

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.1.51>

JIWIT 2012-1-7

원형 수직 캐비티 표면 광방출 레이저의 모드특성

Mode Behavior of Circular Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요약 새롭게 발전시킨 등가 전송선로 해석법을 이용하여 원형 수직 캐비티 표면 광방출 레이저(VCSELs)의 공진 특성을 연구되었다. VCSEL을 설계하기 위하여 필요한 광학변수들인 주기적인 Bragg 거울에서 나타나는 차단대역 특성과 반사율을 분석하였다. 또한, 설계된 VCSEL의 양자효율과 문턱 전류밀도를 평가하기 위하여 원형 모드 전송선로 해석법의 횡방향 공진조건을 이용하였다. 이 해석법은 원형 VCSEL의 광학적 특성들을 분석하기 위한 수치해석 시간을 현저하게 줄여 주며, 명확한 설계개념을 제공한다.

Abstract The resonance properties of circular vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are studied by using a newly developed equivalent network approach. Optical parameters, such as the stop-band or the reflectivity of periodic Bragg mirrors and the resonance wavelength, are explored for the design of these structures. To evaluate the differential quantum efficiency and the threshold current density, a transverse resonance condition of circular modal transmission-line theory is also utilized. This approach dramatically reduces the computational time as well as gives an explicit insight to explore the optical characteristics of circular VCSELs.

Key Words : Circular Modal Transmission Line Theory, Circular VCSELs, Bragg mirrors

1. 서론

1965년에 Melngalis^[1]가 처음으로 10°K에서 InSb를 사용하여 제작한 표면 광방출 레이저를 발표한 이후 수직 캐비티 표면 광방출 레이저(VCSEL)들은 장거리 광통신용이나 광소자들 사이의 신호 전달용 광소자로 널리 사용되고 있다. 이와 같이 광원으로 널리 사용되는 이유는 낮은 문턱 전류밀도와 단일 모드 광섬유에서 높은 전력 전달효율에 기인한다. 더욱이, 2차원 배열로 집적하기 매우 편리한 구조적 특성도 VCSEL이 광원으로 널리 사용되는 이유이다. 그러나, 수직형 배열 구조인 VCSEL은

공진모드가 에너지를 흡수하여 레이저를 방출하기 위한 이득구간이 매우 짧기 때문에 Bragg 거울들의 반사율을 매우 높게 설계하여 낮은 문턱 전류밀도가 발생하도록 설계해야 한다.

이와 같은 목적을 위하여 Shimizu와 그 연구진^[2]들은 VCSEL의 횡방향 모드들을 분석하기 위하여 빔 전파이론(beam propagation method)을 적용하였으며, Demeulenaere와 그 연구진^[3]들은 Bragg 거울들의 반사 특성을 정확하게 분석하기 위하여 Maxwell 방정식을 만족하는 모드 확장이론을 사용하였다. 비록 이들 방법들이 정확하고 다양한 전송구조에 적용이 가능하지만 3차

*정회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2012.1.8, 수정완료 2012.2.8.
게재확정일자 2012.2.10

Received: 8 January 2012 / Revised: 8 February 2012 /

Accepted: 10 February 2012

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

Dept. of Information and Communication Engineering, Hansung University, Seoul, Korea

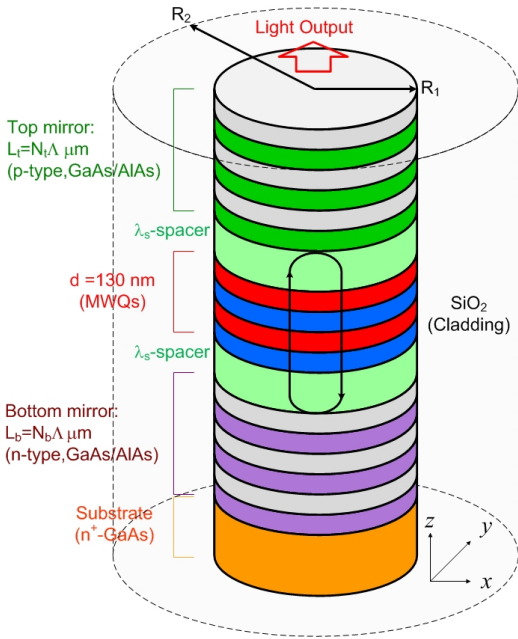


그림 1. 3층의 양자우물과 코어로 구성된 원형 수직 캐비티 레이저의 3-D 구조.
Fig. 1. 3-D geometry of circular vertical-cavity laser with 3 quantum wells and core layers.

원 전송구조인 VCSEL의 설계특성을 분석하기 위하여 많은 수치 해석적 시간과 노력이 필요하다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 발생하는 공진모드를 분석하기 위하여 Floquet 이론과 Babinet^[4] 원리에 기초한 원형 모드 전송선로 이론 (Circular Modal Transmission Line Theory: C-MTLT)을 사용하여 VCSEL의 설계특성을 간단하고 정확하게 해석하였다. 또한, 그림 1에 주어진 원형 VCSEL을 구성하는 무손실 물질들의 굴절률은 absorption loss가 없는 실온 (270°K)에서 참고문헌 [5]를 참고하여 계산하였다.

II. 원형 모드 전송선로 이론

그림 1에 주어진 3-D 원형 VCSEL 구조의 공진모드를 쉽게 분석하기 위하여 우선 2-D 구조로 변환해야 한다. 이를 위하여 그림 2에 주어진 원형 구조의 등가 전송선로를 이용하여 3-D 원형 VCSEL 구조를 구성하는 각 층에 대한 유효 굴절률을 계산해야 한다. 일반적으로, 원

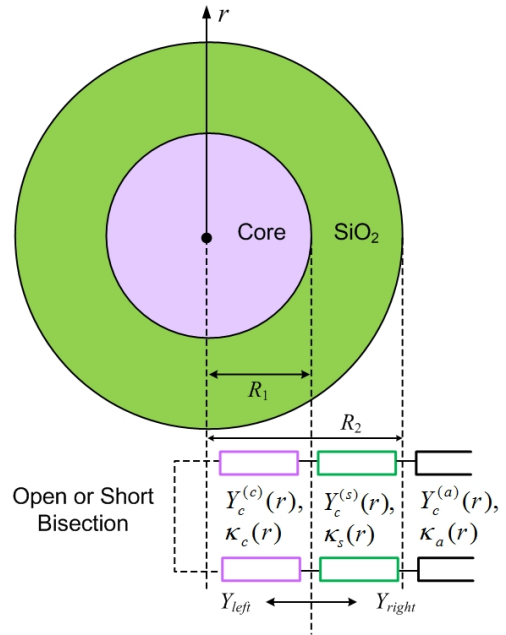


그림 2. 다층 원형 구조의 등가 전송선로.
Fig. 2. Equivalent transmission line of multi-layered circular guiding structure.

형 전송구조에서의 필드분포는 원점을 중심으로 우/기 모드에 대하여 각각 대칭적/비 대칭적으로 분포한다. 이는 TE, TM 모드에 대하여 공히 성립되며 단지 그 분포하는 필드성분만이 다르다. 그러므로, 이등분의 원리를 이용하여 등가 전송선로의 분석을 간소화할 수 있다. 즉, 그림 2에서 보듯이 등가 전송선로는 우 모드에 대하여 개방으로, 기 모드에 대하여 단락으로 대치되어야 한다.

결국, 각 층에 대한 유효 굴절률은 고유치 문제를 결정하는 C-MTLT의 횡방향 공진조건인

$$Y_{left}(r) + Y_{right}(r) = 0 \quad (1)$$

을 적용하여 그 고유 값을 결정할 수 있다. 즉, 그림에서 보듯이 임의의 경계면에서 적용한 그 조건은 다음과 같다.^[6]

$$Y_c^{(g)}(a) \frac{iY_c^{(a)}(b) + Y_a(b)\xi(\kappa_g a, \kappa_g b)\tilde{C}_{or}(\kappa_g a, \kappa_g b)}{Y_c^{(a)}(b)C_{or}(\kappa_g a, \kappa_g b) + iY_a(b)\xi(\kappa_g a, \kappa_g b)} = \begin{cases} iY_c^{(c)}(a) \frac{1}{C_{or}(\kappa_c a, 0)} & (\text{open}) \\ -iY_c^{(c)}(a)\tilde{C}_{or}(\kappa_c a, 0) & (\text{short}) \end{cases} \quad (2)$$

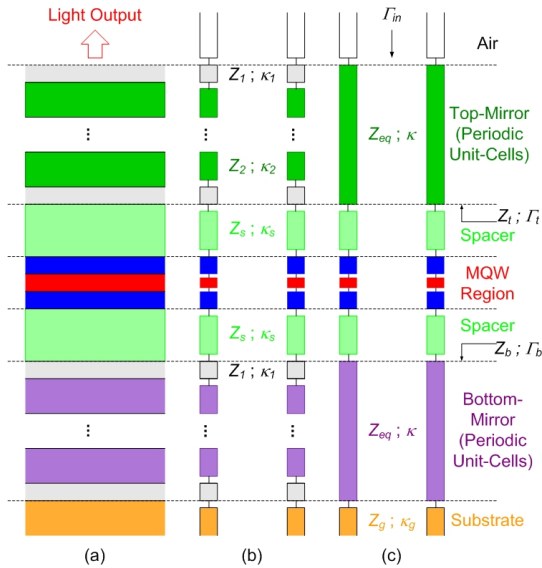


그림 3. (a) 2-D 원형 VCSEL의 기하학적 구조, (b) 전형적인 전송선로 망으로 등가화된 구조, (c) Floquet 이론을 적용하여 간소화된 구조.

Fig. 3. Schematic configurations of (a) the 2-D circular VCSEL structure, (b) the conventional network approach, and (c) the reduced network approach satisfying Floquet's theorem.

여기서, $Y_a(b)$ 는 $r=b$ 에서 오른쪽으로 들여다본 입력 어드미턴스를 나타내며, ξ , C_{ot} , \tilde{C}_{ot} 는 Bessel 함수와 Hankel 함수로 구성된 C-MTLT의 변수들이다.

III. 원형 VCSEL의 모드특성

1. Bragg 거울의 등가 전파상수

원형 VCSEL의 광학적 특성들은 공진모드의 선택에 의존하여 결정된다. 일반적으로, 원하는 단일모드는 그림 1에서 보듯이 코어 층을 감싸고 있는 낮은 굴절률의 클래딩(SiO₂) 물질을 사용하여 쉽게 발생시킬 수 있으며, 발생시킨 단일모드의 공진특성은 원형 VCSEL의 상향과 하향에 구성된 Bragg 거울에 의하여 결정된다. 설계된 Bragg 거울은 p-type과 n-type GaAs/AlAs를 번갈아 쌓은 형태로 구성하였으며, 굴절률을 결정하기 위하여 사용한 doping 값은 각각 $p \approx 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 와 $n \approx 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이다.

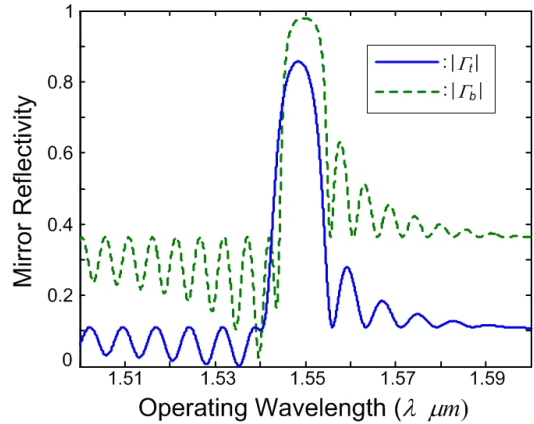


그림 4. 파장의 변화에 따른 거울의 반사율. 여기서, 실선과 점선은 각각 상향과 하향 거울에 대한 반사율이다.
Fig. 4. Mirror reflectivity as a function of wavelength, where the solid-line and the dashed-line are for top and bottom mirrors, respectively.

또한, p-type과 n-type GaAs/AlAs 층의 두께는 주기 Λ 의 거울을 형성하기 위하여 각각 $\Lambda_1 = \lambda/4n_1$ 과 $\Lambda_2 = \lambda/4n_2$ 로 선택하였다. 여기서, λ 는 동작파장이며 n_1, n_2 는 GaAs/AlAs 층의 굴절률을 나타낸다. 그때 그림 3(a)의 2-D 원형 VCSEL의 전송구조로부터 그림 3(b)의 전형적인 등가 전송선로 망을 구성할 수 있다. 그러나, 그림 3(b)는 원하는 전송특성을 얻기 위하여 많은 계산과정이 필요하기 때문에, Floquet 이론에 기초한 그림 3(c)와 같은 간소화된 등가 전송선로 망을 형성하여 간결하고 쉽게 Bragg 거울의 반사율을 수치해석 하였다.

결국, 그림 3(c)에 구성된 상, 하향 Bragg 거울을 등가화한 전송선로의 등가 전파상수는 다음과 같다^[7].

$$\frac{\kappa_{eq}\Lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1}[\theta(\lambda)] \quad (3)$$

여기서, Bragg 거울의 분산특성을 나타내는 변수인 $\theta(\lambda)$ 는

$$\theta(\lambda) = \cos(\kappa_1\Lambda_1)\cos(\kappa_2\Lambda_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1 n_2} \right) \sin(\kappa_1\Lambda_1)\sin(\kappa_2\Lambda_2) \quad (4)$$

와 같이 정의할 수 있다. 그러므로, 식 (3)에 주어진 등가 전파상수를 이용하여 원형 VCSEL의 공진모드가 발생하는 차단대역을 분석할 수 있다.

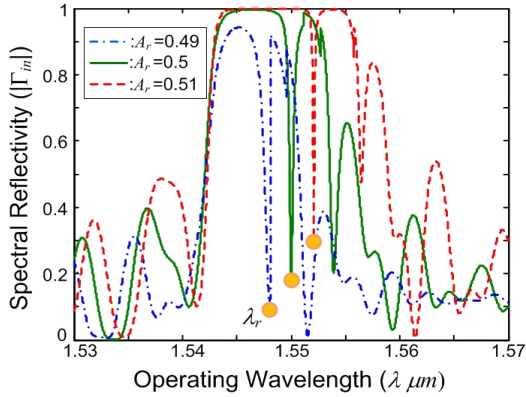


그림 5. TE 모드에 대한 VCSEL의 입력 반사율. 여기서, λ_r 은 공진모드의 파장이다.

Fig. 5. Input spectral reflectivity of VCSEL for TE modes, where λ_r is the wavelength of resonance mode.

2. Bragg 거울의 등가 특성 임피던스

실질적인 Bragg 거울의 반사율을 수치해석 하기 위하여 그림 3(c)에 구성된 등가 전송선로의 특성 임피던스를 결정해야 한다. 그림 3(b)의 전송선로 망에 Babinet 원리를 적용하면 open-circuit과 short-circuit에 대한 다음과 같은 입력 임피던스를 유도할 수 있다.

$$Z_{ob} = iZ_1 \frac{Z_2 - Z_1 \tan(\kappa_1 \Lambda_1 / 2) \tan(\kappa_2 \Lambda_2 / 2)}{Z_1 \tan(\kappa_2 \Lambda_2 / 2) + Z_2 \tan(\kappa_1 \Lambda_1 / 2)},$$

$$Z_{sb} = -iZ_1 \frac{Z_1 \tan(\kappa_1 \Lambda_1 / 2) + Z_2 \tan(\kappa_2 \Lambda_2 / 2)}{Z_1 - Z_2 \tan(\kappa_1 \Lambda_1 / 2) \tan(\kappa_2 \Lambda_2 / 2)} \quad (5)$$

결국, 주기적인 Bragg 거울의 단위 셀에 대한 등가 특성 임피던스는

$$Z_{eq} = \sqrt{Z_{ob} Z_{sb}} \quad (6)$$

와 같이 TE 모드에 대하여 정의 할 수 있다^[7]. 그러므로, 식 (3)과 식 (4)로 구성된 그림 3(c)의 등가 전송선로를 이용하여 상, 하향 Bragg 거울의 반사율을 쉽고 정확하게 분석할 수 있다.

3. MQW의 문턱 전류밀도와 양자 효율

원형 VCSEL의 active 영역을 구성하는 MQW의 문턱 이득은 그림 1에서 보듯이 상, 하향 spacer 사이에서 공진하는 레이저의 공진조건을 분석하여 결정할 수 있다. 이 공진조건은 식 (1)과 같은 횡방향 공진조건으로 정의하여 분석할 수 있는데, 이 경우에는 그림 3(c)에서 보듯

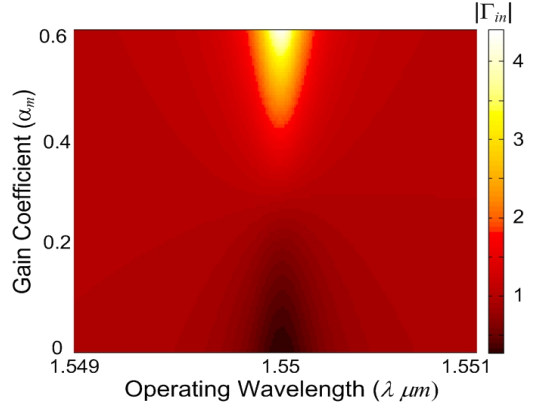


그림 6. MQW의 이득상수에 따른 공진모드의 반사율.
Fig. 6. Detailed spectral reflectivity of a resonance mode along with the gain coefficient (α_m) of quantum-wells.

이 임의의 경계면에서 위와 아래로 들어 다 본 어드미턴스를 적용하면 된다. 그때, Bragg 거울의 방출 손실 (radiation loss)에 기인한 원형 VCSEL의 전체 손실은 공진조건으로부터 얻을 수 있으며, 이 손실은 MQW의 이득 값(α_m)을 증가시켜 보상할 수 있다.

결국, 원형 VCSEL의 전체 손실이 문턱 값 (threshold value)에 이르도록 보상하는 문턱 이득 값($\alpha_m = \alpha_{th}$)은 다음과 같이 문턱 전류밀도(threshold current density)와 관계되어 진다^[8].

$$J_{th} = \frac{4edR_{eff}}{A_o^2} \alpha_{th}^2 \quad (7)$$

여기서, e 는 전자 전하, d 는 active 영역의 길이, A_o 는 이득 계수, 그리고 R_{eff} 는 유효 재결합 상수이다.

또한, 원형 VCSEL을 설계할 때 중요한 광학변수로 작용하는 외부 미분 양자효율(external differential quantum efficiency)을 등가 전송 선로 망에 기초하여 고려하였다. 그림 3(c)에서 보듯이, 양자효율은 전체 공진 손실 α_i 에 대한 상, 하향 거울을 통하여 투과되는 광신호로부터 발생하는 손실의 비율로써 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_D = \eta_i \frac{\ln(1/(|\Gamma_i||\Gamma_b|))}{\ln(1/(|\Gamma_i||\Gamma_b|)) + \alpha_i L_{cav}} \quad (8)$$

여기서, η_i 는 내부 양자효율이다.

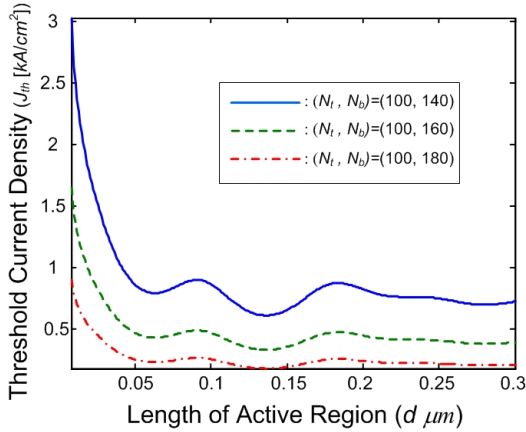


그림 7. 에너지를 갖고 있는 능동영역의 두께 d 에 따른 문턱 전류밀도의 변화.

Fig. 7. Threshold current density as a function of active layer thickness d .

IV. 수치해석 및 고찰

2절에서 고려한 등가 전파상수와 등가 특성 임피던스를 사용하여 $N_t = 100$, $N_b = 140$ 개의 단위 셀로 구성된 상, 하향 Bragg 거울들의 반사율을 수치해석 하였다. 즉, λ_s -spacer에서 위와 아래로 들어 다 본 TE 모드에 대한 거울의 반사율을 분석하였다. 그림 3(c)에서 보듯이, 그 반사율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Gamma_\zeta = \frac{Z_\zeta - Z_s}{Z_\zeta + Z_s} \quad (9)$$

여기서, Z_ζ 는 spacer에서 위($\zeta = t$)와 아래($\zeta = b$)로 들어 다 본 입력 임피던스를 나타낸다. 그림 4에서 보듯이, 동작 파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 상, 하향 거울들의 반사율은 각각 $|\Gamma_t| = 0.86$, $|\Gamma_b| = 0.98$ 로 나타났다. 그러므로, 본 논문에서 제시한 그림 1의 원형 VCSEL은 반사율이 낮은 상향으로 공진모드가 방출된다.

다음으로, 원형 VCSEL의 출력 단에서 아래로 들어 다 본 입력 반사율 $|\Gamma_{in}|$ 을 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, 설계한 원형 VCSEL은 GaAs의 길이 A_1 과 AlAs의 길이 A_2 가 서로 같은 경우인 aspect ratio $A_r = 0.5$ 인 경우에 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 정확하게 공진모드가 발생하였

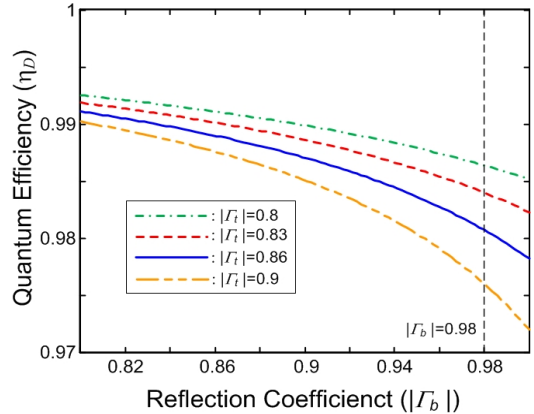


그림 8. 상향과 하향 Bragg 거울들의 반사율에 따른 양자효율의 변화.

Fig. 8. Differential quantum efficiency as a function of the reflectivity of top and bottom Bragg reflectors.

다. 그러나, aspect ratio가 in-phase 상태로부터 매우 미약하게 조정된 경우, 즉 $A_r = 0.49$ 와 $A_r = 0.51$ 인 경우에 공진모드는 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 으로부터 많은 편이가 일어남을 알 수 있었다.

만일, MQW의 이득 값이 원형 VCSEL에서 발생하는 전체 손실 값보다 큰 값으로 증가하게 되면, 그 순간에 레이저는 오직 파장 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 모드가 증가하는 공진특성을 나타낸다. 이를 확인하기 위하여 이득 값 α_m 의 증가에 따른 입력 반사율을 분석하였다. 그림 6에서 보듯이, 단일 공진 모드는 $\alpha_m \approx 0.2$ 에서 $|\Gamma_{in}| \approx 1$ 인 문턱 값에 근접했으며, 이득 값이 0.2보다 커짐에 따라 공진모드는 원형 VCSEL의 입력 단을 통하여 방출됨을 보여 주고 있다. 즉, 공진파장 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 $|\Gamma_{in}| > 1$ 을 확인할 수 있다.

또한, 본 논문에서는 $R_{eff} = 1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$, $A_o = 3.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 인 MQW에서 active 영역의 두께 d 에 따른 문턱 전류밀도를 분석하였다. 그림 7에서 보듯이, TE 모드에 대한 J_{th} 는 $d < 50 \text{ nm}$ 영역에서 현저하게 감소하였으며 하향 Bragg 거울 셀의 수 N_b 가 증가함에 따라 감소율이 커졌다. 그러나, $d > 50 \text{ nm}$ 영역에서는 약한 파동특성이 나타났으며 더 이상의 감소는 보이지 않았다. 그러므로, active 영역의 두께는 50 nm 보다 큰 값을 선택하면 충분히 낮은 문턱 전류밀도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 내부 손실이 $\alpha_i = 20 \text{ cm}^{-1}$ 이고 내부 양자효율이 $\eta_i = 1$ 인 MQW의 외부 미분 양자효율을 분석하였다. 그림 8에서 보듯이, Bragg 거울을 투과하여 전송되는 광신호의 감소에 기인한 η_D 는 상, 하향 Bragg 거울의 반사율이 증가함에 따라 감소하였다. η_D 는 공진모드를 증폭하기 위하여 필요한 문턱이득 α_{th} 과 상호 보완관계에 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 설계한 ($|r_s| = 0.86$, $|r_b| = 0.98$) 원형 VCSEL의 η_D 는 약 0.98로 나타났다.

V. 결론

원형 모드 전송선로 이론(C-MTLT)을 사용하여 공진 파장 $\lambda_r = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 동작하는 원형 VCSEL의 설계 특성을 분석하였다. 상, 하향 Bragg 거울들의 차단 대역이 1차 Bragg 조건($\kappa_{eq}A = \pi$)에서 발생함을 확인하였으며, 원형 VCSEL의 방출 손실보다 큰 이득 값에서 공진모드가 증폭되어 발생함을 분석할 수 있었다. 더욱이, 문턱 전류밀도와 외부 미분 양자효율이 active 영역의 길이와 상, 하향 Bragg 거울의 반사율에 매우 민감하게 변함을 알 수 있었다. 결국, 본 논문에서 제시한 C-MTLT는 원형 VCSEL의 설계특성을 분석하기 위한 매우 쉽고 유용한 해석법으로 사용될 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] L. Melngalis, "Longitudinal Injection-Plasma Laser of InSb," Appl. Phys. Lett., Vol.6, No.3, pp.59-60, 1965.
- [2] M. Shimizu, F. Koyama, and K. Iga, "Transverse mode analysis for surface emitting laser using beam propagation method," IEICE Trans., E-74, No.10, pp.3334-3341, 1991.
- [3] B. Demeulenaere, D. De Zutter, and R. Baets, "Rigorous Electromagnetic Study of Diffraction

Loss in VCSEL Mirrors," IEE Proc. Optoelectron., Vol.143, No.4, pp.221-227, 1996.

- [4] J. A. Kong, Electromagnetic Wave Theory, pp. 373-382, John Wiley & Sons, Inc, 1990.
- [5] K. C. Ho, G. Griffel and T. Tamir, "Polarization Splitting in Lossy/Gainy MQW Directional Couplers," J. Lightwave Technol. Vol. LT-15, pp. 1233-1240, 1997.
- [6] 호광춘, 박천관, " 광통신용 원통형 격자필터 설계를 위한 모드 전송선로 이론," 대한전자공학회지, 제 40권 4호, pp. 18-26, 2003년 4월.
- [7] J. H. Kim, K. C. Ho, and Y. K. Kim, " A Novel Approach of Planar DFB Guiding Structures for Optical Communication," SK Telecom. Review, Vol. 9, No. 4, pp. 662-675, August 1999.
- [8] H. Soda, Y. Motegi, and K. Iga, "GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers with Short Cavity Length," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 19, pp. 1035-1041, 1983.
- [9] 한두희, " 고리형 어븀첨가 광섬유 레이저의 수동형 모드로킹에 관한 연구," 한국산학기술학회논문지, 제 1권 2호, pp.63-68, 2000년 4월.

저자 소개

호 광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 정보통신공학과 교수
- <주관심분야: Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구장려금 지원과제 임.