

WDM용 광섬유 증폭기를 위한 전광섬유형 이득등화 필터 제작

論 文
8-2-8

Design and Fabrication of Gain Equalization Filter in Optical WDM Systems Using Fiber Lattice Tapered Methods

장진현*, 전병구**, 김진식***

Jin-Hyeon Chang, Byung-Goo Jeon, Jinsik Kim

Abstract

All-optical fiber-type gain flattening filter (GFF) for an EDFA (Erbium doped fiber amplifier) were fabricated by using a FBT (fiber biconical tapered) process and the performance of the GFF was tested and athermal package was proposed. Historically, the chief contributor to gain unevenness has been the EDFA. Due to the inherent gain response of the EDFA's operation, there is always a modest imbalance in the gain applied as a function of wavelength. FBT methods have been used to make fiber type couplers and WDM filter since 1980. Attractivity of this methods was simple, cost effective and thermal stability. Simulation program tool is made to design target GFF profile for this paper. Fiber coupler manufacturing machine is modified for the GFF process. The final GFF is obtained by cascading 4 unit filter that has 6 taper stage. Test result shows 1 dB of wavelength flatness in the C band. Polarization dependent loss is under 0.15dB. The center wavelength variation is below $\pm 0.35nm$ at the temperature range of 20°C to 70°C.

Keywords: Fiber amplifier, gain flattening filter, temperature compensation

1. 서 론

BcN(Broadband Convergence Network) 구축을 위한 전달망의 고도화의 한 방편으로 광통신 시스템 대용량화가 지속적으로 이루어지고 있다. 40Gbps 단일채널 전송이 가능해졌고 고밀도 파장 다중화(Dense WDM) 전송방식을 이용한 160채널 10Gbps 전송이 성공적으로 이루어졌다. 전송용량의 확장을 위해서는 전송 채널 파장간의 간격을 더욱 조밀하게 하거나 광섬유 전송 대역폭을 넓히는 두 가지 방법을 동시에 적용하고 있다. 현재 광섬유 전송대역은 1550nm대역에 집중되어 있는

데 이는 최저손실 파장이면서 광섬유 증폭기를 이용한 신호의 증폭이 가능한 대역이기 때문이다. 라만 증폭기와 함께 대표적인 광섬유 증폭기인 EDFA(Erbium doped fiber amplifier)는 현재 C밴드(1535-1565)와 L밴드(1565-1600nm)에서 각각 80 채널의 광신호를 증폭시킬 수 있는 제품이 상용화되었다[1-3]. WDM 광 전송 시스템에 사용되는 EDFA의 핵심 요구사항은 모든 입력 채널신호에 대해서 균일한 증폭률을 갖도록 하는 것이다. 잘 알려진 바와 같이 1530nm 파장 대역에서 ASE로 인하여 다른 영역에 비해서 큰 이득이 발생하고 균일한 증폭을 하기 위해서는 별도의 필터를 이용하여 제거해 주어야 한다[4-5]. 현재까지 사용된 EDFA 이득등화 필터는 EDFA의 출력특성에 맞추어 특별히 조건을 설계하여 제작하는 수동형 필터 방법과 입력되는 광 신호들의 크기와 형태에 따라 자동으로 평탄화 과정을 수행하는 AOTF(Acoustic

접수일자 : 2009년 5월 08일

최종완료 : 2009년 6월 19일

*장진현 : 한국정보통신대학

교신저자 : jhcang@icpc.ac.kr

**전병구 : (주) 옵토스타 책임연구원

***김진식 : (주)신콤 시스템사업부 이사

Optic Tunable Filter) 기술을 이용한 능동형 채널 등화기가 있다[6-8]. 본 논문에서는 수동형 GFF (Gain Flattening Filter)를 제작함에 있어서 기존의 방법과 달리 1×4 이하의 광섬유 커플러를 제작할 때 사용하는 광섬유 용융인장(FBT) 방법에 의해서 EDFA 이득평탄화 필터를 제작하고 그 특성을 타 제작방법과 비교하여 알아보았다. II장에서 EDFA GFF의 제작 원리와 설계 이론에 대해서 살펴보았고, III장에서는 광섬유형 다단필터 방법에 의해서 제작된 필터를 개별적으로 제작하고 이를 합성하였다. IV장에 결론을 맺는다.

II. 이득등화 필터 개요와 설계이론

일반적인 EDFA의 출력 특성은 1530nm 대역에서 이득피크가 발생하고 이로 인하여 자연방출비트잡음을 증가시키고 레이징이 일어나기 쉬워 이득피크를 제거하는 것이 필요하다. 또한 WDM과 같이 다중 입력 광원이 동일하게 증폭되기 위해서는 전체 증폭대역에 대해서 일정한 증폭기 이득이 요구된다[1-3].

따라서 그림 1과 같이 EDFA의 이득곡선과 상반된 손실곡선을 갖는 필터를 삽입함으로써 출력을 평탄하게 하는 과정이 필요하다.

이러한 이득평탄화 필터를 만드는 방법은 다중 간섭막막필터 코팅기술을 이용한 마이크로 렌즈형 제품과 장주기형 광섬유 격자기술(Long period Fiber Bragg Grating)을 이용한 투과 필터 방법이 사용되었으나 두 방법 모두 원하는 필터형상을 얻기 위해서는 매우 복잡한 설계 및 제조공정 그리고 고가의 제조 설비를 필요로 하고 있다[9-12].

EDFA의 불균일한 이득을 평탄하게 만들기 위한 필터를 그림 2와 같이 광섬유형 커플러 제조

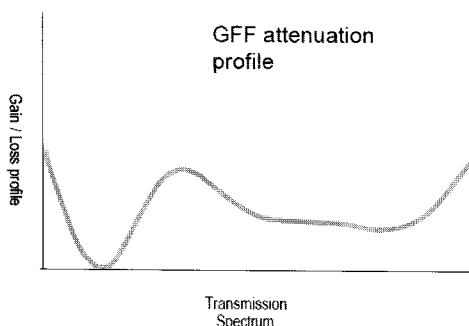


그림 1. EDFA GFF 필터 개요

장비를 이용하여 1100°C 이상의 불꽃이 나오는 가스 토치를 수평 이동함으로써 광섬유를 주기적으로 용융 인장하여 일정한 간격의 테이퍼 형태로 제작할 수 있다. 이 때 인장부위에서 광섬유의 코어를 도파하는 빛이 인장에 의하여 클래딩 모드로 결합되고, 주기적인 결합의 반복에 의해서 원하는 파장에서 생기는 필터를 제작할 수 있다.

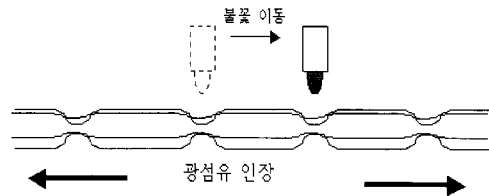


그림 2. 다단 테이퍼 필터의 제작 개요

광섬유 다단 테이퍼를 이용한 GFF의 원리를 설명하기 위해서 그림 3과 같이 광섬유 다단 테이퍼를 통하여 코어모드인 LP_{01} 모드를 LP_{02} 모드로 커플링 시킨다고 가정하면 테이퍼들의 간격 L 을 코어모드 LP_{01} , 클래딩 모드 LP_{02} 모드가 전파됨에 따라 위상차가 생기는데 이는 두 모드의 유효굴절률 차이에 의해서 진행속도가 달라짐으로써 발생한다. 따라서 주기적으로 배치된 여러 단의 테이퍼들이 필터의 역할을 하게 된다.

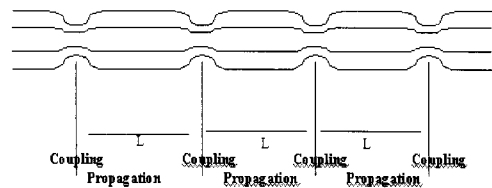


그림 3. 광섬유형 다단 테이퍼 필터 구조

테이퍼의 정도와 테이퍼 사이의 길이에 따라 필터의 폭과 크기의 조절이 가능하다. 이러한 현상을 행렬로 표현하면 커플링 영역은 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{pmatrix} \cos(K) & i \sin(K) \\ i \sin(K) & \cos(K) \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 K 는 테이퍼 영역 커플링 크기이다. 진행영역은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B = \begin{pmatrix} \exp(i\beta_{01}L) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta_{02}L) \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\beta_{01} = n_{01} 2\pi / \lambda$, $\beta_{02} = n_{02} 2\pi / \lambda$ 이고, $\Delta\beta = (n_{01} - n_{02}) 2\pi / \lambda$ 이 된다.

필터 투과 특성은 다음과 같다.

$$T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} A^* B^* A^* \dots A^* B^* A^* \quad (3)$$

여기서 A^* 는 행렬 A 의 전치행렬을 의미한다.(?)

위의 구조에 의한 투과 스펙트럼은 파장에 따라 주기적인 구조 즉, FSR(Free Spectral Range)를 가진다. FSR은 다음의 식으로 정해진다.

$$(n_{01} - n_{02}) \times L \times \Delta\lambda / \lambda^2 = 1 \quad (4)$$

6단으로 구성된 다단 테이퍼 필터의 시뮬레이션을 위한 투과 식은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \left| (1,0) * A \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|$$

$$\bullet 2^* B^* A^* B^* A^* B^* A^* B^* A^* B^* A^* B^* A^* \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} & \text{Exp}[5/2i\Delta\beta L] \times \text{Cos}[K]6 - (\text{Exp}[-5/2i\Delta\beta L] \\ & + 2 \times \text{Exp}[-3/2i\Delta\beta L] + 3 \times \text{Exp}[-1/2i\Delta\beta L] \\ & + 4 \times \text{Exp}[1/2i\Delta\beta L] + 5 \times \text{Exp}[3/2i\Delta\beta L]) \times \text{Cos}[K]4 \times \text{Sn}[K]2 \\ & + 3 \times (\text{Exp}[-3/2i\Delta\beta L] + 2 \times \text{Exp}[-1/2i\Delta\beta L] \\ & + 2 \times \text{Exp}[1/2i\Delta\beta L]) \times \text{Cos}[K]2 \times \text{Sn}[K]4 \\ & + \text{Exp}[-1/2i\Delta\beta L] \times \text{Sn}[K]6 \end{aligned} \right\} 2 \times \Delta\beta \quad (6)$$

$$= (n_{01} - n_{02}) 2\pi/\lambda$$

여기서 $(n_{01} - n_{02}) = 0.0043$ 이고, 설계변수로 테이퍼 사이의 길이 L 에 의해 손실 피크 위치를 결정하고 L 과 (Taper Number-1)의 곱으로 손실 피크의 폭을 결정 하며 커플링 계수 K 와 테이퍼 수의 곱이 손실의 크기를 결정한다.

그림 4와 같이 시뮬레이션을 위한 Matlab 프로그램 작성을 작성하였으며 다음과 같이 함수의 인자로 테이퍼의 단수, 시작 파장, 끝 파장, 데이터 개수, 커플링 계수, 테이퍼 사이의 간격을 입력하여 설계한다.

사용 예

```
[X1,Y1]=mtfilter(6, 1520, 1570, 500, 0.15, 9600);
```

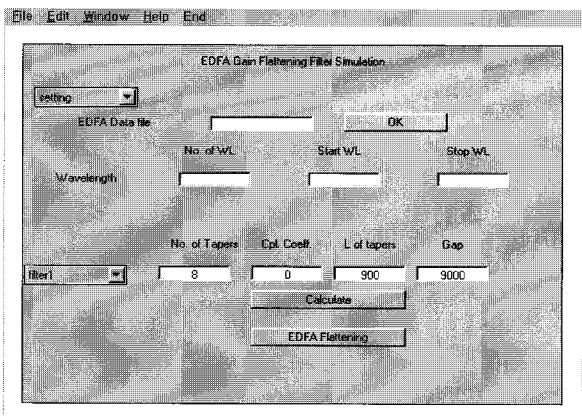


그림 4. EDFA 이득평탄화용 필터 시뮬레이션 프로그램 주화면

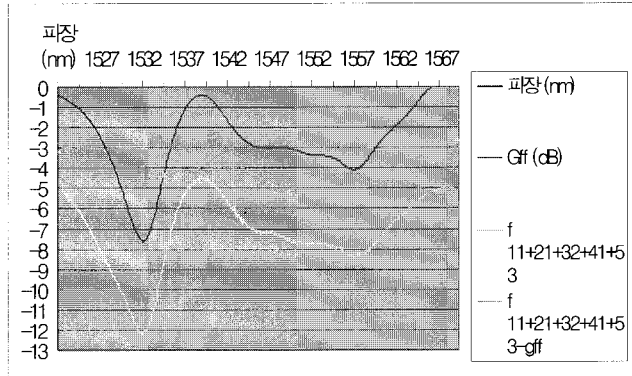
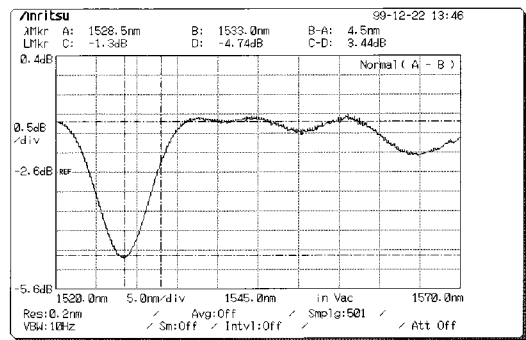


그림 5. EDFA 이득평탄화필터 설계 조합

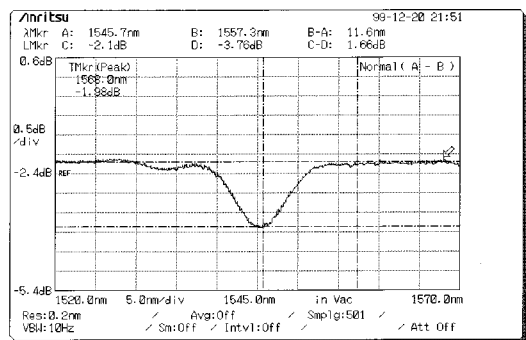
개별적으로 제작된 이득등화 필터 5개를 조합하여 (GFF 13 + 21 + 34 + 42 + 52) 그림 5와 같이 이득등화 필터를 설계할 수 있다.

III. 이득등화 필터 제작과 특성

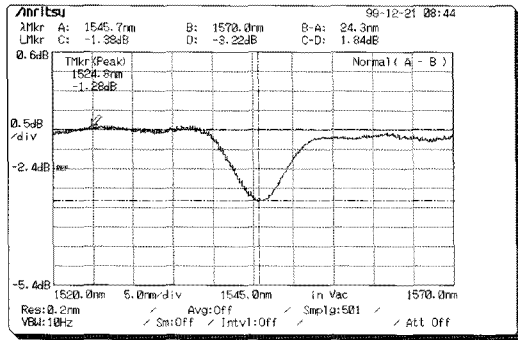
시뮬레이션을 이용한 필터 설계 조합 결과를 바탕으로 일본 NTT사 광섬유 커플러 제조장비를 이용하여 GFF 필터를 각각 제작하였으며 제작된 필터의 개별적인 출력 특성은 다음 그림 6과 같다. 또한 개별적으로 제작된 4개의 필터를 조합하여 최종 GFF 필터를 완성하였다.



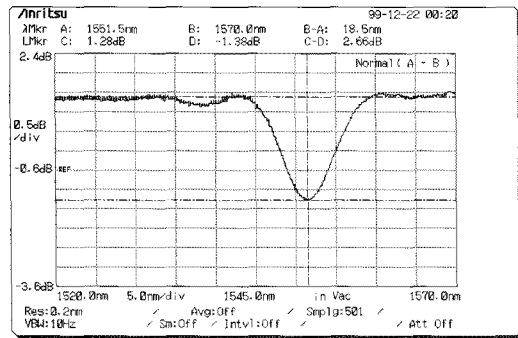
(a) GFF 21



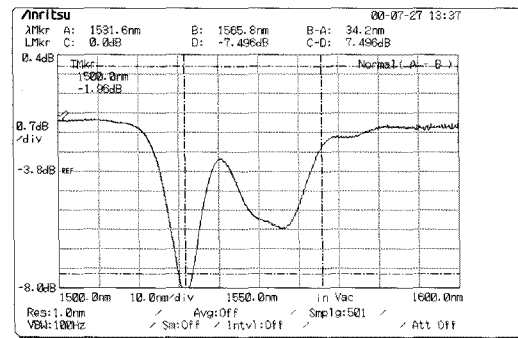
(b) GFF32



(c) GFF42



(d) GFF52



(e)

그림 6. GFF 제작 결과
(a)-(d)는 실제 제작된 샘플 데이터
(e) 최종 완성된 GFF 필터 특성

광섬유 다단 테이퍼 방법에 의해 최종 제작된 필터를 그림 6(e) 이용하여 EDFA 이득 평탄화 특성을 평가하기 위하여 EDFA의 출력에 GFF를 연결하여 평탄해진 출력 특성을 그림 7에 나타내었으며 1530nm 근처에서의 ASE 특성이 평탄화되었음을 확인할 수 있었다.

광증폭기 이득은 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$G (dB) = 10 \log \left[\frac{P_{out} (\lambda_c) - P_{ase} (\lambda_c)}{P_{in} (\lambda_c)} \right] \quad (7)$$

광증폭기 이득은 입력신호에 크게 의존 한다. 입력 광신호가 작으면 증폭이득은 크게 된다. 상

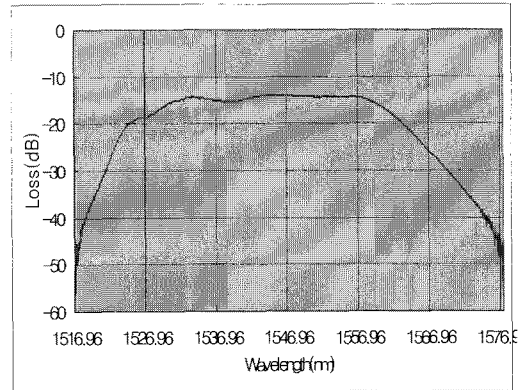


그림 7. 이득 평탄화된 EDFA 최종 특성

용화된 EDFA는 -30 ~ 2 dBm 정도의 입력 신호 범위에 대해서 19 ~ 30dBm 정도의 이득을 갖는다. 그림 8에 실제 C밴드용 광섬유 증폭기 이득 변동에 따른 평탄도 특성을 나타내었다. 55mA에서 220mA까지 전류를 변화시키면서 주입할 때 평탄도를 살펴보았으며 (c)와 같이 220mA 정도가 주입되었을 때 EDFA 출력 평탄도가 유지됨을 알 수 있다. 즉, 수동형 이득평탄 필터는 일정한 출력 레벨에서 이득 평탄도가 유지된다고 하더라도 입력전류 값이 변동이 되면 또다시 평탄도가 깨어짐을 의미한다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해서 입력 전류 변동이나 주위 온도 변화에 따른 광 증폭 출력을 자동으로 보정해 주는 능동형 GFF 기능을 갖는 등화기가 상용화되어 고가의 시스템에 요구되고 있다[9-13].

IV. Athermal 패키징의 설계

온도에 따른 파이버의 길이의 변화의 영향 보다 굴절률의 변화의 영향이 더 크므로 다음과 같이 파장의 온도의 존성을 표현할 수 있다.

$$\frac{d(n_{01} - n_{02})}{dT} \times \frac{1}{\lambda} - (n_{01} - n_{02}) \times \frac{d\lambda}{dT} \times \frac{1}{\lambda^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d(n_{01} - n_{02})}{dT} \times \frac{\lambda}{(n_{01} - n_{02})} \quad (9)$$

광섬유의 온도변화에 따른 파장특성을 알아보기 위하여 섭씨 20 ~ 70 °C 구간에서 측정한 결과 코닝사 Flexcor 1060인 경우 0.036nm/°C SMF 28

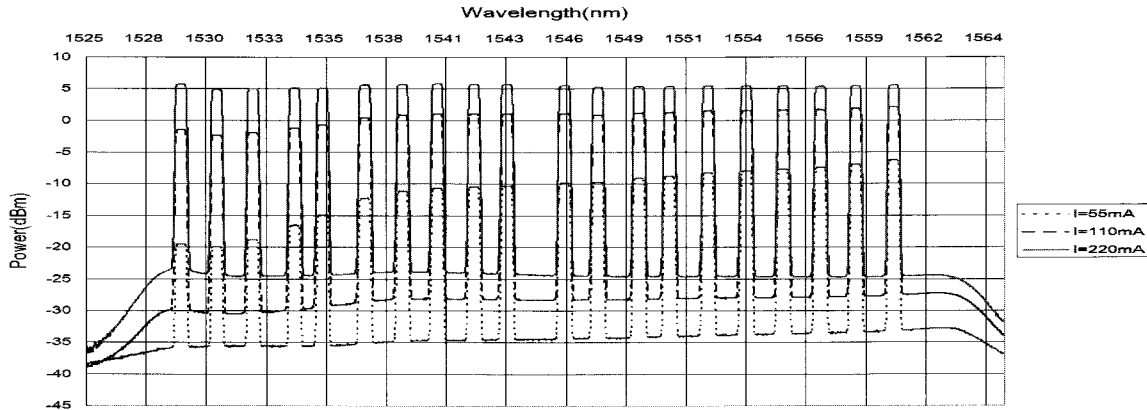


그림 8. 이득 변동으로 인한 평탄도 특성

의 경우는 $0.055\text{nm}/^\circ\text{C}$ 의 의존성을 보였다. 따라서 이러한 실험적인 데이터를 통해 역으로 두 모드사이의 굴절률 차의 온도의존성을 계산할 수 있다.

Flexcore 1060인 경우 $d\lambda/dT = 0.036 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 이므로 $d(n_{01} - n_{02})/dT = 0.113 \times 10^{-6}$ 임을 알 수 있다.

테이퍼 사이의 길이조절을 통하여 온도의존성을 상쇄시키는 구조의 패키지를 고안할 경우 계산상으로는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$d(n_{01} - n_{02})/dT \times 1/\lambda \times L - (n_{01} - n_{02}) \times dL/dT \times 1/\lambda = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} dL/dT \times (1/L) &= d(n_{01} - n_{02})/dT \\ &\times (1/(n_{01} - n_{02})) \\ &= 23.0 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 Athermal Package의 경우 Invar와 CTE가 46×10^{-6} 인 재질을 사용하여, 전체길이 약 8cm로 4cm의 테이퍼 필터 영역을 온도 보상하는 것이 가능하나 실제 제작된 다단 테이퍼 필터를 지그 위에서 인장 시켰을 때 단파장으로 최대 중심파장이 이동하고, 크기가 약간 변화되었다. 이는 인장을 통해서 영향을 받는 부분이 테이퍼 사이의 영역이 아니라, 인장영역 즉 커플링 영역에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 따라서 다단 테이퍼 필터의 온도보상을 위해서는 온도가 상승함에 따라 길이가 줄어드는 패키지가 아니라 길이가 늘어나는 구조를 택해야 한다. 온도 보상 패키징을 적용하여 순수한 GFF필터의 온도특성을 측정된 결과 $20 \sim 70^\circ\text{C}$ 온도 범위에서 4단 테이퍼로 제작한 GFF는 0.25nm , 6단 테이퍼로 제

작한 GFF는 0.35nm 정도의 움직임 확인하였다. 이는 상업적으로 보고된 제품의 온도 특성인 0.25nm ($5\text{pm}/^\circ\text{C}$)[14]에 비해서는 다소 큰 변화를 보였다. 이는 다단 테이퍼 단수가 많아짐에 따른 요인으로 판단된다. 그러나 일정한 온도범위에서 선형적인 변화를 보임으로써 패키징 재료의 선택과 패키징 구조에 따라 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문은 광통신 시스템의 핵심장치인 광섬유 증폭기 EDFA의 이득을 전송영역 전체에 대하여 평탄화 함으로써 DWDM과 같은 다채널 입력 신호들이 균일하게 출력되도록 하는 기능을 하는 전광섬유형 GFF를 광섬유 다단 테이퍼 방법에 의해서 제작하였다. 6단 테이퍼를 갖는 개별적인 필터 4개를 조합하여 최종 GFF를 제작하였으며 그 결과 최종 GFF의 삽입손실 0.8dB 이내이고 편광의존손실이 0.15dB 이하였으며 C 밴드 영역에서 입력 펌프 세기가 220mA 일 때 파장 균일도가 $\pm 1.0 \text{ dB}$ 이내가 되도록 하였으며 이득에 따라 평탄도가 틀어짐을 보이기 위해서 입력 펌프 세기를 변화시켰다. 또한 온도변화에 따른 중심파장의 변화를 최소화 하기 위하여 Athermal 패키지를 적용시켰으며 $20^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ 까지 온도 환경 시험 결과 최대 중심 파장 천이도는 0.35nm 이내로 확인 되었다. 상업용으로 사용하기 위해서는 0.25nm 이내의 중심 파장 변이가 있어야 할 것으로 예측되며 이를 위해서는 열광학 효과와 열

팽창 계수를 고려한 다양한 패키징 재료의 선택과 새로운 패키징 구조에 대한 많은 연구가 계속되어야 할 것으로 판단되며, 지속적인 광대역 증폭기의 요구에 따라 증가되는 테이퍼 단수를 줄일 수 있는 연구가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 한국산업기술진흥원의 지원에 의한 결과임.

[참고 문헌]

[1] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 1994.
 [2] 박남규, "초광대역 광증폭기에 관한 연구," 한국통신학회지, vol. 19, pp. 1514-1528, 2003.
 [3] 김향균, 박서연, 이동호, 박창수, "에르븀 첨가 광증폭기의 파장에 따른 이득특성 측정 및 분석," 한국광학회지, vol. 8, no. 3, pp. 209-212, 1997
 [4] "Variable Gain Flattening Filters," www.DigiLens.com, 1999.
 [5] V. L. D Silva, Y. Silverberg, J. S. Wang, E. L. Goldstein, and M. J. Andrejco, "Automatic gain flattening in Er doped fiber amplifiers," in *Conference on Optical Fiber Communication/International*

Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, vol. 4, p. 174, 1993.
 [6] R. Kashyap, R. Wyatt, and R. J. Campbell, "Wideband gain flattened erbium fibre amplifier using a photosensitive fibre blazed grating," *Electronics Letters*, vol. 29, no 2, pp. 154-156, 1993.
 [7] S. F. Su, R. Olshansky, G. Joyce, D. A. Smith, and J. E. Baran, "Gain equalization in multiwavelength lightwave systems using acoustooptic tunable filters," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 269-271, 1992.
 [8] K. Inoue, T. Kominato, and H. Toba, "Tunable gain equalization using a mach Zehnder optical filter in multistage fiber amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 8, pp. 718-720, 1991.
 [9] K. Y. Huang, *Multi Stage Filtered Optical Amplifier*, US Patent 7,006,280, 2006.
 [10] W. Wu, *All Fiber Gain Flattening Optical Filter*, US Patent 6,822,786, 2004.
 [11] JDS Uniphase, *Two Stage Gain.Equalizer*, US Patent 7,391,973, 2007.
 [12] K. Y. Huang, *Athermal Fiber Bragg Grating*, US Patent 7,116,846, 2006.
 [13] C. R. Giles, "Dynamic gain equalization in a two stage fiber amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 12, pp. 866-868, 1990.
 [14] "Gain flattening filter", www.jdsu.com, 2009.

Biography



장진현

2000년 건국대학교 전자공학과 졸업(공학박사)
 2004년 ~ 현재 한국정보통신대학 광통신설비과 조교수
 <관심분야> 광수동소자 패키지
 <e-mail> jhchang@icpc.ac.kr



김진식

1990년 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1990-1997 삼성전자 통신연구소 연구원
 2008년 ~ 현재 (주)신콤 시스템사업부 이사
 <관심분야> 시각공급 장치, 클럭공급 장치
 <e-mail> jkim@synccom.co.kr



전병구

1994년 서울대학교 물리학과 졸업(이학사)
 1996년 서울대학교 물리학과 졸업(이학석사)
 2004년 ~ 현재 한국과학기술원 물리학과 박사과정
 2005년 ~ 현재 (주)옵토스타 책임연구원
 <관심분야> High power/energy laser, Optical parametric chirped pulse amplification(OPCPA)
 <e-mail> bkjeon@optostar.co.kr

<e-mail> bkjeon@optostar.co.kr