

Arrayed Waveguide Grating의 스펙트럼해석

Spectral Analysis of Arrayed Waveguide Grating

정 재 훈

Jaehoon Jung

요 약

Arrayed waveguide grating의 스펙트럼을 해석하기 위해 Fresnel Kirchhoff diffraction 식과 Fraunhofer diffraction 근사식을 이용하여 실제로 제작되는 16채널 및 40채널의 arrayed waveguide grating에 대해 적용해 보았으며 Fraunhofer diffraction 근사식을 적용할 때 생기는 문제점을 모델별로 도출하였고 그 오차를 실제의 공정오차와 비교하였다.

Abstract

We performed the spectrum analysis of arrayed waveguide grating using Fresnel Kirchhoff diffraction formula and its approximated Fraunhofer diffraction equation and applied both methods to 16 channel and 40 channel models. We presented the spectra and found out the limitations of Fraunhofer diffraction in analysis of arrayed waveguide grating and compared the errors coming from Fraunhofer diffraction approximation and due to imperfection during the fabrication process.

Keywords: arrayed waveguide grating, Kirchhoff diffraction, Fraunhofer diffraction

1. 서 론

Wavelength Division Multiplexing (WDM) 광네트워 크에서는 각 소자의 스펙트럼의 모양에 따라 그 성능에 많은 영향을 미치게 된다 [1]. Arrayed waveguide grating (AWG)은 이 WDM 시스템에서 라우터 및 multiplexer, demultiplexer로 중요한 역할을 하는데 이는 파장과 공간의 두 영역에서 동시에 주기적인 성질을 이용한 것이며, hybrid 혹은 monolithic integration을 통해서 다른 소자와 하나의 칩에 집적화도 가능하다 [2], [3]. AWG 스펙트럼의 최적화에 대한 연구도 심도있게 진행되어 Flat-Top 모양의 스펙트럼을 구현한 시도[4,5]도 있었다. 이러한 최적화 과정은 AWG를

modeling하고 해석하는 정확도에 의해 그 성패가 좌우되기 때문에 정확한 해석방법이 필요하다. AWG를 해석하는 방법은 slab 도파로와 입출력 도파로사이의 빔 진행을 해석하는 것을 기준으로 여러 가지로 생각할 수 있는데 beam propagation method (BPM)으로 해석하는 방법[6], Far-Field Gaussian 근사를 이용한 방법 [7], Fourier Optics를 이용한 방법[8] 등이 있다. 우선 BPM으로 해석하는 방법은 매우 정확하게 해석을 할 수 있으나 파장단위의 형상변화까지 해석하려면 너무 긴 계산시간을 필요로 한다. Far-Field Gaussian 근사를 이용한 방법은 물리적인 이해를 위해서는 훌륭한 방법이지만 정밀한 설계를 위해서는 또한 적합하지 않다. 이것을 실제 도파하는 모드를 계산하여 개선한 것이 Fourier Optics를 이용한 방법인데 이는 Guassian 모드 이외에도 실제로 존재하는 모드도 해석할 수 있고 Fast Fourier Transform(FFT) 알고리즘을 이용해 계산시간이 감소한다는 장점이 있다. 하지만 이 또한 Fraunhofer diffraction(FD) 이라는 가정을 한

단국대학교 전기전자컴퓨터공학부
(School of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Dankook Univ.)

接受日:2004年 4月 6日, 修正完了日:2004年 6月 25日

것이기 때문에 한계를 지닐 수밖에 없는데 본 논문에서는 수식에 근사를 사용하지 않은 Fresnel-Kirchhoff diffraction(FKD) formula를 이용하여 근사적인 FD 식의 한계가 무엇인지와 각 채널별 peak 파장 및 bandwidth의 오차와 실제 공정의 변화에 기인한 오차와 정량적으로 비교하였다.

II. Arrayed Waveguide Grating의 Fresnel-Kirchhoff diffraction formula를 이용한 해석과 Fraunhofer diffraction 근사를 이용한 해석

그림 1은 AWG의 개념도를 나타낸 것이다. AWG의 input 도파로에 입사한 빛은 다음의 단계를 거쳐서 output 도파로에 전해지게 된다. 우선 input 도파로에 입사한 빛은 첫 번째 slab 도파로에 거쳐서 도파로열에 입사하게 되고 길이가 상수배 만큼 다른 이 도파로열을 통과하면서 파장마다 다른 위상차를 겪게 되며 이로 인해 도파로의 끝단에 도달한 빛은 파장별로 그 위상이 다르게 된다. 도파로의 끝단에서 다시 두 번째 slab 도파로와 만나며 이를 거쳐 각 파장의 빛은 각기 다른 output 도파로에 도달하게 된다. 이중 input 도파로와 첫 번째 slab 도파로 사이의 영역과 두 번째 slab 도파로와 output 도파로 사이의 영역에서의 빛의 진행을 해석하는 것이 관건이다. 이 영역을 free propagation region 이라 하며 이 영역에서의 빛의 진행은 다음과 같은 FKD 식을 이용하여 해석할 수 있다.

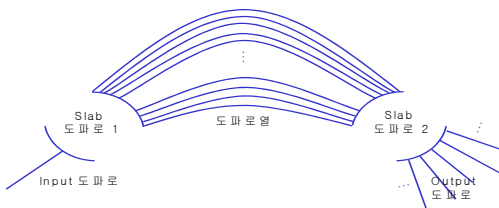


그림 1. Arrayed Waveguide Grating의 개념도
Fig. 1. Diagram of arrayed waveguide grating

$$E(x, y, z) = \frac{jk_n}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0, 0) \frac{1}{r} e^{-jk_n r} dx_0 dy_0,$$

(1)

여기서 (x_0, y_0) 는 도파로의 끝단에서의 좌표이고 r 은 도파로의 끝단에서부터 해석점까지의 거리이며 g 는 도파로내에서의 전계이다. k 는 진공에서의 파수(propagation number)이고 n 은 slab 도파로의 굴절률이다.

통상의 AWG에서는 slab 도파로의 길이 L_f 는 수십 mm에 달하기 때문에 다음의 Far-Field 근사인 FD 영역조건($z \gg \frac{nD^2}{\lambda}$)을 만족하며 이를 근사하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(x, y, z) = f(x, y, z) z \int_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0, 0) \exp\{jkn \frac{(xx_0 + yy_0)}{z}\} dx_0 dy_0, \quad (2)$$

$$f(x, y, z) = \frac{jk_n}{2\pi z} \exp\{-jkn [z + \frac{x^2 + y^2}{2z}]\}$$

여기서 D 는 도파로의 지름이다. 식 (2)의 적분구간내의 함수형태가 g 의 Fourier Transform 형태이기 때문에 이를 Fourier Transform을 이용하여 해석할 수 있다.

그림 2는 40채널, 100GHz AWG에서 input 도파로에서 도파로열에 입사하는 빛의 intensity를 FKD의 식(1)을 직접 적용한 것과 FD의 식으로 근사하여 적용한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우에는 $D=15 \mu\text{m}$, $n=1.45551$, $\lambda=1544.924 \text{ nm}$, $L_f=18832.07 \mu\text{m}$ 이어서 $\frac{nD^2}{\lambda L_f}$ 의 값은 0.0113으로 1에 비해 매우 작아 FD의

조건을 잘 만족시키기 때문에 FKD식으로 정확하게 구한 것과 FD의 식으로 구한 intensity 분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

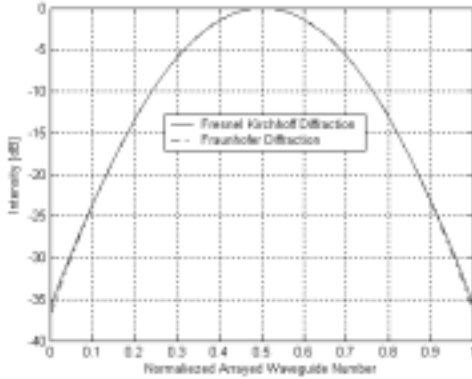


그림 2. 첫 번째 FPR에 입사하는 빛의 Intensity의 비교

Fig. 2. Comparison of optical intensities at the end of the first FPR

그런데 AWG의 두 번째 slab 도파로와 output 도파로 사이의 빛의 진행에서는 FD의 근사식을 이용하면 오차가 생길 수 있다. 그림 3(a)와 3(b)는 실제의 도파로 형상과 FD식에서 가정하는 도파로의 형상을 나타낸 것이다. 즉 FD의 식 (2)를 이용하여 Fourier Transform을 하게 되면 그림 3(b)와 같이 도파로이 선형적으로 분포되어 있음을 가정하는 것이기 때문에 실제의 형상과 차이가 날 수 밖에 없고 AWG의 채널 수가 증가하게 되면 도파로열의 개수도 증가하게 되는데 이 경우에는 FD의 가정을 심각하게 훼손할 수 있기 때문에 출력 파형에 문제를 야기할 수 있다. 즉, z의 영역에는 FD의 근사가 유효하여 단일 도파로에 입사한 빛의 경우에는 그림 2와 같이 그 근사가 참값과 거의 동일한 값을 나타내지만 여러 개의 도파로로 입사한 빛의 경우에는 도파로의 열이 실제로 선형적으로 배치되어 있지 않은 경우에는 참값과 오차를 낼 수밖에 없는 것이다. 이러한 이유로 다수의 도파로열에서 slab 도파로를 통해 빛이 전파하는 경우 즉, AWG의 output 도파로에 입사하는 slab 도파로에서의 빛의 진행의 해석에서 오차가 발생하고 또한, 입력이 다수가 되는 $N \times N$ 라우터 형태의 AWG에서도 해석의 문제점이 발생할 수 있다. 다음 절에서는 실제 제작되고 있는 16채널, 40채널 AWG 제품에 대해 이 두 가지 방법을 적용하여 스펙트럼의 차이를 나타내고 오차가 어떤 조건에서 증가하는지와 그 원인에 대해 논하고자 한다.

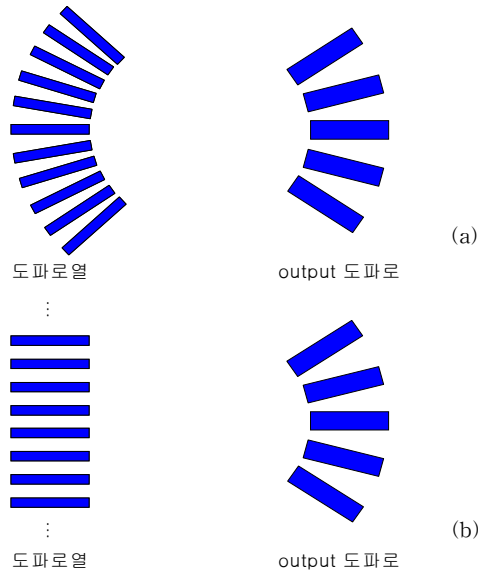


그림 3. (a) Arrayed waveguide grating의 도파로열과 두 번째 slab 도파로의 실제 형상

(b) Fraunhofer Diffraction에서 가정한 도파로열과 두 번째 slab 도파로의 형상

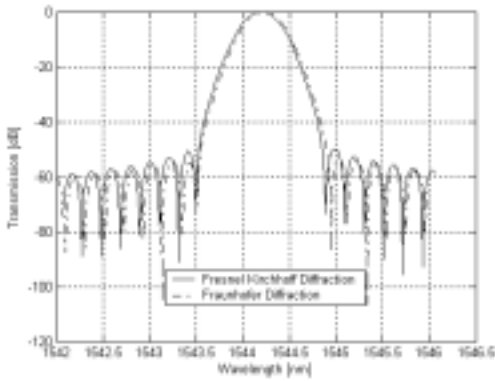
Fig. 3. Geometry of the array waveguide and second slab waveguide

(a) in the actual form and (b) in the FD formulation

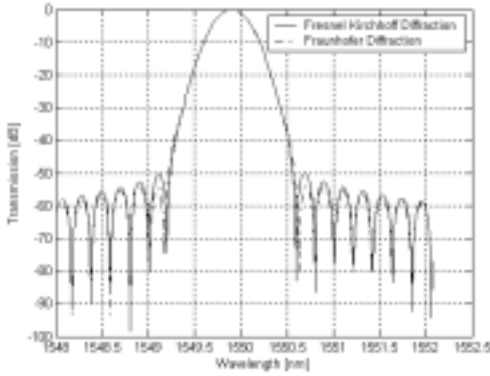
III. Simulation 결과 및 토의

그림 4(a)는 16채널 100GHz의 AWG에서 1번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 스펙트럼을 비교한 것이다. FD의 식을 적용한 결과 중심파장이 설계파장에 비해 0.03 nm 장파장쪽으로 이동한 것을 알 수 있다. 그림 3(a)의 형상을 지닌 물체에서는 그림 3(b)의 형상 물체에 비해 특정의 파장은 중심으로 더 잘 향하게 되므로 FD의 식을 적용하는 경우에는 peak 파장이 장파장으로 이동하게 되는 것이다. 즉, 선형적으로 배열되어 있는 도파로열에서 나오는 빛들은 원주에 분포되어 있는 도파로열에 비해 동일한 파장이더라도 output 도파로에서 먼 쪽으로 빛이 모이게 되는 것이다. 그림 4(b)는 16채널 100GHz의 AWG에서 8번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 스펙트럼을 비교한 것이다. peak 파장은 정확하게 일치함을 알 수 있다. 이

와 같이 중심채널에서 나타나지 않거나 미약하게 나타났던 오차도 가장자리 채널에서는 그 값이 커짐을 알 수 있는데 이는 도파로열의 위치의 오차에 기인한 위상의 오차가 가장자리 채널로 갈수록 증가하기 때문이다.



(a)



(b)

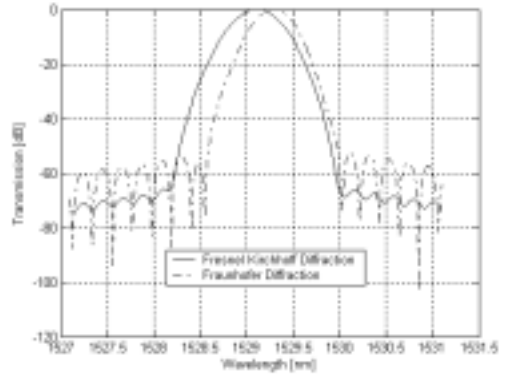
그림 4. (a) 16채널 AWG에서 1번 채널의 스펙트럼 비교

(b) 16채널 AWG에서 8번 채널의 스펙트럼 비교

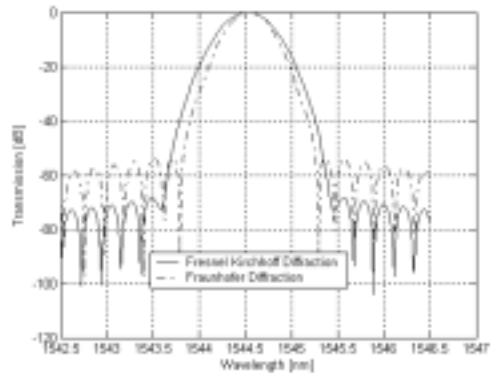
Fig. 4. Comparison between the spectra of (a) the edge channel, and (b) the central channel in 16-channel 100 GHz AWG

그림 5(a)는 40채널 100GHz 의 AWG에서 1번 채널에 대하여 FKD 와 FD의 식을 적용한 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림 4(a)에서처럼 peak 파장의 이동이 나타나고 그 값도 더욱 커진 것을 알 수 있다. 중심파

장이 설계과장에 비해 0.18 nm 장파장쪽으로 이동한 것을 알 수 있다. 이는 40채널이 되면서 도파로열의 개수가 늘어나 그 오차도 증가하기 때문이다. 16채널에서의 도파로열의 개수는 151이고 40채널에서는 291이다. 그림 5(b)는 40채널 100GHz 의 AWG에서 20번 채널에 대하여 FKD 와 FD의 식을 적용한 스펙트럼을 비교한 것이다. peak 파장의 차이는 0.02 nm이다.



(a)



(b)

그림 5. (a) 40채널 AWG에서 1번 채널의 스펙트럼 비교

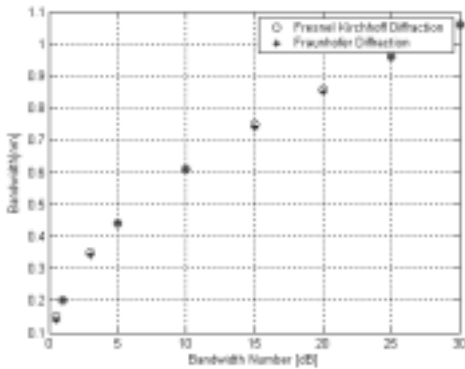
(b) 40채널 AWG에서 20번 채널의 스펙트럼 비교

Fig. 5. Comparison between the spectra of (a) the edge channel, and (b) the central channel in 40-channel 100 GHz AWG

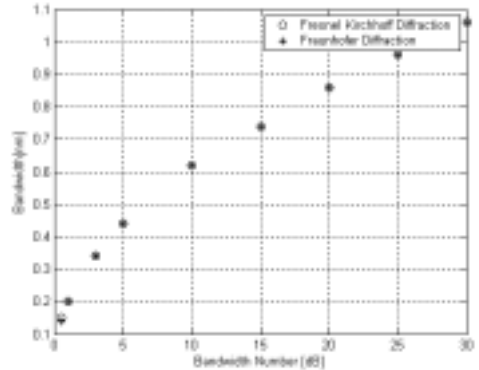
AWG의 중심파장은 여러 요인에 의해 결정되는데 설계가 정확하다고 해도 공정의 불안정성에 의한 silica

굴절률의 변화, 부정확한 식각에 의해 나타나는 빛의 위상의 변화 등에 의해 설계치에서 벗어날 수 있다. 통상적으로 AWG에 대해 중심파장의 정확도를 ± 0.05 nm 정도를 요구함을 고려해 볼 때, 본 연구에서 적용한 40채널의 AWG의 설계에 대해서는 설계치의 오차가 이미 이를 초과하게 되어 FD의 식을 적용하는 것은 파장정확도에 심각한 영향을 줄 수 있다.

그림 6(a)는 16채널 100GHz의 AWG에서 1번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 bandwidth를 비교한 것이다. 두 결과가 거의 비슷한 값을 나타내고 있지만 FD의 식을 적용한 결과 3dB bandwidth 기준으로 0.01nm 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(a)의 형상을 그림 3(b)처럼 모델링하면 output 도파로에서는 실제보다 위상이 급격하게 변화하게 계산되므로 보다 급격하게 스펙트럼이 줄어들게 되어 bandwidth가 감소하게 되는 것이다. 그림 6(b)는 16채널 100GHz의 AWG에서 8번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 bandwidth를 비교한 것이다. 이 경우에는 0.5dB인 경우를 제외하고는 30dB까지 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. 즉 16채널의 중심채널에서는 FD의 근사가 완벽하게 참값을 재현해 내고 있음을 알 수 있다.



(a)



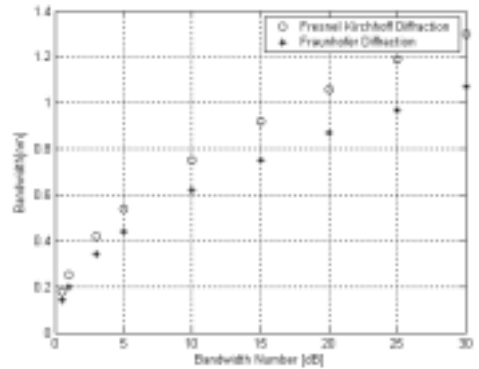
(b)

그림 6. (a) 16채널 AWG에서 1번 채널의 Bandwidth 비교

(b) 16채널 AWG에서 8번 채널의 Bandwidth 비교

Fig. 6. Comparison between the bandwidths of (a) the edge channel, and (b) the central channel in 16-channel 100 GHz AWG

그림 7(a)는 40채널 100GHz의 AWG에서 1번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 bandwidth를 비교한 것이다. FD의 식을 적용한 결과 3dB bandwidth 기준으로 0.08 nm 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 40채널 100GHz의 AWG에서 20번 채널에 대하여 FKD와 FD의 식을 적용한 bandwidth를 비교한 것이다. 3dB bandwidth에서의 값의 차이는 0.06 nm이다.



(a)

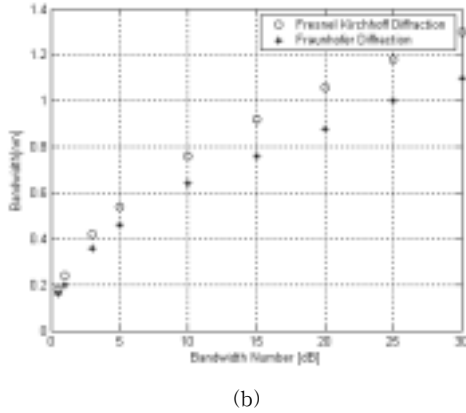


그림 7. (a) 40채널 AWG에서 1번 채널의 Bandwidth 비교
 (b) 40채널 AWG에서 20번 채널의 Bandwidth 비교
 Fig. 7. Comparison between the bandwidths of (a) the edge channel , and (b) the central channel in 40-channel 100 GHz AWG

bandwidth의 차이를 AWG의 제작공정에서의 공정오차와 비교해보자. 3dB bandwidth는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [8].

$$BW_{3dB} = \frac{2 * d_w f_0 n_s}{\lambda L_f m} w_o \sqrt{2 \ln(10^{3/20})} \quad (3)$$

d_w 는 도파로열의 간격 , f_0 는 중심주파수, n_s 는 slab 도파로의 굴절률, m 은 diffraction order, w_o 는 output 도파로의 폭이다. 식각공정에서 통상적으로 $\pm 1 \mu\text{m}$ 정도의 오차는 발생할 수 있다고 하고 다른 파라미터의 값은 동일하게 유지했다고 가정하면 본 연구에 적용한 40채널의 AWG($w_o = 21 \mu\text{m}$)에서의 오차는 $1/21=4.76\%$ 이다. 본 40채널 AWG의 3dB bandwidth의 specification이 0.38 nm인데 그 오차를 비교하면 $0.08/0.38=21.05\%$ 가 된다. 즉, FD의 식을 설계시 적용하면 AWG 제작 공정상에서 통상적으로 일어나는 오차에 기인한 bandwidth의 변화폭 보다 4배 이상 큰 오차를 발생시킨 것이다. 이를 통하여 유추하여 보면, 통상적으로 제작되는 40채널용 AWG에는 FD의 근사를 적용할 경우 파장정확도는 그 specification을 초과하고 bandwidth는 제작공정시 발생할 수 있는 오차보

다 4배보다 큰 오차를 야기하므로 FDK을 근사없이 사용하는 방법을 사용하는 것이 타당하다 할 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 AWG의 스펙트럼을 해석하기 위해 FDK 식을 이용하는 방법과 이를 근사한 FD 식을 이용하는 방법을 비교하고 그 한계를 제시하였다. 일반적으로 AWG의 해석에서는 FD 식의 근사조건이 성립하나 다수의 도파로열에서 진행하는 빛을 해석하면 오차가 발생하게 된다. 그 경향은 동일한 AWG에서는 가장자리 채널로 갈수록 스펙트럼의 오차가 증가하며 채널수가 증가하여 도파로열의 개수가 증가할수록 오차가 증가한다. FDK 식과 FD 식을 적용하여 비교한 결과, 16채널에서 가장자리 채널에서 peak 파장은 0.03 nm, bandwidth 는 3dB 기준으로 0.01nm의 오차를 보이며, 40채널에서는 가장자리 채널에서 peak 파장은 0.18 nm bandwidth 는 3dB 기준으로 0.08nm의 오차를 발생시켰다. 오차의 방향은 peak 파장은 중심채널 peak 파장방향으로, bandwidth는 줄어드는 방향이다. 이는 AWG 제작공정시 silica 굴절률의 변화, 부정확한 식각에 의해 나타나는 빛의 위상의 변화 등에 의해 발생할 수 있는 peak 파장의 허용치 $\pm 0.05 \text{ nm}$ 를 초과하고 있으며 또한, 제작 공정상에서 통상적으로 일어나는 식각공정의 부정확성에서 기인한 bandwidth의 변화폭의 한계치 보다 4배 이상 큰 오차를 발생시킨 것이다. 따라서 40채널이상의 AWG, $N \times N$ 라우터 형태의 AWG의 설계시에는 FDK 식을 근사없이 적용하는 방법을 택하는 것이 타당하다 할 것이다. 또한 특정의 가정이 포함되지 않아 slab 도파로를 포함한 다른 기하학적인 형상이 변화에도 적용할 수 있는 방법이어서 그 응용의 폭이 넓다고 할 수 있다.

감사의글

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

[1] C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications," *IEEE J Select. Areas Commun.*, vol. 8, pp. 948-964, 1990.

[2] M. Smit, "New focusing and dispersive planar component based on an optical phased," *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 385-386, Mar. 1988.

[3] C. Dragone, C. Edwards, and R. Kistler, "Integrated optics NN multiplexer on silicon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 896-898, Oct. 1991.

[4] Y. P. Ho, H. Li, and Y. Chen, "Flat channel passband wavelength multiplexing and demultiplexing devices by multiple Rowland circle design," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 342-344, Mar. 1997.

[5] C. Dragone, T. Strasser, G. A. Bogert, L. W. Stulz, and P. Chou, "Waveguide grating router with maximally flat channel passband produced by spatial filtering," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 15, pp. 1312-1314, July 1997.

[6] W. P. Huang, C. Xu, S. T. Chu, and S. K. Chaudhuri, "The finite-difference vector beam propagation method: Analysis and assessment," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 295-305, 1992.

[7] M. K. Smit and C. van Dam, "PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications," *IEEE J Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 2, pp. 236-250, June 1994.

[8] P. Munoz, D. Pastor, and J. Capmany, "Modeling and Design of Arrayed Waveguide Gratings," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 661-674, 2002.

저 자 소 개

정 재 훈 (鄭 載 勳)



1994년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

1996년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

2000년 8월 : 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사).

2000년 8월 ~ 2003년 2월 : 삼성전자 정보통신총괄 광사업부 근무

2003년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 전임강사 재직중.

< 주관심 분야는 광소자, 광통신 소자, 및 광섬유 센서 등임 >