

論文 97-34D-7-13

## 기하광학 방법을 이용한 사다리꼴 회절격자의 결합계수 계산

(Calculation of the coupling coefficient for trapezoidal gratings using the ray optics technique)

趙成贊\*, 金富均\*

(Sung-Chan Cho and Boo-Gyoun Kim)

## 요 약

기하광학 방법을 사용하여 사다리꼴 회절격자를 가지는 5층 구조 Distributed Feedback 구조 소자의 결합계수 수식을 TE 모드에 대하여 유도하였다. 기하광학 방법을 사용하여 계산한 결합계수를 비교적 정확한 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 비교하였다. 실제로 제작되는 대부분의 회절격자의 두께와 형태에서는 두 방법에 의한 계산 결과의 차이가 작음을 볼 수 있었다. 사각형 회절격자의 경우는 duty cycle이 0.5에서 멀어질수록, 사다리꼴 회절격자의 경우는 회절격자 주기에 대한 윗변 길이의 비율이 0.5에서 멀어질수록, 그리고 밑변의 길이가 윗변의 길이보다 작을수록 두 방법의 차이가 커짐을 볼 수 있었다. 또한 3층 구조의 경우는 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 상대적 차이비율은 5층 구조보다 현저하게 줄어들었다.

## Abstract

Using the ray optics technique, we derive the analytic expressions of TE mode coupling coefficient for five-layer Distributed Feedback(DFB) structure devices. We compare the coupling coefficient calculated by the ray optics technique with those calculated by the extended additional layer method(EALM) which may be a most accurate method of calculating the coupling coefficient. The difference between the results of the ray optics technique and those of the EALM is small for most cases of grating depth and forms being practically made. In the case of rectangular gratings, the difference increases as the duty cycle of grating deviates from 0.5. In the case of the trapezoidal grating, the difference increases as the ratio of the top to the period of grating deviates from 0.5 and as the length of the top becomes longer than that of the base. The difference of three-layer DFB structures is smaller than that of five-layer DFB structures.

## 1. 서 론

결합계수는 Distributed Feedback(DFB) 구조 소자의 특성을 결정짓는 중요한 파라메타이다.<sup>[1]</sup> 결합 모드 이론을 이용하여 결합계수를 계산하는 대표적인 방법은 같은 면적 방법(equal area method)<sup>[2]</sup>과 새

운 층 방법(additional layer method)<sup>[3,4]</sup>이 있다. 위의 두 방법을 이용하여 결합계수를 계산할 경우 overlap integral이 포함되어 있어 적분과정을 거쳐야 하며 unperturbed 모드의 필드 분포를 어떻게 설정하느냐에 따라 결합계수의 값이 크게 달라진다. 반면 적분과정이 필요 없으며 unperturbed 모드의 필드 분포 선정에 영향을 작게 받는 장점을 가지는 기하광학(ray-optics) 방법을 이용한 결합계수의 계산이 최근에 발표되었다.<sup>[5]</sup>

지금까지 발표된 기하광학 방법을 이용한 결합계수

\* 正會員, 崇實大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University)

接受日字:1997年3月20日, 수정완료일:1997年6月3日

계산은 duty cycle이 0.5인 사각형 회절격자, 이등변 삼각형 회절격자 그리고 정현파 형태의 회절격자에 국한되었었다. Reactive ion etching에 의해 회절격자를 제작할 경우 사다리꼴 회절격자가 생성된다.<sup>[6]</sup> 또한 사다리꼴의 각 변의 크기와 기울기를 변화시키면 사각형과 삼각형 회절격자를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적인 형태인 사다리꼴 회절격자의 결합계수를 계산하는 수식을 기하광학 방법을 사용하여 구하였다. 이 수식을 사용하여 그림 1과 같은 5층 구조 DFB 구조 소자의 결합계수를 TE 모드인 경우에 대하여 사각형 회절격자는 duty cycle의 함수로 그리고 사다리꼴 회절격자는 회절격자 주기에 대한 사다리꼴의 윗변과 밑변 길이 비의 함수로 결합계수를 계산하였다.

기하광학 방법에 의한 결합계수 계산 결과와 비교적 정확한 확장된 새로운 층 방법(extended additional layer method, EALM)<sup>[4]</sup>에 의한 결합계수 계산 결과를 비교하였다. duty cycle이 0.5인 사각형 회절격자, 이등변 삼각형 회절격자 그리고 정현파 형태의 회절격자의 경우 기하광학 방법과 결합모드 이론을 사용하여 계산한 결합계수의 값이 아주 작은 차이를 보인다 알려져있다<sup>[5]</sup>. 그러나 duty cycle이 0.5가 아닌 사각형 회절격자나 사다리꼴 회절격자인 경우 두 방법의 결과는 좀더 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 사각형 회절격자의 경우는 duty cycle이 0.5에서 0과 1쪽으로 갈수록 사다리꼴 회절격자의 경우는 회절격자 주기에 대한 윗변 길이의 비율이 0.5에서 0과 1쪽으로 접근할수록 그리고 밑변의 길이가 윗변의 길이보다 작을수록 두 방법의 차이가 커짐을 볼 수 있었다. 또한 3층 구조의 경우는 5층 구조의 경우보다 두 방법에 의한 결합계수 계산 결과의 차이가 더욱 작아짐을 볼 수 있었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 형태인 사다리꼴 회절격자에 대하여 기하광학 방법을 이용하여 결합계수 수식을 유도하였다. 3장에서는 기하광학 방법에 의한 결합계수 계산 결과를 보였으며 확장된 새로운 층 방법에 의한 결합계수 계산 결과와 비교하였다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺었다.

## II. 수식 유도

그림 1과 같이 5층 구조를 가지는 DFB 구조 소자

의 결합계수는 기하광학 방법에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>[5,7]</sup>

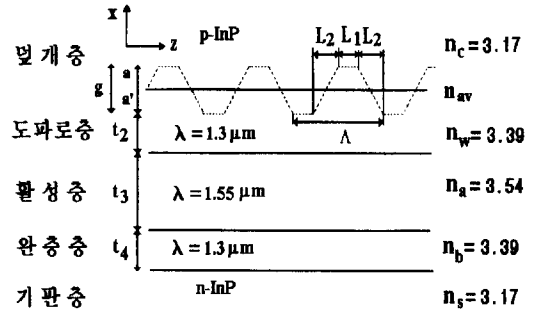


그림 1. 사다리꼴 회절격자를 갖는 5층 구조 DFB 구조 소자의 개념도

Fig. 1. Schematic illustration of a five layer DFB structure with trapezoidal gratings.

$$x = B_m \sqrt{\eta_m} \quad (1)$$

여기서  $B_m$ 은 모드  $m$ 의 bounce rate 이고  $\eta_m$ 은 모드  $m$ 의 회절효율(diffraction efficiency)이다. bounce rate  $B_m$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$B_m = (2 w_m \tan \theta_m)^{-1} = \frac{\sqrt{n_a^2 - n_m^2}}{2 n_m w_m} \quad (2)$$

여기서  $n_a$ 는 활성층의 굴절율이며  $n_m = n_a \sin \theta_m$ 은 모드  $m$ 의 유효굴절율이고  $\theta_m$ 은 모드  $m$ 의 입사각 그리고  $w_m$ 은 광도파로의 유효두께(effective waveguide thickness)이다. 유효두께  $w_m$ 은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$w_m = t_3 + \frac{(\sigma_m^2 - \rho_m^2)XY + \sigma_m^2 \rho_m (\rho_m^2 + q_c^2)(t_2 + 1/q_c)}{\rho_m (\sigma_m^2 X^2 + \rho_m^2 Y^2)} + \frac{(\sigma_m^2 - \rho_m^2)X'Y' + \sigma_m^2 \rho_m (\rho_m^2 + q_c^2)(t_4 + 1/q_c)}{\rho_m (\sigma_m^2 X'^2 + \rho_m^2 Y'^2)} \quad (3)$$

여기서  $t_2$ 는 광도파로층의 두께,  $t_3$ 는 활성층의 두께 그리고  $t_4$ 는 완충층의 두께이며 나머지 변수들은 다음과 같다.

$$\sigma_m = k\sqrt{n_2^2 - n_m^2}, \quad \rho_m = k\sqrt{n_1^2 - n_m^2}, \quad \rho'_m = k\sqrt{n_3^2 - n_m^2},$$

$$q_c = k\sqrt{n_m^2 - n_c^2}, \quad q'_c = k\sqrt{n_m^2 - n_s^2},$$

$$X = \rho_m \cos(\rho_m t_2) + q_c \sin(\rho_m t_2)$$

$$X' = \rho'_m \cos(\rho'_m t_4) + q'_c \sin(\rho'_m t_4)$$

$$Y = \rho_m \sin(\rho_m t_2) - q_c \cos(\rho_m t_2)$$

$$Y' = \rho'_m \sin(\rho'_m t_4) - q'_c \cos(\rho'_m t_4)$$

이다.

TE 모드의 평면파가 활성층과 도파로층의 경계에 크기  $A_0$ 를 갖고  $\theta_m$ 의 각도로 입사하였을때 생성되는 + 1차 회절파(diffracted wave)의 크기를  $a_1$ 로 놓자. 그리고 그림 2와 같이 각층에 존재하는 나머지 성분의 평면파들을 참고문헌 [5]와 같이 놓았다.  $f(z)$ 는 회절격자의 형태를 나타내는 주기함수 이다. 사다리꼴 1차 회절격자의 회절 효율  $\eta_m = |a_{-1} / A_0|^2$  은 다음과 같이 주어진다.

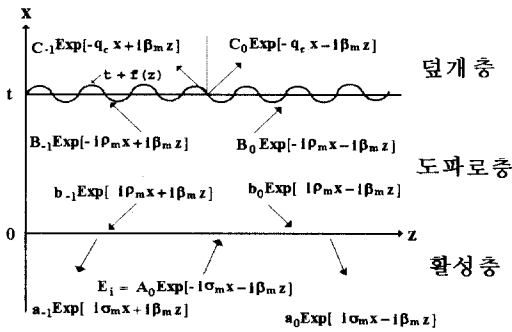


그림 2. 각 층에서의 전계성분  
Fig. 2. Electric field components in each layer.

$$\sqrt{\eta_m} = \frac{8\sigma_m \rho_m (a_c^2 + \rho_m^2) \chi_1}{[\zeta_1(\rho_m^2 Y^2 - \sigma_m^2 X^2) + \zeta_2(\rho_m^2 - \sigma_m^2 Y^2) + 2\zeta_3(\rho_m^2 + \sigma_m^2)XY]^2 + 4\rho_m^2 \sigma_m^2 [2\zeta_4 XY + \zeta_5(Y^2 - X^2)]^2} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \chi_1 = & [(l_1 d_2 + l_3 d_1) \rho_m (a + a') + l_1 a_6 (\rho_m (\bar{d} - a) c_1 + s_1) \\ & + l_1 d_3 (\rho_m (\bar{d} - a) c_1 - s_1) + l_3 a_6 \{ \rho_m (\bar{d} + a') c_1 + s_1 \} \\ & + l_3 d_3 (\rho_m (\bar{d} + a') c_1 - s_1) + d_1 a_3 \rho_m (a - \bar{d}) \\ & + d_2 a_3 \rho_m (\bar{d} + a') + a_3 s_1 (a_6 - d_3) ] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \zeta_1 = & 4\{d_1^2 + d_2^2 - (l_1^2 + l_3^2 + a_3^2 + 2l_1 l_3 + 2l_3 a_3 + 2l_1 a_3) \\ & + 2d_3 a_6 c_1^2 + a_6^2 [c_1^2 - 2\rho_m \bar{d} c_1 s_1] + d_3^2 [c_1^2 + 2\rho_m \bar{d} c_1 s_1] \\ & - 2d_1 d_2 + 2(d_1 - d_2)[(a_6 + d_3)c_1 + (d_3 - a_6)\rho_m \bar{d} s_1]\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \zeta_2 = & 4[ a_6^2 [s_1^2 + 2\rho_m \bar{d} c_1 s_1] + d_3^2 [s_1^2 - 2\rho_m \bar{d} c_1 s_1] \\ & - 2d_3 a_6 s_1^2 + 2\rho_m (a_6 - d_3) s_1 (d_1 a + d_2 a') ] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \zeta_3 = & -4\rho_m [ l_1^2 a - l_3^2 a' + a_3^2 \bar{d} + l_1 l_3 \bar{d} / 2 + l_3 a_3 \bar{d} / 2 + l_1 a_3 (-\frac{3a-a'}{2}) \\ & + 4\{d_1^2 \rho_m a - d_2^2 \rho_m a' + a_6^2 [c_1 s_1 + \rho_m \bar{d} a (c_1^2 - s_1^2)] \\ & - d_3^2 [c_1 s_1 - \rho_m \bar{d} (c_1^2 - s_1^2)] + 2d_3 a_6 \rho_m \bar{d} + d_1 d_2 \rho_m \bar{d} / 2 \\ & - d_2 a_6 [s_1 + \rho_m \bar{d} c_1 - \rho_m a' c_1] + d_2 d_3 [s_1 - \rho_m \bar{d} c_1 + \rho_m a' c_1] \\ & + d_1 a_6 [s_1 + \rho_m \bar{d} c_1 + \rho_m a c_1] - d_1 d_3 [s_1 - \rho_m \bar{d} c_1 - \rho_m a c_1] ] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \zeta_4 = & 2 [ l_1^2 + l_3^2 + a_3^2 + 2l_1 l_3 + 2l_3 a_3 + 2l_1 a_3 ] \\ & - 2[ d_1^2 + d_2^2 + a_6^2 \{ (c_1^2 - s_1^2) - 4\rho_m \bar{d} s_1 c_1 \} + d_3^2 \{ (c_1^2 - s_1^2) + 4\rho_m \bar{d} s_1 c_1 \} \\ & + 2d_3 a_6 \{ c_1^2 + s_1^2 \} - 2d_1 d_2 - 2d_2 a_6 \{ c_1 - \rho_m \bar{d} s_1 + \rho_m a' s_1 \} \\ & - 2d_3 d_3 \{ c_1 + \rho_m \bar{d} s_1 - \rho_m a' s_1 \} + 2d_1 a_6 \{ c_1 - \rho_m \bar{d} s_1 - \rho_m a s_1 \} \\ & + 2d_1 d_3 \{ c_1 + \rho_m \bar{d} s_1 + \rho_m a s_1 \} ] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} l_1 = & L_1 / \Lambda, \quad l_2 = L_2 / \Lambda, \quad l_3 = (1 - l_1 - 2l_2) \\ c_1 = & \cos(l_1 + l_2)\pi, \quad s_1 = \sin(l_1 + l_2)\pi, \quad \bar{d} = (a - a') / 2 \\ d_1 = & \sin[l_1 \pi] / \pi, \quad d_2 = \sin[2(l_1 / 2 + l_2) \pi] / \pi \\ d_3 = & \sin[l_2 \pi + \rho_m g / 2] / (\pi + \rho_m g / (2l_2)) \\ a_3 = & 2l_2 \sin[\rho_m g / 2] / (\rho_m g / 2) \\ a_6 = & \sin[l_2 \pi - \rho_m g / 2] / (\pi - (\rho_m g) / (2l_2)) \end{aligned} \quad (10)$$

수식의 유도과정에서 회절격자의 깊이(=  $a + a'$ )가 아주 작다고 가정하였다. 즉,  $ka \ll 1$ ,  $ka' \ll 1$ 라 가정하여 고차 회절파의 영향을 무시하였으며 따라서  $\cos \rho_m a \approx 1$ ,  $\sin \rho_m a \approx \rho_m a$  라 근사화 했다. 위의 수식에서  $L_1 = 0$  이면 이등변 삼각형 회절격자가 되고  $L_2 = 0$  이면 사각형 회절격자가 된다.

### III. 계산 결과 및 토의

기하광학 방법을 사용하여 그림 1과 같이 5층 구조를 가지는 DFB 구조 소자의 결합계수를 사다리꼴과 사각형 형태의 회절격자에 대하여 계산하였다. 또한 기하광학 방법에 의한 계산 결과를 확장된 새로운 층 방법에 의한 결합계수 계산 결과와 비교하였다. 계산에 사용한 파장은  $1.55 \mu\text{m}$ 이었으며 활성층, 도파로층, 완충층, 뒷개층 그리고 기판층의 굴절율을 각각 3.54, 3.39, 3.39, 3.17, 3.17로 설정하였다<sup>[6]</sup>. 활성층, 도파

로층, 그리고 완충층의 두께는 각각  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.1 \mu\text{m}$ 로 설정하였다.

5층 구조의 DFB 구조 소자를 제작할 경우 보통  $0.02 \mu\text{m}$ 에서  $0.03 \mu\text{m}$  사이의 두께를 갖도록 회절격자를 제작한다. 따라서 사각형 회절격자의 두께가  $0.03 \mu\text{m}$  일 때 사각형 회절격자의 결합계수를 duty cycle의 함수로 계산한 결과를 그림 3에 보였다. 기하 광학 방법에 의한 결합계수와 확장된 새로운 층 방법에 의한 결합계수의 상대적 차이비율은 기하광학 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 차이를 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수로 나눈 값으로 정의하였다. 기하광학 방법의 경우 결합계수 최대값  $111 \text{ cm}^{-1}$ 이 발생하는 지점은 duty cycle이 0.495이고 확장된 새로운 층 방법은 0.51에서  $111 \text{ cm}^{-1}$ 의 최대값을 보인다. 따라서 전체적으로 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법이 차이를 보이며 duty cycle이 0.5일 때 상대적 결합계수 차이비율은 0.008 %로 아주 작으나 이 지점을 기준으로 duty cycle이 0과 1쪽으로 접근할 때 상대적 결합계수 차이비율이 선형적으로 증가하여 duty cycle이 0.2와 0.8 일 때 상대적 결합계수 차이비율은 모두 4.3 % 이었다.

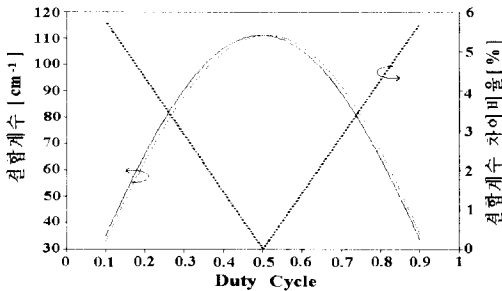


그림 3. 5층 구조에서 회절격자의 두께가  $0.03 \mu\text{m}$  일 때 기하광학방법(실선)과 확장된 새로운 층 방법(점선)을 사용하여 계산한 사각형 1차 회절격자의 duty cycle 에 따른 결합계수와 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 상대적 결합계수 차이비율(굵은 점선)

Fig. 3. First-order coupling coefficient of a rectangular grating calculated as a function of duty cycle using the ray optics technique(solid line) and the extended additional layer method(dotted line) in a five-layer DFB structure. The heavy dotted line is the relative difference ratio of coupling coefficient. Grating depth is  $0.03 \mu\text{m}$ .

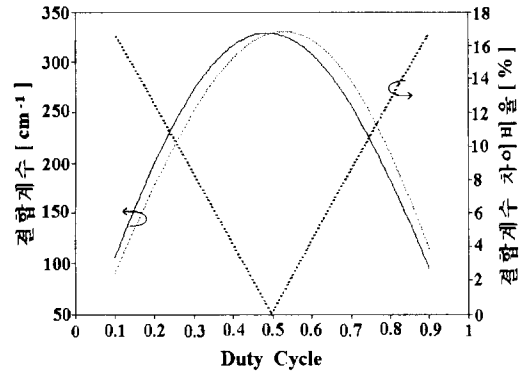


그림 4. 회절격자의 두께가  $0.1 \mu\text{m}$  일 때 기하광학방법(실선)과 확장된 새로운 층 방법(점선)을 사용하여 계산한 사각형 회절격자의 duty cycle 에 따른 결합계수와 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 상대적 결합계수 차이비율(굵은 점선)

Fig. 4. First-order coupling coefficient of a rectangular grating calculated as a function of duty cycle using the ray optics technique(solid line) and the extended additional layer method(dotted line) in a five-layer DFB structure. The heavy dotted line is the relative difference ratio of coupling coefficient. Grating depth is  $0.1 \mu\text{m}$ .

그림 4는 사각형 회절격자의 두께가  $0.1 \mu\text{m}$  일 때 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 두 방법에 의한 결합계수의 상대적 차이비율을 duty cycle의 함수로서 계산한 결과이다. 기하광학 방법은 duty cycle이 0.485 일 때 결합계수의 최대값  $329 \text{ cm}^{-1}$ 가 발생하며 반면 확장된 새로운 층 방법은 duty cycle이 0.53 일 때 결합계수의 최대값  $330 \text{ cm}^{-1}$ 을 보인다. 두 방법의 최대값 발생 지점이 회절격자의 두께가  $0.03 \mu\text{m}$  일 때 보다 더 이동되어 있어 기하광학 방법에 의한 결합계수 계산결과와 확장된 새로운 층 방법에 의한 결합계수 계산 결과가 더 큰 차이를 보인다. duty cycle이 0.5 일 때 상대적 결합계수 차이비율은 0.13 %로 아주 작으나 duty cycle이 0.2와 0.8 일 때 상대적 결합계수 차이비율은 각각 12.5 %와 12.6 %로 큰 값을 보인다.

두 방법의 이러한 차이는 확장된 새로운 층 방법은 도파 모드의 관점에서 결합계수를 계산하였고 기하광학 방법은 평면파라 가정하여 각 층에 두 방향으로 진행하는 여러 성분들을 모두 고려하고 결합계수를 계산하였기 때문이라 생각된다. 또한 기하광학 방법에서는

회절격자의 깊이가 아주 작다고 가정하여( $ka \ll 1$ ,  $ka' \ll 1$ ) 고차회절파의 영향을 무시하였으므로 회절격자의 깊이가 커질수록 두 방법의 차이가 커진다고 생각된다. 두 방법이 차이를 보이는 이유를 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

확장된 새로운 층 방법에서 결합계수의 최대값이 발생하는 지점이 duty cycle 이 0.5인 지점에서 duty cycle이 큰 쪽으로 약간씩 이동되어 있는 현상은 다음과 같이 설명된다<sup>14)</sup>. 결합계수의 크기를 결정하는 것은 perturbation의 정도를 나타내는 푸리에계수  $\Delta\epsilon_q$ 와 전체 광세기 중에서 회절격자 영역에 존재하는 광세기의 비이다. 두 가지 요인중 푸리에계수의 크기가 결합계수의 크기를 결정하는데 큰 영향을 준다. duty cycle이 0.5인 지점의 좌우에서  $\Delta\epsilon_q$ 는 변화가 거의 없으나 duty cycle이 커질수록 회절격자 영역의 유효 굴절율은 커져 전체 광세기 중에서 회절격자 영역에 존재하는 광세기 비가 증가하게 된다. 따라서 결합계수의 최대치는 푸리에 계수의 크기가 최대로 되는 지점에서 회절격자 영역에 존재하는 광세기가 커지는 방향으로 약간씩 이동하여 나타난다. 다시 말하면 결합 모드 이론에 의한 방법은 도파모드가 관점에서 보았기 때문에 회절격자의 기하학적 형태 뿐만 아니라 도파모드의 전개 분포 형태에 따라 결합계수의 값이 영향을 받아 duty cycle 커지는 쪽으로 최대값 발생지점이 이동한다.

기하광학 방법에서 결합계수의 최대값 발생지점이 duty cycle이 0.5에서 이동되어 나타나는 현상은 다음과 같이 설명된다. 회절격자의 회절효율을 활성층에서의 +z 방향으로 진행하는 전진파(forward wave)의 크기  $A_0$ 와 -z 방향으로 진행하는 후진파(backward wave)의 크기  $a_{-1}$  과의 비  $|a_{-1}/A_0|^2$ 로 나타냈다. 따라서 결합계수 값이 최대가 되기 위해서는  $|a_{-1}|$ 의 값이 최대가 되어야 한다.  $|a_{-1}|$ 이 최대가 되기 위해서는 회절격자에 입사하는 전진파  $B_0 \exp[-i\rho_{mx} - i\beta_{mz}]$ 의 0차 회절파의 크기  $b_0$ 는 최소이어야 하고 +1차 회절파의 크기  $b_{-1}$ 는 최대이어야 한다. 다시 말하면 회절격자의 0차 푸리에계수  $|F_0|$ 은 최소이어야 하고 1차 푸리에계수  $|F_{+1}|$ 은 최대이어야 한다.  $|F_0|$ 와  $|F_{+1}|$ 은 duty cycle이 0.5를 기준으로 좌우 대칭 형태를 보이며  $|F_0|$ 은 duty cycle 이 0.5에서 최소이며 duty cycle 이 0과 1로

접근할수록 커진다. 반면  $|F_{+1}|$ 은 0.5에서 최대이며 0과 1로 접근할수록 값이 작아진다. 따라서 전진파  $B_0 \exp[-i\rho_{mx} - i\beta_{mz}]$ 에 의해 발생하는 회절파에 의한 전진파와 후진파의 결합은 0.5에서 최대가 됨을 볼 수 있다.

하지만 그림 2에서 볼 수 있듯이 회절효율의 계산시 후진파인  $B_{-1} \exp[i\rho_{mx} + i\beta_{mz}]$  파를 고려하였다. 물론 이 파의 크기는 작지만 다음과 같이 결합계수 값에 영향을 미친다. -z 방향으로 진행하는  $B_{-1}$  성분이 회절격자에 입사하여 회절 파를 생성할 때 -z 방향으로 진행하는 회절파는 최대가 되고 +z 방향으로의 회절파는 최소가 되어야  $|a_{-1}|$  값이 커져 회절효율을 극대화할 수 있다. 이 경우는 앞의 +z 방향으로 진행하는  $B_0$ 에 의한 것과는 반대로  $B_{-1}$  성분에 의한 0차 푸리에계수  $|F_0|$ 가 최대가 되어야 하고 1차 푸리에계수  $|F_{+1}|$ 이 최소가 되어야  $|a_{-1}/A_0|^2$ 의 회절효율이 최대가 된다. 따라서 이 경우는 duty cycle이 0.5에서 0과 1 쪽으로 멀어질수록 회절효율의 크기를 극대화 할 수 있다.

위에서 살펴보았듯이 회절효율이 최대가 되기 위해서는 상반된 두 가지 조건을 만족하여야 한다. 즉 전진파인  $B_0$ 에 의해 발생하는 -z 방향으로 진행하는 회절파는 duty cycle이 0.5에서 최대가 되며 후진파인  $B_{-1}$ 에 의해 발생하는 -z 방향으로 진행하는 회절파는 duty cycle이 0.5에서 0이나 1쪽으로 멀어질수록 최대가 된다. 따라서 이러한 두 가지 조건을 모두 만족시키기 위해 duty cycle 이 0.5인 지점에서 duty cycle이 0이나 1 쪽으로 이동하여 최대값이 나타나는데 이동범위가 작은 이유는  $B_0$ 보다  $B_{-1}$ 의 크기가 크기 때문이다.

그림 5는 3층 구조에서 회절격자의 두께가  $0.1 \mu\text{m}$ 일 때 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 이용하여 duty cycle의 함수로 계산한 결합계수와 두 방법의 상대적 차이비율을 계산한 것이다. 도파로의 굴절율은 3.54, 덮개층과 기판층의 굴절율은 3.39, 도파로의 두께는  $0.3 \mu\text{m}$ 로 놓고 계산하였다. 확장된 새로운 층 방법에 의한 결합계수 값은 0.53에서  $220 \text{ cm}^{-1}$ 의 최대값이 발생하였으며 기하광학 방법에 의한 결합계수는 0.5에서  $220 \text{ cm}^{-1}$ 의 최대값이 발생하였고 0.5를 기준으로 좌우 대칭이었다. 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 결합계수의 상대적 차이비율은

duty cycle이 0.2와 0.8 사이에서 9.1 % 이하를 보여 5층 구조에서보다 차이비율이 작음을 볼 수 있다.

3층 구조에서는 회절효율을 계산할 때 5층 구조에서처럼  $B_{-1} \exp[-i\rho_m x + i\beta_m z]$ 와 같이  $-z$  방향으로 진행하여 회절격자에 입사하는 성분을 고려할 필요가 없어  $+z$  방향으로 진행하여 회절격자에 입사하는 성분만을 고려하여 회절효율을 구하면 된다. 따라서 기하광학 방법을 사용하여 3층 구조의 결합계수를 계산할 경우 duty cycle이 0.5인 지점에서 최대값이 발생하여 5층 구조 보다 차이비율이 작다.

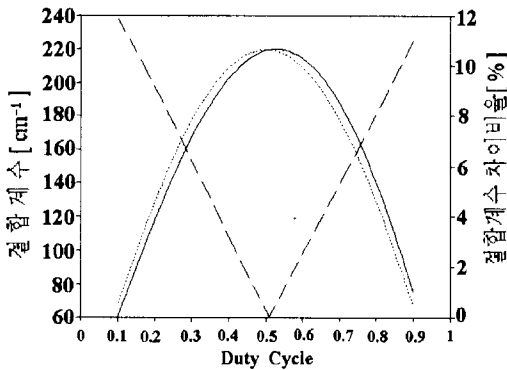


그림 5. 3층 구조에서 회절격자의 두께가 0.1  $\mu\text{m}$  일 때 기하광학방법(실선), 확장된 새로운 층 방법(점선)을 사용하여 계산한 사각형 1차 회절격자의 duty cycle 에 따른 결합계수와 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 결합계수 차이비율(굵은 점선).

Fig. 5. First-order coupling coefficient of a rectangular grating calculated as a function of duty cycle using the ray optics technique(solid line) and the extended additional layer method(dotted line) in a three-layer DFB structure. The heavy dotted line is the relative difference ratio of coupling coefficient. Grating depth is 0.1  $\mu\text{m}$ .

그림 6은 회절격자의 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  일 때 사다리꼴 1차 회절격자의  $L_1/A$ 의 값이 0.25, 0.5, 그리고 0.75 일 때  $L_2/A$ 의 함수로 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 결합계수를 계산한 결과이다. 사각형 회절격자에서와 같이 두 방법에 의한 결합계수의 최대값이 발생하는  $L_2/A$ 의 값이 일치하지 않으며 전체적으로 결합계수 값이 차이를 보임을 볼 수 있다. 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법의 결합

계수 최대값 발생 지점은  $L_1/A$ 가 0.5 일 때 기하광학 방법은  $L_2/A$ 가 -0.005이고 확장된 새로운 층 방법은  $L_2/A$ 가 0.005이며 결합계수의 최대값은 모두 111  $\text{cm}^{-1}$  이었다.

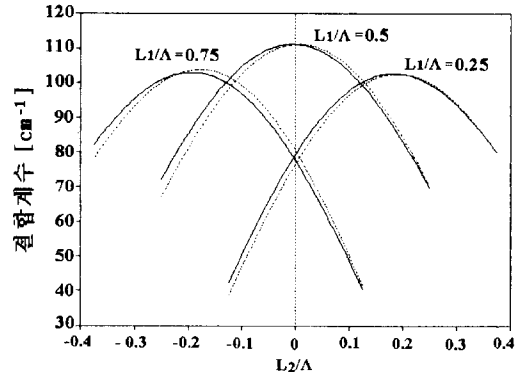


그림 6. 5층 구조에서 회절격자의 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  일 때 기하광학 방법(실선)과 확장된 새로운 층 방법(점선)을 사용하여 여러 개의  $L_1/A$ 에 대하여  $L_2/A$ 의 함수로 계산한 사다리꼴 1차 회절격자의 결합계수

Fig. 6. First-order coupling coefficient of a trapezoidal grating calculated as a function of  $L_2/A$  for various values of  $L_1/A$  using the ray optics technique(solid line) and the extended additional layer method(dotted line) in a five-layer DFB structure. Grating depth is 0.03  $\mu\text{m}$ .

그림 7은 그림 6에서 보인 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결과의 상대적 결합계수 차이비율을 도식한 것이다.  $L_1/A$ 가 0.5 일 때는 직각사각형 형태에 가까울수록 상대적 결합계수 차이비율이 0에 접근함을 볼 수 있다. 또한  $L_1/A$ 가 0.25와 0.75 일 때는  $L_2/A$ 의 값이 커져도 상대적 결합계수 차이비율이 작아지는 구간을 볼 수 있다.  $L_2/A$ 가 양수인 영역에서는  $L_1/A$ 가 0.5 일 때는 1.5% 이하  $L_1/A$ 가 0.75 일 때는 3.7% 이하  $L_1/A$ 가 0.25 일 때는 3.6% 이하의 매우 작은 결합계수 차이비율을 보인다. 반면 음수인 영역에서는 두 방법이 전체적으로 큰 차이를 보인다.

그림 8은 사다리꼴 회절격자의 두께가 0.1  $\mu\text{m}$  일 때 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결과의 상대적 결합계수 차이비율을 보인 것이

다. 직각사각형 회절격자에서와 같이 회절격자의 두께가 커지면서 두 방법이 좀 더 큰 차이를 보인다.  $L_2/A$ 가 음수인 영역에서는  $L_1/A$ 가 0.75 일 때 상대적 결합계수 차이비율이 0으로 떨어지는 영역을 제외하고 전체적으로 큰 차이비율을 보인다. 반면  $L_2/A$ 가 양수인 영역에서는  $L_1/A$ 가 0.5 일 때는 4.7% 이하  $L_1/A$ 가 0.75 일 때는 11% 이하  $L_1/A$ 가 0.25 일 때는 10.4% 이하의 상대적 결합계수 차이비율을 보인다.

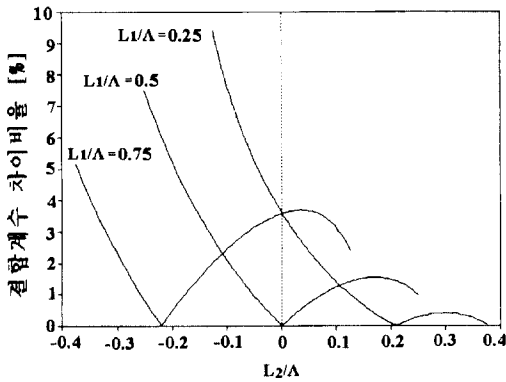


그림 7. 5층 구조에서 회절격자의 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  일 때 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 여러 개의  $L_1/A$ 에 대하여  $L_2/A$ 의 함수로 계산한 사다리꼴 1차 회절격자의 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 상대적 결합계수 차이비율

Fig. 7. The ratio of difference between the coupling coefficient of a trapezoidal grating calculated as a function of  $L_2/A$  for various values of  $L_1/A$  by ray optics technique and those of extended additional layer method to the latter. Grating depth is 0.03  $\mu\text{m}$ .

기하광학 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 차이는 회절격자 형태에 따라 다른 경향을 보이지만 실제로 제작되는 대부분의 회절격자의 두께와 형태에서는 그 차이가 작음을 볼 수 있었다. 사각형 회절격자의 경우는 가장 큰 결합계수를 얻기 위해 보통 duty cycle 이 0.5 가 되도록 제작한다. duty cycle 이 0.4 와 0.6 사이의 값을 가질 때 회절격자 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  와 0.1  $\mu\text{m}$  에서 상대적 결합계수 차이비율은 각각 1.4%와 4.4% 이하이었으며 duty cycle 이 0.5 일 때는 각각 0.008%와 0.13% 이었다. 또한 실제 제작

되는 사다리꼴 회절격자는 윗변의 길이가 밑변의 길이보다 짧으며 회절격자 주기에 대한 윗변 길이의 비율이 0.5 가 되도록 제작하는데 이 경우 사다리꼴이 어떤 형태를 보이든 회절격자의 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  과 0.1  $\mu\text{m}$  일 때 상대적 결합계수 차이비율은 각각 1.5% 와 4.7% 이하이었다. 또한 3층 구조의 경우는 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 상대적 차이비율은 5층 구조보다 현저하게 줄어들었다. 따라서 다층구조 DFB 구조 소자 회절격자의 결합계수를 계산하는데 기하광학 방법은 비교적 큰 오차 없이 빨리 계산할 수 있는 유용한 방법이라 생각된다.

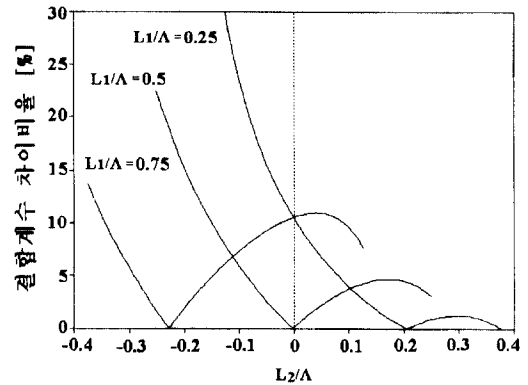


그림 8. 회절격자의 두께가 0.1  $\mu\text{m}$  일 때 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 여러 개의  $L_1/A$ 에 대하여  $L_2/A$ 의 함수로 계산한 사다리꼴 1차 회절격자의 기하광학 방법과 새로운 층 방법의 상대적 결합계수 차이비율

Fig. 8. The ratio of difference between the coupling coefficient of a trapezoidal grating calculated as a function of  $L_2/A$  for various values of  $L_1/A$  by ray optics technique and those of extended additional layer method to the latter. Grating depth is 0.1  $\mu\text{m}$ .

#### IV. 결론

기하광학 방법을 사용하여 도파로층과 덮개층사이 회절격자를 가지는 5층 구조 DFB 구조 소자의 결합계수를 계산하였다. 지금까지 발표된 기하광학 방법을 이용한 결합계수 계산은 duty cycle이 0.5인 사각형 회절격자, 이등변 삼각형 회절격자 그리고 정현파 형태의 회절격자에 국한되었다. 본 논문에서는 기하광학

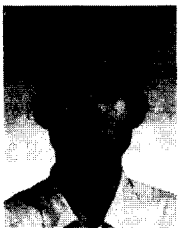
방법을 사용하여 일반적인 형태인 사다리꼴 회절격자에 대하여 결합계수 수식을 유도하였다. 결합계수를 TE 모드인 경우에 대하여 사각형 회절격자는 duty cycle의 함수로 그리고 사다리꼴 회절격자는 사다리꼴의 회절격자 주기에 대한 윗변과 밑변 길이 비의 함수로 결합계수를 계산하였다. 또한 기하광학 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 비교적 정확한 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 결과를 비교하였다.

기하광학 방법을 사용하여 계산한 결합계수와 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 차이는 회절격자 형태에 따라 다른 경향을 보이지만 실제로 제작되는 대부분의 회절격자의 두께와 형태에서는 그 차이가 작음을 볼 수 있었다. 사각형 회절격자의 경우는 가장 큰 결합계수를 얻기 위해 보통 duty cycle 이 0.5 가 되도록 제작한다. duty cycle 이 0.4 와 0.6 사이의 값을 가질 때 회절격자 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  와 0.1  $\mu\text{m}$  에서 상대적 결합계수 차이비율은 각각 1.44 %와 4.35 % 이하이었으며 duty cycle 이 0.5 일 때는 각각 0.008 %와 0.13 % 이었다. 또한 실제 제작되는 사다리꼴 회절격자는 윗변의 길이가 밑변의 길이보다 짧으며 회절격자 주기에 대한 윗변 길이의 비율이 0.5 가 되도록 제작하는데 이 경우 사다리꼴이 어떤 형태를 보이는 회절격자의 두께가 0.03  $\mu\text{m}$  과 0.1  $\mu\text{m}$  일 때 상대적 결합계수 차이비율은 각각 1.53% 와 4.67 % 이하이었다. 또한 3층 구조의 경우는 기하광학 방법과 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 계산한 결합계수의 상대적 차이비율은 5층 구조보다 현저하게 줄어들었다. 따라서 다층구조 DFB 구조 소자 회절격자의 결합계수를 계산하는데 기하광학 방법은 비교적 큰 오차 없이 빨리 계산할 수 있는 유용한 방법이라 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2327-2335, 1972.
- [2] W. Streifer, D. R. Scifres, and R. D. Burnham, "Coupling coefficient for distributed feedback single- and double-heterostructure diode laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-11, no. 11, pp. 867-873, Nov. 1975.
- [3] W. Streifer, D. R. Scifres, and R. D. Burnham, "TM-mode coupling coefficients in guided-wave distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-12, no. 12, pp. 74-78, Dec. 1976.
- [4] 조성찬 김부균 김용근, "확장된 새로운 층 방법을 이용한 사다리꼴 회절격자의 결합계수 계산," 한국광학회지, 제7권 3호, pp. 207-212, 1996년 9월
- [5] H. J. Luo and P. S. Zory, "Ray Optics Determinations of the DFB Coupling Coefficient in Separate Confinement and Multi-quantum-Well Laser Structure," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 10-14, Jan. 1994.
- [6] P. Correc, "Coupling Coefficient for Trapezoidal Grating," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-24, no. 1, pp. 8-10, Jan. 1988.
- [7] D. Marcuse, "Thick Dielectric Grating on Asymmetric Slab Waveguide," *Bell. System Techn. J.*, vol. 56, no. 3, pp. 329-353, Mar. 1977.

## 저 자 소 개



趙成贊(正會員)

1991년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1993년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1995년 9월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 광소자, 광통신 시스템, 광정보장치 등임

金富均(正會員) 第32卷 A編 第3號 參照

1997년 2월 ~ 현재 University of California at Santa Barbara 파견교수