

## 편광 또는 무편광 패브리-페롯 레이저 다이오드의 활성층 및 주입 잠금 동작 특성 모델링

정영철<sup>1†</sup> · 이종창<sup>2</sup> · 조호성<sup>3</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 전자통신공학과  
Ⓞ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

<sup>2</sup>홍익대학교 전자전기공학부  
Ⓞ 121-791 서울특별시 마포구 와우산로 94 (상수동)

<sup>3</sup>(주)엘디스  
Ⓞ 500-706 광주광역시 북구 대촌동 958-3 광주테크노파크 벤처지원센터별관 201호

(2012년 1월 6일 받음, 2012년 2월 14일 수정본 받음, 2012년 2월 14일 게재 확정)

본 논문에서는 패브리 페롯 레이저 다이오드(FP-LD : Fabry-Perot LD)에서 활성층 구조에 따른 주입 잠금 특성을 비교하였다. 편광 및 무편광 다중양자우물 구조와 무편광 벌크 구조의 이득 스펙트럼 및 주입 캐리어 밀도에 따른 최대 이득 특성을 TE, TM 편광에 대하여 계산하였다. 계산된 이득 파라미터를 시영역 대신호 모델에 적용하여 FP-LD의 주입 잠금 특성을 확인한 결과, 무편광 FP-LD가 편광 FP-LD 에 비하여 RIN(Relative Intensity Noise) 특성 면에서 약 3 dB 정도 우수하고, 2.5 Gbps 변조 시에 아이 특성이 훨씬 우수함을 알 수 있다.

## Modeling of Active Layer and Injection-locking Characteristics in Polarized and Unpolarized Fabry-Perot Laser Diodes

Youngchul Chung<sup>1†</sup>, Jong Chang Yi<sup>2</sup>, and Ho Sung Cho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University,  
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea*

<sup>2</sup>*School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University,  
72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea*

<sup>3</sup>*ELDIS, Inc., 201 Venture Incubation Center Annex, Gwangju Technopark,  
958-3 Daechon-dong, Buk-gu, Gwangju 500-706, Korea*

(Received January 6, 2012; Revised manuscript February 14, 2012; Accepted February 14, 2012)

In this paper, injection-locking characteristics versus active layer structures in Fabry-Perot laser diodes (FP-LD) are compared. TE and TM gain spectra and peak gains versus carrier density in polarized and unpolarized multiple quantum well structures and in an unpolarized bulk structure are calculated. The calculated gain parameters are applied to a time-domain large-signal model to simulate the injection-locking characteristics. The results show that RIN in unpolarized FD-LDs is about 3 dB lower than that in a polarized FP-LD and that the eye characteristics of the unpolarized FP-LD are much better than those of the polarized FP-LD.

Keywords: Semiconductor lasers, Injection-locked lasers, Diode lasers, WDM-PON, Fabry-Perot laser diode  
OCIS codes: (250.5960) Semiconductor lasers; (140.3520) Lasers, injection-locked; (140.2020) Diode lasers

<sup>†</sup>E-mail: [ychung@kw.ac.kr](mailto:ychung@kw.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

## I. 서 론

IPTV (Internet Protocol Television) 등과 같은 HDTV급의 영상서비스에 대한 인터넷 서비스 수요가 점증함에 따라서 100 Mbps 이상의 고속 광 가입자 망에 대한 수요가 확대되고 있다. 현재 고속 광 가입자 망으로 상용화된 E-PON (Ethernet-passive optical network)은 시분할 방식으로서 전송속도의 확대에 근원적인 한계가 있다. 또한, 시분할 방식은 네트워크 망이 간단하다는 장점이 있지만 기지국과 수동 광 파워 분배기 (Optical Power Splitter)로 연결되어 있는 가입자간의 시간적인 동기화 기지국과 가입자 사이의 동기를 항상 유지해야 한다는 운영상의 복잡성으로 인하여 망의 확장 및 유지, 보수가 어렵다. E-PON의 제한 요소를 극복하기 위한 대안으로 기가 비트 급의 대용량 초고속 가입자 망 구축이 가능한 WDM-PON (Wavelength division multiplexing - passive optical network)에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중이다<sup>[1]</sup>. WDM-PON은 AWG(Arrayed Waveguide Grating)와 같은 광 파장 분리기/다중화기를 이용하여 가입자에게 서로 다른 파장의 신호가 제공되도록 하여 고속의 신호 전송과 망의 보안성 및 확장성이 우수하다. 그러나 각 가입자에게 서로 다른 파장을 제공하기 위해서는 서로 다른 파장을 제공하는 광원이 필요하다. 이로 인해 망의 구축비용이 증가하는 단점을 가지고 있다. 차세대 가입자 망의 궁극적인 솔루션인 WDM-PON을 경제적으로 구현하기 위해서는 배열도파로 격자(AWG : Arrayed Waveguide Grating)와 같은 광 파장 분리기와 단일 파장 광원 등의 부품의 비용을 낮추는 것이 관건이다<sup>[2, 3]</sup>. 저가형 WDM-PON 광원으로 주입 잠금 패브리 페롯 레이저 다이오드 (FP-LD : Fabry-Perot LD)의 활용에 대한 관심이 점증하고 있는 상황이고, 155 Mbps 급은 상용화가 일부 이루어진 바도 있고, 최근에는 1.25 Gbps급, 2.5 Gbps 급의 WDM-PON 시스템에 주입 잠금 FP-LD를 적용하려는 연구 개발이 진행되고 있는 상황이다. 특히, 2.5 Gbps 급에서는 RIN (Relative Intensity Noise)를 적절히 억제하여야 하기 때문에 RIN 값을 2배 이상 줄일 수 있는 무편광 FP-LD를 사용하고자 하는 시도가 보고된 바 있다<sup>[4]</sup>. RIN은 주로 beating noise에 의하여

발생하므로, 전체 광 파워가 두 편광 성분에 나누어 존재하는 경우에 대체로 2배 정도 작게 나타날 가능성이 있다.

본 연구에서는 편광 MQW, 무편광 벌크, 무편광 MQW 활성층의 이득 특성을 Luttinger-Kohn Hamiltonian을 기반으로 하여 모델링 하였다. 계산된 TE, TM 이득 특성에서 얻어지는 차분 이득 및 투명 전자 밀도를 시영역 대신호 모델링에 적용하여 잡음 주입 발진 특성을 살펴보았다. 비교 분석 결과, 2.5 Gbps 급에서 주입잠금 레이저 다이오드 변조를 하기 위해서는 무편광 FP-LD가 훨씬 유리함을 시영역 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

## II. 편광 및 무편광 MQW와 Bulk 활성층 특성 해석

### 2.1. 모드 이득 계산을 위한 수치해석 모델링

양자우물 구조의 이득을 계산하기 위하여 우선 에너지 밴드를 구하여야 하며, 다음의 Schroeödinger 방정식으로부터 전도대의 파동 함수 및 에너지 밴드를 얻을 수 있다.

$$H_c \Psi_{cn} = -\frac{\hbar^2}{2m_c^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Psi_{cn} + \left\{ \frac{\hbar^2}{2m_c^*} (k_x^2 + k_y^2) + V_c(z) \right\} \Psi_{cn} = E_{cn} \Psi_{cn} \quad (1)$$

여기서  $m_c^*$ ,  $V_c$ ,  $E_{cn}$ ,  $\Psi_{cn}$ 은 각각 전도대의 실효질량(Effective Mass), 포텐셜 에너지 레벨(Potential Energy Level), n번째 고유 에너지(Eigen-Energy) 및 고유 파동 함수(Eigen-Wave Function)를 나타낸다. 한편 가전대인 경우는 Spin Split-Orbit band의 영향을 무시할 수 있다고 가정하면 4×4 Luttinger-Kohn Hamiltonian  $H_v$ 를 이용하여 에너지 밴드 계산이 가능하다<sup>[5]</sup>.

$$H_v \Psi_{vm} = E_{vm} \Psi_{vm} \quad (2)$$

본 연구에서 고려하는  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  화합물 반도체 활성층의 파동 함수를 구하기 위한 파라미터를 표 1에 나타내었다<sup>[4]</sup>.

전도대와 가전대의 에너지 밴드가 구해지면 상태 밀도

TABLE 1. Material parameters

Parameter	Symbol(unit)	GaAs	InP	InAs	GaP	
Lattice constant	$a(\text{Å})$	5.65	5.86	6.05	5.45	
Effective mass	Electron	$m_e/m_0$	0.063	0.079	0.023	0.79
	Hole	$m_{hh}/m_0$	0.52	0.6	0.57	0.83
Luttinger parameter	$\Upsilon_1$	6.98	5.08	20.0	4.05	
	$\Upsilon_2$	2.06	1.6	8.5	0.49	
	$\Upsilon_3$	2.93	2.1	9.2	2.93	
Energy bandgap energy	$E_g(\text{eV})$	1.42	1.34	0.36	2.27	
Average valence band energy	$E_v(\text{eV})$	-6.92	-7.04	-6.67	-7.4	
Optical dielectric constant	$\epsilon_{opt}$	10.9	9.61	12.25	9.08	
Refractive index	$n(\lambda)$	3.65	3.41	3.52	3.45	

(Density of State)를 구할 수 있게 된다. 우선, 가전대 에너지가 [100] 방향과 [110] 방향에 대해 비등방성을 갖고 있으므로 다음과 같이 그 평균값을 취한다.

$$E_v = E_v(k_x, k_y) \approx E_v(k_r) = \frac{1}{2} \left\{ E_v(k_{100}, 0, 0) + E_v\left(\frac{k_{100}}{\sqrt{2}}, \frac{k_{100}}{\sqrt{2}}, 0\right) \right\} \quad (3)$$

이것을 바탕으로 다음 식과 같이 모든  $k$ 성분에 대한 상태(State)를 합한다. 이 식에서  $n$ 은 부밴드(Sub-Band) 번호를 나타내며  $L_z$ 는 양자 우물의 두께이고  $V$ 는 양자우물의 부피이고,  $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  을 나타낸다.

$$\begin{aligned} N_{QW}(E) &= \frac{2}{V} \sum_n \sum_{k_x} \sum_{k_y} \delta(E - E_n - E_n(k_x, k_y)) \\ &= \frac{1}{\pi L_z} \sum_n \int_0^\infty \frac{dk_r}{dE} k_r \delta(E - E_n - E_n(k_r)) dE \\ &= \frac{1}{\pi L_z} \sum_n \frac{k_r}{dE_n(k_r)} \Big|_{E=E_n + E_n(k_r)} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 하나의 부밴드만을 고려했을 때의 상태 밀도 함수는 다음과 같은 계산식을 이용하여 구한다.

$$\rho(E) \equiv N_{QW}(E) = \frac{1}{V} \frac{2\pi(k_{i+1}^2 - k_i^2) \times \frac{1}{4}}{\left(\frac{\pi}{L_x L_y}\right)^2 (E_{i+1} - E_i)} = \frac{1}{2L_z} \frac{k_{i+1}^2 - k_i^2}{\pi(E_{i+1} - E_i)} \quad (5)$$

여기서  $E_i$ 와  $k_i$ 는 특정 부밴드의  $E-k$  관계를 이산화 했을 때  $i$  번째 샘플의 값들이다.

한편, 준 페르미 준위(quasi-Fermi Level)를 전도대의 경우  $E_{qfn}$ , 가전대의 경우  $E_{qfp}$  라 하면, 이 값들은 다음과 같은 전체 주입 전자 밀도 및 정공 밀도 식을 통하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} n &= \int f(E) N_{QW}(E) dE \\ &= \int_{E_c}^\infty \rho_c(E) \cdot \frac{1}{1 + \exp[(E - E_{qfn})/kT]} = n(E_{qfn}) \\ p &= \int f(E) P_{QW}(E) dE \\ &= \int_{E_v}^{-\infty} \rho_v(E) \cdot \frac{1}{1 + \exp[(E_{qfp} - E)/kT]} = p(E_{qfp}) \end{aligned} \quad (6)$$

양자우물에 주입된 캐리어 밀도를 일정한 값이라고 가정하여 계산된  $E_{qfn}$ 과  $E_{qfp}$ 는 광학 이득이나 인구 반전 인자(Population Inversion Factor)  $n_{sp}$  등의 특성변화에 영향을 미치게 된다. 반도체 물질 내의 광학적 이득은 다음 식을 통하여 계산한다.

$$\begin{aligned} g_m^p(E, N) &= \frac{e^2}{m_0^0} \frac{\pi \hbar}{\epsilon_0 n_r c E} \frac{1}{L_{qw}} \sum_{n_v} \sum_{n_c} \sum_{k_r=0}^{N \times \Delta k} \times \\ & \left[ \frac{k_r \Delta k}{2\pi} |M_{ave}^{n_c n_v p}|^2 [f_c(E_c(k)) - f_v(E_v(k))] L(E - E_{ck} + E_{vk} - E_g) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $|M_{ave}^{n_c n_v p}|^2$ 은 밴드간(Interband) 천이 행렬 요소로서 전도대와 가전대간의 중첩적분(Overlap Integral)과 벌크 천이 행렬 요소를 이용하여 구할 수 있다. 한편 식 (7)에서  $L(E)$ 는 Lineshape 함수로서 양자우물인 경우는 다음과 같은 가우시안 함수로 정의하여 계산하였다.

$$L(E - E_k) = \sqrt{\frac{1}{2\pi \Delta E^2}} e^{-\frac{(E - E_k)^2}{2\Delta E^2}} \quad \text{with } \Delta E = \frac{\hbar}{\tau_{LN}} \quad (8)$$

여기서  $\tau_{LN}$ 은 밴드 간 Relaxation Lifetime으로 보통 0.1 ps가 된다.

## 2.2. 편광 MQW, 무편광 벌크, 무편광 MQW 구조의 이득 특성 해석 및 비교

그림 1에 편광 MQW, 무편광 Bulk, 무편광 MQW 형태의 활성층 구조들을 보였다. 편광 MQW 구조는 6개의 1.55Q 양

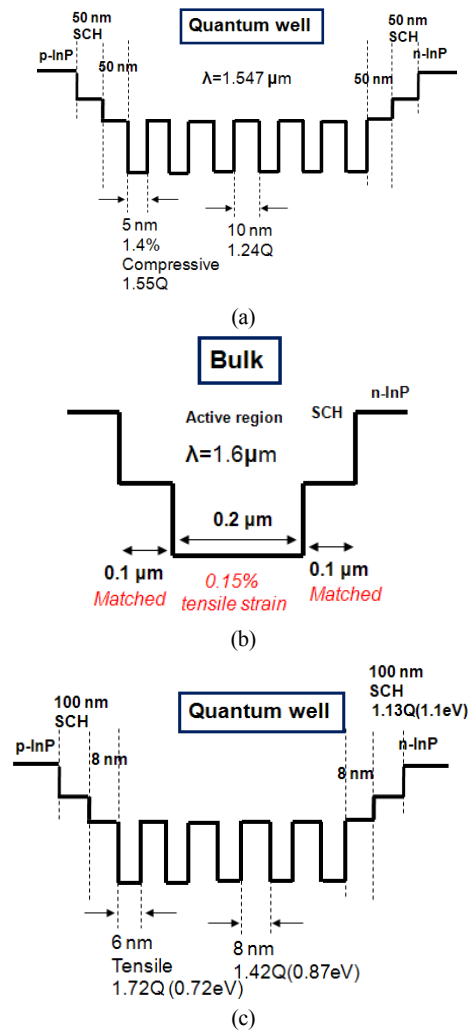


FIG. 1. (a) Polarized MQW, (b) Unpolarized bulk, and (c) Unpolarized MQW active layer structures.

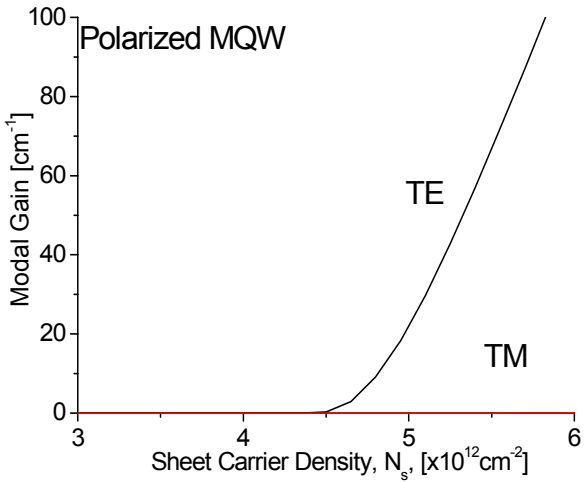


FIG. 2. Peak mode gain versus sheet carrier density in polarized MQW structure.

자 우물(5 nm) 들이 1.24Q의 배리어(10 nm) 들 사이에 놓여 있는 구조이며, 50 nm의 1.24Q 층과 50 nm의 SCH (Separate Confinement Heterostructure) 층으로 이루어져 있다. 양자 우물은 1.4%의 압축 스트레인을 가한 것으로 하였다. 벌크 구조는 0.2  $\mu\text{m}$ 의 활성층과 0.1  $\mu\text{m}$ 의 SCH 층이 있는 구조이고, 활성층은 0.15%의 인장 스트레인을 가지도록 하였다. 무편광 MQW 구조는 그림 1(c)에 보인 바와 같이 5개의 1.72Q 양자 우물(6 nm) 들과 6개의 1.42Q 배리어(8 nm) 및 100 nm의 1.13Q SCH 층으로 구성되어 있으며, 양자 우물에는 0.8%의 인장 스트레인을 가하였다.

각각의 활성층 구조에 대한 이득 특성을 알아보기 위해 앞에서 기술된 절차에 따라서 캐리어 밀도에 따른 물질 이득 특성을 계산하였다. 무편광 벌크의 경우는 활성층의 두께가 200 nm 이고, 편광 또는 무편광 MQW의 경우는 양자 우물 층의 두께의 합이 30 nm이며, TE 및 TM 모드가 구속인자 값이 활성층 구조에 따라 다르므로, 주입되는 sheet 캐리어 밀도에 따른 최대 모드 이득을 도시하여 비교할 필요가 있다.

편광 MQW 구조 (그림 1(a))의 sheet 캐리어 밀도에 따른 최대 모드 이득을 구하여 그림 2에 제시하였다. TE 모드의 이득이 TM 모드에 비하여 훨씬 큼을 알 수 있다. 무편광 벌크 활성층 구조 (그림 1(b))의 경우, sheet 캐리어 밀도에 따른 최대 모드 이득을 구하여 그림 3에 도시하였으며, 차분 이득 (dg/dN)과 투명 캐리어 밀도 값이 편광에 크게 좌우되지 않음을 알 수 있다.

무편광 MQW 구조 (그림 1(c))에서의 최대 모드 이득 특성을 sheet 캐리어 밀도의 함수로 그림 4에 나타내었다. 주어진 sheet 캐리어 밀도에 대하여, 편광 MQW의 경우가 가장 큰 모드 이득을 나타내고, 무편광 MQW, 무편광 Bulk의 순으로 모드 이득이 작아짐을 알 수 있다. 이를 통하여 무편광 MQW가 적절히 구현되는 경우 Bulk 구조에 비하여 우수한 주입 잠금 레이저 다이오드 특성을 얻을 수 있을 것임을 예측할 수 있다.

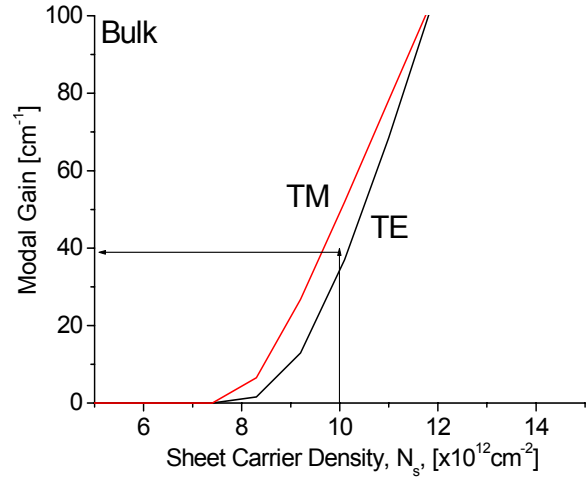


FIG. 3. Peak mode gain versus sheet carrier density in unpolarized bulk structure.

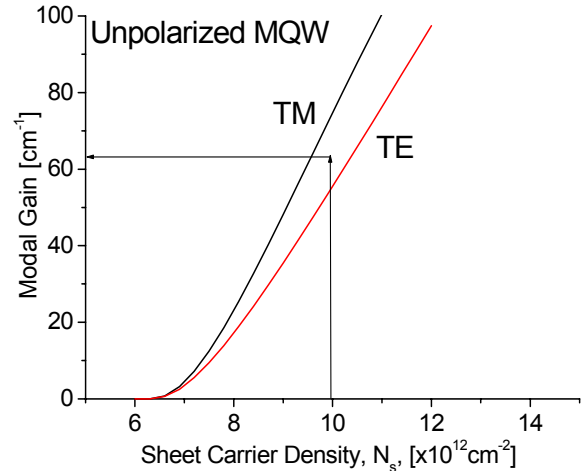


FIG. 4. Peak mode gain versus sheet carrier density in unpolarized MQW structure (tensile strain : 0.8%).

### III. 주입 잠금 레이저 다이오드 시영역 모델링

#### 3.1. 시영역 모델링 방법

주입 잠금 레이저 다이오드를 모델링한 결과는 일부 보고가 된 바가 있다. 레이저 다이오드 공진기의 모드 5개 정도만을 고려하여 광파 및 캐리어의 율 방정식을 시간 스텝마다 수치 해석하여 실험과 접근하는 결과를 제시한 바가 있다. 그럼에도 불구하고 이 방법은 레이저 다이오드 내에서의 spatial hole burning 효과 등은 반영이 되지 않는 한계를 내포하고 있다<sup>[6]</sup>. 또한 레이저 공진기 내에서의 광자 및 캐리어의 분포가 균일하다고 가정하여, 공진기 왕복시간마다 광파의 값을 추적하는 해석 방법도 제시된 바가 있고, 이 방법 또한 실험과 상당히 유사한 결과를 나타내는 것으로 보고되고 있다<sup>[7]</sup>. 그럼에도 불구하고, 보다 엄밀한 시물레이션을 위해서는 레이저 공진기를 다수의 섹션으로 나누어서 각 섹션에서의 광자밀도 및 캐리어 밀도를 시간 스텝마다 추적하는

시영역 시뮬레이션 방법이 필요하다.

광 도파로 내에서 전파하는 전계(electric field)는

$$E_i(t, z) = [F_i(t, z)e^{-j\beta_0 z} + R_i(t, z)e^{j\beta_0 z}]e^{j\omega_0 t}, \quad i = x, y \quad (9)$$

과 같이 순방향으로 진행하는 전파와 역방향으로 진행하는 전파의 합으로 표현되어질 수 있다. 여기서  $\omega_0$ 는 중심 주파수이고,  $\beta_0$ 는 도파로의 전파상수를 나타낸다.  $F_x$ 와  $R_x$ 는 순방향과 역방향으로 진행하는 TE 모드 전계의 크기와 위상을 함께 포함하고 있는 복소수 값을 가지는 복소 전계(Complex Electric Field)값이고,  $F_y$ 와  $R_y$ 는 TM 모드의 복소 전계이다. 이러한 진행파는 도파로 내부의 이득 (gain)과 손실 (loss) 및 진행되는 광파간의 결합 (coupling)이 있는 보편적인 광도파로 내에서의 전계 변화를 표현하고 있는 시간변수가 있는 결합 파동 방정식 (Time-Dependent Coupled Wave Equation) 식 (10)을 만족하게 된다<sup>[8]</sup>.

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F_x(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial F_x(t, z)}{\partial z} = (g_x - j\delta_{x,b} - \alpha_0/2)F_x(t, z) + S_{fx} \quad (10a)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F_y(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial F_y(t, z)}{\partial z} = (g_y - j\delta_{y,b} - \alpha_0/2)F_y(t, z) + S_{fy} \quad (10b)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R_x(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial R_x(t, z)}{\partial z} = (g_x - j\delta_{x,b} - \alpha_0/2)R_x(t, z) + S_{rx} \quad (10c)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R_y(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial R_y(t, z)}{\partial z} = (g_y - j\delta_{y,b} - \alpha_0/2)R_y(t, z) + S_{ry} \quad (10d)$$

식 (10)을 시간 스텝마다 풀이하는 과정에서 왼쪽면 ( $z=0$ )에서 슬라이스된 잡음이 주입된다고 가정하며, 이에 따른 경계 조건은 다음과 같다.

$$F_i(t, z=0) = r_1 R_i(t, z=0) + N_i(t), \quad i = x, y \quad (11a)$$

$$R_i(t, z=L) = r_2 F_i(t, z=L), \quad i = x, y \quad (11b)$$

여기서  $N_i(t)$ 는 AWG(Arrayed Waveguide Grating)을 통하여 가우시안 필터링된 잡음이고,  $r_1$ 는 주입잡음 레이저 다이오드의 왼쪽 단면 (주입 단면) 전계 반사율이고,  $r_2$ 는 주입잡음 레이저 다이오드의 오른쪽 단면 전계 반사율이다. 주입 잡음은 주파수 영역에서 주파수 성분들의 진폭은 일정하고, 위상이 랜덤하도록 잡음 스펙트럼을 발생시킨 후에 가우시안 필터링하여 역 FFT 함으로써 시 영역에서의 랜덤 잡음을 생성하여 시뮬레이션에 사용하였다.

$c_g$ 는 도파로 내에서의 군속도(Group Velocity)를 나타내며

임의의 주파수에서는 일정하다고 가정되어진다.  $g$ 는 외부에서 인가되는 전류 등에 의해 발생하는 전계이득,  $\alpha_0$ 는 도파로에서 흡수 및 산란 등에 의해서 발생하는 손실 계수이다.  $S_f$ 와  $S_r$ 은 자발방출 잡음(Spontaneous Emission Noise)을 나타내는 파라미터로 레이저 다이오드 발진시 구동원(Driving Source)으로 작동하게 된다. 여기서  $S_f$ 와  $S_r$ 은 랜덤하게 변하는 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는 전계이다.

전계가 광도파로를 진행하면서 외부에서 인가되는 전류 등에 의해서 모드 전계 이득(Modal Field Gain)의 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_i(z, t) = \frac{\Gamma_i g_{i,n}(N(z, t) - N_{i,0})}{2(1 + \epsilon P_i)}, \quad i = x, y \quad (12)$$

여기서  $\Gamma_i$ 는 광도파로 내에서의 TE 또는 TM 모드의 구속인자(Confinement Factor)를 나타내며,  $g_{i,n}$ 는 캐리어밀도 변화량에 대응하여 전계이득의 변화하는 정도를 나타내는 TE 또는 TM 모드 차분이득(Differential Gain)이다.  $N_{i,0}$ 는 투명 캐리어밀도 (Transparency Carrier Density),  $P_i$ 는 TE 및 TM 모드 광자밀도, 그리고  $\epsilon$ 는 이득억제계수(Gain Suppression Coefficient)로 전계 이득과 광자밀도와의 비선형 관계를 나타낸다. 캐리어 밀도 변화에 따른 실효 굴절률 (Effective Refractive Index)의 변화는 아래의 식으로 나타낸다.

$$n_{i,eff}(z, t) = n_{eff0} - \frac{\lambda}{4\pi} \Gamma_i \alpha_m g_{i,n} \Delta N(z, t) \quad (13)$$

여기서  $n_{eff0}$ 는 투명 캐리어밀도인 경우의 실효 굴절률이고,  $\alpha_m$ 은 선폭증가인자(Linewidth Enhancement Factor)이다. 캐리어밀도의 변화에 의한 위상 벗어남 인자(detuning factor)  $\delta_{i,b}$ 는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\delta_{i,b} = -\frac{1}{2} \Gamma_i \alpha_m g_{i,n} \Delta N(z, t) \quad (14)$$

시간의존 결합 파동방정식에 있는 파라미터는 캐리어밀도의 시간과 공간에 따른 변화에 의해 주도되어지는데, 이러한 시간에 따른 캐리어 밀도의 변화는 율방정식(Rate Equation)으로 표현되어진다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - BN^2 - CN^3 - 2c_g(g_x P_x + g_y P_y) \quad (15)$$

여기서  $J$ 는 전류 주입밀도(Current Injection Density)[A/cm<sup>2</sup>],  $e$ 는 전하량,  $d$ 는 활성층의 두께,  $C$ 는 Auger 캐리어 재결합 계수 (Carrier Recombination Coefficient)를 나타내고,  $P_i$ 는 정규화된 광자 밀도(Normalized Photon Density)로 아래의 식과 같이 나타내어진다.

$$P_i = F_i^2 + R_i^2, \quad i = x, y \quad (16)$$

공간 전파에 따른 캐리어 밀도의 변화와 그에 따른 파라미터의 변화 및 광자 밀도의 변화는 (10)~(16)의 식들을 이용하여 얻어지는 유한차분 알고리즘으로부터 구할 수 있다<sup>[8-12]</sup>. 입력 단에 주입되는 NB-ASE(Narrowband-amplified spontaneous emission) 잡음은 화이트 잡음 주파수 영역에서 각 주파수 성분들의 위상이 랜덤하도록 잡음을 발생한 후 적절히 대역 필터링하여 얻었다. 필터링 된 잡음을 역 푸리에 변환하여 시영역 잡음 신호로 만든 다음에 이를 FP-LD의 입력 단에 주입하여 시뮬레이션을 행하였다.

### 3.2. TE과 TM 편광이 공존하는 경우의 시영역 모델링

시영역 모델링을 하기 위해서는 캐리어 밀도에 따른 최대 이득 특성에서 추출되는 이득 기울기와 투명 캐리어 밀도 값

을 알아야 한다. 편광 다중양자우물(MQW) 구조, 무편광 벌크 및 MQW 구조에서의 캐리어 밀도에 따른 이득 스펙트럼 및 최대 모드 이득 특성을 2장에서 계산한 바 있다. 편광 MQW 구조(그림 1(a)), 무편광 Bulk 구조(그림 1(b))와 무편광 MQW 구조(그림 1(c), tensile strain 0.8%)의 sheet 캐리어 밀도에 따른 최대 모드 이득은 그림 2, 그림 3 및 그림 4에 각각 도시하였다. 이 계산 결과에 따라서 각각의 활성층 구조에 대한 이득 기울기와 투명 캐리어 밀도 등을 구하여 표 2, 3, 4에 각각 나타내었다. 표 2, 표 3, 표 4의 파라미터를 이용하여 편광 MQW, 무편광 벌크, 무편광 MQW 인 경우의 임계 전류, dP/dI 및 6mW 파워를 발생하기 위한 주입전류 값을 표 5에 보였다. 이 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 6에 나타내었다.

3.1절에서 기술한 시영역 모델링 방법을 이용하여 계산한 예를 아래에 기술한다. 그림 5는 표 2에 제시된 파라미터를

TABLE 2. Parameters used for the calculation of polarized MQW FP-LD

		TE	TM
Strip Width	$w$	$1\mu m$	
Thickness of the Active Layer	$d$	$0.03\mu m$	
Confinement Factor	$\Gamma$	0.11	0.07
Differential Gain	$g_n$	$27 \times 10^{-16} cm^2$	0
Transparency Carrier Density	$N_0$	$1.63 \times 10^{18} cm^{-3}$	$1.63 \times 10^{18} cm^{-3}$

TABLE 3. Parameters used for the calculation of unpolarized bulk FP-LD

		TE	TM
Strip Width	$w$	$1\mu m$	
Thickness of the Active Layer	$d$	$0.2\mu m$	
Confinement Factor	$\Gamma$	0.476	0.345
Differential Gain	$g_n$	$18 \times 10^{-16} cm^2$	$18 \times 10^{-16} cm^2$
Transparency Carrier Density	$N_0$	$0.53 \times 10^{18} cm^{-3}$	$0.50 \times 10^{18} cm^{-3}$

TABLE 4. Parameters used for the calculation of unpolarized MQW FP-LD(tensile strain 0.8%)

		TE	TM
Strip Width	$w$	$1\mu m$	
Thickness of the Active Layer	$d$	$0.03\mu m$	
Confinement Factor	$\Gamma$	0.11	0.07
Differential Gain	$g_n$	$5.8 \times 10^{-16} cm^2$	$7.1 \times 10^{-16} cm^2$
Transparency Carrier Density	$N_0$	$2.65 \times 10^{18} cm^{-3}$	$2.35 \times 10^{18} cm^{-3}$

TABLE 5. Threshold currents, dP/dI, and injection currents for P=6mW in case of three active layer structures

	편광 MQW	무편광 벌크	무편광 MQW
Threshold Current [mA]	6.2 mA	12.01 mA	11.52 mA
dP/dI [W/A]	0.44 W/A	0.407 W/A	0.423 W/A
Current for 6mW Output	19.8 mA	26.75 mA	25.70 mA

TABLE 6. Laser diode parameters used in the simulations

Device Length	600 $\mu\text{m}$
Spontaneous Recombination Coefficient	$7 \times 10^{-11} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$
Auger Recombination Coefficient	$5 \times 10^{-30} \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$
Waveguide Loss	$20 \text{cm}^{-1}$
Nonlinear Gain Suppression Coefficient	$3.6 \times 10^{-17} \text{cm}^3$
Spontaneous Coupling Factor	$5.0 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$
Reflectivity at facets	Left facet : 0.1%, Right facet : 30%
Group Index	3.5
Line width Enhancement Factor	3

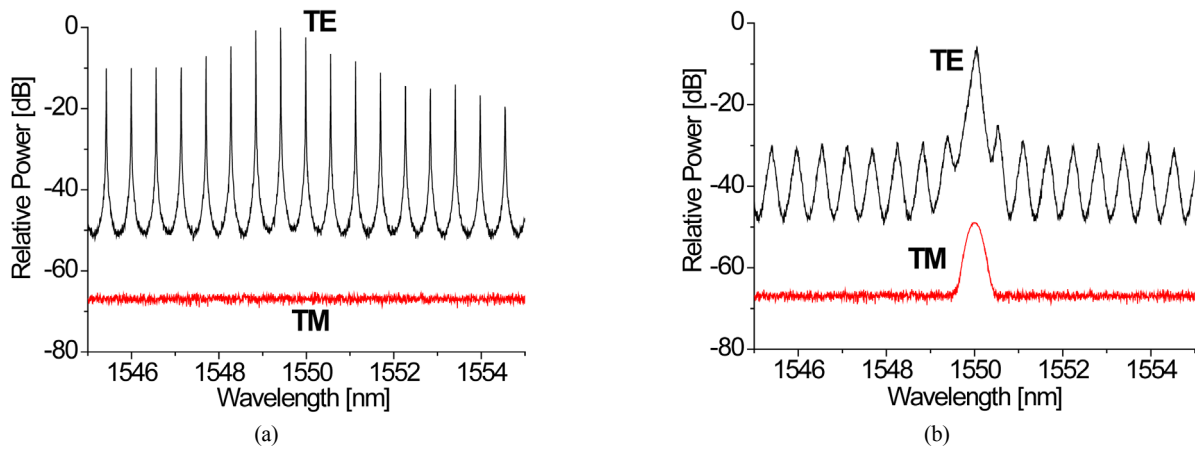


FIG. 5. Lasing spectra of polarized MQW FP-LD (a) before injection-locking and (b) after injection locking.

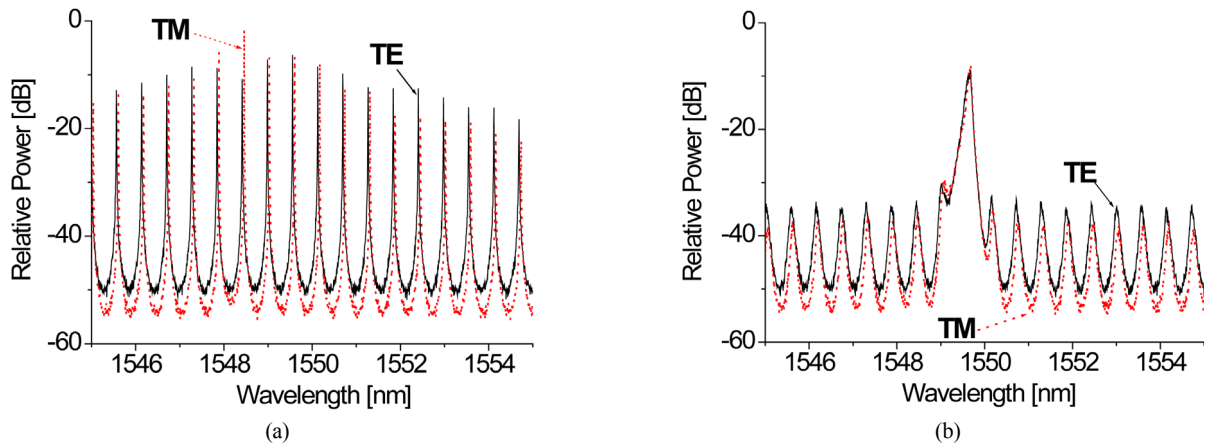


FIG. 6. Lasing spectra of unpolarized MQW FP-LD (a) before injection-locking and (b) after injection locking.

기반으로 편광 MQW LD의 출력 스펙트럼을 계산한 결과로 주입 잠금 전과 후로 나누어 도시하였다. 주입된 NB-ASE (Narrow band amplified spontaneous) 잡음의 중심파장은 TE 모드의 발진모드들 중 하나의 모드에 일치하도록 하였고, 3-dB 밴드 폭은 50GHz 이며 -13dBm의 파워를 갖는다. 또한 주입 NB-ASE 잡음은 TE, TM 편광이 균일하게 섞여 있는 것으로 가정하였다. 레이저 다이오드에 인가되는 전류는 19.8 mA로 하여, 주입 잠금 전의 레이저 출력 파워가 6 mW 가 되도록

하였다. MQW 구조에서는 TM 모드의 이득이 낮고 Transparency carrier density가 TE 모드의 경우 보다 크기 때문에 TM 모드는 발진하지 못하고, 주입 잠금 후에 TE 모드의 부 모드 억제율은 20 dB 이상으로 나타남을 알 수 있다.

그림 6은 표 4에 제시된 파라미터를 기반으로 무편광 MQW LD의 출력 스펙트럼을 계산한 결과로 주입 잠금 전과 후로 나누어 도시하였다. 이 경우에도 인가 전류를 25.3 mA로 하여, 주입 잠금전 출력 파워가 6 mW가 되도록 하였다.

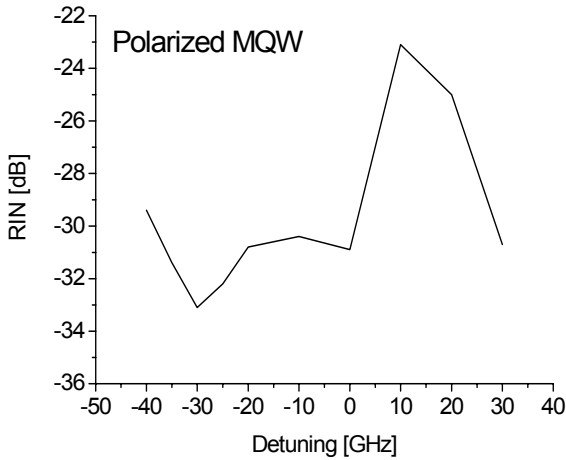


FIG. 7. RIN versus detuning for the case of polarized MQW.

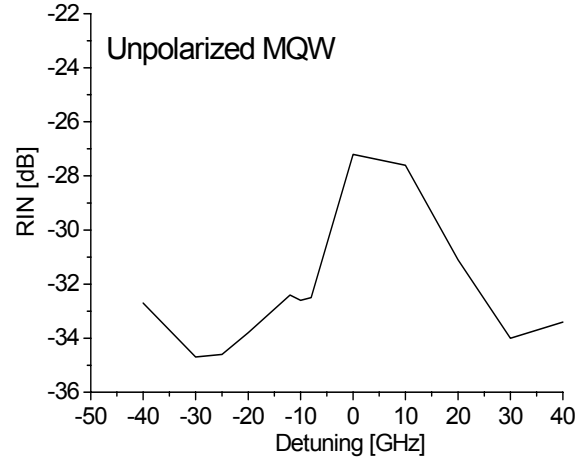


FIG. 9. RIN versus detuning for the case of unpolarized MQW.

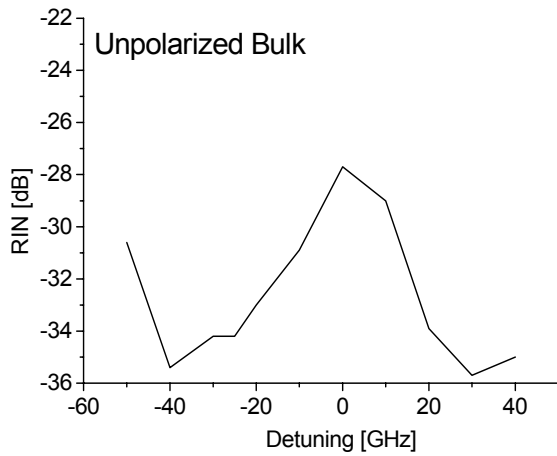


FIG. 8. RIN versus detuning for the case of unpolarized bulk.

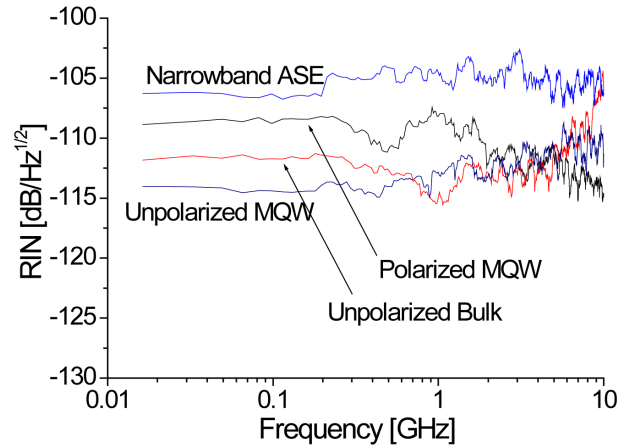


FIG. 10. RIN spectrum for three different active region cases.

TE 모드와 TM 모드의 발진파장이 거의 일치하는 경우의 시뮬레이션 결과이며, 주입 잠금 전에 TE와 TM 모드가 거의 비슷하게 발진하며, 주입 잠금 후에 TE와 TM 모드 둘 다 20 dB 이상의 부 모드 억제율을 보인다. 주입 광은 무 편광 상태를 유지하기 때문에, 무 편광 MQW LD의 주입 잠금 효율이 편광 MQW LD에 비하여 약 2배 정도 우수하여 고속 동작에 유리할 것으로 기대된다.

### 3.3. 편광 MQW, 무편광 벌크, 무편광 MQW 활성층에 따른 RIN 특성

표 2, 3, 4에 제시된 세 가지 활성층 구조 파라미터를 이용하여, RIN (Relative Intensity Noise)을 계산하여 detuning의 함수로 도시하였다. 출력 광 파워가 6 mW 인 경우를 기준으로 하여 고려하였다. 여기서 detuning은 주입되는 ASE의 중심파장과 주입잠금 레이저 다이오드의 모드 위치가 어긋나는 주파수 값이다. 앞에 설명한 바와 같이 가우시안 필터링된 잠금이 주입되도록 한 후에, 주입잠금 레이저 다이오드의 주입단면에서 나오는 레이저 출력을 동일하게 잠금 필터와

동일한 필터로 필터링한 후에 RIN을 계산하였다. 그림 7, 8, 9에 편광 MQW, 무편광 벌크, 무편광 MQW 인 경우를 나타내었다. 여기서 계산된 전체 RIN 값은 RIN 스펙트럼 계산 후에 125 MHz 이내의 주파수 성분들의 합을 나타낸 것이다. 편광 MQW의 경우는 -30 GHz의 detuning에서 약 -33dB의 RIN 특성을 보인다. 무편광 벌크 활성층의 경우는 -40 GHz 근처에서 약 -35.5, 무편광 MQW의 경우는 -27 GHz 근처에서 약 -35 dB의 RIN 특성을 보임을 알 수 있다. 즉, 무편광 특성을 가지는 활성층을 사용한 주입잠금 레이저 다이오드가 약 2~3 dB 작은 RIN 특성을 보임을 알 수 있다. 그림 10에는 주입되는 NB-ASE 잠금과 세가지 활성층의 경우에 RIN 스펙트럼을 나타내었는데, 저주파 대역에서 무편광 벌크 구조가 편광 MQW 구조에 비하여 약 2.5 dB 작은 RIN 특성을 보이고 무편광 MQW 구조는 약 5 dB 작은 RIN 특성을 나타냄을 알 수 있다. 세가지 경우 모두 주입 잠금된 경우의 RIN 잡음값이 NB-ASE의 RIN 잡음에 비하여 개선된 특성을 보인다. 이는 식 (10)에 보인 바와 같이 광파워의 증가에 따라 캐리어 밀도가 감소하게 되어 이득 포화 현상이 일어날



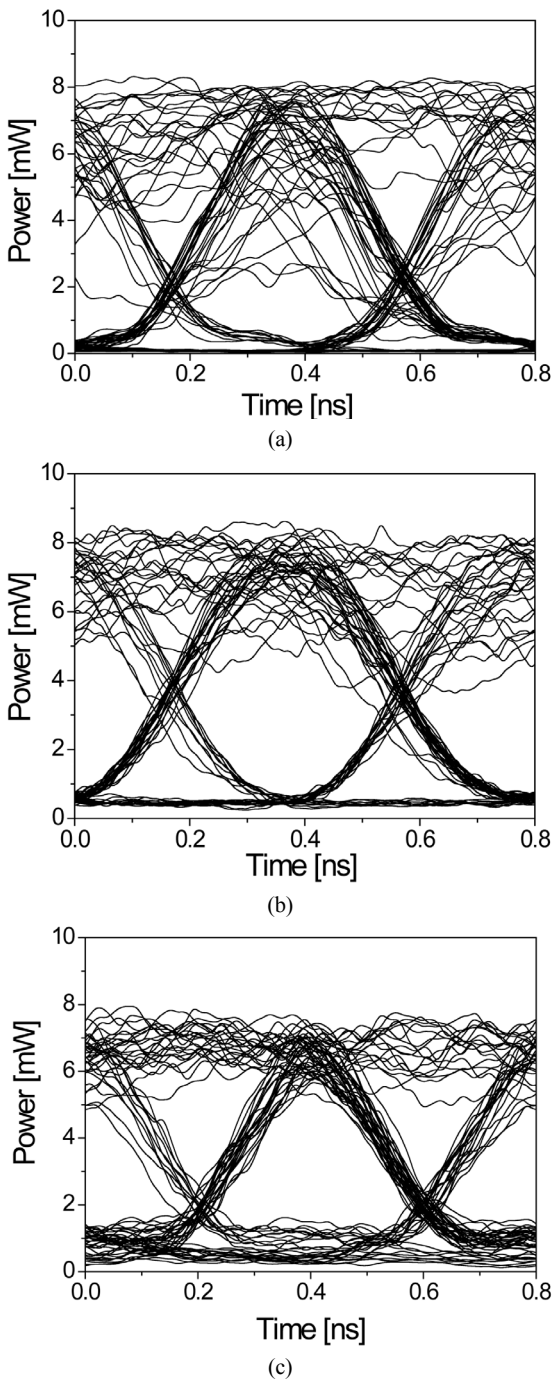


FIG. 11. (a) 2.5Gbps modulation characteristics for injection-locked FP-LD with polarized MQW active layer, (b) with unpolarized bulk active layer, and (c) with unpolarized MQW active layer.

뿐만 아니라, 식 (11)에 보인 비선형 이득 억제 현상<sup>[13]</sup>에 의하여 강도 잡음이 억제되기 때문이다. 무편광 활성층의 경우가 편광 MQW 구조에 비하여 좋은 RIN 특성을 보이는 이유는 처음에 기대한 바와 같이 TE와 TM 편광 성분이 같이 주입 잠금되어 광 파워가 TE 및 TM 편광에 나누어 존재하기 때문에 beating noise 가 약 2배 정도 감소하기 때문이다. 편광 MQW의 경우는 RIN 값이  $-109 \text{ dB/Hz}^{1/2}$ , 무 편광 벌크의

경우는  $-112 \text{ dB/Hz}^{1/2}$ , 무 편광 MQW의 경우는  $-114 \text{ dB/Hz}^{1/2}$  정도로 나타나서, 무 편광 벌크 또는 무편광 MQW 구조의 FP-LD가 고속 동작에 훨씬 유리할 것으로 사료된다. 특히, 무편광 MQW의 경우 벌크 활성층에 비하여 임계전류가 작고, 인가 전류대 광파워 기울기가 훨씬 크기 때문에 고속 변조에 가장 유리할 것으로 보인다.

2.5Gbps의 속도로 변조하는 경우의 아이 특성을 계산한 결과를 편광 MQW의 경우 그림 11(a), 무편광 벌크 활성층의 경우를 그림 11(b), 무편광 MQW 활성층의 경우를 그림 11(c)에 나타내었다. 주입된 NB-ASE의 파워는  $-13 \text{ dBm}$ 이고, 선폭은  $50 \text{ GHz}$ 이다. 레이저 다이오드에 인가한 전류 패턴의 High 신호는 광 출력이 약  $7 \text{ mW}$ 가 되고, Low 신호는 임계 전류 근처로 인가하였다. 또한, 약  $0.2 \text{ ns}$ 의 상승 시간, 즉 약  $1.75 \text{ GHz}$ 의 대역폭을 가지는 저역 필터를 이용하여 저역 필터링하였다. TE 모드가 TM 모드에 비교하여 광 이득 특성이 크고 TM 모드의 광 이득 특성이 현저히 작은 편광 MQW 구조의 경우는 아이 다이어그램의 눈 열림이 작고 노이즈가 심한 것을 확인할 수 있다. 반면에 TE, TM 모드 간에 광이득 특성이 유사한 무편광 구조의 경우는 아이 다이어그램의 눈열림이 크고 편광 MQW 구조에서 보다 노이즈가 훨씬 작음을 알 수 있다. 특히, 무편광 MQW의 아이 특성이 무편광 벌크 구조에 비하여 우수함을 확인할 수 있는데, 이는 2장에서 계산한 바와 같이 무편광 MQW 구조의 sheet carrier 밀도에 대한 모드 이득 특성이 무편광 벌크 구조에 비하여 우수하기 때문이다. 즉, 표 5에서 볼 수 있듯이 무편광 MQW 구조의 임계전류가 무편광 벌크 구조에 비해서 작고, 전류대 광파워 기울기는 무편광 MQW 구조가 더 크게 나타난다. 따라서, 무편광 MQW 구조가 무편광 벌크 구조에 비하여 고속 변조 특성이 우수하게 나타나는 것이다. 결과적으로 주입 잠금 레이저 다이오드를  $2.5 \text{ Gbps}$  급 이상으로 고속 변조 하기 위해서는 TE, TM 모드 간에 광 이득 특성이 유사한 무편광 구조로 설계된 레이저 다이오드를 사용하는 것이 유리하다. 특히 무편광 MQW 구조를 적절히 설계 및 구현할 수 있다면 이 구조가 가장 유리할 것임을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 현재 WDM-PON용 광원으로 많은 관심을 끌고 있는 주입 잠금 패브리-페롯 레이저 다이오드에 대한 특성을 시영역 대신호 모델을 이용하여 분석하였다. 벌크 구조의 무편광 활성층과 MQW 구조의 무편광 활성층 구조를 제시하고, 이득 특성을 모델링하고, 편광 MQW 구조의 특성과 비교하였다. 적절히 설계된 무편광 MQW 구조의 경우 무편광 벌크 구조에 비하여 우수한 모드 이득 특성을 보임을 확인하였다. 이에 따라 무편광 MQW 구조가 벌크 구조에 비하여 임계 전류는 작고, 전류 대 광 파워 기울기는 크게 나타남을 알 수 있다.

시영역 대신호 시뮬레이션을 이용한 RIN 계산 결과를 보면, 무편광 특성을 가지는 활성층을 사용한 주입잠금 레이저

다이오드가 약 2~3 dB 작은 RIN 특성을 보임을 알 수 있다. RIN 스펙트럼을 계산한 결과를 보면, 편광 MQW의 경우는 RIN 값이  $-109 \text{ dB/Hz}^{1/2}$ , 무 편광 벌크의 경우는  $-112 \text{ dB/Hz}^{1/2}$ , 무 편광 MQW의 경우는  $-114 \text{ dB/Hz}^{1/2}$  정도로 나타나서, 무 편광 벌크 또는 MQW 구조의 FP-LD가 고속 동작에 훨씬 유리한 것으로 나타났다. 특히, 무편광 MQW의 경우 벌크 활성층에 비하여 임계전류가 작고, 인가 전류대 광파워 기울기가 훨씬 크기 때문에 고속 변조에 가장 유리할 것으로 보인다. 또한 편광 다중양자우물 구조와 무 편광 벌크 활성층을 가지는 레이저 다이오드에 대한 주입 잠금 시의 2.5 Gbps 급 변조 시의 아이 특성을 비교하였다. TE와 TM의 이득 특성이 거의 동일한 무편광 구조의 경우가 아이 열림 특성이 훨씬 우수함을 확인하였다. 결과적으로 2.5 Gbps 급의 고속 주입잠금 WDM-PON용 광원으로서 무편광 특성을 가지는 광원을 사용하는 것이 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 한국산업단지공단(주) 엘디스에 대한 2011년도 생산기술사업화 지원사업(현장맞춤형 기술개발 부문, 이 전기술사업화 부문)중 위탁연구개발비 지원을 받아 수행된 것임.

### 참고문헌

1. C. Ollivry, "Why Fiber? Why Now?," FTTH Council Europe (Montpellier, 2004).
2. C.-H. Lee, W. Sorin, and B.-Y. Kim, "Fiber to the home using a PON infrastructure," *IEEE J. Lightwave Technol.* **24**, 4568 (2006).
3. M.-H. Kim, S.-M. Lee, S.-G. Mun, and C.-H. Lee, "A 240 km reach DWDM-PON of 8-Gb/s capacity using an optical amplifier," *J. Opt. Soc. Korea* **11**, 1-4 (2007).
4. H.-K. Lee, H.-S. Cho, J.-Y. Kim, and C.-H. Lee, "A WDM-PON with an 80 Gb/s capacity based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diode," *Opt. Express* **18**, 18077-18085 (2010).
5. S. L. Chuang, *Physics of Optoelectronics Devices* (Wiley-Interscience Publication, New York, USA, 1995), pp. 176-190.
6. K.-Y. Park, S.-G. Mun, K.-M. Choi, and C.-H. Lee, "A theoretical model of a wavelength-locked Fabry-Pérot laser diode to the externally injected narrow-band ASE," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1797-1799 (2005).
7. J.-Y. Kim, S.-R. Moon, and C.-H. Lee, "Analysis of noise evolution in an injection seeded WDM-PON," in *Proc. The 16th Opto-Electronics and Communications Conference, OECC 2011* (Kaohsiung, Taiwan, July, 2011), pp. 11-12.
8. B.-S. Kim, Y. Chung, and J.-S. Lee, "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 787-794 (2000).
9. L. M. Zhang and J. E. Carroll, "Large signal dynamic model of the DFB laser," *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 604-611 (1992).
10. L. M. Zhang, S. F. Yu, M. C. Nowell, D. D. Marcenac, J. E. Carroll, and R. G. S. Plumb, "Dynamic analysis of radiation and side mode suppression in second order DFB laser using time-domain large-signal travelling wave model," *IEEE J. Quantum Electron.* **30**, 1389-1395 (1994).
11. L. M. Zhang and J. E. Carroll, "Semiconductor 1.55 mm laser source with gigabit/second integrated electroabsorptive modulator," *IEEE J. Quantum Electron.* **30**, 2537-2577 (1994).
12. D. Marcenac and J. E. Carroll, "Quantum mechanical model for realistic Fabry-Perot lasers," *Proc. IEEE* **140**, 157-171 (1993).
13. F. Girardin and G.-H. Duan, "Characterization of semiconductor lasers by spontaneous emission measurements," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **3**, 461-470 (1997).