

평면 DFB (Distributed-Feedback) 전송구조의 등가 전송선로 해석법

Equivalent Network Approach of Planar DFB (Distributed-Feedback) guiding Structures

金 竣 煥*, 扈 光 春**, 金 曠 權*

(June-Hwan Kim *, Kwang-Chun Ho **, and Yung-Kwon Kim *)

요 약

Floquet의 정리와 이등분의 원리 (bisection principle)에 기초한 등가 전송선로 해석법을 이용하여 평면 DFB 구조의 반사특성을 해석하고, 격자주기 (grating period)에 따른 분산특성과 전력반사도를 계산하였다. 수치해석 결과 등가 전송선로 해석법은 DFB 전송구조의 광학적 특성을 분석하기 위한 간편하고 유용한 알고리즘으로 사용될 수 있음을 보여 주었다.

Abstract

By using an equivalent network based on Floquet's theorem and bisection principle, the optical properties of planar DFB guiding structure are evaluated. The optical parameters, such as Bragg condition and the reflectivity as a function of grating period, are numerically calculated. The numerical results reveal that this method offers a simple and convenient algorithm to analyze the optical characteristics of DFB configurations.

I. 서 론¹

평면 DFB 구조는 광학 집적회로에 적합하고, 레이저 다이오드, 광 필터, 빔 스플리터 등과 같은 광통신용 소자로써 그 활용분야가 넓기 때문에 DFB 전송구조의 광학적 특성을 간편하고 정확하게 해석하기 위한 많은 연구가 있어 왔다. 1970년대 Kogelnik는 결합모드 해석법 (coupled-mode theory)^[1]을 이용하여 처음으로 DFB 구조의 분산특성과 진행파 (forward-traveling wave)

와 반사파 (backward-traveling wave)사이의 전송특성을 분석하였다. 그 후, DFB 전송구조의 광학적 특성을 분석하고 설계하기 위하여 Shigesawa와 Tsuji^[2]는 평면 유전체 도파로의 불연속성 (discontinuity)에 기초한 망 해석법 (network approach)을 이용하였고 Borsboom과 Frankena^[3]는 최근 산란 행렬공식을 이용한 모드 정합법 (mode-matching method)을 적용하였다. 비록, 이들 해석법들은 격자주기 (grating period)와 높이 (depth)의 변화에 따른 DFB 구조를 정확하게 해석하기 충분하지만 그 수치 해석적 계산시간이 길고 복잡하다는 단점이 있다. 이에 우리는 격자의 변화에 따른 DFB 구조의 전송특성을 간단하고 비교적 정확하게 계산할 수 있는 새로운 해석법인 등가 전송선로 해석법을 소개하고자 한다.

본 논문에서는 Floquet의 정리^[4]와 이등분의 원리

*建國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Konkuk Univ.)

**漢拏工科大学 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Halla Institute of Technology)

接受日: 1998年4月22日, 修正完了日: 1998年7月23日

(bisection principle)^[5]에 기초한 그 등가 전송선로 해석법 (equivalent network approach)을 이용하여 파장 $\lambda=0.86 \mu\text{m}$ 의 TE 모드에서 동작하는 평면형 DFB 구조의 분산특성 및 기대율 (aspect ratio)과 격자주기에 따른 진행파와 반사파 사이의 그 전력반사도를 계산하였다.

II. 평면 DFB 도파로의 분산곡선

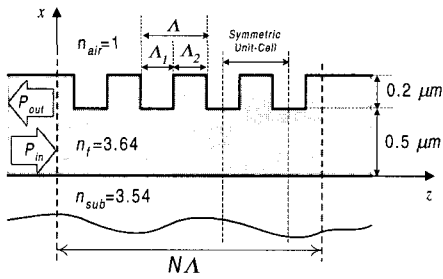


그림 1. 평면 DFB 전송 구조
Fig. 1. A typical DFB guiding structure.

일반적인 DFB (Distributed-Feedback) 도파로의 단면도가 그림 1에 도시되어 있다. 그림에서 보듯이 설계된 DFB 도파로는 굴절률 $n_f=3.64$, 두께 $0.2 \mu\text{m}$ 의 균일한 격자로 구성된 두께 $0.7 \mu\text{m}$ 의 전송 채널과 굴절률 $n_{sub}=3.54$ 인 기판 층(Substrate), 그리고 공기 층인 커버로 구성되었다. 그 균일한 격자주기 Λ 로 구성된 그림 1의 DFB 도파로는 길이 Λ_1 인 홈이 패인 부분들과, 길이 Λ_2 인 홈이 패이지 않은 부분으로 구성된 그림 2(a)에 도시한 대칭 단위 셀 (symmetric unit-cell)들의 합으로 나타낼 수 있다. 이 대칭 단위 셀의 x-축 방향으로 구성된 전송선로에 공진조건^[6]

$$Y_{up} + Y_{dn} = 0 \tag{1}$$

을 적용하면 각 단 (segment)에서의 전파상수 κ_1, κ_2 가 결정되어진다. 여기서, Y_{up} 과 Y_{dn} 은 $x=0$ 에서 위와 아래로 각각 들여다본 입력 어드미턴스 (input admittance)를 나타낸다. 그 해석적 등가 전송선로 (equivalent transmission-line network)가 그림 2(b)에 자세하게 묘사되어 있다.

그때, TE 모드에 대한 각 영역의 전계 E_x 와 자계

H_x 는 다음과 같다^[7].

$$\begin{aligned} E_m(x, z) &= V_m(z)e_m(x) \\ H_m(x, z) &= -I_m(z)h_m(x) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $m=1, 2$ 는 격자구조에서 홈이 패인 부분과 홈이 패이지 않은 부분을 각각 나타내며, $e_m(x)$ 와 $h_m(x)$ 는 그 모드 함수 (modal function)이다. 여기서, 모드 전압 V_m 과 전류 I_m 는 아래와 같이 특성 임피던스 (characteristic impedance)에 의하여 관계 지어진다.

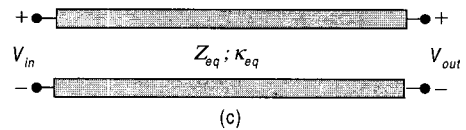
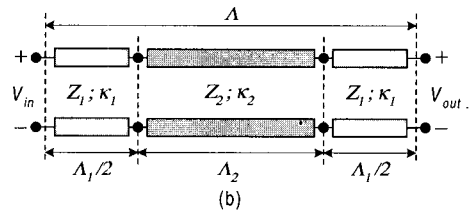
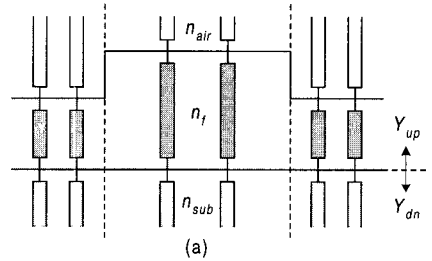


그림 2. 평면 DFB 도파로의 대칭 단위 셀:

- (a) 각 영역의 전파상수 κ_1, κ_2 을 계산하기 위한 전송선로, (b) 등가 전파상수 κ_{eq} 를 계산하기 위한 전송선로, (c) Floquet의 정리를 만족하는 전송선로.

Fig. 2. Symmetric unit-cell of planar DFB waveguide:

- (a) network to calculate the propagation constants κ_1, κ_2 of each segment, (b) equivalent network to calculate equivalent propagation constant κ_{eq} , (c) network describing Floquet's theorem.

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m} = \frac{\omega\mu}{\kappa_m} \quad (3)$$

그러므로, 그림 2(b)에서 보듯이 식 (3)의 고유 임피던스를 갖는 전송선로의 입력 단과 출력 단에서의 전압과 전류는 다음과 같은 관계 식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{pmatrix} = T_1 T_2 T_1 \begin{pmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, m 번째 단의 전송행렬 (transfer matrix) T_m 은 다음과 같이 주어지고

$$T_m = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_m d_m) & iZ_m \sin(\kappa_m d_m) \\ iY_m \sin(\kappa_m d_m) & \cos(\kappa_m d_m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

각 단의 전송 길이는 $d_1 = \Lambda_1/2$, $d_2 = \Lambda_2$ 이다.

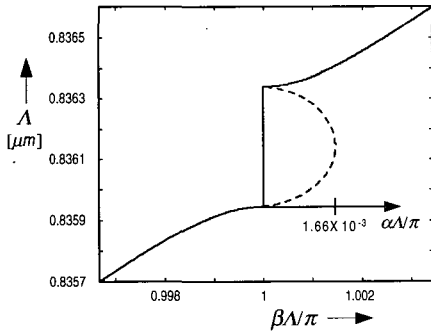


그림 3. 평면 DFB 구조의 분산곡선과 정규화된 감쇠 상수

Fig. 3. Dispersion curves for planar DFB structure and normalized attenuation factor.

이러한 주기적 구조체에 파장 $\lambda = 0.86 \mu m$ 의 진행파가 입사한다고 가정하면, 대칭적 단위 셀의 입, 출력 전압과 전류는 Floquet의 정리를 만족하는 하나의 등가 전송선로로 대치할 수 있으며 이에 대한 그림이 2(c)에 주어졌다. 그때, Floquet 지수 성분 $\kappa_{eq} = \beta + i\alpha$ 로 표현되는 등가 전송선로는 아래와 같은 전송 관계식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\kappa_{eq}\Lambda} & 0 \\ 0 & e^{i\kappa_{eq}\Lambda} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{pmatrix} \quad (6)$$

결국, 식(4)과 (6)를 결합하고 풀면 주기적 전송구조의 그 광학적 특성을 나타내는 분산관계 (dispersion relation) 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos(\kappa_{eq}\Lambda) &= \cos(\kappa_1\Lambda_1)\cos(\kappa_2\Lambda_2) \\ &- \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}} \right) \sin(\kappa_1\Lambda_1)\sin(\kappa_2\Lambda_2) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, ϵ_1 과 ϵ_2 는 단위 셀을 구성하는 각 단의 그 유효 유전률 (effective dielectric constant)을 나타내며, 정규화된 등가 전파상수 ($\kappa_{eq}\Lambda/\pi$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\kappa_{eq}\Lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1}[\theta(\lambda)] \quad (8)$$

그리고, 분산변수 $\theta(\lambda)$ 는

$$\begin{aligned} \theta(\lambda) &= \cos(\kappa_1\Lambda_1)\cos(\kappa_2\Lambda_2) \\ &- \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\sqrt{\epsilon_1\epsilon_2}} \right) \sin(\kappa_1\Lambda_1)\sin(\kappa_2\Lambda_2) \end{aligned} \quad (9)$$

이다.

위에서 유도한 식 (8)은 TE 모드에 대한 그 분산 특성을 해석하기 위하여 사용될 수 있으며 그 분석 결과가 그림 3에 명확하게 도시 되어 있다. 그림 3에서 보듯이 그림 1에 설계된 DFB 도파로는 약 0.4 nm 의 저지 대역 (stop band)을 형성하고, 정규화 감쇠상수 (attenuation factor) $\alpha\Lambda/\pi = 1.66 \times 10^{-3}$ 를 갖는 단위 셀로 구성된다. 이 감쇠상수는 진행파가 격자구조에 의하여 반사되는 그 정도를 나타내는 물리적 양 (physical quantity)이다. 그림 3의 광학적 특성을 나타내는 단위 셀로 구성된 DFB 도파로의 그 필터링 특성은 다음 절에서 자세하게 분석될 것이다.

III. 평면 DFB 도파로의 반사도

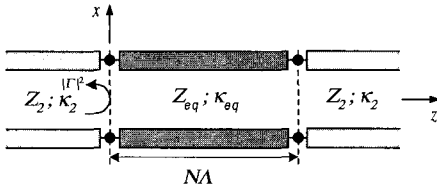


그림 4. 평면 DFB 구조의 등가 전송선로, 여기서, N 은 격자의 수를 나타낸다.

Fig. 4. Equivalent transmission-line network of planar DFB structure, where N is the number of grating.

2장에서 우리는 Floquet 등가 전송선로의 그 등가 전파상수 κ_{eq} 를 유도하였다. 그 분산 특성에 기초한 DFB 도파로의 반사도 (reflectivity)을 분석하기 위하여 또 하나의 미지 변수인 등가 특성 임피던스(equivalent characteristic impedance) Z_{eq} 를 이 장에서 고려할 것이다. 주기적 특성을 나타내는 전송구조의 전파상수와 그 특성 임피던스는 비 주기적 다층 전송구조 (stratified guiding structure)의 특성 식 (3)에 의하여 단순히 정의되지 않기 때문이다. 이를 위하여 그림 2(b)에 주어진 단위 셀의 등가 전송선로에 이등분의 원리를 적용하면 우 (even)모드의 특성을 나타내는 개방 이등분 (open bisection)의 그 등가 임피던스는

$$Z_{ob} = iZ_1 \frac{Z_2 - Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_1 \Lambda_1}{2}\right) \tan\left(\frac{\kappa_2 \Lambda_2}{2}\right)}{Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_2 \Lambda_2}{2}\right) + Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_1 \Lambda_1}{2}\right)} \quad (10)$$

이고, 기 (odd)모드의 특성을 나타내는 단락 이등분 (short bisection)에 대응하는 등가 임피던스는

$$Z_{sb} = -iZ_1 \frac{Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_1 \Lambda_1}{2}\right) + Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_2 \Lambda_2}{2}\right)}{Z_1 - Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_1 \Lambda_1}{2}\right) \tan\left(\frac{\kappa_2 \Lambda_2}{2}\right)} \quad (11)$$

으로 주어 진다. 그때, 주기적인 전송구조의 단위 셀을 나타내는 전송선로의 등가 임피던스 Z_{eq} 는 아래와 같이 정의된다.

$$Z_{eq} = \sqrt{Z_{ob} Z_{sb}} \quad (12)$$

그러므로, 식 (6)과 (10)의 등가 전파상수와 임피던스를 갖는 단위 셀로 구성된 그림 1의 DFB 도파로는 그림 4와 같은 3 단 (입력, DFB, 출력 단)의 전송선로에 의하여 등가화할 수 있다. 그때, 그림 4에 도시된 전송선로의 입력 단에서 들여다본 입력 반사계수 (입력 전압 P_{in} 에 대한 반사 전력 P_{ref} 의 비율)를 구하면 다음과

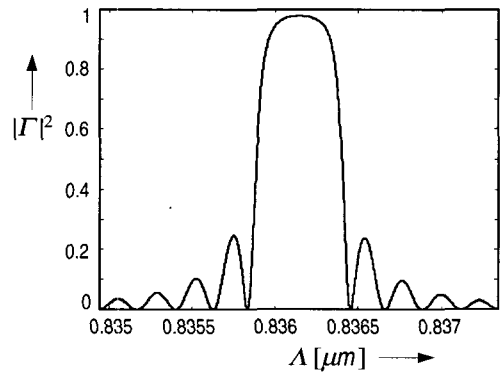


그림 5. 격자주기 Λ 에 대한 TE 모드의 전력 반사도. 여기서, 기대율은 $A_r = \Lambda_1 / \Lambda = 0.5$ 이다.

Fig. 5. Reflectivity as a function of grating period Λ for TE modes, where the aspect ratio is $A_r = \Lambda_1 / \Lambda = 0.5$.

같다.

$$\Gamma = \frac{P_{ref}}{P_{in}} = \frac{Z_{in} - Z_2}{Z_{in} + Z_2} \quad (13)$$

여기서, Z_{in} 은 입력 단 ($z=0$)에서 들여다본 그 입력 임피던스 (input impedance)를 나타낸다.

위의 식 (13)에 정의된 반사도의 특성을 분석하기 위하여 먼저 $N=500$ 개의 격자로 구성된 길이 NA 인 DFB 도파로의 그 반사도 (reflectivity) $|\Gamma|^2$ 를 분석하였다. 그림 5에서 보듯이 입력 단에서 입사된 진행파의 97.8%가 1차 Bragg 조건 ($\Lambda=836.1 \text{ nm}$)에서 약 5 nm 정도의 협 대역 (narrow band)특성을 나타내며 반사되었다.

다음으로 우리는 격자구조 (기대율)에 따른 반사도의 변화를 수치 해석하였다. 그림 6은 격자의 개수

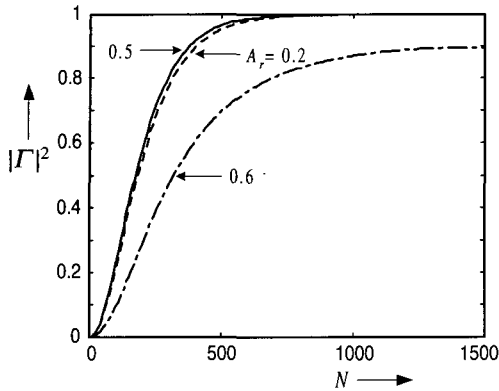


그림 6. 기대율 A_r 과 격자의 개수 N 에 따른 최대 반사도의 변화.

Fig. 6. Variation of maximum Reflectivity along the number of grating N and aspect ratio A_r .

를 0 개부터 1500 개 까지 변화하였을 때 DFB 도파로의 최대 반사도를 살펴본 그림이다. 여기서, 기대율 (aspect ratio)은 $A_r = A_1 / A_2$ 로 정의되었다. 그림에서 보듯이 홈이 패인 부분 (길이 A_1)과 홈이 패이지 않은 부분 (길이 A_2)의 폭 (width)이 같은 기준 (critical) 기대율 ($A_r=0.5$)에서의 최대 반사도는 $N=800$ 개의 격자로 구성된 DFB 도파로에서 완전 반사 $|\Gamma|^2 \approx 1$ 가 발생하였다. 또한, 기대율이 기준 기대율보다 작은 경우 ($A_r=0.2$) 최대 반사율은 기준 기대율에서의 반사 특성과 거의 변화가 없었다. 즉, 홈이 패이지 않은 부분 (A_2)의 폭은 증가하여도 DFB 도파로의 반사에 영향을 주는 격자의 특성은 변화가 없음을 나타내는 것이다. 그러나, 홈이 패이지 않은 부분의 폭이 감소하는 $A_r=0.6$ 인 경우 격자의 반사특성이 줄어들어 전력반사도가 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 1, 2 차 Bragg 조건 사이에서 격자주기 Λ 의 변화에 따른 TE 모드의 반사도를 수치해석하였다. 그림 7에서 보듯이 격자의 개수가 $N=10$ (20)인 경우 1 차 Bragg 조건은 $\Lambda=0.835$ (0.836)에서 발생하였으며 2 차 Bragg 조건은 $\Lambda=0.95$ (0.954)에서 발생하였다. 또한, 각 경우에 1, 2 차 Bragg 조건 사이에서 10 개 또는 20 개의 리플 비트 (ripple beat) 패턴들이 나타났다. 비록, 충분한 반사도 (>80 %)를 얻기에는 격자의 개수가 부족하지만 격자 모서리 (edge)의 불연속성 (discontinuity)에 기인한 진행파의 산란 (scattering)특성

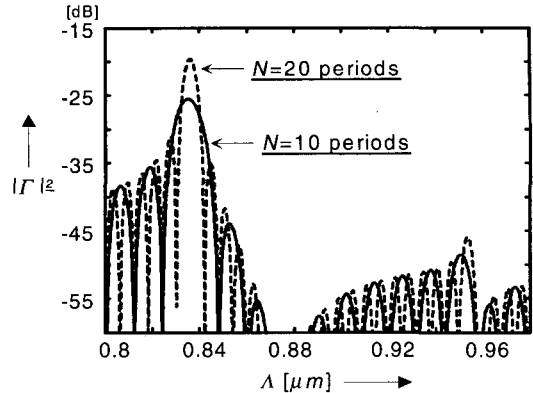


그림 7. 격자주기 Λ 에 대한 TE 모드의 전력반사

Fig. 7. Power reflectivity for TE modes as a function of the grating period Λ .

을 잘 나타내고 있다.

IV. 결 과

Floquet의 정리와 이등분의 원리에 기초한 등가 전송선로 해석법을 이용하여 $\lambda=0.86 \mu\text{m}$ 의 파장에서 일반적인 평면 DFB 구조의 그 광학적 특성을 해석하였다. 수치 해석한 결과 평면 DFB 구조의 분산곡선은 1 차 Bragg 조건 ($\kappa\Lambda=\pi$)에서 저지대역 (stop band)이 나타났으며, $N=500$ 개의 격자로 구성된 DFB 전송구조의 전력 반사도는 약 97.8 %가 되었다. 또한, 기대율이 증가함에 따라 격자구조의 반사도가 현저하게 떨어졌으며 80 %이상의 반사도를 얻기 위하여 기준 기대율에서 보다 2 배의 격자 개수가 더 필요하였다. 더욱이, 1, 2 차 Bragg 조건 사이에서 격자주기 Λ 의 변화에 따른 반사도의 영향을 살펴보았다. 결국, 모드 전송선로 해석법은 평면 DFB 구조뿐만 아니라, 대부분의 주기적인 구조체에서 매우 간편하고, 정확한 수치해석 결과를 제공한다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-wave theory of distributed feedback lasers," *J. App. Phys.*, Vol. 43, pp. 2327~2335, May 1972.

[2] H. Shigesawa and M. Tsuji, "A New Equivalent Network Method for Analyzing Discontinuity Properties of Open Dielectric Waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 37, pp. 3~14, 1989.

[3] P. P. Borsboom and H. J. Frankena, "Field Analysis of Two-Dimensional Integrated Optical Gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 12, pp. 1134~1141, 1995.

[4] W. L. Weeks, *Electromagnetic Theory for Engineering Applications*, pp. 167-173, John Wiley & Sons, Inc, 1963.

[5] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, pp. 373-382, John Wiley & Sons, Inc, 1990.

[6] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," 전자공학회지 7월호 게재 예정, 1998.

[7] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*, pp. 187-190, IEEE Press, 1994.

저 자 소 개

金 竣 煥 (學生會員)

第 1 卷 第 1 號 論文 97-01-16 參照.

現在 建國大學校 大學院 電子工學科 博士過程 在學 中.

金 映 權 (IEEE senior member)

第 1 卷 第 1 號 論文 97-01-14 參照.

現在 建國大學校 電子·情報通信工學科 教授.

扈 光 春 (會員申請中)



1985 年 2 月 建國대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1987 年 2 月 建國대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1988 年~1990 年 육군사관학교 전자공학과 전임강사. 1993 年 Polytechnic in Brooklyn

ElectroPhysics 졸업(M.S.). 1996 年 Polytechnic Electrical Engineering 졸업(Ph.D). 1996 年~1997 年 Polytechnic Research Associate. 1997 年~1998 年 한국통신 무선통신연구소 선임연구원. 1998 年 현재 한라공과대학교 전자공학과 전임강사.

주관심분야 : 광집적소자 설계 및 해석, 마이크로파 전파특성 해석, 등