

Fabry-Perot 레이저 다이오드의 Missing Mode

(Missing Modes in Fabry-Perot Laser Diodes)

이동수*

(Dong-Soo Lee)

요 약

Fabry-Perot 레이저 다이오드의 missing mode의 원인으로 의심되는 활성층 내의 구조적 결함과 리플의 영향을 TDLM(time domain laser model)방식을 사용하여 모델링하였다. 보다 정확한 모델링의 결과를 얻기 위하여 여러 가지 비선형 효과를 추가 고려하였다. 이를 이용하여 레이저 다이오드를 시뮬레이션하였고, 모드 스펙트럼(mode spectrum)을 구하였다. 실제 레이저 다이오드의 missing mode를 측정하기 위한 실험 장비를 구성하여 측정 결과를 추출하였고, 시뮬레이션과 측정 실험 결과로부터 결론을 내렸다.

Abstract

Mode missing of Fabry-Perot laser diodes has been modeled using the time domain laser model(TDLM). Fabry-Perot laser diodes that have structure of ripple in the waveguide of active layer or defects inside the active layer were simulated. For accurate simulation, the nonlinear effects were included such as spatial hole burning(SHB) and gain saturation. From the simulation results, it was founded that the defect inside the active layer in laser diodes has a strong influence on mode missing rather than the waveguide ripple. The simulation results are confirmed with the fabricated Fabry-Perot laser diodes by measuring the longitudinal mode spectra as a function of temperature from 25[°C] to 85[°C].

Key Words : Fabry-Perot laser diode, missing modes, longitudinal mode spectrum, edge ripple, active layer, TDLM(time domain laser model)

1. 서 론

다가오는 정보통신 시대에는 각 가정마다 화상전화, CATV, 인터넷 등 수많은 멀티미디어 서비스가

대중화 될 것이며, 이에 따라 막대한 양의 정보처리 시스템이 요구될 것이다. 이를 위해 광통신 시스템이 구축될 것이고, 경제성을 고려하여 Fabry-Perot (FP) 레이저 다이오드를 이용한 직접 변조 방식이 사용될 것으로 예측된다. 특히 저가품의 FP 레이저 다이오드는 이런 수요에 대처하기 위해 수년 내에 실용화를 목표로 하는 FTTH(fiber to the home)에 사용되어질 전망이다. 또한 현재에도 단거리 및 저

* 주저자 : 김포대학 정보통신계열 교수
Tel : 031-999-4776, Fax : 031-999-4775
E-mail : dslee@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2004년 10월 12일
1차심사 : 2004년 10월 15일
심사완료 : 2004년 11월 5일

속 광통신 시스템에서 쓰이는 레이저의 대부분을 차지하고 있고, 그 응용범위가 확대되고 있다. 이러한 시스템에서 전송 특성을 만족하기 위해서 레이저의 종축 모드(longitudinal mode) 안정도는 고려되어야 할 중요한 항목 중의 하나이다[1]. 레이저 다이오드에서 모드의 불안정은 전송 시스템의 성능을 크게 저하시키기 때문에, 레이저 다이오드의 경우 동작온도 범위(-45~85[°C])에서 missing mode의 숫자가 가능한 한 적어야 한다[1]. 또한 레이저의 제작 과정에서 메사 에칭(mesa etching), 전류 차단층(blocking layer) 생성과 같은 단계를 거치면서 활성층(active layer)의 결함(defect)이나 도파로(waveguide)에 리플(edge ripple)이 생길 수 있으며 이것이 레이저의 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 FP 레이저 다이오드의 모델링을 통해 mode missing의 원인으로 의심되는 활성층의 결함과 도파로의 리플이 종축 모드 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였다. 모델링의 정확성을 높이기 위해 SHB(spatial hole burning), 이득 포화 현상(gain saturation)과 굴절률의 변화 등의 비선형 효과를 포함하였다[2].

2. Missing mode를 가지는 FP 레이저 다이오드의 모델링

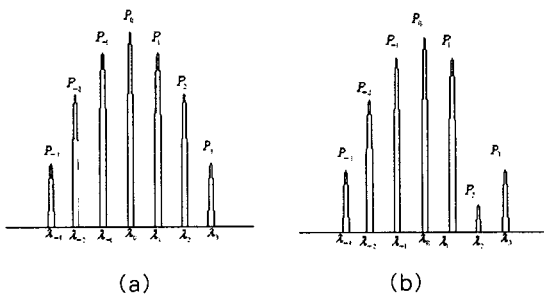


그림 1. 다중 모드 스펙트럼
Fig. 1. Multi-mode Spectrum

그림 1은 FP 레이저 다이오드의 스펙트럼의 예를 보여주고 있다. 그림 1(a)는 FP 레이저 다이오드의 전형적인 스펙트럼인 가우스 (Gaussian)형태를 보

여준다. 그림 1(b)에서 λ_2 모드의 강도 P_2 는 인접한 모드의 강도 P_3 보다 작으며, 중심 모드의 강도 P_0 의 1/4보다도 작다. 이 경우 λ_2 모드를 missing mode로 간주한다.

레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼 특성에 관한 이론적인 분석은 공동(longitudinal cavity)을 전파해 나가는 1차원 파형 방정식에 기초를 둔다. 소자의 굴절률은 EIM(effective index method)를 사용하여 계산될 수 있고[4], 이를 통해 3차원 구조는 1차원 구조로 대체될 수 있다[3]. TDLM은 소자의 3차원 구조를 1차원 구조로 바꾸어서 표현하고, 공진기를 세로 방향을 따라서 여러 개의 작은 섹션(section)으로 나누어 각각의 섹션을 기본으로 하는 해석 방법이다. TDLM은 여러 가지 비선형 효과를 고려하여 실제에 맞는 정확한 모델링이나 복잡한 구조를 가지는 집적화 소자의 분석에 적용시킬 수 있고, 반복적인(recursive)형태를 가지기 때문에 컴퓨터에서 구현하기가 쉽다는 장점이 있다. 그림 2는 TDLM을 기본으로 하는 FP 레이저 다이오드 대신호 모델의 개념도이다. 여러 가지 매개 변수(parameter)들이 시간 t 부터 $t+\Delta t$ 사이에 i 번째 섹션에서 변하지 않는다고 가정하면, 식(1)을 이용하여 시간 t 에서의 입력 전진파 A_i 와 입력 후진파 B_{i+1} 로부터 시간 $t+\Delta t$ 에서의 출력 전진파 A_{i+1} 와 출력 후진파 B_i 를 계산할 수 있다.

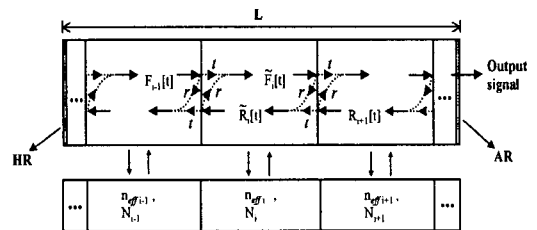


그림 2. TDLM을 기본으로 하는 레이저 다이오드 모델의 개념도
Fig. 2. Laser diode model based on TDLM

$$\hat{F}_i[t] = t' F_{i-1}[t-1] + r' R_i[t-1] \quad (1-a)$$

$$\hat{R}_i[t] = t' R_{i+1}[t-1] + r' F_i[t-1] \quad (1-b)$$

여기서 r' 은 반사 계수이고 t' 은 전달 계수이다. $F_{i-1}[t-1]$ 과 $R_{i+1}[t-1]$ 은 각각 시간 $t-\Delta t$, 섹션 $i-1$ 과 $i+1$ 에서의 전진파와 후진파이다. 시간 영역 모델에서 디지털 필터의 출력파는 입력파와 필터의 주파수 응답 $h[n]$ 의 컨볼루션(convolution)으로 주어진다.

$$F_i[t] = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{F}[t-n]h[n] \quad (2-a)$$

$$R_i[t] = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{R}_i[t-n]h[n] \quad (2-b)$$

섹션 길이 ΔL 을 따라, 이득 중심 주파수 ω_0 에서의 이득은 다음과 같다.

$$g(\omega_0) = \exp\{b\Gamma(N_i(t) - N_0)\Delta L/2\} \quad (3)$$

여기서 b 와 Γ 는 각각 미분 이득(differential gain)과 광 가둠 계수(confinement factor)이고, N_0 는 투명 캐리어 밀도(transparency carrier density)이다. 캐리어 밀도와 α (linewidth enhancement factor)로부터 계산된 위상 변이는 다음과 같이 주어진다[5].

$$\phi = -ab\Gamma\Delta LN_i(t)/2 \quad (4)$$

섹션 안에서의 레이저 다이오드의 구조에 따라 변하는 유효 굴절률과 광 가둠 계수를 구하기 위해서 EIM를 사용하였다. 유효 굴절률은 다음과 같은 관계를 갖고 캐리어 밀도의 변화에 따라 변한다.

$$n_{eff}(i,t) = n_{eff}(i,t-1) + \Gamma \frac{dn}{dN} N_i(t-1) \quad (5)$$

반도체 레이저의 dynamics는 잡음이 가미된 캐리어 밀도에 대한 rate equation에 의해 모델링 된다. 비선형 이득은 이득 압축 요소 ε 을 사용함으로써 포함된다.

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - (AN_i(t) + BN_i(t)^2 + CN_i(t)^3) - \frac{\nu \mu \Gamma b(N_i(t) - N_0)S_i(t)}{1 + \varepsilon S_i(t)} \quad (6)$$

여기서 인덱스 i 는 각각의 다른 섹션을, I 는 주입 전류를, V 는 활성층의 부피를 나타내며, q 는 전하량, A, B 와 C 는 재결합 계수들이다. 섹션 i 에서 광자 밀도 $S_i[t]$ 와 오른쪽 단면으로부터의 출력전력 $P(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_i[t] = (F_i[t]^2 + R_i[t]^2)/h\nu \quad (7)$$

$$P(t) = h\nu wdS[t]\nu_g \quad (8)$$

여기서 h 는 평균 광자 에너지, ν_g 는 군속도이고, w 와 d 는 레이저 다이오드 안의 활성층의 너비와 두께이다. 본 시뮬레이션에서는 $1.3\mu m$ 에서 동작하는 전형적인 BH 구조의 FP 레이저 다이오드가 고려되었다.

3. FP 레이저 다이오드의 시뮬레이션

BH(Buried-heterostructure : 매립형 이종 구조) 형태의 레이저 다이오드를 제작하기 위해서는 여러 번의 결정성장이 필요하며 주로 MOVPE(metal organic vapor phase epitaxy)방법을 이용한다. 첫 번째 결정성장에서는 DH(double-heterostructure : 이종 헤테로 구조) 구조를 성장시킨다. 이와 같이 성장된 웨이퍼에 필름 공정을 통하여 에칭 패턴을 형성시킨 후 이를 마스크로 하여 메사 에칭을 수행한다. 이후 전류 차단층 2차 결정성장을 수행한다. 위와 같이 DH구조를 성장할 때 격자 구조에서 위치 결함(dislocation)이나 불순물에 의해서 레이저 다이오드의 활성층 내에 결함이 존재하게 될 수 있으며, 메사 에칭 공정에서는 에칭 액의 혼합정도나 에칭 되는 부분에 포함된 불순물 등에 의해 불균일한 에칭 속도를 가지게 되어 활성층의 도파로 부분에 미세한 리플이 발생할 수 있다. 이와 같이 레이저 다이오드의 제작 과정에서 발생한 활성층의 결함이나 리플은 레이저 다이오드의 발진 모드에 영향을 미칠 수 있다[7][8]. 이러한 활성층의 결함이나 도파로의 리플과 missing mode와의 관계에 대해 알아보기 위해 주입 전류가 30[mA]이고, 레이저의 양단에 각각 15[%]의 AR(Anti Reflection) 코팅과 70[%]의

Fabry-Perot 레이저 다이오드의 Missing Mode

HR(High Reflection) 코팅된 BH 구조의 FP 레이저 다이오드를 사용하여 레이저다이오드를 모델링하였다. 그림 3은 계산에 의한 1.3[μm] BH 구조의 FP 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼을 보여 준다. 이때 스펙트럼은 가우스 분포를 하고 있다.

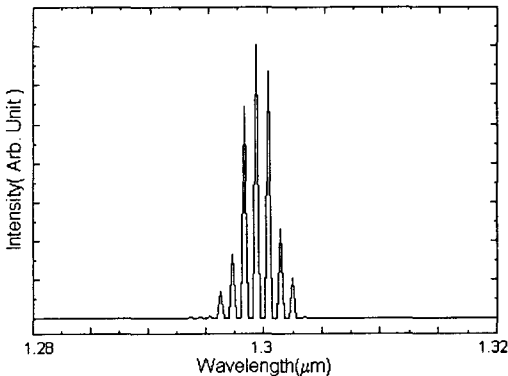


그림 3. FP 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼
Fig. 3. Longitudinal mode spectrum for FP-LD

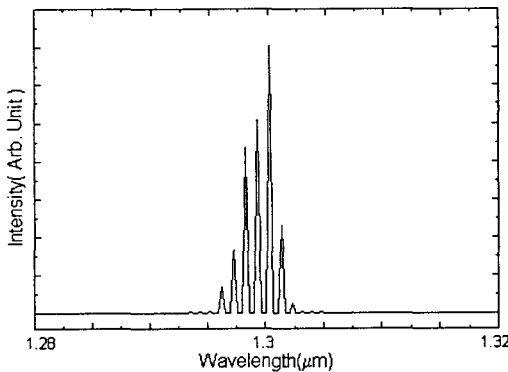


그림 4. 도파로에 리플이 있는 경우의 종축 모드 스펙트럼
Fig. 4. Longitudinal mode spectrum with ripples in the waveguide

첫째로 mode missing의 원인으로 예측되는 리플 구조를 고려하여 리플이 종축 모드 스펙트럼에 미치는 영향을 모델링하였다. 이는 각각의 섹션을 임의의 길이와 너비를 갖게 함으로써 모델링하였다. 그림 4는 시뮬레이션 결과이다. 이를 통하여 도파로의 리플은 종축 모드 스펙트럼에 그다지 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알았다. 둘째로 활성층의 부정합이나 결함은 전기장 진행 시 산란의 중심이 될 수 있

다. 그림 5는 활성층 내의 결함의 위치를 나타내 준다. 그림에서 활성층의 폭은 1[μm]이고 길이는 250[μm]이다. 결함에 의한 흡수층에 대해서는 흡수 계수의 변화는 물론 굴절률의 변화까지 함께 고려하였다. 흡수계수는 400[cm^{-1}]이고 반사율은 약 0.02[%]이다.

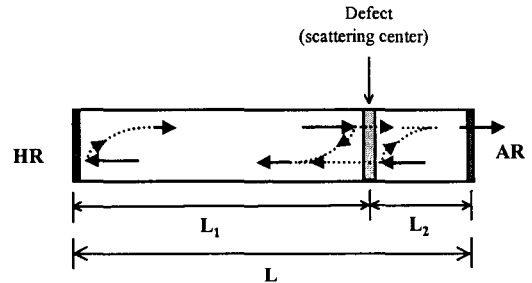


그림 5. 활성층 내에서 결함의 위치
Fig. 5. Location of defects inside the active layer

우선 결함의 위치가 HR코팅 면 근처에 있을 경우를 살펴보았다. $L_1=L/8$ 의 위치에 결함이 있는 경우의 종축 모드 스펙트럼이 그림 6에 나타나 있다. 스펙트럼은 mode missing에 이르지 못하지만 레이저 다이오드 내의 결함에 의해 영향을 받는다.

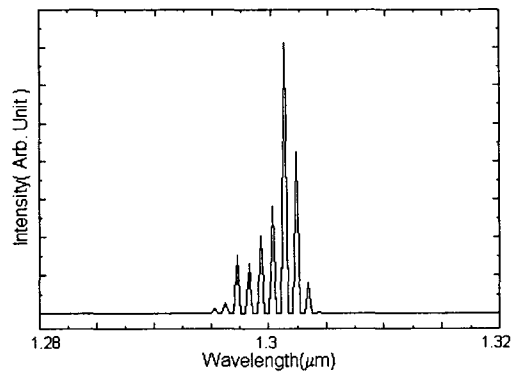


그림 6. HR코팅 면에 결함이 있는 경우 종축 모드 스펙트럼
Fig. 6. Longitudinal mode spectrum with the defect near HR

그러나 AR코팅 근처인 $L_2=L/8$ 에 결함이 있을 경우인 그림 7(a)의 종축 모드 스펙트럼은 레이저 다이오드 내의 결함이 missing mode를 일으킴을 알 수 있다. 그림 7(b)는 $L_2=L/9$ 위치에 결함이 있을 경우

에 대한 종축 모드 스펙트럼이다. Missing mode가 2개 나타나는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과, 레이저 다이오드 안의 리플보다 AR 코팅에 가까이 있는 결합이 mode missing의 원인이 된다는 것을 알았다. 또한 결합의 위치와 상태에 따라서 missing mode의 개수가 늘어날 수도 있다는 것을 알 수 있었다.

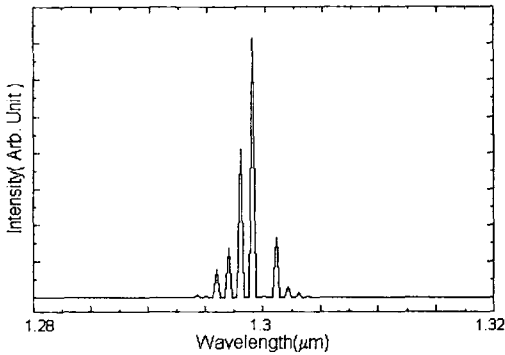


그림 7(a). missing mode가 1개 있는 경우의 종축 모드 스펙트럼
Fig. 7(a). Longitudinal mode spectrum with 1 missing mode

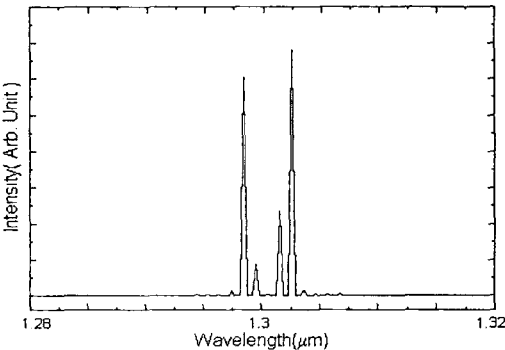


그림 7(b). missing mode가 2개 있는 경우의 종축 모드 스펙트럼
그림 7(b). Longitudinal mode spectrum with the 2 missing modes

4. 1.3[μm] InGaAsP/InP FP 레이저 다이오드 종축 모드 스펙트럼 측정

1.3[μm] InGaAsP/InP FP 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼을 측정하기 위해 그림 8과 같이 실험 장비를 구성하였다.

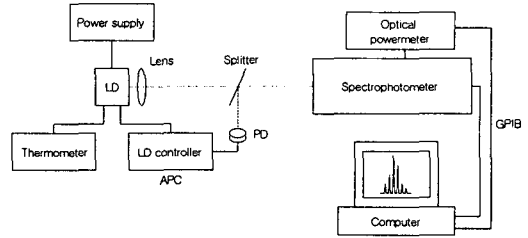


그림 8. 실험 장비 구성도
Fig. 8. Experimental setup

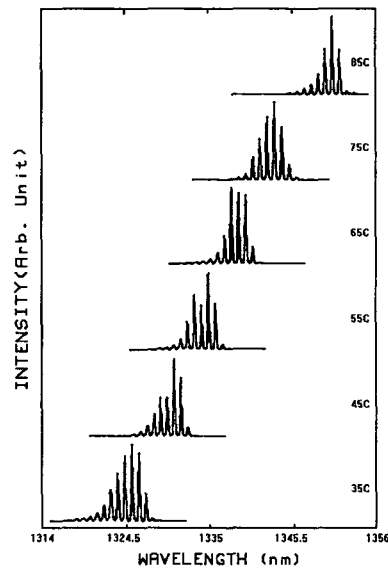


그림 9. missing mode가 없는 경우의 종축 모드 스펙트럼
Fig. 9. Longitudinal mode spectrum without missing mode

과장에 대한 광 전력을 측정하기 위해 분광 광도계(spectrophotometer)와 광 전력계를 사용하였다. 또한 두 장비를 컴퓨터와 연결하여 온도를 10[°C]간격으로 측정하도록 조절하면서 측정 데이터를 컴퓨터에 저장하여 출력하였다. 시뮬레이션과는 달리 실제에서는 온도가 증가함에 따라서 이득 곡선이 장파장 쪽으로 이동하기 때문에 활성층의 결합이 있어도 그것이 발진하지 않는 모드에 영향을 미친다면 스펙트럼 상에서는 missing mode로 나타나지 않는다. 측정하는 동안 출력 전력을 5[mW]로 유지하였고, 30[mA]의 입력전류로 각 온도에서 FP 레이저 다이오드의 스펙트럼 모양을 관찰하였다. 측정에 사용된

Fabry-Perot 레이저 다이오드의 Missing Mode

레이저들은 모두 BH 구조였으며 측정된 스펙트럼은 온도가 증가하면서 $0.4[\text{nm}/^\circ\text{C}]$ 정도의 비율로 장파장 쪽으로 이동하였다. 그림 9는 상온 이상에서 missing mode가 없는 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼을 보여준다. 그러나 그림 10의 다른 회사의 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼에서는 missing mode가 발생함을 볼 수 있었다.

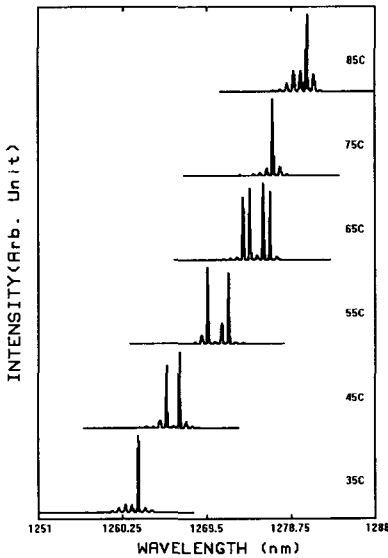


그림 10. missing mode가 있는 경우의 종축 모드 스펙트럼

그림 10. Longitudinal mode spectrum with missing modes

5. 결 론

본 논문에서는 $1.3[\mu\text{m}]$ Fabry-Perot 레이저 다이오드를 TDLM 방식을 이용하여 모델링하였고 정확성을 높이기 위하여 비선형 효과들을 고려해 주었다. mode missing의 원인으로 의심되는 레이저 다이오드의 활성층에 리플이 있는 경우와 활성층에 결함이 있는 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 그 결과 리플이 있는 경우는 mode의 missing에 큰 영향을 미치지 않음을 알았다. 활성층에 결함이 있는 경우는 AR쪽에 결함이 있는 경우와 HR쪽에 결함이 있는 경우 두 가지로 나누어 시뮬레이션하였다. 그 결과 활성층에 존재하는 결함이 mode의 missing에 큰 영

향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 특히 AR쪽에 결함이 있을 때 mode의 missing이 더 심하게 일어남을 알 수 있었다. 마지막으로 실제 다이오드에서는 어느 정도 missing mode가 발생하는가를 관찰하기 위해서 레이저 다이오드의 종축 모드 스펙트럼을 측정하여 보았다. 측정 결과 몇몇 레이저 다이오드에서 발생하는 missing mode를 관찰할 수 있었다.

이 논문은 2004학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] D.A. Lkozłowski, J.S. Young, R.G.S plumb, and J.M.C England, "Time -domain modeling of mode suppression in $1.3\mu\text{m}$ Fabry-Perot lasers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, pp.755-757, Jun. 1996.
- [2] C.Y.J. Chu and H. Chafouri-shiraz, "Analysis of gain and saturation characteristics of a semiconductor laser optical amplifier using transfer matrices", J. Lightwave technol., vol. 12, pp. 1378-1386, Aug. 1994.
- [3] A.J. Lowery, "New dynamic semiconductor laser model based on the transmission-line modeling method", IEE proceeding, vol. 134, Pt. J, pp. 281-289, Oct. 1987.
- [4] Jens Buus, "The effective index method and its application to semiconductor lasers", IEEE J. Quantum Electron, vol. QE-18, no.7, pp. 1083-1089, 1982.
- [5] D.D. Marcenac and J.E. Carroll, "Quantum-mechanical model for realistic Fabry-perot lasers", IEE Proceedings, vol. 140, Pt. J, pp. 320-324, Jun. 1993.
- [6] A.J. Lowery, "New inline wide band dynamic semiconductor laser amplifier model", IEE Proceedings, vol.135, Pt J, pp.242-250, Jun. 1988.
- [7] F.H. Peters and D.T. Cassidy, "Strain and scattering related spectral output of $1.3(\mu\text{m})$ InCaAsP semiconductor diode lasers", Applied Optics., vol. 30, pp.1036-1041, Mar. 1991.
- [8] F.H. Peters and D.T. Cassidy, "Spatially and polarization resolved electroluminescence of $1.3(\mu\text{m})$ InCaAsP semiconductor diode lasers", Applied Optics, vol.28, pp. 3774-3750, Sep. 1989.
- [9] Hentschel, Fiber Optics Handbook, Hewlett Packard, 1988.

◇ 저자소개 ◇

이동수 (李同洙)

1958년 11월 8일생. 1981년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1999년 고려대학교 공과대학원 졸업(박사). 2000년~현재 김포대학 정보통신계열 교수.