

레이저 다이오드 단면의 무반사 코팅 설계

正會員 金 富 均*, 正會員 金 炫 樹*, 金 用 坤*

Design of the Antireflection Coatings on Laser Diode Facets

Boo Gyoung Kim*, Hyun Soo Kim*, Yong Gon Kim* Regular Members

要 約

무반사 코팅층 설계에 사용되어지는 네가지 간단한 방법의 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다. 세가지 간단한 방법을 사용하여 얻은 최적 무반사 코팅층 파라메타들의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하였다. 무반사 코팅층 제작에 중요하게 사용되리라 예상되는 무반사 코팅층 파라메타들의 공차지도를 세가지 간단한 방법을 사용하여 TE 모드와 TM 모드인 경우 각각에 대하여 구하였다. 각각의 공차지도가 거의 같음을 확인하였다. 세가지 간단한 방법중 가장 간단한 방법은 레이저 다이오드의 굴절율을 에너지 관점으로 본 비유전 상수의 평균값의 제곱근으로 설정한 방법이다. 레이저 다이오드 단면의 반사율을 TE 모드와 TM 모드인 경우 각각에 대하여 활성층 두께의 함수로써 네가지 간단한 방법을 사용하여 얻은 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다.

ABSTRACT

For the design of antireflection coatings, the results of the four simplified methods are compared to those of the rigorous method. The optimum antireflection coating parameters obtained by the three simplified methods are agreed very well to those obtained by the rigorous method. We present the tolerance maps of coating parameters for both TE and TM modes, important for the fabrication of antireflection coatings, using the three simplified methods. And we find the three tolerance maps are almost same. The simplest method among the three simplified methods is the method choosing the refractive index of a laser diode as the square of average value of dielectric constant from the energy view point. For both TE and TM modes, the results of facet reflectivities as a function of active layer thickness using the four simplified methods are compared to those using the rigorous method.

*송실대학교 전자공학과
Department of Electronic Engineering Soongsil
University
論文番號 : 94297
接受日字 : 1994年 10月 27日

I. 서 론

레이저 다이오드 단면에서의 반사율은 레이저 다이오드 및 여러가지 소자들의 동작 특성에 큰 영향을 미치므로 단면 반사율을 레이저 다이오드의 구조 변수의 함수로써 계산하기 위하여 많은 연구가 행해졌다^(1,2). 레이저 다이오드로 대표되는 도파관 구조 소자 표면에서의 무반사 코팅 설계 기술은 초고속 광통신 시스템의 외부 변조기로 사용되는 흡수(electro-absorption) 변조기와 반도체 광 증폭기의 개발에 필수적인 기술이다.

또한 무반사 코팅 기술은 external cavity 레이저 다이오드, superluminescent 레이저 다이오드, DFB 레이저 다이오드 등과 같은 소자들을 구현하는데 있어서도 필수적인 기술이다. 따라서 레이저 다이오드 구조 변수의 함수로써 무반사 코팅을 하였을 때 가장 낮은 반사율을 주는 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 두께를 계산하는 많은 방법들이 제안되었다⁽³⁻¹¹⁾.

엄밀한(rigorous) 방법(3)은 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 매우 많은 시간이 소요된다. 이러한 많은 시간 소요는 무반사 코팅층을 설계하는 데 있어서 큰 걸림돌이 된다. 따라서 최적 무반사 코팅 조건을 계산하는데 있어서 시간 소요가 적게 요구되어지며 정확한 방법의 결과와 큰 오차가 없어 실제 코팅 제작에 유효하게 사용할 수 있는 간단한 설계 방법의 개발이 요구되어진다. 참고문헌 (10)은 레이저 다이오드 구조 변수의 함수로써 최적 무반사 코팅 조건 및 단면 반사율을 계산하는 세가지 서로 다른 간단한 방법을 참고문헌 (7), (8), 과 (9)에 기초를 두어 각각 기술하였다. 또한 무반사 코팅층의 최적 두께와 굴절율을 세가지 서로 다른 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산하고 그 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다.

본 논문은 참고문헌 (10)의 내용들을 보완하고 확장한 것이다. 참고문헌 (10)에서 소개한 세가지 간단한 방법 외에 레이저 다이오드 내의 굴절율을 에너지 관점에서 본 비유전상수의 평균값의 제곱근으로 설정하는 새로운 간단한 방법을 소개한다. 레이저 다이오드의 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적두께를 네가지 간단한 방법들을 사용하여 각각 TE 모드와 TM 모드인 경우에 활성층 영역의 두께의 함수로서 계산

한 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다.

무반사 코팅층 제작시 발생하는 제작 오차를 감안한다면 네가지 간단한 방법 중 레이저 다이오드의 굴절율을 전기장의 관점에서 본 비유전상수의 평균값의 제곱근(유효 위상 굴절율)으로 설정한 방법을 제외한다면 나머지 3가지 방법이 무반사 코팅층을 설계하는데 유용하게 사용되어질 수 있는 표준 근사 설계 방법이라 생각된다.

세가지 표준 근사 방법중 방법 2는 레이저 다이오드 내 도파 모드를 구성하는 서로 다른 각도를 가지고 레이저 다이오드 단면에 입사하는 평면파 각각에 대하여 레이저 다이오드의 굴절율을 입사각도에 따라 다르게 설정해야 한다. 방법 3은 레이저 다이오드의 구조가 다층 구조인 경우 반사율 및 무반사 코팅층 파라메타들을 계산하기 위하여 각 층에 존재하는 field의 angular spectrum을 각각 구하고 그들 간의 crossing term들을 구해야 하므로 층의 수가 많아질수록 수식이 복잡해지고 계산시간이 많이 걸릴 것이라는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 반면에 방법 4는 레이저 다이오드 단면에 입사하는 평면파의 입사각도에 관계없이 레이저 다이오드의 굴절율을 에너지 관점에서 본 비유전 상수의 평균값의 제곱근인 상수로 설정하면 된다. 따라서 방법 4가 세가지 표준 근사 설계 방법중 가장 간단한 설계 방법이라고 생각되어진다.

엄밀한 방법의 결과와의 비교를 통하여 채택된 표준 근사 설계 방법을 이용하여 무반사 코팅 제작시 매우 긴요하게 사용될 무반사 코팅층 파라메타들의 공차지도(무반사 코팅층에 허용될 수 있는 최대 반사율이 주어졌을 때, 그러한 최대 반사율 보다 작은 반사율을 얻을 수 있는 코팅층 파라메타들의 범위를 나타내는 그림)을 제시한다.

레이저 다이오드 단면의 반사율을 활성층 영역의 두께의 함수로써 네가지 간단한 방법을 사용하여 계산한 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다. 그 비교를 통하여 TE 모드와 TM 모드 각각에 대하여 단면 반사율 계산을 위한 활성층 영역 두께에 따른 표준 근사 방법을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 네가지 서로 다른 간단한 설계방법과 엄밀한 설계방법의 이론 및 구현 방법을 제시한다. III장에서는 네가지 서로 다른 간단한 방법을 이용하여 각 편파모드에 대한 무

반사 코팅층의 최적 굴절율과 두께 및 코팅층이 없는 경우의 단면 반사율을 레이저 다이오드 구조 변수의 함수로써 계산한 결과들을 엄밀한 방법의 결과들과 비교 검토한다. 비교 검토를 통하여 각 경우의 표준 근사 설계 방법을 선정한다. IV장에서는 무반사 코팅층 제작시에 진요하게 사용되리라 예상되는 무반사 코팅층의 최대 허용 반사율이 주어졌을때 이를 구현할 수 있는 무반사 코팅층의 굴절율과 두께의 범위를 나타내는 공차지도를 제시한다. V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 설계 방법들을 위한 이론

레이저 다이오드 내부의 도파관 구조에 의해서 결정되어지는 도파 모드에 Angular spectrum 방법과 Fresnel 반사계수식을 적용하여 반사율과 최적 코팅 파라메타들을 구하는 방법들이 엄밀한 방법에 비하여 시간이 적게 소요되어지고 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 오차가 작게 발생되어진다⁽¹⁰⁾. 위의 방법들은 도파모드에 Angular spectrum 방법과 Fresnel 반사계수식을 적용하기 위하여 레이저 다이오드 내의 굴절율을 어떻게 설정하였느냐에 따라서 다음과 같이 나뉜다.

첫번째 방법 (방법 1)은 레이저 다이오드의 굴절율을 전기장 관점에서 본 비유전상수의 평균값의 제곱근 (유효 위상 굴절율)(7)로, 두번째 방법 (방법 2)는 레이저 다이오드내 도파 모드를 구성하는 서로 다른 각도를 가지고 레이저 다이오드 단면에 입사하는 평면파 각각에 대하여 레이저 다이오드의 굴절율을 입사각도에 따라 다르게(8), 세번째 방법 (방법 3)은 활성층 영역의 field에는 활성층 영역의 굴절율로 클래딩층 영역의 field에는 클래딩층의 굴절율로(9), 네번째 방법 (방법 4)는 레이저 다이오드의 굴절율을 에너지 관점에서 본 비유전상수의 평균값의 제곱근으로 설정하였다.

레이저 다이오드의 단면 반사율및 최적 무반사 코팅 파라메타들을 계산하기 위하여 사용한 레이저 다이오드의 구조는 계산의 편의를 위하여 그림1 과 같은 대칭적인 2차원 모델을 사용하였다.

방법 1, 2 및 3을 이용하여 단면 반사율및 최적 무반사 코팅 파라메타들을 계산하기 위하여 사용한 상세

한 이론적 해석및 수치해석 방법은 참고문헌 (10)에 이미 발표되어있다. 방법 4 는 레이저 다이오드 내의 굴절율을 $n_0 = \beta/k_0$ 라고 정의 되어진 유효 위상 굴절율 대신에 다음과 같이 정의 되어진 굴절율을 가지고 참고문헌 (10)의 식 (7)을 이용하여 무반사 코팅된 레이저 다이오드의 반사율을 계산하는 방법이다.

$$n_0^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} n^2(x) E^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} E^2(x) dx} \quad (1)$$

여기서 $n(x)$ 는 레이저 다이오드 내의 굴절율이고 $E(x)$ 는 레이저 다이오드의 도파관 구조에 의해서 결정되는 전기장의 분포이다. 엄밀한 방법은 Vassallo 가 레이저 다이오드 단면에서 장의 연속조건으로부터 얻은 적분방정식을 푸리에 변환과 반복연산법 (iteration process)을 이용하여 반사율과 최적 무반사 코팅 파라메타들을 구한 방법으로서 상세한 이론적 해석및 수치해석 방법은 참고문헌 (3)에 나와있다.

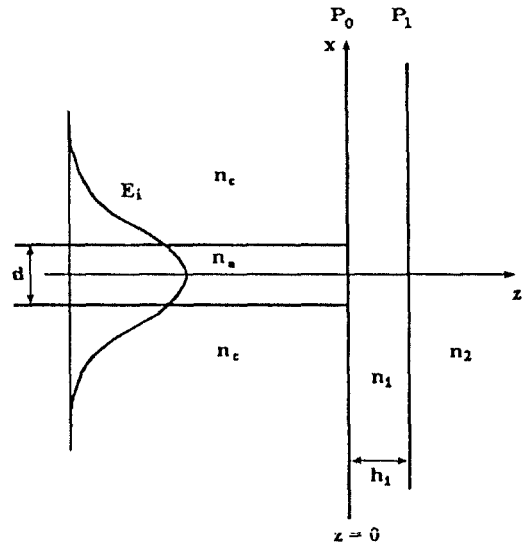


그림 1 해석에 사용한 단층 무반사 코팅된 레이저 다이오드의 모델
 n_a : 활성층의 굴절율, n_c : 클래딩층의 굴절율,
 n_1 : 코팅층 굴절율, n_2 : 바깥 매질의 굴절율,
 d : 활성층의 두께, h_1 : 코팅층의 두께.
 Fig. 1. Model of a single layer antireflection coated laser diode used in the analysis.
 n_a : refractive index of the active layer,
 n_c : refractive index of the cladding layer,
 n_1 : refractive index of the coating layer,
 n_2 : refractive index of the external medium,
 d : active layer thickness,
 h_1 : coating layer thickness.

Ⅲ. 설계 방법 결과들의 비교 검토

Fresnel 반사 계수식을 사용하여 레이저 다이오드의 단면 반사율 및 최적 무반사 코팅 파라메타들을 계산하기 위한 네가지 간단한 방법중 표준 방법을 채택하기 위하여 그 결과들을 엄밀한 방법의 결과(3)와 비교하였다.

먼저 활성층 영역의 굴절을 n_a 가 3.512, 클래딩층의 굴절을 n_c 가 3.17, 활성층의 두께 d 가 $0.2\mu\text{m}$ 이고 발진 파장이 $1.55\mu\text{m}$ 일때 무반사 코팅층의 최적 코팅 굴절을 n_1 과 최적 코팅 두께 h_1 을 네가지 방법을 사용하여 얻은 결과와 엄밀한 방법의 결과를 TE모드와 TM모드에 대하여 각각 (표 1)에 보였다.

표 1. TE와 T 모드 각각에 대해서 $n_a=3.512$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$, $n_c=3.17$ 이고 $d=0.2\mu\text{m}$ 일때 무반사 코팅층의 최적 코팅 굴절을 n_1 과 최적 코팅 두께 h_1 에 대한 네가지 간단한 방법을 사용하여 얻은 결과와 엄밀한 방법의 결과와의 비교

Table 1. Comparison of the optimum refractive index n_1 and optimum thickness h_1 of antireflection coatings on the facet of a laser diode with parameters $n_a=3.512$, $n_c=3.17$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$, and $d=0.2\mu\text{m}$ using the rigorous method and the four simplified methods for TE and TM modes respectively.

		방법1	방법2	방법3	방법4	엄밀한 방법
TE	$h_1(\mu\text{m})$	0.22577	0.22334	0.22323	0.22374	0.22331
	n_1	1.83592	1.85393	1.85187	1.85198	1.85363
TM	$h_1(\mu\text{m})$	0.21367	0.21239	0.21249	0.21078	0.21206
	n_1	1.82922	1.83987	1.84060	1.85260	1.84209

TE 모드인 경우 최적 코팅 굴절율에 있어서는 방법 2의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 가장 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 방법 3과 방법 4의 결과도 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 오차가 0.002 이하로서 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 최적 코팅 두께에 있어서는 방법 2의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 가장 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 방법 3과 방법 4의 결과도 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 각각 오차가 0.04% 이고 0.2% 로서 최적 코팅 굴절율의 결과와 마찬가지로 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

TM 모드인 경우 최적 코팅 굴절율에 있어서는 방

법 3의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 가장 잘 일치하며 그 오차는 0.002 이하이다. 또한 방법 2의 결과도 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 방법 3의 결과와 비슷한 정도의 오차를 가진다. 방법 4와 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 앞의 두 방법의 결과보다는 비교적 큰 오차를 보이며 그 오차는 0.01 정도임을 알 수 있다. 최적 코팅 두께에 있어서 방법 2와 방법 3의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 비슷한 정도의 오차를 보이며 그 오차는 0.2% 이하이다. 또한 방법 4와 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 비슷한 정도의 오차를 가지며 그 오차는 0.8% 이하이다.

좀 더 일반적인 비교를 위하여 TE 모드인 경우에 각각의 활성층 영역의 두께에 대하여 무반사 코팅층의 반사율을 최소로 하는 최적 코팅 굴절율과 최적 코팅 두께를 네가지 방법을 사용하여 구하였다. 이때 사용한 매개 변수는 $n_a=3.7$, $n_c=3.5$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$ 이다.

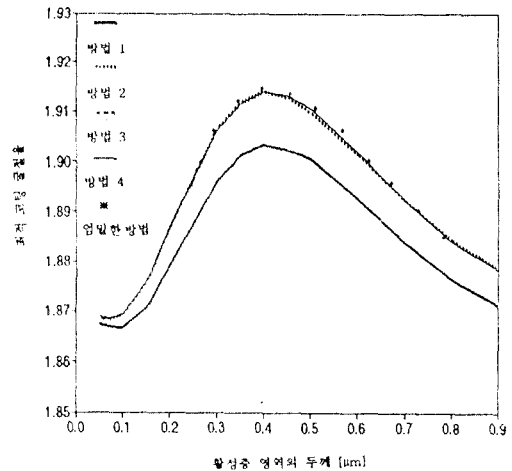


그림 2. TE 모드인 경우 엄밀한 방법과 네가지 간단한 방법을 사용하여 활성층 영역 두께의 함수로써 계산한 최적 코팅 굴절율 사용한 변수값 : $n_a=3.7$, $n_c=3.5$ 와, $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

Fig. 2. Optimum coating refractive index calculated as a function of active layer thickness using the rigorous and four simplified methods in the case of TE mode with parameters $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, and $\lambda=1.5$

그림 2는 네가지 방법을 사용하여 각각의 활성층 영역의 두께에 대하여 계산된 최적 코팅 굴절율을 엄밀한 방법의 결과와 비교하기 위하여 최적 코팅 굴절

울을 활성층 영역의 두께의 함수로서 도시한 결과이다. 굵은 점으로 표시된 것은 참고문헌 (3)에 발표된 엄밀한 방법의 결과이고 굵은 실선은 방법 1의 결과이며 점선은 방법 2의 결과이다. 그리고, 일점쇄선은 방법 3의 결과이며, 가는 실선은 방법 4의 결과이다. 그림 2에서 보면 활성층 영역 전범위에 걸쳐 방법 2, 방법 3과 방법 4의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하며 눈으로는 거의 그 차이를 볼 수 없다. 반면 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 상대적으로 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을 때 활성층 영역의 두께가 $0.2\mu\text{m}$ 일때 약 0.008 정도의 오차를 보인다. 활성층 영역의 두께가 커질수록 오차가 증가하기 시작하여 활성층 영역의 두께 $0.4\mu\text{m}$ 근방에서 오차가 약 0.01 정도로 최대가 된다. 그 이후에는 활성층 영역의 두께가 증가할수록 오차가 감소하기 시작하여 활성층 영역의 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 이상에서는 오차가 약 0.007 정도로 일정하게 나타난다. 활성층 영역의 두께 $0.4\mu\text{m}$ 근방에서 4 가지 방법 모두 최적 코팅 굴절율이 최대값을 가진다. 그 이유는 활성층 영역의 두께가 $0.4\mu\text{m}$ 근방일때 도파 모드가 도파관내에 가장 심하게 묶여 있어 angular spectrum 분포가 넓어지기 때문이다.

그림 3은 네가지 방법을 사용하여 계산된 최적 코팅 두께를 활성층 영역의 두께의 함수로서 도시한 결과이다. 방법 2, 3과 방법 4의 결과는 활성층 영역 두께의 전 범위에 걸쳐 거의 동일한 결과를 주고 있음을 볼 수 있다. 방법 1의 결과는 방법 3의 결과에 비교했을 때 활성층 영역 두께의 전범위에 걸쳐 큰 값을 주고 있다.

TM 모드인 경우에 TE 모드인 경우와 마찬가지로 활성층 영역의 두께를 $0.05\mu\text{m}$ 에서 $0.9\mu\text{m}$ 까지 변화시키며 네가지 방법을 사용하여 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 두께를 각각의 활성층 영역의 두께에 대하여 계산한 결과를 비교하였다. 이때 사용한 매개 변수는 $n_a=3.7$, $n_c=3.5$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$ 이다. 이 경우 엄밀한 방법의 결과는 참고문헌 (3)에 나와있지 않아 네가지 방법의 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하지 못하였다.

최적 굴절율값은 4가지 방법의 결과가 모두 활성층 영역의 두께가 $0.9\mu\text{m}$ 까지 증가할 때까지 계속 증가하

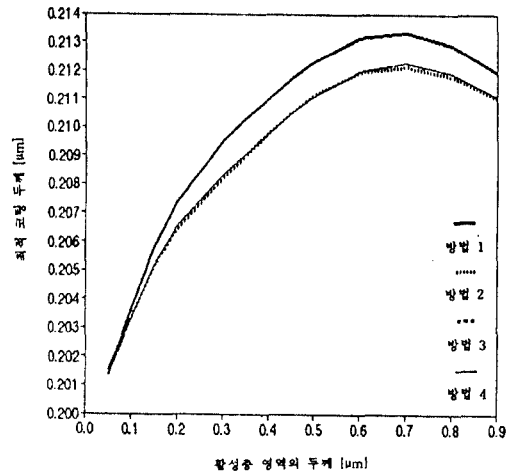


그림 3. TE 모드의 경우 네가지 간단한 방법을 사용하여 활성층 영역 두께의 함수로써 계산한 최적 코팅 두께. 사용한 변수값 : $n_a=3.7$, $n_c=3.5$ 와, $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

Fig. 3. Optimum coating thickness as a function of active layer thickness using the four simplified methods in the case of TE mode with parameters $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, and $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

였다. 방법 2, 3과 방법 4의 결과는 활성층 영역 두께의 전범위에 걸쳐 거의 같은 값을 주고 있으나 방법 1의 결과는 방법 3과 방법 4의 결과에 비하여 약간 작은 값을 주고 있음을 볼 수있었다. 무반사 코팅층의 최적 두께값은 4가지 방법의 결과가 모두 활성층 영역의 두께가 $0.9\mu\text{m}$ 까지 증가할 때까지 계속 감소하였다. 방법 2, 3과 방법 4의 결과는 활성층 영역 두께의 전범위에 걸쳐 거의 같은 값을 주고 있으나 방법 1의 결과는 방법 2, 3과 방법 4의 결과에 비하여 약간 큰 값을 주고 있음을 볼 수있었다.

무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께를 계산하는데 있어서 TE 모드 인 경우 방법 2, 3과 방법 4의 결과가 활성층 영역 두께의 전범위에 걸쳐 엄밀한 방법의 결과와 거의 같은 결과를 주고 있음을 볼 수 있다. 또한 TM 모드인 경우에도 방법 2, 3과 방법 4의 결과는 거의 같은 값을 주고 있음을 볼 수 있다. 활성층과 클래딩층의 굴절율 및 발진 파장이 달라지는 경우에도 방법 2, 3과 방법 4의 결과는 거의 같은 값을 주고 있음을 볼 수 있었다.

레이저 다이오드의 단면 반사율은 레이저 다이오드의 동작 특성에 큰 영향을 미치므로 코팅층이 존재하지 않는 경우에 레이저 다이오드의 단면 반사율을 4

가지 방법을 사용하여 얻은 결과와 엄밀한 방법의 결과 (3)를 비교하였다. TE 모드인 경우에 4 가지 방법을 사용하여 얻은 결과와 엄밀한 방법을 사용하여 얻은 결과를 <표 2>에 보였다.

Weakly guiding ($n_a=3.6$, $n_c=3.24$)인 경우는 네가지 방법의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있으나 그중 방법 4의 결과가 가장 잘 일치하고 있다. $n_a=3.6$ 이고 $n_c=1$ 인 strongly guiding인 경우 방법 4의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있으나 나머지 3 방법의 결과는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 2. 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 $n_c=1.0$, $d=0.1815\mu\text{m}$ 일때 레이저 다이오드 단면 반사율에 대한 엄밀한 방법의 결과와 네가지 간단한 방법의 결과와의 비교

Table 2. Comparison of TE reflectivity using the rigorous method and the four simplified methods in the case of air at the end of the laser diode with parameters $n_a=3.6$ and $\lambda=0.86\mu\text{m}$ for $n_c=3.24$, $d=0.25\mu\text{m}$, and $n_c=1.0$, $d=0.1815\mu\text{m}$.

	엄밀한 방법	방법1	방법2	방법3	방법4
$n_c=3.24$, $d=0.25\mu\text{m}$	0.4147	0.4071	0.4174	0.4195	0.4157
$n_c=1.0$, $d=0.1815\mu\text{m}$	0.4306	0.3862	0.4758	0.3670	0.4322

TM모드인 경우에 네가지 방법을 사용하여 얻은 결과와 엄밀한 방법의 결과를 <표 3>에 보였다. 두 경우 모두 weakly guiding인 경우로서 $n_c=3.42$ 인 경우는 n_a 와 n_c 의 비굴절율의 차 Δ 가 5%인 경우이고 $n_c=3.24$ 인 경우는 Δ 가 10%인 경우이다. 두 경우 모두 4 가지 방법을 사용하여 얻은 결과가 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그 중 방법 3의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 거의 동일한 값을 주고 있음을 알 수 있다.

좀 더 일반적인 비교를 위하여 네가지 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께의 함수로서 계산된 단면 반사율의 결과와 엄밀한 방법의 결과를 TE 모드인 경우에는 그림 4에 TM 모드인 경우에는 그림 5에 각각 도시하였다. 이때 사용한 파라메타는 $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ 와 $\lambda=0.86\mu\text{m}$ 이고 10%인 경우와 3%의 두 경우에 대하여 도시하였다.

표 3. 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 $n_c=3.24$ 일 때 레이저 다이오드 단면의 반사율에 대한 엄밀한 방법의 결과와 네가지 간단한 방법의 결과와의 비교

Table 3. Comparison of TM reflectivity using the rigorous method and the four simplified methods in the case of air at the end of the laser diode with parameters $n_a=3.6$, $\lambda=0.86\mu\text{m}$, and $d=0.2\mu\text{m}$ for $n_c=3.42$, and $n_c=3.24$.

	엄밀한 방법	방법1	방법2	방법3	방법4
$n_c=3.42$	0.2729	0.2693	0.2726	0.2728	0.2733
$n_c=3.24$	0.2639	0.2576	0.2631	0.2639	0.2667

TE 모드인 경우의 그림 4에서 $\Delta=3\%$ 인 경우는 4 가지 방법의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 방법 1을 제외한 나머지 3가지 방법의 결과는 활성층 영역 두께 전 범위에 걸쳐서 거의 같은 값을 주고 있음을 알 수 있다. 활성층 영역의 두께 $0.3\mu\text{m}$ 근방까지는 방법 1의 결과보다는 나머지 3가지 방법의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 더 잘 일치하나 활성층 영역의 두께가 $0.3\mu\text{m}$ 이상에서는 방법 1의 결과가 나머지 3가지 방법의 결과보다 더 잘 일치함을 볼 수 있다.

$\Delta=10\%$ 인 경우는 $\Delta=3\%$ 인 경우에 비하여 4가지 방법의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 오차가 커짐을 볼 수 있다. 활성층 영역의 두께가 $0.3\mu\text{m}$ 근방까지는 방법 1을 제외한 나머지 3 가지 방법의 결과가 방법 1의 결과보다 엄밀한 결과와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 활성층 영역의 두께가 $0.3\mu\text{m}$ 보다 커지면 방법 1을 제외한 3가지 방법의 결과는 거의 일치된 값을 주며 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 반사율이 약 1.5% 정도 커짐을 볼 수 있다. 활성층 영역의 두께가 $0.35\mu\text{m}$ 이상에서는 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

TM 모드인 경우의 그림 5에서 $\Delta=3\%$ 인 경우는 4 가지 방법의 결과가 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 방법 1을 제외한 나머지 3 가지 방법의 결과는 전 활성층 영역의 두께에 걸쳐 같은 값을 주고 있으며 또한 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 전 활성층 영역의 두께에 걸쳐 약간 작은 반사율을 주고 있다.

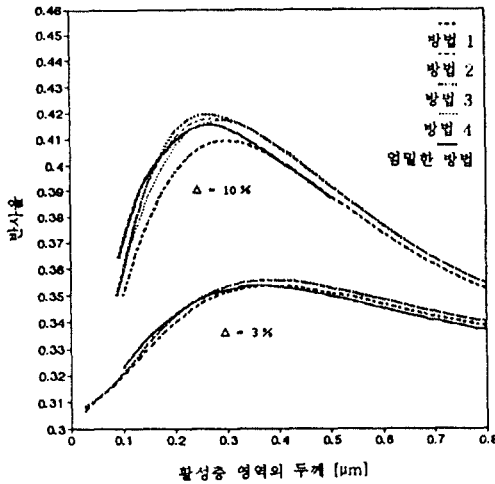


그림 4. TE 모드인 경우 코팅층이 존재하지않고 바깥매질이 공기 일때 엄밀한 방법과 네가지 간단한 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산한 레이저 다이오드의 단면 반사율.
 사용한 변수값 : $n_s=3.6$, $n_c=n_s(1-\Delta)$ 와 $\lambda=0.86\mu\text{m}$ 이고 $\Delta=10\%$ 와 3% .

Fig. 4. TE reflectivity calculated as a function of active layer thickness using the rigorous and four simplified methods in the case of air at the end of a laser diode with parameters $n_s=3.6$, $n_c=n_s(1-\Delta)$, and $\lambda=0.8\mu\text{m}$ for $\Delta=10\%$ and 3% .

$\Delta=10\%$ 인 경우는 방법 2와 방법 3의 결과는 전 활성층 영역의 두께에 걸쳐 거의 같은 값을 가지며 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 활성층 영역의 두께가 $0.1\mu\text{m}$ 에서 $0.4\mu\text{m}$ 범위인 경우에 방법 4의 결과는 엄밀한 방법의 결과에 비교했을때 약간 큰 반사율의 값을 가지며 그 이외의 영역에서는 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 방법 1의 결과는 $\Delta=3\%$ 인 경우와 마찬가지로 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 전 활성층 영역의 두께에 걸쳐 작은 반사율을 주고 있다.

무반사 코팅층이 없는 경우의 단면 반사율 계산에 있어서 TE 모드인 경우 방법 1을 제외한 나머지 3가지 방법의 결과는 weakly guiding인 경우 활성층 영역 전 범위에 걸쳐 거의 같은 값을 주고 있다. 또한 활성층 영역의 두께가 $0.35\mu\text{m}$ 일때까지는 엄밀한 방법의 결과와 거의 같은 값을 주고 있으며 활성층 영역의 두께가 $0.35\mu\text{m}$ 이상인 경우에서는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 반사율이 약 1.5% 정도 커짐을 볼 수 있다. 반면에 방법 1의 결과는 활성층 영역의 두께가 $0.35\mu\text{m}$ 이상에서 정확한 방법의 결과와

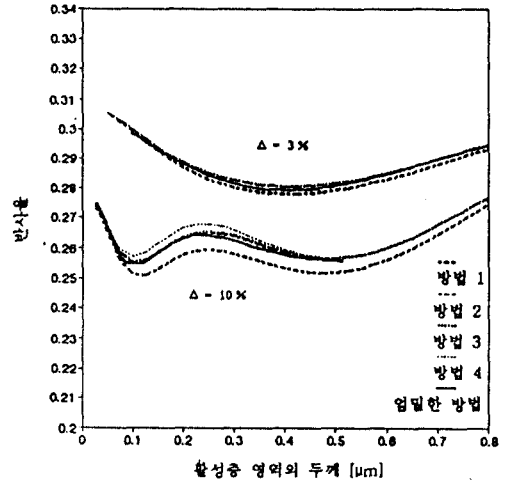


그림 5. TM 모드인 경우 코팅층이 존재하지않고 바깥매질이 공기 일때 엄밀한 방법과 네가지 간단한 방법을 사용하여 활성층 영역의 두께의 함수로써 계산한 레이저 다이오드의 단면 반사율.
 사용한 변수값 : $n_a=3.6$, $n_c=n_a(1-\Delta)$ 와 $\lambda=0.86\mu\text{m}$ 이고 $\Delta=10\%$ 와 3% .

Fig. 5. TM reflectivity calculated as a function of active layer thickness using the rigorous and four 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 $\lambda=0.8\mu\text{m}$ for $\Delta=10\%$ and 3% .

잘 일치함을 볼 수 있다.

TM 모드인 경우는 방법 2와 방법 3의 결과는 $\Delta=3\%$ 인 경우와 10% 인 경우 모두 활성층 영역 전 범위에 걸쳐 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 방법 1의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 비교했을때 약간 작은 반사율을 주고 있음을 볼 수 있다. 방법 4의 결과는 $\Delta=3\%$ 인 경우는 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하나 $\Delta=10\%$ 인 경우는 엄밀한 방법의 결과보다 약간 큰 반사율을 주고 있음을 볼 수 있다.

IV. 코팅 파라메타 공차 계산의 예

무반사 코팅층 제작시에 발생하는 코팅층 두께의 공차는 1%이고 굴절율의 공차가 0.02 정도⁽⁷⁾ 라는 것을 감안한다면 방법 2, 3과 방법 4에 의한 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께의 계산 결과는 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치한다고 생각할 수 있다. 따라서 방법 2, 3과 방법 4를 무반사 코팅층을 설계하는데 유용하게 사용되어질 수 있는 표준 근사

설계 방법이라 할 수 있다.

실제 무반사 코팅 제작시에는 제작시 발생하는 오차 때문에 최적 무반사 코팅 파라메타 값뿐만 아니라 무반사 코팅층에 허용될 수 있는 최대 반사율 이하의 반사율을 얻을 수 있는 코팅 파라메타들의 값의 범위를 나타내는 공차지도가 필요하게 된다. 3가지 표준 근사 설계 방법을 사용하여 공차지도를 구하였고 그 결과를 비교하였다.

공차 지도를 구하기 위하여 사용한 레이저 다이오드의 구조 변수값은 $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$ 이며 무반사 코팅층의 최대 허용 반사율은 0.1%로 설정하였다. 그림 6은 방법 2를 사용하여 구한 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우의 공차 지도로서 검은 타원 형태로 나타내진 부분이 반사율을 0.1% 이하로 얻을 수 있는 무반사 코팅층의 파라메타들의 범위를 나타낸다.

위의 타원과 밑의 타원은 각각 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우의 코팅층의 파라메타들의 범위를 나타낸다. 두 타원이 겹쳐지는 부분의 코팅 파라메타들을 무반사 코팅층이 가질 때 TE 모드와 TM 모드의 반사율이 모두 0.1% 이하가 된다. TE 모드인 경우의 최적 코팅 굴절율은 1.8872 이고 최적 코팅 두께는 $0.2065\mu\text{m}$ 이다. 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = \pm 0.055$ 이고 코팅 두께의 허용치 $\Delta h_1 = 0.008\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. TM 모드인 경우의 최적 코팅 굴절율은 1.9145 이고 최적 코팅 두께는 $0.1969\mu\text{m}$ 이다. 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = 0.063$ 이고 코팅 두께의 허용치 $\Delta h_1 = \pm 0.009\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. TM 모드인 경우가 TE 모드인 경우보다 코팅 굴절율과 코팅 두께에 있어서 모두 허용 오차가 큼을 알 수 있다.

그림 7은 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우에 각각 방법 3을 사용하여 구한 공차지도로서 사용한 변수값은 그림 6을 구하기 위하여 사용한 변수값을 사용하였다. TE 모드인 경우의 최적 무반사 코팅 굴절율은 1.8868 이고 최적 코팅 두께는 $0.2064\mu\text{m}$ 이며 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = \pm 0.056$ 이고 코팅 두께의 허용치 $\Delta h_1 = \pm 0.008\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. TM 모드인 경우의 최적 굴절율은 1.9153이고 최적 코팅 두께는 $0.1970\mu\text{m}$ 이며 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = 0.063$ 이고 $\Delta h_1 = 0.009\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

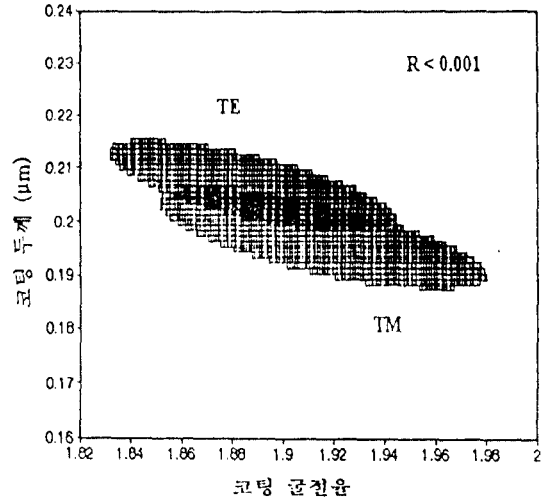


그림 6. 방법 2를 이용하여 TE 모드와 TM 모드 각각에 대하여 0.1% 이하의 반사율을 얻을 수 있는 무반사 코팅층의 파라메타들의 범위를 나타내는 공차지도. 사용한 변수값: $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

Fig. 6. Tolerance map describing the range of coating parameters of antireflection coatings which give reflectivities of R 10-3 using the second method for TE and TM modes respectively. $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ and $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

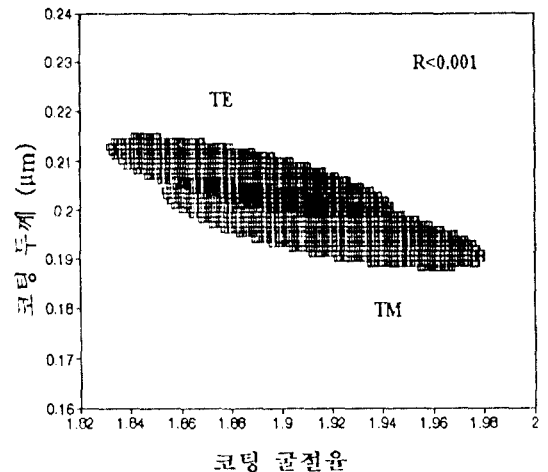


그림 7. 방법 3을 이용하여 TE 모드와 TM 모드 각각에 대하여 0.1% 이하의 반사율을 얻을 수 있는 무반사 코팅층의 파라메타들의 범위를 나타내는 공차지도. 사용한 변수값: $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

Fig. 7. Tolerance map describing the range of coating parameters of antireflection coatings which give reflectivities of R 10-3 using the third method for TE and TM modes respectively. $n_a=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ and $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

그림 8은 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우에 각각 방법 4를 사용하여 구한 공차지도로서 사용한 변수값은 그림 6을 구하기 위하여 사용한 변수값을 사용하였다. TE 모드인 경우의 최적 코팅 굴절율은 1.8866 이고 최적 코팅 두께는 0.2065 μm 이다. 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = \pm 0.056$ 이고 코팅 두께의 허용치 $\Delta h_1 = \pm 0.008\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. TM 모드인 경우의 최적 코팅 굴절율은 1.9185 이고 최적 코팅 두께는 0.1966 μm 이다. 코팅 굴절율의 허용치 $\Delta n_1 = \pm 0.063$ 이고 코팅 두께의 허용치 $\Delta h_1 = 0.009\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

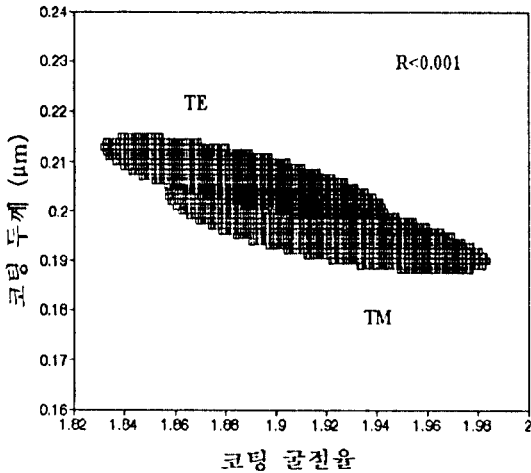


그림 8. 방법 4를 이용하여 TE 모드와 TM 모드 각각에 대하여 0.1% 이하의 반사율을 얻을 수 있는 무반사 코팅층의 파라메타들의 범위를 나타내는 공차지도.

사용한 변수값: $n_s=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ 이고 $\lambda=1.5\mu\text{m}$.
 Fig. 8. Tolerance map describing the range of coating parameters of antireflection coatings which give reflectivities of R 10⁻³ using the fourth method for TE and TM modes respectively.
 $n_s=3.7$, $n_c=3.5$, $d=0.2\mu\text{m}$ and $\lambda=1.5\mu\text{m}$.

III 절에서 구한 최적 무반사 코팅 파라메타들의 결과와 마찬가지로 TE 모드인 경우에 세가지 표준 근사 방법을 사용하여 각각 구한 그림 6, 7과 8을 비교하면 최적 무반사 코팅 파라메타 뿐만 아니라 코팅 파라메타들의 허용치도 거의 같아 거의 동일한 공차 지도임을 알 수 있다. TM 모드인 경우도 그림 6, 7과 8을 비교하면 코팅 파라메타의 허용치에는 같은 값을 가지나 최적 코팅 파라메타값에서 TE 모드에 비해 서로 약간 다른 값을 가지게 되어 공차 지도가 TE

모드인 경우보다 약간 달라짐을 알 수 있다.

V. 결 론

레이저 다이오드의 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께를 네가지 간단한 방법을 사용하여 각각 TE 모드와 TM 모드인 경우에 활성층 영역의 두께의 함수로서 계산한 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다. 무반사 코팅층 제작시에 발생하는 코팅층 두께의 공차는 1%이고 굴절율의 공차가 0.02 정도⁽⁷⁾라는 것을 감안한다면 방법 2, 3과 방법 4에 의한 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 최적 두께의 계산 결과는 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치한다고 생각할 수 있다.

무반사 코팅층을 설계하는데 사용되어지는 표준 근사 설계방법으로 채택한 방법 2, 3과 방법 4를 이용하여 무반사 코팅층의 반사율을 0.1% 이하로 주는 코팅층 파라메타들의 범위를 나타내는 공차지도를 구하였다. 세 방법을 이용하여 구한 공차지도는 TE 모드뿐만 아니라 TM 모드에서도 거의 같았다. TM 모드인 경우가 TE 모드인 경우보다 코팅층 파라메타들의 공차가 큼을 알 수 있었고 또한 두 모드의 반사율을 0.1%이하로 주는 무반사 코팅층의 코팅 굴절율과 코팅 두께가 존재함을 확인할 수 있었다.

세가지 표준 근사 방법중 방법 2는 레이저 다이오드 내 도파 모드를 구성하는 서로 다른 각도를 가지고 레이저 다이오드 단면에 입사하는 평면파 각각에 대하여 레이저 다이오드의 굴절율을 입사각도에 따라 다르게 설정해야 한다. 방법 3은 레이저 다이오드의 구조가 다층 구조인 경우 반사율 및 무반사 코팅층 파라메타들을 계산하기 위하여 각 층에 존재하는 field의 angular spectrum 을 각각 구하고 그들 간의 crossing term 들을 구해야 하므로 층의 수가 많아질수록 수식이 복잡해지고 계산시간이 많이 걸릴 것이라는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 반면에 방법 4는 레이저 다이오드 단면에 입사하는 평면파의 입사각도에 관계없이 레이저 다이오드의 굴절율을 에너지 관점에서 본 비유전 상수의 평균값의 제곱근인 상수로 설정하면 된다. 따라서 방법 4가 세가지 표준 근사 설계 방법중 가장 간단한 설계 방법이라고 결론지을 수 있다.

또한 레이저 다이오드 단면의 반사율을 활성층 영

역의 두께의 함수로써 네가지 간단한 방법을 사용하여 계산한 결과를 엄밀한 방법의 결과와 비교하였다. TM 모드인 경우 n_s 와 n_c 의 비 굴절율의 차 Δ 가 10%가 될 때까지 방법 2와 방법 3의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 거의 차이를 발생하지 않음을 볼 수 있었다. TE 모드인 경우 Δ 가 10%가 될 때까지 활성층 영역의 두께 $0.3\mu\text{m}$ 이하에서는 방법 1을 제외한 나머지 세가지 방법의 결과가 방법 1의 결과와 비교했을 때 엄밀한 방법의 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 활성층 영역의 두께 $0.3\mu\text{m}$ 이상에서는 방법 1의 결과가 나머지 3가지 방법의 결과보다 엄밀한 방법의 결과와 더 잘 일치하며 나머지 세가지 방법의 결과는 거의 같은 값을 가지나 엄밀한 방법의 결과와 비교하였을 때 반사율이 약 1.5% 정도 커짐을 볼 수 있었다. 활성층 영역의 두께 d 가 $0.1815\mu\text{m}$ 이고 $n_s=3.6$, $n_c=1.0$ 인 strongly guiding 인 경우는 방법 4의 결과만이 엄밀한 방법의 결과와 비교하였을 때 0.5% 이하의 오차를 보였고 나머지 3가지 방법의 결과는 엄밀한 방법의 결과와 큰 차이를 보였다.

참고문헌

1. T. Ikegami, "Reflectivity of mode of facet and oscillation mode in double heterostructure injection lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-8, pp. 470-476, 1972
2. C. M. Herzinger, C. C. Lu, T. A. De-Temple, and W. C. Chew, "The Semiconductor Waveguide Facet Reflectivity Problem," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 29, No. 8., pp. 2273-2281, 1993.
3. C. Vassallo, "Reflectivity of multidielctric coating deposited on the end facet of a weakly guiding dielectric slab waveguide," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 5, No. 11, pp. 1918-1928, 1988.
4. M. J. O. Mahony, "Semiconductor laser amplifiers for use in future fiber systems," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 531-544, 1988.
5. G. Eisenstein, "Theoretical design of single-layer antireflection coatings on laser facets," *Bell Syst. Tech. J.* Vol. 63, No. 2, pp. 357-364, 1984.
6. D. R. Kaplan and P. P. Deimel, "Exact calculation of the reflection coefficient for coated optical waveguide devices," *Bell Syst. Tech. J.* Vol. 63, No. 6, pp. 857-877, 1984.
7. Lennart Atterän s and Lars Thylen, "Single layer antireflection coating of semiconductor lasers : Polarization properties and the influence of the laser structure", *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 426 - 430, 1989.
8. W. Hellmich and P. P. Deimel, "Optimal AR-Coating for optical waveguide device," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 469-476, 1992.
9. T. Saitoh, T. Mukai, and O. Mikami, "Theoretical analysis and fabrication of antireflection coatings on laser diode facets," *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 288 - 293, 1985.
10. 박세진, 김부균, "레이저 다이오드 단면의 최적 무 반사 코팅을 위한 수치 해석 방법 비교", 한국 통신학회 논문지, 제 18 권, 제 12 호, pp 1935-1944, 1993.
11. C. Vassallo, "Rigorous and approximate calculation of antireflection layer parameters for traveling-wave diode laser amplifier," *Electron Letters*, Vol. 21, No. 8, pp. 333-334, 1985.



金 富 均 (Boo Gyoung Kim) 정회원

1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과
공학사

1981년 2월 : 한국과학기술원 전기및
전자공학과 공학석사

1989년 8월 : University of Southern
California 공학박사

1993년 6월~8월 : IBM Almaden 연구소 방문연구원

1981년 3월~현재 : 숭실대학교 전자공학과 부교수

* 주관심분야 : 광소자, 광통신시스템, 광정보장치 등



金 炫 榭 (Hyun Soo Kim) 정회원

1993년 2월 : 숭실대학교 전자공학과
공학사

1995년 2월 : 숭실대학교 전자공학과
공학석사

1995년 1월~현재 : 대한전선 정보통
신 연구소 연구원



金 用 坤 (Yong Gon Kim) 정회원

1994년 2월 : 숭실대학교 전자공학과
공학사

1997년 3월~현재 : 숭실대학교 전자
공학과 석사과정