

## Variational 방법으로 구한 필드 분포와 Angular Spectrum 방법을 사용한 Buried 채널 도파로 소자 단면의 단층 무반사 코팅 설계

김상택\* · 김형주 · 김부균

승실대학교 정보통신전자공학부

Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

(2001년 10월 22일 받음, 2002년 1월 9일 수정본 받음)

Buried 채널 도파로의 필드 분포에 대한 analytic 표현식을 effective index method(EIM)와, variational method(VM)을 사용하여 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 도파로 폭과 두께에 따른 최소의 반사율을 주는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 코팅 두께를 구하였고 이를 비교 검토하였다. 도파로 폭이 큰 영역에서는 두 방법으로 구한 코팅층의 파라메타가 비슷한 결과를 보였으나 도파로 폭이 작아질수록 VM을 사용하여 구한 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께는 클레딩층만으로 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께로 접근한 반면에 EIM을 사용하여 구한 경우는 차이가 많이 발생하였다. Buried 채널 도파로의 도파로 폭과 두께가 같을 때, 활성층과 클레딩층의 굴절율 차이에 비례하여 VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도는 거의 동일한 영역에 존재하였다. 반면에 free space radiation mode(FSRM) 방법의 경우는 활성층과 클레딩층의 굴절율 차이의 비가 10%일 때, quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도는 서로 다른 영역에 존재하였다. 따라서 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도가 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도보다 정확함을 알 수 있었다.

주제어 : integrated optics/waveguide, semiconductor devices.

### I. 서 론

단면 반사율은 반도체 레이저 다이오드, 반도체 광 증폭기와 silica 도파로 소자 등과 같은 광 도파로 소자들의 특성을 결정짓는 중요한 파라메타이다.<sup>[1]</sup> 특히 반도체 광 증폭기가 높은 이득, 낮은 리플 이득, 그리고 넓은 대역폭 등과 같은 향상된 동작 특성을 가지기 위해서는 광 증폭기 단면의 반사율을 최소화( $<10^{-4}$ )하기 위한 무반사 코팅이 필수적으로 요구되어진다.<sup>[2]</sup>

Vassallo는 slab 도파관 구조를 가지는 광 도파로 소자 단면의 반사율 계산을 위한 정확하고 엄밀한 계산방법을 제안하고 이를 이용하여 무반사 코팅층의 파라메타 (굴절율과 두께) 최적화에 대한 연구를 수행하였다.<sup>[2,3]</sup> 또한 Smartt 등은 Fourier operator 방법을 사용하여 slab 도파로의 정확한 단면 반사율을 계산하였다.<sup>[4]</sup> 수치해석방법으로는 beam propagation 방법과 finite difference 방법 등이 널리 이용되고 있다.<sup>[5,6]</sup> 이러한 방법들을 사용하여 얻은 결과는 매우 정확하지만 코팅된 단면 반사율의 계산 과정이 너무 복잡하고 계산 시간도 많이 소요된다. 따라서 Vassallo의 정확한 방법이나 수치해석방법을 사용하여 무반사 코팅층의 파라메타를 최적화 하에는 많은 어려움이 예상된다.

단면 반사율 계산을 신속하면서도 정확하게 계산하기 위한 근사적인 방법으로는 angular spectrum 방법과 free space radiation mode(FSRM) 방법 등이 있다. FSRM 방법의 경우 활성층의 굴절율과 클레딩층의 굴절율의 차이가 10% 보다 크

면 단면 반사율의 오차가 많이 발생하지만 대부분의 광소자의 경우 굴절율 차이가 작아 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다.<sup>[7,8]</sup> Angular spectrum 방법의 경우 간단한 계산 방법의 결과와 오차가 매우 작으며 계산 과정이 간단하고 빠른 계산 수행능력을 가지고 있어 단면 반사율 계산과 무반사 코팅층 설계에 많이 사용된다.<sup>[9,10]</sup>

Buried 채널 도파로는 광통신 소자에 널리 사용되는 구조로 특히 도파로 폭과 두께가 거의 같은 크기를 가질 때 소자의 편광에 따른 특성 변화를 줄일 수 있어 반도체 광 증폭기 등에 많이 사용되고 있다.<sup>[11]</sup> Angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로 소자의 코팅된 단면의 반사율을 구하기 위해서는 정확한 2차원 필드 분포의 analytic한 표현식이 필요하며 이러한 필드 분포의 정확도는 반사율 값의 정확도에 큰 영향을 미친다.<sup>[12,13]</sup> 많은 경우 채널 도파로의 반사율 계산에 사용하는 필드 분포를 채널 도파로를 slab 도파로로 가정하여 구한 1차원의 필드 분포를 사용하였으며, 2차원의 필드 분포를 사용하여 단면 반사율을 계산한 경우에는 대부분 유효굴절율 방법(effective index method, EIM)을 사용하여 구한 채널 도파로의 2차원 필드 분포를 사용하였다.<sup>[10,14]</sup> 그러나 유효굴절율 방법을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포는 aspect ratio(채널 도파로 폭/채널 도파로 두께)가 1에 가까울 때에는 정확한 필드 분포와의 오차가 크게 나타남으로써 반사율 또한 큰 오차를 초래한다는 단점이 있다. 그러나 variational method (VM)<sup>[12,15,16]</sup>을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포는 채널 도파로의 도파로 폭과 두께 및 그 비에 관계없이 보다 정확한 2차원의 필드 분포를 가진다.

\*E-mail: taegi@sunbee.soongsil.ac.kr

최근에 우리는 EIM과 VM을 사용하여 구한 2차원 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로의 단면 반사율을 계산하였다.<sup>1)</sup> 그 결과 채널 도파로 구조의 단면 반사율은 EIM이 잘 맞는 영역에서는 두 가지 방법으로 구한 단면 반사율은 거의 일치하였으나, aspect ratio가 1에 가까운 경우(EIM이 잘 맞지 않는 영역)에서는 VM을 사용하여 구한 단면 반사율이 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율보다 정확함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 VM을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로 소자 단면의 무반사 코팅층의 최적의 굴절율과 정규화된 두께를 여러 개의 도파로 두께에 대하여 도파로 폭의 함수로 계산하였고 이를 EIM을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 결과와 비교 검토하였다. 또한 여러 경우에 대하여 VM과 EIM을 사용하여 구한 무반사 코팅층의 공차지도(단면 반사율을 10<sup>-4</sup> 이하로 얻을 수 있는 코팅층의 굴절율과 정규화된 코팅층의 두께의 범위를 나타내는 그림)를 구하였고 그 결과를 비교 검토하였다. 그리고 aspect ratio가 1일 때 VM과 angular spectrum을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용한 구한 공차지도를 비교 검토하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Buried 채널 도파로 구조를 가진 광소자의 코팅된 단면의 반사율을 계산하는 방법과 코팅층의 최적의 파라메타 값을 구하는 방법에 대하여 간략히 설명하였다. 3장에서는 여러 가지 방법을 사용하여 구한 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께를 여러 개의 도파로 폭과 두께에 대하여 계산하였으며 단면 반사율을 10<sup>-4</sup> 이하로 얻을 수 있는 코팅층의 공차지도를 제시하고 그 결과를 비교 검토하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 채널 도파로의 단면 반사율

채널 도파로의 단면 반사율을 계산하기 위해서는 도파로를 따라 진행하는 도파 모드의 필드 분포에 angular spectrum 방법을 적용하여 서로 다른 각도(φ, θ)를 가지고 진행하는 평면파의 합으로 나타낸 다음 각각의 평면파에 Fresnel 반사율식을 사용하여 구한 반사파와의 overlap integral로 구할 수 있다. 그림 1은 계산에 사용된 단층 무반사 코팅된 buried 채널 도파로의 단면도와 측면도를 나타내는 그림이다. 그림 1(a)에서 w는 buried 채널 도파로의 도파로 폭을 나타내며, d는 두께, n<sub>a</sub>는 코어의 굴절율, 그리고 n<sub>c</sub>는 코어를 둘러싼 클래딩의 굴절율을 나타낸다. 그림 1(b)에서 n<sub>f</sub>는 코팅층의 굴절율을 나타내고 h는 코팅층의 두께를 나타낸다.

Angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로 소자의 코팅된 단면의 반사율을 구하기 위해서는 정확한 2차원 필드 분포의 analytic한 표현식이 필요하다. 그림 1과 같은 채널 도파로의 필드 분포 Ψ(x, y, z)가 변수 분리가 가능하다면 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Psi(x, y, z) = f(x) g(y) e^{-\beta z} \quad (1)$$

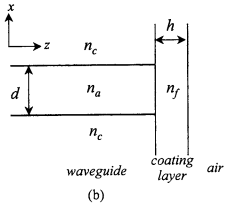
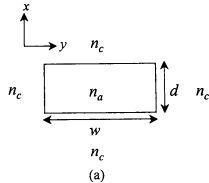


그림 1. (a) 단층 무반사 코팅된 buried 채널 도파로의 단면도와 (b) 측면도.

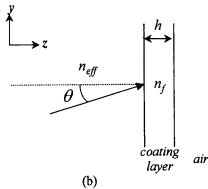
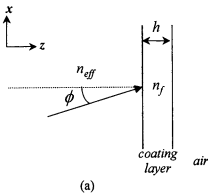


그림 2. Angular spectrum 방법을 사용하여 코팅된 채널 도파로의 단면 반사율을 계산하기 위한 (a) x-z 단면도와 (b) y-z 단면도.

여기서  $\beta_n$ 는 전파상수이고,  $f(x)$ 는  $x$  방향으로의 필드 분포와  $g(y)$ 는  $y$  방향으로의 필드 분포로 EIM 또는 VM<sup>[12,15,16]</sup>을 사용하여 구할 수 있다. 필드 분포에 대한 angular spectrum 함수는 푸리에 변환으로부터 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$F(s, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{jtx} dx \int_{-\infty}^{\infty} g(y) e^{jty} dy \quad (2)$$

여기서  $s = k_0 n_{eff} \sin \phi$ 이고  $t = k_0 n_{eff} \sin \theta$ 이며,  $n_{eff}$ 는 레이저 다이오드를 에너지 관점에서 본 유효굴절율<sup>[3]</sup>이고  $\phi$ 는 그림 2(a)에서와 같이  $x$ - $z$  평면상에서 입사파의 진행 방향이  $z$ 축과 이루는 각도이며,  $\theta$ 는 그림 2(b)에서와 같이  $y$ - $z$  평면상에서 입사파의 진행 방향이  $z$ 축과 이루는 각도이다. 즉 푸리에 변환으로 구한 angular spectrum 함수를 사용하여 채널 도파로를 진행하는 guided wave를 그림 2와 같이 유효굴절율이  $n_{eff}$ 인 균일한 물질에서 서로 다른 각도( $\phi, \theta$ )를 가지고 진행하는 평면파의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 코팅된 buried 채널 도파로의 반사율은 각각의 평면파에 Fresnel 반사율식을 적용하여 구할 수 있으며 그 수식은 다음과 같다.<sup>[10]</sup>

$$R = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(s, t) \Gamma(s, t) F^*(s, t) ds dt \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(s, t) F^*(s, t) ds dt \right|^2} \quad (3)$$

여기서 evanescent 필드에 의한 반사율에 대한 기여 부분을 포함하기 위해서 적분 구간을  $-\infty$ 에  $+\infty$ 까지 취하였다. 그리고  $\Gamma(s, t)$ 는 그림 2와 같이 임의의 각도( $\phi, \theta$ )로 진행하는 평면파에 대한 반사 계수를 나타내며 그 수식은 다음과 같다.

$$\Gamma(s, t) = \frac{r_{12}(s, t) + r_{23}(s, t) e^{-2\beta_z h}}{1 + r_{12}(s, t) r_{23}(s, t) e^{-2\beta_z h}} \quad (4)$$

여기서  $r_{12}(s, t)$ 는 유효굴절율  $n_{eff}$ 를 가지는 매질과 코팅층의 경계면에서의 Fresnel 반사계수,  $r_{23}(s, t)$ 는 코팅층과 공기의 경계면에서의 Fresnel 반사계수를 의미하며 그 수식은 참고문헌 [10]과 [12]를 참고하였다. 그리고  $\beta_z$ 는 코팅층에서의 전파상수를 나타낸다.

코팅된 buried 채널 도파로의 가장 낮은 반사율을 주는 코팅층의 굴절율과 두께를 구하기 위하여 코팅층의 굴절율과 두께를 변화시키면서 식 (3)을 계산하였다. 이때 코팅층의 굴절율과 정규화된 두께의 초기치는 그림 2에서 유효굴절율이  $n_{eff}$ 인 균일한 물질과 공기사이에서 존재하는 무반사 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 두께를 사용하였고 그 수식은 다음과 같다.

$$n_f = \sqrt{n_{eff}}, \quad \frac{n_f h}{\lambda} = \frac{1}{4} \quad (5)$$

### III. 계산 결과 및 검토

#### 3.1. 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께

채널 도파로의 2차원의 필드 분포를 VM과 EIM을 사용하여 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 코팅된 단면의 반사율을 구하고 코팅층의 굴절율과 정규화된 두께를 구하여 비교 검토하였다. 계산에 사용된 파라미터 값은 파장이 1.55

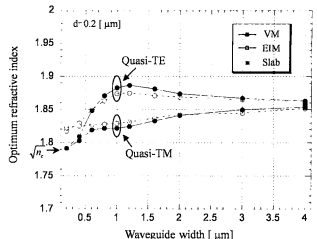


그림 3. VM과 EIM을 사용하여 구한 필드 분포 식에 angular spectrum 방법을 적용하여 구한 도파로 두께가 0.2 μm일 때 도파로 폭에 따른 코팅층의 최적 굴절율.

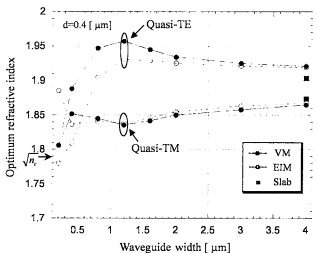


그림 4. VM과 EIM을 사용하여 구한 필드 분포 식에 angular spectrum 방법을 적용하여 구한 도파로 두께가 0.4 μm일 때 도파로 폭에 따른 코팅층의 최적 굴절율.

μm, 활성층의 굴절율이 3.54이고 클래딩층의 굴절율이 3.21이다. 그리고 도파로 두께  $d$ 가 0.2 μm, 0.4 μm와 0.6 μm일 때 도파로 폭  $w$ 를 0.2 μm에서 4 μm까지 변화시켜가며 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 가장 낮은 반사율을 주는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 두께를 구하고 이를 EIM을 사용하여 구한 코팅층의 파라미터 값들과 비교 검토하였다.

그림 3과 4는 각각 도파로 두께  $d$ 가 0.2 μm와 0.4 μm일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 가장 낮은 반사율을 주는 코팅층의 최적 굴절율을 나타내는 그림이다. 도파로 폭이 증가할수록 VM을 사용하여 구한 코팅층의 최적 굴절율은 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드 모두 각각의 3층 slab 도파로의 코팅층의 최적 굴절율로 접근함을 볼 수 있다. 도파로 폭이 감소할수록 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드로

대한 코팅층의 최적 굴절율은 모두 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 최적 굴절율  $\sqrt{n_c}$  (1.79)로 접근함을 알 수 있다. 또한 도파로 두께  $d$ 가 0.6  $\mu\text{m}$ 일 때도 마찬가지로 그림 3과 4의 경우와 매우 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 도파로 폭  $w$ 가 0.2  $\mu\text{m}$ 일 때, 도파로 두께  $d$ 가 작을수록 코팅층의 최적 굴절율은 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 최적 굴절율  $\sqrt{n_c}$ 로 좀더 빨리 접근함을 알 수 있다.

반면에 EIM을 사용하여 구한 buried 채널 도파로의 도파로 폭  $w$ 에 따른 코팅층의 최적 굴절율은 도파로 폭이 큰 영역에서는 VM을 사용하여 구한 코팅층의 최적 굴절율과 비슷하였으나 도파로 폭이 작은 영역에서는 차이가 크게 나타났다. 또한 VM의 경우와는 달리 도파로 폭이 감소할수록 코팅층의 최적 굴절율이 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 최적 굴절율  $\sqrt{n_c}$ 로 접근하지 않았다.

그림 5와 6은 각각 도파로 두께  $d$ 가 0.2  $\mu\text{m}$ 와 0.4  $\mu\text{m}$ 일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 가장 낮은 반사율을 주는 코팅층의 정규화된 최적 두께를 나타내는 그림이다. 도파로 폭이 증가할수록 VM을 사용하여 구한 코팅층의 정규화된 최적 두께는 각각의 3층 slab 도파로의 코팅층의 정규화된 최적 두께로 접근하였다. 도파로 폭이 감소할수록 코팅층의 정규화된 최적 두께는 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 정규화된 최적 두께인 0.25로 접근함을 알 수 있다. 또한 도파로 두께  $d$ 가 0.6  $\mu\text{m}$ 일 때도 마찬가지로 그림 5와 6의 경우와 매우 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 도파로 폭  $w$ 가 0.2  $\mu\text{m}$ 일 때, 도파로 두께  $d$ 가 작을수록 코팅층의 정규화된 최적 두께는 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 정규화된 최적 두께 0.25로 좀더 빨리 접근함을 알 수 있다.

EIM을 사용하여 구한 buried 채널 도파로의 도파로 폭  $w$ 에 따른 코팅층의 정규화된 최적 두께는 도파로 폭이 큰 영역에서는 VM을 사용하여 구한 정규화된 최적 두께와 비슷하여

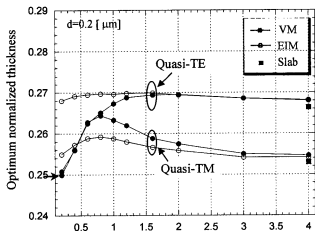


그림 5. VM과 EIM을 사용하여 구한 필드 분포 식에 angular spectrum 방법을 적용하여 구한 도파로 두께가 0.2  $\mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭에 따른 코팅층의 정규화된 최적 두께.

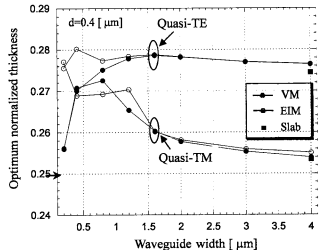


그림 6. VM과 EIM을 사용하여 구한 필드 분포 식에 angular spectrum 방법을 적용하여 구한 도파로 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭에 따른 코팅층의 정규화된 최적 두께.

도파로 폭이 증가할수록 3층 slab 도파로의 코팅층의 정규화된 최적 두께로 접근하였다. 그러나 도파로 폭이 작은 영역에서는 차이가 크게 나타났고 VM의 경우와는 달리 도파로 폭이 감소할수록 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이 존재하는 코팅층의 정규화된 최적 두께 0.25로 접근하지 않았다.

그림 3에서부터 그림 6까지에서 알 수 있듯이 VM을 사용하여 구한 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께는 여러 개의 도파로 두께에 대하여 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드 모두 도파로 폭이 감소함에 따라 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기의 경계면 사이에 존재하는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 코팅 두께로 접근함을 알 수 있었고 또한 도파로 두께에 따라 접근하는 정도의 차이가 있음을 알 수 있었다. 도파로 두께가 0.2  $\mu\text{m}$ 일 경우가 도파로 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 와 0.6  $\mu\text{m}$ 일 경우에 비해서 클래딩층으로만 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 굴절율과 정규화된 최적 두께로 더 빨리 접근하는 것을 볼 수 있었다. 그 이유는 도파로 두께가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 같은 도파로의 폭에 대하여서는 클래딩층의 영향이 크기 때문이라 생각된다.

### 3.2. 공차지도

광소자 단면의 무반사 코팅 설계시 중요하게 사용되리라 예상되는 코팅층의 공차지도(단면 반사율을  $10^{-4}$  이하로 얻을 수 있는 코팅층의 굴절율과 정규화된 두께의 범위를 나타내는 그림)를, VM과 EIM을 사용하여 얻은 필드 분포와 angular spectrum을 사용하여, 구하고 이를 비교 검토하였다. 또한 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum을 사용하여 구한 공차지도도 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도와 비교 검토하였다.

그림 7은 파장이 1.3  $\mu\text{m}$ 이고, 활성층의 굴절율이 3.2819, 클래딩층의 굴절율이 3.2491로 굴절율 차이의 비가 1%이며, 도파로 두께와 폭이 0.6335  $\mu\text{m}$ 일 때(aspect ratio=1), VM을 사

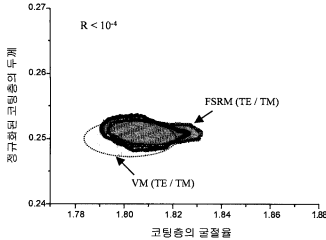


그림 7. 도파로 두께와 폭이 0.6335  $\mu\text{m}$ 이고  $n_o=3.2491$ ,  $n_e=3.2819$ 일 때 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도<sup>[8]</sup>의 비교.  $\Delta n=(n_o-n_e)/n_o=1\%$ .

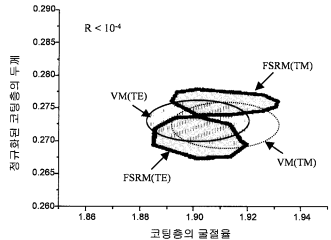


그림 8. 도파로 두께와 폭이 0.4  $\mu\text{m}$ 이고  $n_o=3.52$ ,  $n_e=3.2$ 일 때 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도<sup>[8]</sup>의 비교.  $\Delta n=(n_o-n_e)/n_o=10\%$ .

용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도를 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도<sup>[8]</sup>와 비교한 그림이다. 굴절을 차이의 비가 1%인 경우(FSRM 방법이 잘 맞는 영역), VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도는 거의 일치함을 볼 수 있다. 그러나 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도가 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도보다 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기사이에서의 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께(1.79, 0.25)에 더 접근해 있음을 볼 수 있다.

그림 8은 활성층의 굴절률이 3.52, 클래딩층의 굴절률이 3.2로 굴절률 차이의 비가 10%이며(FSRM 방법이 잘 맞지 않는 영역) 도파로 두께와 폭이 0.4  $\mu\text{m}$ 일 때, VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도를 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도<sup>[8]</sup>와 비교한 그림이다. 그림 7과는 달리 굴절률 차이의 비가 10%인 경우에 있어서 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도는 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도와 서로 다른 영역에 존재함을 알 수 있다. VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도의 경우에는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도가 거의 같은 영역에 존재하는 반면에 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도의 경우 두 모드의 공차지도 영역이 서로 다를 수 있다. Aspect ratio가 1인 채널 도파로의 경우는 도파로 폭과 두께가 같으므로 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도는 거의 같은 영역에 존재하여야 한다.

그림 7과 8로부터 활성층과 클래딩층의 굴절률 차이의 비에 관계없이 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도가 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도보다 정확함을 알 수 있다.

그림 9는 도파로 두께  $d$ 와 폭  $w$ 가 0.2  $\mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 공차지도를 나타내는 그림이다. 나머지

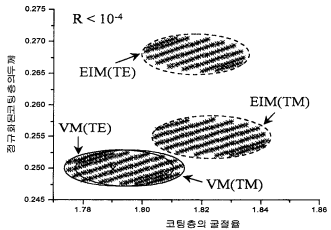


그림 9. 도파로 두께와 폭이 0.2  $\mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 공차지도의 비교.  $\times$ : 클래딩층으로만 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 코팅 굴절률과 정규화된 최적 코팅 두께.

파라미터는 그림 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 VM을 사용하여 구한 공차지도는 EIM을 사용하여 구한 공차지도와 매우 다른 위치에 존재함을 알 수 있다. VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도의 경우에는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도가 거의 같은 영역에 존재한 반면에 EIM을 사용한 필드 분포로 구한 공차지도의 경우에는 두 모드의 공차지도가 서로 다른 영역에 존재함을 알 수 있다. 또한 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도에 클래딩층으로만 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께(1.79, 0.25)가 포함되어 있음을 알 수 있다.

그림 10을 얻는데 사용한 파라미터는 도파로 폭  $w$ 가 0.4  $\mu\text{m}$ 이고 나머지 파라미터는 그림 9와 같다. 그림 10의 경우도 그림 9와 마찬가지로 반사율을 계산할 때 사용하는 필드 분포

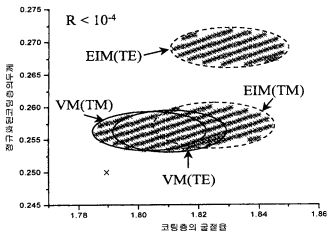


그림 10. 도파로 두께가  $0.2 \mu\text{m}$ 이고 폭이  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 공차지도의 비교. x: 클래딩층으로만 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 코팅 굴절률과 정규화된 최적 코팅 두께.

가 반사를 값에 영향을 미치며 따라서 공차지도의 영역에도 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 그림 9와 10에서 알 수 있듯이 VM으로 구한 필드 분포를 사용하여 구한 공차지도가 EIM으로 구한 필드 분포를 사용하여 구한 공차지도보다 정확한 영역에 존재함을 알 수 있다. 그 이유는 aspect ratio가 1에 가까워 질수록 EIM으로 구한 필드 분포가 부정확하기 때문이라 생각된다.

#### IV. 결 론

채널 도파로 소자 단면의 무반사 코팅층 설계를 VM을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 무반사 코팅층의 파라메타값을 계산하였고 이를 EIM을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 값과 비교 검토하였다. 또한 VM과 EIM을 사용하여 반사율을  $10^{-4}$  이하로 얻을 수 있는 코팅층의 공차지도를 구하였고 이를 비교 검토하였다. 그리고 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용한 공차지도를 비교 검토하였다.

채널 도파로 소자의 2차원 필드 분포의 정확도가 단층 무반사 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께에 영향을 미침을 알 수 있었다. 도파로 폭이 비교적 큰 영역에서는 EIM과 VM으로 구한 무반사 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께는 거의 일치하였으며 도파로 폭이 줄어들수록 slab 도파로의 코팅층의 최적 파라메타값으로 접근하였다. 도파로 폭이 작아질수록 VM을 사용하여 구한 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께는 클래딩층만으로 구성된 물질과 공기 사이에 존재하는 코팅층의 최적 굴절률과 정규화된 최적 두께로 접근한 반면에 EIM을 사용하여 구한 경우는 이와 차이가 심하게 나타났다.

채널 도파로의 도파로 폭과 두께가 같을 때 (aspect ratio = 1), 활성층과 클래딩층의 굴절률 차이의 비가 1%인 경우와 10%

인 경우에 있어서 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도와 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도를 비교하였다. 그 결과 활성층과 클래딩층의 굴절률 차이에 관계없이 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도의 경우에는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 공차지도가 거의 같은 영역에 존재한다. 반면에 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도의 경우에는 굴절률 차이의 비가 1%인 경우에는 두 모드의 공차지도 영역이 거의 같으나 굴절률 차이의 비가 10%인 경우에는 두 모드의 공차지도 영역이 서로 다름을 알 수 있다. 따라서 VM을 사용하여 구한 필드 분포와 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도가 FSRM 방법을 사용하여 구한 공차지도보다 정확하다고 생각된다.

채널 도파로의 도파로 두께가  $0.2 \mu\text{m}$ 이고 도파로 폭이  $0.2 \mu\text{m}$ 과  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 공차지도를 구하였다. 그 결과 채널 도파로의 경우 VM을 사용하여 구한 공차지도는 EIM을 사용하여 구한 공차지도와 매우 다른 위치에 존재함을 알 수 있다. 또한 VM을 사용하여 구한 공차지도의 경우 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드가 거의 같은 영역에 존재한 반면에 EIM을 사용하여 구한 공차지도의 경우는 두 모드가 각각 서로 다른 영역에 존재하였다. 이것은 aspect ratio가 1에 가까워질수록 EIM으로 구한 필드 분포가 부정확하기 때문이다. 따라서 VM과 angular spectrum 방법을 사용하여 구한 공차지도가 EIM을 사용하여 구한 공차지도보다 정확함을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] G. Guekos, *Photonic Devices for Telecommunications* (Springer, Berlin, 1999), Chapter 1.
- [2] C. Vassallo, "Rigorous and approximate calculation of anti-reflection layer parameters for traveling-wave diode laser amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 8, pp. 333-334, 1985.
- [3] C. Vassallo, "Reflectivity of multilayer dielectric coatings 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] C. J. Smart, T. M. Benson, and P. C. Kendall, "Exact analysis of waveguide discontinuities: junctions and laser facets," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1352-1353, 1993.
- [5] K. Kawano, T. Kitoh, M. Kohtoku, T. Takeshita, and Y. Hasumi, "3-D semivectorial analysis to calculate facet reflectivities of semiconductor optical waveguide based on the bi-directional method of line BPM (MoL-BPM)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 108-110, 2001.
- [6] J. Uamauchi, A. Shin'ichi, and H. Nakano, "Reflectivity analysis of optical waveguides with coated and tilted facets using the FD-TD method with PML absorbing boundary condition," *Proc. Integrated Photonics Research*, Boston, MA, pp. 422-425, 1996.
- [7] P. C. Kendall, D. A. Roberts, P. N. Robson, M. J. Adams, and M. J. Robertson, "New formula for semiconductor laser facet reflectivity," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no.

2, pp. 148-150, 1993.

[8] A. Vukovic, P. Sewell, T. M. Benson, and P. C. Kendall, "Advances in facet design for buried lasers and amplifiers," *IEEE. J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 175-184, 2000.

[9] T. Saitoh, T. Mukai, and O. Mikami, "Theoretical analysis and fabrication of antireflection coatings on laser-diode facets," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, no. 2, pp. 288-293, 1985.

[10] J. Buus, M. C. Farries, and D. J. Robbins, "Reflectivity of coated and tilted semiconductor facets," *IEEE. J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1837-1842, 1991.

[11] S. Kitamura, K. Komatsu, and M. Kitamura, "Polarization-insensitive semiconductor optical amplifier array grown by selective MOVPE," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 173-175, 1994.

[12] 김상택, 김동후, 김부균, "Variational 방법으로 구한 필드 분포를 이용한 도파로 폭에 따른 buried channel waveguides 의 단면 반사율," 전자공학회논문지, SD편, 제37권, 제11호, pp. 36-42, 2000.

[13] 김상택, 김동후, 김부균, 유명식, "Angular spectrum 방법을 사용하여 구한 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 단면 반사율 비교," 전자공학회논문지, SD편, 제38권, 제9호, pp. 30-38, 2001.

[14] C. Vassallo, "Some numerical results on polarization insensitive 2-layer antireflection coatings for semiconductor optical amplifiers," *IEE. Proceedings*, vol. 137, Pt. J, no. 4, pp. 203-204, 1990.

[15] W. P. Huang and H. A. Haus, "A simple variational approach to optical rib waveguide," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 56-61, 1991.

[16] W. Huang, H. A. Haus, and H. N. Yoon, "Analysis of buried-channel waveguides and couplers: scalar solution and polarization correction," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 642-648, 1990.

**The design of a single layer antireflection coating on the facet of buried channel waveguide devices using the angular spectrum method and field profiles obtained by the variational method**

Sang-Taek Kim<sup>†</sup>, Hyoung-Joo Kim, and Boo-Gyoun Kim

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: taegi@sunbee.soongsil.ac.kr

(Received October 22, 2001 ; revised manuscript received January 9, 2002)

We have calculated the optimum refractive index and normalized thickness of a single layer antireflection coating on the facet of buried channel waveguides as a function of waveguide width for several waveguide depths using the angular spectrum method and field profiles obtained by the effective index method (EIM) and the variational method (VM), respectively, and discussed the results. In the area of large waveguide width, the optimum parameters of a single layer antireflection coating obtained by both methods are almost the same. However, as waveguide width decreases, the parameters obtained by the VM approach those of a single layer antireflection coating between cladding layer and air, while those obtained by the EIM do not approach those, and the difference between the two parameters is large. The tolerance maps of the quasi-TE and quasi-TM modes obtained by the VM for square waveguides are located in almost the same area regardless of refractive index contrast, while those obtained by the free space radiation mode (FSRM) method for refractive index contrast of 10% are located in the different area. Thus, we think that the tolerance maps obtained by the VM are more exact than those obtained by the FSRM method.

Classification codes : OE.010, OE.050.