

50 GHz 채널 간격의 64 채널 광신호 전송을 위한 L-band EDFA의 구조 최적화

최보훈*

Structure optimization of a L-band erbium-doped fiber amplifier for 64 optical signal channels of 50 GHz channel spacing

Bo-Hun Choi*

*Professor, Department of Materials Physics, Dong-A University, Busan, 49315 Korea

요약

채널 간격이 50 GHz 인 64 채널 파장분할 다중화 광신호를 위한 고출력 이득 평탄화된 L-band 광증폭기의 구조가 최적화되고 이 증폭기의 출력 특성이 측정되었다. 1570 nm 에서 1600 nm 사이에서 그리고 -2 dBm 입력조건 하에서, 최적화된 이단증폭기는 1 dB 오차 내에서 파장에 따른 평탄화된 이득을 가지며 이득 값은 20 dB 였다. 잡음지수는 6 dB 이내로 최소화 되었다. 추가적인 소자의 도움 없이 EDF 의 특성만을 고려하여 이득평탄화가 구현되었다. 증폭기는 2단 증폭단으로 구성되며 각 증폭단은 EDFA 구조를 기본으로 하였다. 각 단에서 EDF의 길이와 펌핑 구조들이 실험을 통해 최적화 되었다.

ABSTRACT

The structure of a high-power gain-flattened long wavelength band (L-band) optical amplifier was optimized, which was implemented for 64-channel wavelength division multiplexed optical signals with a channel spacing of 50 GHz. The output characteristics of this L-band amplifier were measured and analyzed. The amplifier of the optimized two-stage amplification configuration had a flattened gain of 20 dB within 1 dB deviation between 1570 and 1600 nm for -2 dBm input power condition. The noise figure under this condition was minimized to within 6 dB in the amplification bandwidth. The gain flattening was realized by considering only the characteristics of gain medium in the amplifier without using additional optical or electrical devices. The proposed amplifier consisted of two stages of amplification stages, each of which was based on the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) structure. The erbium-doped fiber length and pumping structures in each stage of the amplifier were optimized through experiments.

키워드 : 파장분할 다중화, 광통신, 어븀 첨가된 광섬유 증폭기, 잡음지수

Key word : wavelength division multiplexing, optical communications, Erbium-doped fiber amplifier, Noise Figure

Received 13 September 2022, Revised 24 September 2022, Accepted 1 October 2022

* Corresponding Author Bo-Hun Choi(E-mail:adamchoi@dau.ac.kr, Tel:+82-51-200-7221)

Professor, Department of Materials Physics, Dong-A University, Busan, 49315 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.11.1666>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

IoT (internet of things) 기술, 데이터센터 등의 새로운 수요에 힘입어 광통신 전송 용량이 급격히 증가하고 있다. 기존에 광통신 기술에서 전송 용량의 확대에 획기적으로 기여한 광신호 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing) 기술은 이러한 수요에 힘입어 사용되는 광신호의 채널수 증대에 더욱 요구되고 있다. 파장다중화 채널의 수는 초창기에는 몇 개 되지 않았지만 최근 급격한 발전으로 100 채널 이상도 가능한 상황이다. 또한 개별 채널의 전송 속도도 과거의 10 Gb/s에서 40 Gb/s 혹은 100 Gb/s의 기술들이 속속 상용화 되고 있다. 따라서 파장다중화 되고 각 채널은 초고속화된 광신호의 전송이 오늘날 광전송 기술을 주도하고 있다[1,2].

광신호 파장분할 다중화 기술은 광신호 생성 기술이나 광신호의 다중화/역다중화 장치 등 여러 기술들의 융합으로 구현되는 기술이지만 광신호의 전송이라는 관점에서 본다면 기술적인 핵심은 광증폭 기술이다. 수십 채널의 파장분할 다중화된 광신호를 수용하기 위해서는 광증폭기의 필수 조건은 첫째 넓은 파장대역폭을 가져야 한다. 이득을 줄 수 있는 대역폭이 충분히 넓지 못하면 다중화된 광신호들은 파장에 의존하는 이득을 가지게 되고 최종 송신단에서 측정되는 신호품질은 파장에 따라 큰 차이를 보이게 될 것이다. 둘째 조건은 높은 광출력이 요구된다. 이는 채널의 수가 급격히 늘어나면 증폭기의 입력 값은 높아지기 때문이다. 고출력이면서 동시에 잡음지수도 적절히 관리되어야 한다. 셋째 조건은 이득평탄화를 통해 파장분할다중화 채널간의 이득의 균등화가 요구된다[3].

본 논문에서는 1570~1600 nm 파장영역인 L-band 대역에서 50 GHz 채널 간격의 64 개의 파장분할 다중화 채널들의 입력을 위한 광증폭기의 구조를 최적화하였다. 광전송 시스템의 특성상 실제로 사용되어야 할 많은 광원들을 모두 사용하기에는 제약이 있으므로 앞서 논문에서 입증된 포화이득 신호 기법을 적용하였다[4,5]. 광증폭기는 2단 증폭기 구조가 채택되었으며 각 증폭단은 어븀 첨가된 광섬유증폭기(erbium-doped fiber amplifier; EDFA)의 구조를 기본으로 하되 어븀 첨가된 광섬유(erbium-doped fiber; EDF) 길이, 펌프의 사용 구조 등이 최적화되었다. 특히 파장분할 다중화 신호 증폭에서 중요한 이득의 파장에 따른 평탄화가 다른 특수 부품의 도

움 없이 EDF의 특성만을 이용하여 구현되었다. 이득 특성과 함께 잡음지수도 최소화하여 이득평탄화된 고출력 저잡음 L 대역 증폭기가 구현되었다.

II. 실험 장치

L 대역 구간의 광신호 증폭을 위한 광증폭기의 특성을 조사하기 위한 기본 실험 장치와 증폭기의 구조가 그림 1에 주어져 있다. 64 채널의 파장분할다중화 입력 신호 실험을 위해 이득 포화 신호 실험 방법을 적용되었는데 하나의 파장 가변 레이저(Tunable Light Source)가 광원으로 사용되었고 두 개의 고출력 DFB (distributed feedback) LD(laser diode)가 이득 포화 신호 (Saturation tone)로 사용되었다. 두 LD들의 파장은 전체 L 대역 범위를 고려하여 1576 와 1592 nm 이 선택되었다. 가변파장 레이저의 파장은 국제표준(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector: ITU-T)에 의해 파장다중화 전송을 위한 정해진 표준화 값을 따라 L 대역에서 50 GHz 주파수 간격으로 이동하면서 선택했다[6]. 이 광원들이 파장분할 다중화기에 의해 하나의 전송선에 결합되었다. 이 광원들이 파장다중화 커플러에 의해 결합되어 어븀 첨가 광섬유증폭기의 입력으로 사용되었다. 광증폭기의 증폭 매질로 사용된 어븀 첨가 광섬유의 개구수는 0.22이며 단일모드 단락파장은 1330 nm이다. 1200 nm에서 3.6 dB/km 감쇄 값을 갖는다. 이득을 위한 흡수 계수는 1480 nm와 1531 nm에서 각각 2.85 dB/m와 7.6 dB/m를 가진다. L 대역 증폭은 C 대역에서 형성된 증폭자발방출(amplified spontaneous emission: ASE)을 다시 흡수해서 L 대역의 신호 증폭의 효율이 증가하게 된다. 따라서 이 EDF의 1531 nm 흡수 계수가 C 대역용 EDF에 비해 상당히 큰 것을 통해 사용된 EDF가 L 대역용임을 확인할 수 있다.

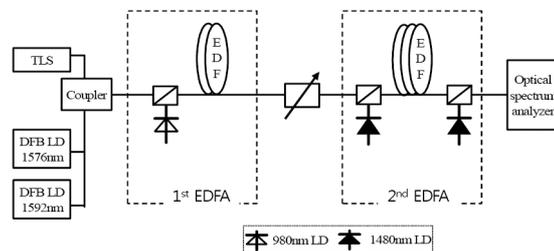


Fig. 1 A schematic of the experiment setup

입력신호는 개별 채널당 -21 ~ -15 dBm을 고려하여 총 입력신호는 +2 dBm를 사용하였다[3]. 증폭기 구조는 2단 증폭기 구조이므로 첫 번째 단의 EDF는 50 m이고 980 nm 펌프 LD에 의해 순방향 펌핑 되었다. 두 번째 단의 EDF는 80 m로, 두 개의 1480 nm 펌프 LD에 의해 양방향 펌핑 되었다. 각 EDF의 길이는 시뮬레이션에 의해 최적화 계산에 의해 선택된 값이다. EDF의 발광스펙트럼의 특성상, L 대역에서 균일한 이득을 가지려면 밀도반전을 낮게 유지해야 한다[7]. 입력신호가 이같이 큰 조건에서 밀도반전을 낮추려면 EDF의 길이가 길어야 한다. 따라서 L 대역 EDFA의 EDF의 길이는 C 대역용 EDFA의 경우보다 길어지게 된다. 펌핑 구조는 순방향의 980nm 펌핑 구조가 저잡음에 유리하고 역방향의 1480 nm 펌핑 구조가 고출력에 유리한 사실을 고려하여 선택된 구조다[8]. 각 펌프 LD들은 파장다중화 커플러를 통해 EDF에 입사되었고 입사되는 펌프의 세기는 125 mW (980 nm pump LD)과 200 mW (1480 nm pump LD)였다. 첫 번째 단의 출력세기에 따라 가변 광 감쇄기에 의해 +5 dBm 과 +9 dBm으로 조정된 후 둘째 단의 증폭기에 입사되었다. 이 감쇄기의 역할은 실제 전송 시에는 사용될 분산보상장치 등에 의한 손실값을 의미한다. EDFA에 의해 출력된 증폭 신호는 광스펙트럼 분석기를 통해 스펙트럼이 분석되었다.

III. 실험 및 실험 결과

그림 1의 증폭기 구조 중 제1단 증폭기에 대한 이득과 잡음지수 스펙트럼 실험 결과가 그림 2에 주어져 있다. 그림에서 위쪽 세 그래프는 광신호의 이득을 나타내며 아래쪽 세 그래프는 광신호의 잡음지수를 나타낸다. 펌프 LD에 인가되는 전류를 190 ~ 220 mA 사이로 변화시키면서 측정하였다. 인가되는 전류의 세기가 220 mA에 가까워질수록 이득이 증가하면서 동시에 이득 스펙트럼도 파장에 따라 균일한 값을 가진다. 이 펌프의 조건에서 잡음지수는 5 dB 이하의 안정된 낮은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. L 대역 구간인 1570 ~ 1600 nm 파장영역에서 이득의 크기 자체는 11 dB로 낮지만 균일한 이득과 낮은 잡음지수는 2단 증폭기 구조에서 제1단 증폭기로서는 적절한 특성으로 평가된다. 여기서 한가지 중요한 것은 펌프의 출력 에너지에 따라 증폭기 이득의

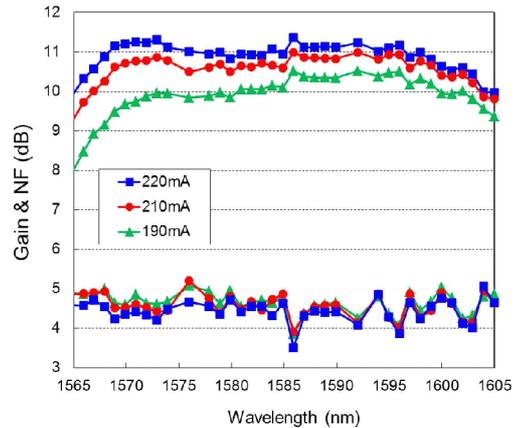


Fig. 2 Gain and NF spectra of the first EDFA

파장에 따른 기울기가 달라진다는 것이다. 이는 펌프의 조건에 따라서 EDF의 밀도반전 정도가 달라져서 발광스펙트럼이 변한 결과다. 이 조건을 이용하여 제2단 증폭기에 의한 최종적인 이득 기울기가 결정된다.

제2단 증폭기의 EDF는 제1단 증폭기의 EDF와 같은 광섬유를 사용하였고 길이는 80 m로 컴퓨터 시뮬레이션 실험을 통해 최적화된 길이를 사용하였다. 제1단 증폭기의 이득 평탄화 조건인 220 mA 조건을 사용하였고 이를 그림1의 실험장치도에 있는 광감쇄기를 사용하여 +5 또는 +9 dBm의 세기로 조정한 뒤 제2단 증폭기의 입력으로 사용하였다. 이 같은 조건에서 얻어진 이단증폭기의 이득과 잡음지수 스펙트럼이 그림 3에 주어져 있다. 그림에서 위쪽 두 곡선은 이득이며 아래쪽 두 곡선은 잡음지수를 나타낸다. 그리고 사각형점으로 나타낸

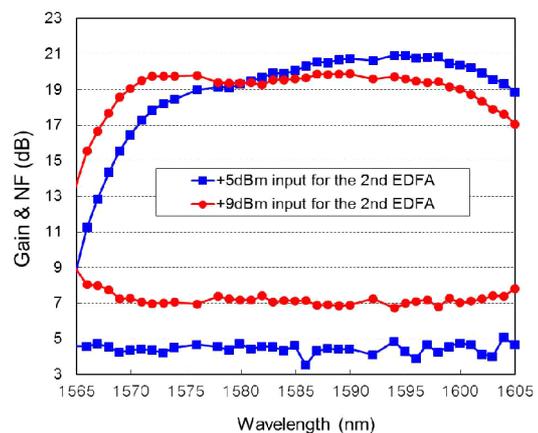


Fig. 3 Gain and NF spectra of two-staged EDFA using two 1480 nm pumps for the second EDFA

것은 입력세기가 +5 dBm 인 경우이고 원형점으로 나타낸 것은 +9 dBm 인 경우이다.

제2단 증폭기로 입력되는 광신호의 세기가 +9 dBm의 입력조건에서 19 dB 이상의 이득이 파장에 따라 평탄하게 얻어짐을 확인 할 수 있다. 하지만 이 경우 +5 dBm 입력조건과 비교하여 잡음지수가 급격히 나빠져서 최소 1 dB 이상 악화되었다. 잡음지수 특성은 특히 장거리 전송에서 중요한데 잡음지수가 높을수록 광증폭기를 통과할 때마다 광신호의 신호 대 잡음비율이 나빠지게 된다. 따라서 가능하면 잡음지수의 악화를 최소화하면서 원하는 이득을 얻도록 광증폭기를 설계해야 한다. +9 dBm 입력조건에서 잡음지수 악화의 원인은 제1단 증폭기에서 이득이 11 dB 로 낮았고 이를 다시 광감쇄기로 광신호를 줄이는 과정에서 신호대 잡음비가 악화되었기 때문으로 해석된다. 이를 극복하기 위해서는 제1단 증폭기의 이득을 더 향상시키는 것이 필요하다. 제1단 증폭기의 이득을 향상시키면 제2단 증폭기의 밀도반전을 유지시키기 위해서는 제2단 증폭기의 펌프 에너지의 증가도 요구된다.

이 같은 점들을 수용하여 잡음지수 악화를 극복하고 평탄한 이득 특성을 갖는 증폭기를 위해서 개선된 구조의 증폭기 구조를 사용하였다. 이 구조가 그림 4에 주어진다. 이 구조의 EDF의 길이는 그림1과 같지만 펌프 조건이 변경되었다. 제1단 증폭기의 펌핑 구조는 고이득을 위해 양방향 펌핑으로 보강되었다. 고이득과 함께 저잡음도 고려하여 순방향은 980 nm 파장을 사용하였고 역방향은 1480 nm 파장을 사용하였다. 순방향 펌프 세기는 160 mW이고 역방향 펌프 세기는 40 mW로 최적화하였다. 이 같은 펌프세기의 보강은 EDF의 밀도반전을 향상시키게 되고 그 결과 증폭대역 중에서 단파장 쪽이 이득이 장파장 쪽 보다 크게 되는 효과를 주게 된다. 제2단 증폭기도 저잡음을 위해 순방향은 980 nm LD를

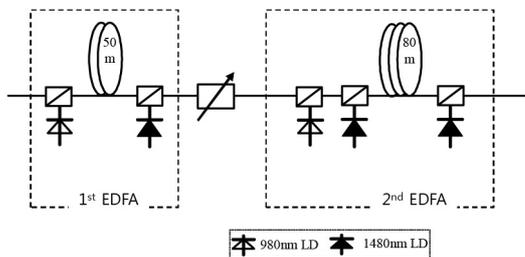


Fig. 4 two-staged EDFA configuration revised for high gain and low NF

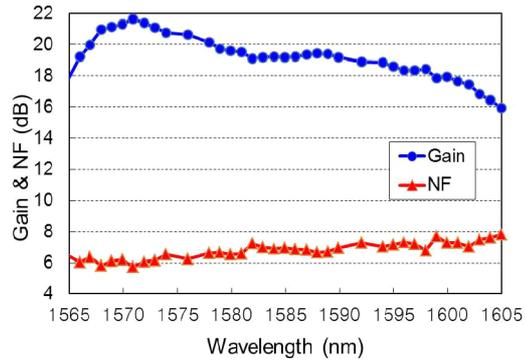


Fig. 5 Gain and NF spectra of two-staged EDFA using three pump LDs for the second EDFA

사용하였다. 또한 제1단 증폭기의 펌프 세기가 증가할 것을 고려하여 제2단 증폭기에서도 펌프세기를 더 보강하기 위해서 순방향으로 1480 nm LD를 함께 사용하였고 역방향은 1480 nm LD를 사용하였다. 그 결과 제2단 증폭기는 모두 3개의 펌프 LD를 사용하는 구조를 사용하였다. 펌프의 세기는 순방향 980 nm LD와 1480 nm LD는 각각 160 mW와 40 mW가 사용되었고 역방향 1480 nm LD는 190 mW 가 사용되었다.

그림4의 증폭기 구조에서 제1단증폭기의 입력은 +2 dBm으로 제2단 증폭기의 입력은 +5.5 dBm으로 하였을 때 측정된 이득과 잡음지수 스펙트럼이 그림 5에 주어 져 있다. 이득은 단파장에서 컷지만 장파장으로 갈수록 작아지고 그 결과로 잡음지수는 단파장에서는 6 dB지만 장파장에서는 8 dB까지 확대되었고 전체적으로 이득 평탄화가 이루어지지 못했다. 이득 스펙트럼을 볼 때 제2단 증폭기의 EDF에서 밀도반전 상태가 높다는 것을 확인할 수 있다. 증폭기가 이득 평탄화가 되도록 조건을 맞추기 위해서는 이 밀도 반전 상태가 더 낮아져야 한다. 이를 위해서는 펌프의 세기를 낮추거나 입력신호를 높이는 두 가지 방법 중에 하나를 사용할 수 있다. 펌프 세기를 낮추면 밀도반전은 낮아지지만 동시에 이득도 줄어들게 된다. 따라서 입력신호를 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 이를 위해 제2단 증폭기로 입력되는 광세기를 +9 dBm으로 증가시켰다. 또한 펌프 세기도 일부 보강을 위해 그림 4에서처럼 세 개의 LD를 사용하는 대신 190 mW의 두 개의 1480 nm LD로 양방향 펌핑하였다. 잡음지수를 위해서는 980 nm 펌프가 유리하지만 이 단 증폭기 구조에서 전체 잡음지수는 제1단의 영향이 크므로 제2단 증폭기에서는 잡음지수 효과보다 이득에

유리한 1480 nm를 양방향으로 사용한 것이다.

이 같은 증폭기 구조와 입력조건을 사용하여 얻어진 결과가 그림 6에 주어진다. 그림에서 (a)는 제1단 증폭기의 이득과 잡음지수이고, (b)는 제2단 증폭기의 이득과 잡음지수로 각 단을 구별하여 측정하였다. 제1단 증폭기는 단파장에서 큰 이득을 가지며 L대역 전체에서 평균 14 dB 로 그림2에서 이득보다 배나 큰 이득임을 확인할 수 있다. 잡음지수는 4 dB보다 조금 큰 정도로 낮은 값을 가지는데 이는 순방향의 980 nm 펌프에 의한 영향이다. 제2단 증폭기의 이득은 단파장에서는 작고 장파장에서 큰 특성을 보여주고 있으며 이는 +9 dBm과 큰 입력신호에 의해 EDF의 밀조반전 상태가 낮아져서 얻어진 결과이다. 큰 입력값 때문에 190 mW 두 개의 LD를 사용하였으나 이득 값은 13 dB 전후를 얻었다. 잡음지수는 7 dB 전후이고 단파장으로 갈수록 낮은 이득으로 인해 잡음지수가 악화됨을 알 수 있다.

그림 7은 이 두 증폭기가 연결된 이단 증폭기 구조에서 측정된 이득과 잡음지수이다. L 대역 구간인 1570 nm에서 1600nm 파장구간에서 편차 1 dB 이내에서 이득은 평탄화된 결과를 보여준다. 동시에 이득이 20 dB의 고이득을 보인다. 이 같은 이득 평탄화 결과는 C 대역 증폭기 구조에서 일반적으로 사용하는 이득 평탄화

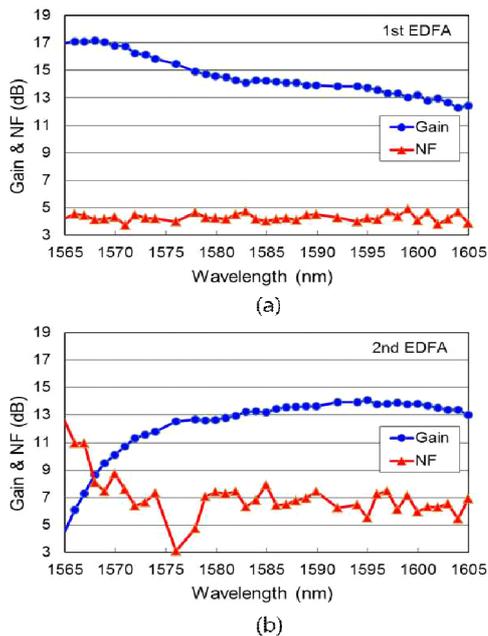


Fig. 6 gain and NF of the first EDFA (a) and the second EDFA (b) for optimized two-staged EDFA

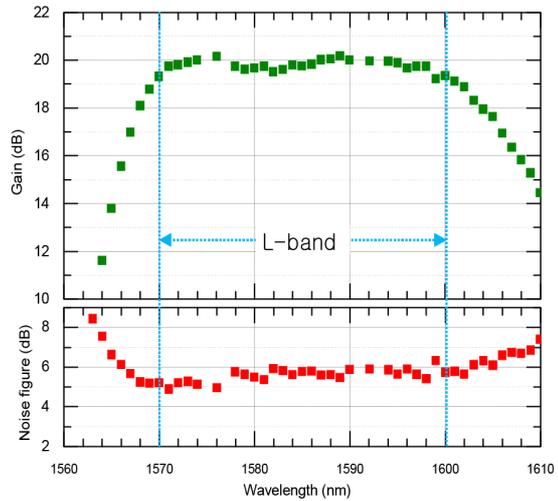


Fig. 7 Gain and NF of gain-equalized two-staged EDFA

장치를 사용하지 않고 얻어진 결과다. 이득평탄화 장치 대신 제1단 증폭기의 파장에 따른 이득 기울기와 제2단 증폭기의 파장에 따른 이득 기울기를 그림 6에서와 같이 반대방향으로 하여 다른 부품의 도움 없이 순수히 증폭기 자체의 특성 최적화를 통해 이루어졌다. 잡음지수도 6 dB 이내로 측정되었는데 그림 3이나 그림 5에서 실험된 결과에 비교하여 최소 1 dB 이상 개선되었음을 알 수 있다.

이단 증폭기 구조를 사용하고 EDF의 길이를 시뮬레이션을 통해 최적화하였으며, 실험을 통해 제1단과 제2단의 펌핑조건과 구조를 최적화함으로써 L대역에서 사용가능한 이득평탄화된 고이득 저잡음지수의 광증폭기가 구현되고 실험으로 그 결과를 입증하였다.

IV. 결론

채널 간격이 50 GHz인 64 채널 파장분할 다중화 광신호를 위한 고출력 이득 평탄화 된 L-band 광증폭기의 구조가 최적화되고 이 증폭기의 출력 특성이 측정되었다. 구조는 2단 증폭단으로 구성되며 각 증폭단은 EDFA 구조를 기본으로 하였다. 첫 번째 단은 980 nm 순방향 펌프 하나만 사용된 구조와 980 nm와 1480 nm가 양방향 펌프로 사용된 구조가 비교되었다. 두 번째 단은 순방향의 980 nm를 포함하여 3개의 펌프가 사용된 경우와 두 개의 1480 nm 펌프가 사용된 경우가 비교되었다.

제1단과 제2단 증폭기에서 EDF의 길이는 각각 50 m와 80 m로 최적화 되었고, 펌프 구조의 최적화는 두 증폭단의 이득 기울기가 파장에 따라 반대가 되는 밀도발전 조건에 의해 선택되었다. L 대역인 1570 nm에서 1600 nm 사이에서 그리고 -2 dBm 입력조건 하에서, 최적화된 이단증폭기는 1 dB 오차 내에서 파장에 따른 평탄화된 이득을 가지며 이득 값은 20 dB 였다. 잡음지수는 6 dB 이내로 최소화 되었으며 이 같은 이득평탄화는 추가적인 소자의 도움없이 EDF의 특성만을 고려하여 최적화 되었다.

ACKNOWLEDGEMENT

It was also supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2022R1A2C1004234)

References

- [1] T. Hasegawa, Y. Yamamoto, and M. Hirano "Optimal fiber design for large capacity long haul coherent transmission," *Optics Express*, vol. 25, no. 2, pp. 706-712, Jan. 2017.
- [2] L. Krzeczanowicz, M. A. Iqbal, I. Phillips, P. Harper, and W. Forsyia, "High-capacity multi-span transmission performance characterization of broadband discrete Raman amplifier," *Optics Express*, vol. 28, no. 12, pp. 18296-18303, Jun. 2020.
- [3] B. -H. Choi, "Optimization of a C-band Erbium-Doped Fiber Amplifier for Wavelength Division Multiplexing Optical Communications Using 64 Channels," *New Physics: Sae Mulli*, vol. 69, no. 1, pp. 107-112, Jan. 2019.
- [4] B. -H. Choi, H. -H. Park, and M. -J. Chu, "New pump wavelength of 1540nm-band for Long-Wavelength-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier (L-band EDFA)," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 39, no. 10, pp. 1272-1280, Oct. 2003.
- [5] B. -H. Choi, "Long haul transmission link using a optimized circulating loop for optical wavelength division multiplexing signals," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 1757-1763, Jul. 2014.
- [6] G.694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [Internet]. Available: www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1.
- [7] K. Maeda, Y. Tsuchida, S. Takasaka, T. Saito, K. Watanabe, T. Sasa, R. Sugizaki, K. Takeshima, and T. Tsuritani, "Cladding pumped multicore EDFA with output power over 20 dBm using a fiber based pump combiner," in *Proceedings of 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, Shanghai, China, pp. 1-3, 2015.
- [8] B. -H. Choi and S. S. Lee, "Input power dynamic range analysis of SOA and EDFA link extenders on TDM-PON systems without burst effect control," *Optics Communications*, vol. 286, pp. 187-191, Jan. 2013.



최보훈(Bo-Hun Choi)

1992년 부산대학교 물리학 학사
 1996~1998년 삼성전자 근무
 2001년 8월 KAIST(ICU) 공학 박사
 2009~현재 동아대학교 교수
 ※ 관심분야 : 광전송시스템, 광섬유센서, 광증폭기