
섭동 현상을 갖는 광 방향성 결합기의 응답 특성의 해석

김선엽* · 박형근*

An Analysis of characteristic response for Optical Directional Coupler with Perturbation Phenomenon

Sun-youb Kim* · Hyoung-keun Park*

요 약

광통신시스템들에서 사용되는 많은 통신용 소자들의 특성은 방향성 결합기(directional coupler)의 구조에 따라 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 방향성 결합기 구조에 섭동현상을 일으킬 수 있는 도파로 구조를 포함시켜 그 특성에 대해 연구를 수행하였고, 또한 도파로 구조를 변화시켰을 때, 얻어지는 특성에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

결과로써, 섭동현상을 일으키는 도파로 구조를 첨가한 방향성 결합기가 광 필터로 동작함을 확인 할 수 있었고, 또한 도파로 구조의 듀티 비를 조절하여 보다 우수한 광 필터로 동작함을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션 결과, 도파로 구조의 듀티 비가 50%인 경우보다 듀티 비가 변화하는 경우가 -18dB정도의 우수한 응답특성을 갖게 됨을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

As for the characteristic of elements for a lot of communication used in light communication systems, it is affected according to structure of directional coupler. We carried out study on a characteristic of the directional coupler which had waveguide structure to have perturbation phenomenon in this paper and ran simulation on the characteristic that we changed structure of directional coupler too, and was got. Confirmation was able to do that it operated with an optical filter, and the directional coupler which added waveguide structure to produce perturbation phenomenon by the results was able to confirm what we adjusted duty ratio of waveguide structure too, and operated with a more excellent optical filter. Through simulation, the case that duty ratio changed than the case that duty ratio of waveguide structure was 50% was able to get an excellent answer characteristic of a -18dB degree.

키워드

Coupler, perturbation, side-lobe, flat-top, filter

I. 서 론

급변하는 산업화와 정보화로 인해 폭발적으로 증가하는 통신사용자들의 정보욕구를 충족시키기 위해 많은 통신방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데 현재

는 광섬유가 갖는 폭 넓은 주파수대역을 효과적으로 이용할 수 있는 광통신시스템이 국가 및 산업의 기간망으로 자리를 잡아 가고 있다[1][2].

현재는 국간 중계 구간에서 사용되는 광통신 망을 가입자 망까지 확대하기 위하여 이른바 FTTH (Fiber-To-The-

Home) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이러한 FITH 시스템에서 사용되는 소자들을 제작하는데 사용되는 기본적인 구조가 방향성 결합기 구조이다. 방향성 결합기는 도파로 1에 입력한 광신호를 도파로 2로 전달하는 역할을 하는 소자이다.[3] 그러나 이러한 방향성 결합기는 광신호를 두 도파로 간에 단순히 전달하는 역할을 수행하는 소자로써, 그 사용분야가 매우 제한되어 있다.

이러한 방향성 결합기 구조의 사용분야를 확대시키기 위한 방안으로 본 논문에서는 이러한 방향성 결합기 구조에 섭동을 일으킬 수 있는 도파로 구조를 첨가하여 그 특성을 해석하였다.

도파로 구조의 듀티 비가 50%인 경우에는 두 도파로 사이에 결합계수(coupling coefficient)의 분포가 일정하기 때문에 결합 강도(coupling strength)의 분포를 해석하는 방법에 대해 연구를 수행하였고, 도파로의 듀티 비를 변화시켰을 때의 나타나는 현상에 대해 연구를 수행하였다.

또한 실제 제작공정에서 이용되는 전자 빔의 노출 시스템의 해상도에 맞추기 위해 격자 주기의 함수들이 연속 함수이므로 실제로 사용하기 위해서는 여러 가지 제한들이 발생하게 된다. 이에 본 논문에서는 격자 주기의 함수를 양자화 시키는 방안의 연구를 통해 절단 가우시안 함수와 해밍 함수를 적용하는 방안에 대해서도 연구를 수행하였다.

II. 섭동을 갖는 도파로 구조의 해석

1. 듀티 비가 50%인 방향성 결합기

그림 1에 보이는 구조는 일반적인 방향성 결합기를 나타내고 있다. 이러한 방향성 결합기에서는 섭동현상이 발생하지 않으므로 식 (1)과 같이 전계 $\vec{E}(x, y, z)$ 을 비섭동 전계 $\vec{e}(x, y)$ 를 이용하여 표현 할 수 있다.

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(z) \exp(-j\beta_i z) e(x, y) \quad (1)$$

식 (1)에서 방사모드들을 무시한 후, 전개하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.[4]

$$E(x, y) = A_1(z) \exp(-j\beta_1 z) e_1(x, y) + A_2(z) \exp(-j\beta_2 z) e_2(x, y) \quad (2)$$

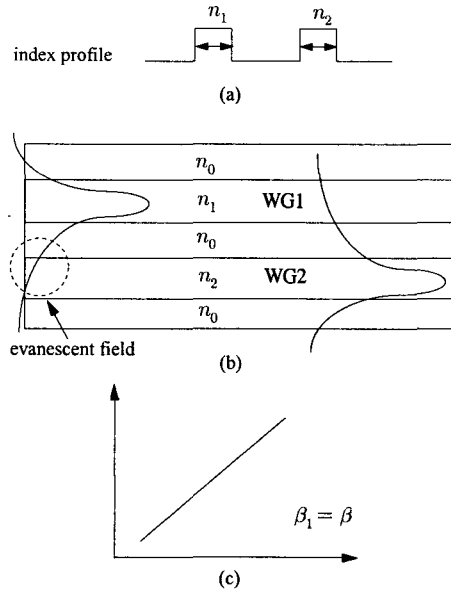


그림 1. 방향성 결합기 개념도. (a) 굴절율 분포 (b) 필드 분포 (c) 파장의 변화에 따른 전파상수
Fig. 1 Schematic diagram of directional coupler. (a) index distribution (b) field distribution (c) propagation constant as a function of wavelength.

그림 2에는 섭동현상을 일으키는 구조가 포함된 방향성 결합기 구조를 보이고 있다. 여기서, $\Delta\epsilon_r(x, y, z)$ 은 식 (3)과 같이 주어진다.

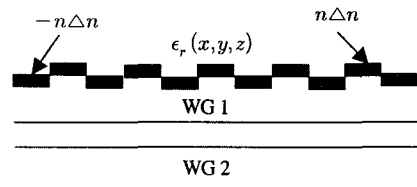


그림 2. 섭동을 갖는 방향성 결합기의 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of directional coupler with perturbation

$$\Delta\epsilon_r(x, y, z) = \begin{cases} n\Delta n & \\ -\frac{g}{2} \leq x \leq 0, & 0 \leq z \leq \frac{A}{2} \\ -n\Delta n & \\ 0 \leq x \leq \frac{g}{2}, & \frac{A}{2} \leq z \leq A \end{cases} \quad (3)$$

$\Delta\epsilon_r(z)$ 이 전파방향으로 주기성을 가지므로 Fourier 급

수로 전개하면 식(4)와 같이 표현할 수 있다.[5]

$$\Delta\epsilon_r(z) = \sum_{m=-\infty, m \neq 0}^{\infty} \epsilon_{rm} \exp\left(-jm \frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (4)$$

식(1)과 식(4)를 파동방정식에 대입하고 직교 정리를 하면 식(5)와 같은 결합방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) &= -j\kappa A_2(z) \exp(j\Delta\beta z) \\ \frac{d}{dz} A_2(z) &= -j\kappa^* A_1(z) \exp(-j\Delta\beta z) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\Delta\beta(\lambda) = \beta_1(\lambda) - \beta_2(\lambda) - \frac{2\pi}{\Lambda} m$$

식(5)로부터 얻어진 이계미분방정식을 풀면 다음의 식(6)과 같이 주어지는 일반해를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1(z) &= [C_1 \sin(sz) + C_2 \cos(sz)] \exp\left(j \frac{\Delta\beta}{2} z\right) \\ A_2(z) &= [C_3 \sin(sz) + C_4 \cos(sz)] \exp\left(-j \frac{\Delta\beta}{2} z\right) \end{aligned} \quad (6)$$

방향성 결합기의 임의의 점 z 에서 모드의 크기를 식(7)과 같이 정의하면, z 에서의 복합모드의 크기는 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$a_i(z) = A_i(z) \exp(-j\beta_i z) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{bmatrix} = \exp\left(-j \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} z\right) T \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$$T_{11} = \left[\cos(sz) - j \frac{\Delta\beta}{2s} \sin(sz) \right] \exp\left(-j \frac{\pi}{\Lambda} mz\right)$$

$$T_{12} = -j \frac{\kappa}{s} \sin(sz) \exp\left(-j \frac{\pi}{\Lambda} mz\right)$$

$$T_{21} = -j \kappa^* \sin(sz) \exp\left(j \frac{\pi}{\Lambda} mz\right)$$

$$T_{22} = \left[\cos(sz) + j \frac{\Delta\beta}{2s} \sin(sz) \right] \exp\left(j \frac{\pi}{\Lambda} mz\right)$$

이 때 $a_1(0) = 1$ 그리고 $a_2(0) = 0$ 이라고 가정하면 $z = L$ 인 경우 WG 2에서 모드크기는 다음식과 같이 쓸 수 있다.[6]

$$|a_2(L)|^2 = \frac{\kappa^* \kappa}{\kappa^* \kappa + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\kappa^* \kappa + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} L \right) \quad (9)$$

윗 식으로부터 길이 L 을 갖는 방향성결합기의 응답은 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(L, \lambda) = \frac{1}{1 + \sigma^2(\lambda)} \sin^2 \left(|\kappa(\lambda)| L \sqrt{1 + \sigma^2(\lambda)} \right) \quad (10)$$

만약, 중심파장 $\lambda = \lambda_c$ 인 경우 WG 1에서 WG 2로 광이 전송될 때에는 다음 식을 만족하면 100%의 광전송이 이루어진다.[7]

$$\sigma(\lambda_c) = 0 \quad (11)$$

$$|\kappa(\lambda_c)|L = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots \quad (12)$$

2. 듀티 비를 변화시킨 방향성 결합기

식(10)의 응답은 σ 의 변동폭이 매우 작기 때문에 방향성 결합기의 응답 $R(L, \lambda)$ 와 $|\kappa(z)|$ 사이에는 간단한 FT 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 결합계수 $|\kappa(z)|$ 가 가우시안 함수형태로 된다면 필터의 응답중 부엽이 급격히 줄어들게 된다.

그림 3에는 방향성 결합기의 결합계수분포를 가우시안 함수 형태로 얻기 위해 WG 1의 듀티 비를 변화시킨 방향성 결합기의 구조를 나타내고 있다.

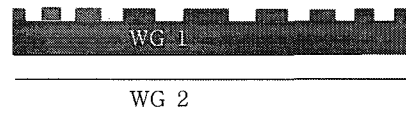


그림 3. 듀티 비를 변화시킨 방향성 결합기의 개략도
Fig. 3 A Schematic diagram of directional coupler with varied duty ratio

그림 3과 같이 듀티 비가 변화하면 방향성 결합기의 결합계수도 다음 식과 같이 변화된다.

$$\kappa^m = j \left[\frac{(n_{dad}^2 - n_{gra}^2)}{\lambda_c \sqrt{n_1 n_2}} \frac{1}{m} \int_{gra} \phi_1^* \phi_2 dx dy \right] \sin\left(\pi \frac{w}{\lambda}\right) \quad (13)$$

3. 듀티 비의 변화에 따른 테이퍼 함수

방향성 결합기의 듀티 비가 50%일 때는 두 도파로의 결합강도가 구형파의 형태를 띄게 되지만 듀티 비가 변화하면 두 도파로 간의 결합강도가 변화하기 때문에 변화된 결합강도를 표현하기 위해 새로운 함수를 사용해야 한다. 이에 본 논문에서는 식(14)로 표현되는 가우시안 함수를 사용하였다.[8]

$$f(z) = 2.267 \exp\left[-\left(\frac{4z}{L}\right)^2\right] \quad -\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2} \quad (14)$$

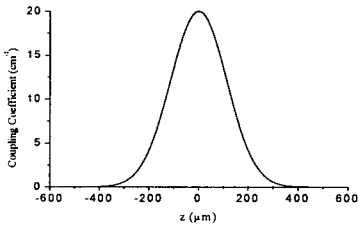


그림 4. 이상적인 가우시안 함수
Fig. 4 Ideal Gaussian function

그림 4와 같은 함수는 연속적인 함수이므로 실제로 적용하는 데는 무리가 따르게 된다. 그러므로 실제 사용되는 시스템의 해상도에 맞추어서 양자화를 하여 사용하여야 한다. 그림 5는 시스템의 해상도에 따라서 연속적인 함수를 양자화한 함수를 나타내고 있다.

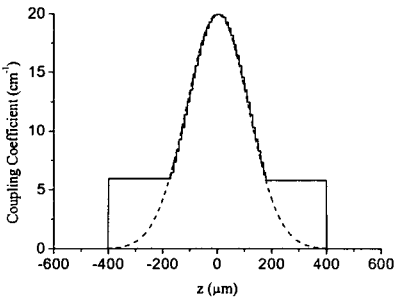


그림 5. 절단 가우시안 함수
Fig. 5 Truncated Gaussian function

III. 시뮬레이션

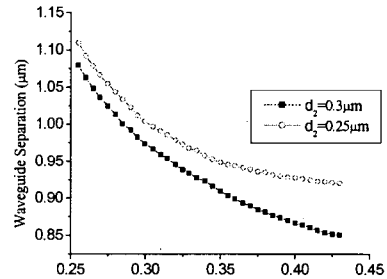
앞에서 검토한 이론들을 바탕으로 그림 3에 보이는 방향성 결합기의 개략도를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 도파로의 굴절을 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 도파로의 굴절을
Table 1. The index of waveguide

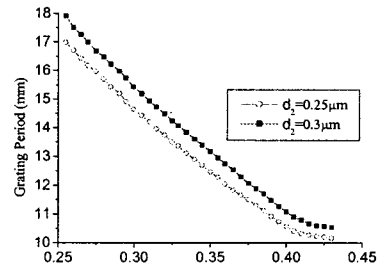
도파로	파라미터	thickness (μm)	굴절율
	클래딩층	2	3.15
	격자	0.03	3.35
	도파로 WG 1	0.33	3.35
	중간층	0.85	3.15
	도파로 WG 2	0.3	3.28
	기판층	3	3.15

표 1에서 보이는 도파로의 굴절을 이용하여 도파로의 두께와 도파로사이의 간격은 방향성 결합기의 길이 L을 결정한 수를 계산해야 한다.

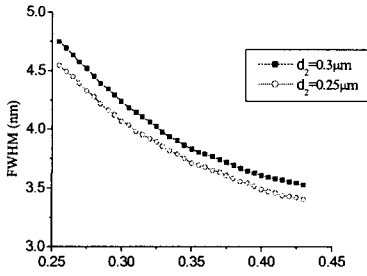
그림 6은 중심파장을 1550μm, 방향성 결합기의 길이를 800μm로 설정하였을 때의 도파로 WG 1과 WG 2사이의 간격 d₂이다.



(a)



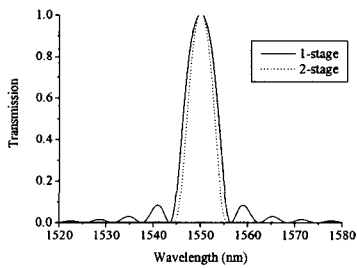
(b)



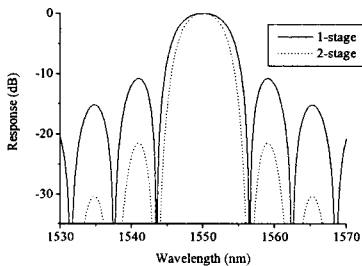
(c)

그림 6. 설계 조건 (중심파장 : 1550nm, 길이 : 800 μm). (a) 도파로 간격 (b) 격자주기 (c) 2-단인 경우의 FWHM

이러한 파라미터들을 이용하여 섭동을 갖는 방향성 결합기의 응답을 계산하였다. 그림 7은 듀티 비가 50%인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 실선은 방향성 결합기를 1개 사용한 결과이고, 점선은 방향성 결합기 2개를 직렬로 연결하여 얻어진 결과를 나타낸다.



(a)

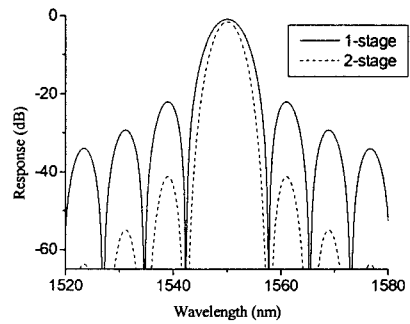


(b)

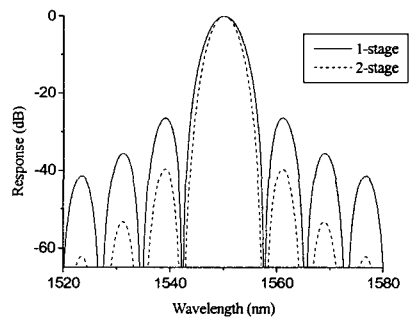
그림 7. 듀티 비가 50%인 방향성 결합기의 응답 (a) 선형응답 (b) 로그응답
Fig. 7 Response of directional coupler with 50% duty ratio (a) Linear response and (b) log response.

위의 그림에서 보이는 바와 같이 방향성 결합기의 SSR이 1단의 경우에는 대략 -11dB, 2단의 경우에는 -21dB로 계산이 되었다. 그러나 이러한 SSR은 실제 광통신 시스템에 적용하기에는 무리가 따르는 매우 좋지 않은 값이라 할 수 있다. 그러므로 본문에서 살펴본바와 같이 duty ratio를 변화시킨 경우에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 8에 보이고 있다.

그림 8은 그림 5의 양자화에 기초하여 필터의 응답을 보인 것이다.



(a)



(b)

그림 8. 절단 가우시안 함수를 이용한 방향성 결합기의 응답 (a) 최소 격자의 폭 : 2 μm (b) 최소 격자의 폭 : 1.5 μm
Fig. 8 Response of the directional coupler using truncated Gaussian function (a) minimum width of grating : 2 μm (b) minimum width of grating : 1.5 μm

실선은 1개의 방향성 결합기를 이용한 결과이고 점선은 방향성 결합기 두 개를 직렬로 연결하여 얻어진 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 방향성 결합기를 2개를 직렬로 연결한 결과의 경우 SSR이 -40dB 이하로 50%의

듀티 비를 갖는 경우보다 많은 개선이 있음을 확인 할 수 있다. 또한 이러한 값은 현재의 광통신 시스템에 적용하기에 무리가 없는 값이다.

지금까지 살펴본 방향성 결합기의 특성은 하나의 채널만을 선택하는 필터로서 사용할 수 있는 경우라 할 수 있다. 그러나 다른 광통신 응용분야에서는 이러한 특성이 불필요한 경우가 존재하는데, 그 중 대표적인 분야는 조밀하게 위치한 파장채널을 동시에 스위칭(*switching*)하는 경우이다. 이런 경우에는 파장대역 전체를 통과시킬 수 있는 응답이 필요하고, *side-lobe*는 앞에서 논의한 것처럼 특정 레벨이하로 억제되어야 한다.

본문에서 방향성 결합기의 결합계수와 광필터 응답간에는 간단한 푸리에 변환관계가 있음을 확인하였다. 그러므로, *sinc* 함수의 푸리에 변환은 구형파 함수이므로 결합계수 분포를 *sinc* 함수로 선택하면, 광필터의 응답 특성이 *flat-top* 형태로 얻어진다.

그림 9는 제안된 방향성 결합기의 *flat-top* 특성을 얻기 위하여 계산된 결합계수의 분포를 보이고 있다.

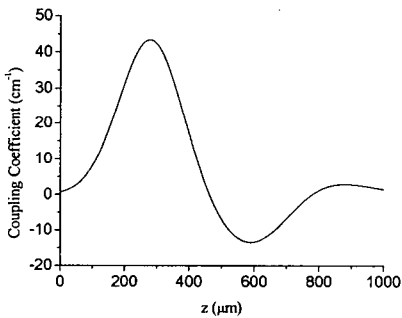


그림 9. *flat-top* 응답을 얻기 위한 결합 계수 분포

Fig 9. Coupling coefficient distribution to achieve *flat-top* response.

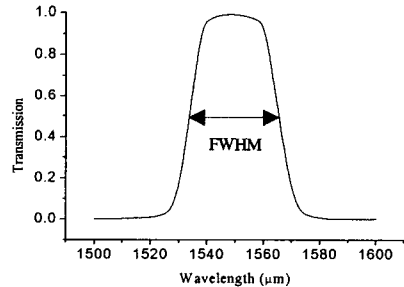
위의 결합계수 분포를 이용하여 본 논문에서 제안한 방향성 결합기의 *flat-top* 특성을 표 2의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과가 그림 10에 보이고 있다. 그림에서 나타난 것처럼 결합계수 분포를 *sinc* 함수로 선택한 GACC 필터의 FWHM은 대략 23nm으로 나타나고 있는데, 필터의 중심파장인 1550nm 근처의 10nm에서 광신호의 95% 이상이 전송이 되고, 나머지 파장의 광신호는 거의 반사됨을 확인할 수 있다. 그리고 이 필터의 SSR은 -13dB정도의 값을 갖는데, 이는 양자화시에 세밀한 양

자화가 이루어지지 못한데 기인한다.

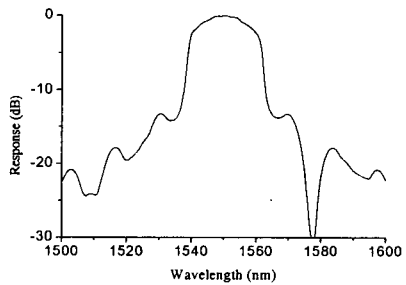
표 2. 도파로 파라미터
Table 2. The parameter of a waveguides

파라미터 도파로	thickness(μm)	굴절율(n)
클래딩층	2	3.18
격자	0.03	3.35
도파로 WG 1	1.2	3.35
중간층	2.3	3.18
도파로 WG 2	0.3	3.28
기판층	3	3.18

다른 연구가에 의한 결과를 보면 -30dB 정도의 값을 갖는 것으로 보고되고 있는데[8], 이는 좀 더 세밀한 양자화 즉, 필터의 끝단에서 절단되는 결합계수값과 양과 부의 값이 교차하는 영역에서의 양자화를 보다 세밀히 하면 -30dB에 근접하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 10. 방향성 결합기의 *flat-top* 특성
(a) 선형응답 (b) 로그응답
Fig. 10 The response of directional coupler

V. 결 론

본 논문에서는 현재의 광통신시스템의 핵심소자를 제작하는데 기본이 되는 방향성결합기에 격자구조를 추가하여 얻어지는 특성에 대해 연구를 수행하였다. 얻어진 결과로써는 첫 번째 격자를 추가하면 도파로 1에서 도파로 2로 전송되는 신호의 대역폭을 조절할 수 있어 필터로 사용할 수 있음을 확인하였고, 또한 격자의 주기를 조절하여 통과되는 광신호가 이웃한 채널과의 누화로 인해 신호가 왜곡되는 현상을 감소시키기 위한 side-lobe의 억제 실현할 수 있음을 확인하였다. 얻어진 시뮬레이션 결과는 50%의 격자 주기를 갖는 방향성 결합기의 경우, 대략 -20dB의 좋지 않은 SSR을 얻은 반면에 격자주기를 조절할 경우에는 -40dB이하의 우수한 SSR을 얻을 수 있었다. 이는 현재의 광통신 시스템에 직접 적용할 수 있는 수치이다.

또한 방향성 결합기의 다른 분야의 응용인 flat-top 특성을 확인하였다.

시뮬레이션 결과 방향성 결합기의 FWHM이 대략 30 μm 로써 광대역 필터로써도 동작함을 확인할 수 있었다.

따라서 앞으로 도래할 FTTH 시스템에 본 논문에서 제안한 방향성 결합기의 격자 도입방법을 이용하면 이웃한 채널과의 누화를 효과적으로 피할 수 있는 우수한 성능의 광필터를 설계하는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 제안된 다른 특성인 flat-top 특성을 효과적으로 이요용할 경우에는 광대역 필터를 설계하는데 효율적일 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] P. E. Green, Jr., *Fiber Optics Networks*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.

- [2] J. C. Palais, *Fiber Optics Communications*, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- [3] C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing network: principles and application", *IEEE J. Select. Areas in Comm.*, vol. 8, pp. 948-964, 1990
- [4] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd ed., Academic, 1994
- [5] D. Marcuse, " Directional couplers made of nonidentical asymmetric slab. II. Grating-assisted couplers," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol 5, pp. 268-273 1987
- [6] Z. M. Chuang, *Widely Tunable Semiconductor Lasers/Receivers Based on Grating-Assisted Codirectional Coupler Filters*, Ph.D. Dissertation, ECE Technical Report, University of California at Santa Babara, 1993.
- [7] D. Marcuse, "Radiation loss of grating-assisted directional coupler," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-26, pp. 675-684, 1990.
- [8] R. C. Alferness and P. S. Cross, "Filter characteristics of codirectionally coupled waveguides with weighted coupling", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, pp. 843-847, 1978.

저자소개

김선엽(Sun-young Kim)

제 9 권 제 5호 참조

박형근(Hyoung-keunpark)

제 9 권 제 1호 참조