

전송선 이론을 이용한 평면 광 도파관의 전파특성 해석

권 범, 박 영 태, 손 태 호, 이 상 실
한양 대학교 전자 통신 공학과

The analysis of planar optical waveguide using transmission line analogy

Kwon bunn, Park yong tae, Son tae ho, Lee sang seol
Dep. of Electronic communication Engr. Hanyang Univ.

ABSTRACT

We present here a numerical solution for obtaining propagation characteristics including lossess for various modes of an multi-layered optical waveguide structure. The method is based on transmission line analogy. A comparison with other method shows the our results are accurate and simple.

1. 서 론

근래에 평면 도파관 구조의 전파 특성을 계산하기 위한 수치 해석법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다 [1]-[3]. T.E.Batchman은 특성 함수 (eignvalue method) 를 사용하여 반도체와 유전체로 구성된 평면 도파관의 모우드 결합에 대해 연구하였으며 Michico Momoda는 완충층 (buffer layer)이 있는 다층 광 도파관의 전파 특성 연구에 모드매칭 (mode matching) 법을 사용하였다. 최근에 M.R.Shenoy는 행렬법 (matrix method) 을 이용하여 평면 광도파관 구조의 전파특성을 계산하였다.

본 논문에서는 평면 구조의 다층 광도파관을 등가 전송선 회로로 변환하여 그의 전파특성을 해석한다. 해석 방법으로는 주어진 각 층의 굴절률을 이용하여 임피던스를 구하고 층간 경계면에서 투과 및 반사계수를 구하여 각 층에 형성되는 전계의 크기를 계산한다. 도파도 (guiding film) 에서의 전계와 입사파의 전계의 비로부터 각 층의 퍼라미터(두께, 굴절률) 에 따른 도파도의 전파특성을 알아낸다. 그 계산 예로서 리키(leaky)구조의 광 결합기, 방향성 결합기 및 APM(air-polimer-meter)도파관에 대하여 전파특성을 계산하고 Shenoy의 결과와 비교한다.

2. 전파특성 계산

그림 1과 같은 구조에서 θ_1 의 각도로 입사하는 평면파에 대한 각 층에서의 전계는 다음 식과 같다.

$$E_i = \hat{e}_i^+ E_i^+ e^{i\Delta_i} \exp[i(\omega t - k_i \cos\theta_i x - \beta z)] + \hat{e}_i^- E_i^- e^{-i\Delta_i} \exp[i(\omega t - k_i \cos\theta_i x - \beta z)] \quad (1)$$

여기서

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 0, \Delta_3 = k_3 d_2 \cos\theta_3$$

$$\Delta_4 = k_4 \cos\theta_4 (d_1 + d_2) \quad (2)$$

$$k_i = k_0 n_i \quad (3)$$

$$\beta = k_1 \sin\theta_1 = k_2 \sin\theta_2 = k_3 \sin\theta_3 \quad (4)$$

이다. \hat{e}_i^+ 와 \hat{e}_i^- 는 전계의 진행 방향을 나타내는 단위 벡터이며 E_i^+ 와 E_i^- 는 각 경계면에서 입사하는 전계와 반사하는 전계의 크기를 나타낸다.

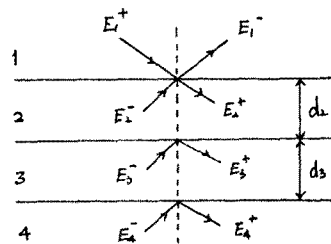


그림 1. 층을 이룬 구조에 입사한 평면파
Fig.1 The incidence of the plane wave at angle θ_1 in a stratified medium

그림 1을 등가 전송선 회로로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 t_{ij} 와 r_{ij} 는 각 경계면에서의 투과 계수와 반사 계수이며

$$r_{ij} = \frac{z_j - z_i}{z_j + z_i}, \quad t_{ij} = \frac{2z_j}{z_j + z_i} \quad (5)$$

이다. 여기서 Z_i 는 매질의 특성 임피던스로서

TE파의 경우
$$Z_i = \frac{120\pi}{n_i \cos\theta_i} \quad (6)$$

TM파의 경우
$$Z_i = 120\pi n_i \cos\theta_i \quad (7)$$

이다. δ_i 는 경계면간 거리로서

$$\delta_i = k_i d_i \cos\theta_i \quad (8)$$

이다.

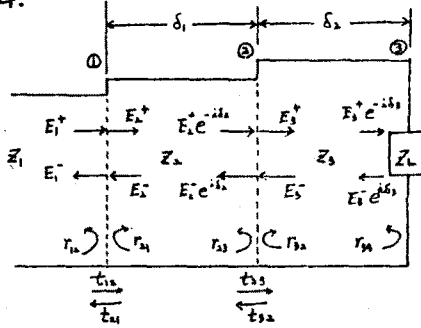


그림 2. 등가 전송선 회로

Fig.2 Equivalent transmission line circuit

경계 조건에 의해 경계면 1에서는

$$t_{12} E_1^+ = E_2^+ - r_{21} E_2^- \quad (9)$$

의 관계가 있고, 경계면 2에서는

$$t_{23} E_2^+ e^{-i\delta_2} = E_3^+ - r_{32} E_3^- \quad (10)$$

$$t_{32} E_3^- = E_2^- e^{i\delta_2} - r_{23} E_2^+ e^{-i\delta_2} \quad (11)$$

이 만족된다. 그리고 경계면 3에서도

$$E_3^- e^{i\delta_3} = r_{34} E_3^+ e^{-i\delta_3} \quad (12)$$

의 관계식을 얻을 수 있다.

식 (10) 으로부터

$$E_2^+ = \frac{e^{i\delta_2}}{t_{23}} (E_3^+ + r_{32} E_3^-) \quad (13)$$

식을 얻고, 또한 식 (11) 과 식 (12) 로 부터 식 (14), (15)를 유도한다.

$$E_2^- = e^{-i\delta_2} (t_{32} E_3^- e^{-2i\delta_3} + r_{34} E_3^+ e^{-i\delta_3}) \quad (14)$$

$$E_3^- = r_{34} E_3^+ e^{-2i\delta_3} \quad (15)$$

식 (15) 를 식 (13) 에 대입하면 식(16)이 되며

$$E_2^+ = \frac{e^{i\delta_2}}{t_{23}} (1 + r_{32} r_{34} e^{-2i\delta_3}) E_3^+ \quad (16)$$

식 (14), (16) 을 식 (1)에 대입하여 정리하면 세 번째 층에 여기되는 여기율 (excitation efficiency) 는

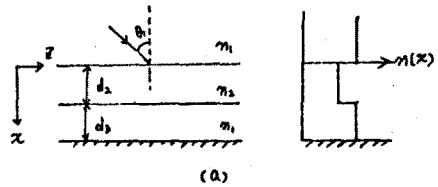
$$\left| \frac{E_3^+}{E_1^+} \right|^2 = \left\{ (1 - r_{34} e^{-2i\delta_3}) (e^{i\delta_2} - r_{23} r_{34} e^{-i\delta_2}) \frac{1}{t_{23}} - r_{12} t_{32} e^{-i(\delta_2 + \delta_3)} \right\}^{-2} \quad (17)$$

와 같다.

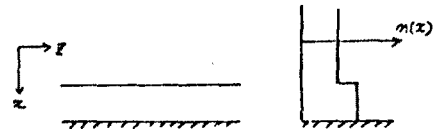
2-1 리키 (leaky) 구조의 경우

도파로 근처에 높은 굴절률의 매질이 있는 리키 도파관 구조는 집적 광 편광기 (integrate optic polarizers), 차단 여파기 (cutoff filters), 프리즘-필름 결합기 (prism-film coupler) 등의 구조에서 많이 사용된다. 이러한 구조에 앞의 방법을 사용하기 위해 그림 3에 보인 굴절률이 다음과 같은 구조에 대해 고려한다.

$$\begin{aligned} n(x) &= n_1, & x < 0, & d_2 < x < d_2 + d_3 \\ &= n_2, & 0 < x < d_2 \end{aligned} \quad (18)$$



(a)



(b)

그림 3. (a) 리키 도파관 구조

(b) 자유 도파관 구조

Fig.3 (a) A leaky planar waveguide, and (b) the corresponding free guide structure.

이 구조에서 매질 4는 금속이라 가정한다.

이러한 구조에서 전파 모드(guided mode)가 존재하지 않으며, $\beta < k_0 n_1$ 인 모든 값의 β 가 허용되며 복사 모드(radiation mode)가 형성된다. 그러나 이런 구조에서 그림 3(b)와 같이 매질 1의 굴절률이 n_2 이거나 $d_2 \rightarrow \infty$ 인 경우에는 $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$ 인 한정된 β 값에 대하여만 몇 가지의 전파모드가 형성될 수 있다. 이런 β 값에 대응하는 그림 3(a)에서의 복사 모드를 의사 모드(quasi-modes) 또는 공진 모드(resonant mode)라 한다 [4].

그림 1에서 2,3 그리고 4 매질을 각각 상층(superstrate), 도파로(guiding film), 하층(substrate)라 하면 도파로 내의 여기율 $\eta(\beta)$ 는 β 에 대한 함수로서 로렌츠 함수 모양을 갖는 몇 개의 공진 피크를 갖는다 [5]. 이 때 피크가 나타나는 β 값에서 전파 상수의 실수부를 얻으며 피크의 1/2이 되는 β 의 폭 (the full

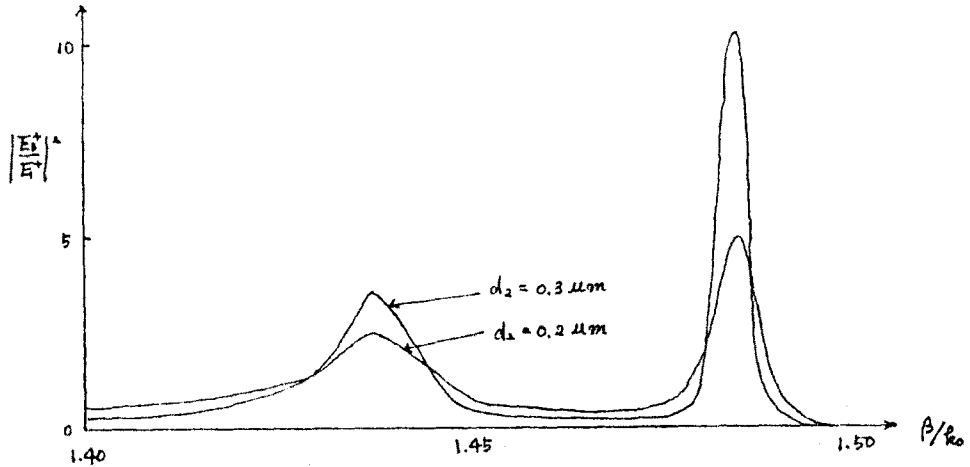


그림 4. β/k_0 에 대한 $|E_1^+/E_1^-|^2$ 의 변화
 Fig.4 The variation of $|E_1^+/E_1^-|^2$ as a function of β/k_0 for the configuration shown in Fig.3(a).

width at half maximum) 으로 부터 감쇄 계수를 구할 수 있다 [4]. 그림 4에 두 가지 d_2 에 대한 $\eta(\beta) = |E_1^+/E_1^-|^2$ 의 변화를 나타내었다.

$n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.4$ 그리고 $d_1 = 2 \mu m$ 이며 $\lambda_0 = 1 \mu m$ 이다.

d_2 가 $0.3 \mu m$ 인 경우가 $0.2 \mu m$ 인 경우보다 감쇄가 적음을 알 수 있었으며 Shenoy의 결과와 일치하였다 [3]. 만일 d_2 가 증가하면 리키 구조의 전파 상수는 자유 도파관의 전파 상수에 수렴한다.

2-2 방향성 결합기의 경우

방향성 결합기 (directional coupler) 는 집적 광 도파장치의 중요한 부분이며 근래에 집적 광 어파기에 사용되고 있다. 그림 5와 같은 구조의 방향성 결합기에 대한 전파 특성을 계산한다. $n_1 > n_3$ 인 임의의 굴절률을 가진 매질 1을 도입한 후 d_2 를 증가시킨다. 이 계산에서는 $n_1 = 1.5$ 로 하였으며 $\lambda_0 = 1 \mu m$ 이다.

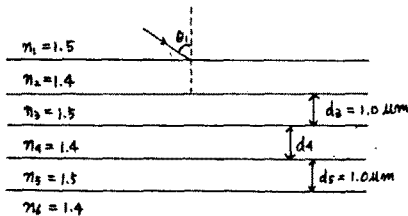


그림 5. 방향성 결합기
 Fig.5 Directional coupler

d_4 가 $0.2 \mu m$, $0.7 \mu m$ 인 두 가지 경우에 대하여 $\eta(\beta) = |E_1^+/E_1^-|^2$ 의 피크가 생긴 위치의 변화를 그림 6에 나타내었다.

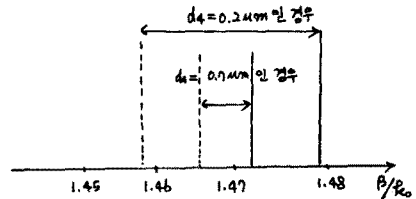


그림 6. 두께 d_4 에 따른 피크의 변화
 Fig.6 The variation of the position of peaks depend on d_4 .

그림 6으로 부터 두 도파로 간의 거리 d_4 가 증가함에 따라 피크의 위치는 서로 근접해지며 마침내 합쳐지게 됨을 알 수 있다.

2-3 금속 클래드 평면 도파관의 경우

금속 클래드 광 도파관 (metal cladded optical planar waveguide) 구조인 AFM (air polymer metal) 도파관의 전파 상수를 계산한다. 금속은 금이라 가정하면 그림 1에서 보인 구조에서

$$n_2 = 1$$

$$n_3 = 1.5884$$

$$n_4 = 0.1620 - i 3.2103$$

이다. $n_1 > n_3$ 인 임의의 매질 1을 도입한 후 $d_1 \rightarrow \infty$ 로 하여 계산한다. 계산된 결과는

TE₀ 모드에 대해

$$= (1.587814 - i 0.1794 \times 10^{-6})$$

TE₁ 모드에 대해

$$= (1.586068 - i 0.7247 \times 10^{-6})$$

이며 Shenoy의 결과와 일치함을 보였다.

3. 결 론

승을 이론 도파관 구조의 전파 특성을 등가 전송선 회로를 이용하여 계산하였다. 이 방법은 다른 방법에 비해 수식이 간단하므로 계산하기가 쉽고 계산 시간이 짧은 장점을 갖고 있다. 계산의 타당성을 입증하기 위하여 리키 구조의 평면 도파관 및 평면 방향성 결합기, 그리고 APM 도파관에 적용하여 그 전파 특성을 계산하여 Shenoy의 결과와 비교하여 정확히 일치함을 보였다. 이 연구 방법은 평면 광 결합기 및 평면 광 도파관 설계에 유용히 사용할 수 있다.

참고 문헌

1. T.E.Batchman & G.H.McWright, "Mode coupling between dielectric and semiconductor planar waveguide", IEEE J.Quantum Electron., vol.QE-18, pp782-788, 1982.
2. T.Miyamoto & M.Momoda, "Propagation characteristic of a multilayered thin film optical waveguide with buffer layer", J.Opt.Soc.Amer., vol.72, pp.1163-1166, 1982.
3. M.R.Shenoy et al, "Numerical analysis of planar optical waveguides using matrix approach", J.Light Tec., vol.5, no.5, May 1987.
4. A.K.Ghatak, "Leak modes in optical waveguides", Opt.Quan.Electron., vol.17, pp311-321, 1970.
5. R.Ulrich, "Theory of prism-film coupler by plane wave analysis", J.Opt.Soc.Amer.A. vol.2, pp595-602, 1985.