

論文2001-38SD-9-5

# Angular spectrum 방법을 사용하여 구한 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 단면 반사율 비교

## (Comparison Between the Facet Reflectivities of Buried Channel Waveguides and Those of Ridge Waveguides Using the Angular Spectrum Method)

金相澤\*, 金東厚\*, 金富均\*, 兪明植\*

(Sang-Taek Kim, Dong-Hoo Kim, Boo-Gyoun Kim, and Myungsik Yoo)

### 요 약

Buried channel 도파로와 ridge 도파로에 대하여 variational method (VM)과 유효굴절율 방법을 사용하여 2차원의 필드 분포를 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 여러 개의 도파로 두께에 대하여 도파로 폭에 따른 단면 반사율을 계산하고 이를 비교 검토하였다. 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량은 buried channel 도파로의 경우는 매우 크게 나타났으나 ridge 도파로의 경우는 buried channel 도파로의 변화량에 비해 매우 작게 나타났다. Angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로 소자의 단면 반사율을 계산할 때 사용되는 2차원의 필드 분포의 정확성은 반사율 값에 큰 영향을 미칠 수 있었다. 유효굴절율 방법의 경우 도파로 폭과 도파로 두께가 감소할수록 필드 분포의 부정확성으로 인해 정확한 반사율 값과의 오차가 심하게 나타났다. 반면에 VM을 사용하여 구한 필드 분포는 도파로 폭과 두께에 관계없이 정확한 필드 분포와 오차가 적어 유효굴절율 방법보다 정확한 반사율 값을 구할 수 있었다. 유효굴절율 방법이 잘 적용되는 영역에서는 두 방법을 사용하여 구한 반사율의 차이가 매우 작음을 알 수 있었다.

### Abstract

We calculate the facet reflectivity of buried channel waveguides and ridge waveguides as a function of the waveguide width for various thicknesses using the angular spectrum method and the two dimensional field profiles obtained by the variational method (VM) and the effective index method (EIM). The variation of the reflectivity of buried channel waveguides as a function of the waveguide width is large, while that of ridge waveguides is very small. The accuracy of the field profiles necessary for the calculation of the facet reflectivity using the angular spectrum method greatly affects that of the facet reflectivity. The difference between the exact reflectivity and that using EIM increases as the waveguide width and thickness decreases due to the inaccuracy of the field profiles obtained by EIM. However, the difference between the exact reflectivity and that using VM is smaller than that using EIM regardless of waveguide width and thickness. The difference between the facet reflectivities using EIM and VM is small in the area where the EIM works very well.

\* 正會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部  
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)  
接受日字:2001年2月14日, 수정완료일:2001年7月20日

## I. 서 론

단면 반사율은 반도체 레이저 다이오드, 반도체 광 증폭기와 silica 도파로 소자 등과 같은 광 도파로 소자들의 특성을 결정짓는 중요한 파라메타이다. 따라서 광 도파로 소자의 단면 반사율을 정확하고 신속하게 계산하기 위하여 많은 연구가 행해졌다<sup>[1,4,5,6]</sup>. 많은 경우에 있어서 광 도파로 소자의 단면 반사율을 계산할 때 광 도파로 소자를 측면 방향으로 동일한 굴절율을 가지는 slab 도파로로 가정하고 1차원의 필드 분포를 사용하여 단면 반사율을 계산하였다. 그러나 실제 사용되는 광 도파로 소자는 lateral 방향으로도 일정한 폭을 가지는 2차원 도파로 구조이다. 광통신용 소자에 널리 사용되는 구조로는 buried channel 도파로와 ridge 도파로 등이 있다. 특히 buried channel 도파로는 도파로 폭과 두께를 거의 같은 크기로 구현함으로써 편광에 따른 특성 변화를 줄일 수 있어 반도체 광 증폭기 등에 많이 사용되고 있다<sup>[2]</sup>. 그리고 ridge 도파로 구조를 사용한 소자는 다른 구조의 도파로 소자에 비해 제작이 용이하고 vertical 방향과 lateral 방향으로의 굴절율 분포를 쉽게 조절할 수 있으며 능동 소자와 수동 소자와의 집적이 용이하기 때문에 널리 사용되고 있다<sup>[3]</sup>.

Angular spectrum 방법을 사용하여 2차원 도파로 소자의 단면 반사율을 구하기 위해서는 vertical 방향의 필드 분포뿐만 아니라 lateral 방향의 필드 분포의 analytic한 표현식이 필요하며 이러한 필드 분포의 정확도는 반사율 값에 큰 영향을 미친다. Buus 등은 유효굴절율 방법을 사용하여 buried channel 도파로의 2차원 필드 분포에 대한 analytic 표현식을 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 반사율을 구하였다<sup>[5]</sup>. 그러나 유효굴절율 방법을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포는 lateral 방향으로 도파로 폭이 작을 때는 정확한 필드 분포와의 오차가 크게 나타남으로서 반사율 또한 큰 오차를 초래한다는 단점이 있다. 따라서 최근에 유효굴절율 방법(effective index method, EIM)과 variational method(VM)을 사용하여 buried channel 도파로 구조의 필드 분포를 구한 뒤, angular spectrum 방법을 사용하여 도파로의 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭에 따른 단면 반사율을 계산하였다<sup>[4]</sup>. 그 결과 buried channel 도파로 구조의 단면 반사율은 EIM이 잘 맞는 영역(aspect ratio가 큰 영역)에서는 두 가지 방법으로

구한 단면 반사율은 거의 일치하였으나, aspect ratio가 작을 때는 VM을 사용하여 구한 단면 반사율이 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율보다 정확함을 알 수 있었다. 이것은 VM을 사용하여 구한 2차원의 필드 분포는 buried channel 도파로의 aspect ratio에 관계없이 정확한 필드 분포와 오차가 매우 작기 때문이라 생각된다.

본 논문에서는 buried channel 도파로와 ridge 도파로 구조의 단면 반사율을 VM<sup>[7]</sup>과 EIM을 사용하여 2차원의 필드 분포를 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 구하였고 여러 개의 도파로 두께에 대하여 도파로 폭에 따른 두 도파로의 단면 반사율 변화를 비교 검토하였다. EIM이 잘 적용되는 영역에서는 두 가지 방법을 사용하여 구한 반사율의 차이는 매우 작았으나 그 이외의 영역에서는 두 가지 방법으로 구한 반사율의 차이가 큼을 알 수 있었다. 또한 VM을 사용하여 구한 단면 반사율이 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율보다 정확함을 알 수 있었다. 일정한 도파로 두께에 대하여 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량은 buried channel 도파로 경우는 매우 크게 나타났으나, ridge 도파로 경우는 buried channel 도파로의 변화량에 비해 매우 작게 나타났다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 angular spectrum 방법을 사용하여 2차원 도파로 구조의 단면 반사율을 계산하는 방법에 대하여 설명하였다. 3장에서는 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 도파로 두께와 도파로 폭에 따른 단면 반사율을 비교 검토하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 단면 반사율 수식

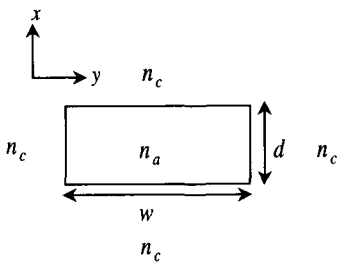
그림 1은 해석에 사용된 buried channel 도파로 구조와 ridge 도파로 구조의 단면도이며, 그림 2는 입사면과 입사파의 진행 방향을 나타내는 그림이다. 그림 1(a)에서  $w$ 는 도파로 폭,  $d$ 는 도파로 두께,  $n_a$ 는 도파로층의 굴절율, 그리고  $n_c$ 는 클래딩층의 굴절율을 나타낸다. 그림 1(b)에서  $w$ 는 ridge 폭,  $d$ 는 도파로 두께,  $t$ 는 클래딩층의 두께,  $h$ 는 ridge 두께,  $n_a$ 는 도파로층의 굴절율,  $n_c$ 는 클래딩층의 굴절율, 그리고  $n_s$ 는 기판층의 굴절율을 나타낸다. 그림 2에서 음영진 면은 입사면을 나타내고,  $\hat{v}_i$ 는 입사면상에서 입사파의 진행방향을 나타내는 단위벡터이며,  $\phi$ 는 입사각도이고,  $\phi$ 는 입사파

의 진행 방향이 x 방향과 이루는 각도이며,  $\theta$ 는 입사파의 진행 방향이 y 방향과 이루는 각도를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 도파로는 x 방향뿐만 아니라 y 방향으로도 일정한 폭  $w$ 를 가지고 있기 때문에 레이저 다이오드내 필드의 진행방향은 그림 2와 같이 x 방향뿐만 아니라 y 방향으로도 일정한 각도를 가지고 진행하게 된다. 따라서 이러한 2차원 도파로 구조의 단면 반사율은 입사면에  $\phi$ 의 각도로 입사하는 진행파의 polarization 벡터를 입사면에 수직인 성분과 입사면에 수평인 성분으로 분리한 다음 각각에 대하여 Fresnel 반사율 식을 적용하여 구할 수 있고 그 수식은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

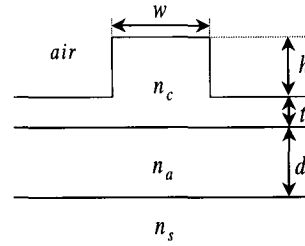
$$R = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(s, t) r(s, t) F^*(s, t) ds dt \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(s, t) F^*(s, t) ds dt \right|^2}$$

$$r(s, t) = \left( \frac{\tan^2 \phi}{\tan^2 \phi + \tan^2 \theta} \cos^2 \theta \right) r_{\perp}(\phi) + \left( \cos^2 \phi - \frac{\tan^2 \phi}{\tan^2 \phi + \tan^2 \theta} \cos^2 \theta \right) r_{\parallel}(\phi)$$

여기서  $F(s, t)$ 는 EIM이나 VM을 사용하여 구한 2차원 필드 분포에 대한 푸리에 변환으로 주어지는 angular spectrum이고  $r(s, t)$ 는 2차원 도파로 구조에서의 반사계수이며  $s = k_0 n_{eff} \sin \phi$ 이고  $t = k_0 n_{eff} \sin \theta$ 이며,  $n_{eff}$ 는 레이저 다이오드를 에너지 관점에서 본 유효굴절율<sup>[8]</sup>이다. 그리고  $r_{\perp}(\phi)$ 와  $r_{\parallel}(\phi)$ 은 입사면에 대하여 수직인 성분과 수평인 성분에 대한 Fresnel 반사 계수이다. VM을 사용하여 2차원 필드 분포를 구하는 수식은 참고문헌 [4,7]을 참고하였다.



(a)



(b)

그림 1. 해석에 사용된 (a) buried channel 도파로와 (b) ridge 도파로의 단면도

Fig. 1. Cross sections of (a) buried channel waveguides and (b) ridge waveguides used in the analysis.

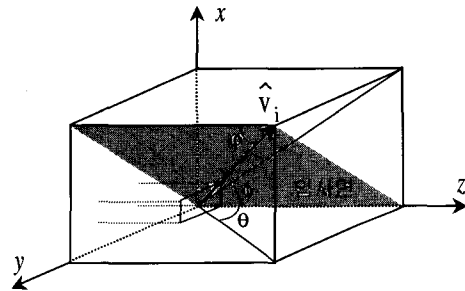


그림 2. 입사면과 입사파의 진행 방향 및 각도의 정의를 나타내는 그림

Fig. 2. Definition of angles and propagation direction of incident plane wave and incident plane.

### III. 계산 결과 및 검토

그림 3, 4와 5는 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭  $w$ 를  $0.4 \mu\text{m}$ 에서  $4 \mu\text{m}$ 까지 변화시키면서 구한 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 단면 반사율이다. 계산에 사용되는 파라메타 값은 파장이  $1.55 \mu\text{m}$ 이고,  $n_a = 3.54$ ,  $n_c = 3.21$ 이고 ridge 도파로의 경우 추가로 필요한 파라메타 값은  $n_s = 3.21$ ,  $t = 0.1 \mu\text{m}$ 이고  $h = 0.2 \mu\text{m}$ 이다.

그림 3은 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭에 따른 두 도파로의 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 단면 반사율이다. 그림 3에서도 알 수 있듯이 도파로 폭이 증가할수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 buried

channel 도파로와 ridge 도파로의 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 단면 반사율은 그에 대응되는 slab 도파로의 단면 반사율 값으로 접근하였다. Buried channel 도파로의 경우, 도파로 폭이 증가할수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율은 클래딩의 굴절율이  $n_c$ , 코어의 굴절율이  $n_a$ 이고 두께가  $d$ 인 3층 slab 도파로의 반사율로 접근하였다. Buried channel 도파로의 도파로 폭  $w$ 가  $4 \mu\text{m}$ 일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 반사율은 그에 대응되는 3층 slab 도파로의 반사율과 각각 2.6 %와 2.5 %의 차이를 보였고, quasi-TM 모드의 반사율은 각각 0.02 %와 1.0 %의 매우 작은 차이를 보였다.

Ridge 도파로의 경우, ridge 폭(도파로 폭)  $w$ 가 증가할수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율은 ridge 부분의  $\text{air-n}_c(h+t)-n_a(d)-n_s$ 인 4층 slab 도파로의 반사율로 접근하였다. Ridge 도파로의 도파로 폭  $w$ 가  $4 \mu\text{m}$ 일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 반사율은 4층 slab 도파로의 반사율과 각각 1.9 %와 1.5 %의 차이를 보였고, quasi-TM 모드의 반사율은 각각 0.7 %와 0.06 %의 매우 작은 차이를 보였다. 즉 EIM이 잘 적용되는 영역(도파로 폭이 도파로 두께에 비해 큰 영역)에서는 VM과 EIM을 사용하여 구한 반사율은 모두 그에 대응되는 4층 slab 도파로의 단면 반사율로 접근함을 알 수 있었다.

표 1은 도파로 폭  $w$ 가  $4 \mu\text{m}$ 이고 도파로 두께  $d$ 가 각각  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 단면 반사율과 그에 대응되는 slab 도파로의 단면 반사율과의 차이를 나타냈다. 표 1에서 알 수 있듯이 도파로 폭이  $4 \mu\text{m}$ 일 때, 두 도파로의 단면 반사율은 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드 모두 그에 대응되는 slab 도파로의 단면 반사율과 매우 작은 차이를 나타냈다. 표 1의 경우는 EIM이 잘 적용되는 영역이므로 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율이 VM을 사용하여 구한 단면 반사율과 거의 일치하였고 또한 그에 대응되는 slab 도파로의 단면 반사율과 매우 작은 차이를 보이며 접근함을 알 수 있었다.

도파로 폭  $w$ 가 작아짐에 따라 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 단면 반사율의 변화는 매우 다른 경향을 나타냈다. 그림 3, 4와 5에서 도파로 폭에 따른 buried channel 도파로의 단면 반사율 변화는 매우 크게 나타났으나 ridge 도파로의 ridge 폭(도파로 폭)에

따른 단면 반사율 변화는 매우 작게 나타났다. 도파로 폭이 작아질수록 VM을 사용하여 구한 buried channel 도파로의 단면 반사율은 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율 0.275로 접근하였고, ridge 도파로의 단면 반사율은 ridge 바깥부분의  $\text{air-n}_c(t)-n_a(d)-n_s$ 인 4층 slab 도파로의 단면 반사율로 접근하였다.

Buried channel 도파로의 경우, 도파로 폭이 작아질수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드 단면 반사율은 그림 3, 4와 5 모두 그에 대응되는 3층 slab 도파로의 단면 반사율로부터 감소하였다. 그 이유는 도파로 폭이 작아질수록  $y$  방향으로 나타나는 TM 모드의 효과가 커지기 때문이라 생각된다. 도파로 폭  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 에서 도파로 두께  $d$ 가 각각  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때, VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 반사율은 거의 일치하였다. 또한 VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 반사율은 도파로 폭이 감소함에 따라 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율( $\rightarrow 0.275$ )과 0.8 %의 차이를 보이며 접근하였다. 그러나 EIM을 사용하여 구한 반사율은 그림 3의 경우 도파로 폭이  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 0.311로 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율 0.275와 13.2 %의 차이가 나타났다. 그림 4와 5의 경우도 표 2에서 알 수 있듯이 VM을 사용하여 구한 단면 반사율은 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율 0.275와 차이가 작았으나 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율은 좀더 큰 차이를 보였다.

Quasi-TM 모드의 경우, 도파로 폭이 작아질수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 buried channel 도파로의 단면 반사율은 그림 3, 4와 5 모두 도파로 폭이  $0.8 \mu\text{m}$ 까지는 그에 대응되는 3층 slab 도파로의 단면 반사율로부터 약간 증가하였으나  $0.4 \mu\text{m}$ 까지는 다시 감소하여 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율( $\rightarrow 0.275$ )로 접근하였다. 이것은 도파로 폭이 어느 정도 작아질 때까지는 정규화된 도파로 유효 두께가 작아져  $y$  방향으로 나타나는 TE 모드의 효과가 커지다가 도파로 폭이 더욱더 작아지게 되면 정규화된 도파로 유효 두께가 급속도로 커져 필드 분포의 구속이 작아져  $y$  방향으로 나타나는 TE 모드의 효과가 사라지게 되기 때문이라 생각된다<sup>[9]</sup>.

Ridge 도파로의 경우, ridge 폭(도파로 폭)이 작아질수록 VM으로 구한 quasi-TE 모드 반사율은 그림 1(b)에서 ridge 바깥 부분의  $\text{air-n}_c(t)-n_a(d)-n_s$ 인 4층

slab 도파로의 반사율로 접근하였다. 그러나 EIM으로 구한 quasi-TE 모드의 반사율은 약간의 오차를 보였다. 도파로 폭  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때, 그림 3의 경우 VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 반사율 값은 0.366으로 그에 대응되는 4층 slab 도파로의 반사율 값과 0.9 %의 매우 작은 차이를 보였으나, EIM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 반사율 값은 0.360으로 2.6 %의 차이를 나타냈다. 그림 4와 5의 경우도 표 2에서 알 수 있듯이 VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 반사율은 4층 slab 도파로의 반사율 값과 매우 작은 차이를 보였으나 EIM으로 구한 반사율은 좀더 큰 차이를 보였다.

Quasi-TM 모드의 경우, ridge 폭 (도파로 폭)  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 ridge 도파로의 단면 반사율은 ridge 바깥 부분의  $\text{air-n}_c(t)\text{-n}_a(d)\text{-n}_s$ 인 4층 slab 도파로의 반사율과 약간의 차이를 보였다. 도파로 폭  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때, 그림 3의 경우 VM을 사용하여 구한 quasi-TM 모드의 반사율 값은 0.237로 4층 slab 도파로의 반사율 값과 7.7 %의 차이를 보였고 EIM을 사용하여 구한 quasi-TM 모드의 반사율 값은 0.215로 16.4 %의 차이를 나타냈다. 그러나 표 2에서도 알 수 있듯이 도파로 두께가 커질수록 VM과 EIM을 사용하여 구한 quasi-TM 모드의 단면 반사율과 ridge 바깥 부분의 4층 slab 도파로의 단면 반사율과의 차이는 점점 줄어들었다.

표 2는 도파로 폭  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 이고 도파로 두께  $d$ 가 각각  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때, VM과 EIM을 사용하여 구한 buried channel 도파로의 단면 반사율과 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율 0.275와의 차이와, ridge 도파로의 단면 반사율과 ridge 바깥 부분의  $\text{air-n}_c(t)\text{-n}_a(d)\text{-n}_s$ 인 4층 slab 도파로의 단면 반사율의 차이를 나타냈다. 표 2에서도 알 수 있듯이 VM을 사용하여 구한 두 도파로의 단면 반사율이 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율보다 좀더 정확함을 알 수 있다. 또한 도파로 두께가 커질수록 (EIM이 잘 적용되는 영역) EIM을 사용하여 구한 반사율과 VM을 사용하여 구한 반사율의 차이가 작아짐을 볼 수 있었다.

표 1과 2, 그림 3, 4와 5에서 알 수 있듯이 도파로 폭  $w$ 와 두께  $d$ 가 커질수록 EIM으로 구한 단면 반사율과 VM으로 구한 단면 반사율과의 차이는 작아짐을 볼 수 있었다. 이것은 도파로 폭과 두께가 커질수록 정규화된 주파수가 증가하여 EIM으로 구한 필드 분포의 정확성이 향상되기 때문이라 생각된다<sup>[10,11]</sup>. 즉 EIM이 잘

적용되는 영역에서는 두 가지 방법으로 구한 반사율의 차이는 무시할 정도로 매우 작았다. 그러나 도파로 폭과 두께가 감소할수록 EIM으로 구한 반사율은 VM으로 구한 반사율과 차이가 매우 크게 나타났다. 이것은 EIM을 사용하여 구한 두 도파로의 2차원의 필드 분포는 정확한 필드 분포와 오차가 크게 나타나기 때문이다. 그러나 VM을 사용하여 구한 단면 반사율은 buried channel 도파로의 경우 클래딩만으로 구성된 물질과 공기사이의 반사율 0.275로, ridge 도파로의 경우 ridge 바깥 부분의  $\text{air-n}_c(t)\text{-n}_a(d)\text{-n}_s$ 인 4층 slab 도파로의 반사율로 접근하였고 이를 통하여 VM을 사용하여 구한 단면 반사율이 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율보다 정확함을 알 수 있었다.

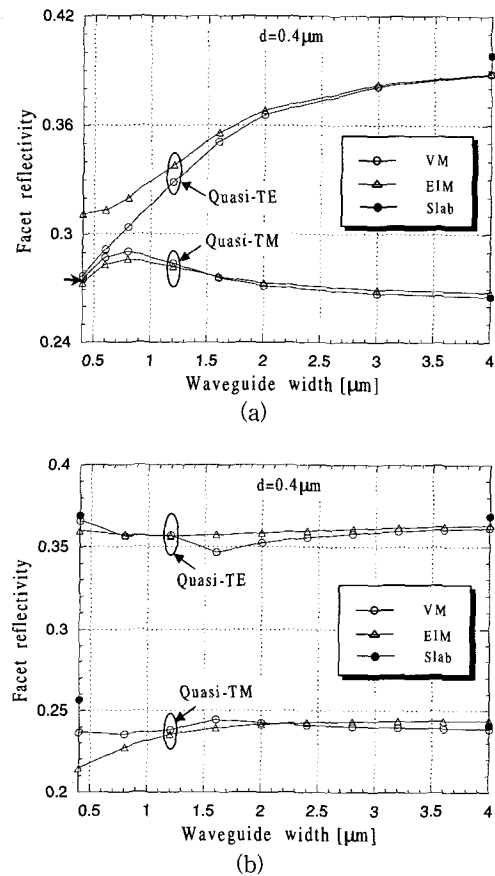
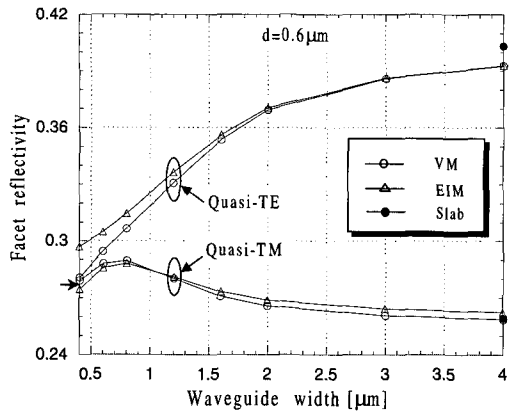
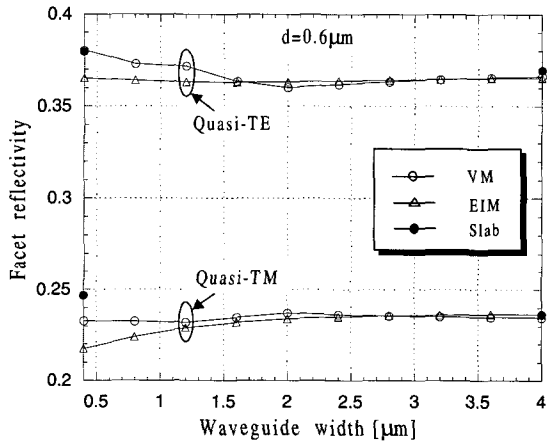


그림 3. 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 (a) buried channel 도파로와 (b) ridge 도파로의 도파로 폭  $w$ 에 따른 단면 반사율

Fig. 3. Facet reflectivity of (a) buried channel waveguides and (b) ridge waveguides as a function of waveguide width when waveguide thickness is  $0.4 \mu\text{m}$ .



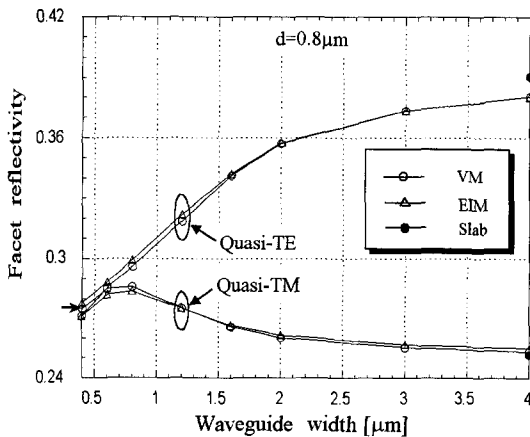
(a)



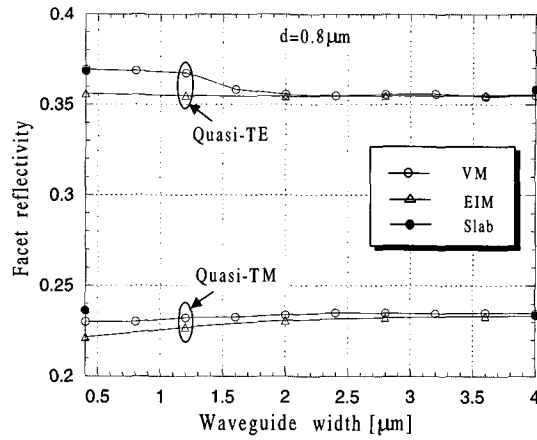
(b)

그림 4. 도파로 두께  $d$ 가  $0.6 \mu\text{m}$ 일 때 (a) buried channel 도파로와 (b) ridge 도파로의 도파로 폭  $w$ 에 따른 단면 반사율.

Fig. 4. Facet reflectivity of (a) buried channel waveguides and (b) ridge waveguides as a function of waveguide width when waveguide thickness is  $0.6 \mu\text{m}$ .



(a)



(b)

그림 5. 도파로 두께  $d$ 가  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때 (a) buried channel 도파로와 (b) ridge 도파로의 도파로 폭  $w$ 에 따른 단면 반사율.

Fig. 5. Facet reflectivity of (a) buried channel waveguides and (b) ridge waveguides as a function of waveguide width when waveguide thickness is  $0.8 \mu\text{m}$ .

표 1. 도파로 폭  $w$ 가  $4 \mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율과 그에 대응되는 slab 도파로의 반사율과의 차이. 단위 [%]

Table 1. Difference between the reflectivities using VM and EIM when waveguide width  $w$  is  $4 \mu\text{m}$  and those of the corresponding slab waveguides. Unit [%]

		Buried channel 도파로		Ridge 도파로	
		도파로 폭이 $4 \mu\text{m}$ 에서 VM과 EIM으로 구한 반사율과 $n_c - n_b(d) - n_c$ 인 3층 slab 도파로의 반사율과의 차이		도파로 폭이 $4 \mu\text{m}$ 에서 VM과 EIM으로 구한 반사율과 $\text{air} - n_c(h+d) - n_b(d) - n_c$ 인 4층 slab 도파로의 반사율과의 차이	
		VM	EIM	VM	EIM
Figure 3 ( $d=0.4 \mu\text{m}$ )	Quasi-TE	2.6	2.5	1.9	1.5
	Quasi-TM	0.02	1.0	0.7	0.06
Figure 4 ( $d=0.6 \mu\text{m}$ )	Quasi-TE	2.6	2.5	0.9	1.1
	Quasi-TM	0.3	1.6	0.7	0.06
Figure 5 ( $d=0.8 \mu\text{m}$ )	Quasi-TE	2.6	2.6	0.9	0.7
	Quasi-TM	0.5	1.1	0.4	0.03

표 2. 도파로 폭  $w$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 VM과 EIM을 사용하여 구한 단면 반사율과 그에 대응되는 slab 도파로의 반사율과의 차이. 단위 [%]

Table 2. Difference between the reflectivities using VM and EIM when waveguide width  $w$  is  $0.4 \mu\text{m}$  and those of the corresponding slab waveguides. Unit [%]

		Buried channel 도파로		Ridge 도파로	
		VM	EIM	VM	EIM
		도파로 폭이 $0.4 \mu\text{m}$ 에서 VM과 EIM으로 구한 반사율과 클래딩으로만 구성된 물질과 공기사이의 반사율과의 차이			
		도파로 폭이 $0.4 \mu\text{m}$ 에서 VM과 EIM으로 구한 반사율과 ridge 바깥 부분 $\text{air-n}_c(t)-n_b(d)-n_s$ 인 4층 slab 도파로의 반사율과의 차이			
Figure 3 ( $d=0.4\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	0.8	13.2	0.9	2.6
	Quasi-TM	0.2	0.5	7.7	16.4
Figure 4 ( $d=0.6\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	2.1	8.0	0.2	3.8
	Quasi-TM	1.5	0.2	5.6	11.8
Figure 5 ( $d=0.8\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	1.3	1.0	0.3	3.3
	Quasi-TM	0.1	1.5	2.7	6.3

표 3은 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때, 도파로 폭  $w$ 를  $0.4 \mu\text{m}$ 에서  $4 \mu\text{m}$ 까지 변화시켰을 때 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 VM을 사용하여 구한 단면 반사율의 최대 변화량이다. Ridge 도파로의 경우 VM을 사용하여 구한 ridge 폭(도파로 폭)에 따른 단면 반사율의 변화량은 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드 모두 buried channel 도파로의 변화량에 비해 매우 작았다. 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때, quasi-TE 모드의 경우 VM을 사용하여 구한 ridge 도파로의 단면 반사율의 변화량은  $2.9\%$ 이었고 quasi-TM 모드의 경우 단면 반사율의 변화량은  $3.6\%$ 이었다. 그러나 buried channel 도파로의 경우 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때, VM을 사용하여 구한 quasi-TE 모드의 단면 반사율의 변화량은  $32.4\%$ 이었고 quasi-TM 모드의 경우는  $7.6\%$ 이었다. 도파로 두께  $d$ 가  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 경우도 표 3에서 알 수 있듯이 ridge 도파로의 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량이 buried channel 도파로

의 단면 반사율 변화량보다 매우 작음을 알 수 있다.

VM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 buried channel 도파로의 단면 반사율의 변화는 quasi-TE 모드가 quasi-TM 모드에 비해 변화량이 컸다. Quasi-TE 모드의 경우 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 도파로 폭에 따른 단면 반사율의 변화는  $32.4\%$ 이었다. 그러나 quasi-TM 모드의 경우 도파로 폭에 따른 단면 반사율의 변화는  $7.6\%$ 로 quasi-TE 모드에 비해 변화량이 매우 작았다. 표 3에서 알 수 있듯이 도파로 두께  $d$ 가  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때도 VM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 buried channel 도파로의 단면 반사율의 변화는 quasi-TE 모드가 quasi-TM 모드에 비해 변화량이 컸다.

표 3. VM을 사용하여 구한 buried channel 도파로와 ridge 도파로의 도파로 폭에 따른 반사율의 최대 변화량 ( $0.4 \mu\text{m} \leq$  도파로 폭  $\leq 4 \mu\text{m}$ ). 단위[%]

Table 3. Maximum variation of reflectivities of buried channel waveguides and ridge waveguides as a function of waveguide width using VM ( $0.4 \mu\text{m} \leq$  waveguide width  $\leq 4 \mu\text{m}$ ). Unit[%]

		Buried channel 도파로	Ridge 도파로
		VM으로 구한 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량	VM으로 구한 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량
Figure 3 ( $d=0.4\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	32.4	2.9
	Quasi-TM	7.6	3.6
Figure 4 ( $d=0.6\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	28.5	5.3
	Quasi-TM	10.7	2.1
Figure 5 ( $d=0.8\mu\text{m}$ )	Quasi-TE	28.7	4.0
	Quasi-TM	11.4	2.2

VM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 ridge 도파로의 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드에 대한 단면 반사율의 변화량의 차이는 매우 작았다. 도파로 두께  $d$ 가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때, quasi-TE 모드의 경우 도파로 폭에 따

른 단면 반사율의 변화는 2.9 %이었고, quasi-TM 모드의 경우는 3.6 %로 변화량의 차이가 quasi-TE 모드와 비슷하였다. 표 3에서 알 수 있듯이 도파로 두께  $d$ 가  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때도 VM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 ridge 도파로의 단면 반사율의 변화는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드가 비슷하였다.

#### IV. 결 론

광통신용 소자에 널리 사용되는 구조인 buried channel 도파로와 ridge 도파로에 대하여 VM과 EIM을 사용하여 각각 2차원의 필드 분포를 구한 뒤 angular spectrum 방법을 적용하여 여러 개의 도파로 두께에 대하여 도파로 폭에 따른 단면 반사율을 계산하였다. Angular spectrum 방법을 사용하여 채널 도파로 소자의 단면 반사율을 계산할 때 사용되는 2차원의 필드 분포의 정확성은 반사율 값에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

도파로 폭과 두께가 커질수록 EIM으로 구한 단면 반사율은 VM으로 구한 단면 반사율과 매우 작은 차이를 나타냈다. 이것은 도파로 폭과 두께가 커질수록 정규화된 주파수가 증가하여 EIM으로 구한 필드 분포의 정확성이 향상되기 때문이라 생각된다. 즉 EIM이 잘 적용되는 영역에서는 두 가지 방법으로 구한 반사율의 차이는 무시할 정도로 매우 작았다. 그러나 도파로 폭과 두께가 감소할수록(EIM이 잘 적용되지 않는 영역으로 갈수록) EIM으로 구한 반사율과 VM으로 구한 반사율과의 차이가 커졌다. EIM의 경우 도파로 폭과 도파로 두께가 감소할수록 필드 분포의 부정확성으로 인해 정확한 반사율 값과의 오차가 크게 나타났으나 VM을 사용하여 구한 필드 분포는 도파로 폭과 두께에 관계없이 정확한 필드 분포와 오차가 적어 EIM보다 정확한 반사율 값을 구할 수 있었다.

Buried channel 도파로의 경우, VM을 사용하여 구한 단면 반사율은 도파로 폭이 증가할수록 그에 대응되는 3층 slab 도파로의 단면 반사율로 접근하였고, 도파로 폭이 감소할수록 클래딩으로만 구성된 물질과 공기사이의 반사율로 접근하였다. Ridge 도파로의 경우, VM을 사용하여 구한 단면 반사율은 ridge 폭이 증가할수록 ridge 부분의 4층 slab 도파로의 단면 반사율로 접근하였고, ridge 폭이 감소할수록 ridge 바깥 부분의 4층 slab 도파로의 단면 반사율로 접근하였다.

도파로 폭에 따른 VM을 사용하여 구한 단면 반사율의 변화량은 buried channel 도파로의 경우는 매우 크게 나타났으나 ridge 도파로의 경우는 buried channel 도파로의 변화량에 비해 매우 작았다. 도파로 두께가  $0.4 \mu\text{m}$ 일 때 VM을 사용하여 구한 buried channel 도파로의 도파로 폭에 따른 quasi-TE 모드의 단면 반사율의 변화량은 32.4 %이었고 quasi-TM 모드의 경우는 7.6 %이었다. 반면에 ridge 도파로의 도파로 폭에 따른 quasi-TE 모드의 단면 반사율의 변화량은 2.9 %이었고 quasi-TM 모드의 경우는 3.6 %로 buried channel 도파로의 도파로 폭에 따른 단면 반사율의 변화량에 비해 매우 작았다. 도파로 두께  $d$ 가  $0.6 \mu\text{m}$ 와  $0.8 \mu\text{m}$ 일 때도 ridge 도파로의 도파로 폭에 따른 단면 반사율 변화량이 buried channel 도파로의 단면 반사율 변화량보다 매우 작음을 알 수 있었다. Buried channel 도파로의 경우, VM을 사용하여 구한 도파로 폭에 따른 단면 반사율의 변화는 quasi-TE 모드가 quasi-TM 모드에 비해 변화량이 매우 컸다. 반면에 ridge 도파로의 경우, 도파로 폭에 따른 단면 반사율의 변화는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드가 비슷하였다.

따라서 도파로 폭과 두께에 관계없이 EIM보다 정확한 VM을 사용하여 구한 필드 분포의 analytic 표현식에 angular spectrum 방법을 사용하면 채널 도파로의 단면 반사율을 보다 정확하게 구할 수 있고, 무반사 코팅층과 같은 코팅층의 코팅 파라미터를 신속하면서도 정확하게 계산하여 무반사 코팅층 설계에 사용할 수 있다고 생각된다.

본 연구는 2001년도 두뇌한국21사업, 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원과 중점국가 연구개발사업 차세대포토닉스 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김용곤, 김부근, 주홍로, "다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 설계," 한국 통신학회 논문지, 제 21권, 제 7호, pp. 1850~1860, 1996
- [2] 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.



- [3] H. Bissessor, C. Graver, O. Le Gouezigou, G. Michaud, and F. Gaborit, "Ridge Laser with Spot-Size Converter in a Single Epitaxial Step for High Coupling Efficiency to Single-Mode Fibers," *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, vol. 10 no. 9, pp. 1235~1237, 1998.
- [4] 김상택, 김동후, 김부근, "Variational 방법으로 구한 필드 분포를 이용한 도파로 폭에 따른 Buried Channel Waveguides의 단면 반사율," *전자공학 회논문지, SD편, 제 37권, 제 11호, 36~42, 2000*
- [5] Jens Buus, Mark C. Farries, and David J. Robbins, "Reflectivity of Coated and Tilted Semiconductor Facets," *IEEE. J. Quantum Electron.*, vol. 27, NO. 6, pp. 1837~1842, 1991.
- [6] Kenji Kawano, Tsutou Kitoh, Masaki Kohtoku, Tatsuya Takeshita, and Yuji 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, 1998.
- [7] 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.
- [8] 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, November 1988.
- [9] H. Kogelink and V. Ramaswamy, "Scaling Rules for Thin-Film Optical Waveguides," *Appl. Opt.*, Vol. 13, No. 8, pp. 1857~1862, August, 1974.
- [10] K. S. Chiang, "Dual effective-index method for the analysis of rectangular dielectric waveguides," *Appl. Opt.*, Vol. 25, No. 13, pp. 2169~2174, July, 1988.
- [11] A. Kumar, D. F. Clark, and B. Culshaw, "Explanation of errors inherent in the effective-index method for analyzing rectangular-core waveguides," *Opt. Lett.*, Vol. 13, No. 12, pp. 1129~1131, December, 1988.

저 자 소 개

金 相 澤(正會員)

1998년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학사. 2000년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 3월~현재 : 숭실대학교 전자공학과 박사과정. <주관심분야> 광통신 및 광네트워크용 소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

金 東 厚(正會員)

1998년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학사. 2000년 8월 : 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 8월~현재 : 이스텔시스템. <주관심분야> 광통신 및 광네트워크용 소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

俞 明 植(正會員)

1989년 2월 : 고려대학교 전자전산공학과 공학사. 1991년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 : Dept. of Electrical Engineering, SUNY at Buffalo 공학박사. 2000년 1월~2000년 8월 : Senior Research Engineer, Nokia Research Center, Boston, MA, USA 2000년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

金 富 均(正會員)

2000년 6월 : 전자공학회지 제 27권 제 6호 저자소개 참조