

논문 2004-41SD-7-5

# 수직 공진기 반도체 레이저에서 전달 행렬 방법과의 비교를 통한 유효 공진기 모델의 타당성 검토

(On the Validity of the Effective Cavity Model with the Transfer Matrix Method as a Frame of Reference in VCSELs)

김 태 용\*, 김 상 배\*\*

( Tae-Yong Kim and Sang-Bae Kim )

## 요 약

Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser(VCSEL)는 in-plane 형태의 레이저와는 달리 여러 층의 distributed Bragg reflector(DBR) mirror를 반사 면으로 사용하기 때문에 광출력이나 미분양자효율(differential quantum efficiency)을 계산하는 데에 많은 어려움이 따른다. 이러한 이유로 광출력, 광출력 비 및 미분양자효율 등의 성능 지수를 계산하는 방법으로 유효 공진기 모델과 전달행렬 방법(transfer matrix method) 등이 사용되고 있다. 유효 공진기 모델은 반사율 및 문턱이득을 계산하는 데에는 적합하지만 광출력, 광출력 비 및 외부양자효율을 계산하는 데에는 오차를 보인다. 그 이유는 유효 공진기 모델이 금속 전극 개구부 바로 아래 GaAs 층에서의 빛의 흡수는 고려하지 못하기 때문이다. 이 논문에서는 유효 공진기 모델로부터 구한 성능 지수 값들을 전달행렬 방법으로부터 구한 값들과 비교·검토하여, 유효 공진기 모델의 타당성에 대하여 살펴보고 전달행렬 방법의 유용성을 재확인하였다.

## Abstract

In comparison with in-plane lasers, predicting the output power and differential quantum efficiency of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers(VCSELs) is very difficult due to the distributed Bragg reflector(DBR) layers. Therefore, effective cavity model and transfer matrix method have been adapted in order to calculate the output power and differential quantum efficiency. The effective cavity model is inappropriate to calculate output power and differential quantum efficiency while it is practically adequate to calculate the threshold gain and threshold current density. The reason is that the effective cavity model can not take account of the absorption in GaAs stack layer right below the metal aperture. In this paper, we have compared the threshold current and differential quantum efficiency calculated by using transfer matrix method with effective cavity model and we have made a study of the validity of the effective cavity model. Finally, we have confirmed the versatility of the transfer matrix method with these studies.

**Keywords:** VCSELs, diode lasers, transfer matrix method, effective cavity model

## I. 서 론

LED(light emitting diode)의 제조 가격과 레이저로서의 성능을 모두 갖춘 차세대 광소자로서 높은 기대를 받아온 VCSEL은, 높은 효율과 가격 경쟁력을 바탕으로 10

Gigabit Ethernet, 대용량의 병렬 inter-connection, 시스템 inter-connection, 인트라 시스템 inter-connection 그리고 디지털 비디오 인터페이스(digital video interface, DVI) 등에 사용되기 시작하면서 그 중요성이 점차 커져가고 있다. 특히 최근에는, MBE(Molecular Beam Epitaxy)와 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 등의 반도체 공정기술이 급격히 발달함에 따라 양자우물뿐만 아니라 양자선, 양자점을 활성층으로 사용한 고효율 VCSEL의 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

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

접수일자: 2003년7월14일, 수정완료일: 2004년5월28일

이처럼 반도체 레이저에 대한 연구·개발이 활기를 띠면서 VCSEL의 제작 기술 또한 충분히 성숙하였고, 초고속·근거리 통신의 주 광원 및 센서 소자로서 VCSEL이 사용되기 시작함에 따라 수요 시장 역시 열리고 있는 상태이다. 하지만 이런 VCSEL의 성능 개선 및 특성 예측을 위한 구체적인 방법론은 충분하지 않은 실정이다.

한편, VCSEL의 광출력 및 미분양자효율의 계산을 위한 방법으로 유효 공진기 모델과 전달 행렬 방법이 주로 사용되고 있다<sup>[1][2][3][4]</sup>. 유효 공진기 모델을 사용하면, Fabry-Perot 레이저와 같이 간단한 형태로 모델링할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 유효 공진기 모델을 사용하면 DBR mirror 층에 손실이 있으며 특히, 빛이 방출되는 표면 가까운 곳에 흡수 계수가 큰 물질을 포함하고 있는 구조의 VCSEL에 대해서는 정확한 광출력 및 미분양자효율 값을 얻어내기가 어렵다. 이 논문의 목표는 유효 공진기 모델과 전달 행렬 방법으로 계산한 미분양자효율 및 문턱전류밀도의 비교를 통하여 유효 공진기 모델의 한계에 대하여 알아보고, 보다 개선된 방법론을 제시하는 데에 있다. 유효 공진기 모델이란 VCSEL의 광출력비, 반사율 비 그리고 변환효율 등의 성능 지수를 쉽게 계산하기 위하여 여러 층의 DBR mirror를 두 개의 discrete한 유효 거울로 재규정한 뒤, 이 두 거울과 그 내부를 유효 공진기라고 하는 새로운 공진기로 정의한 것이다. II장에서는 유효 공진기 모델에 대하여 자세히 알아보고 이를 이용하여 각 성능 지수를 구하는 방법에 대하여 조건을 바꿔가면서 살펴본다. 먼저, 1절에서는 유효 공진기 모델로부터 구한 미분양자효율을 전달 행렬 방법으로 구한 미분양자효율 값과 비교하고, 2절에서는 광출력 비율을 구한 다음 비교해 본다. 3절에서 문턱이득과 문턱전류밀도를 유효 공진기 모델과 전달 행렬 방법으로 구하여 비교·분석한 다음, 마지막으로 III장에서는 II장의 내용을 종합하여 결론을 맺는다.

## II. 유효 공진기 모델

VCSEL에서 DBR mirror는 빛의 반사가 여러 경계면에서 일어나는 distributed mirror로 하나의 거울면에서 반사가 일어나는 보통의 Fabry-Perot 레이저의 discrete mirror와 구별된다. 유효 공진기 모델은 VCSEL의 광출력비, 반사율 비 그리고 변환효율 등의 성능 지수를 쉽게 계산하기 위하여 여러 층의 DBR mirror를 두 개의 discrete한 유효 거울로 재규정한 뒤, 이 두 거울과 그 내부를 유효 공진기라고 하는 새로운 공진기로 정의한 것

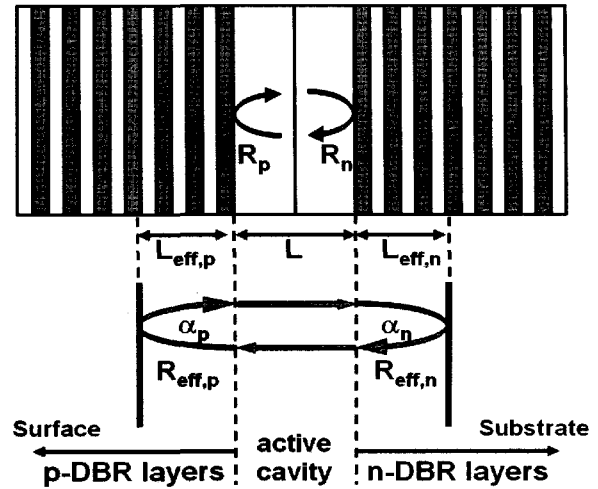


그림 1. 유효 공진기 모델을 설명하기 위한 개념도  
Fig. 1. Schematic diagram for the effective cavity model.

이다. 이렇게 정의된 유효 공진기는 두 개의 거울로 구성된 Fabry-Perot 공진기로 간주할 수 있기 때문에 VCSEL의 특성을 해석하는 데에 유용하다.

그림 1은 유효 공진기 모델을 설명하기 위한 그림이다. 활성층을 포함하고 있는 공진기의 광학적 길이는 점선 안쪽의  $L$ 이다. 그림에서 왼쪽이 표면방향이고 p-형으로 도핑되어 있다. 오른쪽은 기판방향이며 n-형으로 도핑되어 있다. p-, n-형 각각의 영역에 분산되어 있는 여러 층의 DBR mirror들을 각각 반사율이  $R_{eff,p}$ ,  $R_{eff,n}$ 인 두 개의 거울로 모델링한다. 이때 p-형 영역에서의 손실계수를  $\alpha_p$ , n-형 DBR에서의 손실계수를  $\alpha_n$ 이라고 가정한다.  $R_p$ 는 p-형 영역에 손실이 없다고 가정하고 계산한 활성층에서 표면방향으로 바라본 반사율이고,  $R_n$ 은 n-형 영역에 손실이 없다고 가정하고 계산한 기판방향으로 바라본 반사율이다. 그리고 반사율이 각각  $R_{eff,p}$ ,  $R_{eff,n}$ 인 두 거울로 새로이 정의한 공진기를 유효 공진기라고 하고, 실제 공진기의 광학적 길이  $1\lambda$ 에 대한 p-형, n-형 영역 길이 증가분을 각각  $L_{eff,p}$ ,  $L_{eff,n}$ 으로 정의한다.  $L_{eff,p}$ ,  $L_{eff,n}$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>[5]</sup>.

$$L_{eff,p,n} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \phi_{p,n}}{\partial \beta_{p,n}} \quad (1)$$

$\beta_{p,n}$ 는 매질 내에서의 전파상수,  $\phi_{p,n}$ 는 전파되는 빛의 위상이다. 그리고 유효 반사율의 크기  $R_{eff,p}$ ,

$R_{eff, n}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{eff, p, n} = R_{p, n} \exp(-2\alpha_{p, n} \cdot L_{eff, p, n}) \quad (2)$$

그리고 유효 공진기 모델로부터 표면으로 나가는 광출력에 대한 미분양자효율을 다음의 식으로 구할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$\eta_{d, top} = \eta_i \cdot \frac{\ln R_{eff, p}}{\ln(R_{eff, p} \cdot R_{eff, n}) - 2\alpha_i \cdot (L + L_{eff})} \quad (3)$$

식 (3)은 활성층, p-DBR, n-DBR 영역의 손실계수가  $\alpha_i$ 로 같고, 각 영역에서의  $L_{eff, p}$ ,  $L_{eff, n}$ 가  $L_{eff}$ 와 같다고 가정했을 때의 식이다. 그러므로 p-형 영역과 n-형 영역이 대칭성을 지니고 있을 때 사용할 수 있는 식이며 비대칭 구조에서는 적합하지 않다.

p-형 영역과 n-형 영역의 서로 다른 손실계수  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ 를 고려하면 식 (3)의  $\alpha_i \cdot (L + L_{eff})$ 는  $\alpha_i \cdot L + \alpha_p \cdot L_{eff, p} + \alpha_n \cdot L_{eff, n}$ 로 바뀌어, 표면 방향으로 나가는 광출력에 대한 미분양자효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{d, top} = \eta_i \cdot \frac{\ln R_{eff, p}}{\ln(R_{eff, p} \cdot R_{eff, n}) - 2(\alpha_i \cdot L + \alpha_p \cdot L_{eff, p} + \alpha_n \cdot L_{eff, n})} \quad (4)$$

### III. 유효 공진기 모델과 전달행렬 방법을 이용한 계산 결과 비교

그림 2는 이 논문에서 사용한 VCSEL의 단면도이다. 아래쪽에서부터 GaAs 기판, n-DBR mirror 층, 활성층, p-DBR mirror 층 그리고 그 위에 금속 전극이 있다. 각각의 p-, n-형 DBR 거울 영역에는 수십 쌍의  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.92}Ga_{0.08}As$ 층이 반복적으로 배열되어 있고, 이 두 층 사이의 경계면은 직렬저항을 줄이기 위하여 단계적으로 Al의 양을 변화시켰다. p-DBR 영역을 자세히 살펴보면, 활성층 바로 위에 전류와 빛을 모아주기 위한 산화층이 있고 금속 전극 바로 아래 부분에는 두꺼운 GaAs 캡 층이 있다. 이 층은 금속 전극과의 Ohmic contact을 용이하게 하고, 수평 성분의 직렬저항을 줄이기 위하여 높게 도핑하였다. 금속 전극은 Au/Zn과 Au/Ge/Ni 합금을 각각 p-DBR mirror 층과 n-DBR mirror 층과의 Ohmic contact을 위하여 사용하였다.

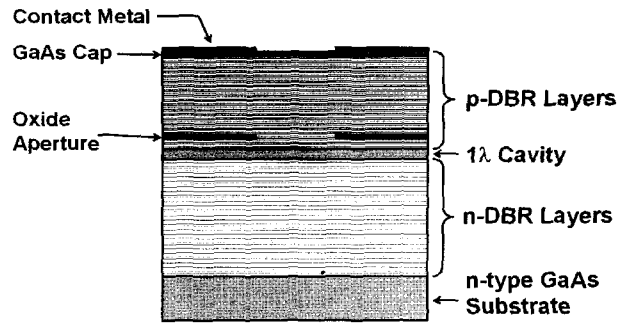


그림 2. 일반적인 oxide 구조 VCSEL의 단면도  
Fig. 2. A cross-sectional view of a typical oxide VCSEL.

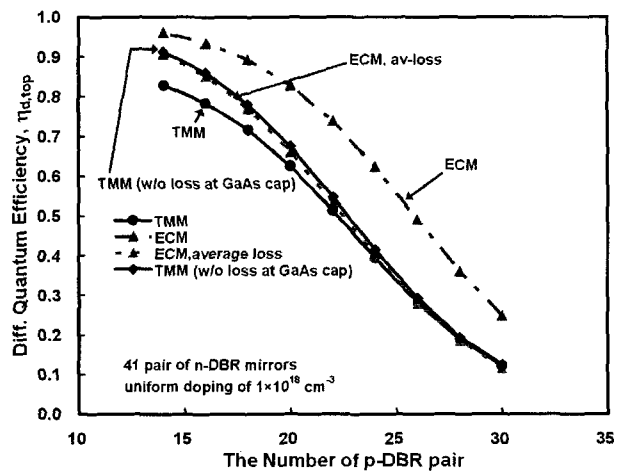


그림 3. VCSEL의 p-DBR 거울층 수 변화에 따른 미분양자효율의 변화:  
전달 행렬 방법(원-실선), GaAs 캡 층에 손실이 없다고 가정한 전달 행렬 방법(마름모-실선), 평균 손실을 고려한 유효 공진기 모델(삼각형-점선), 유효 공진기 모델(삼각형-이중 쇄선)  
Fig. 3. Comparison the differential quantum efficiency calculated by using:  
transfer matrix method(solid line), transfer matrix method without loss at GaAs cap layer (diamond-dotted line), effective cavity model with taking into account average absorption loss(triangle-dotted line) and effective cavity model without taking into account average absorption loss (triangle-double dotted line)

#### 1. 미분양자효율 비교

식 (3)을 이용하여 구한 미분양자효율, 유효 공진기 모델로부터 추출한 반사율 값으로 문턱전류밀도를 p-DBR 거울 쌍의 수를 변화시켜가면서 구해 보았다.

그림 2에서 원-실선은 전달 행렬 방법을 이용하여 구한 미분양자효율이고, 마름모-실선은 GaAs 캡 층에 손실이 없다고 가정하고 전달 행렬 방법으로 구한 미분양자효율이며, 이중 쇄선은 각각의 p-, n-형 영역에서 서로 다른 손실계수  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ 를 고려한 식 (4)를 사용한

계산결과이고, 점선은 평균손실 값  $(\alpha_p + \alpha_n)/2$  을 적용시킨 유효 공진기 모델로 계산한 미분양자효율이며, 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\eta_{d, \text{eff}, \text{av}} = \eta_i \cdot \frac{\ln R_{\text{eff}, p}}{\ln(R_{\text{eff}, p} \cdot R_{\text{eff}, n}) - 2\alpha_i \cdot L - (\alpha_p + \alpha_n) \cdot (L_{\text{eff}, p} + L_{\text{eff}, n})} \quad (5)$$

그림 3을 보면, 식 (4)로 표현된 유효 공진기 모델에서의 미분양자효율 계산결과와 식 (5)의 평균 손실을 고려한 유효 공진기 모델의 계산결과 사이에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그리고 평균 손실을 고려한 유효 공진기 모델이 보다 정확하다고 할 수 있는데, 그 이유는 다음과 같다. VCSEL은 Fabry-Perot 레이저에 비해서 공진기가 짧고 반사율이 크기 때문에 활성층에서 생성된 빛 입자들이 p-, n-형 영역을 여러 번 왕복하게 되고, 이러한 왕복과정을 거치면서 빛 입자가 느끼게 되는 손실 계수는 p-, n-형 영역 각각에 대한 값이 아니라 전체 구조 내부 손실계수의 평균값이 되는 것이다. 따라서 평균 손실 계수를 고려한 유효 공진기 모델이 VCSEL의 특성을 계산하는 데에 보다 적합하다고 할 수 있다.

그림 3의 p-DBR mirror 쌍의 수가 20보다 작은 쪽의 결과를 보면, 전달행렬 방법을 이용하여 계산한 미분양자효율과 유효 공진기 모델을 사용해서 구한 미분양자효율의 값 사이에 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 금속전극 바로 아래에 두꺼운 GaAs 층이 위치하기 때문에, 이 GaAs 캡 층은 에너지 갭이 표면으로 방출되는 레이저 빛 에너지보다 크기가 작아서 활성층에서 생성된 광전력의 약 10% 정도를 흡수하게 된다. 특히, 상대적으로 p-DBR mirror 층의 수가 적은 구조에서는 p-DBR 영역 전체에서 흡수되는 광전력 중 GaAs 캡 층에서 흡수되는 광전력의 비중이 커지기 때문에, 전달 행렬 방법과 유효 공진기 모델 계산 값의 차이가 커지는 것이다. 이는 그림 3의 GaAs 캡 층의 손실을 0으로 가정 한 후 전달 행렬 방법으로 구한 결과에 의하여 뒷받침된다. GaAs 캡 층의 손실 계수를 0으로, 나머지 조건들은 똑같이 두고 전달 행렬 방법으로 계산한 미분양자효율은 평균 손실을 가정한 식 (5)로 계산한 미분양자효율 값에 가까워지기 때문이다.

2. 출력 비율 비교

다음으로 전달 행렬 방법을 이용하여 계산한 상·하향 광출력 비율과 유효 공진기 모델을 이용하여 계산한 상·하향 광출력 비율을 비교하여 보았다.

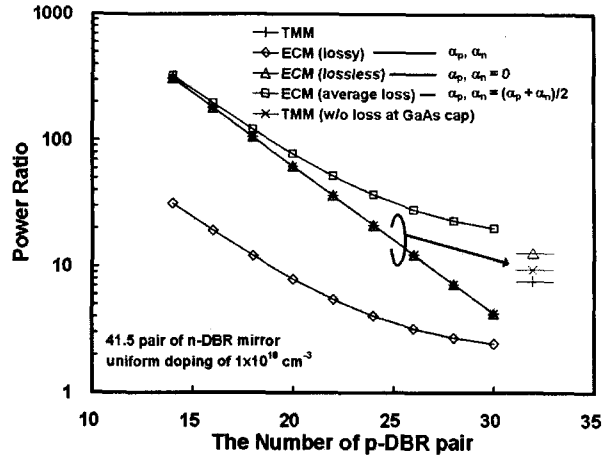


그림 4. VCSEL의 p-DBR 거울 층 수의 변화에 따른 광출력 비율의 변화:

전달 행렬 방법(TMM, 십자-실선), 손실이 있는 DBR mirror 층을 가정하고 구한 유효 공진기 모델(ECM, 마름모-점선), 손실이 없는 DBR mirror 층을 가정하고 구한 유효 공진기 모델(ECM, 삼각형-실선), GaAs 캡 층의 손실이 없는 구조에 대한 전달 행렬 방법(TMM, 가위-실선)

Fig. 4. Power ratio changes depending on the number of p-DBR pair:

transfer matrix method(TMM, cross-dotted line), effective cavity model(ECM, cross-dotted line), effective cavity model with lossy DBR mirrors (ECM, diamond-dotted line), effective cavity model with average loss in DBR mirrors(ECM, rectangular-dotted line), transfer matrix method without loss at GaAs cap(TMM, slanted cross-dotted line)

Fabry-Perot 레이저에서 양쪽 거울면의 반사율과 그 면으로 빠져나가는 출력 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(1-R_2)\sqrt{R_1}}{(1-R_1)\sqrt{R_2}} \quad (6)$$

전달 행렬 방법, DBR mirror 층에 손실이 있을 때의 유효 공진기 모델, DBR mirror 층에 손실이 없을 때의 유효 공진기 모델로부터 구한 각각의 상·하향 광출력 비율을 비교해 보았다.

그림 4에서 마름모-실선으로 나타낸 손실이 있는 유효 공진기 모델의 광출력 비는 식 (2)로 계산한  $R_{\text{eff}, p}$ ,  $R_{\text{eff}, n}$  값을 식 (6)에 대입하여 구한 값이고, 삼각형-실선으로 나타낸 손실이 없는 유효 공진기 모델의 광출력 비는 VCSEL DBR mirror 층 전체에 손실이 없다고 가정하고 계산한 반사율  $R_p$ ,  $R_n$  값을 식 (6)에 대입하여 구한 광출력 비이다. 사각형-실선으로 나타낸 평균손실  $(\alpha_p + \alpha_n)/2$  을 고려한 유효 공진기 모델의 광출력 비

이다. 그림 3을 보면 알 수 있듯이, 유효 공진기 모델은 DBR mirror 층에 손실이 있을 때 광출력 비를 구하는 데에는 적합하지 않다. 다만, 광출력 비를 구하는 데에 한해서는 DBR mirror 층 자체에 손실이 없다고 가정할 유효 공진기 모델을 사용할 수는 있다. 그리고 여기서 주의해야 할 점은 GaAs 캡 층의 흡수손실은 표면으로 방출되는 광출력에만 영향을 줄뿐만 아니라, 아래쪽 기판방향으로 빠져나가는 광출력에도 영향을 준다는 사실이다. 즉, GaAs 캡 층이 존재하면 표면과 기판방향으로 빠져나가는 광출력의 크기는 줄어들지만, 그 줄어드는 크기의 비율이 거의 같기 때문에 상·하향 광출력 비에는 영향을 주지 못한다는 것이다. 그림 3을 p-DBR mirror 층수에 유의해서 살펴보면, p-DBR mirror 층수가 많은 구조에서 전달 행렬 방법과 유효 공진기 모델 사이의 차이가 작은 것을 알 수 있다. 그 이유는 p-DBR mirror 층수가 많아지면, 활성층에서 생성되는 광전력의 크기에 비해서 GaAs 캡 층에서의 흡수되는 광전력의 크기가 상대적으로 적어지기 때문으로 해석된다. GaAs 캡 층의 손실을 0으로 두고 전달 행렬 방법을 사용하여 광출력 비를 구한 결과를 가위-선으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 GaAs 캡 층 손실은 미분양자효율의 변화에는 영향을 크게 미치지 않지만 광출력 비에는 영향을 미치지 못하는데 그 이유는 표면과 기판방향으로 빠져나가는 광출력의 비가 같게 광출력의 크기가 변하기 때문이다.

### 3. 문턱이득과 문턱전류밀도 비교

다음으로 전달 행렬 방법을 이용하여 계산한 문턱이득과 문턱전류밀도와 유효 공진기 모델을 이용해서 계산한 결과를 비교하여 보았다. 문턱전류밀도는 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$J_{th} = N_w \cdot J_{tr} \cdot \exp(g_{th}/g_0) \quad (7)$$

여기에서,  $N_w$ 는 양자우물의 수,  $J_{tr}$ 은 광이득이 0일 때의 전류밀도,  $g_0$ 는 물질이득 상수이며 각각 3,  $110 \text{ A/cm}^2$ ,  $1300 \text{ cm}^{-1}$ 를 사용하였다<sup>[5]</sup>. 따라서 식 (7)에서 유효 공진기 모델과 전달 행렬 방법으로 구한 문턱전류밀도의 차이는 계산 방법에 따른 문턱이득  $g_{th}$  값의 차이에 의해서 결정된다. 전달 행렬 방법으로 문턱이득을 계산하는 방법은 참고문헌 [4]에 상세하게 기술하였고, 유효 공진기 모델의 문턱이득 식은 다음과 같다.

$$g_{th,ECM} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_{eff,p} \cdot R_{eff,n}}\right) \quad (8)$$

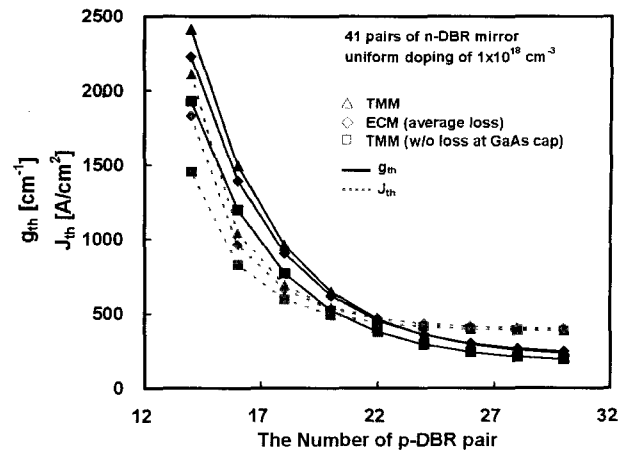


그림 5. VCSEL의 구조 변화에 따른 문턱이득과 문턱전류밀도의 변화: 전달 행렬 방법(삼각형), 평균 손실 계수를 고려한 유효 공진기 모델(마름모), GaAs 캡 층의 손실이 0인 구조에 대한 전달 행렬 방법(사각형). 실선은 문턱이득을 나타내고 점선은 문턱전류밀도를 나타낸다.

Fig. 5. Comparison threshold gain and threshold current density calculated by using: transfer matrix method(triangle), effective cavity model with taking into account average absorption loss(diamond), transfer matrix method without loss at GaAs cap(rectangular). Solid lines denote the threshold gain while dotted lines denote the threshold current density.

$\alpha_i$ 는 내부 손실이며,  $L$ 은 활성층의 길이이고, 각각  $10 \text{ cm}^{-1}$ ,  $24 \text{ nm}$ 를 사용하였으며  $R_{eff,p}$ ,  $R_{eff,n}$ 는 식 (2)로 구한 유효 반사율의 크기이다. 식 (8)의 문턱이득은 서로 다른  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ 을 가정하든 평균 손실  $(\alpha_p + \alpha_n)/2$ 를 사용하든 같은 결과를 얻음에 주의할 필요가 있다. 이렇게 전달 행렬 방법과 유효 공진기 모델로부터 구한 문턱이득  $g_{th,TMM}$ 과  $g_{th,ECM}$ 을 식 (8)의  $g_{th}$ 에 대입하여 문턱전류밀도를 계산하여 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 실선은 문턱이득을, 점선은 문턱전류밀도를 나타내고, 서로 다른 도형은 계산 조건을 나타낸다. 삼각형은 전달 행렬 방법으로 계산한 결과이고, 마름모는 평균손실을 고려한 유효 공진기 모델로 계산한 결과이며, 사각형은 GaAs 캡 층에 손실이 0이라고 두고 전달 행렬 방법으로 계산한 결과이다. 그림을 보면 p-DBR mirror 층수가 많을 때는 세 방법을 통해서 계산한 결과가 별 차이를 보이지 않지만, p-DBR mirror 수가 적어

지면서 약간씩 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 흡수 층인 GaAs 캡 층의 영향이 DBR mirror 층 수가 작아지면서 크게 나타나기 때문이다. 그러나 그 영향이 광출력에서보다 작게 나타나기 때문에 실질적으로는 두 방법으로 계산한 문턱전류밀도는 문턱전류를 예측하는 데에는 유용하다고 볼 수 있다.

### III. 결 론

전달 행렬 방법을 이용하여 조건을 바꿔가면서 VCSEL의 미분양자효율, 상·하향 광출력 비율, 문턱이득 및 문턱전류밀도를 계산해 보았다. 그리고 계산된 결과를 유효 공진기 모델을 사용해서 계산한 결과와 비교해 보았다. 먼저, p-, n-형에서의 손실계수를 각각  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ 로 둔 원래의 유효 공진기 모델로 문턱이득, 문턱전류밀도 그리고 미분양자효율을 구해 보았다. 이 유효 공진기 모델로 구한 문턱이득과 문턱전류밀도는 전달 행렬 방법으로 구한 값과 별 차이가 없지만, 미분양자효율 및 상·하향 광출력 비는 전달 행렬 방법으로 구한 값과 큰 차이를 보였다. 다음으로 p-, n-형 영역의 손실계수를 평균화한 평균 손실계수  $(\alpha_p + \alpha_n)/2$ 를 고려한 유효 공진기 모델로부터 계산한 결과를 전달 행렬 방법으로 구한 결과와 비교하여 보았다. 평균 손실계수를 고려한 유효 공진기 모델의 문턱이득 및 문턱전류밀도 값은 각각 서로 다른 손실계수를 고려한 유효 공진기 모델보다 실질적으로 유효하다고 볼 수 있으나, 미분양자효율의 결과에서 약간의 오차를 보였다. 그 원인은 이 유효 공진기 모델이 GaAs 캡 층에서의 손실을 고려하지 못하기 때문으로 p-DBR mirror 층 수가 적은 영역에서 보다 큰 영향을 보인다. 이는 GaAs 캡 층의 손실을 0으로 두고 전달 행렬 방법으로 계산한 결과로부터 확인할 수 있었고, GaAs 캡 층의 영향을 제외하면 평균 손실을 고려한 유효 공진기 모델은 대체로 타당하다는 것을 확인하였다.

한편, GaAs 캡 층은 표면으로 방출되는 광출력의 크기에만 영향을 주는 것이 아니라 기판으로 빠져나가는 광출력의 크기에도 같은 비율의 변화를 준다는 것을 발견하였다. 광출력 비를 계산하는데 한해서는 손실이 없는 거울 층을 사용한 유효 공진기 모델의 결과가 타당하며 GaAs 캡 층의 손실의 여부에 상관없이 전달 행렬 방법으로 구한 광출력 비와는 일치하는 것을 알 수 있었다.

위의 사실로부터 결론을 내리면 다음과 같다. 유효 공

진기 모델은 문턱이득과 문턱전류밀도를 구하는 데에 한해서는 타당하지만, 미분양자효율을 구하려면 평균 손실계수를 고려해 주어야 한다는 것이다. 유효 공진기 모델은 GaAs 캡 층에서의 손실을 고려하지 못하기 때문에, 보다 정확한 미분양자효율 및 광출력 비를 구하려면 전달 행렬 방법을 사용해야 한다. 이로부터 전달 행렬 방법의 유용성과 신뢰성을 재확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. S. Geels, S. W. Corzine, L. A. Coldren "InGaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 27, no. 6, June 1991.
- [2] R. Baets, "Considerations on geometry design of surface-emitting laser diodes," *Proc. IEE, part J*, vol. 135, pp. 233-241, June 1988.
- [3] R. Michalzik, K. J. Ebeling, "Modeling and Design of Proton-Implanted Ultralow-Threshold Vertical-Cavity Lasers Diodes," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 29, no. 6, June 1993.
- [4] T. Y. Kim, S. B. Kim, "전달 행렬 방법을 이용한 850 nm 수직 공진기 레이저 구조의 최적설계," 대한전자공학회 논문지, 제41권 SD편, 제1호, 35-46쪽, 2004. 1.
- [5] C. W. Wilmsen, H. Temkin, L. A. Coldren, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999, Table 2.1

### 저 자 소 개



김 태 웅(학생회원)  
2001년 아주대학교 정보통신대학  
전자공학부 (공학사)  
2003년 아주대학교 대학원  
전자공학과 (공학석사)  
2003년 3월~현재 아주대학교  
대학원 전자공학과 박사  
과정 재학 중

<주관심분야: 화합물반도체 광전소자, VCSEL 등>

김 상 배(정회원)  
제37권 SD편 제8호 참조  
현재 아주대학교 정보통신대학 전자공학부 교수  
<주관심분야: 광전소자, 광전집적회로, 광통신 등>