
L 대역 EDFA 특성의 펌프 파장 의존성에 관한 연구

최 보 훈*

Investigation of Pump Wavelength Dependence of Long-Wavelength-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier using 1530nm-Band Pump

Bo-Hun Choi*

이 논문은 광주대학교의 연구지원을 받았음

요 약

1530nm 파장 대역이 L밴드 (long-wavelength-band) EDFA(erbium-doped fiber amplifier)를 위한 펌프 파장으로 연구되었다. 이 펌프 광원은 파장 가변 광원과 직렬 연결된 C 밴드 (conventional-band) EDFA로 제작되었다. 이 L밴드 EDFA는 순방향 펌핑 구조를 사용하였다. 1530nm 대역 내에서 1545nm 펌프 파장을 사용하였을 때 0.45dB/mW 이득 계수를 얻었는데 이는 기존에 사용되는 1480nm 파장으로 펌핑하였을 경우보다 2배 이상 높은 수치이다. 1530nm 파장 펌핑의 잡음지수는 가장 좋지 않은 경우가 6.36dB였는데 이는 1480nm 펌핑보다 0.75dB 높은 값이다. 제안된 펌핑 파장을 이용하는 L밴드 EDFA에서 얻은 이 같은 높은 이득 계수는 이 L밴드 EDFA가 전력 소모를 적게 한다는 것을 의미한다.

ABSTRACT

1530nm band has been studied as pump wavelength for long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifier (L-band EDFA). The pump source is built using a tunable light source and cascaded conventional-band (C-band) EDFA. The L-band EDFA uses a forward pumping scheme. Within the 1530nm band, 1545nm pump demonstrates 0.45dB/mW gain coefficient, which is twice better than that of conventional 1480nm pumped EDFA. The noise figure of 1530nm pump is at worst 6.36dB, which is 0.75dB higher than that of 1480nm pumped EDFA. Such high gain coefficient indicates that the L-band EDFA consumes low power.

키워드

에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA), 이득(gain), 광섬유통신, 파장분할다중화

I. 서론

광신호 증폭을 위해서는 광신호 대역으로 현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 1550nm 대역을 증폭할 수 있는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (erbium-doped fiber

amplifier; EDFA)가 있지만 기존의 신호 대역보다 장파장 대역을 증폭시킬 수 있는 EDFA에 대한 연구가 최근 급격히 진행되고 있다[1]. 기존의 신호 대역을 증폭시키는 EDFA를 C 대역 EDFA, 그리고 장파장 대역을 증폭시키는 EDFA를 L 대역 EDFA라고 불린다. 이같은 L 대역

증폭이 주는 장점은 첫째로, C 대역 EDFA와 함께 L 대역 EDFA를 사용하는 것이 파장분할다중화(wavelength division multiplexing; WDM) 광신호 전송에서 광신호의 전송 용량을 크게 증가시킬 수 있다는 것이다[2]. 둘째로, 분산천이광섬유(dispersion-shifted fiber)를 전송선으로 이용하는 경우 L대역 전송과 증폭기 사용이 사파혼합(four wave mixing)으로 인한 비선형 현상을 급격히 줄여준다는 사실이다[3]. 셋째로는 C 대역 EDFA와 비교하여 이득 평탄화 필터(gain-flattening filter)를 사용하지 않고서도 파장에 따른 이득 평탄화를 이루기가 훨씬 용이하다는 점이다[4].

그러나 L 대역에서 발광계수(emission coefficient)가 낮은 에르븀 광섬유의 본질적인 특성상 이득 계수가 낮아 L 대역 EDFA의 증폭 특성을 개선하고자 하는 다양한 시도들이 행해져 왔는데 그 중에서도 적절한 펌핑 구조나 펌프 파장을 찾는 것이 주요한 연구 방향이었다[1], [5]. EDFA 증폭 특성의 펌프 파장에 대한 의존성은 주로 800nm, 980nm, 그리고 1480nm 대역에서 보고되었고 지금 대부분의 L 대역 EDFA는 980nm나 1480nm 펌프 대역을 사용하고 있다[6]. 반면, 1555nm 파장이 펌프 파장으로 조사된 적이 있으나 이 경우 잡음지수가 크게 악화되었고 이득은 개선되지 못했다는 결과를 얻었다[7]. 또한 980nm나 1480nm pump를 제1 펌프로 사용하고 1555nm distributed feedback (DFB) 레이저 다이오드가 보조 펌프로써 사용한 연구가 보고되었으며 이때 이득 계수(gain coefficient)에서 20%의 개선 효과를 보았다[8].

본 논문에서는 L 대역 EDFA를 위한 새로운 펌프 파장으로 1530nm 대역을 사용하였다. 이 경우 펌핑 효율을 결정하기 위해, 펌프 파장을 1530nm부터 1560nm까지 3nm 간격으로 변화시키면서 각각의 펌프 파장에 대해 이득 계수, 파워 변환 효율(power conversion efficiency; PCE), 그리고 잡음지수(noise figure; NF)들이 측정되었다. 이 같은 계수나 지수들이 기존에 사용되던 1480nm 파장에 의해 펌핑된 L 대역 EDFA에 대해서도 동일한 과정을 거쳐 측정되었고 이 값들이 1530nm 대역으로 펌핑된 L 대역 EDFA의 값들과 비교되었다. 순방향 증폭자발방출(amplified spontaneous emission; ASE)의 세기를 조사함으로써 펌프 파장의 변화에 따른 펌핑 효율의 변화에 대한 이유가 분석되었다. 끝으로 제한된 펌프 파장을 가진 펌프가 사용될 때 요구되는 광원으로서의 선풍 특성을 알아보기 위해 1530nm 대역 펌핑에 의한 이득 스펙트

럼들이 조사되었다.

II. 실험장치

간략화된 실험 장치도가 그림 1에 주어져 있다. L대역 증폭을 위한 에르븀 첨가 광섬유(erbium-doped fiber; EDF)의 길이는 65m이고 이 광섬유의 차단 파장(cutoff wavelength)은 1330nm, 개구수(numerical aperture)는 0.22, 그리고 흡수 계수는 1530nm 흡수 피크에서 7.6dB/m였다. 실험에서 순방향 펌핑 구조가 사용되었다.

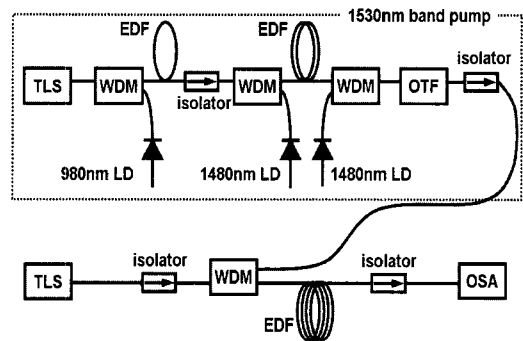


그림 1. 1530nm 대역 펌핑된 L 대역 EDFA 구조의 개략도. TLS; tunable light source, WDM; wavelength-division multiplexer, EDF; erbium-doped fiber, OTF; optical tunable filter
Fig. 1 Experimental configuration

가변 파장 광원(tunable light source; TLS)와 두개의 EDFA가 직렬 연결된 C 대역 EDFA를 이용하여 1530nm 대역 펌프 광원이 자체 제작되었다. 직렬 연결된 C 대역 EDFA에서 첫번째 EDFA의 구조를 살펴보면 EDF는 10m 길이이고 980nm 레이저 다이오드 (laser diode; LD)에 의해 순방향 펌핑되었다. 두번째 EDFA의 구조는 20m 길이의 EDF를 사용하였고 두개의 1480nm LD들에 의해 양방향으로 펌핑되었다. 이 직렬 연결된 C 대역 EDFA는 23dBm의 고출력을 갖기 위해 이 같은 직렬 연결 구조를 채택한 것이다. 펌프의 파장과 신호 광원의 파장은 각각의 TLS를 조정함으로써 선택되었다. TLS로부터 나온 펌프 광은 직렬 연결된 EDFA에 의해 증폭된 뒤 파장 가변 필터(optical tunable filter; OTF)를 거치는데이

필터의 역할은 직렬 연결된 EDFA에서 나오는 ASE 잡음을 억제하기 위한 것이다. 이 ASE 잡음이 적절히 제거되지 못하면 1570nm 근처의 신호 파장 대역에서 증폭 특성 저하의 원인이 된다. 파장 가변 필터 후 펌프 광은 광 아이솔레이터(optical isolator)와 WDM 커플러를 거쳐서 65m EDF에 입력함으로써 1530nm 대역 펌프 광으로써 작동하게 된다. 이 때 사용된 WDM 커플러는 L 대역 신호 광과 1530nm 대역 펌프 광을 파장 다중화 시켜준다.

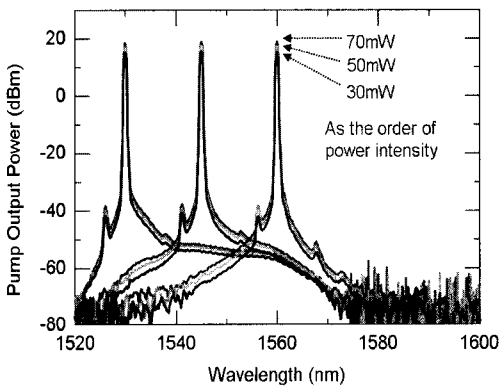


그림 2. 각각 1530nm, 1545nm 그리고 1560nm 파장의 펌프를 광세기가 30, 50, and 70mW로 조정하면서 측정된 출력 스펙트럼
Fig. 2 The spectra of 1530nm-band pumps

그림 2는 제작된 1530nm 대역 펌프에 의해 출력된 스펙트럼을 보여준다. 여기서, 펌프 파장은 1530nm, 1545nm 그리고 1560nm일 경우, 이들의 세기는 각각 30mW, 50mW, 그리고 70mW 경우에 측정된 것이다. 모든 경우에 2차 모드 억제 비율 (side mode suppression ratio; SMSR) 은 거의 60 dB 이상이다. 이 같은 SMSR 특성은 약 45dB SMSR을 갖는 TLS가 OTF를 통해 걸러져서 이루어졌다. 이 스펙트럼들이 보여주는 것은 펌프의 세기나 파장에 상관없이 사용될 펌프들에서 ASE 세기가 충분히 낮아서 L 대역 EDFA의 이득 영역에서 이 ASE가 잡음으로 작용하기 힘들다는 것이다. OTF는 광서큐레이터와 광섬유 격자 (fiber Bragg grating; FBG) 필터로도 대체될 수 있다. 실제 실험에서도 각각 1533nm, 1545nm 그리고 1554nm에서 반사되는 FBG들이 사용되었고 이 때 결과가 OTF를 사용한 결과와 차이가 없었다. 하지만 OTF가 파장 변환 특성이 더 뛰어나므로 본 실험 결과들

은 모두 OTF를 사용하여 측정되었다

III. 실험 및 실험 결과

그림 3(a)는 1533nm 파장 펌프된 L 대역 EDFA의 이득 스펙트럼을 보여준다. 신호광의 파장영역은 1569.5nm에서 1621.5nm 까지 2nm 간격으로 측정되었다. 이때 펌프의 세기는 30mW에서 70mW까지 변화되었다. 펌프 세기가 증가함에 따라 밀도 반전 (population inversion)이 변해서 1600nm 근처에서의 이득 보다 1570nm 근처에서의 이득이 더 커진다. 약 42mW 펌프 세기에서 1571.5nm 부터 1601.5nm 사이에서 1nm 편차로 이득 스펙트럼이 평탄화되어 있음을 볼 수 있다.

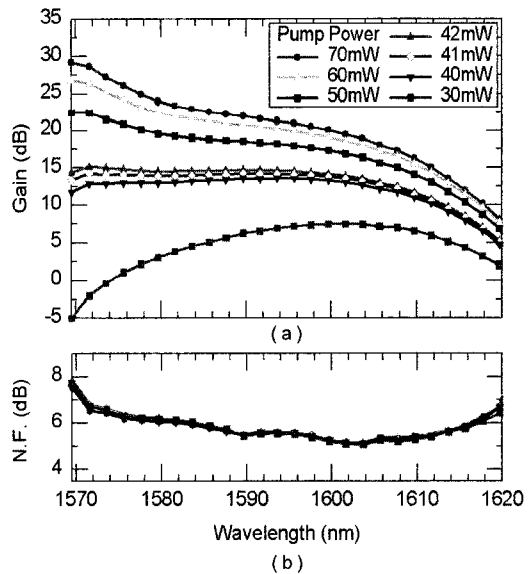


그림 3. 1533nm 펌프 파장에서 펌프 세기를 30mW에서 70mW까지 변화시켰을 때 측정된 L 대역 EDFA의 (a) 이득 스펙트럼과 (b) 잡음지수 스펙트럼
Fig. 3 (a) Gain spectra and (b) noise figure spectra of 1533nm pumped L-band EDFA

그림 3(b)는 그림 3(a)와 같은 조건에서 측정된 잡음지수 스펙트럼이다. 잡음지수는 펌프 세기의 변화에 불구하고 거의 변화가 없다. 42mW 펌프 세기 시에, 평탄화된 이득 영역 내에서 가장 나쁜 잡음지수는 1571.5nm에서

측정된 6.55dB였다. 1570nm 근처 파장에서 잡음지수의 악화는 EDF 내에 있는 Er³⁺이온의 바닥 상태 흡수(the ground state absorption)에 의한 것이고 1600nm보다 장파장에서의 잡음지수의 악화는 Er³⁺이온의 신호 여기 상태 흡수 (signal excited state absorption) 때문인 것으로 알려져 있다[4].

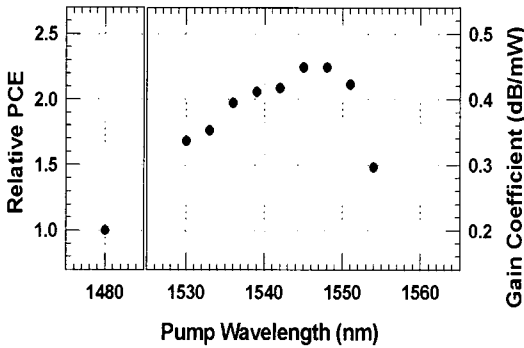


그림 4. 1530nm 대역에서 펌프 파장 변화에 따른 상대 세기 변환 효율(Relative PCE) 과 이득 계수가 측정되었고 이 값들이 1480nm 파장에 의한 펌핑의 경우와 비교되어 있음.

Fig. 4 Relative PCE and gain coefficient

그림 3 과 같은 측정을 펌프 파장이 1530nm부터 3nm 간격으로 1560nm까지 변화시키면서 각 펌프 파장마다 측정하였고 이를 이용하여 각 펌프파장에 대한 이득 계수, 상대 PCE, 그리고 잡음지수가(NF)가 구해졌고 그 중 이득 계수와 상대 PCE가 그림 4에 주어져 있다. 또한 그림 1의 실험 장치도에서 1480nm LD가 1530nm 대역 펌프를 대치하여 실험하였고 그 결과로 1480nm 펌프를 이용한 경우의 측정된 증폭 특성이 그림 4에 비교되어 주어져 있다. 이득 계수 측정에서, 이득 계수들은 신호 광의 특정 파장 값에서 측정한 것이 아니라 신호 파장 영역인 1571.5nm부터 1601.5nm사이에서 L 대역 EDFA가 1dB 보다 작은 이득 편차를 가지고 평탄화된 15dB 이득을 얻기 위해 요구되는 펌프 광의 세기를 기준으로 측정되었다. 측정에서는 파장 가변 광원을 이용하여 L 대역에서 파장을 변화시키면서 파장에 따른 이득을 측정하였고 이 때 이득이 평탄화되는 조건에서 펌프의 세기를 결정하였다. PCE (파워 변환 효율)의 의미는 가해진 펌프의 광 에너지가 신호광 에너지로 변환되는 효율을 의미하며 그 식은 (1)과 같다.

$$PCE = (P_{sigout} - P_{sigin}) / P_{pump} \quad (1)$$

여기서 P_{sigout} , P_{sigin} and P_{pump} 은 각각 출력 신호광의 세기, 입력신호광의 세기, 그리고 펌프 세기를 의미한다. 상대 PCE는 1530nm 대역 펌프로 펌핑한 경우의 PCE 대 1480nm 펌프로 펌핑한 경우의 PCE 의 비로 결정되며 그 식이 식(2)에 주어져 있다.

$$Relative\ PCE = \frac{PCE\ of\ 1530nm\ band\ pump}{PCE\ of\ 1480nm\ pump} \quad (2)$$

이 실험에서 입력 신호의 세기는 신호 채널당 -30dBm이었다. 1480m 펌프의 이득 계수는 0.2dB/mW였고 이 값은 앞서 보고된 값과 실험값과 잘 일치하였다 [5]. 조사된 1530nm 대역 내에서 1545nm 파장에 의한 펌프의 이득 계수와 상대 PCE는 각각, 0.45dB/mW 와 2.25 이었고 이 값은 1480nm 로 펌핑한 경우와 비교하여 2 배 이상 높은 수치였다.

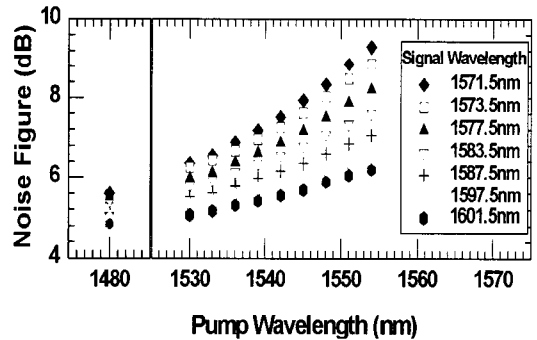


그림 5. 1530nm 대역의 여러가지 파장들과 1480nm 파장에서 측정된 L 대역 EDFA의 잡음지수
Fig. 5 Noise figure of the L-band EDFA

잡음지수의 경우는 1530nm와 1533nm로 펌핑하였을 경우 1571.5nm 의 신호 파장에서 각각 6.36dB 와 6.55dB 를 얻었는데, 측정 구간 내에서 이 신호 파장에서 잡음 지수가 가장 나쁜 상태였고 이 결과가 그림 5에 주어져 있다. 이 같은 값들은 1480nm 펌프의 경우와 비교하여 1dB 보다 적게 악화된 것인데 1530nm 대역 펌프 파장에서 얻은 이득의 개선을 고려하면 크게 악화되었다고 보여지지는 않는다. 다만 펌프 파장이 장파장으로 더 옮겨

갈수록 잡음지수는 더욱 악화되는 것을 그림에서 볼 수 있다.

그림 4에서 보여진 1530nm 대역 펌핑에서의 이득 계수 향상의 이유는 1530nm 대역 펌프의 입력으로 인해 L 대역 증폭을 위한 EDF의 입력 영역에서 역방향 ASE가 억제되었기 때문이다. 그래서 펌프 파워가 효과적으로 증폭된 신호광으로 변환될 수 있었기 때문이다[7], [8]. 그러나 1550nm 보다 장파장의 펌프 파장에 대해서 이득 계수의 감소가 측정되었는데 이는 펌프 파워의 흡수가 낮아지기 때문이다. 이 낮아지는 흡수 현상이 그림 7에 의해서 설명된다. 펌프 파장이 장파장으로 갈수록 잡음 지수가 급격히 악화되는 이유는 바닥 상태 흡수 (ground state absorption)가 증가하기 때문이다[1].

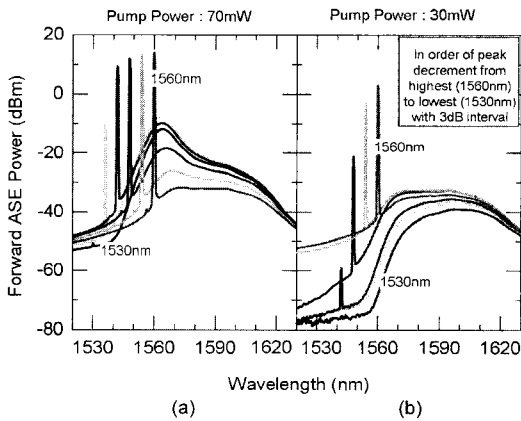


그림 6. 펌프의 세기가 각각 (a) 70mW 와 (b) 30mW 인 조건에서 펌프 파장을 변화시킨 경우 측정된 ASE 스펙트럼들

Fig. 6 ASE spectra for various pump wavelengths

그림 6은 각각의 펌프 파장에서 70mW (a) 와 30mW (b) 세기로 펌핑하였을 때 측정된 ASE 스펙트럼을 보여 준다. 스펙트럼들에서 날카로운 피크는 인가된 펌프 중 EDF 내에서 흡수되지 않고 남은 펌프 세기이다. 스펙트럼을 통해 1530nm 펌프의 경우 인가된 펌프가 충분히 잘 흡수되었음을 알 수 있다. 그러나 펌프가 장파장으로 갈수록 펌프는 덜 흡수되고 ASE 스펙트럼이 수평축에 대해 평평해져 가는 것을 확인할 수 있다. 그림 4에서 보여 지는 1545nm 보다 단파장에서 이득 계수 증가의 경향은 그림 (b)를 통해 부분적으로 설명 되어질 수 있는데 왜냐 하면 이들의 이득 계수를 측정하는 조건이 펌프 세기가

30mW에 가깝기 때문이다. 마찬가지로 그림 4에서 1550nm보다 장파장에서 이득 계수 감소는 그림 6(b)를 통해 이해될 수 있는데 왜냐하면 이들의 이득 계수 측정 조건이 펌프 세기가 70mW에 가깝기 때문이다.

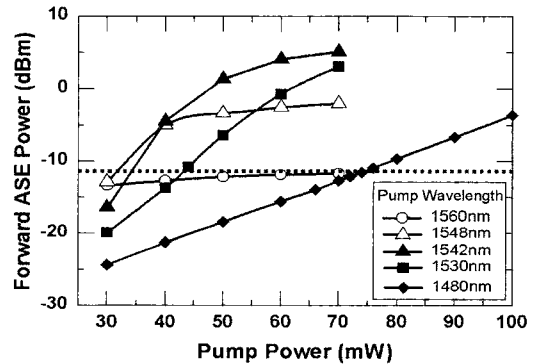


그림 7. 1530nm 대역의 펌프 세기 변화에 따른 L 대역 EDFA의 순방향 ASE 세기 변화.

Fig. 7 Forward ASE powers in the L-band EDFA

여러 가지 펌프 파장에서 펌프 세기의 변화에 따른 순방향 ASE 세기가 측정되어서 그림 7에 정리되어 있다. 이 값들은 순방향 ASE 스펙트럼을 측정하여 계산된 것인데 이때 흡수되지 못하고 EDF를 빠져 나와 함께 측정된 펌프의 세기는 여기서 제거되었다. 그림 7에서 수직 축은 순방향 ASE의 값인데 dBm 단위로 표시되었다. 펌프의 세기가 증가할수록 1480nm 펌프의 ASE의 출력 세기는 지수함수적으로 증가하는데 반해 1530nm 대역 펌프들의 경우 ASE 곡선에서는 포화가 발생하고 있다. 이 그래프를 위해 측정된 순방향 ASE 스펙트럼 측정 결과로부터 확신되는 바는 ASE 세기의 포화가 EDF내에서 흡수되지 못하고 통과해 나온 펌프광 세기에 기인한다는 사실이다. 펌프 파장이 장파장으로 옮겨 갈수록 ASE 출력 세기 포화 현상은 보다 분명해지며 ASE 세기 그 자체도 작아지며 그 결과로 이득 계수가 작아지게 된다. 그래서 실험에서 파장이 제일 긴 1560nm 펌프 파장이 사용된 경우 펌프의 세기를 크게 증가시켜도 15dB의 평탄한 이득 스펙트럼을 L 대역 신호들에서 얻을 수 없었다. 그림 속의 각 펌프에 의한 선들에서, 15dB 평탄화 이득을 위한 펌프 세기의 조건에서 얻어진 ASE 스펙트럼들의 세기들에 해당되는 점들을 연결하여 점선으로 그려진 수평선이 보여진다. 1560nm 펌프 파장의 경우, ASE 세

기 곡선과 이 점선 사이에 가로지는 점이 없고 그래서 그림 4에서 1560nm 펌프의 경우에 이득 계수 측정 결과가 주어지지 못했다. 이 점선이 의미하는 바는 펌프의 세기가 충분히 크다 하더라도 1560nm보다 더 긴 펌프 파장인 경우 15dB 평탄 이득을 얻는다는 것은 어렵다는 것이다. 광증폭기의 펌프 광원으로써의 스펙트럼 특성을 조사하기 위해 펌프 파장과 펌프의 세기를 변화시키면서 이득의 변화 그래프를 측정하였다.

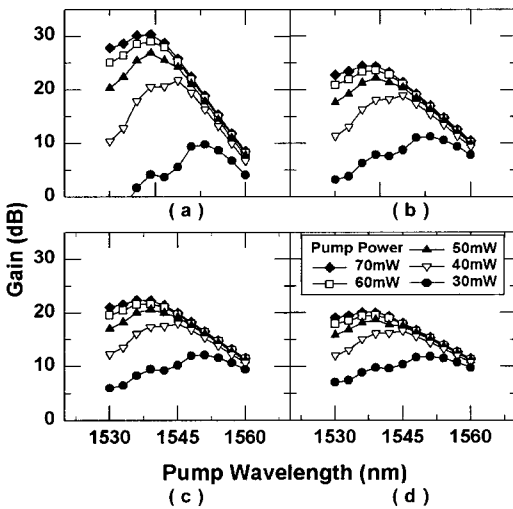


그림 8. 1530nm 대역 펌프 파장과 펌프의 세기가 변화함에 따라 측정된 이득의 변화. 네 개의 그래프는 각각 (a) 1571.5nm, (b) 1581.5nm, (c) 1591.5nm, 그리고 (d) 1601.5nm의 신호 파장에서 측정되었음

그리고 이들은 그림 8에서 보여지는 것처럼 각각 (a)1571.5nm, (b)1581.5nm, (c)1591.5nm, 그리고 (d)1601.5nm의 입력광신호의 파장에서 측정되었다. 각각의 그래프에서 각 곡선은 펌프의 세기를 고정시킨 채 펌프의 파장을 변화시키면서 측정된 것이고 이 곡선에서 펌프의 세기를 변화시키므로 여러 개의 곡선들을 얻을 수 있었다. 나아가 이 측정을 네 가지 다른 입력신호 파장에서 측정하여 최종적으로 그림 8가 얻어졌다. (a)에서 (d)사이의 네 가지 그래프 속에서 같은 펌프 세기일 때 측정된 이득의 변화는 모두 다르다. 이는 방출 총 단면(the emission cross section)이 신호 파장의 함수이기 때문이다. 그러나 각 그래프에서, 이득이 변화하는 추세가 유사함을 알 수 있는데 즉, 펌프 세기가 증가할수록

최고 이득 위치가 단파장 쪽으로 이동하며, 이득 최고점을 중심으로 장파장 쪽에서 이득 변화 기울기가 급해지는 것이다. 이 급격한 이득 경사는 그림 7에서 설명하였던 것처럼 이 파장에서 펌프의 낮은 흡수율에 기인한 것이다. 앞서의 이득 계수, 잡음지수의 결과들과 함께, 이 결과를 고려하면 고 이득 저 잡음지수 성능을 위한 L 대역 EDFA 펌프 파장으로 1530nm에서 1540nm 사이의 파장이 제안된다. 또한 각 그래프에서 이득 변화의 3dB 대역폭이 10nm 이상임을 알 수 있다. 이는 그림 8의 결과에서 한 가지 더 중요한 것을 말하는데, L 대역 EDFA를 위한 펌프 파장으로 1530nm 대역 광원이 사용될 때 이 광원은 실험에서 사용된 것과 같은 단색성에 가까운 광원 뿐만 아니라 선폭이 넓은 광원도 1530nm 대역 펌프의 광원으로 사용될 수 있다는 것을 지적한다.

IV. 결론

L 대역 EDFA를 위한 펌프 파장으로 1530nm 대역이 제안되었다. 펌프 파장을 1530nm 부터 3nm 간격으로 1560nm 변화시키면서 신호파장 영역에서 15dB 평탄 이득을 주는 출력 조건에서의 이득 계수를 측정하였고 그 결과 1545nm 펌프 파장에서 0.45dB/mW 값을 얻었다. 이는 기존에 사용되는 1480nm 펌프된 경우와 비교하여 2배 이상으로 개선된 이득 계수 결과였다. 잡음지수는 1530nm 펌프에서 6.36dB, 그리고 1533nm pump에서 6.55dB를 얻었는데 이는 잡음지수가 제일 좋지 않은 신호 파장인 1571.5nm에서 측정된 값이다. 이 잡음지수 값들은 기존의 1480nm 펌프와 비교하여 1dB보다 적게 약화된 수치이다. 이 같은 이득 계수의 큰 개선은 1530nm 대역 펌프를 사용하였을 때 L 대역 EDFA가 전력 손실을 크게 줄일 수 있음을 의미한다. 그러나 1550nm보다 장파장의 펌프 파장에서 가해진 펌프의 흡수율이 떨어져서 이득 계수의 개선 효과는 급격히 감소되었다. 그러므로 실험 결과들은 고 이득과 저 잡음지수의 증폭 특성을 위해서는, 1530nm 대역 내에서 1530nm 와 1540nm 사이의 파장이 적절함을 제안했다. 펌프 파장의 변화에 따른 이득 스펙트럼은 10dB보다 넓은 3dB 대역폭 결과를 보여주었는데 이는 단일 파장의 펌프 뿐만 아니라 넓은 선폭 특성을 가진 광원 역시 1530nm 대역 펌프로 사용될 수 있음을 제시하였다.

참고문헌

- [1] C.L. Changa, L. Wanga, and Y.J. Chiangb, "A dual pumped double-pass L-band EDFA with high gain and low noise," *Optics Communications*, Vol. 267, No. 1, pp. 108-112, 2006
- [2] Y. Sun, J. W. Suhoff, A. K. Srivastavas, A. Abramov, T. A. Strasser, P. F. Wysocki, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, R. P. Espindola, C. Wolf, J. L. Zyskind, A. M. Vengsarkar, and J. Zhou, "A Gain-Flattened Ultra Wide Band EDFA for High Capacity WDM Optical Communications Systems," *Proc.ECOC'98*, pp.53-54, 1998.
- [3] C.F. Su, and L. Wang, "Gain enhancement of L-band EDFA by using residual pump power in a three-stage configuration," *Optics Communications*, Vol. 280, No. 2, pp. 412-416, 2007
- [4] H. Ono, M. Yamada, M. Shimizu, and Y. Ohishi, "Single Output Characteristics of 1.58mm Band Gain Flattened Er³⁺-Doped Fibre Amplifiers for WDM Systems," *Electron. Lett.*, Vol.34, No.15, pp.1513-1514, 1998.
- [5] H. Ono, M. Yamada, M. Shimizu, and Y. Ohishi, "Comparison of Amplification Characteristics of 1.58 and 1.55mm Band EDFAs," *Electron. Lett.*, Vol.34, No.15, pp.1509-1510, 1998.
- [6] F. A. Flood, and C. C. Wang, "980-nm Pump-Band Wavelengths for Long-Wavelength-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.11, No.10, pp.1232-1234, 1999.
- [7] J. F. Massicott, R. Wyatt, and B. J. Ainslie, "Low Noise Operation of Er³⁺Doped Silica Fibre Amplifier around 1.6μm," *Electron. Lett.*, Vol.28, No.20, pp.1924-1925, 1992.
- [8] R. Di Muro, N. E. Jolley, and J. Mun, "Measurement of the Quantum Efficiency of Long Wavelength EDFAs with and without an Idler Signal," *Proc. ECOC'98*, pp.419-420, 1998.

저자소개



최보훈 (Bo-Hun Choi)

1992년 2월 부산대학교 물리학 학사
 1994년 2월 부산대학교 물리학 석사
 1994~1995년 하이닉스 군무
 1996~1998년 삼성전자 군무

2001년 8월 : ICU 공학 박사

2001~2004년 Uni. Melbourne, Research fellow

2005년~현재 광주대학교 조교수

※ 관심분야: 광통신부품, 광전송망, 광인터넷.