

# 금속선의 주기적 배열로 유도된 장주기 격자를 이용한 이득 평탄화된 광섬유 증폭기 제작

† 손경락\* · 황웅\*\* · 심준환\*\*\*

\* · \*\*\*한국해양대학교 컴퓨터·제어·전자통신공학부 교수, \*\*한국해양대학교 전자통신공학전공

## Fabrication of an Optical Fiber Amplifier Using Long-period Fiber Gratings Formed by Periodically Arrayed Metal Wire

† Kyung-Rak Sohn\* · Woong-Hwang\*\* · June-Hwan Shim\*\*\*

\* · \*\*\*Division of Computer, Control and Electronic Communications Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea  
\*\*Department of Electronic Communications Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 이득 평탄화된 어븀첨가 광섬유 증폭기를 제작하였다. 이득 평탄화 필터는 주기적으로 배열된 금속선을 이용하여 유도되는 장주기 광섬유 격자로 구현하였다. 980 nm 펄핑 레이저에 의해 증폭된 자발방출 출력 스펙트럼의 C-밴드 파장 영역에서 이득 리플을 제작된 필터를 적용하여 1 dB 이내로 억제하였다. 다중 채널을 동시에 증폭시킬 수 있는 성능은 페브리 페롯 레이저 다이오드를 이용하여 측정하였고 C-밴드에서 20 dB 이상 증폭시킬 수 있음을 보여주었다. 이 증폭기는 파장분할 다중화 방식의 장거리 광 전송에서 다중 채널을 동시에 증폭하는 효과적인 방법을 제공할 것이다.

**핵심용어** : 어븀첨가 광섬유, 장주기 광섬유 격자, 이득 평탄화 필터, 광섬유 증폭기, 파장분할 다중화

**Abstract** : In this study, we have fabricated a gain flattened erbium-doped optical fiber amplifier. Gain flattening filters were realized by the strain-induced long period fiber gratings, which are made of periodically arrayed metal wires. Using the filter of 550 $\mu$ m period, spontaneous emission amplified at C-band wavelength by a 980nm pumping laser was flattened within 1dB of gain ripple. The performance of the simultaneous multi channel amplification was measured using a fabry-perot laser diode. Amplification ratio was above 20dB. This amplifier can be applied to the long distance transmission system based on a wavelength division multiplexing for boosting an attenuated signal.

**Key words** : Erbium-doped fiber, Long-period fiber grating, Gain flattening filter, Optical fiber amplification, Wavelength division multiplexing

### 1. 서 론

다양한 형태의 실시간 멀티미디어 서비스 및 유비쿼터스 센서 네트워크의 정보전송을 위한 대용량 채널에 대한 욕구가 늘어남에 따라 기존 구리선에 의존하는 통신망이 광섬유를 통신채널로 이용하는 광통신 기술로 대체되어 초고속 통신서비스 분야가 급진적으로 발전하고 있다.(Baldwin et al., 2001) 이러한 광통신 기술의 발달은 궁극적으로 모든 통신이 빛으로 이루어지는 전광 통신망(All Optical Network)으로 진화될 것으로 보인다. 조선분야에서도 선박내 다양한 멀티미디어 기기 및 통신 장비간의 데이터 통신과 안전항해와 선체의 안전도를 감시하는 각종 광섬유 센서의 도입으로 선내 통신망이 광통신망으로 대체되고 있는 추세이다.(Becker et al., 1999; Borinski and Meller, 2001; Hamdi and Qiao, 2003)

광 전송 시스템은 현재 시간분할 다중방식으로 10 Gb/s 제품의 상용화가 이루어졌으며, 40 Gb/s 수준의 시제품이 개발되었다. 이와 동시에 종래의 광섬유를 이용한 데이터 전송이 하나의 광섬유에 단일파장의 광 신호를 전송하고 있음에 비해, 하나의 광섬유에 여러 파장의 광 신호를 전송함으로써 전송용량을 획기적으로 증대시키는 기술로 파장분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing: WDM)방식이 사용되고 있다. 광통신 시스템은 200 THz 이상의 광대역을 제공하므로 대용량의 정보를 전송할 수 있고, 전송 손실 측면에서도 동축 케이블은 2.5 MHz에서 3.5 dB/km의 손실을 가지지만, 광케이블은 0.3dB/km 이하의 손실로서 다른 유선 통신 시스템보다 중계기 없이 장거리 전송이 가능하다. 그러므로 최소한의 중계기로도 시스템 구축이 가능하여 설비 비용이 감소된다. 또한 광섬유는 가볍고 가볍기 때문에 취급과 설치가 용이하고

\* 책임저자 : 손경락(정회원), krsohn@hhu.ac.kr 051)410-4312  
\*\*\* 정회원, jhsim@hhu.ac.kr 051)410-4811

전자파 간섭이 없어 설치 환경의 제약을 받지 않을 뿐만 아니라 습도의 영향도 받지 않는다. 그리고 재료가 풍부해서 가격이 저렴한 장점들이 있다. 그러나 광통신 시스템에서 장거리 전송을 하는 경우, 광케이블에서의 산란과 흡수, 접속 손실, 각종 소자의 삽입손실 등에 따라 광 신호의 감쇠가 발생함은 물론 분산에 의한 파형왜곡이 발생한다. 이와 같은 감쇠와 파형왜곡에 따른 전송품질의 열화를 보상하기 위해 광 신호를 증폭해야 한다. 이 때 사용하는 증폭기로는 전송된 광 신호를 먼저 전기신호로 변환하여 증폭하고, 이를 디지털 신호 처리한 뒤 다시 광신호로 변환하는 광전 재생기 (Opto-electronic Regeneration)가 있다. 이는 장치가 복잡하고 커서 통신의 고속화에 대응하려면 비용이 많이 들뿐만 아니라 파장분할 다중화 방식에 적용하기 힘든 문제점이 있다. 이에 반해 광섬유 증폭기는 광 신호를 전기신호로 변환하지 않고 광섬유 상에서 직접 증폭할 수 있을 뿐만 아니라 관심영역의 여러 파장을 동시에 증폭할 수 있어 파장분할 다중화에 적합하다. 이러한 광전 변환없이 전송선 상에서 신호를 그대로 증폭해주는 광섬유 증폭기로서 대표적인 것이 어븀 첨가 광섬유(Erbium-doped Fiber:EDF)를 이득 매질로 사용하는 광섬유 증폭기이다. 기존의 광섬유가 단순히 빛을 전파하는 수동적인 기능만을 수행한 것과는 달리 어븀첨가 광섬유는 입력된 광 신호를 증폭하는 능동적인 기능을 수행하므로 광섬유의 전송손실을 보상하는 능동 시스템으로 구현 할 수 있게 된다. 그러나 어븀첨가 광섬유 증폭기에서 문제점은 이득 곡선이 평탄하지 않다는 것이다. 많은 연구자들이 다양한 방법의 이득 평탄화 방법을 발표하고 있다(Harumoto et al., Ishi et al., 2001; Lee and Lai, 2002; Poloso, 2001; Sohn and Kim, 2005).

본 논문에서는 새로운 방법으로 구현된 이득 평탄화 필터가 적용된 어븀첨가 광섬유 증폭기를 설계하여 제작하였다. 새로운 형태의 광섬유 대역제거 필터는 주기적으로 배열된 금속선으로 유도되는 장주기 격자를 이용하여 대역제거 필터를 구현한 것으로 이득 평탄화를 위한 필터의 동작원리와 제작 방법을 상세히 설명하였다. 어븀첨가 광섬유의 흡수 스펙트럼을 측정하였으며 C-밴드 광섬유 증폭기로 활용될 수 있는 원리를 소개하였다. 그리고, 제작된 증폭기의 성능과 파장분할 다중화의 다채널 증폭이 가능함을 페브리 페롯 레이저를 이용하여 실험하였다.

## 2. 광섬유 증폭기의 동작원리

광통신 채널의 용량을 획기적으로 확장할 수 있는 파장분할 다중화 방식에서 어븀첨가 광섬유 증폭기(Erbium-doped Fiber Amplifier: EDFA)는 매우 중요한 역할을 하는데 이때 사용되는 어븀첨가 광섬유는 핵심적인 기능을 한다. 펌핑 광에 의한 주요 증폭 파장대는 1525~1565 nm 이지만 어븀첨가 광섬유의 길이를 길게 함으로써 1565~1610 nm 파장대도 증폭이 가능하다. 광섬유는 파장 대에 따라 손실특성이 다르게 나타나는데 여러 파장 대 중 C-밴드 (1530~1560 nm)에서 손

실이 가장 작게 나타난다. 이 대역에서 사용할 수 있는 광섬유 증폭기가 어븀첨가 광섬유 증폭기이다.(Vengsarkar, 1996)

Fig. 1은 어븀첨가 광섬유의 흡수 스펙트럼을 보여준다. 10m 길이의 어븀첨가 광섬유에 백색 광원을 입사한 후 출력되어 나오는 광을 광 스펙트럼 분석기로 측정된 결과 980 nm 대역과 C-밴드에서 강한 흡수가 일어남을 알 수 있다. 어븀 이온을 여기시키기 위한 펌프는 대개 980 nm 또는 1480 nm 파장에서 운용되는 레이저이다. 980 nm 중심파장을 가지는 펌프는 최대 출력보다는 저 잡음이 중요한 경우에 사용되며, 1480 nm 중심파장을 가지는 펌프는 저 잡음보다 고효율이 중요한 경우에 사용된다. 본 연구에서는 980 nm 파장의 펌프 레이저를 사용하였다. 어븀첨가 광섬유의 어븀 이온이 980 nm의 펌프 광자 (photon)를 흡수하면, 기저대역에 있는 전자는 더 높은 에너지 수준으로 여기된다. 곧이어 전자는 조금 낮은 메타-안정 여기 상태(meta-stable excited state)로 감쇠한다. 전자가 여기상태에서 다시 기저상태로 감쇠할 때 빛이 방출된다. 즉, 전자가 보다 낮은 메타-안정 여기상태에서 기저상태로 감쇠하면서 C-밴드 대역의 증폭된 자발 방출 (Amplified spontaneous emission: ASE) 광이 생성된다. 이러한 현상은 입력신호로부터 나온 광자와 반응할 때 일어나므로 그림 1의 흡수 스펙트럼으로부터 980 nm 펌핑에 의해 C-밴드의 자발 방출이 유발될 수 있음을 알 수 있다.

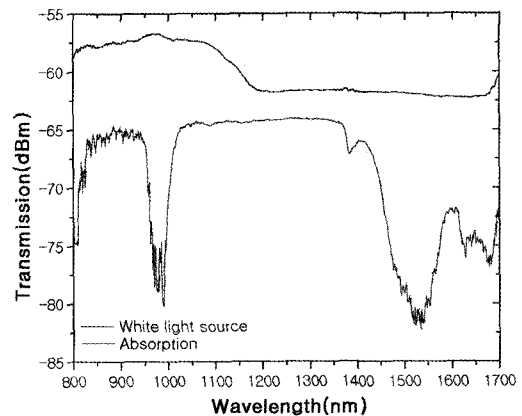


Fig. 1 Absorption spectrum of EDF measured by using white light source

## 3. 시스템 설계 및 제작

Fig. 2는 이득 평탄화된 어븀첨가 광섬유 증폭기의 개략도이다. 신호광원과 펌프광은 파장분할 다중화 결합기를 통해 결합되어지고 어븀첨가 광섬유에 입사된다. 어븀첨가 광섬유는 파장분할 다중화 결합기와 아이솔레이터 사이의 일반 광섬유와 응착 접속된다. 어븀첨가 광섬유에 의해서 증폭된 신호는 아이솔레이터를 거쳐 이득 평탄화 필터를 통과한다. 여기서 아이솔레이터는 어븀첨가 광섬유에 의해서 증폭된 신호가 반사되어 입력단으로 되돌아가는 것을 방지하기 위하여 사용한다. 입력 광 신호는 단일파장 또는 다파장 신호원에 의해서

정보를 전송할 수 있다. 본 연구에서는 페브리-페롯 레이저 다이오드를 사용하여 C-밴드의 다중 파장 영역에서 증폭이 일어남을 보여주려고 한다. 이득 평탄화 필터는 금속선을 광섬유에 주기적으로 배열하여 장주기 격자를 형성시킴으로써 대역제거 특성이 일어나는 원리를 이용하여 적용하였다.

Fig. 3은 제안된 이득 평탄화 필터의 개략도와 제작된 필터의 투과 스펙트럼을 보여준다. 평판 유리위에 550 $\mu\text{m}$  주기로 250 $\mu\text{m}$  직경의 금속선을 배열한다. 각 금속선간의 일정한 주기를 지속적으로 유지할 수 있도록 하기 위하여 제작시 보조 지그를 사용하였으며 소자가 완성된 후 제거하였다. 금속선의 정렬이 끝나면 단일모드 광섬유를 금속선과 수직이 되게 위치시키고 자외선에 경화될 수 있는 포토폴리머의 일종인 광접착체를 도포한다. 마지막으로 평판유리를 상부에 덮고 일정한 힘으로 누른 상태에서 자외선을 조사하여 상하부의 평판유리를 완전히 접착시킨다. 이때 상부에 누르는 힘에 따라 공진 파장에서의 광 결합 정도가 달라지므로 이득 평탄화시키고자 하는 어븀첨가 광섬유의 증폭된 자발 방출의 출력 스펙트럼에 따라 필터 특성을 조절할 수 있다. 광 접착제가 완전히 경화된 후에는 상부에서 누르던 힘을 제거한다. 지금까지 발표된 외부 응력에 의해 유도되는 장주기 격자와는 달리 본 연구에서 적용한 필터는 외부의 압력이 제거되더라도 광 접착제의 결합력에 의해 장주기 격자가 광섬유 상에 형성되어 유지되는 특성을 가진다. Fig. 3 (b)는 제작된 소자의 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 필터의 스펙트럼 폭은 장주기 격자의 개수에 의해서 결정이 되는데 격자의 수가 늘어나면 필터의 선폭은 좁아진다. 공진파장은 단일모드 광섬유내의 LP<sub>01</sub> 코어모드와 LP<sub>0m</sub> 클래딩 모드간의 위상 정합 조건을 만족하는 특정한 파장에서 일어나는데 식 (1)로 표현된다.

$$\lambda_m = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{0m})\Lambda \quad (1)$$

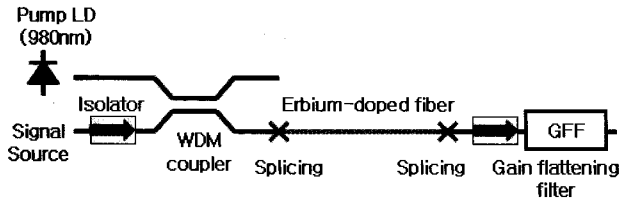


Fig. 2 Schematic of gain-flattened EDFA.

여기서  $\lambda_m$ 는 m차 모드의 공진파장,  $n_{co}^{01}$ 와  $n_{cl}^{0m}$ 는 각각 코어와 클래딩의 유효 굴절률,  $\Lambda$ 는 격자의 주기이다.

일반적으로 어븀첨가 광섬유의 자발 방출 스펙트럼은 1530 nm 영역에서 최대의 이득특성을 가지므로 이득 평탄화 필터의 공진 파장 또한 동일한 파장내역으로 맞추어져야 한다. 코어 모드에서 클래딩의 특정 모드로 광 결합이 일어나게 되므로 광 스펙트럼 분석기로 측정된 투과 스펙트럼은 Fig. 3 (b)와 같은 대역제거 필터의 특성이 된다. 550  $\mu\text{m}$  주기의 장주기 격자로부터 공진파장이 1535 nm 부근에서 나타남을 알 수

있다. 공진파장을 이득곡선의 최대치와 일치시키기 위해서 금속선과 광섬유의 교차각을 조절함으로써 격자 주기가 바뀌는 효과를 이용하여 가변시킨다. 대역제거 깊이는 광 접착제의 결합력에 의해 -15 dB 이상까지 제어가 가능하다.

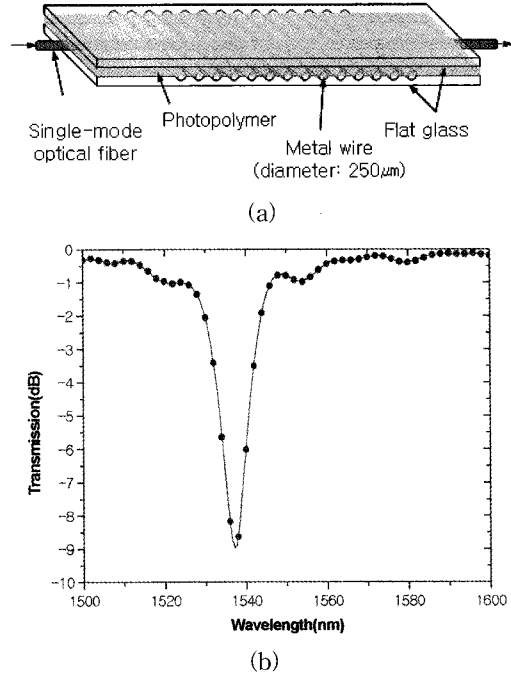


Fig. 3 Proposed long period fiber gratings for gain-flattening of EDFA

(a) schematic and (b) transmission spectrum

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 제작된 어븀첨가 광섬유 증폭기의 사진을 보여주고 있다. 광 접속합체를 이용하여 시스템을 구현하였고 커넥터를 이용하여 입력신호와 출력신호를 연결할 수 있도록 하였다. 출력 단자의 경우 이득 평탄화된 출력과 이득 평탄화 되기 전의 출력 스펙트럼을 측정할 수 있도록 분리된 단자를 두고 있다. 10 m 길이의 어븀첨가 광섬유에 980 nm 중심파장을 가지는 레이저 다이오드로 펌핑했을 때 나타나는 투과 스펙트럼을 측정한 결과는 그림 5와 같다. 펌핑 광원에 의한 출력 스펙트럼이 980 nm 부근에 나타나고 있으며, 펌핑으로 여기된 어븀 이온의 자발방출에 의한 이득곡선이 C-밴드 영역에서 나타남을 알 수 있다. 이것은 광통신에서 파장분할 다중화의 다 채널 신호들을 동시에 증폭시키기 위한 C-밴드에서의 광섬유 증폭기로 적용이 가능함을 보여준다.

이득 평탄화 되기 전의 어븀첨가 광섬유 증폭기의 출력 스펙트럼과 이득 평탄화 된 후의 출력 스펙트럼을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 이득 평탄화 필터를 통과하기 전에는 1530 nm 부근에서 평탄화되지 않은 투과 스펙트럼을 보여주고 있으며 이 경우 다채널 증폭기로 활용하는데 제약이 따르는데 여러 개의 파장을 동시에 증폭시킬 경우 증폭된 후 각각의 채널의

출력 광세기가 일정하지 않은 문제점이 발생한다. 통상 ASE의 출력 리플이 1 dB이내가 되도록 이득을 평탄화 시킨다. 제안된 장주기 광섬유 격자 필터를 이용한 경우 Fig. 6과 같이 비교적 평탄화가 잘 이루어진 ASE를 얻을 수 있었다. 이득 평탄화 필터의 공진파장은 1530 nm에 맞추어졌으며 광 결합에 의한 감쇠 깊이는 -6 dB이다. 또한, 이득 평탄화 되어 일정한 이득을 유지하는 영역의 파장은 1525~1560 nm로 선평이 35 nm 정도이고 이득 리플이 1 dB 이내로, 증폭된 자발방출을 이용한 광대역 광원으로 활용이 가능함을 보여준다.

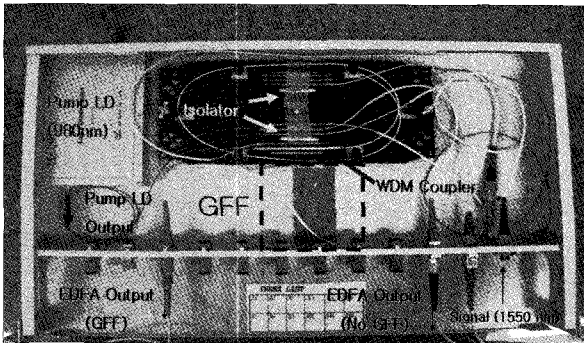


Fig. 4 Photograph of fabricated EDFA. The length of EDF is 10m

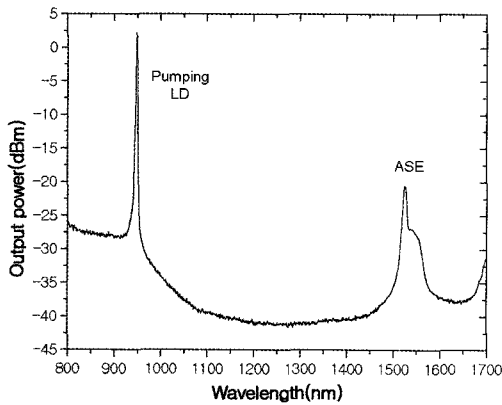


Fig. 5 Transmission spectrum of pump laser diode and amplified spontaneous emission of EDF by pumping

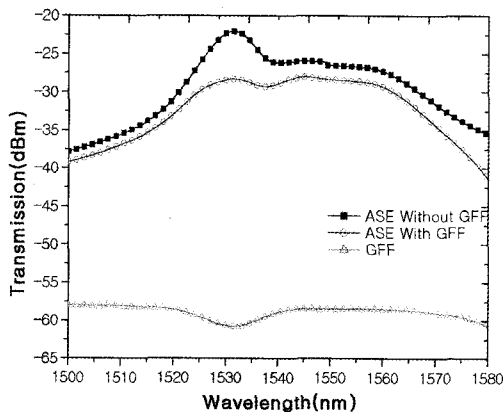


Fig. 6 Transmission spectrum of gain-flattened EDF

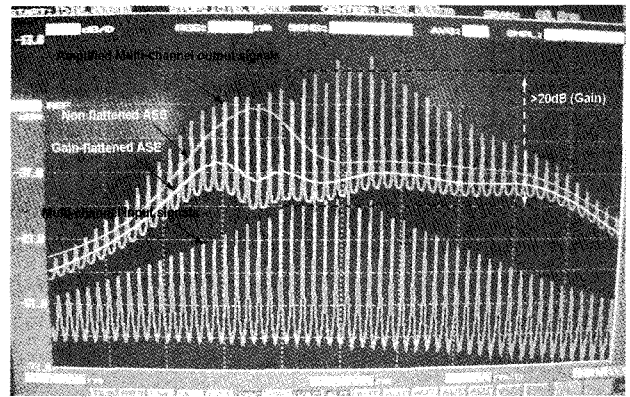


Fig. 7 Transmission spectra when multi channels are passing through EDFA. All of channels are amplified and maximum amplification ratio is about 20dB

파장분할 다중화 광 전송 시스템에서 C-밴드의 다중파장을 동시에 증폭시킬 수 있음을 보여주는 실험을 수행하였다. 다중파장 신호원으로 페브리-페롯 레이저 다이오드를 Fig. 2의 신호원 단자에 연결하고 펌핑 광원과 동시에 파장분할 다중화 결합기에 입사시킨다. 펌핑광은 어븀첨가 광섬유를 지나면서 어븀 이온의 자발방출을 유도하고 신호원에 이득을 제공한다.

Fig. 7은 측정된 투과 스펙트럼이다. 입력 다중 채널 신호, 증폭된 자발방출 곡선, 이득 평탄화된 이득 곡선, 증폭된 다중 채널 신호를 보여주고 있다. 입력 다중 채널 신호원은 페브리-페롯 레이저 다이오드이므로 공진 파장에 따른 출력의 세기가 일정하지 않다. 최대 출력은 1540 nm 부근에서 나타나고 있다. 만약 파장 가변 레이저 광원을 사용한다면 전 대역에 걸쳐 출력세기가 일정한 입력 신호원을 제공할 것이다. 증폭기를 통과한 입력신호의 모든 채널이 동시에 증폭됨을 알 수 있으며 이득 평탄화된 ASE에 의해서 최대 20 dB 이상 증폭된 다중 채널 출력 신호가 된다. 이와 같이 광섬유 증폭기는 여러 채널의 신호를 한 개의 증폭기로 증폭할 수 있으므로 시스템을 간소화시키는 이점을 제공한다.

## 5. 결 론

주기적으로 배열된 장주기 광섬유 격자를 이용하여 이득 평탄화된 어븀첨가 광섬유 증폭기를 제작하였다. 980 nm 펌핑광원의 펌핑에 의하여 어븀첨가 광섬유의 어븀이온은 자발방출을 하게 되는데 이득 곡선이 평탄하지 못하므로 제작된 장주기 광섬유 격자를 이용하여 1 dB 이내의 리플을 가지도록 평탄화 시켰다. 증폭된 자발 방출을 이용하여 35 nm의 파장대역을 가지는 광대역 광원으로 활용될 수 있음을 보였다. 파장분할 다중화 방식의 광 전송 시스템에서 제작된 증폭기로 여러 개의 채널 신호를 동시에 증폭시킬 수 있음을 보였다. C-밴드의 다중 채널 신호에 대하여 20 dB 이상 증폭된 출력 신호를 얻었다. 제안된 광섬유 증폭기는 파장 분할 다중화 방식의 초고속 대용량 장거리 광전송 시스템 또는 손실이

많은 광 네트워크 시스템에서 전기적인 신호 변환 없이 광섬유 상에서 바로 증폭할 수 있는 효과적인 방법을 제공할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Baldwin, C., Chen, P., Kiddy, J., Niemczuk, J., Christiansen, M. Vaithyanathan, K. and Chen, S. (2001), "Structural testing of a Navy LPD-17 propulsion propeller using Bragg grating sensors and digital spatial wavelength domain multiplexing", Proc. of SPIE, vol. 4332, pp. 124-132.
- [2] Becker, P. C., Olsson, N. A. and Simpson, J. R. (1999), "Erbium-doped Fiber Amplifiers-Fundamentals and Technologies", Academic Press.
- [3] Borinski, J. W. and Meller, S. A. (2001), "Fiber optic sensors for machine health monitoring", Proc. of SPIE, vol. 4191, pp.55-65.
- [4] Hamdi, M. and Qiao, C. (2003), "Special Issue: Engineering the next-generation optical internet", Optical Networks Magazine, vol. 4, pp. 5-6.
- [5] Harumoto, M., Shigehara, M., Suganuma, H. and Suganuma, H. "Gain-flattening filter using long-period fiber gratings, J. Lightwave Technol.," vol. 20, pp. 1027-1033.
- [6] Ishii, Y., Okude, S. Nishide, K. and Wada A. (2001), "Athermalization of wideband EDFA gain profile using a phase-shifted long-period fiber grating, Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Comm., Amsterdam", pp. 82-83.
- [7] Lee, C. L. and Lai, Y. (2002), "Evolutionary programming synthesis of optimal long-period fiber grating filters for EDFA gain flattening", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, pp. 1557-1599.
- [8] Poloso, T.(2001), "Fiber bragg gratings optical sensing technology", Smart Materials Bulletin, september, pp. 7-10.
- [9] Sohn, K. R. and Kim, K. T. (2005), "Thermo-optically tunable band-rejection filters usinf mechanically formed long-period fiber gratings", Opt. Lett., vol. 30, pp. 2688-2690.
- [10] Vengsarkar, A. M., Pedrazzani, J. R., Judkins, J. B. and Lemaire, P. J. (1996), "Long-period fiber-grating-based gain equalizers", Opt. Lett., vol. 21, pp. 336-338.

---

원고접수일 : 2007년 5월 9일

원고채택일 : 2007년 12월 30일