

논문 2004-41SD-9-5

Oxide층의 두께와 위치 조절을 통한 oxide-VCSEL의 단일모드 동작반경 확장

(Extending the Single-Mode-Operation Radius of the Oxide-VCSEL by
Controlling the Thickness and Position of the Oxide-Layer)

김 남 길*, 김 상 배*

(Nam Gil Kim and Sang Bae Kim)

요 약

oxide 층의 위치와 두께 조절을 통하여 oxide-VCSEL이 단일모드로 동작하는 활성영역의 반경을 확장하는 방법을 Self-consistent effective-index 방법을 이용하여 제시하였다. 이렇게 활성영역이 넓어지면 고속, 고신뢰도, 고출력 동작에 유리한 단일모드 VCSEL을 만들 수 있게 된다. 고출력을 위하여 단일모드로 동작하는 활성영역을 확대하는 방법을 요약하면 다음과 같다. 첫째, oxide 층은 활성층에서 멀리 떨어진 곳에 위치시켜야 한다. 둘째, oxide 층은 얇게 만들어야 한다. 셋째, oxide 층을 node에 위치시켜야 한다. 그리고 고출력을 위하여 p-DBR 쌍의 수를 줄이는 것은 단일모드 동작조건을 변화시키지 않는다. 이 방법을 사용하면 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 300% 이상 키울 수 있다.

Abstract

We have proposed a design methodology for large active-area single-mode VCSELs, which have higher reliability and output power, and are well-suited for high-speed operation. The key idea underlying the design methodology is to reduce the effective index difference between active and cladding regions by controlling the thickness and position of the oxide layer. The idea is confirmed by the self-consistent effective index method. By placing the oxide layer position properly, we can increase the radius of the oxide aperture for single-mode operation by 3 times.

Keywords : VCSEL, Semiconductor lasers, Single-mode, Oxide-layer, effective index

I. 서 론

VCSEL(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)은 낮은 문턱전류, 높은 광전변환 효율 낮은 온도 의존성, 저가격, 빠른 동작속도 등의 장점을 갖추어 Gigabit Ethernet에 사용할 수 있는 근거리 통신용소자로 각광을 받고 있다. 특히 oxide-VCSEL은 implant-VCSEL보다 동작속도가 빨라 gigabit/sec 이상의 고속 통신용 광소자로 적합하다.^{[1]-[2]} 이에 따라 10Gigabit Ethernet 표준안에도 VCSEL이 포함되어 있다.

Oxide-VCSEL을 10 gigabit/sec 정도의 고속으로 동작시키기 위해서는 단일모드로 동작시켜야 한다. 다중모드 VCSEL에서는 고차모드가 발진하면서 파형의 왜곡이 크게 나타나 데이터 에러가 높아지기 때문이다. 또, 주어진 데이터 에러를 맞추려면 레이저 구동 신호의 크기나 바이어스 전류를 잘 조절해 주어야 한다.^{[3]-[4]} 지금까지 발표된 연구결과에 따르면 oxide-VCSEL은 oxide-aperture 지름이 약 $3.5\mu\text{m}$ 이하일 때 단일모드로 동작한다.^{[5]-[6]} 그러나 oxide-aperture 지름이 $3.5\mu\text{m}$ 정도로 작으면 광출력이 낮고 소자수명이 짧아 통신용 광소자로서 부적합하다.^[7] 그러므로 oxide-VCSEL을 고속 동작에서 안정적으로 사용하기 위해서는 단일모드로 동작하는 oxide-aperture의 크기를 최대화할 필요가 있다. 이렇게 oxide

* 정회원, 아주대학교 전자공학부

(Dept. Electronics Eng., Ajou University)

접수일자: 2004년1월30일, 수정완료일: 2004년8월31일

-aperture를 키워 활성영역의 면적을 늘리는 것은 광출력을 높이는 방법이기도하다.

이전의 여러 연구에서는 단일모드 oxide-VCSEL을 제작하기 위해서 표면에칭 방법과 metal-aperture 크기를 조절하는 방법이 사용되었다.^{[8]-[10]} 이 방법들은 고차모드의 발진을 억제함으로써 단일모드 동작영역을 넓히려는 것이었다. 그러나 기본모드의 동작도 나쁜 영향을 받아 문턱전류가 증가하고, L-I특성의 비선형성이 나타나는 문제점들이 생겼다. 이 연구의 목표는 oxide층의 두께와 위치조절만으로도 단일모드 동작영역을 확대할 수 있어, 고출력과 고신뢰도 단일모드 oxide-VCSEL을 만들 수 있음을 보이는 것이다. Self-consistent effective-index method로 계산한 결과, oxide 층의 위치를 조절함으로써 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 3배 정도 증가시킬 수 있었다.

II. Oxide-aperture 크기에 따른 850nm oxide-VCSEL의 모드별 발진파장, 발진모드, 광집속 계수 계산

Oxide-VCSEL의 발진파장과 발진모드 등 광학적 특성을 해석하기 위해서 Self-Consistent Effective-Index (S-EI) 방법을 사용하였다.^[11] Oxide-VCSEL은 원통형의 도파로 구조이므로 평면 도파로 해석에 사용하는 Effective-Index(EI) 방법을 그대로 적용할 수 없다.^[12] S-EI 방법은 EI 방법을 oxide-VCSEL의 광학적 특성을 해석하기 위해 확장한 방법이다. 시뮬레이션에 사용한

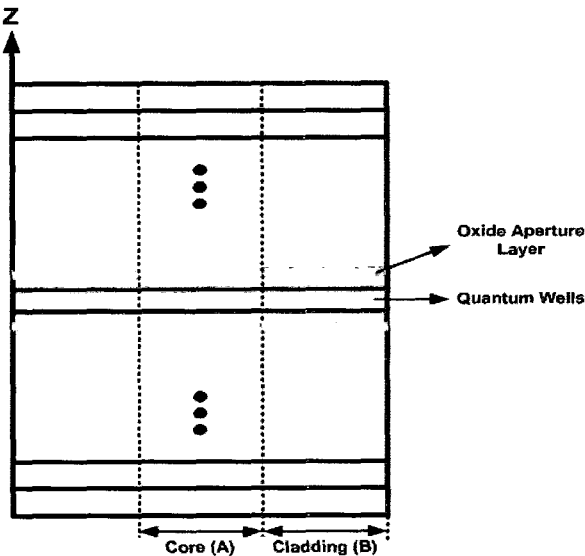


그림 1. Oxide-VCSEL의 구조
Fig. 1. Structure of the oxide-VCSEL.

파라미터 값은 Al₂O₃의 굴절률과 Al_xGa_{1-x}As의 굴절률이다. 이 값은 Y.Kokubo 수식을 실험값과 근사하도록 수정하여 사용하였다.^[13]

그림 1은 일반적인 oxide-VCSEL의 구조를 나타낸 그림이다. S-EI 방법에서 원통형의 도파로 구조를 갖는 oxide-VCSEL은 oxide 층이 있는 cladding 영역과 활성영역인 core 영역으로 구분된다. oxide-VCSEL의 광학적 특성을 계산하기 위해서는 먼저 cladding 영역과 core 영역의 유효 굴절률을 구해야 한다. 유효 굴절률은 다음 수식을 사용해 구할 수 있다.

$$n_{core,eff}^2 = \frac{\sum_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} n_{i,core}^2 E_z^2 dz}{\int E_z^2 dz} \tag{1-1}$$

$$n_{clad,eff}^2 = \frac{\sum_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} n_{i,clad}^2 E_z^2 dz}{\int E_z^2 dz} \tag{1-2}$$

$n_{core,eff}$, $n_{clad,eff}$ 는 각각 core 영역과 cladding 영역의 유효 굴절률이고 n_i 는 i 번째 층의 굴절률이다. 유효 굴절률을 구한 다음 core 영역과 cladding 영역의 유효 굴절률을 광섬유 형태의 도파로 형태에 적용시킨다. 그리고 다음의 식을 사용하여 수평방향의 전파 상수를 구하게 된다.

$$k_t^2 = n_{core}^2 k_0^2 - \beta^2 \tag{2}$$

여기서 k_t 는 수평방향의 전파상수이고, k_0 는 전달행렬 방법으로 구한 초기 전파상수 값이다. β 는 광섬유 형태의 도파로에 적용시켜 구한 전파상수이다. 수평방향의 전파상수 값을 사용하여 각 층의 새로운 굴절률을 구하면 다음식과 같다.

$$n_{i,change}^2 = n_i^2 - \frac{k_t^2}{k_0^2} \tag{3}$$

$n_{i,change}$ 는 계산과정에서 구한 각 층의 새로운 굴절률이다. 수평방향의 전파상수 k_t 가 일정한 값으로 수렴할 때까지 위의 계산과정을 반복하여 VCSEL의 광학적 특성을 해석한다.

Oxide-VCSEL에서 oxide-aperture 크기는 VCSEL의 광학적 특성에 영향을 주게 된다. 그 이유는 광섬유 형태 도파로의 전파상수가 core영역의 크기에 해당하는 aperture 크기에 따라 변하기 때문이다. 전파상수의 변화

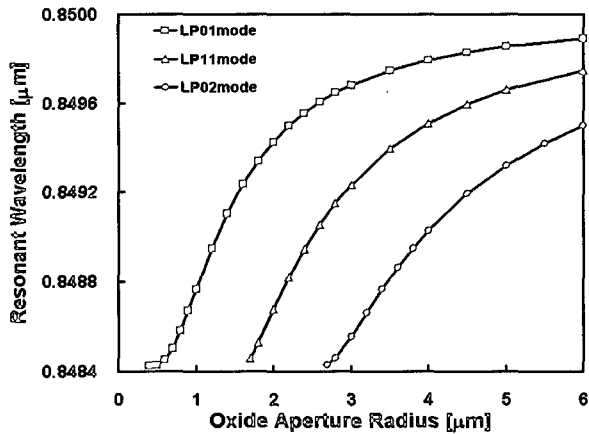


그림 2. Oxide-aperture 크기에 따른 모드별 발진파장의 변화

Fig. 2. Change of the resonant wavelength of each resonant mode with the radius of oxide-aperture.

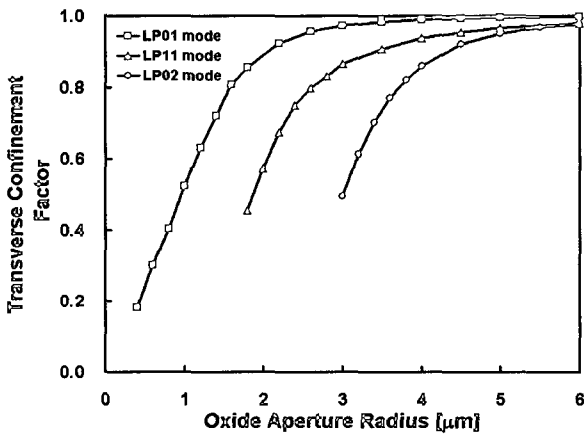


그림 3. oxide-aperture 반경에 따른 수평방향의 광집속 계수

Fig. 3. Transverse optical confinement factor versus oxide-aperture radius.

는 S-EI 방법으로 oxide-VCSEL의 발진파장과 발진모드를 해석할 때 광학적 특성이 달라지게 하는 원인이 된다.

해석에 사용된 Oxide-VCSEL은 1λ cavity와 그 위와 아래에 p-DBR 층 22쌍, n-DBR 층 42쌍으로 이루어져 있다. 그리고 oxide 층은 p-DBR 층에만 있고 두께는 30 nm이다. 그림 2에 oxide 층이 활성층 바로 위에 있을 때 S-EI 방법으로 계산한 oxide-aperture 크기에 따른 모드별 발진파장을 나타내었다. Oxide-aperture 크기가 작아질수록 발진파장이 단파장 영역으로 이동함을 알 수 있다. 그 이유는 oxide-aperture 크기가 작아질수록 수평방향의 전파상수가 커지기 때문이다. 수평방향의 전파상수가 커지게 되면 S-EI 방법으로 새롭게 계산한 각 층의 굴절률이 작아져 발진파장이 단 파장 영역으로 이동하는

현상이 나타나게 된다.

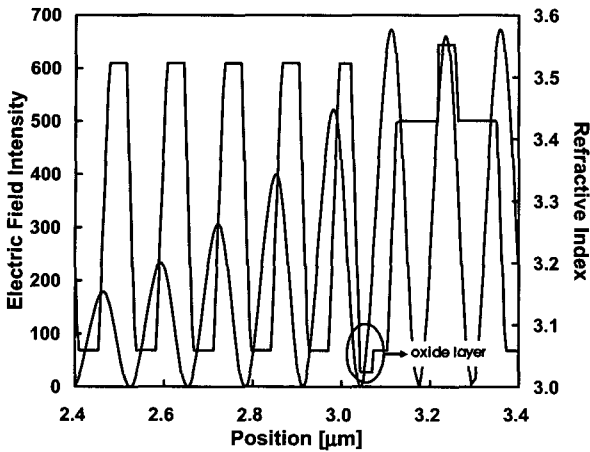
발진모드의 cutoff 조건을 살펴보면 oxide-aperture 반지름이 $1.5\mu\text{m}$ 보다 작을 때 LP₁₁ 모드가 cutoff되고, $2.5\mu\text{m}$ 보다 작을 때는 LP₀₂ 모드가 cutoff된다. 따라서 oxide-aperture 반지름이 $1.5\mu\text{m}$ 보다 작을 때에만 단일모드로 동작함을 알 수 있다. 그림 3은 oxide-aperture 크기에 따라 변하는 수평방향의 광집속 계수를 나타낸 그림이다. 광집속 계수는 다음 식을 사용하여 구했다.

$$\Gamma_{br} = \frac{\int_{core} n(\rho) E^2 \rho d\rho d\phi}{\int n(\rho) E^2 \rho d\rho d\phi} \quad (4)$$

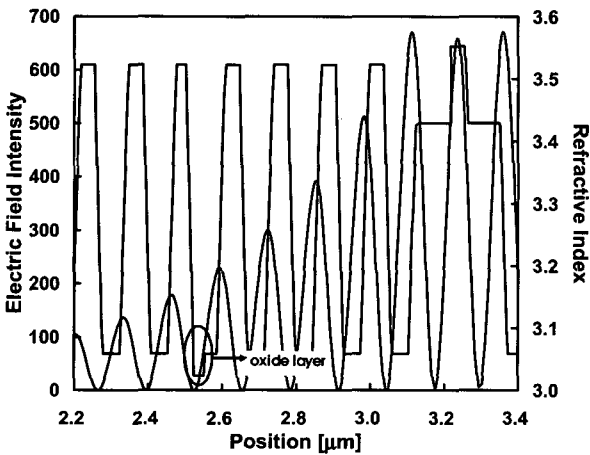
여기서 ρ 는 실린더 좌표계의 반경, ϕ 는 방위각이며, (4)식에서 분자는 core 영역에 분포하는 power flux의 세기이고 분모는 core 영역과 cladding 영역에 분포하는 power flux의 세기이다. 수평방향의 광집속 계수는 oxide-aperture 크기에 따라 변함을 알 수 있다. 특히 oxide-aperture 크기가 작아질수록 급격히 변함을 알 수 있다. 광집속 계수가 작아지면 문턱이득이 커지는 문제가 발생한다. 문턱이득을 줄이기 위해서 oxide-aperture 를 크게 하여 광집속 계수를 높이면 발진모드 수가 증가하는 문제가 발생하게 된다.

III. Oxide층의 위치와 두께에 따른 발진파장과 발진모드 분석

oxide 층의 위치가 달라지면 oxide 층이 위치한 곳에서 전기장의 분포가 그림 4처럼 달라진다. 이렇게 oxide 층이 위치한 곳에서 전기장의 분포가 달라지면 oxide-VCSEL의 cladding 영역에서의 유효 굴절률이 달라진다. 따라서 oxide층의 위치에 따라 발진파장과 발진모드 등 광학적 특성이 변하게 된다. 그림 4(a)에서보다 그림 4(b)가 oxide 층이 위치하는 곳에서 전기장의 세기가 작다. 그러므로 oxide 층이 활성층으로부터 DBR 층 네 쌍 위에 있는 그림 4(b)의 경우가 core영역과 cladding영역의 유효 굴절률의 차이가 작음을 알 수 있다. 그림 5는 그림 4(b)의 경우에 대해 모드별 발진파장을 나타낸 그림이다. oxide 층이 활성층 바로 위에 있을 때인 그림 2의 경우와 비교하면 LP₁₁ 모드와 LP₀₂ 모드가 cutoff되는 oxide-aperture 크기가 커졌음을 알 수 있다. 모드가 발진할 수 있는 조건은 다음 식으로 주어지는 V값에 의해서 결정된다.



(a)



(b)

그림 4. Oxide-VCSEL에서 전기장 세기의 분포도. (a) Oxide 층이 활성층 바로 위에 있는 경우와 (b) Oxide 층이 활성층으로부터 네 쌍의 p-DBR위에 있는 경우

Fig. 4. Electric field profile in the oxide-VCSEL : (a) Oxide layer located just above the cavity and (b) oxide layer located 4 DBR pairs away from the cavity.

$$V = k_0 \cdot r \cdot (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{1/2} \quad (5)$$

여기서 r은 core 영역의 반경이고, n_{core} , n_{clad} 는 각각 core와 cladding 영역의 유효 굴절률이다. V값이 2.405보다 작으면 LP11 모드가 cutoff되고, V값이 3.832보다 작으면 LP02 모드가 cutoff된다. oxide 층이 활성층에서 멀어질수록 $n_{core}^2 - n_{clad}^2$ 가 작아지므로 LP11 모드와 LP02 모드가 각각 cutoff되는 oxide-aperture 크기가 커지게 된다. oxide 층이 활성층으로부터 네 쌍의 DBR 층 위에 있는 그림 4(b)의 경우가 oxide 층이 활성층 바로

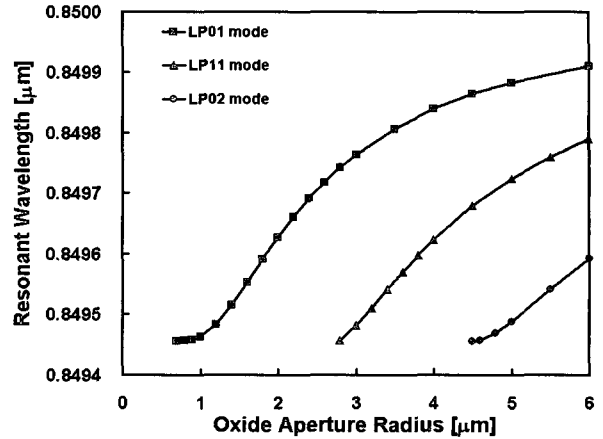


그림 5. Oxide 층이 활성층으로부터 네 쌍의 p-DBR 위에 있을 때 oxide-aperture 크기에 따른 모드별 발진파장의 변화

Fig. 5. Change of the resonant wavelength of each resonant mode with the size of oxide-aperture when the oxide layer is located 4 DBR pairs away from the cavity.

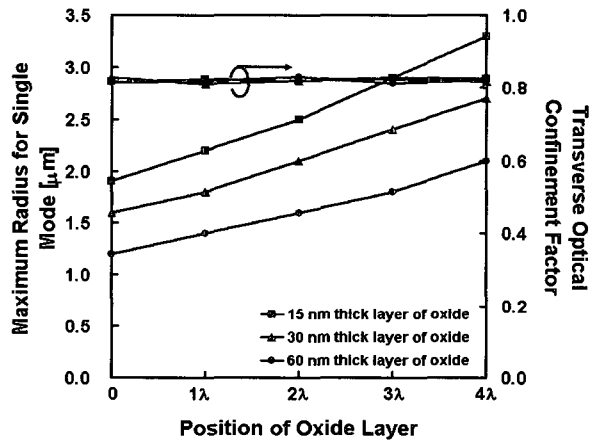


그림 6. Oxide 층의 위치와 두께에 따른 단일모드 동작 조건과 수평방향 광집속 계수

Fig. 6. Dependence of the condition of single-mode operation and the transverse optical confinement factor on the position and thickness of the oxide-layer.

위에 있는 그림 4(a)의 경우보다 단일모드로 동작하는 oxide-aperture가 큰 것은 n_{clad} 가 증가하면서 $n_{core}^2 - n_{clad}^2$ 값이 줄어들기 때문이다.

그림 6은 oxide 층의 위치에 따른 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기의 변화를 보여준다. 이 그림에서 oxide 층의 위치는 1λ cavity의 p-DBR쪽 가장자리를 기준으로 했을 때 oxide 층까지의 거리를 optical thickness로 나타낸 것이다. oxide 층의 위치가 활성층에서 멀어질수록 단일모드로 동작하는 oxide-aperture가 커짐을 확인할 수 있다. 또 oxide층의 두께가 얇을수록 단일모드로

동작하는 oxide-aperture가 커짐을 확인할 수 있다. 그림 5를 통하여 단일모드로 동작할 때의 수평방향 광집속 계수는 크게 변하지 않는다는 사실 또한 알 수 있다. 따라서 단일모드 동작과 높은 광출력을 동시에 만족하기 위해서는 얇은 oxide 층이 활성층에서 멀리 떨어져 있도록 설계해야 한다.

IV. Node와 anti-node 위치에 따른 발진파장과 발진모드 분석

Oxide 층이 전기장 세기 분포도의 어느 위치에 있는가도 발진모드에 영향을 주게 된다. 전기장 세기 분포에 따라 core와 cladding 영역의 유효 굴절률이 변하기 때문이다. 그러므로 oxide 층이 있는 DBR 층의 위치가 정해져 있더라도, 그 층의 어느 부분에 oxide 층이 존재하느냐에 따라 모드 특성이 달라진다. 그림 7은 oxide 층이 전기장의 세기가 최대인 곳(anti-node)에 위치한 경우와 최소인 곳(node)에 위치한 경우를 비교하여 보여주는 그림이다. oxide 층이 node에 위치한 경우에는 core와 cladding 영역의 유효 굴절률 차이가 최소가 되므로 식(5)을 통하여 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기가 최대가 됨을 알 수 있다. 반대로 oxide층이 anti-node에 위치한 경우에는 core와 cladding 영역의 유효 굴절률 차이가 최대가 되므로 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기가 최소가 됨을 알 수 있다. 이러한 사실은 oxide 층의 두께가 30nm일 때, oxide 층의 위치에 따른 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기의 최대값을 나타낸 그림 8을 통해 보다 자세히 알 수 있다. oxide 층의 위치가 node에서 anti-node로 갈 때 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기가 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서 단일모드로 동작하는 oxide-aperture를 크게 하기 위해서는 oxide 층의 위치를 DBR 내부의 node에 위치시켜야 한다. 위의 사실은 oxide 층이 anti-node에서보다 node 근처에 위치할 때 발진모드 수가 감소하는 M. Grabherr의 연구결과와 잘 일치한다.^[14] 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 최대가 되게 하려면 수 nm내에서 oxide 층의 위치를 조절해야 하므로 MOCVD와 같은 정밀한 에피 성장이 필요하다.

VCSEL을 고속 통신용 소자로 사용하기 위해서는 단일모드 동작뿐 아니라 고출력이 요구된다. 고출력 단일모드 VCSEL을 제작하기 위해서는 p-DBR 쌍의 수를 줄이는 방법이 있다. 그림 9는 p-DBR 쌍의 수에 따라 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기가 어떻게 변하는지

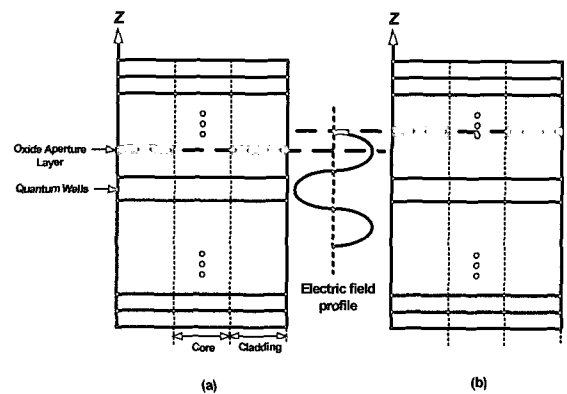


그림 7. Oxide 층의 위치: (a) Anti-node와 (b) node.
Fig. 7. The position of oxide-layer: (a) Anti-node and (b) node.

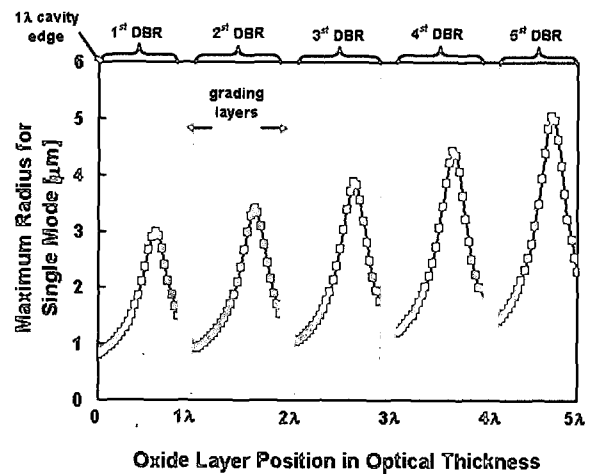


그림 8. Oxide 층이 anti-node에서 node로 이동해 갈 때 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기의 변화.
Fig. 8. The radius of the oxide-aperture for single-mode operation as the oxide-layer moves from anti-node to node.

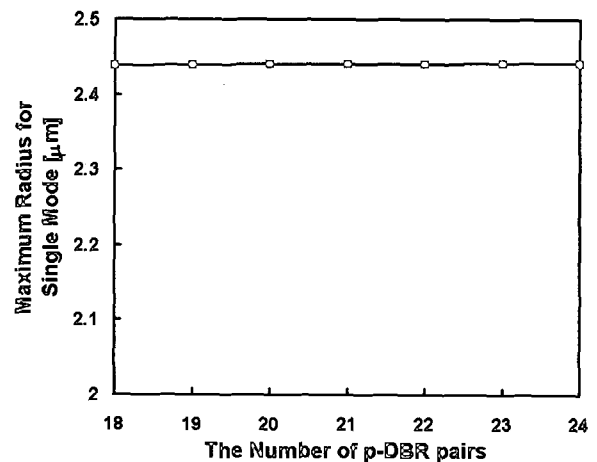


그림 9. DBR 쌍의 수에 따른 단일모드 동작조건
Fig. 9. The condition of single-mode operation versus the number of p-DBR pairs.

나타낸 그림이다. p-DBR 쌍의 수가 달라지더라도 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기가 거의 변하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 고출력 단일모드 VCSEL을 제작하기 위해서는 p-DBR 쌍의 수를 작게 하고, oxide 층을 node에 위치시켜 단일모드로 동작하는 oxide-aperture를 크게 하여 활성영역의 면적을 넓혀야 한다.

V. 문턱이득을 고려한 단일모드 동작조건

S-EI 방법을 사용한 도파로 형태의 계산결과 LP₁₁ 모드가 발진이 가능하도록 oxide-aperture 크기가 정하여졌다 하더라도 LP₀₁ 모드와 LP₁₁ 모드의 문턱이득 차이가 커서 LP₁₁ 모드가 발진조건을 만족시키지 못할 수 있다. 이 경우에는 LP₁₁ 모드가 발진하지 못하고 단일모드로 동작하게 된다. 따라서 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 보다 정확히 계산하기 위해서는 문턱이득 차이까지 고려해야 한다. 그림 10은 문턱이득 차이를 고려했을 때 단일모드 동작조건을 보여주는 그림이다. 문턱이득은 다음 식을 사용해 구하였다.

$$g_{th} = g_{th, TMM} / \Gamma_{tr} \tag{6}$$

$g_{th, TMM}$ 은 전달행렬 방법을 사용한 S-EI 방법으로 구한 문턱이득이고, Γ_{tr} 은 수평방향 광집속 계수이다. oxide 층이 두께가 30nm이고 활성층 바로 위에 있을 때에는 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 반지름의 크기는 1.75 μ m

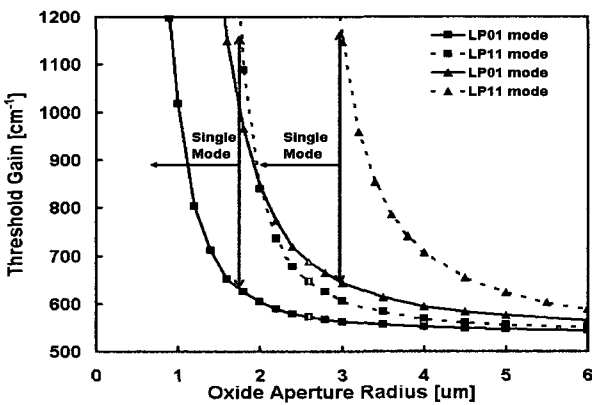


그림 10. 문턱이득을 고려한 단일모드 동작조건. 활성층 바로 위에 oxide 층이 있는 경우(사각형 모양의 선), 활성층으로부터 네 쌍의 DBR 위에 oxide 층이 있는 경우(삼각형 모양의 선)

Fig. 10. The condition of single-mode operation with the threshold gain difference taken into account when the oxide layer is located just above the cavity(square line) and oxide layer located 4 DBR pairs away from the cavity(triangle line).

정도이다.^{[5]-[6]} Oxide-VCSEL의 단일 모드 동작 조건은 전류가 흐르지 않을 때의 동작 조건뿐만 아니라 전류의 흐름에 따른 캐리어 농도의 증가, 열 발생 등의 영향을 받는다. 그러므로 이 연구에서는 이러한 영향들이 종합적으로 고려된 실험적으로 구한 문턱 이득 차이를 단일모드 동작 조건으로 사용하기로 한다.

oxide-aperture 반지름의 크기가 1.75 μ m이고 oxide 층이 활성층 바로 위에 있을 때, LP₀₁ 모드와 LP₁₁ 모드의 문턱이득의 차이는 520 cm^{-1} 이다. 이 값을 활성층으로부터 네 쌍의 DBR 위에 oxide 층이 있는 구조에 적용하면, 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 반지름을 보다 정확히 계산할 수 있다. 그림 10에서 활성층으로부터 네 쌍의 DBR 위에 oxide 층이 있을 때, 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 반지름이 3 μ m가 됨을 확인할 수 있다. 이 경우 S-EI 방법을 사용한 도파로 상태에서 구한 단일모드 동작조건은 그림 3에서 보여주듯이 2.7 μ m이다.

따라서 문턱이득을 고려하여 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 계산하면 단순히 도파로 조건에서 구한 oxide-aperture 크기보다 10% 정도 커짐을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

Oxide 층의 두께와 위치조절을 통하여 고출력 단일모드 VCSEL을 설계하는 방법을 제시하였다. 활성영역을 넓혀 고출력 단일모드 VCSEL을 설계하는 방법을 요약하면 다음과 같다. 첫째, oxide 층은 활성층에서 멀리 떨어져 놓아야 한다. 둘째, oxide 층은 얇게 만들어야 한다. 셋째, oxide 층을 전기장 분포의 node에 위치시켜야 한다. 마지막으로 고출력을 위해서는 p-DBR 쌍의 수를 줄여야 한다. 문턱이득을 고려하여 단일모드로 동작하는 oxide-aperture 크기를 계산하면 광섬유 도파로 형태에서 구한 값보다 oxide-aperture 크기가 10% 정도 커짐을 확인하였다. S-EI 방법을 사용하여 oxide 층의 위치와 두께를 조절하면 이전의 연구결과보다 단일모드로 동작하는 oxide-VCSEL의 oxide-aperture 크기를 300% 이상 증가시킬 수 있다. 즉, oxide 층을 1 λ cavity로부터 다섯 쌍의 p-DBR 위의 node에 위치시키면 단일모드로 동작하는 oxide-aperture의 직경이 3.5 μ m에서 11 μ m로 확장된다. 다만, oxide 층이 DBR 쌍 4주기보다 더 높게 있을 때에는 oxide 층의 전류집속 기능이 떨어지는 문제점이 있다. 이때에는 별도의 전류집속 공정이 추가 되어야 한다.

참고 문헌

- [1] Yinon Satuby and Meir Orenstein, "Limits of the Response of a Single-Mode Proton Implanted VCSEL," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10. no. 6, pp. 762-762, Jun 1998.
- [2] B. J. Thibeault et al, "High-Speed Characteristics of Low-Optical Loss Oxide-Apertured Vertical-Cavity Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 9. no. 1, pp. 11-13, Jan 1997.
- [3] A. Haglund et al, "A Comparative Study of the High-Speed Digital Modulation Performance of Single- and Multimode Oxide Confined VCSELs for Free Space Optical Interconnects," *SPIE Proc. VCSEL VI*, Vol. 4649, pp. 272-280, 2002.
- [4] Hans K. Bissessur et al, "Modeling of Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol 3., no. 2, pp. 344-352, Apr 1999.
- [5] C Jung et al, "Highly efficient oxide-confined VCSEL arrays for parallel optical interconnects." *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.*, vol 1., no. 2, pp. 272-275, Mar 1999.
- [6] Melissa, et al., "Effect of Control in Oxide-Confined Top Emitting Lasers," *Proc. of the 15th IEEE International Semiconductor Laser Conference*, pp. 83-84, Oct 1996.
- [7] Bobby M. Hawkins et al, "Reliability of Various Size Oxide Aperture VCSELs," *Proc. of the 15th IEEE International Semiconductor Laser Conference*, pp. 540-550, Oct 1996.
- [8] Hekio J. Unold et al, "Large-Area Single-Mode VCSELs and the Self-Aligned Surface Relief," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 386-392, Mar/Apr. 2001.
- [9] H. Martinsson et al, "Transverse Mode Selection in Large-Area Oxide-Confined VCSELs using a Shallow Surface Relief," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11. no. 12, pp. 1536-1538, Dec 1999.
- [10] Nobuaki Ueki, et al, "Single-Transverse-Mode 3.4-mW Emission of Oxide-Confined VCSELs," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 1539-1541, Dec 1999.
- [11] Wei-Choon Ng, et al, "Resonant-Wavelength Control and Optical-Confinement Analysis for Grades SCH VCSELs using a Self-consistent Effective-Index Method," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 555-560, Feb 2003.
- [12] R. M. Hibbs-Brenner and P. P. Toullos, "Integrated circuits for the millimeter through optical frequency range," *Proc. M.R.I. Symp. Sub-millimeter Waves*, Polytechnic Press., pp. 497-516, 1970.
- [13] Y. Kokubo and I. Ohta, "Refractive index as a function of photon energy for AlGaAs between 1.2 and 1.8 eV," *J. of Applied Physics*, Vol. 81, pp. 2042-2043, 1997
- [14] M. Grabherr et al, "Efficient Single-Mode Oxide-Confined GaAs VCSEL's Emitting in the 850-nm Wavelength regime," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 10, pp. 1304-1306, Oct 1997.

저자 소개

김 남 길(정회원)
제40권 SD편 8호 참조
현재 (주)대우전자연구원

김 상 배(정회원)
제40권 SD편 8호 참조
현재 아주대학교 전자공학부 교수