

0.75 Δ % 굴절율차를 가진 40채널 광파장 다중화 및 역다중화 소자 제작 및 특성

문형명[†] · 최기선 · 이길현 · 김동훈 · 이지훈 · 이동환 · 오진경 · 박승찬 · 권오관 · 강동수

(주)피피아이

☎ 500-470 광주시 북구 대촌동 958-1

최준석

전남대학교 물리학과

☎ 500-757 광주광역시 북구 대촌동 958-10

정건 · 이현용

전남대학교 응용화학공학부 광전자화학소재전공

☎ 500-757 광주광역시 북구 대촌동 958-10

박만용

한국전자통신연구원

☎ 305-350대전시 유성구 가정동 161

(2005년 12월 24일 받음, 2005년 3월 30일 수정본 받음)

0.75 Δ %의 평판광회로(PLC; Planar Lightwave Circuit)소자의 설계 및 제작기술을 가지고 저손실과 높은 누화율을 가진 파장 다중화 및 역다중화 소자를 개발하였다. C-band AWG(Arrayed Waveguide Grating)에서의 삽입손실은 2.5dB이하, 누화율은 35dB이상, 균일도는 1dB이하이며 L-band에서는 Vernier 디자인을 적용하여 ITU-T의 파장 정확도가 0.04nm이하가 되도록 제작하였다.

주제어 : Optical devices, Multiplexing, Waveguides planar.

I. 서 론

최근 파장분할 다중화 소자(WDM: Wavelength Division Multiplexer)는 광통신시스템에서 전송용량을 증가시키기 위한 가장 기대되는 기술의 하나가 되었다. WDM은 하나의 광도파로 내에서 다른 파장을 갖는 신호를 다중화하여 전송하고, 수신단에서 파장에 따라서 신호를 분리(역다중화)함으로써, 광섬유의 전송용량을 증가시킬 수 있도록 하는 전송방법을 말한다. WDM 방식의 광전송은 넓은 광주파수 대역을 각각의 통신채널로 나누어 각 채널마다 광신호를 전송하는 방법으로서, 정보전송 용량을 획기적으로 증가시켜 주었으며, 이와같은 전송방식은 광 집적회로의 기술발전에 의하여 가능하게 되었다.

WDM의 장점은 한 광섬유에 서로 다른 파장의 여러 신호의 흐름을 가능하게 함으로 부가적인 광섬유의 설치없이 기존 광선로의 용량을 증가시킬 수 있다는 것이다. 현재까지 광통신용으로 개발된 WDM 기술은 주로 프리즘이나 회절격자, 유전체 다층필터 등 각종 미세 광부품을 이용한 미세광학 WDM과 용융형 광섬유 커플러 기술을 이용한 WDM 광섬유 커플러, 평판상에 형성된 PLC 등이 있다.

WDM용 PLC는 두개의 광의 간섭을 이용한 Mach-Zender 간섭계를 연결하여 만든 방식과 배열 도파로 다발들을 이용하여 회절에 의한 각 분산을 이용한 방법, Bragg grating을 이용한 방법 등이 있다. AWG의 경우 다수개의 WDM을 동일 기판상에 집적 할 수 있으며 채널 주파수나 채널의 대역폭 등의 조절이 가능하고 Fabry-Perot형 광필터 등의 다양한 광소자의 집적성 및 공간상에서 할 수 없는 고회절차수(50차 이상)를 이용하여 분해능을 높일 수 있는 등의 장점이 있어서 고속 광통신용 고밀도 WDM의 제조에 응용되고 있다.^[1]

이와 같은 PLC형 AWG의 제작은 반도체나 폴리머 박막 등을 이용하여 연구가 진행되고 있으며, 특히 실리카를 이용한 WDM 광집적회로는 안정성, 고성능 및 소형화가 가능하며, 낮은 삽입손실, 설계유연성, 고신뢰성 및 높은 재현성 때문에 WDM 광소자를 제조하는 유용한 방법 중에 하나다.

파장 다중화 소자를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 최적화하여 제작한 마스크를 적용하였다. 최적화된 박막증착 공정을 이용하여 base층과 core층 굴절율차를 0.75%를 가진 실리카 광도파로 박막을 제작하였으며 포토리소그라피 공정 및 ICP(Inductively Coupled Plasma) etcher를 이용한 식각공정을 통하여 40채널 AWG를 제작하고 그의 특성을 평가하였다.

[†]E-mail: moonhm@ppitek.com

II. 본 론

2.1. AWG WDM 구조

AWG WDM 소자는 두개의 slab과 경로차 ΔL를 갖는 도파로 다발들로 구성되어 있다. 입력단의 파장 다중화된 광은 첫 번째 도파로 slab에서 각각의 도파로 다발들로 동위상으로 입사되며, 도파로 다발에서는 각도파로를 따라 진행하면서 도파로간의 경로차 ΔL에 의하여 일정한 위상차(phase shift)가 생기고 두번째의 slab 도파로의 입력단에 도달한다. 이때 각각의 도파로는 Rowland circle^[2,3]상에 존재하게 되며 두 번째 평판 도파로를 진행하면서 파장에 따른 각 분산에 의하여 특정한 각도에 있는 출력 포트를 선택하게 된다. 이때 grating line과 focal line은 Rowland circle에 위치하게 된다. 그림 1은 AWG의 구조도이다. 두개의 slab 도파로와 가운데 배열도파로 및 양쪽에 입출력단이 있다.

2.2. AWG의 설계

AWG를 회절격자 관점에서 보면 다음의 격자방정식을 만족한다. 여기서 광은 중앙의 포트로 입사되었다고 가정한다. 그러면 AWG는 다음의 회절격자 방정식을 만족한다.

$$n_c d \sin \theta_i + n_c \Delta L + n_s d \sin \theta_j = m \lambda \quad (1)$$

여기서, $\theta_i = i \frac{\Delta x}{L_f}$, $\theta_j = j \frac{\Delta x}{L_f}$ 이며, i, j는 입력단과 출력단에서의 각각의 도파로 순서를 의미하며 중심을 0으로 하여 -20, -19, ..., 0, ..., 19, 20이다. n_c 는 배열도파로의 유효굴절률, n_s 는 평판층의 유효굴절률, ΔL은 배열 도파로들의 경로차,

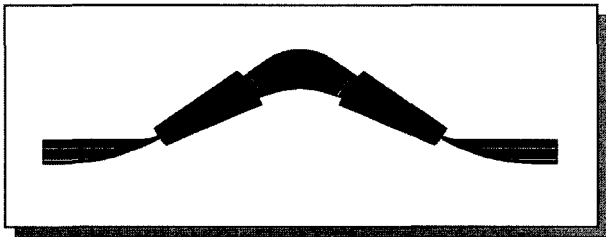


그림 1. AWG 구조 개략도.

표 1. 0.75Δ% AWG의 설계 변수

Symbol	Meaning	Parameter
N	Number of Input/output waveguide	40
L_f	Focal length difference of arrayed waveguide	19420μm
ΔL	Path length difference of arrayed waveguide	25.5μm
L_T	Taper length	500μm
M	Diffraction order	24
Δf	Frequency channel spacing	100GHz 0.8nm
FSR	Free spectral range	64nm
n_{co}	Effective refractive index of core	1.4565
n_{cl}	Effective refractive index of clad	1.4455
n_{eff}	Effective refractive index	1.453886
λ_c	Center wavelength	1.55μm

m은 회절차수, d는 배열 도파로들의 입력단에서의 각 도파로들 간의 중간 간격이며 L_f 는 slab waveguide의 길이이며 Δx는 출력단 도파로의 중심간 간격이다.

여기서 중심 파장(center wavelength)을 다음과 같이 정의한다

$$n_c \Delta L = m \lambda_0 \quad (2)$$

중심파장이란 (i, j)=(0, 0) 중앙의 입력단에서 광이 입사하여 중앙의 출력단으로 광이 진행하는 파장을 의미한다. 따라서 $\sin \theta_i = 0$ 이 되며 중심 파장이 결정된다.

40채널 AWG의 경우 각 채널간의 평탄성이 중요하다. 이는 전체 형태가 Gaussian의 형태를 취하므로 FSR(free spectral range)를 조절함에 따라 균일도를 향상시켰다.^[4]

배열 도파로의 개수는 입력단에서 출발한 광이 평판도파로를 지나면서 focal length만큼 진행한 광을 충분히 배열 도파로로 coupling되기 위하여 평판 도파로의 끝부분의 Rowland Circle 상에 적정개수의 배열 도파로들을 구성하여야 한다.

배열 도파로 개수의 결정은 2차원 조화함수 전개법을 이용한 Fourier method로 Far field를 구하고 이로부터 최대강도가 $1/e^2$ 되는 영역까지 배열 도파로를 배열하였다.

설계변수는 표 1과 같다. 본 연구의 WDM 소자 설계는 유한 영역에서의 조화함수 전개법을 이용하여 채널도파로의 mode index를 계산하였으며 Δn은 0.75%로 하여 곡률에서의 손실을 최소화하였다.

평판 도파로에서의 core층의 두께에 따라 계산된 유효굴절률 변화와 채널 도파로에서의 mode 굴절률 변화를 그림 2와 그림 3에 각각 보였다. Core의 두께 및 폭이 각각 6.0 μm인

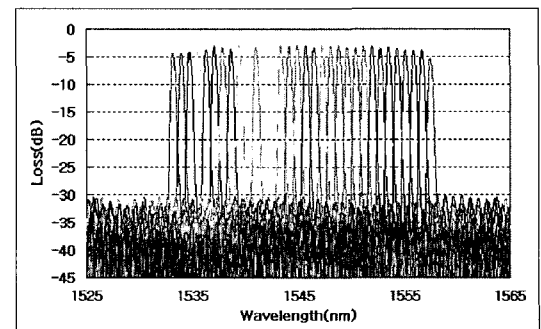
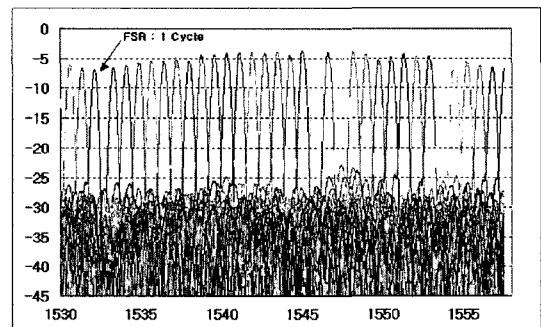


그림 2. (a) 단일 순환형 FSR을 가진 AWG, (b) 1.5배의 FSR을 가진 AWG.

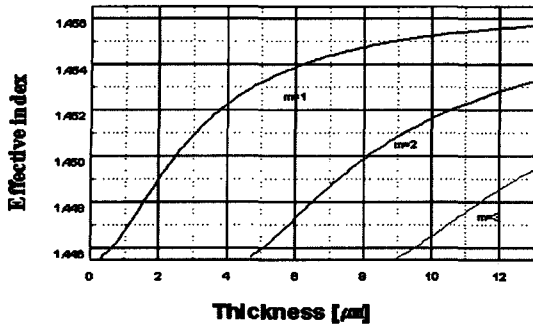


그림 3. 평판도파로에서의 core층 두께에 따른 유효굴절률 변화.

단일모드 도파로를 설계하였다.

분광 범위(FSR)를 64 nm로 설정한 것은 원하는 출력이 값이 균일한 특성을 얻기 위함이다. 전체 출력의 분포는 가우시안 형태를 보이는데 출력 슬랩 도파로의 FSR이 단일 순환형의 AWG의 경우에는 손실 균일도가 3 dB정도이다. FSR을 1.5배 정도로 확장하면 가우시안 대역이 넓어지면서 중심에서의 손실은 증가하고 양끝의 채널은 손실이 줄어드는 역할을 하므로 전체적으로 원하는 균일도가 얻어진다. 그림 2는 AWG의 FSR을 확장하므로 균일도가 3 dB에서 1.5 dB로 낮추어지는 그래프를 보여주고 있다.^[7] 또한 그림 2에서의 전체적인 누화율이 30 dB이지만 박막의 굴절율을 비롯한 공정변수를 최적화 하므로 35 dB 이상의 값을 얻을 수 있게 되었다.^[9]

2.3. 배열 도파로의 간격과 회절 손실

WDM소자 중 AWG의 경우 배열 도파로에 의한 회절 손

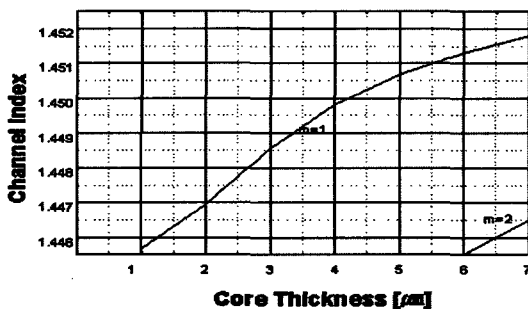


그림 4. 채널 도파로에서의 core층 두께에 따른 mode 굴절률 변화.

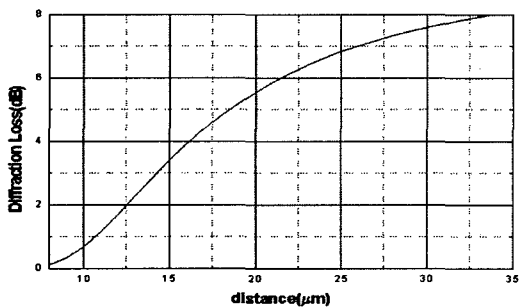


그림 6. 배열도파로의 간격에 따라 계산된 손실 변화.

실이 다른 종류의 소자에 비해 크다는 단점을 갖고 있고 회절에 의한 손실은 배열 도파로의 간격 및 배열 도파로의 광 분포(beam size)에 따라 달라진다.

본 설계를 위해 배열 도파로의 간격에 따른 회절 손실을 계산하였으며 도파로의 간격이 일정할 때 도파로를 넓히면서 배열 도파로의 광 분포에 해당되는 모드(mode) 폭을 변화 시키면서 회절손실을 계산하였다.^[9] AWG의 기본 설계는 100 GHz 40 채널로 설계하였으며 배열 도파로의 grating line과 파장에 따른 focal line은 비점수차가 0인 Rowland circle상에 위치하였으며 focal line의 도파로간 거리는 25.5 mm로 고정하였다. 따라서 배열 도파로 간격이 변화됨에 따라 focal length가 달라지므로 이를 조절하면서 slab 도파로의 파장 길이를 달리하면서 채널 간격은 0.8 nm로 일정하게 유지하였다. BPM을 이용하여 회절에 의한 손실 및 AWG의 output coupler에서 taper의 변화에 따른 파장 스펙트럼 특성을 계산하였다.

그림 4는 AWG WDM의 output coupler 근처의 확대도이고 그림 5는 배열도파로의 간격 즉, minimum waveguide separation의 간격 변화에 따른 회절 손실에 대한 계산 결과이다. 회절에 의한 손실은 배열도파로 간의 간격이 증가함에 따라서 커지는 경향을 보였다. 보통의 경우 인접한 도파로 간 영향이 거의 없는 간격인 20 μm이상의 간격에서는 5.5db 이상의 회절 손실을 보임을 알 수 있다.

Output coupler의 회절 손실 및 taper의 영향을 고려하여 최적화한 설계 결과로 최소 삽입손실을 0.68 db까지 줄일 수 있었으며 채널간 누화율은 40 db이상, 균일도는 1.0 db이하로 설계하였다.^[7] 그림 6은 설계된 AWG WDM의 simulation 스펙트라이이다.

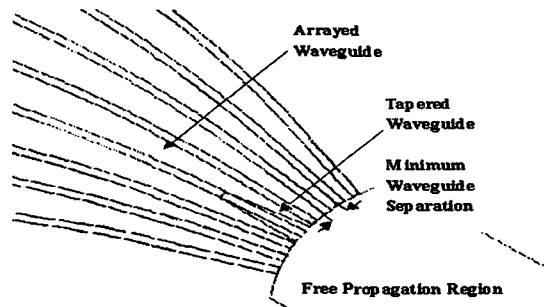


그림 5. AWG WDM의 output coupler 근처의 확대도.

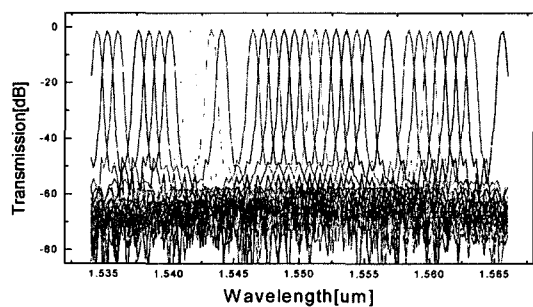


그림 7. 회절 손실 및 taper의 영향을 고려한 최적화 설계된 AWG WDM의 투과 스펙트라.

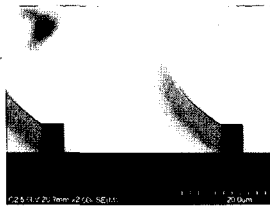


그림 8. 도파로의 식각된 사진.

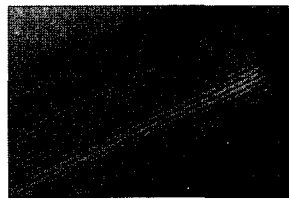


그림 9. 도파로의 사진과 Array 투과 사진.

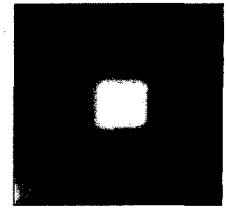
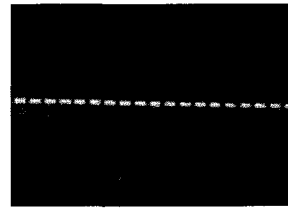


그림 10. AWG의 near field 사진.

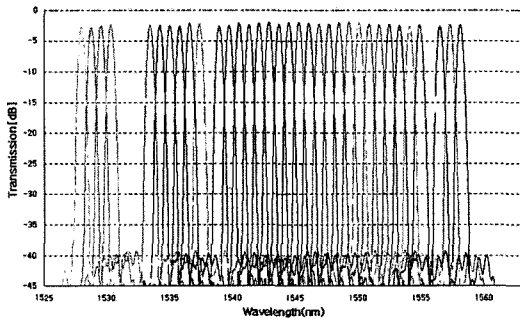


그림 11. C-band 40channel AWG Spectra.

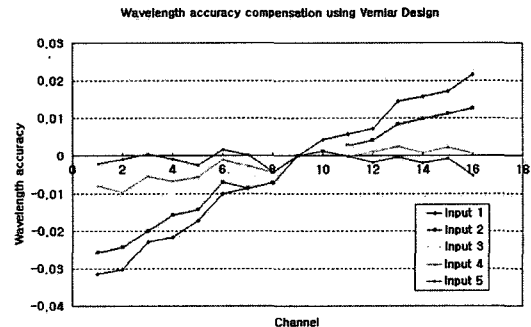


그림 12. Vernier 적용한 입력 도파로에 변화에 따른 출력 파장 정확도 측정.

2.4. AWG WDM 제작

Silicon 웨이퍼를 기판으로 사용하였으며 균일한 Base clad층을 증착하기 위하여 thermal oxidation공정으로 SiO₂층을 성장시켰다. 증착된 Base clad 기판을 이용하여 Δn=0.75%가 되도록 6 μm의 코어를 증착하고 40채널 AWG의 마스크를 이용하여 패턴 및 ICP(Inductive Coupled Plasma) etcher를 이용한 식각공정을 진행하였다. 그림 8은 식각된 도파로의 SEM 사진이다. 그림 9(a)는 overclad가 올라간 도파로의 사진이며 그림 9(b)는 Array 부분에서 백색광 투과된 모양을 보여준다.

2.5. AWG WDM 측정결과

제작된 AWG는 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 광원과 자동 정렬 장치를 이용하여 입력단과 출력단을 정렬하고 광도파로 접속 및 패키징을 하였다. 측정 장비의 구성은 tunable laser source와 polarization controller와 multichannel powermeter로 구성되어 있다. 파장 정밀도는 0.003 nm이다. 측정 장치를 이용하여 C-band의 AWG를 측정하였으며 삽입손실은 평균 2.8 dB 이하이고 또한 편광의존성도 0.3 dB이하로 측정되었다. 누화율은 30 dB 이상이었다.

Center wavelength의 ITU-T권고 파장을 정확히 맞추기 위해 입력단에 Vernier 디자인을 적용하였다.^[5] 그림 12는 Vernier가 적용된 입력 도파로를 변경하여 측정하면서 적용된 파장 정확도를 0.02 nm까지 맞춘 결과로 16채널을 측정하였다. 그림 13은 L-band의 AWG 파장 스펙트럼을 보여주고 있다.^[6,8]

III. 결 론

본 논문에서는 0.75 delta%의 굴절율차를 가진 C-band와

L-band용 파장 다중화 소자를 제작, 평가하였다. BPM을 이용한 시뮬레이션과 박막 식각 공정을 적용하여 제작된 AWG의 C-band에서의 삽입손실은 2.5 dB이하, 균일도는 0.8 dB이하 Non-adjacent 누화율은 35dB이었고 L-band에서는 파장 정확도가 0.02 nm이하였다. 향후 AWG의 채널 증가에 따른 소자 크기의 한계를 극복하기위해 1.5 delta%의 굴절율 차를 가진 소자의 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 중기저점 기술개발 사업지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 이용태 화염가수분해 증착법에 의한 파장 다중화 실리콘 광도파로 소자 제작” 박사학위 청구논문 1999. 2월 pp. 73-100, 1999.
- [2] Reinhard Marz, “Integrated Optics: Design and Modeling”, Artechouse Inc., 1995.
- [3] Erwin G. Loewwn and Evgeny Popov, “Diffraction Gratings and Application”, Marcel Dekker INC., NewYork, 1997
- [4] 박만용 실리콘 기판위에 실리콘 물질로 제작되는 두 종류 집적광학필터의 공정개발 및 최적화 설계 : 박사학위 청구논문 2003. 2월 pp. 81-114, 2003.
- [5] Katsunari Okamoto “Fundamentals of optical waveguides” Academic Press pp. 360-362, 2000.
- [6] Y. Hida, et al. “400-channel 25-GHz spacing arrayed-waveguide grating covering a full range of C- and L-bands” OFC 2001, Anaheim WB2-2A.

- [7] 문형명, 정건, 최기선, 오진경, 정호연, 백수현, 이형종
분광 범위 확장에 따른 32채널 파장 다중화 필터의
손실 균일도 향상 제8회 광전자 및 광통신 학술회의
(COOC 2001) ThC1-6. 2001. 5.
- [8] 고원태, 강동수, 정호연, 오진경, 박만용, 문형명, 이형종
“장파장 대역의 파장 다중화/역다중화 소자 제작” 제9회
광전자 및 광통신 학술회의 (COOC 2002) FD2-3. 2002. 5.
- [9] 최준석, 정호연, 오진경, 백수현, 문형명, 이형종 “향
상된 채널 누화율의 40채널 광도파로열 격자 파장필
터의 설계 및 제작” 제9회 광전자 및 광통신 학술회의
(COOC 2002) ThD1-3. 2002. 5.

40channel Arrayed Waveguide Grating with 0.75% Refractive Index

H.M. Moon, G.S. Choi, K.H. Lee, D.H. Kim, J.K. Oh, S.C. Kwak,
O.K. Kwon, D.S. Kang and J.B. Kim

Photonics Planar Integration Technology Inc., 958-10 Daechon Dong, Gwangju 500-470, KOREA

J.S. Choi and H.J. Lee

Department of Physics, Channam National University, YongBong-Dong, Gwangju, KOREA

G Jong and H.Y. Lee

Faculty of Applied Chemical Engineering, Channam National University, YongBong-Dong, Gwangju, KOREA

M.O. Park

Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Gajeong-Dong yuseong-gu Daejeon, 305-350, KOREA

[†]E-mail: moonhm@ppitek.com

(Received December 24, 2005, Revised manuscript March 30, 2005)

A 40 channel arrayed-waveguide grating (AWG) filter operating in C-band and L-band wavelength regions has been fabricated using PLC (Planar Lightwave Circuit) processes with 0.75 refractive index difference. Its design was optimized for matching the center wavelength with the ITU-recommended wavelength. The characteristics of the fabricated C-band AWG are as follows; average insertion loss < 2.5 dB, polarization-dependent loss < 0.3 dB, non-adjacent crosstalk >35dB, and the loss uniformity of 0.8 dB. In the L-band AWG, wavelength accuracy is below 0.02nm.

OCIS Codes : 060.4230, 230.0230, 230.7390.