

논문 2004-41SD-1-6

전달 행렬 방법을 이용한 850 nm 수직 공진기 레이저 구조의 최적설계

(Design of 850 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers by Using a Transfer Matrix Method)

김 태 용*, 김 상 배*

(Tae-Yong Kim and Sang-Bae Kim)

요 약

Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser(VCSEL)는 짧은 공진기(cavity)와 여러 층의 distributed Bragg reflector(DBR)층을 거울로 사용하기 때문에, edge-emitting lasers(EELs)와는 달리, 광출력 및 변환효율 등의 예측이 쉽지 않다. 그 주된 원인은 VCSEL에서는 Fabry-Perot 레이저와는 달리, 각각의 DBR 거울 층들이 손실을 가지고 있기 때문으로 이에 따라 상/하향 광출력 비나 변환효율을 계산해 내는 데에 어려움이 있다. 그러나 전달 행렬 방법(transfer matrix method, TMM)을 이용하면, VCSEL과 같은 여러 층을 갖는 구조에서의 성능 지수를 정확히 계산할 수 있다. 이 논문에서는 전달 행렬 방법을 이용하여 VCSEL의 구조 변화에 따른 문턱이득, 문턱전류 밀도 및 변환효율을 구하였으며 문턱전류 및 변환효율 모두를 고려한 VCSEL의 최적 구조 설계 기법을 제시하였다.

Abstract

In comparison with edge-emitting lasers(EELs), predicting the output power and slope efficiency of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers(VCSELs) is very difficult due to the absorption loss in DBR layers. However, by using transfer matrix method(TMM), we've made possible to calculate such parameters of multi-layer structures like VCSELs. In this paper, we've calculated the threshold gain, threshold current and slope efficiency through the methodology based on TMM. Also TMM is the way of customizing the VCSEL structure for the desired threshold current and slope efficiency by changing the number of DBR mirror layers.

Keywords: VCSEL, Semiconductor lasers, optical interconnection

I. 서 론

VCSEL은 20여 년에 걸친 연구소에서의 연구·개발 과정을 거쳐, 1990년대 후반에 이르러 상업화되기 시작하였다. 현재에는 많은 연구소와 기업들이 VCSEL의 생산 및 응용을 위한 연구·개발에 참여하고 있다. 특히 최근에는, 데이터 전송량의 증대 및 정보의 고속화로 인한 병목현상을 해결하기 위하여, VCSEL에 기반을 둔

guided-wave 및 free-space 접근방법들이 광대역 근거리 통신망 구축을 목표로 아주 광범위하게 연구되고 있다. 그리고 VCSEL의 생산 및 패키징 기술의 급격한 발전과 미소 광소자 컴포넌트 및 MEMS에 대한 지속적인 연구·개발에 힘입어 VCSEL을 기반으로 한 근거리 광통신 기술에 대한 잠재력이 새롭게 인식되기 시작하였다. 그러나 VCSEL의 복잡한 구조와 동작 특성 때문에, 아직까지 정확한 특성 예측 및 모델링은 수치해석 방법에 의존해야 하는 실정이다^[1].

한편, 전달 행렬 방법은 주로 DFB 레이저 및 전계 흡수 변조기 집적 DFB 레이저 그리고 tunable DFB

* 정회원, 아주대 전자공학부
(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)
접수일자 : 2003년5월19일, 수정완료일 : 2004년1월9일

레이저의 특성 예측과 모델링을 위하여 사용되어 온 [2][3][4]. 유용한 방법으로, 다층 박막 필터 및 VCSEL 등과 같이 여러 층으로 이루어진 소자의 해석에 특히 유용하다 [5]. 그러나 이 방법으로 레이저의 문턱이득, 발진파장, 전계분포 등을 구하는 데에는 큰 어려움이 없는 반면, 외부 양자효율이나 레이저의 변환효율을 구하는 데에는 어려움이 많다. 특히 VCSEL과 같이 활성층이 연이어져 있지 않고 떨어져 있는 경우에는 더 큰 어려움이 따른다. 이 논문의 목표는 전달 행렬 방법을 이용하여 문턱이득, 발진파장, 문턱전류의 계산은 물론 구조의 변화에 따른 변환효율을 구하여 최종적으로 VCSEL의 최적 구조를 설계하는 기법을 개발하는 데에 있다. 먼저 II 장에서는 전달 행렬 방법과 반사율, 투과율, 발진 조건과 각 층에서 생성·흡수되는 전력을 전달 행렬 방법으로 계산하는 방법론을 다룬다. III 장에서는 전달 행렬 방법을 이용한 VCSEL의 구조 설계에 대하여 기술한다. 그리고 IV 장에서 II 장, III 장의 결과에 기초하여 결론을 맺는다. 이 연구에서 제시한 방법론은 VCSEL을 설계하고자 하는 모든 이들에게 유용한 기초 자료가 될 것이다. 특히 이 논문에서 제시된 문턱전류와 변환효율 측면에서 VCSEL의 특성을 최적화하는 방법론은 좋은 설계도구가 될 것이다.

II. 전달 행렬 방법

1. 전달 행렬 방법

전달 행렬 방법은 굴절률이 서로 다른 다층 구조에서 각 층과 경계면에서의 광파 전파조건과 경계조건을 이용하여 순방향 진행파와 역방향 진행파 사이의 관계를 행렬 형태로 전개하여, 최종적으로 입력 광파에 대한 반사율과 투과율을 계산하는 방법이다. 그림 1에서 $E_{k,f}$ 는 k-1과 k번째 층의 경계에서 k번째 층 쪽으로 투과되는 투과파, $E_{k,f}'$ 는 k와 k+1번째 층의 경계에서 k+1번째 층 쪽으로 입사되는 입사파, $E_{k,r}$ 는 k-1과 k번째 층의 경계에서 k-1번째 층 쪽으로 입사되는 입사파이고 $E_{k,r}'$ 는 k와 k+1번째 층의 경계에서 k번째 층 쪽으로 투과되는 투과파이다. 경계조건을 이용하여 진행파와 반사파 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

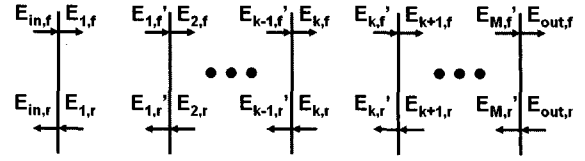


그림 1. 전달 행렬 방법의 해석 대상인 M개의 분할로 이루어진 다층 구조

Fig. 1. A multi-layer structure to be analyzed by the transfer matrix method.

$$\begin{aligned} E_{k,f}' + E_{k,r}' &= E_{k+1,f} + E_{k+1,r} \\ H_{k,f}' - H_{k,r}' &= H_{k+1,f} - H_{k+1,r} \end{aligned} \quad (1)$$

복소 굴절률을 \tilde{n} 으로 나타내면, $H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \tilde{n} E$ 이므로 k와 k+1번째 층 경계에서의 전달 행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{pmatrix} E_{k,f}' \\ E_{k,r}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{n}_k + \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} & \frac{\tilde{n}_k - \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} \\ \frac{\tilde{n}_k - \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} & \frac{\tilde{n}_k + \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{k+1,f} \\ E_{k+1,r} \end{pmatrix} \quad (2)$$

광학적 특성이 균일한 각 층에서 광파의 전파 조건으로부터 순방향 진행파와 역방향 진행파의 관계를 구하여 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} E_{k+1,f} \\ E_{k+1,r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{jk_0 \tilde{n}_{k+1} l_{k+1}} & 0 \\ 0 & e^{-jk_0 \tilde{n}_{k+1} l_{k+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{k+1,f}' \\ E_{k+1,r}' \end{pmatrix} \quad (3)$$

앞에서 구한 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 아래의 식과 같이 k번째 층과 k+1번째 층에서의 진행파와 반사파 사이의 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_{k,f}' \\ E_{k,r}' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{\tilde{n}_k + \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} & \frac{\tilde{n}_k - \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} \\ \frac{\tilde{n}_k - \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} & \frac{\tilde{n}_k + \tilde{n}_{k+1}}{2\tilde{n}_k} \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} e^{jk_0 \tilde{n}_{k+1} l_{k+1}} & 0 \\ 0 & e^{-jk_0 \tilde{n}_{k+1} l_{k+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{k+1,f}' \\ E_{k+1,r}' \end{pmatrix} \\ &\equiv T_k \begin{pmatrix} E_{k+1,f}' \\ E_{k+1,r}' \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \tilde{n}_k 과 l_k 는 k번째 층의 복소 굴절률과 길이이며, T_k 는 이 층의 전달 행렬이다. 그리고 M개의 층으로 구성된 VCSEL 전체 구조의 전달 행렬은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_{in,f} \\ E_{in,r} \end{pmatrix} &= (T_1 T_2 \cdots T_M) \cdot T_{out} \cdot \begin{pmatrix} E_{out,f} \\ E_{out,r} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{out,f} \\ E_{out,r} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

T_{out} 은 VCSEL 표면의 출력부 거울면에서의 전달행렬이다. 따라서, 이 행렬 내에서의 n_k 는 표면 층의 복소 굴절률이고 n_{k+1} 은 공기의 굴절률이 된다.

2. 반사율, 투과율 및 발진 조건

전달 행렬 방법은 복잡한 다층 구조의 반사율, 투과율과 다층 구조 레이저의 발진 조건을 구하는 데에 가장 유용하다. $E_{out,r}=0$, 다시 말하여 뒤쪽에서의 입사파가 없다고 가정하면 반사율과 투과율은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{Re [E_{in,r} \times H_{in,r}^*]}{Re [E_{in,f} \times H_{in,f}^*]} \Big|_{E_{out,r}=0} \\ &= \left| \frac{H_{21}}{H_{11}} \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{Re [E_{out,r} \times H_{out,r}^*]}{Re [E_{in,f} \times H_{in,f}^*]} \Big|_{E_{out,r}=0} \\ &= \frac{n_{out}}{n_{in}} \left| \frac{1}{H_{11}} \right|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 (6), (7)식의 반사율과 투과율이 무한대가 되는 조건, 즉 $H_{11}=0$ 이 되는 조건으로부터 문턱이득 g_{th} 와 발진파장을 구할 수 있다. $H_{11}=0$ 은 내부에서의 루프 이득이 1이 되는 조건, 즉 발진 조건과 같음을 증명할 수 있다. $H_{11}=0$ 의 해인 문턱이득과 발진 파장은 투과율이 최대일 때의 물질이득과 파장 값을 초기 조건으로 하여 Newton-Rapson 방법을 사용하여 구한다. 이렇게 구해진 문턱이득은 직접 $\Gamma g_{th} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$ 로부터 구한 g_{th} 값과 일치한다. 여기에서 Γ 는 전파 방향으로의 광집속 계수, L 은 활성층의 길이 그리고 R_1, R_2 는 각각 활성층에서 본 표면 쪽과 기판 쪽 반사율이다. 그리고 광집속 계수 Γ 는 다음 절에서 상세히 설명하겠다. 이렇게 Γ 값을 구하지 않고도 물질이득 g_{th} 값을 구할 수 있다는 것은 전달 행렬 방법이 유용한 여러 이유 가운데 하나이다.

3. 각 층에서 생성, 흡수되는 전력의 계산

k 번째 층에서 생성 또는 흡수되는 광전력 $P_{gen,k}$ 는 $E_{k,f}, E_{k,r}$ 그리고 $E_{k,f}'$ 과 $E_{k,r}'$ 으로부터 다음과 같

이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{gen,k} &= \Gamma_{z,k} \cdot \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cdot n_k [(|E_{k,f}'|^2 - |E_{k,f}|^2) \\ &\quad + (|E_{k,r}|^2 - |E_{k,r}'|^2)] \end{aligned} \quad (8)$$

n_k 는 k 번째 층에서의 복소 굴절률의 실수부이고, $\Gamma_{z,k}$ 는 k 번째 층에서 빛의 전파 방향인 z -방향으로의 광집속 계수이다. 식 (8)로 계산된 광전력이 음수가 된다면 이는 그 층에서 광전력의 흡수가 일어남을 의미한다.

광집속 계수 Γ 는 정상 상태(steady state)에서 VCSEL 내부의 전기장 분포가 정재파의 형태로 나타나기 때문에 고려해주는 지수이다. 전기장 분포가 정재파가 되기 때문에 특정 층이 정재파의 어느 부분에 위치하느냐에 따라 그 층의 평균 광자 밀도와 정재파 한 주기의 평균 광자 밀도가 다르게 된다. 특정 층에서의 평균 광자 밀도를 정재파 한 주기의 평균 광자 밀도로 나눈 값을 그 층의 광집속 계수라고 한다. 그러므로 활성층의 광집속 계수 Γ 는 활성영역에서 유도 방출에 실제로 기여하는 광자의 비를 나타낸다. VCSEL과 같이 발진 파장에 비해 두께가 얇은 양자우물이 전기장의 세기가 최대값인 부분에 있으면 광집속 계수는 2에 가깝게 된다. 그리고 양자우물이 전기장의 세기가 0이 되는 부분에 있을 때에는 광집속 계수가 0에 가까워진다. 따라서 활성층에서의 광집속 계수를 높이기 위해서는 양자우물 전기장의 세기가 최대인 곳에 두어야 한다. 그리고 또 한 가지 중요한 사실은 광집속 계수는 광전력의 생성에서뿐만 아니라 광전력의 흡수에 대해서도 똑같이 고려하여야 한다는 점이다. 즉, 전기장 세기가 큰 부분에서는 전기장 세기가 작은 부분에서보다 광전력의 흡수도 많이 일어난다는 것이다.

VCSEL의 기판에서부터 표면으로 향하는 방향 즉, 빛이 방출되는 방향을 z -축으로 놓으면, 활성층에서 생겨난 빛은 z -방향으로 공진하게 된다. 그리고 z -방향으로 정재파가 생기게 된다. xy -방향으로도 정재파가 생기지만, xy -방향으로는 광학적 특성이 균일한 활성층이 충분히 넓어 xy -방향에서의 광집속 계수는 거의 1이 된다. VCSEL 활성층이 1λ 공진기로 이루어졌다고 가정하면, 공진기 내부의 정규화된 전기장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{norm}(x, y, z) = U(x, y) \sqrt{2} \cos \beta z \quad (9)$$

$U(x, y)$ 는 정규화된 xy -방향의 전기장 성분이고, β 는

z -방향으로의 전파 상수이다. 그러면, 1λ 공진기 안에 있는 두께가 L_a 인 활성층의 z -방향으로의 광집속 계수 Γ_z 는 아래와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_z = \frac{1}{L_a} \int_L^{L+L_a} 2 \cos^2 \beta z dz \quad (10)$$

여기서 L 은 활성층이 시작되는 z 좌표이다.

이 연구의 대상인 그림 2에 보인 VCSEL은 여러 층의 DBR 거울들로 구성되어 있기 때문에, 전달 행렬 방법을 사용하여 계산하는 것이 유리하다. 굴절률에 따라 각각의 층을 나눈 다음, 각 층에서 전기장의 분포를 구하면, 광전력의 흐름을 나타내는 Poynting 벡터를 구해낼 수 있다.

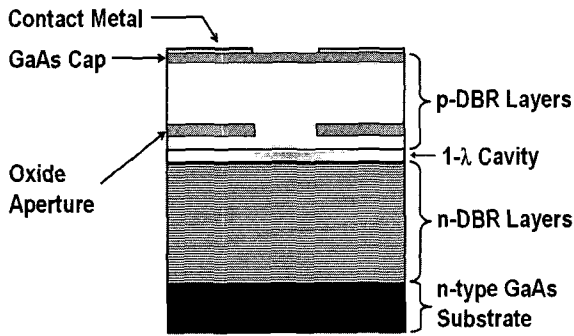


그림 2. 일반적인 oxide 구조 VCSEL의 단면도
Fig. 2. A cross-sectional view of a typical oxide VCSEL.

VCSEL에서 광전력의 흐름을 나타내는 요소들을 그림 3에 나타내었다. P_{gen} 은 활성층에서 생성된 광전력, $P_{out,top}$ 은 위쪽의 aperture를 통해서 나가는 광전력, $P_{out,bot}$ 은 아래쪽으로 나가서 기판에서 흡수되어 없어지는 광전력이다. 그리고, p-DBR, n-DBR에서 흡수되어 없어지는 광전력은 각각 $P_{loss,p-DBR}$, $P_{loss,n-DBR}$ 이다. 이들 사이의 관계를 에너지 보존 법칙에 따라 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{gen} &= P_{out,top} + P_{out,bot} + P_{p-DBR,loss} + P_{n-DBR,loss} \\ &= P_{loss,total} \end{aligned} \quad (11)$$

즉, 활성층에서 순수하게 생성된 전력 P_{gen} 은 DBR 층에서 소멸된 전력과 밖으로 빠져나간 전력의 총합 $P_{loss,total}$ 과 같다. 활성층에서는 빛이 생성되기도 하고 흡수되기도 하는데, P_{gen} 은 순수하게 생성된 양만을 나타냄에 주의할 필요가 있다.

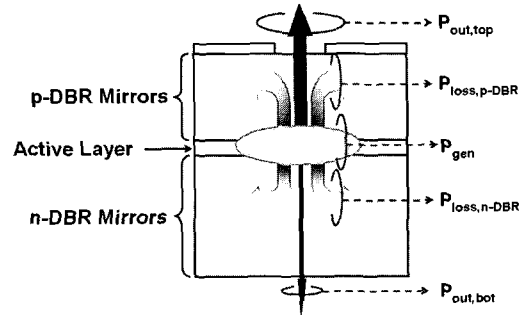


그림 3. VCSEL에서의 광전력의 생성 및 손실
Fig. 3. Generation and absorption of optical power in a VCSEL structure.

그림 4는 3개의 양자우물 근처에서 표면 그리고 기판 방향으로의 Poynting 벡터 $S (= \frac{1}{2} Re [E \times H^*])$ 를 각각의 층에서 구하여, 그 크기를 나타낸 것이다. 그림 4에서 가로 축 position은 VCSEL 표면을 0으로 두었을 때 표면에서 기판방향으로의 거리를 나타낸다. 각각의 양자우물에서 Poynting 벡터 S 의 크기 차이가 그 양자우물에서 생성된 광전력의 상대적인 크기를 나타낸다. 그러므로, 어느 활성층에서 표면과 기판방향으로 향하는 두 Poynting 벡터 값의 들어가는 경계면과 나가는 경계면에서의 차이 ΔS 에 광집속 계수 Γ 를 곱하면 그 층에서 생성된 전력이 된다. 그리고 이 전력을 전체 활성층에서 합하면 생성된 총 전력이 된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

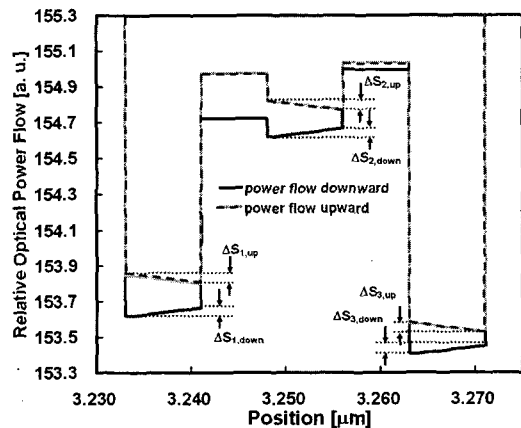


그림 4. 활성층에서 표면 그리고 기판 방향으로의 광전력 흐름 (그림에서 왼쪽이 표면 방향이고 오른쪽이 기판 방향, 그리고 그림자 처리된 부분이 3개의 양자우물임)
Fig. 4. Upward and downward power flow in the active region of the VCSEL

$$P_{gen} = \Gamma_1 \cdot (\Delta S_{1,up} + \Delta S_{1,down}) + \Gamma_2 \cdot (\Delta S_{2,up} + \Delta S_{2,down}) + \Gamma_3 \cdot (\Delta S_{3,up} + \Delta S_{3,down}) \quad (12)$$

식 (12)에서 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 는 각각 표면으로부터, 첫 번째 두 번째 세 번째 양자우물에서의 광집속 계수이다. 그리고 $S_{k,up}$ 은 표면방향으로 향하는 성분의 Poynting 벡터 이고 $S_{k,down}$ 은 기관 방향으로 향하는 성분의 Poynting 벡터 값을 나타낸다 ($k = 1, 2, 3$). 이러한 방법으로 모든 층에 대하여 생성 및 흡수된 광전력을 구해낼 수 있다. 앞서서도 설명하였지만 어느 층에서 계산한 생성된 전력이 음수이면 빛이 그 층에서 흡수된다는 것을 의미한다.

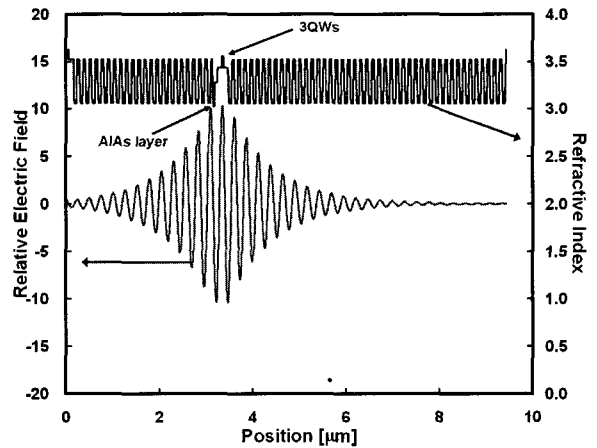
VCSEL 내부의 어느 곳에서도 손실이 없다면, 활성층에서 생성된 광전력 P_{gen} 은 표면으로 빠져나간 광전력 $P_{out,top}$ 과 기관으로 빠져나간 광전력 $P_{out,bot}$ 의 합과 같아야 한다. 그런데, VCSEL 내부에서 손실이 없다고 가정하고 전달 행렬 방법으로 각각의 광전력 요소들을 구하여 $\gamma = \sum_{k=0}^3 (\Delta S_{k,up} + \Delta S_{k,down}) / (S_{out,top} + S_{out,bot})$ 를 구하면, γ 는 1이 되지 않고, 3층에 대하여 구한 광집속 계수 Γ 가 된다. 빛이 정제파를 이루기 때문에 광집속 계수 Γ 를 곱해 주어야 하기 때문이다.

III. 전달 행렬 방법을 이용한 VCSEL의 설계

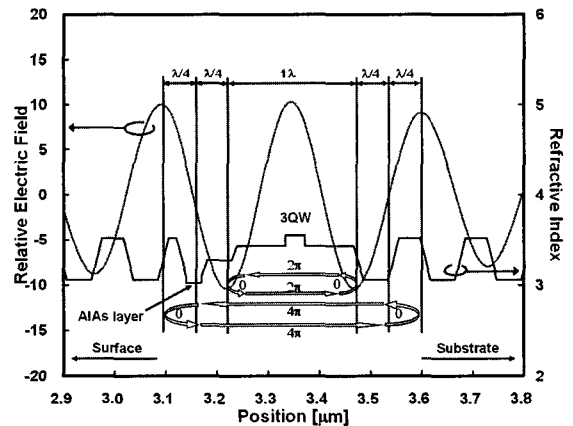
Implant VCSEL과 oxide VCSEL의 에피 구조를 설계할 때 고려해주어야 하는 특성에는 전기적인 특성과 광학적 특성이 있다. 주요 전기적 특성 지수에는 문턱전류, 직렬저항, 동작전압 등이 있다. 이러한 전기적 특성을 향상시키기 위하여 고려해주어야 할 사항에는 DBR mirror의 층 수, 캡 층의 두께 및 도핑 농도, 임플란트 마스크 또는 oxide aperture의 크기 및 금속 전극의 크기, 각 DBR mirror 이종접합 경계면에서의 전위 장벽 등이 있다. 광학적 특성 지수에는 광출력, 변환효율 등이 있고, 이러한 성능 지수를 향상시키려면 낮은 내부 흡수 손실 및 높은 상/하향 광출력 비 등이 요구된다. 이렇게 VCSEL의 전기적 특성 및 광학적 특성 지수들은 에피 구조를 매개체로 하여 서로 복잡하게 얽혀있기 때문에, 요구되는 특성에 알맞게 설계해 주어야 한다.

1. Implant VCSEL과 oxide VCSEL 활성층의 위치 조절

VCSEL의 설계요소 중 첫 번째로 활성층의 위치 조절에 대하여 알아보자. 공진기의 최적화에 앞서 공진기 및 활성층만의 영향을 살펴보기 위하여, p-DBR 및 n-DBR의 광학적 길이는 발진파장의 1/4로, 충분한 반사율을 얻도록 DBR mirror 쌍의 수는 각각 23.5, 41.5로 정하였다. 그리고 oxide VCSEL의 AIAs 층 두께는 30 nm로 정하였다.



(a)



(b)

그림 5. 1λ 공진기 VCSEL의 상대적인 전기장 분포와 굴절률의 실수부

(a) 전체 VCSEL 구조, (b) 활성층 부근

Fig. 5. Relative electric field and the real part of the refractive index in the 1λ cavity VCSEL: (a) entire VCSEL, and (b) around the active region.

그림 5는 1λ 공진기 VCSEL의 상대적인 전기장의 분포와 굴절률의 실수부를 나타낸 것으로, (a)는 VCSEL 전체 구조에 대한 그림이고, (b)는 활성층 근처만을 확대한 그림이다. 그림 5에서처럼 공진기의 광학적 길이를 λ의 정수배가 되게 하고 DBR mirror 각 층

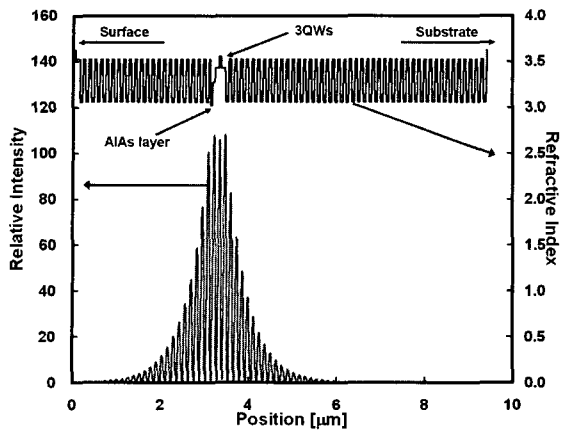


그림 6. 1λ 공진기 VCSEL에서 전기장의 세기 분포
Fig. 6. A relative intensity profile in the 1λ cavity.

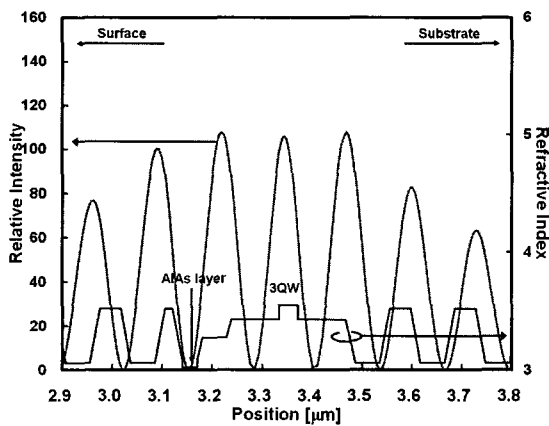


그림 7. 활성층 부근에서의 전기장 세기의 분포
Fig. 7. A relative intensity profile in the 1λ cavity VCSEL around the active region.

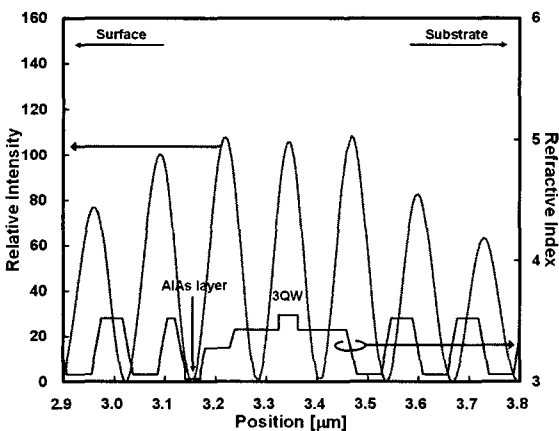


그림 8. 활성층의 위치를 전기장의 최대값에 재배치한 예
Fig. 8. An example of relocating the quantum wells at the field-peak point.

의 두께가 $\lambda/4$ 가 되게 설계하면, 공진기를 포함한 VCSEL구조에서 빛의 왕복 위상변화가 2π 의 정수배가 되는 Bragg 파장에서 보강간섭이 일어난다. 그러므로 Bragg 파장에서 레이저 발진이 이루어진다. 그림 6은 그림 5 구조에서 전기장의 크기를 제공하여 그린 것이다. 그리고, 그림 7은 전기장의 세기 분포를 활성층 부근에 대해서만 확대해서 나타낸 것이다. 문턱이득을 낮추고 광출력을 높이기 위해서는 활성층을 전기장의 최대값에 위치시켜 Γ 값을 최대화하여야 하는데, 그림 7을 보면 활성층의 위치가 약간 오른쪽으로 치우쳐져 있는 것을 알 수 있다. 그 이유는 AlAs 층이 활성층 부근에 위치함으로 하여 좌우 대칭성이 깨어졌기 때문이다. 그리고 그림 8과 같이 활성층을 재배치하면, 문턱이득은 617.854 cm^{-1} 에서 571.9686 cm^{-1} 로 감소하고, 광집속 계수가 커져 광출력 비 및 변환효율이 약 2% 정도 개선되는 것을 계산을 통하여 확인 할 수 있다.

VCSEL에서 공진기는 활성층이 있는 곳일 뿐만 아니라 발진 파장을 결정하는 영역이며, 그 길이에 따라 전기장 분포도 달라진다. 따라서 공진기의 광학적 길이는 VCSEL의 설계에 있어서 매우 중요한 변수가 된다. 공진기의 광학적 길이가 문턱이득에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1λ 공진기와 $3\lambda/2$ 공진기의 VCSEL을 설계하여, 전기장의 분포를 알아보았다. 공진기 길이만의 영향을 보기 위해서, 공진기를 제외한 나머지 부분은 모두 같게 두고 계산하였다. 그림 9의 (a)와 (b)에 각각 1λ 공진기와 $3\lambda/2$ 공진기 VCSEL 구조의 전기장 분포를 활성층 근처만 확대해서 나타내었다.

그림 9의 (a)에서는 활성층이 전기장이 최대인 곳에 있지만 (b)에서는 활성층이 전기장의 세기가 0인 곳에 있기 때문에, $3\lambda/2$ 의 공진기가 있는 구조의 VCSEL은 1λ의 공진기가 있는 구조의 VCSEL보다 문턱이득이 훨씬 높아질 것임을 짐작할 수 있다. 850 nm oxide VCSEL 구조에서 계산해보면, 1λ 공진기 VCSEL의 문턱이득은 617.854 cm^{-1} , $3\lambda/2$ 의 공진기 VCSEL의 문턱이득은 4296.125 cm^{-1} 으로 아주 크게 증가한 반면에 발진파장은 857.889 nm 에서 858.039 nm 로 0.1 nm 정도 커지는데 그쳤다. 이와 같이 공진기의 광학적 길이가 VCSEL의 문턱이득에 큰 차이를 주는 이유는 다음과 같다. 그림 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, 공진기의 양쪽 끝 부분에서는 굴절률이 높은 부분에서 낮은 부분으로 광파가 진행된다. 그러므로 공진기의 경계면에서 공진기 안쪽으로 반사되는 광파의

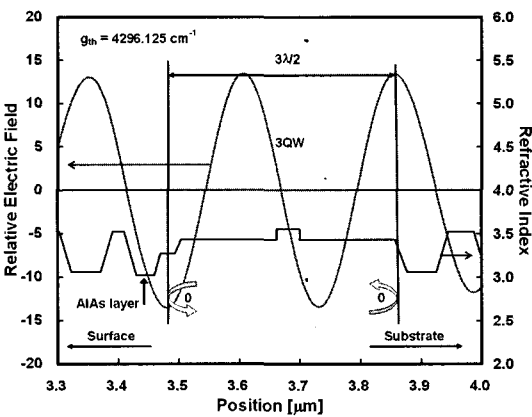
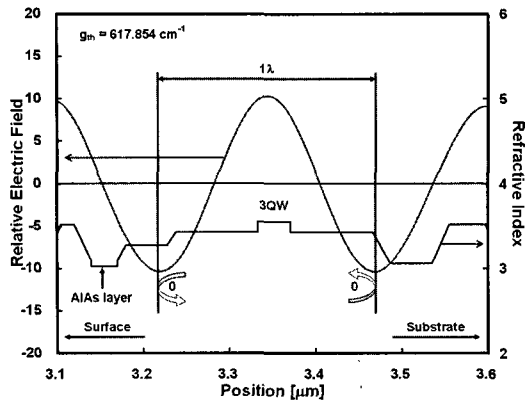


그림 9. 공진기의 광학적 길이에 따른 전기장의 분포
(a) 1λ 공진기 (b) $3\lambda/2$ 공진기
Fig. 9. The electric field profile in the VCSEL when the optical thickness of the cavity is (a) 1λ and (b) $3\lambda/2$.

위상 변화는 모두 0° 가 되어 공진기 안으로 진행하는 파와 경계면에서 반사되는 파는 서로 보강간섭을 일으킨다. 따라서 공진기의 경계면 부근에서 전기장의 세기가 최대인 정재파가 형성된다. 1λ 공진기에서 그 공진기 안에 한 주기의 정재파만이 존재하게 되므로 그림 9의 (a)처럼 활성층에서 전기장의 세기가 최대가 되지만, $3\lambda/2$ 공진기의 경우는 한 주기 반의 정재파가 존재하게 되므로 전기장의 세기가 0이 되는 정재파의 node가 활성층에 위치한다. 이렇게 r 가 0에 가까워지면서 문턱이득이 크게 증가하는 것이다.

2. DBR 최종 층에서의 위상 정합

VCSEL의 DBR grating이 끝나는 표면 층과 기판 인접 층에서는 DBR grating의 주기성이 무너지기 때문에, 이 두 부분은 새로이 최적화해 줄 필요가 있다. 공진기와 DBR mirror 층 모두 Bragg 파장에서 발진하도

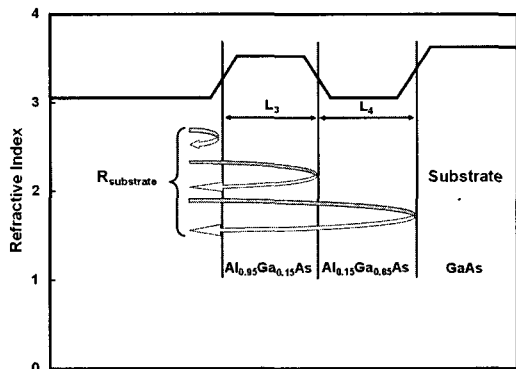
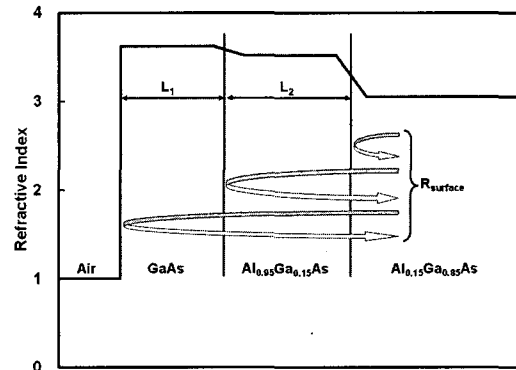


그림 10. VCSEL의 DBR 거울을 최적화하기 위해 규정한 (a)표면 쪽 반사를 $R_{surface}$ 와 (b)기판 쪽 반사를 $R_{substrate}$
Fig. 10. Schematic representation of the reflectivities at (a) the surface/air and (b) n-DBR/substrate interface.

록 설계되어 있지만, 표면과 기판에서 반사되는 파의 위상이 DBR 층에서 반사되는 파의 위상과 달라지면 발진 파장이 변하고, 문턱이득이 증가할 수 있기 때문이다. 특히 표면 부분은 반도체의 높은 굴절률에서 공기의 굴절률 1로 굴절률이 급격히 바뀌는 곳이므로 그 영향이 매우 클 수 있다. 이는 그림 5에서도 확인할 수 있는데, p-DBR 층의 수가 적어 VCSEL 표면 쪽의 전기장의 세기가 VCSEL 기판 쪽의 전기장의 세기보다 상대적으로 크기 때문에, 표면 층의 두께에 의한 영향이 상대적으로 기판 인접 층의 두께에 의한 영향보다 크다. 표면과 기판 인접 층 두께 최적화의 목표는 VCSEL 전체 구조의 문턱이득을 최소화하는 것이다. 이를 위하여 표면 쪽 두 층의 두께와 기판 인접 두 층의 두께를 변화시켜 가면서 문턱이득의 변화를 살펴보았다. 그림 10에 나타낸 바와 같이 표면 쪽에서 표면 층 L_1 , L_2 와 공기 층의 영향을 모두 고려한 Bragg 파장의 반사율 $R_{surface}$ 와 기판 인접

두 층의 길이 L_3, L_4 및 기판의 영향을 고려한 Bragg 파장의 반사율 $R_{\text{substrate}}$ 의 위상이 $\pm 180^\circ$ 가 되도록 L_1, L_2, L_3, L_4 각각의 두께를 조절한다. 이렇게 하면, 표면 및 기판 경계면에 전기장의 최대값이 위치하게 된다. 즉 공진기를 포함한 전체 VCSEL 구조 내에서 Bragg 파장의 빛이 정재파를 형성하는 것이다.

그림 11의 (a)는 표면 쪽 두 층의 두께를 변화시키면서 문턱이득의 변화를 나타낸 것이고, (b)는 기판 쪽 두 층의 두께를 변화시키면서 문턱이득의 변화를 나타낸 것이다. 그림 11의 (a)와 (b)를 보면 표면 및 기판에 인접한 두 층의 길이 L_1, L_2 와 L_3, L_4 를 적절히 조합하여 문턱이득을 최소화할 수 있음을 알 수 있다. 이 두께 조합은 그림 10에 보인 R_{surface} 와 $R_{\text{substrate}}$ 의 위상이 $\pm 180^\circ$ 가 되는 두께에 해당한다. 따라서 문턱이득만으로 VCSEL을 설계한다고 가정하면, 그림 11에서

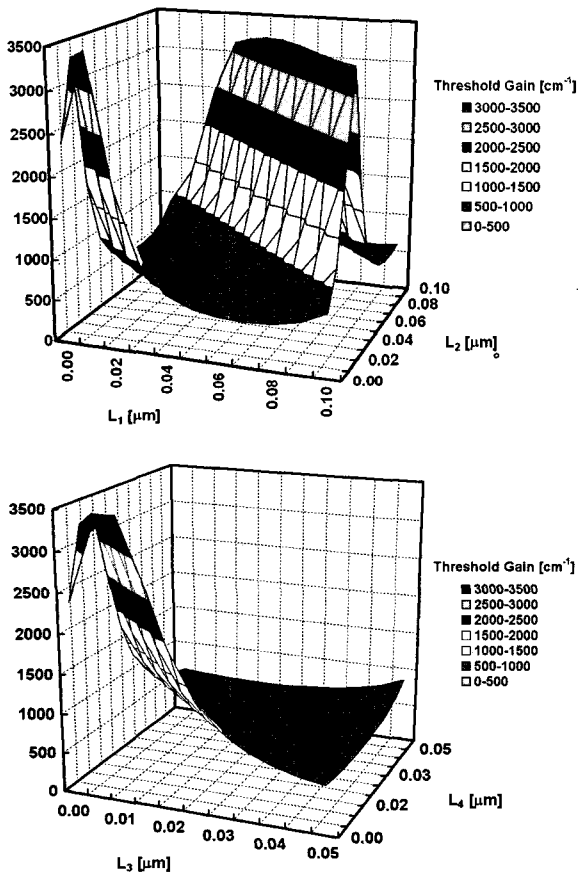


그림 11. 표면 인접 두 층 L_1, L_2 와 기판 인접 두 층 L_3, L_4 의 길이 변화에 따른 문턱이득의 변화
 Fig. 11. Threshold gain changes with the various combinations of two layers to adjacent (a) the surface and to (b) the substrate. 문턱이득이 최소가 되는 조합을 찾아서 두께를 조절해

주면 된다. 그러나 GaAs 캡 층은 금속 전극과 바로 접촉되는 부분이기 때문에 Ohmic contact을 위해서 충분한 두께가 유지되어야 하고, 전극 아래에서 활성층 가운데 부분으로 흘러가는 전류 성분에 의한 저항을 줄여주기 위해서 도핑도 높게 해 주어야 한다.

3. 각 층에서 광전력의 분포

II장에서 논의한 광전력 계산 방법을 이용하여 계산한 VCSEL 활성층에서의 광전력 흐름을 그림 12에 나타내었다. 계산에 사용한 oxide VCSEL은 표면으로부터 순서대로 금속 전극, 23.5 쌍의 p-DBR 영역, 1λ 공진기, 41.5 쌍의 n-DBR 영역 그리고 가장 아래쪽에 GaAs 기판으로 구성되어 있다.

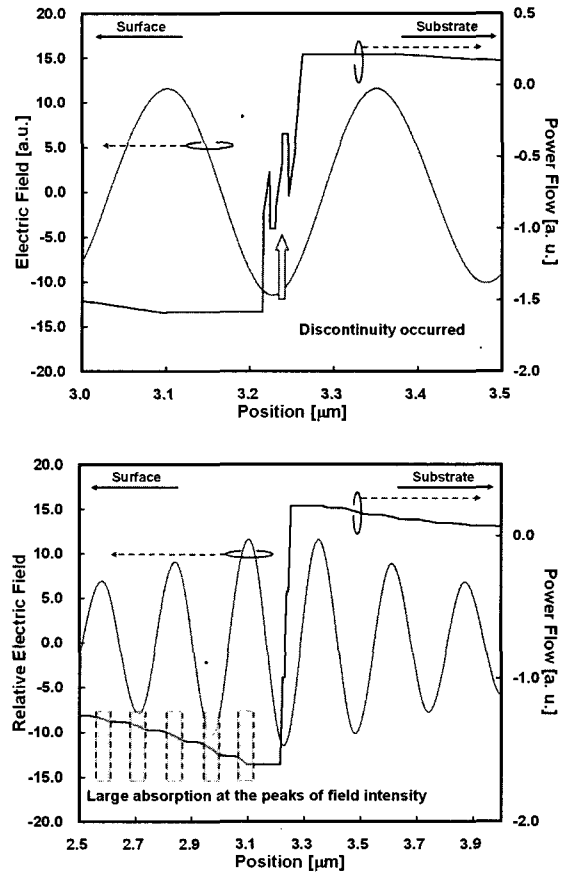


그림 12. (a) 활성층 근처에서 광집속 계수를 고려하지 않고 계산한 기판 방향으로의 Poynting 벡터 와 (b) 광집속 계수를 고려하고 계산했을 때의 Poynting 벡터

Fig. 12. Poynting vector flow profile with the optical confinement factor (a) taken into account and (b) not taken into account

그림 12의 (a)는 광집속 계수를 고려해 주지 않았을

때 활성층 근처에서의 Poynting 벡터이고, 그림 12의 (b)는 광집속 계수를 곱해주었을 때의 Poynting 벡터를 약간 더 넓은 영역에서 나타낸 그림이다. 비교를 위하여 전기장 분포를 함께 나타내었다. 전기장의 분포는 복소수 전기장 E 의 실수부인 $Re[E]$ 이며, 왼쪽이 표면 방향 오른쪽이 기판 방향이다. 그림 12의 (a)를 보면 양자우물이 있는 부분에서 Poynting 벡터의 흐름에 불연속성이 있는 것을 발견할 수 있다. 우리가 사용하는 전달 행렬 방법은 레이저의 정상 상태 동작을 가정하고 있으므로 전력의 분포에 불연속성이 있을 수 없다. 광집속 계수를 고려한 다음, 전력분포를 나타낸 것이 그림 12의 (b)이다. 그림 12의 (b)에서는 그림 12의 (a)에서와는 달리 전력분포에 불연속성이 없다. 그림 13의 (a)에서의 Poynting 벡터는 단순히, 각 층에서의 Poynting 벡터의 차이 즉, $S'_{k,down} - S_{k,up}$ 만을 나타낸 것이다. 이와는 달리 그림 12의 (b)는 z-축 방향으로 각각의 층을 여러 개의 작은 분할로 나눈 뒤 각각 층에서의 optical field 분포를 구한 다음, 식 (14)를 사용하여 구한 광집속 계수 값을 Poynting 벡터의 차이에 곱한 즉, $\Gamma_k \cdot [S'_{k,down} - S_{k,up}]$ 를 나타낸 것이다. 그림 12의 (b)에서 그림자 처리된 영역인 광집속 계수가 큰 곳 즉, 전기장 분포의 극대인 곳에서 광전력의 흡수가 크게 일어나는 것도 알 수 있다. 이처럼 각 층에서 생성 또는 흡수되는 광전력을 계산하려면 그 층에서의 광집속 계수를 Poynting 벡터 차이에 곱해주어야 한다.

그림 13은 광전력의 흐름 및 굴절률을 VCSEL 전체에 대해서 나타낸 것이다. 이 그림을 보면, VCSEL 내부에서 생성 또는 흡수된 전력 P_{gen} , $P_{loss,p-DBR}$, $P_{loss,n-DBR}$ 과 출력되는 전력 $P_{out,top}$, $P_{out,bot}$ 각각의 크기가 얼마가 되는지를 아주 명료하게 알 수 있다. 그리고 이렇게 계산한 광전력을 이용하면 상/하향 광출력 비 $P_{out,top} / P_{out,bot}$ 도 구해낼 수 있다. 따라서 VCSEL의 외부 양자효율도 계산할 수 있다.

4. p- 및 n-DBR 층 수의 변화에 따른 변환효율의 변화

VCSEL에서 DBR 거울 층은 공진기 거울로서의 본연의 역할뿐만 아니라 흡수 층으로서의 나쁜 역할도 하기 때문에, 광출력이나 변환효율을 예측하는 것이 F

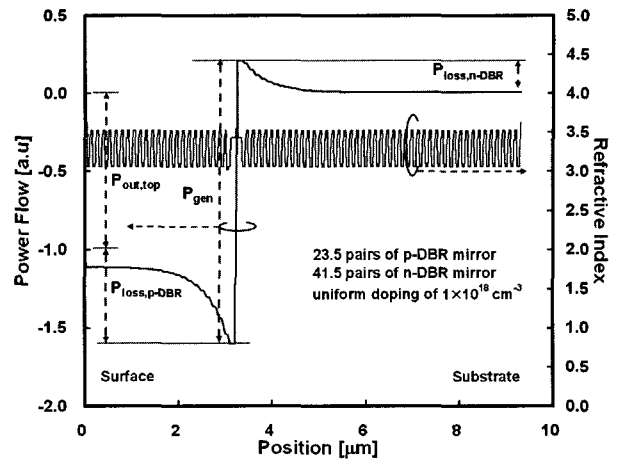


그림 13. VCSEL 내부에서의 광전력의 흐름
Fig. 13. Power flow in a VCSEL.

abry-Perot 레이저와 DFB(distributed feedback) 레이저보다 훨씬 까다롭다. VCSEL의 상/하향 광출력 비 및 변환효율 SE (slope efficiency)를 전달 행렬 방법으로 구한 광전력 요소를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$SE = \eta_{id} \cdot \frac{h\nu}{q} \cdot \frac{P_{out,top}}{P_{gen}} \cdot \frac{g_{th}(\alpha_i=0)}{g_{th}(\alpha_i=0) + \alpha_i} \quad (13)$$

여기에서 η_{id} 는 내부미분양자효율(internal differential quantum efficiency), h 는 Planck 상수, ν 는 발진되는 빛의 파장, q 는 전자의 전하량이다. 그리고 α_i 는 내부 손실이고 $g_{th}(\alpha_i=0)$ 은 활성층의 내부 손실이 0일 때 구한 문턱이득이다. $P_{out,top}$ 과 P_{gen} 은 앞에서 기술한 방법으로 계산할 수 있고, $g_{th}(\alpha_i=0)$ 은 II.2에 기술한 방법으로 구한다. 식 (13)에서 내부미분양자효율 η_{id} 는 1로 가정하였다. 즉 문턱전류 이상에서 추가 주입된 모든 전자-정공 쌍은 활성층으로 주입되어 광자로 바뀐다고 가정한 것이다. 전달 행렬 방법으로 구한 문턱이득 값은 활성층에서의 흡수손실을 극복하고 난 값이기 때문에 그 값 자체에는 흡수 손실의 영향이 포함되지 않는다. 그러

므로 $\frac{g_{th}(\alpha_i=0)}{g_{th}(\alpha_i=0) + \alpha_i}$ 를 곱해 주어야 활성층에서의 흡수손실이 고려된 실제의 변환효율이 된다. 그리고, 누설전류가 없다고 가정하면 문턱이득으로부터 문턱전류 밀도를 구할 수 있다.

$$J_{th} = N_w \cdot J_{tr} \cdot \exp(g_{th}/g_0) \quad (14)$$

N_w 는 양자우물의 수, J_{tr} 은 광이득이 0일 때의 전류밀도, g_0 는 물질이득 상수이며 각각 3, $110 A/cm^2$,

1300 cm^{-1} 를 사용하였다 [6]. 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 변환 효율 SE 와 문턱전류밀도 J_{th} 를 n-DBR 및 p-DBR 쌍의 수를 바꿔가면서 계산하여 그림 14에 나타내었다. 그림 14를 보면 p-DBR 거울 쌍의 수가 증가할수록 변환효율 SE 와 문턱전류밀도 J_{th} 가 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 문턱전류가 가장 높은 그리고 변환효율이 가장 낮은 데이터가 n-DBR이 31쌍일 때의 결과이고, n-DBR이 41, 45쌍일 때에는 데이터가 거의 겹쳐져 있는 것을 알 수 있다.

변환효율 SE 는 p-DBR 거울 쌍의 수가 19보다 많아지면서 감소율이 커지는 것을 볼 수 있다. 문턱전류밀도 J_{th} 는 p-DBR 거울 쌍의 수가 약 17이 될 때까지는 급격히 감소하지만 그 보다 많을 때에는 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 변환효율과 문턱전류밀도만을 고려하여 VCSEL 구조를 설계한다면, 약 20쌍의 p-DBR 거울 수가 적합하다고 할 수 있겠다. n-DBR 거울 층의 수 역시 VCSEL의 변환효율 및 문턱전류밀도에 영향을 준다. 그림 14의 결과로 보면 40쌍 정도가 n-DBR 거울 층의 수로 적합하다고 할 수 있다. n-DBR 쌍의 수가 41, 45인 경우를 비교해 보면, 변환효율 및 문턱전류밀도의 값이 p-DBR 쌍의 수에 관계없이 거의 같다는 것을 알 수 있다. 이것은 n-DBR 거울 쌍의 수가 약 41쌍 이상으로 많아지게 되면 더 쌓아진 n-DBR 거울 쌍은 변환효율 및 문턱전류의 변화에 기여하지 못한다는 것을 의미한다.

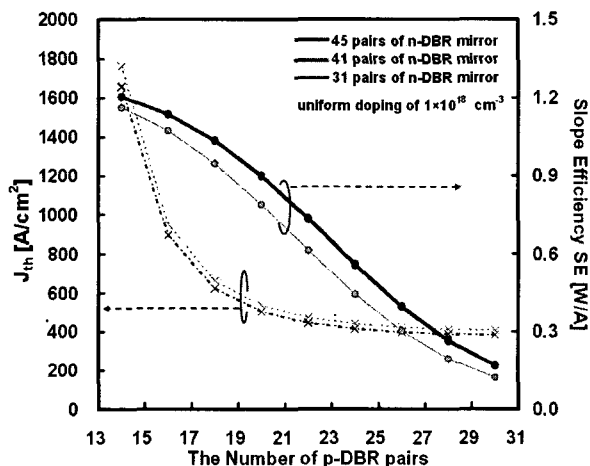


그림 14. p-DBR 및 n-DBR쌍 수의 변화에 따른 변환효율 및 문턱전류밀도의 변화
Fig. 14. Change in the slope efficiency and threshold current density with the number of p- and n-DBR mirror pairs.

5. 반사 스펙트럼

II장에서 기술한 식 (6)의 반사율을 입력 파장을 바꿔가면서 그린 것이 그림 15이다. 그림 15를 보면 발진 파장은 0.857 μm 가 되는 것을 알 수 있고, 발진 파장 양 옆에서의 반사율은 약 0.96이 되는 것을 알 수 있다. 반사 스펙트럼은 발진 파장을 구하는 것 이외에, 에피 층이 정확히 성장되었는지를 알아보는 데에도 사용할 수 있다. 계산된 반사 스펙트럼을 측정된 반사 스펙트럼의 Fabry-Perot dip, 정지 대역폭, 어깨 부분, side lobe 모습 등의 차이를 중심으로 비교하면 공진기 및 DBR 거울 층이 설계한 대로 잘 성장되었는지를 점검할 수 있다.

IV. 결론

전달행렬 방법을 사용하여 VCSEL의 최적구조를 설

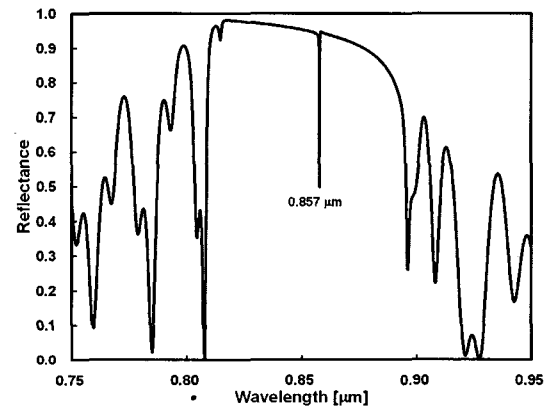


그림 15. 1 λ 공진기 VCSEL의 반사 스펙트럼
Fig. 15. A reflection spectrum of the 1 λ cavity VCSEL

계하는 방법론에 대하여 기술하였다. 먼저, VCSEL에서 광전력 흐름을 계산하여 활성층에서 생성되는 전력, DBR 층에서 흡수되는 전력, 위로 나오는 광출력과 기판으로 나가 흡수되는 전력 등을 정확하게 계산하려면 각 층에서의 광집속 계수를 곱해 주어야 함을 발견하였다. 그리고 이를 토대로 변환효율과 상/하향 광출력 비를 구하는 방법을 제시하였다. DBR 층의 수에 따른 변환효율과 발진 문턱전류밀도의 변화로부터 최적의 VCSEL 구조를 설계하는 기법에 대하여도 기술하였다. 이 최적화에는 활성층의 위치, DBR 마지막 층에서의 위상정합 등도 함께 고려하였다. 한편, 반사 스펙트럼은 VCSEL 에피 구조가 설계된 대로 만들어졌는지를 점검하는 도구로 사용할 수 있음도 보였다. 이렇게, 전달행렬 방법은

VCSEL과 같은 다층구조 광전소자 설계에 유용한 도구이다.

참 고 문 헌

- [1] G. R. Hadley, K. L. Lear, M. E. Warren, K. D. Choquette, J. W. Scott, S. W. Corzine "Comprehensive Numerical Modeling of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers" *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 32, no. 4, Apr. 1996
- [2] Y. Kim, S. Nam, J. Jeong, "Yield Estimation of 10-Gb/s Electroabsorption Modulator-Integrated DFB Lasers Due to Chirp," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 447-449, Apr. 2002
- [3] O. A. Lavrova, D. J. Blumenthal, "Detailed Transfer Matrix Method-Based Dynamic Model for Multisection Widely Tunable GCSR Lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18 no. 9 pp. 1274-1283, Sep. 2000
- [4] J. Hong, W.-P. Huang, T. Makino, "Static and Dynamic Simulation for Ridge-Waveguide MQW DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 1, Jan. 1995
- [5] R. Michalzik, K. J. Ebeling, "Modeling and Design of Proton-Implanted Ultralow-Threshold Vertical-Cavity Laser Diodes" *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 29, no. 6, June, 1993
- [6] 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



정 재학중

김 태 용(학생회원)

2001년 2월 : 아주대학교 정보통신대
학 전자공학부 졸업 (공학사), 2003년
2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과
(공학석사), 2003년 3월 ~ 현재 : 아
주대학교 대학원 전자공학과 박사과

김 상 배(정회원)

第37卷 SD編 第8號 參照

현재 : 아주대학교 정보통신대학 전자공학부 교수