

# 다층 구조 도파관 소자 단면에서의 무반사 코팅 설계

正會員 김 용 곤\*, 김 부 균\*, 주 흥 로\*\*

## Design of Antireflection Coatings on the Facets of a Multilayered Structure Waveguide Device

Yong-Kon Kim\*, Boo-Gyoun Kim\*, Heung-Ro Choo\*\* *Regular Members*

### 요 약

다층 구조 도파관 소자 단면에서의 무반사 코팅 설계에 대한 결과들을 제시한다. 다층 구조 도파관 소자 단면에서의 무반사 코팅 설계를 위하여 그 결과가 3층 구조인 경우 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하는 무반사 코팅 설계 방법을 확장하여 사용하였다. 확장된 설계 방법을 사용하기 위하여 필요한 다층 구조내의 필드 분포는 전달 행렬 방법을 사용하여 구하였다. 또한 도파관 소자의 층 수가 증가할수록 무반사 코팅층 설계에 많은 시간이 소요되므로 이를 해결하기 위하여 가상의 4층 구조 방법을 제안하였다. 다층 구조 방법과 가상의 4층 구조 방법에 의한 결과와 다층 구조를 3층 구조로 가정한 경우의 결과들을 비교 검토하기 위하여 참고문헌 [9]와 [10]에 각각 나와있는 2가지의 6층 구조 도파관 소자에 대하여 최적 코팅 파라메타와 공차지도를 구하였다. 가상 4층 구조 방법에 의한 결과는 3층 구조로 가정한 세가지 다른 경우의 결과에 비하여 다층 구조 방법의 결과에 근접함을 알 수 있었다. 이러한 결과의 주된 이유는 가상 4층 구조 방법에 의한 도파관내 필드 분포가 3층 구조로 가정한 경우에 비하여 다층 구조 소자의 필드 분포에 유사하기 때문이다. 특히 반도체 광증폭기 등과 같은 소자를 제작하기 위하여 필요한  $10^{-3}$  이하의 단면 반사율을 목표로 하는 무반사 코팅 설계시에는 다층 구조 방법이나 가상 4층 구조 방법을 사용하여야 됨을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

We present the results for the design of antireflection (AR) coatings on facets of a multilayered structure waveguide device. The method, whose results agree very well with the results of the rigorous method in the case of a symmetric three layer structure device, is extended for the design of AR coatings on the facets of a multilayered structure waveguide device. The field profile in a multilayered structure waveguide necessary for the use of the ex-

\* 숭실 대학교 전자 공학과

\*\* 한국 전자 통신 연구소(ETRI)

論文番號: 96067-0221

接受日字: 1996年 2月 21日

tended method is obtained from the transfer matrix method. The virtual four layered structure method (VFLM) is proposed to reduce the time for the design of AR coatings because the time for the design of AR coatings using the extended method increases as the number of layers increases. The optimum coating parameters and tolerance maps for two different six layered waveguide devices in Ref. [9] and [10] are obtained using the extended method and the VFLM, and for the three different cases approximated as three layered waveguide devices to compare the results of each case. The results of the VFLM are similar to those of the extended method compared to those of the three layered structure waveguide. The main reason for the above results is that the field profile in the device calculated using the VFLM is similar to that calculated using the extended method compared to that for three layered structure waveguide. We conclude that the extended method or VFLM should be used for the design of AR coatings on facets of a device required for the facet reflectivity less than  $10^{-3}$  such as a semiconductor optical amplifier.

## I. 서 론

도파관 구조를 가지는 광소자 단면의 무반사 코팅은 광소자들의 특성을 향상시킬 뿐만 아니라 광소자들간의 광집속 효율을 높일 수 있기 때문에 많은 연구가 행하여졌다[1-6]. 그러나 이러한 무반사 코팅에 필요한 최적 코팅 파라메타들을 엄밀한 방법을 사용하여 구하는 데에는 매우 많은 시간이 요구되어진다[2]. 따라서 이러한 엄밀한 방법의 결과와 제작 관점에서 보았을 때 큰 오차가 없고 시간이 적게 걸리는 근사방법을 찾는데 많은 연구가 행하여졌다[3-7]. 그러나 지금까지의 무반사 코팅 설계 기법에 관한 연구 및 그 결과는 가장 간단한 도파관 구조인 대칭 구조를 가지는 3층 구조 도파관 구조를 가지는 소자에 대하여 집중적으로 연구가 행하여졌다[2-7].

실제로 사용되어지고 있는 도파관 구조 소자는 3층 구조를 가지는 소자가 아니라 다층 구조를 가지는 도파관 소자이다. 본 논문에서는 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 층을 설계하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 3층 구조를 가지는 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계시 그 결과가 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하는 근사방법[7]을 확장하여 사용하였다. 확장된 근사방법을 사용하기 위해서는 다층 구조 도파관 소자 내의 횡축 방향으로의 필드 분포를 알아야 한다. 이러한 필드 분포는 Ramadas 등이 제안한 전달 행렬 방법[8]을 사용하여 구하였다.

확장된 근사방법을 참고문헌 [9]와 [10]에 나오는 다층 구조 도파관 소자에 각각 적용하여 최적 코팅 파

라메타들과 무반사 코팅층 제작시 유용하게 사용되어지는 공차지도를 작성하였다. 또한 다층 구조 도파관 소자를 3층 구조 도파관 소자로 가정하고 동일한 근사방법을 사용하여 계산한 무반사 코팅 층의 최적 코팅 파라메타들과 공차지도를 작성하였다. 그 결과 3층 구조로 가정한 경우의 최적 코팅 파라메타와 공차지도는 다층 구조인 경우의 결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 주된 이유는 다층 구조 도파관 소자 내 필드 분포와 다층 구조 도파관을 3층 구조로 가정한 경우의 필드 분포가 크게 다르기 때문이다. 따라서 실제 사용되어지는 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계에는 3층 구조가 아니라 다층 구조를 고려한 설계 방법을 적용해야 한다고 본다.

본 논문에서 사용한 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계 방법은 필드 분포를 계산하기 위하여 전달 행렬 방법을 사용하였기 때문에 임의의 층 수를 가지는 도파관 소자에 적용 가능한 방법이다. 그러나, 도파관 소자의 층 수가 증가할수록 무반사 코팅층 설계에 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 논문에서는 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계 방법의 결과와 비교적 작은 오차가 발생하면서 빠른 계산 속도를 가지는 가상의 4층 구조 방법을 제안한다.

가상의 4층 구조 방법의 기본 개념은 cover와 substrate 및 그 사이의 2개의 층으로 구성된 4층 구조 도파관의 필드 분포를 다층 구조 도파관 소자 내의 필드 분포와 비슷하도록 2개의 층의 굴절률과 두께를 설정하는 방법이다. 가상의 4층 구조 방법을 사용하여 계산한 최적 코팅 파라메타와 공차지도는 3층 구

조로 가정한 경우의 결과와 비교하여 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계 결과와 매우 근접된 결과를 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 설계 방법에 관하여 기술한다. 다층 구조 도파관 소자내 필드 분포를 체계적으로 계산하는 전달 행렬 방법[8]을 간략히 기술한다. 계산된 필드 분포로부터 얻어지는 무반사 코팅층 설계에 사용되어지는 Angular spectrum에 관한 식을 기술한다. 또한 무반사 코팅층 설계에 필요한 다층 구조 도파관 소자의 에너지 관점에서 분유효 굴절율에 관한 식을 기술한다. III 장에서는 가상의 4층 구조 방법을 적용하기 위하여 필요한 cover와 substrate 사이의 2개의 층의 굴절율과 두께를 설정하는 방법에 대하여 기술한다. IV 장에서는 참고문헌 [9]와 [10]에 나오는 각각의 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅층 설계에 다층 구조를 고려하여 계산된 최적 코팅 파라메타와 공차치도 및 3층 구조라고 가정한 경우와 가상의 4층 구조 방법을 적용하여 계산한 최적 코팅 파라메타와 공차치도의 결과들을 제시하며 비교 검토한다. V 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 설계 방법

다층 구조 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 설계를 위한 방법은 3층 구조를 가지는 도파관 소자 단면의 무반사 코팅 설계시 그 결과가 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하는 근사방법[7]을 사용하였다. 사용된 근사방법은 도파관 구조에 의하여 결정되는 도파 모드에 Angular spectrum 방법을 적용하여 서로 다른 각도를 가지고 진행하는 평면파의 합으로 나타낸 후 각각의 평면파에 Fresnel 반사율 식을 사용하여 얻은 반사파에 가중치를 곱하여 더한다. 이때 Fresnel 반사율 식을 적용하기 위하여 가정한 도파관 구조 소자의 유효 굴절율은 에너지 관점에서 분유효 굴절율로 설정하였다.

임의의 층 수를 가지는 다층 구조 도파관 내의 필드 분포를 체계적으로 구하기 위하여 Ramadas 등이 제안한 전달 행렬 방법[8]을 사용하였다.

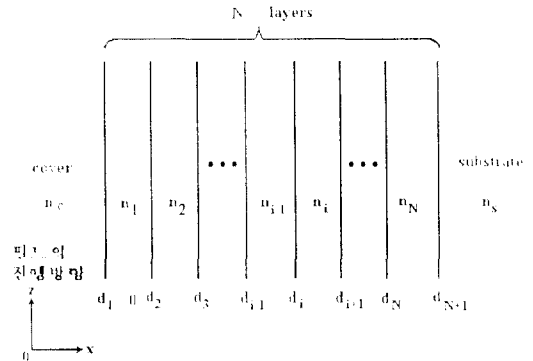


그림 1. 다층 구조 도파관의 횡수 방향의 단면도.  
Fig. 1 Transverse cross section of a multilayer structure waveguide.

그림 1과 같이 횡축 방향으로 substrate와 cover 사이에 N개의 층이 존재하는 다층 구조 도파관을 생각한다. i 번째 층의 전기장의 y 성분  $E_y$ 는 식 (1)과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$E_y(x) = A_i \cos k_i(x-d_i) + B_i \zeta_i \sin k_i(x-d_i) \quad (1)$$

여기서  $A_i$ 와  $B_i$ 는 임의의 상수이고,  $\zeta_i$ 는 TE 모드인 경우는  $1/k_i$ 이고, TM 모드인 경우는  $n_i^2/k_i$ 이다.  $k_i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$ 이며  $n_i$ 는 i 번째 층의 굴절율을 나타낸다.  $d_i$ 는 i 번째 경계의 위치를 나타내는 좌표이며  $\beta$ 는 종축방향(z 방향)으로의 진파 상수이다. TM 모드인 경우 식 (1)은 i 번째 층의 자기장의 y 성분  $H_y$ 를 나타낸다. 각 경계면에서 전기장과 자기장의 접선 성분은 연속이므로 i + 1 번째 층에서의 필드 진폭을 나타내는 상수  $A_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$ 과 i 번째 층에서의 필드 진폭을 나타내는 상수  $A_i$ ,  $B_i$ 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \end{bmatrix} = S_i \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$S_i = \begin{bmatrix} \cos \Delta_i & \zeta_i \sin \Delta_i \\ -(1/\zeta_i) \sin \Delta_i & \cos \Delta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

모서 i 번째 층의 전달 행렬을 나타내고  $\Delta_i = k_i d_i$ ,  $i =$

$d_i$ )이다.

경계 조건을 연속적으로 적용하면  $A_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$ 과 1 번째 층에서의  $A_1$ ,  $B_1$ 과의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \end{bmatrix} = S_i S_{i-1} \cdots S_2 S_1 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 1과 같은 다층 구조 도파관에서의 전파상수  $\beta$  를 구하기 위한 특성 방정식은 양쪽 최외각층인 substrate와 cover에서의 radiation 조건으로부터 구할 수 있다. 다층 구조 도파관에서 도파 모드가 존재하기 위해서는 substrate와 cover에서 필드는 지수 함수적으로 감소하여야 한다.

cover에서의 필드 형태가  $-x$  방향으로 갈수록 지수 함수적으로 감소하여야 하므로  $A_i = \gamma_c B_i$ 이어야 한다. 여기서  $\gamma_c = i\zeta_c$ 이다. 따라서 식 (4)와  $A_i = \gamma_c B_i$ 이라는 관계식을 사용하면 각 층에서의 필드의 진폭을 나타내는  $A_i$ 와  $B_i$ 는  $B_i$ 과 다층 구조 도파관의 구조 변수의 함수의 곱으로 나타내질 수 있다.

$x = d_{N+1}$ 에서의 경계 조건을 적용하면 substrate에서의 필드 진폭을 나타내는  $A_s$ ,  $B_s$ 와 N 번째 층에서의 필드의 진폭을 나타내는  $A_N$ ,  $B_N$ 과의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} = S_N \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)로부터 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} = S_N S_{N-1} \cdots S_2 S_1 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = S(\beta) \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 식 (6)으로부터 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$A_s = [\gamma_c S_{11}(\beta) + S_{12}(\beta)] B_1 \quad \text{이} \quad B_s = [\gamma_c S_{21}(\beta) + S_{22}(\beta)] B_1 \quad (7)$$

여기서  $A_i = \gamma_c B_i$ 라는 관계식을 사용하였다.

substrate에서의 필드 형태가  $+x$  방향으로 갈수록 지수 함수적으로 감소하여야 하므로  $A_s + \gamma_s B_s = 0$ 이

다. 여기서  $\gamma_s = i\zeta_s$ 이다. 따라서 이 조건을 식 (7)에 대입하면 다층 구조 도파관에서의 전파 상수를 구할 수 있는 다음과 같은 특성 방정식이 얻어진다.

$$\gamma_c S_{11}(\beta) + S_{12}(\beta) \gamma_c \gamma_s S_{21}(\beta) + \gamma_s S_{22}(\beta) = 0 \quad (8)$$

식 (8)의 특성 방정식으로부터 도파 모드의 전파 상수를 구할 수 있다. 따라서 다층 구조 도파관에서 도파 모드의 필드 분포에 관한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_i(x) = \begin{cases} A_c e^{-jk_c x} & x < d_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^N (A_i \cos k_i(x-d_i) + B_i \zeta_i \sin k_i(x-d_i)) & d_1 < \cdots < d_i < x < d_{i+1} < \cdots < d_{N+1} \\ A_s e^{jk_s(x-d_{N+1})} & x > d_{N+1} \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $E_i(x)$ 는 TE 모드인 경우 전기장의  $y$  성분을 나타내며 TM 모드인 경우 자기장의  $y$ 성분을 나타낸다. 각 층에서의 필드 진폭  $A_i$ 와  $B_i$ 는 식 (6)에 의하여  $A_1$ 과 다층 구조 도파관의 구조 변수의 함수의 곱으로 표현된다. 도파 모드의 Angular spectrum은 식 (9)의 푸리의 변환에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$F(s) = \frac{A_c e^{-jk_c d_1}}{\gamma_c - j\hat{k}s} + \frac{A_s e^{-j\hat{k}s d_{N+1}}}{\gamma_s - j\hat{k}s} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [(A_i + B_i \gamma_i) e^{-jk_i d_i} \frac{e^{j(k_i - \hat{k}s)d_{i+1}} - e^{j(k_i - \hat{k}s)d_i}}{j(k_i - \hat{k}s)} + (A_i - B_i \gamma_i) e^{jk_i d_i} \frac{e^{-j(k_i + \hat{k}s)d_{i+1}} - e^{-j(k_i + \hat{k}s)d_i}}{-j(k_i - \hat{k}s)}] \quad (10)$$

여기서  $A_c = A_1$ ,  $\hat{k} = k_0 n_j$ ,  $\gamma_i = j\zeta_i$ ,  $n_j$ 는 코팅층의 굴절율,  $s$ 는  $\sin \theta$ 로서  $\theta$ 는 도파관 구조 소자에서 코팅층으로 입사하는 각도이다.

다층 구조 도파관의 유효 굴절율은 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우 에너지 관점에서 본 유효 굴절율로 각각 식 (11-a)와 (11-b)와 같이 정의되어진다.

$$n_{eff}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} n^2(x) E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(x) dx} \quad (11-a)$$

$$n_{eff}^2 = \frac{\int_{-x}^x H_y^2(x) dx}{\int_{-x}^x \frac{H_y^2(x)}{n^2(x)} dx} \quad (11-b)$$

식 (10)과 (11)을 이용하면 반사율 식은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{\left| \int_{-x}^x r(s) F^*(s) F(s) ds \right|^2}{\left| \int_{-x}^x F^*(s) F(s) ds \right|^2} \quad (12)$$

여기서  $r(s)$ 는 도파관 구조 소자-코팅층-마감 매질로 구성되는 삼층 구조에서의 Fresnel 반사 계수이다.

### III. 가상의 4층 구조 방법

다층 구조 도파관 소자 단면의 부분사 코팅 설계 방법은 임의의 층 수를 가지는 도파관 소자에 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 도파관 소자를 구성하는 층 수가 증가할수록 부분사 코팅 설계에 많은 시간이 소요되게 된다. 다층 구조 도파관을 3층 구조 도파관으로 가정하여 계산한 부분사 코팅 설계는 필드의 분포가 일반적으로 다층 구조의 필드 분포와 크게 다르기 때문에 큰오차가 발생한다. 따라서 부분사 코팅 설계의 결과가 다층 구조를 고려한 경우의 결과와 크게 차이가 발생하지 않으면서 빠른 계산속도를 가지는 가상의 4층 구조 방법을 제안한다.

가상의 4층 구조 방법의 기본 개념은 cover와 substrate 및 그 사이의 2개의 층으로 구성된 4층 구조 도파관의 필드 분포가 다층 구조 도파관 내의 필드 분포와 유사하도록 2개의 층의 굴절율과 두께를 설정하는 방법이다.

가상의 4층 구조 방법을 사용하기 위하여 2개의 층의 굴절율과 두께를 어떠한 방법으로 설정하였느냐를 설명하기 위하여 참고 문헌 [9]에 나와있는 그림 2와 같은 6층 구조 도파관을 생각하자.

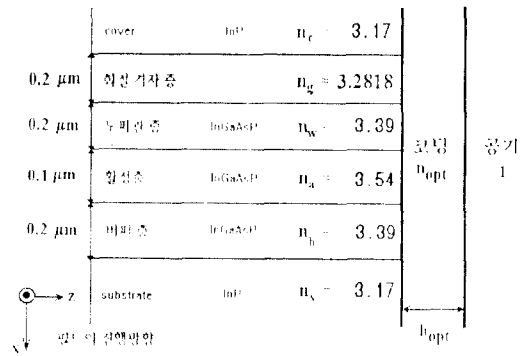


그림 2. 참고문헌[9]에서 사용한 각 층의 두께와 굴절율을 보여 주는 6층 구조 도파관 소자의 개념도.

Fig. 2 Schematic diagram of a six layered structure waveguide device showing the thickness and indices at 1.55μm of layers in Ref. [9].

전달 행렬을 이용하면 도파관 소자내 필드의 상대적인 크기와 위치를 알 수 있으며 그 결과를 그림 3에 실전으로 도시하였다. 횡축은 도파관 소자내 횡축 방향으로의 위치를 나타내며 종축은 필드의 상대적인 크기를 나타낸다. 따라서 cover 층과 회전 각자 영역의 경계에서의 위치와 필드의 상대적 크기( $x_1, y_1$ ), substrate와 비파층의 경계에서의 위치와 필드의 상대적 크기( $x_2, y_2$ )와 최대 필드가 발생하는 위치와 상대적 크기( $x_s, y_s$ )를 알 수 있다.

최대 필드가 발생하는 위치를 경계로 cover 층의 경계까지를 하나의 층(가상층 1)으로 substrate 층의 경계까지를 다른 하나의 층(가상층 2)으로 설정하면 각 층의 굴절율은 다음과 같이 구해진다. 가상층 1에서의 필드 분포는 식 (1)과 같이 주어진다. 가상층 1의 양 경계에서의 필드의 상대적 크기가 다층 구조인 경우와 같도록 설정하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$y_2 = y_1 \cos k_1(x_2 - x_1) + B_1 \zeta_1 \sin k_1(x_2 - x_1) \quad (13)$$

또한  $x = x_2$ 에서 필드의 최대값이 발생하기 때문에 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$-k_1 y_1 \sin k_1(x_2 - x_1) + B_1 \zeta_1 k_1 \cos k_1(x_2 - x_1) = 0 \quad (14)$$

(13)과 (14)식으로부터  $B_1$ 과  $k_1$ 을 구할 수 있다. 따라

서  $k_1 = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$  이므로 가상층 1의 굴절율을 구할 수 있으며 가상층 1의 필드 분포는 다음 식과 같이 주어진다.

$$E_1(x) = y_1 \{ \cos k_1(x-x_1) + \tan k_1(x_2-x_1) \sin k_1(x-x_1) \} \quad (15)$$

가상층 1에 적용한 과정과 비슷한 과정을 거치면 가상층 2의 굴절율을 구할 수 있으며 가상층 2의 필드 분포는 다음 식과 같이 주어진다.

$$E_2(x) = y_2 \cos k_2(x-x_2) \quad (16)$$

가상 4층 구조 방법의 필드 분포를 (15)식과 (16)식을 이용하여 그림 3에 점선으로 도시하였다. 필드의 크기가 최대로 발생하는 위치가 다층 구조 도파관의 중앙에 있지 않음에도 불구하고 가상 4층 구조 방법에 의한 필드 분포와 다층 구조를 고려한 필드 분포가 크게 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. 가상의 4층 구조 방법은 다층 구조의 층 수에 관계없이 4개의 층을 가진 구조로 근사하는 방법이므로 층 수가 많아질수록 유용한 설계방법이라 생각된다.

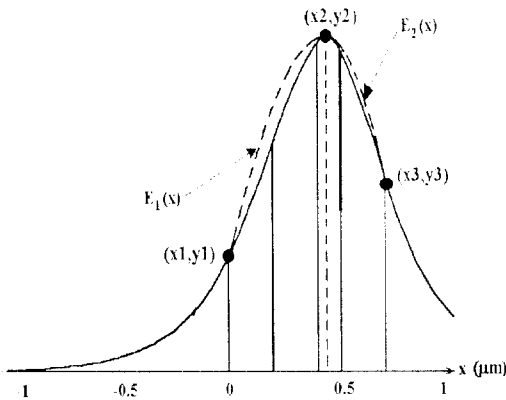


그림 3. 그림 2와 같은 소자내의 field 분포: 전달행렬을 사용하여 얻은 field 분포(실선)와 가상 4층 구조 방법을 사용하여 얻은 field 분포(점선).

Fig. 3 Field distribution in the device shown in Fig. 2: Field distribution(solid line) obtained from the transfer matrix method and that(dotted line) obtained from the virtual four layered structure method.

#### IV. 결과 및 토의

다층 구조 도파관 소자 단면에서의 무반사 코팅 설계 방법의 결과를 다층 구조를 3층 구조로 가정하였을 때와 가상의 4층 구조로 설정하였을 때 얻어지는 결과들을 비교 검토하기 위하여 그림 2의 6층 구조 도파관 소자에 대하여 무반사 코팅 설계를 수행하였다. 다층 구조를 3층 구조로 가정한 경우는 다음의 세 가지 경우이다.

- ㉔ 다층구조 중에서 활성층, cover 층과 substrate 층으로 구성되는 3층 구조
- ㉕ 다층 구조 중에서 활성층과 활성층 주위의 2개의 층으로 구성되는 3층 구조
- ㉖ 다층 구조 중에서 활성층과 활성층 주위의 양쪽 층들을 각각 에너지 관점에서 본 유효 굴절율- (식 11)을 사용하여 계산한 굴절율-로 가지는 2개의 층으로 구성되는 3층 구조

무반사 코팅 설계를 위하여 사용한 동작 파장은  $1.55\mu\text{m}$ 이다.

표 1과 표 2는 다층 구조 방법, 가상 4층 구조 방법 그리고 다층 구조를 3층 구조로 가정한 ㉔, ㉕, ㉖ 세 경우에 계산한 최적 코팅 파라미터를 TE와 TM 모드 각각의 경우에 대해 나타낸 표이다.

표 1과 표 2에서 보면 예상한 대로 가상 4층 구조 방법에 의한 최적 코팅 파라미터 값이 3층 구조로 가정한 세 가지 경우의 값보다 다층 구조 방법에 의한 최적 코팅 파라미터 값에 근접함을 알 수 있었다. 또한 3층 구조로 가정한 세 가지 경우 중에서는 ㉕, ㉖의 방법에 의한 결과가 ㉔에 의한 방법의 결과보다

표 1. 그림 2에 보인 소자 단면에서의 최적 코팅 파라미터 (TE 모드).

Table 1. Optimum coating parameters for the facet of the device shown in Fig. 2 (TE mode).

	최적 코팅 굴절율	최적 코팅 두께 ( $\mu\text{m}$ )
다층 구조 방법	1.85377	0.22749
가상 4층 구조 방법	1.84504	0.22860
㉕, ㉖ 경우	1.83927	0.21215
㉔ 경우	1.79894	0.22292

표 2. 그림 2에 보인 소자 단면에의 최적 코팅 파라메타 (TM 모드).

Table 2. Optimum coating parameters for the facet of the device shown in Fig. 2 (TM mode).

	최적 코팅 굴절율	최적 코팅 두께 (μm)
다층 구조 방법	1.86471	0.20783
가상 4층 구조 방법	1.86869	0.20631
㉞, ㉟ 경우	1.85126	0.20997
㉠ 경우	1.81472	0.21527

다층 구조 방법에 의한 결과에 근접함을 알 수 있었다. 이러한 결과의 이유는 가상의 4층 구조에 의한 필드 분포가 3층 구조로 가정한 세 경우보다 다층 구조의 필드 분포와 유사하기 때문이라 생각된다. 가상 4층 구조 방법과 3층 구조로 가정한 세 가지 경우에 얻은 최적 코팅 파라메타 값들에 대하여 다층 구조 방법을 이용하여 계산한 반사율을 표 3에 보인다.

표 3. 각 방법으로 부터 얻어진 최적 코팅 파라메타값에 대하여 다층 구조 방법으로 계산한 반사율.

Table 3. Reflectivity calculated using the multilayered structure method for the values of optimum coating parameters obtained from each method.

	TE 모드	TM 모드
다층 구조 방법	$1.0182 \times 10^{-11}$	$5.4635 \times 10^{-11}$
가상 4층 구조 방법	$3.0096 \times 10^{-5}$	$2.2022 \times 10^{-5}$
㉞, ㉟ 경우	$7.3960 \times 10^{-3}$	$4.6875 \times 10^{-5}$
㉠ 경우	$4.4797 \times 10^{-3}$	$6.2150 \times 10^{-4}$

표 3에서 보는 것처럼 3층 구조로 가정한 세가지 경우에 얻은 최적 코팅 파라메타 값에 대하여 다층 구조 방법을 사용하여 계산한 반사율은 TE 모드인 경우  $10^{-3}$  보다 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. 또한 TM 모드인 경우는 반사율이  $10^{-4}$  정도의 값을 가짐을 알 수 있었다. 가상 4층 구조 방법으로 얻은 최적 코팅 파라메타 값에 대하여 다층 구조 방법을 사용하여 계산한 반사율은 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우 각각  $3 \times 10^{-5}$ 이고  $2.2 \times 10^{-5}$ 으로서 3층 구조로 가정한 세가지 경우보다 반사율이 작았으며 모두  $10^{-4}$  이하의 반사율을 가졌다.

부반사 코팅 제작시 중요하게 사용되리라 예상되는 공차지도(단면 반사율을  $10^{-3}$  이하로 얻을 수 있

는 코팅 굴절율과 코팅 두께의 범위를 나타내는 그림)를 다층 구조 방법, 가상의 4층 구조 방법과 3층 구조로 가정한 ㉞ 방법을 사용하여 구하였다. 그 결과를 각각 그림 4, 그림 5와 그림 6에 보였다.

그림 4와 그림 5를 비교해 보면 다층 구조 방법을 사용하여 얻은 공차지도와 가상 4층 구조 방법으로 얻은 공차지도가 비슷함을 볼 수 있다. 그러나 3층 구

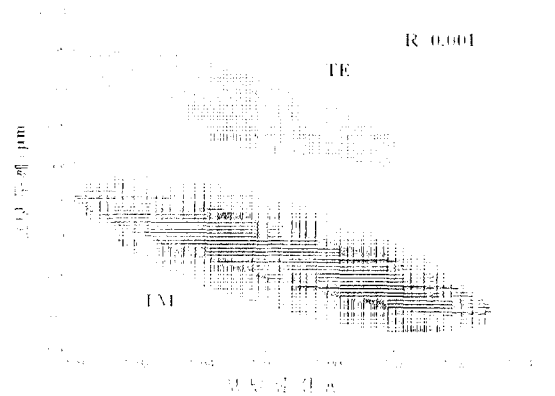


그림 4. 그림 2에 보인 소자 단면의 부반사 코팅층 제작을 위해 다층 구조 방법으로 얻은 공차지도.

Fig. 4 Tolerance map obtained from the multilayered structure method for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 2.

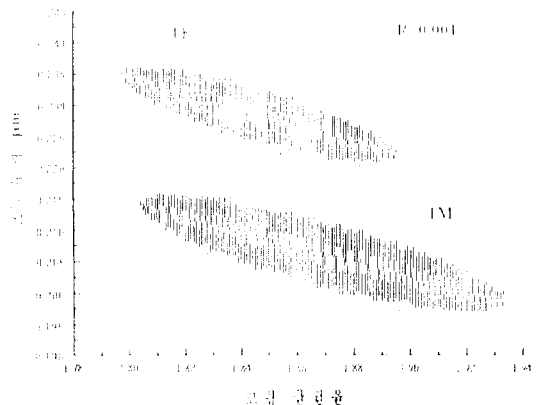


그림 5. 그림 2에 보인 소자 단면 부반사 코팅층 제작을 위해 가상 4층 구조 방법으로 얻은 공차지도.

Fig. 5 Tolerance map obtained from the virtual four layered structure method for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 2.

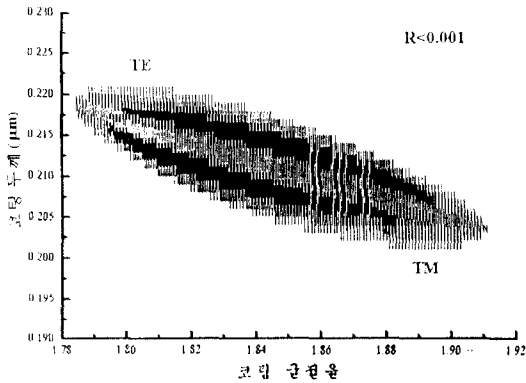


그림 6. 그림 2에 보인 소자 단면 무반사 코팅층 제작을 위해 3층 구조로 가정된 ㉞ 경우에 얻은 공차지도.  
 Fig. 6 Tolerance map obtained from the case ㉞ assumed as the three layer structure for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 2.

조로 가정한 세가지 경우 중 다층 구조 방법의 결과에 가장 근접한 결과를 주는 ㉞ 경우에 계산된 공차지도 그림 6은 그림 4와 매우 다름을 볼 수 있다. 특히 그림 4에서 보던 TE 모드와 TM 모드 모두에 대하여 반사율을  $10^{-3}$  이하로 주는 코팅 파라메타가 존재하지 않는데 반해 그림 6에서 보던 TE 모드와 TM 모드 모두에 대하여 반사율을  $10^{-3}$  이하로 주는 코팅 파라메타의 영역이 넓게 존재함을 볼 수 있다.

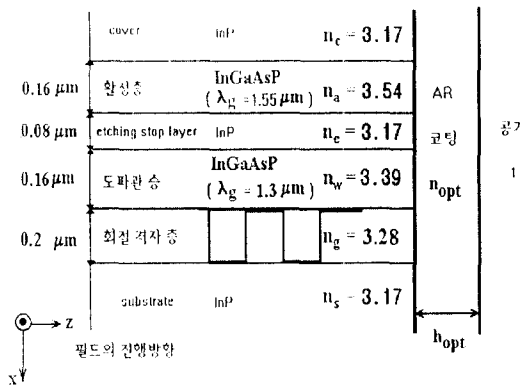


그림 7. 참고 문헌[10]에서 사용한 각 층의 두께와 굴절율을 보여주는 6층 구조 도파관 소자의 개념도.  
 Fig. 7 Schematic diagram of a six layered structure waveguide device showing the thickness and indices at 1.55μm of layers in Ref. [10].

다층 구조 방법에 의한 결과와 가상의 4층 구조 방법 및 3층 구조로 가정한 세가지 경우의 결과들의 차이를 확인하기 위하여 참고 문헌 [10]에 나와있는 그림 7과 같은 6층 구조 도파관 소자의 무반사 코팅층 설계를 5가지 방법을 사용하여 수행하였다.

표 4. 그림 7에 보인 소자 단면에서의 최적 코팅 파라메타 (TE 모드)

Table 4. Optimum coating parameters for the facet of the device shown in Fig. 7 (TE mode).

	최적 코팅 굴절율	최적 코팅 두께 (μm)
다층 구조 방법	1.82794	0.22784
가상 4층 구조 방법	1.82994	0.22806
㉞ 경우	1.82963	0.21884
㉞ 경우	1.83042	0.21966
㉞ 경우	1.83930	0.22368

표 5. 그림 7에 보인 소자 단면에서의 최적 코팅 파라메타 (TM 모드).

Table 5. Optimum coating parameters for the facet of the device shown in Fig. 7 (TM mode).

	최적 코팅 굴절율	최적 코팅 두께 (μm)
다층 구조 방법	1.85810	0.20845
가상 4층 구조 방법	1.86869	0.20631
㉞ 경우	1.85803	0.20842
㉞ 경우	1.83689	0.21249
㉞ 경우	1.84082	0.21305

표 4와 표 5는 각각 다층 구조 방법, 가상의 4층 구조 방법 및 다층 구조를 3층 구조로 가정한 ㉞, ㉞와 ㉞의 세 경우에 계산한 최적 코팅 파라메타를 TE 모드와 TM 모드인 경우에 대하여 나타낸 표이다. 표 4와 표 5에서 보던 예상한대로 가상의 4층 구조 방법에 의한 결과가 3층 구조로 가정한 세가지 경우에 의한 결과보다 다층 구조 방법에 의한 결과에 매우 근접함을 알 수 있다. 또한 3층 구조로 가정한 세 가지 경우 중에는 ㉞ 경우의 결과가 다른 2 경우의 결과에 비하여 다층 구조 방법에 의한 결과에 근접함을 알 수 있었다. 가상 4층 구조 방법과 3층 구조로 가정한 세가지 경우에 얻은 최적 코팅 파라메타 값들에 대하여 다층 구조 방법을 이용하여 계산한 반사율을 표 6에 보인다.



표 6. 각 방법들로 부터 얻어진 최적 코팅 파라메타값에 대하여 다층 구조 방법으로 계산한 반사율.

Table 6. Reflectivity calculated using the multilayered structure method for the values of optimum coating parameters obtained from each method.

	TE 모드	TM 모드
다층 구조 방법	$5.6378 \times 10^{-11}$	$5.4635 \times 10^{-11}$
가상 4층 구조 방법	$7.0826 \times 10^{-6}$	$2.2022 \times 10^{-5}$
㉔ 경우	$1.8433 \times 10^{-3}$	$4.6875 \times 10^{-5}$
㉕ 경우	$1.4792 \times 10^{-3}$	$6.2150 \times 10^{-4}$
㉖ 경우	$2.2416 \times 10^{-4}$	$1.7991 \times 10^{-4}$

표 6에서 보는 것처럼 3층 구조로 가정한 세가지 경우에 얻은 최적 코팅 파라메타 값에 대하여 다층 구조 방법을 사용하여 계산한 반사율은 TE 모드인 경우  $10^{-3}$  보다 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. 또한 TM 모드인 경우는 반사율이  $10^{-4}$  정도의 값을 가짐을 알 수 있었다. 가상 4층 구조 방법으로 얻은 최적 코팅 파라메타 값을 가질때 다층 구조 방법을 사용하여 계산한 반사율은 TE 모드인 경우와 TM 모드인 경우 각각  $7 \times 10^{-5}$ 이고  $2.2 \times 10^{-5}$ 으로서 3층 구조로 근사한 세가지 경우보다 반사율이 작았으며 모두  $10^{-4}$  이하의 반사율을 가졌다.

무반사 코팅 제작시 중요하게 사용되리라 예상되는

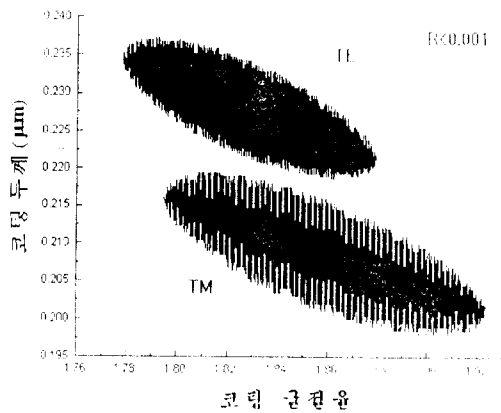


그림 8. 그림 7에 보인 소자 단면의 무반사 코팅층 제작을 위해 다층 구조 방법으로 얻은 공차지도.

Fig. 8 Tolerance map obtained from the multilayered structure method for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 7.

공차지도를 다층 구조 방법, 가상의 4층 구조 방법, 3층 구조로 가정한 ㉔의 방법을 사용하여 구하였다. 그 결과를 각각 그림 8, 그림 9와 그림 10에 보았다.

그림 8과 그림 9를 비교해 보면 다층 구조 방법을 사용하여 얻은 공차지도와 가상 4층 구조 방법으로 얻은 공차지도가 비슷함을 볼 수 있다. 그러나 3층 구조로 가정한 세가지 경우 중 다층 구조 방법의 결과

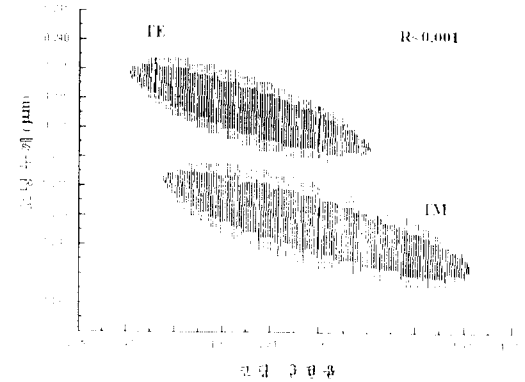


그림 9. 그림 7에 보인 소자 단면 무반사 코팅층 제작을 위해 가상 4층 구조 방법으로 얻은 공차지도.

Fig. 9 Tolerance map obtained from the virtual four layered structure method for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 7.

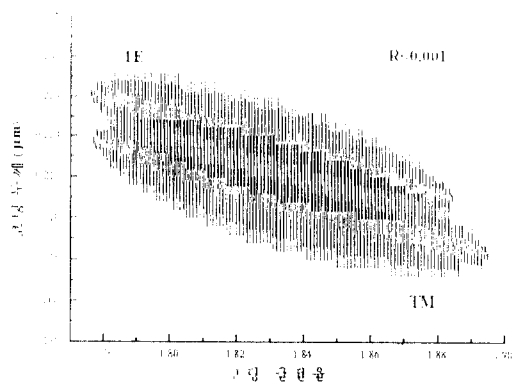


그림 10. 그림 7에 보인 소자 단면 무반사 코팅층 제작을 위해 3층 구조로 가정한 ㉔ 경우에 얻은 공차지도.

Fig. 10 Tolerance map obtained from the case ㉔ assumed as the three layer structure for the fabrication of antireflection coatings on the facet of the device shown in Fig. 7.

에 가장 근접한 결과를 주는 © 경우에 계산된 공차 지도 그림 10은 그림 8과 매우 다름을 볼 수 있다. 특히 그림 8에서 보면 TE 모드와 TM 모드 모두에 대하여 반사율을  $10^{-3}$  이하로 주는 코팅 파라메타가 존재하지 않는데 반해 그림 10에서 보면 TE 모드와 TM 모드 모두에 대하여 반사율을  $10^{-3}$  이하로 주는 코팅 파라메타의 영역이 넓게 존재함을 볼 수 있다.

### V. 결 론

지금까지의 무반사 코팅 설계 방법에 대한 연구는 가장 간단한 도파관 구조인 대칭 구조를 가지는 3층 도파관 구조를 가지는 소자에 대하여 집중적으로 연구가 행하여 졌다. 그러나 실제로 사용되어지고 있는 도파관 구조 소자는 대부분 3층 구조가 아니라 4층 이상의 다층 구조를 가지는 도파관 소자이다. 따라서 본 논문에서는 다층 구조 도파관 소자의 무반사 코팅 설계를 위하여 그 결과가 3층 구조인 경우 엄밀한 방법의 결과와 매우 잘 일치하는 무반사 코팅 설계 방법을 확장하여 사용하였다.

확장된 설계방법을 사용하기 위하여 필요한 다층 구조내의 필드 분포는 전달 행렬 방법을 사용하여 구하였다. 또한 도파관 소자의 층 수가 증가할수록 무반사 코팅층 설계에 많은 시간이 소요되므로 이를 해결하기 위하여 가상의 4층 구조 방법을 제안하였다.

다층 구조 방법과 가상의 4층 구조 방법에 의한 결과와 다층 구조를 3층 구조로 가정한 경우의 결과들을 비교 검토하기 위하여 참고문헌 [9]와 [10]에 각각 나와있는 2가지의 6층 구조 도파관 소자에 대하여 최적 코팅 파라메타와 공차지도를 구하였다. 그 결과 3층 구조로 가정하여 계산한 최적 코팅 파라메타와 공차지도는 다층 구조 방법에 의한 결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

가상 4층 구조 방법에 의한 결과는 3층 구조로 가정한 세가지 다른 경우의 결과에 비하여 다층 구조 방법의 결과에 근접함을 알 수 있었다. 이러한 결과의 주된 이유는 가상 4층 구조 방법에 의한 도파관내 필드 분포가 3층 구조로 가정한 경우에 비하여 다층 구조 소자의 필드 분포에 유사하기 때문이다.

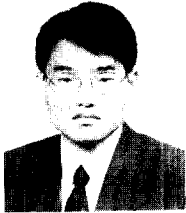
특히 반도체 광증폭기 등과 같은 소자를 제작하기 위하여 필요한  $10^{-3}$  이하의 단면 반사율을 목표로 하

는 무반사 코팅 설계시에는 다층 구조 방법이나 가상 4층 구조 방법을 사용하여야 됨을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. T. Ikegami, "Reflectivity of mode of a facet and oscillation mode in double heterostructure injection lasers," IEEE J. Quantum Electron. QE-8, pp. 470-476, 1971.
2. C. Vassallo, "Reflectivity of multielectric 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.
3. G. Einstein, "Theoretical design of single layer antireflection coatings on laser facets," Bell Syst. Tech. J. Vol. 63, No. 2, pp. 357-364, 1984.
4. Lennart Atterrånas 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.
5. 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.
6. 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.
7. 김부균, 김현수, 김용곤, "레이저 다이오드 단면의 무반사 코팅 설계," 한국 통신 학회 논문 지, 제20권, 제2호, pp. 545-555, 1995.
8. M. R. Ramadas and E. Garmire, A. K. Ghatak, K. Thyagarajan, and M. R. Shenoy "Analysis of absorbing and leaky planar waveguides: a novel method," Opt. Lett., Vol. 14, No. 7, pp. 376-378, 1989.
9. P. Correc, "Coupling Coefficients for Trapezoidal Gratings", IEEE J. of Quantum Electronics, Vol. 24, No. 1, pp. 8-10, 1988.
10. T. Numai, "1.5- $\mu$ m Wavelength Tunable Phase-

Shift-Controlled Distributed Feedback Laser",  
IEEE J. of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 2,  
pp. 199-205, 1992.



김 옹 곤(Yong-Kon Kim) 정회원  
1971년 11월 27일생  
1994년: 숭실대 전자공학과(학사)  
1996년: 숭실대 전자공학과 대학  
원(석사)  
1996년 1월~현재: 대우통신 제품  
연구소 진화기부분  
연구원

※주관심분야: 단일 모드 장파장 광소자 및 광통신,  
도파관 해석 및 그 응용 디지털 이동통  
신, DECT

김 부 균(Boo-Gyoun Kim) 정회원  
한국통신학회 논문지 제20권 제2호 참조

주 흥 로(Heung-Ro Choo) 정회원  
1979년: 서울대학교 물리학과(이학사)  
1981년: KAIST 물리학과(이학석사)  
1992년: University of Texas, Austin(이학박사)  
1993년 1월~현재: 한국통신 전자연구소 광전자연구  
실 근무  
※주관심분야: 광통신용 광소자