

레이저 다이오드 단면의 최적 무반사 코팅을 위한 수치해석 방법 비교

正會員 朴 世 珍* 正會員 金 富 均*

Comparison of the Numerical Methods for the Optimum Antireflection Coatings of Laser Diode Facets

Se Jin Park*, Boo Gyoung Kim* *Regular Members*

要 約

레이저 다이오드 단면의 최적 무반사 코팅 조건을 활성층 두께의 함수로써 세가지 간단한 수치해석 방법을 사용하여 계산하였다. 세가지 간단한 수치해석 방법을 사용하여 얻은 결과가 서로 다른 것은 각 방법에서 사용한 레이저 다이오드내의 유효 굴절율이 다르기 때문이다. 또한 간단한 수치해석 방법의 정확성을 검토하기 위하여 정확한 수치해석 결과와 그 결과들을 비교하였다. 레이저 다이오드의 유효 굴절율이 도파 모드를 구성하는 각 평면과의 입사각도에 따라 변화하도록 설정한 방법이 TE와 TM 모드에 대해서 또 활성층 굴절율과 클래딩층의 굴절율차가 작은 경우 큰 경우 각각에 대하여 정확한 수치해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We calculate the optimum refractive index and thickness for a single layer antireflection coating as a function of active layer thickness of a laser diode using three different simplified numerical methods. The difference of the results using three methods comes from that of the effective refractive index of a laser used in three methods. We compare three simplified methods to an exact method to check the validity of the simplified methods. We conclude that the simplified method, choosing the effective index of a laser diode as a function of incidence angle of each plane wave composing of a guided mode agree well to an exact method for both TE and TM modes and the cases of strongly and weakly guiding.

*崇實大學校 電子工學科
Department of Electronic Engineering SoongSil University
論文番號 : 93 - 193

I. 서 론

레이저 다이오드 단면에서의 반사율은 레이저 다이오드의 동작 특성에 큰 영향을 미치므로 단면 반사율을 정확하고 신속하게 계산하기 위하여 많은 연구가 행해졌다.^{1,2} 장래의 광통신 시스템에 중요하게 사용되어지리라 예상되는 반도체 광증폭기는 단면 반사율이 작을수록 동작 특성이 향상된다^{3,4}. 따라서 반도체 광증폭기를 구현하는데 있어서 무반사 코팅 기술의 개발은 필수적으로 요구되어진다. 이런 무반사 코팅 기술은 external cavity 레이저 다이오드, superluminescent 레이저 다이오드, DFB 레이저 다이오드등과 같은 소자들을 구현하는데 있어서도 필수적인 기술이다.

무반사 코팅층의 굴절율과 두께가 최소 반사율을 주는 최적 굴절율과 최적 두께로부터 조금만 달라져도 단면 반사율이 급격히 증가한다. 따라서 레이저 다이오드의 구조 변수의 함수로써 무반사 코팅층의 정확한 최적 굴절율과 최적 두께를 계산하는 방법의 개발은 중요하다고 할 수 있다. 지금까지 레이저 다이오드의 활성층 영역의 두께의 함수로써 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 두께를 계산하는 많은 방법들이 제안되었다^{1,10}. 이 중 정확한 방법을 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 매우 많은 시간이 소요되므로 이러한 많은 시간 소요는 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 있어서 큰 걸림돌이 된다. 따라서 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 있어서 시간 소요가 적게 요구되어지며 정확한 방법의 결과와 큰 오차가 없이 실제 코팅 제작에 유효하게 사용할 수 있는 간단한 방법의 개발이 요구되어진다.

본 논문에서는 레이저 다이오드 구조 변수의 함수로써 최적 무반사 코팅 조건 및 단면 반사율을 계산하는 세가지 서로 다른 간단한 방법을 참고 문헌 [8], [9], 그리고 [10]에 기초를 두어 각각 기술하였고 무반사 코팅층의 최적 두께와 굴절율을 세가지 서로 다른 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산하였다. 세가지 서로 다른 간단한 방법에 대해서는 II 장의 이론적 해석에서 설명하고자 한다. 또한 세가지 서로 다른 간단한 방법중 어떤 방법이 정확한 방법과 잘 일치하는지를 알아보기 위하여 Vassallo⁸가 경계면에서 field의 연속 조건으로부터 얻은 적분 방정식을 Fourier 변환과 반복 연산법(iteration process)을 이용하여 구한 정확한 방법의 결과와 비교하였다. 이 비교를 통하여 세가지 서로 다른 간단한 방

법의 결과중 참고 문헌[10]에 기초를 둔 근사 방법의 결과가 TE 모드뿐만 아니라 TM 모드의 경우에서도 정확한 방법의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 참고 문헌[10]에 기초를 둔 방법의 결과는 weakly guiding인 경우 - 활성층 영역의 굴절율과 클래딩층 영역의 굴절율이 큰 차이가 없는 경우 - 뿐만 아니라 strongly guiding인 경우에서도 잘 일치함을 알 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 세가지 서로 다른 간단한 방법을 위한 이론을 기술하였으며 3장에서는 이를 구현하기 위한 수치 해석 방법에 대하여 기술하였다. 4장에서는 세가지 서로 다른 방법을 사용하여 무반사 코팅층의 최적 두께와 굴절율을 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산하였고 간단한 방법들의 결과의 정확한 방법의 결과를 비교 검토하였다. 5장에서는 본 연구의 결론을 맺었다.

II. 이론적 해석

무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께를 계산하기 위하여 정확한 수치 계산 방법이 개발되었지만 이러한 정확한 수치 계산 방법에 의하여 결과를 얻기 위해서는 매우 많은 시간이 요구된다². 따라서 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 있어서 시간 소요가 적게 요구되어지며 정확한 방법의 결과와 큰 오차가 없이 실제 최적 무반사 코팅 제작시 그 결과를 이용하고자 많은 근사 방법이 개발되었다. 레이저 다이오드내에서 진행하는 광파들은 평면파가 아닌 레이저 다이오드 내부의 도파관 구조에 의해서 결정되는 guided wave이므로 이러한 guided wave에 대한 무반사 코팅의 조건들은 균일 매질에서의 평면파에 대한 무반사 코팅 조건들과는 크게 다르게 된다. 그 주된 이유는 다음과 같다. 레이저 다이오드, 코팅층, 바깥 매질로 구성된 3층 구조에서의 반사율을 계산하기 위해서는 Fresnel 반사율식이 사용된다. Fresnel 반사율식은 입사파가 평면파인 경우에 입사각도의 함수로써 반사율을 계산하는 식이다. 따라서 레이저 다이오드 표면에서의 반사율을 계산하기 위해서는 레이저 다이오드내 진행파형인 guided wave에 angular spectrum 방법을 적용하여 서로 다른 각도를 가지고 진행하는 평면파의 합으로 나타낸 후 각각의 평면파에 Fresnel 반사율식을 사용하여 얻은 반사파에 가중치를 곱하여 더한다.

따라서 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께

및 반사율을 정확하고 신속하게 계산하기 위하여

첫째: 레이저 다이오드에서 코팅층에 입사하는 파의 형태

둘째: Angular Spectrum 방법을 적용하기 위한 레이저(다이오드내의 유효 굴절율)

을 어떻게 설정하느냐에 따라 여러 종류의 간단한 설계기법이 발표되어 있다^[8,10]. 이 중 레이저 다이오드 내에서 코팅층에 입사하는 파의 형태를 레이저 다이오드 내 도파관 구조에 의해서 결정되는 guided wave로 설정한 방법들의 결과가 실험치 및 정확한 수치계산 방법에 의한 결과와 비교적 잘 일치하므로^[8] Atterias와 Thylen [8], Saitoh 등 [9], 그리고 Hellmich와 Deimel [10]에 의한 3가지 방법에 기초를 둔 식을 각각 제시한다. 참고 문헌 [9]는 angular spectrum 방법을 적용하기 위하여 레이저 다이오드내의 굴절율을 활성층 영역에 존재하는 field 성분은 활성층의 굴절율로, 클래딩층 영역에 존재하는 field 성분은 클래딩층의 굴절율로 설정하였다. 참고문헌 [8]은 레이저 다이오드내의 굴절율을 유효 위상 굴절율, $n_{eff}(0) = \beta/k_0$ 로 설정하였다. 여기서 β 는 전파 정수이고 k_0 는 공기중에서의 전파 상수이다. 또한 참고 문헌[10]은 레이저 다이오드의 굴절율을 레이저 다이오드내 guided wave를 구성하는 서로 다른 각도를 가지고 진행되는 평면파의 각각의 유효 굴절율이 입사각도에 따라 달라지게 설정하였다.

일반적으로 레이저 다이오드의 활성층영역의 폭은 두께에 비하여 매우 넓으므로 레이저 다이오드 내부에서 field 진폭 분포가 접합면에 평행한 방향으로 일정하다고 가정할 수 있다. 또한 계산의 편의를 위하여 도파관 구조가 대칭적이라고 하면 guided wave의 field 진폭 분포는 그림 1과 같은 대칭적인 2차원 model을 사용하므로써 구할 수 있다.

코팅된 레이저 다이오드의 반사율 R은 레이저 다이오드와 코팅층과의 경계면 $z=0$ 에서의 입사파 $E_i(x)$ 와 반사파 $E_{ref}(x)$ 사이의 결합계수의 제곱으로써 다음과 같이 주어진다^[11].

$$R = \frac{|\int_{-\infty}^{\infty} E_i(x) E_{ref}(x) dx|^2}{|\int_{-\infty}^{\infty} E_i^2(x) dx|^2} \quad (1)$$

분모를 1로 정규화 시키면 레이저 다이오드와 무반사 코팅의 경계면인 $z=0$ 에서의 입사파 $E_i(x)$ 는 TE와

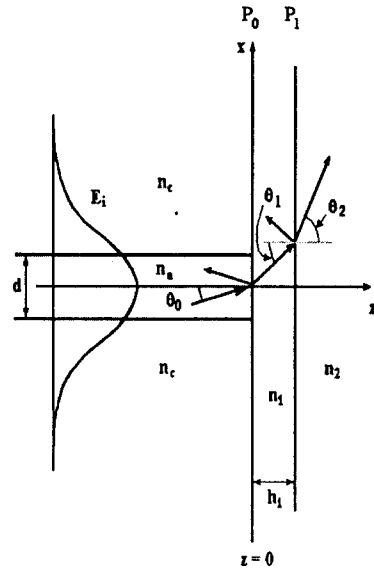


그림 1. 해석에 사용한 단층 무반사 코팅된 레이저 다이오드의 모델.

n_a : 활성층의 굴절율, n_c : 클래딩층의 굴절율,

n_1 : 코팅 굴절율, n_2 : 바깥 매질의 굴절율,

d : 활성층의 두께, h_1 : 코팅층의 두께,

E_i : 입사파, $\theta_i(i=0, 1, 2)$: 각 영역에서의 입사 각도

Fig. 1. Model of an Antireflection coated laser diode used in the analysis.

n_a : refractive index of active layers,

n_c : refractive index of cladding,

n_1 : refractive index of coating layer,

d : active layer thickness,

n_2 : refractive index of external medium,

h_1 : coating layer thickness,

E_i : incident wave,

$\theta_i(i=0, 1, 2)$: incident angle in each layer

TM 모드인 경우 각각 다음과 같이 주어진다^[12].

$$E_{itr}(x) = A \begin{cases} \cos(\kappa x), & |x| \leq \frac{d}{2} \\ \cos(\kappa d/2) \exp[\gamma(d/2 - |x|)], & |x| \geq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (2)$$

여기서

$$A = \left[\frac{d}{2} + \frac{1}{\gamma} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$E_{IRM}(x) = B \begin{cases} \frac{1}{n_a} \cos(\kappa x), & |x| \leq \frac{d}{2} \\ \frac{1}{n_c} \cos(\kappa d/2) \exp[\gamma(d/2 - |x|)], & |x| \geq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (3)$$

여기서

$$B = n_a \left[\frac{d}{2} + \frac{(n_c n_a)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)}{\gamma(n_c^2 \kappa^2 + n_a^2 \gamma^2)} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

또한 $\gamma^2 = \beta^2 - k_c^2$ 이고 $\kappa^2 = k_a^2 - \beta^2$ 이며 β 는 전파정수이고, $k_{a,c} = (2\pi n_{a,c}/\lambda)$ 는 레이저 다이오드의 활성층과 클래딩층에서의 전파 상수이며, d 는 활성층 영역의 두께이고, 첨자 a 와 c 는 활성층과 클래딩층을 나타낸다. 단층 부반사 코팅인 경우 TE 모드, TM 모드인 경우의 Fresnel 반사계수 $r(s)$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$r(s) = \frac{r_{01}(s) + r_{12}(s) \exp[-2i\phi(s)]}{1 + r_{01}(s)r_{12}(s) \exp[-2i\phi(s)]} \quad (4)$$

여기서 $r_{01}(s)$ 는 레이저 다이오드와 코팅층의 경계면에서의 Fresnel 반사계수이며 $r_{12}(s)$ 는 코팅층과 바깥 매질의 경계면에서의 Fresnel 반사계수이며 $\phi(s) = 2\pi h_1 n_1 \cos \theta_1 / \lambda$ 이다. 여기서 h_1 은 코팅층의 두께이다. 입사파의 angular spectrum $F_i(s)$ 는 입사파 $E_i(x)$ 의 푸리에 변환으로 주어지며 따라서 $F_i(s)$ 는 TE와 TM 모드인 경우 각 방법에 따라 다음과 같이 주어진다.

첫번째 방법 : 레이저 다이오드내 도파 모드의 angular spectrum 성분들을 계산하기 위하여 레이저 다이오드 내부의 굴절율을 유효 위상 굴절율로 생각할 경우;

$$F_{IRM}(s) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \left[2\cos(\kappa d/2) \frac{[\gamma \cos(k_1 s d/2) - k_1 s \sin(k_1 s d/2)]}{\gamma^2 + (k_1 s)^2} + \frac{\sin[(\kappa - k_1 s) d/2]}{\kappa - k_1 s} + \frac{\sin[(\kappa + k_1 s) d/2]}{\kappa + k_1 s} \right] \quad (5)$$

$$F_{IRM}(s) = \frac{B}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{2\cos(\kappa d/2)}{n_c} \right]$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{[\gamma \cos(k_1 s d/2) - k_1 s \sin(k_1 s d/2)]}{\gamma^2 + (k_1 s)^2} \\ & + \frac{1}{n_a} \frac{\sin[(\kappa - k_1 s) d/2]}{\kappa - k_1 s} \\ & + \frac{1}{n_a} \frac{\sin[(\kappa + k_1 s) d/2]}{\kappa + k_1 s} \end{aligned} \right] \quad (6)$$

여기서 $s = \sin \theta_1$ 이고 θ_1 는 코팅층내에서의 입사각도이며 $k_1 = (2\pi n_1)/\lambda$ 이다. 반사파의 angular spectrum $F_r(s)$ 는 $F_r(s) = -r(s)F_i(s)$ 로 주어진다. $E_r(x)$ 와 $E_i(x)$ 는 $F_r(s)$ 와 $F_i(s)$ 의 역 푸리에 변환식이므로 (1)식으로부터 반사율을 $F_r(s)$ 와 $r(s)$ 에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \left| \int_{-\infty}^{\infty} k_1 r(s) F_i(s) F_i^*(s) ds \right|^2 \quad (7)$$

여기서 $k_1 = 2\pi n_1/\lambda$.

두번째 방법 : 레이저 다이오드내 도파 모드의 angular spectrum 성분들을 활성층내 파의 기여분 $F_a(s)$ 와 클래딩층내 파의 기여분 $F_c(s)$ 의 합으로 생각하는 경우;

반사율을 나타내는 (1) 식은 $F_a(s)$, $F_c(s)$ 와 $r(s)$ 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$R = \left| \int_{-\infty}^{\infty} k_a r_a(s) F_a^*(s) F_a(s) ds + \int_{-\infty}^{\infty} k_c r_c(s) F_c^*(k_c s/k_a) F_c(s) ds + \int_{-\infty}^{\infty} k_a r_a(s) F_c^*(k_a s/k_c) F_a(s) ds + \int_{-\infty}^{\infty} k_c r_c(s) F_c^*(s) F_c(s) ds \right|^2 \quad (8)$$

식 (8)은 참고문헌 [9]의 식 (8)과는 달리 활성층의 기여분과 클래딩층의 기여분의 crossing term들이 포함되어있다. 여기서 $F_a(s)$ 와 $F_c(s)$ 는 $F_i(s)$ 에서 k_1 대신에 각각 k_a 와 k_c 로 대체하여 대입한 수식을 사용하면 된다. 이 경우 $s = \sin \theta_0$ 이며 θ_0 는 레이저 다이오드 내에서 코팅층으로의 입사각도이다.

세번째 방법 : Fresnel 반사계수를 계산하기 위하여 레이저 다이오드내의 굴절율을 서로 다른 각도를 가지고 진행하는 평면파 개개의 유효 굴절율이 입사

각도에 따라 달라지게 설정하는 경우: 레이저 다이오드의 구조 - 활성층과 클래딩층의 굴절을 그리고 활성층의 두께 - 가 주어지면 특성 방정식으로 부터 전파정수 β 를 구할 수 있다. 따라서 진행방향에 대하여 0이 아닌 각도를 가지고 코팅층에 입사하는 평면파의 전파정수는 그림 2에서 보는 바와 같이 진행 방향으로 β , 수직 방향으로 k 의 성분을 가지므로 $w^2 = \beta^2 + k^2$ 으로 계산되는 전파정수 w 를 가지고 진행한다. 따라서 이러한 평면파의 레이저 다이오드에서의 유효 위상 굴절율은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$n_{eff}(s') = \frac{1}{\cos \theta_0} \frac{\beta}{k_0} = \frac{n_{eff}(0)}{\cos \theta_0} \quad (9)$$

여기서 $n_{eff}(0) = \beta/k_0$ 이고 $s' = \sin \theta_0$.

(9)식에 주어진 유효 위상 굴절율을 개개의 평면파에 대한 레이저 다이오드 내부의 굴절율로 사용하는 경우의 반사율식은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \left| \int_{-x}^x k_1 r(s) F_i(s) F_i^*(s) ds \right|^2 \quad (10)$$

이때 $r(s)$ 는 식 (6)으로 주어지며 이 경우 $r_{01}(s)$ 는 입사각도에 관계없이 고정된 것이 아니라 식 (9)에서 보는 것처럼 입사각도에 따라 변화된다는 것이다.

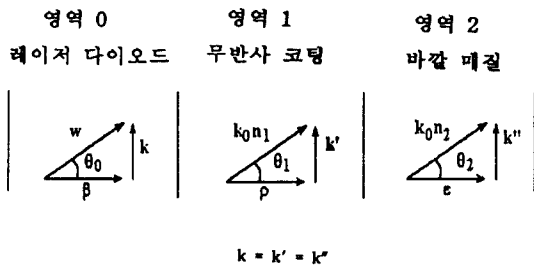


그림 2. 입사 각도에 따른 각 영역 전파 상수들의 관계.
Fig. 2. The relation of propagation constants in each region according to the incidence angle. The angles θ_0 , θ_1 , and θ_2 are related by Snell's law.

III. 수치해석 방법

코팅된 레이저 다이오드의 반사율을 수치해석적으로 계산하기 위하여 Gaussian Quadrature 방법을 사

용하였다. 수치해석 결과의 상대적 오차를 알기 위하여 Gaussian Quadrature의 data point 수를 변화시켜 계산하여 상대오차가 0.1% 이하가 되는 data point 수를 선정하여 계산하였다. 또한 좀더 정확한 수치 해석결과를 얻기 위하여 적분 구간을 TE와 TM 모드 각각에 대하여 다음과 같이 나누었다.

TE 모드인 경우 피적분 함수 형태가 각각의 경계면에서 전반사가 일어나는 각도를 중심으로 크게 달라지므로 적분 구간을 다음과 같이 나누었다.

- ㉑ $s < s_{c1}$: 평면파는 레이저 다이오드 내부, 코팅층, 바깥 매질 모두에서 진행파임.
- ㉒ $s_{c1} < s < s_{c2}$: 평면파는 레이저 다이오드 내부, 코팅층에서는 진행파이나 바깥 매질에서는 evanescent field 형태임.
- ㉓ $s_{c2} < s < s_{c3}$: 평면파는 레이저 다이오드 내부에서 진행파이나 코팅층과 바깥 매질에서는 evanescent field 형태임.
- ㉔ $s_{c3} < s$: 평면파는 레이저 다이오드 내부, 코팅층, 바깥매질 모든 부분에서 evanescent field 형태임.

여기서 s_{c1} , s_{c2} 와 s_{c3} 는 각각 코팅층과 바깥 매질, 레이저 다이오드와 코팅층, 레이저 다이오드 내부에서 전반사가 일어나는 각도에 대응되는 값이다. 또한 적분 구간이 무한대의 적분을 행하기 위해 $s > s_{c3}$ 일 때 improper 적분을 행하였다.

TM 모드인 경우는 피적분 함수의 형태가 전반사가 일어나는 각도에서 뿐만 아니라 브루스터 (Brewster) 각도에서도 변하므로 TE 모드일 때의 적분 구간에 브루스터 각도를 고려하여 더욱 세분하였다. 또한 $s > s_{c3}$ 인 경우 s 가 증가할 때 $r(s)$ 와 $F_i(s)$ 가 감소하는 율이 TE 모드일 때 보다 TM 모드일 때가 작아 오차를 줄이기 위하여 TM 모드 일때는 TE 모드일 때 보다 더 큰 s 값에서부터 improper 적분을 행하였다.

IV. 결과 및 토의

II 장에서 제시한 세가지 서로 다른 간단한 방법들로 부터 무반사 코팅된 레이저 다이오드의 반사율을 최소로 하여 주는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께를 활성층 두께의 함수로써 구하였다. 또한 세가지 간단한 방법들이 얼마나 정확한 결과를 주는가를 알아보기 위하여 세가지 간단한 방법들에 의해 얻어진 결과를 참고문헌[2]에서 제시된 정확한 방법

을 사용해서 얻은 결과와 비교하였다.

그림 3과 4는 세가지 간단한 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께를 변화시켜 가면서 계산한 무반사 코팅층의 최적 코팅 굴절율과 정규화된 최적 두께를 각각 도식한 것이다. 이때 사용한 매개변수의 값은 $n_a = 3.53$, $n_c = 3.2$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 이다. 실선은 세번째 방법 - 식 (10) - 에 기초를 둔 방법의 결과이고 일직쇄선은 두번째 방법 - 식 (8) - 에 기초를 둔 방법의 결과이다. 가는 실선은 첫번째 방법 - 식 (7) - 에 기초를 둔 방법의 결과이다.

그림 3에서 보면 활성층 영역 두께에 따른 최적 코팅 굴절율값의 변화는 세가지 방법 모두 다 비슷한 형태를 가진다. 최적 코팅 굴절율 값의 크기에 있어서는 활성층 영역 두께의 전 범위에 걸쳐 실선과 일직쇄선은 거의 같은 값을 가지나 가는 실선은 그보다 작은 값을 가진다. TE 모드인 경우 활성층 영역

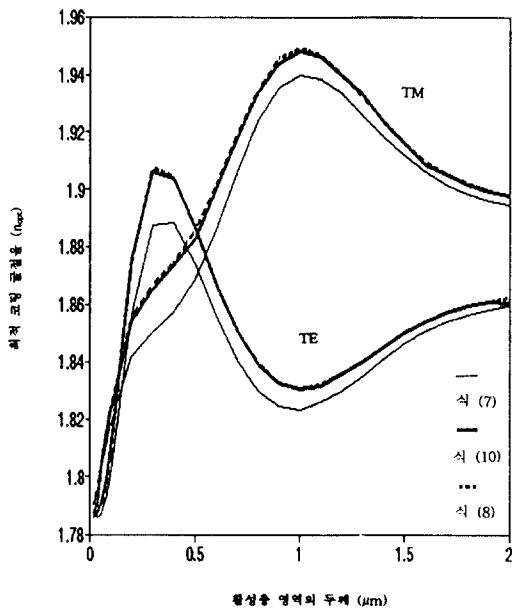


그림 3. TE 모드와 TM 모드 각 경우에 대하여 세가지 방법을 사용한 활성층 영역 두께의 함수로써 계산된 최적 코팅 굴절율 결과.

사용한 변수값: $n_a = 3.53$, $n_c = 3.2$ 와 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$

Fig. 3. Results for optimum coating refractive index using three simplified methods as a function of active layer thickness in TE and TM modes with parameters $n_a = 3.53$, $n_c = 3.2$ and $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$.

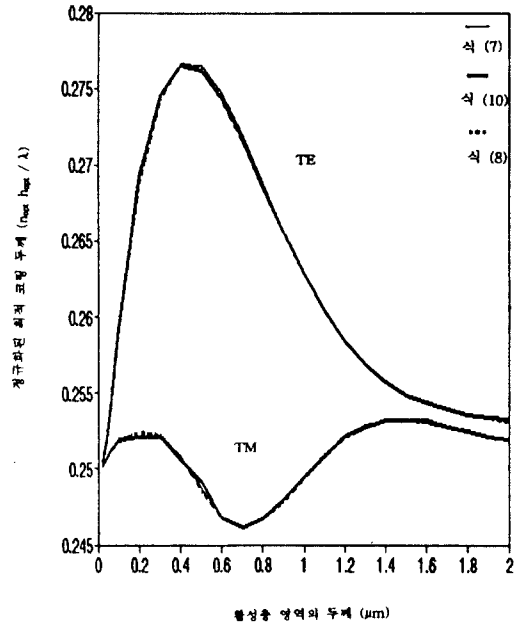


그림 4. TE 모드와 TM 모드 각 경우에 대하여 세가지 방법을 사용한 활성층 영역 두께의 함수로써 계산된 정규화된 최적 코팅 두께.

사용한 변수값: $n_a = 3.53$, $n_c = 3.2$ 와 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$

Fig. 4. The results for optimum normalized film thickness using three simplified method as a function of active layer thickness in TE and TM modes with parameters $n_a = 3.53$, $n_c = 3.2$ and $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$.

두께의 함수로써 최적 굴절율의 변화는 다음과 같다. 활성층 영역의 두께가 $0.35 \mu\text{m}$ 근방에서 최대치를 가지고 두께가 작아질수록 감소하여 평면파인 경우의 최적 굴절율 값인 $\sqrt{n_c}$ 값으로 수렴함을 알 수 있고 또한 두께가 커질수록 감소하여 $d = 1 \mu\text{m}$ 근방에서 최소치를 가지며 다시 점차적으로 증가하여 평면파인 경우의 최적 굴절율 값인 $\sqrt{n_a}$ 값으로 수렴함을 알 수 있다.

TM 모드인 경우 활성층 영역 두께의 함수로써 최적 굴절율의 변화는 다음과 같다. TE 모드가 최대 최적 굴절율을 갖는 활성층 영역 두께인 $d = 0.35 \mu\text{m}$ 근방에서 TM 모드의 최적 굴절율 값은 TE 모드 보다 작은 값을 갖는다. $d = 1 \mu\text{m}$ 근방에서 최대치를 가지며 d 가 작아질수록, d 가 커질수록 감소하여 각각 평면파인 경우의 최적 굴절율 값인 $\sqrt{n_c}$ 와 $\sqrt{n_a}$ 값으로 수렴함을 알 수 있다.

그림 4에서 보면 활성층 영역 두께에 따른 정규화된 최적 코팅 두께는 세가지 방법 다 모두 비슷한 형태와 값을 가진다. TE 모드인 경우 활성층 영역 두께에 따른 정규화된 최적 코팅 두께의 변화는 다음과 같다. 모든 활성층 영역 두께에서 정규화된 최적 코팅 두께는 단일 평면파인 경우의 정규화된 최적 코팅 두께 0.25 보다 큰 값을 가지며 $d = 0.4 \mu\text{m}$ 근방에서 최대치를 가지고 d 가 작아질수록 또는 커질수록 감소하여 단일 평면파인 경우의 정규화된 최적 두께 0.25로 접근함을 알 수 있다.

TM 모드인 경우 d 의 함수로써 정규화된 최적 두께의 변화는 다음과 같다. $d = 0.3 \mu\text{m}$ 근방과 $1.4 \mu\text{m}$ 근방에서 극대치를 가지고 d 가 0에 접근할수록 또는 d 가 커질수록 감소하여 단일 평면파인 경우의 정규화된 최적 코팅 두께 0.25로 접근함을 알 수 있다. 또한 흥미로운 사실은 $d = 0.7 \mu\text{m}$ 근방에서 최소치를 가지며 이 값은 평면파인 경우의 정규화된 최적 두께 0.25 보다 작은 값을 가진다는 점이다.

지금까지 사용한 세가지 근사 방법중 어떤 방법이 좀더 정확한 결과를 주는가를 알아보기 위하여 Vassallo가 참고문헌[2]에서 사용한 정확한 수치 해석결과와 그 결과를 비교하였다. TE 모드인 경우 활성층 영역 두께의 함수로써 계산한 최적 코팅 굴절율의 값을 그림 5에 도시하였다. 이때 사용한 파라미터는 $n_a = 3.7$, $n_c = 3.5$, $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 이다. 굵은 실선, 일점 쇄선, 점선은 각각 식 (10), (8), (7)에 기초를 두어 만든 방법의 결과이고 가는 실선의 정확한 수치해석의 결과이다. 식 (10)에 기초를 둔 근사 수치해석 - 레이저 다이오드의 굴절율을 입사각도에 따라 변화하는 유효 굴절율로 잡은 방법 - 의 결과와 식 (8)에 기초를 둔 근사 수치해석 - 클래딩 영역의 field 성분에는 클래딩의 굴절율을, 활성층 영역의 field 성분에는 활성층 영역의 굴절율을 적용한 방법 - 의 결과는 활성층 영역의 두께 전범위에 걸쳐 정확한 수치해석의 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있고 식 (7)에 기초를 둔 근사 수치해석의 결과는 상당한 오차를 보여줌을 알 수 있다.

또한 코팅층이 존재하지 않는 경우 세가지 간단한 수치해석 방법이 제공하는 반사율값과 정확한 수치해석결과와 반사율값을 비교하기 위하여 그 결과를 TE인 경우에 <표 1>에 TM인 경우에 <표 2>에 보였다. <표 1>과 <표 2>에서 보는 것 처럼 식 (7)에 기초를 둔 수치해석의 결과는 정확한 수치해석의 결과와 매우 큰 차이를 보여줌을 알 수 있다. 식 (8)에 기초

를 둔 근사 수치해석의 결과는 TE 모드인 경우 $n_a = 3.6$ 일때, $n_c = 3.24$ 인 weakly guiding인 경우는 정확한 수치해석의 결과와 잘 일치하나 $n_a = 3.6$ 이고 $n_c = 1.0$ 인 strongly guiding인 경우는 큰 차이를 보이고 있다. TM 모드인 경우는 모든 경우에서 큰 차이를 보이고 있다. 식 (10)에 기초를 둔 근사 수치해석의 결과는 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우 모두 정확한 수치해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 우리는 식 (10)에 기초를 둔 근사 수치해석의 결과는 최적 코팅 굴절율과 반사율 모두 정확한 수치해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

좀더 정확하면서 일반적인 비교를 위하여 코팅층이 존재하지 않을때 레이저 다이오드 단면의 반사율을 활성층 영역 두께의 함수로써 TE와 TM 모드인 경우

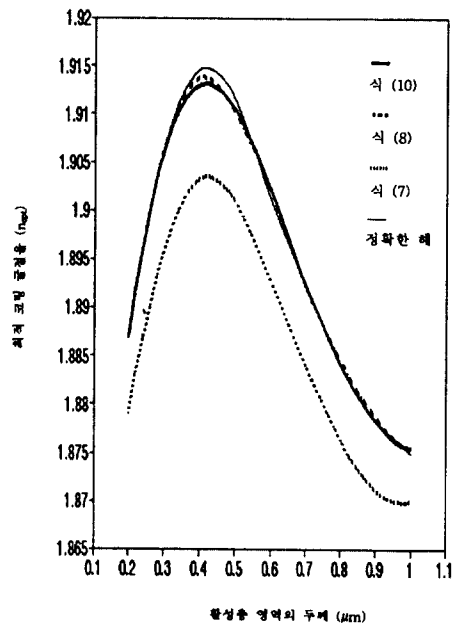


그림 5. TE 모드의 경우 활성층 영역 두께의 함수로써 계산된 최적 코팅 굴절율에 대한 정확한 수치해석 결과와 본 논문에서 사용한 세가지 간단한 수치해석 결과와의 비교.

사용한 변수값 : $n_a = 3.7$, $n_c = 3.5$ 와 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$

Fig. 5. Comparison of the optimum coating index calculated as a function of active layer thickness using rigorous and three simplified methods in the case of TE mode with parameters $n_a = 3.7$, $n_c = 3.5$ and $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$.

<표 1> TE 모드인 경우 $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ 이고, $n_c = 3.24$, $d = 0.25 \mu\text{m}$ 와 $n_c = 1.0$, $d = 0.1815 \mu\text{m}$ 일 때 레이저 다이오드 반사율에 대한 정확한 수치해석 결과와 세가지 간단한 수치해석으로 부터 얻은 결과의 비교

<Table 1> Comparison of TE reflectivity using a rigorous method and the three simplified methods in the case of air at the end of the laser diode with parameters $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ for $n_c = 3.24$, $d = 0.25 \mu\text{m}$, and $n_c = 1.0$, $d = 0.1815 \mu\text{m}$.

TE 모드 : $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$				
	정확한 수치해	식 (10)	식 (8)	식 (7)
$n_c = 3.24$, $d = 0.25 \mu\text{m}$	0.4147	0.4093	0.4197	0.2638
$n_c = 1.0$, $d = 0.1815 \mu\text{m}$	0.4306	0.3910	0.3674	0.1079

<표 2> TM 모드인 경우 $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$, $d = 0.2 \mu\text{m}$ 이고, $n_c = 3.42$ 와 $n_c = 3.24$ 일때 레이저 다이오드 단면의 반사율에 대한 정확한 수치해석 결과와 세가지 간단한 수치해석으로 부터 얻은 결과의 비교

<Table 2> Comparison of TM reflectivity using a rigorous method and the three simplified methods in the case of air at the end of the a laser diode with parameters $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$, and $d = 0.2 \mu\text{m}$, for $n_c = 3.42$ and $n_c = 3.24$.

TE 모드 : $n_a = 3.6$, $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$, $d = 0.2 \mu\text{m}$				
	정확한 수치해	식 (10)	식 (8)	식 (7)
$n_c = 3.42$	0.2729	0.2726	0.3612	0.1029
$n_c = 3.24$	0.2639	0.2632	0.4097	0.0900

각각에 대하여 strongly guiding인 경우와 weakly guiding인 경우에 대하여 계산하여 그 결과를 그림 6과 그림 7에 도시하였다. 이때 사용한 파라메타는 $n_a = 3.6$, $n_c = n_a(1 - \Delta)$ 와 $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ 이다. Guiding의 정도에 따른 수치해석 결과들의 비교를 위하여 $\Delta = 10\%$ 와 $\Delta = 3\%$ 인 경우를 도시하였다. 식 (7)에 기초를 둔 수치해석의 결과는 <표 1>과 <표 2>에서도 보듯이 정확한 수치해석의 결과와 매우 큰 오차를 보이므로 도시하지 않았고 식 (8)과 식 (10)에 기초를 둔 수치해석의 결과와 정확한 수치해석의 결과를 도시하였다. 그림 6은 TE 모드의 결과이고 그림 7은 TM 모드의 결과이다.

TE 모드인 경우 $\Delta = 3\%$ 인 경우는 식 (8)과 식 (10)에 기초를 둔 수치해석의 결과는 정확한 수치해석의 결과와 활성층 영역 전범위에 걸쳐 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. $\Delta = 10\%$ 인 경우는 식 (8)과 식 (10)에 기초를 둔 수치해석의 결과는 정확한 수치해석의 결과와 비교했을때 $\Delta = 3\%$ 인 경우보다는 오차가 많이 남을 알 수 있다.

TM 모드인 경우 식 (10)에 기초를 둔 수치해석의 결과는 $\Delta = 3\%$ 와 $\Delta = 10\%$ 인 경우 모두 정확한 수치해석 결과와 활성층 영역 전범위에 걸쳐 잘 일치함을

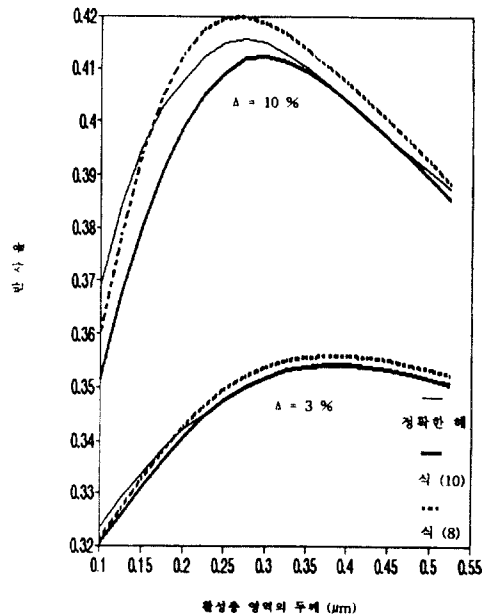


그림 6. TE 모드인 경우 코팅층의 존재하지 않고 바깥 매질이 공기인 때 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산된 단면 반사율에 대한 정확한 수치해석 결과와 본 논문에서 사용한 간단한 방법의 결과와의 비교.

사용한 변수값 : $\Delta=10\%$ 와 $\Delta=3\%$ 인 경우에 $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ 와 $\lambda=0.86 \mu\text{m}$.

Fig. 6. Comparison of TE reflectivity calculated as a function of active layer thickness using a rigorous method and two simplified methods in the case of air at the end of a laser diode with parameters $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ and $\lambda=0.86 \mu\text{m}$ for $\Delta=10\%$ and $\Delta=3\%$.

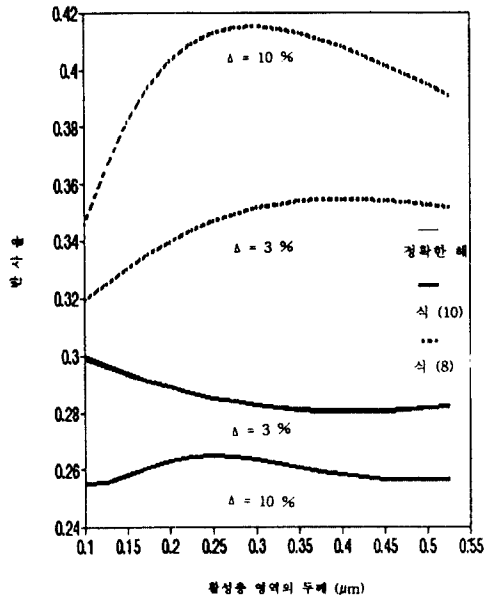


그림 7. TM 모드인 경우 코팅층이 존재하지 않고 바깥 매질이 공기일 때 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산된 단면 반사율에 대한 정확한 수치해석 결과와 본 논문에서 사용한 간단한 방법의 결과와의 비교. 사용한 변수값 : $\Delta=10\%$ 와 $\Delta=3\%$ 인 경우에 $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ 와 $\lambda=0.86 \mu\text{m}$.

Fig. 7. Comparison of TM reflectivity calculated as a function of active layer thickness using a rigorous method and two simplified methods in the case of air at the end of a laser diode with parameters $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ and $\lambda=0.86 \mu\text{m}$ for $\Delta=10\%$ and $\Delta=3\%$.

알 수 있다. 그러나, 식 (8)에 기초를 둔 수치해석 결과는 $\Delta=3\%$ 와 $\Delta=10\%$ 인 경우 모두 정확한 수치해

석 결과와 전혀 일치하지 않고 있음을 알 수 있다.

또한 수치 계산을 행하는데 있어서 소요되는 시간을 비교한 결과 식 (7)에 기초를 둔 첫번째 방법과 식 (10)에 기초를 둔 세번째 방법은 거의 비슷한 시간이 소요되나 식 (8)에 기초를 둔 두번째 방법의 소요 시간은 첫번째 방법과 세번째 방법의 소요 시간에 비하여 두 배 정도 더 걸린다.

V. 결론

진행과정 반도체 광증폭기를 구현하기 위하여 필요한 최소 반사율을 주는 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께를 활성층 영역 두께의 함수로써 세가지 방법을 사용하여 계산하였다. 식 (10)에 기초를 둔 방법과 식 (8)에 기초를 둔 방법은 활성층 영역 두께 전 범위에 걸쳐 최적 코팅 굴절율 값이 거의 같으나 식 (7)에 기초를 둔 방법은 위의 두 방법보다 최적 코팅 굴절율 값이 작게 나타난다. 정규화된 최적 두께는 식 (10), (8)과 (7)에 기초를 둔 방법 모두 활성층 영역 두께 전 범위에 걸쳐 거의 같은 값을 준다.

한편 위 세가지 방법의 정확도를 검토하기 위하여 Vassallo가 제시한 정확한 수치해석 방법의 결과와 비교하였다. 그 비교 결과 식 (10)에 기초를 둔 간단한 방법과 식 (8)에 기초를 둔 간단한 방법은 TE 모드인 경우 활성층 영역 전 범위에 걸쳐 최적 코팅 굴절율 값은 정확한 수치해석의 결과와 거의 일치함을 알 수 있었으나 식 (7)에 기초를 둔 방법은 정확한 수치해석의 결과와 큰 오차를 보여주었다.

코팅층이 없는 경우의 레이저 다이오드 단면에서의 활성층 영역의 두께에 따른 반사율 값의 비교는 다음과 같다. 식 (7)에 기초를 둔 방법은 TE 모드와 TM 모드인 경우 모두 정확한 수치해석의 결과와 큰 오차를 보인다. 식 (8)에 기초를 둔 방법은 TE 모드인 경우에 있어서는 정확한 수치해석의 결과와 거의 일치하나 TM 모드인 경우에는 큰 오차를 보임을 알 수 있다. 식 (10)에 기초를 둔 방법은 TE 모드와 TM 모드 모두에 대하여 정확한 수치해석의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

따라서 우리는 식 (10)에 기초를 둔 방법이 TE 모드뿐만 아니라 TM 모드에 대하여서도 최적 무반사 코팅층의 두께와 굴절율 뿐만아니라 단면 반사율에 있어서도 정확한 수치해석의 결과와 거의 오차가 없는 결과를 주는 간단한 방법이라 결론지을 수 있다.

