사용하여 측정된 결과를 그림 17에 나타내었다. 시간축은 150ps/div, 세로축인 광출력축은 25μW/div으로 설정하였다. off 전류가 문턱전류 이상일 때는 깨끗한 eye-diagram을 보이고 있



(a) (b) (c) (d)

그림 17. off 전류에 따른 Eye-diagram: (a) $I_{off} = 0.7mA$ (b) $I_{off} = 0.6mA$ (c) $I_{off} = 0.4mA$ (d) $I_{off} = 0.2mA$

Fig. 17. Effect of the off-current on the eye-diagram: (a) $I_{off} = 0.7mA$, (b) $I_{off} = 0.6mA$, (c) $I_{off} = 0.4mA$, and (d) $I_{off} = 0.2mA$.

($I_{on} = 1.07mA$, 150ps/div, 25μW/div)

지만, off 전류가 문턱전류 이하가 되면, turn-on delay가 크게 증가하면서 eye-diagram의 모양이 일그러지는 것을 확인할 수 있다. 한편, off 전류가 0.2mA에 이르면 off 전류가 문턱전류 이상인 0.7mA일 때에 비해 eye-opening 시간이 50%이상 감소하고 있다. 또한 앞 절의 turn-off 특성에서 살펴본 것처럼 off 전류가 문턱 전류 이하가 되어도 turn-off 지연을 나타내는 eye-pattern의 변화는 turn-on 곡선 변화에 비해 아주 작은 것을 확인할 수 있다.

그림 18은 대신호 등가회로를 사용하여 on 전류는 1.07mA로 고정하고, off 전류를 문턱전류 이상(0.7mA)인 경우와 문턱전류 이하(0.4mA, 0.3mA)인 경우로 나누어 시뮬레이션한 eye-pattern이다. 입력 펄스의 주파수는 측정할 때와 같이 1.25Gbps로 정하였고, 수신기 필터의 영향도 고려하였다. 또한 실제 eye-diagram과 동일한 환경을 구현하기 위해, 400MHz에서 2GHz의 noise를 입력신호와 함께 인가하였다. turn-on 부분에서, filter의 영향에 의해 왜곡되어 시뮬레이션 결과와 차이가 나는 광출력 0.1mW 부분을 제외하고는 전체적으로 측정 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

대신호 등가회로 모델을 이용하여 depletion 커패시턴스의 영향을 알아보기 위해, off 전류가 0.4mA일 때 C_{jo} 를 바꾸어가면서 eye-diagram을 구하였다. 그림 19에 보인 것처럼 depletion 커패시턴스에 따른 turn-off

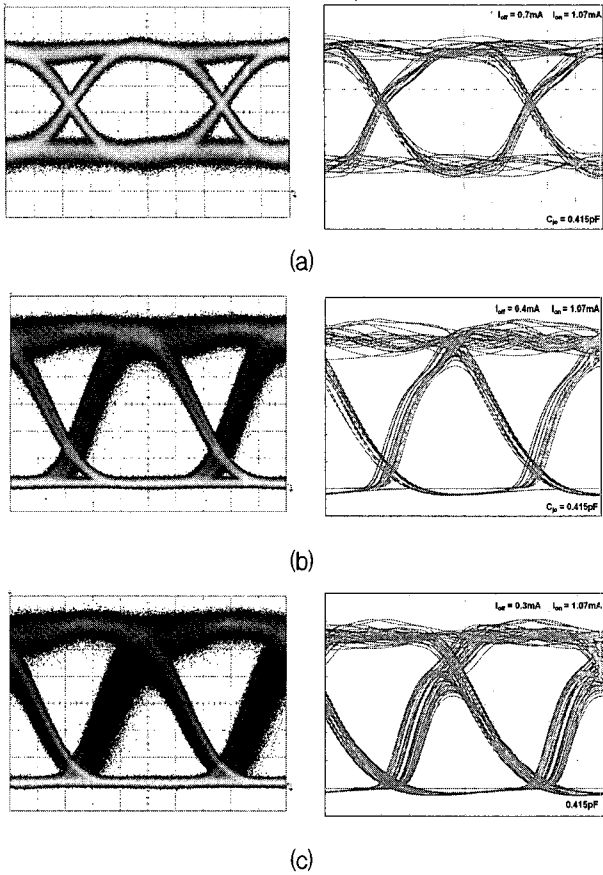


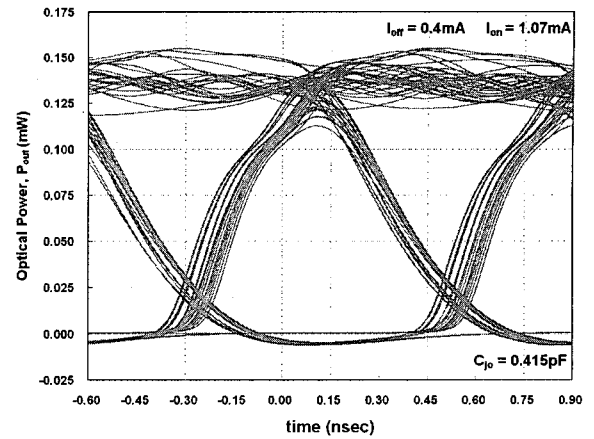
그림 18. off 전류 변화에 따른 eye-diagram 비교 ($C_{jo}=0.415\text{pF}$)

(a) $I_{\text{off}} = 0.7\text{mA}$ (b) $I_{\text{off}} = 0.4\text{mA}$ (c) $I_{\text{off}} = 0.3\text{mA}$

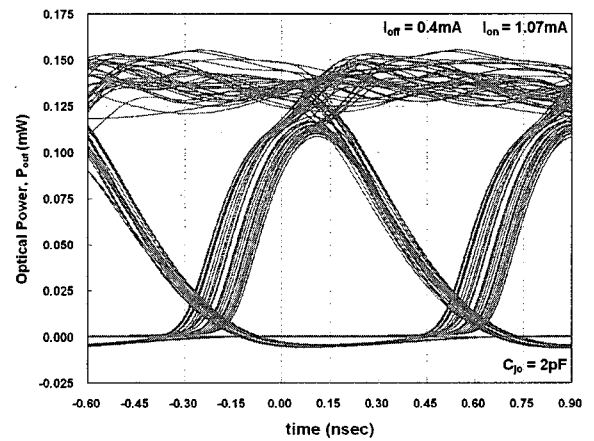
Fig. 18. Effect of the off-current on the eye-diagram ($C_{jo}=0.415\text{pF}$): (a) $I_{\text{off}} = 0.7\text{mA}$, (b) $I_{\text{off}} = 0.4\text{mA}$, and (c) $I_{\text{off}} = 0.3\text{mA}$.

부분의 변화는 거의 나타나지 않는다. 그렇지만 C_{jo} 가 0.415pF 일 때에 비해 4pF 인 경우에는 turn-on이 시작되는 시점이 약 100ps 정도 더 지연된 것을 확인할 수 있다. 또한 eye-diagram 내의 turn-on 곡선의 폭, 즉 timing noise가 C_{jo} 의 증가에 따라 커지고 있는데, 이는 pulse pattern 변화에 따른 turn-on 시간의 변화가 C_{jo} 에 크게 의존함을 나타내고 있다. 즉, 전력 소모를 낮추기 위해 off 전류를 문턱전류 이하로 설정했을 때, depletion 커패시턴스가 고속 동작에 큰 장애요소를 확인할 수 있다.

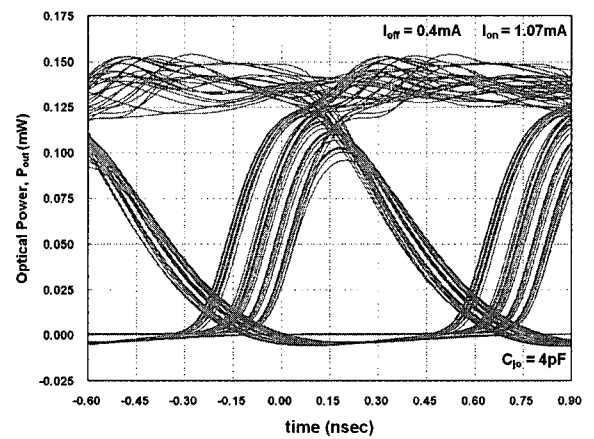
한 가지 덧붙일 것은 다중 모드 VCSEL 해석에 단일 모드 등가회로 모델을 사용하는 것의 타당성에 관한 것이다. 연구에 사용된 VCSEL은 다중 모드 동작을 하는 반면에 사용한 등가회로 모델은 단일 모드 모델이기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 연구에 사용된 VCSEL은 산화막 직경, 즉 활성영역 직경이 $10\mu\text{m}$ 로 비



(a)



(b)



(c)

그림 19. Depletion 커패시턴스에 따른 eye-diagram 비교 (a) $C_{jo} = 0.415\text{pF}$ (b) $C_{jo} = 2\text{pF}$ (c) $C_{jo} = 4\text{pF}$

Fig. 19. Effect of the depletion capacitance on the eye-diagram: (a) $C_{jo} = 0.415\text{pF}$, (b) $C_{jo} = 2\text{pF}$, and (c) $C_{jo} = 4\text{pF}$.

교적 작다. 이에 따라 대부분의 횡 모드가 공간적으로 겹쳐져 있게 된다. 즉, 모든 모드가 하나의 캐리어 참고

에서 유도방출에 필요한 전자-정공 쌍을 받아오는 형태가 된다. 이는 전체 모드 광자의 합은 마치 하나의 모드처럼 볼 수 있음을 의미한다. 특히, 이 연구의 대상인 저전류 동작에서는 모드의 수가 많지 않아 이러한 현상이 더 두드러지게 나타난다. 단일 모드 모델이 비교적 잘 맞는 것은 이 때문이다. 물론 한계도 있는데, 그림 5, 그림 9와 10에서 볼 수 있는 시뮬레이션과 실험 결과의 오차가 그러한 예이다.

V. 결 론

상품으로 생산되는 oxide VCSEL을 저전류로 동작시킬 때 나타날 수 있는 문제점에 대하여 알아보았다. 가장 심각한 문제는 turn-on 지연과 timing noise였고, 레이저 다이오드의 커패시턴스와 on/off 전류에 의해 결정된다. 대신호 등가회로를 이용하여 분석한 결과 커패시턴스 성분 중에서 지금까지 거의 무시되었던 요소인 depletion 커패시턴스가 turn-on 지연과 timing noise에 상당한 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 그리고 이렇게 중요한 커패시턴스를 C-V meter로 측정된 data에서 depletion 커패시턴스와 기타 기생 커패시턴스로 구분하는 방법을 제시하였다. 그 반면, turn-off 특성에 미치는 depletion 커패시턴스의 영향은 미미한 수준이었다. 따라서 VCSEL이 저전류 동작과 동시에 고속 동작이 가능하려면 모든 커패시턴스 성분을 줄여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Carl Wilmsen, Henryk Temkin, and Larry A. Coldren, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, (Cambridge Univ, 1999).
- [2] G. E. Giudice, D. V. Kuksenkov, and H. Temkin, "Measurement of Differential Carrier Lifetime in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, no. 7, pp.920-922, July. 1998.
- [3] P. V. Mena, J. J. Morikuni, S.-M. Kang, A. V. Harton, and K. W. Wyatt, "A Simple Rate-Equation-Based Thermal VCSEL Model," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, no. 5, pp. 865-872, May. 1999.
- [4] 김상배, "레이저 다이오드의 비이상적인 전류-전압 미분특성에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제 28 권 A편, 제 10호, 830-839쪽, 1991년 10월
- [5] K. Konnerth and C. Lanza, "Delay Between Current Pulse and Light Emission of A Gallium Arsenide Injection Laser," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 4, no. 7, pp 120-121, April 1964.
- [6] R. W. Dixon and W. B. Joyce, "Generalized Expressions for the Turn-on Delay in Semiconductor lasers," *J. Appl. Phys.* Vol. 50(7), pp. 4591-4595, March 1979.
- [7] Stephane Barland, Piernicola Spinicelli, Giovanni Giacomelli, and Francesco Marin, "Measurement of the Working Parameters of an Air-Post Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*. Vol. 41, no. 10 pp 1235-1243, October 2005.
- [8] L. Zei, K. Petermann, R. Jager, and K. J. Ebeling, "Operation Range of VCSEL - Interconnect Links with "Below-Threshold"-Biasing," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, no. 4 pp 477-481, April 2000.
- [9] J. Dellunde, M. C. Torrent, J. M. Sancho, and K. A. Shore, "Statistics of Transvers Mode Turn-On Dynamics in VCSEL's," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 33, no. 7 pp 477-481, July 1997
- [10] J. J. Morikuni, P. V. Mena, A. V. Harton, K. W. Wyatt and S.-M. Kang, "Spatially Independent VCSEL Models for the Simulation of Diffusive Turn-Off Transients," *IEEE Journal of Lightwaver Technology*, Vol. 17, no. 1 pp 95-102, January 1999.
- [11] 김태용, 김상배, "전달 행렬 방법을 이용한 850 nm 수직 공진기 레이저 구조의 최적 설계," 전자공학회 논문지, 제 41권, SD편, 제 1호, 835-846쪽, 2004년 1월

저 자 소 개



장 민 우(학생회원)
 2004년 아주대학교 전자공학부
 학사 졸업.
 2006년 아주대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2006년 현재 삼성전자
 메모리 사업부.

<주관심분야 : 광전소자, 메모리 소자 등>



김 상 배(정회원)
 1981년 아주대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1983년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 1987년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 박사 졸업.

1987년~1990년 한국전자통신연구원 선임연구원
 1990년~현재 아주대학교 전자공학부 교수.

<주관심분야 : 광통신용 반도체 레이저 및 부품, 광전 소자 등>