

초광대역 광증폭기에 대한 연구

서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박남규, 박종한, 이한석, 김나영

차 례

1. C+L 밴드 EDFA(Wideband EDFA)
2. 라만 증폭기
3. 톨륨 증폭기
4. 요약
5. REERENCES

초록

고용량 파장다중분할(WDM) 전송 시스템의 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 기존의 erbium-doped fiber amplifiers(EDFA)가 제공하는 이득 대역을 넘어서는 대역폭의 광증폭기의 개발이 촉진되고 있다. 에르븀 이외의 새로운 희토류 첨가물을 사용한 증폭기와 광섬유 내에서의 비선형 현상인 라만 산란에 의한 라만 증폭기에 집중적인 연구가 그 예라 하겠다. 최근 몇 년간의 집중적인 연구를 통하여 현재의 광대역 광 증폭기는 기존의 EDFA(C 밴드 EDFA)가 제공하는 광이득대역의 4~5배 정도를 쉽게 제공할 수 있다. 이러한 목적을 가지고 통신 시장에서 사용될 수 있는 1500nm 근처 대역의 증폭에 대한 세가지의 증폭 기술이 연구되고 있다. 우선, S+밴드(1450-1480nm)와 S밴드(1480-1530nm)의 증폭을 위한 thulium-doped fluoride fiber amplifiers(TDFFA), C 밴드(1530-1560nm)와 L 밴드(1570-1610nm)를 위한 EDFA, 그리고 마지막으로 100nm 이상의 이득대역과 S+에서 L 밴드까지 증폭파장대역의 선택이 자유로운 라만 증폭

기가 있다. 또한 위의 세 기술을 직렬 또는 병렬로 조합하여 사용하는 증폭기가 있다. 이러한 증폭기 모두에 대해서 실험적인 보고는 많이 있었으나, 내부의 에너지 준위가 복잡하여 증폭 기제가 복잡하고, 실험 파라미터를 측정하기가 어려워 광대역증폭기의 성능을 예측하기 어려운 점이 있었다. 게다가 이러한 상황에서 광대역증폭기에 대한 해석적이거나 수치해석적인 심도깊은 연구가 부족하여 앞으로 증폭기를 다양하게 응용하기 위한 성능의 예측이 어려울 것으로 보인다. 이는 광대역 증폭기 기반의 전송 시스템을 성공적으로 적용하는데 제한을 줄 것이다. 따라서 본 논문에서는 광대역 증폭기(C/L 밴드 EDFA, 라만 증폭기, TDFA)에 대한 실험적인 분석뿐만 아니라 해석적, 수치해석적인 분석 방법까지 그 응용의 예와 함께 소개할 것이다.

1. C+L 밴드 EDFA (Wideband EDFA)

1.1 서론

최근 들어, 1530~1560nm 대역의 C-밴드와 1570~1610nm 대역의 L-밴드 EDFA를 병렬로 연결하는 실리카 기반의 C+L 밴드 EDFA는 광대역 광증폭기를 구성하는데 가장 현실적으로 빠르게 적용가능한 기술로써 주목받고 있다[1, 2]. 이는 C+L 밴드 EDFA를 구성하는 물질인 실리카에 대한 연구나 펌프 소스 등의 기술이 이미 숙성되어 있기 때문이다. 그러나 L-밴드 EDFA(L-EDFA)의 경우 C-밴드 EDFA (C-EDFA)에 비해서 최근 몇 년을 제외하고는 충분한 연구가 이루어지지 않은 것이 현실이다. L-EDFA에 대한 연구는 주로 C-EDFA에 비해서 펌프 효율이 떨어지는 특성을 보완하기 위한 방법으로써 효율을 높이기 위한 연구가 집중적으로 이루어졌으며, L-EDFA의 전력변환률을 증가시키기 위한 방안에 대한 연구가 그 예라고 할 수 있다 [3, 4]. 전력변환률을 높이는 방안의 하나로써 C-밴드에서 낭비되는 역방향 ASE (amplified spontaneous emission)를 L-밴드의 2차 펌프 소스로써 사용하는 구조를 제안한 바 있다 [4].

본 장에서는 C-밴드로 투입되는 소스가 1차적인

펌프 광원과 L-EDFA의 역방향 ASE, 그리고 C-밴드로 삽입된 광원과 L-EDFA에서 증폭되는 신호로 각각 전달되는 과정을 W-EDFA의 내부 다이내믹스를 공간적으로 수치해석 모델을 적용하여 제시하고자 한다. 또한 적용 사례로써, 추가적인 펌프 광원의 사용이 필요하지 않은 새로운 W-EDFA 구조를 소개한다 [5, 6]. 실험 결과, 이득과 잡음지수가 입력 신호 레벨이 -3.5dBm인 경우 각각 2.6dB 상승과 0.6dB 감소를 얻을 수 있었다. 이 때의 C 밴드와 L 밴드 EDFA 사이의 채널간 크로스토크는 무시할 만한 수준이었다.

1.2 실험 및 수치 해석

그림 1-1은 본 연구에 사용된 실리카 기반의 C-밴드 EDFA와 L-밴드 EDFA를 더해놓은 커플 구조를 보여주고 있다. 본 구조에서는 C-EDFA에서 발생한 역방향 ASE가 서큘레이터와 C/L 밴드 WDM 커플러를 통해서 L-EDFA 쪽으로 주입된다. 실험에 사용한 EDF는 상용의 알루미늄이 에르븀과 같이 도핑된 것으로써 1530nm 부근에서 흡수계수가

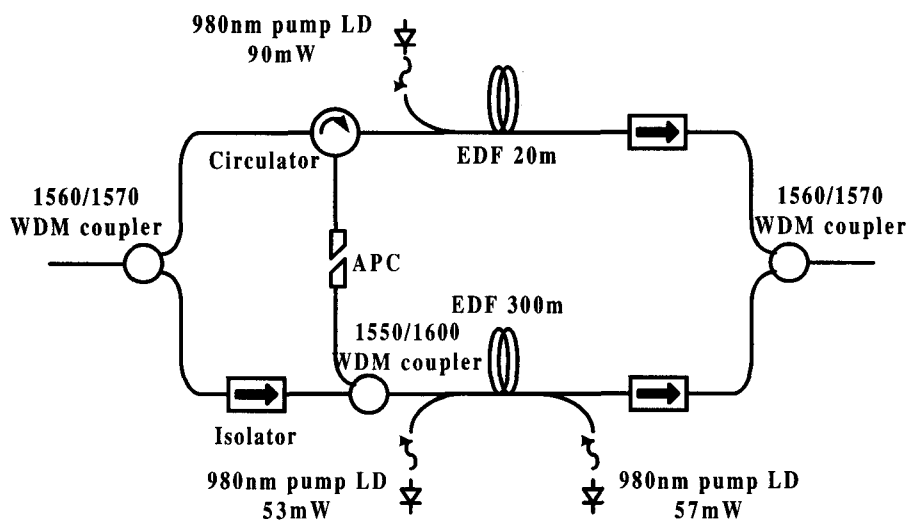


그림 1-1. 실리카 기반의 C+L 밴드 EDFA의 커플 구조 [ref]

4.5dB/m로 최대치를 보였다. 펌프로는 각각 90mW, 53mW, 57mW의 파워 레벨의 980nm LD를 가지고 C-밴드 쪽으로는 순방향 펌핑으로, L-밴드 쪽으로는 순방향/역방향 펌핑으로 사용했다. 서클레이터와 C/L WDM 커플러의 삽입 손실은 각각 0.6dB와 0.3dB 이하인 것으로 측정되었다. 1540nm와 1595nm로 조절한 external cavity 레이저를 사용하여 OSA(optical spectrum analyzer)를 통해 증폭기의 이득과 잡음지수를 측정하였다.

제안된 커플 구조와 일반적인 구조의 성능을 비교하기 위해서, C-밴드 EDFA에서 생성되는 역방향 ASE 소스를 L-밴드 EDFA로 주입하는 포트인 APC 커넥터를 연결하지 않은 상태에서 1540nm와 1595nm의 신호 주파수 대역에서 saturation 출력 파워를 측정하였다(그림 1-1의 APC 커넥터 참조). 이 때의 신호의 입력/출력 파워의 비는 1540nm 대역에서 -3.5dBm/13.01dBm, 1595nm에서 -3.5dBm/10.47dBm와 같았는데 이는 L-밴드의 전력변환율이 C-밴드에 비교했을 때 훨씬 낮은 수준임을 알 수 있다. 반면에 L-밴드 EDFA로의 ASE

소스 주입을 연결시켰을 때, background ASE 스펙트럼이 현격하게 변화하면서 L-EDFA의 출력 파워가 2.6dB 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다(그림 1-2 참고). ASE 프로파일로 추정된 커플 구조 증폭기의 이득 대역폭은 80nm 이상이었다.

또한, C-EDFA의 이득에 따른 L-EDFA의 성능 변화를 살펴보기 위해서, C-EDFA의 펌프 파워를 변화시켜 가면서 1595nm 대역의 포화 출력 파워를 측정하였다(그림 1-3 참고). ASE 주입 포트를 연결시키면, L-EDFA는 입력 파워가 -3.5dBm일 때 이득이 2.1~2.6dB 정도 상승하고 입력 파워가 6.5dBm 일 때 0.1~0.3dB 정도 상승하는 limiting amplifier와 같은 특징을 보인다. 또 잡음지수는 C-EDFA의 이득이 6.57~17.72dB 정도로 큰 폭으로 변화하더라도 거의 무관하게 0.6dB 정도 좋아지는 특성을 보였다. C-밴드 EDFA의 이득이 11.2dB 정도로 변화하여 C-EDFA에서 생성되는 역방향 ASE 파워가 역시 큰 폭으로 변화하는 동안에도 L-EDFA의 이득은 0.5dB 정도로 거의 변화하지 않는 특성을 보였는데, 이는 C-밴드 ASE 신호가 L-밴드로 주입되었을 때 L-EDFA의 앞부분에서

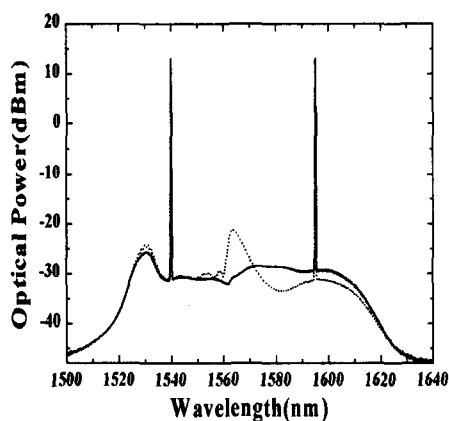


그림 1-2. 1540nm와 1595nm의 대역에서 포화 입력 파워가 -3.5dBm일 때 커플 구조(-: 실선)와 일반 구조(.....: 점선)의 출력 스펙트럼.(RBW = 0.2nm).

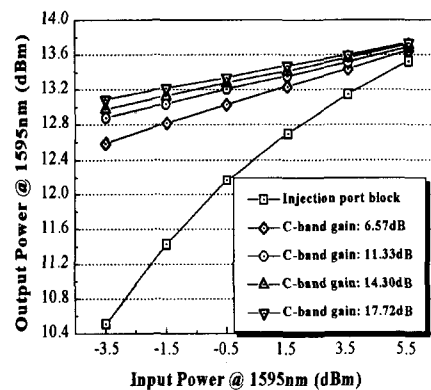


그림 1-3. 여러 가지 C-EDFA 이득 수준에 대한, 1595nm의 입력 파워에 따른 출력 파워의 변화.

saturation 레벨로 빠르게 증폭되어 증폭기의 뒷부분에는 L-밴드 포톤으로 전환되기 때문이다. 이러한 메커니즘은 C-밴드 입력 파워의 변화로 인한 L-밴드로의 과도 crosstalk 효과가 거의 무시할 만큼 작게 측정된 이유를 설명해준다. C-밴드에서의 입력 파워가 -4dBm에서 2dBm으로 약 6dB 정도 변화하는 동안 L-밴드 출력 saturation 파워는 0.2dB 정도의 변화 정도에 그쳤다. 이 때 L-EDFA의 입력 파워는 -3.5dBm에서 4.5dBm로 변화시키면서 측정했다. C-EDFA의 과도 응답에 대한 기존 연구(6)에 의하면, C-EDFA에서 L-EDFA로의 0.2dB 정도의 crosstalk는 대부분의 시스템에서 거의 문제가 되지 않는 수준으로 알려져 있다.

위에서 언급한 이득과 잡음지수 등의 성능 향상에 대한 메커니즘에 대해서 확인하기 위해서 제안한 구조에 대한 수치 해석 모델을 적용하여 분석하였다. 증폭기는 homogeneous한 세 레벨의 시스템으로 가정하였다. 공간적, 스펙트럼 상의 변화를 고려하였으며(7) 1500nm에서 1620nm 까지 120nm에 달하는 주파수 영역에서 1nm의 주파수 간격을 가지고 시뮬레이션 하였다. EDF의 흡수계수와 방출계수 등의 여러 파라미터들은 실험에 사용한 EDF의 데이터 자료에서 취득하여 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 대부분의 주파수 영역에서 1.5dB 내의 오차 범위 안에서 실험 결과와 일치하였으며 실험을 통해 얻은 일반적인 경향과 성능의 향상 정도에서도 동일한 결과

를 얻을 수 있었다.

시뮬레이션을 통해 본 L-EDFA 섹션에서 순방향으로 신호가 진행하면서 주파수 영역에서 증폭되는 과정을 그림 1-4에 나타내었다. (a)는 커플구조에서의 모양이고 (b)는 일반 구조에서의 모양을 보여주고 있다. 그림 1-4(a)에서 단파장 영역에서 나타나는 신호의 작은 형성은 C-EDFA에서 발생한 Rayleigh backscatter 신호의 원인으로 보인다. 그림에서 나타나듯이, 980nm의 펌프 광원과 C-밴드에서 생성된 역방향 ASE 소스를 함께 주입하였을 경우, 이것이 순방향 ASE가 입력쪽에서 훨씬 빠르게 증가되게 하는 seed로 작용을 하게 됨을 알 수 있다. 이렇게 강력하게 증폭된 순방향 ASE는 EDF 내를 진행하면서 흡수되어 그 에너지가 장파장 쪽으로의 전이가 일어나고 이러한 에너지 전이가 마치 L-밴드 포톤이 중간 레벨로 흡수되도록 하는 일차적인 펌프로써 작용을 하게 된다. 또한 동시에 펌프 파워가 일찍 고갈되는 것을 막아주는 역할도 하게 된다.

이와 비교하여 일반 구조의 W-EDFA는 L-EDFA의 입력쪽에서부터 약 50m 정도의 구간에서, 순방향으로 진행하는 ASE와 신호의 파워가 움푹 패인 모양을 보이고 있다. 왜냐하면 이 때에는 L-밴드의 신호와 980nm 순방향 펌프 사이를 연결해줄 C-밴드에서 들어오는 seed 포톤이 존재하지 않기 때문이다. 따라서 펌프 파워가 커플 구조에 비해서

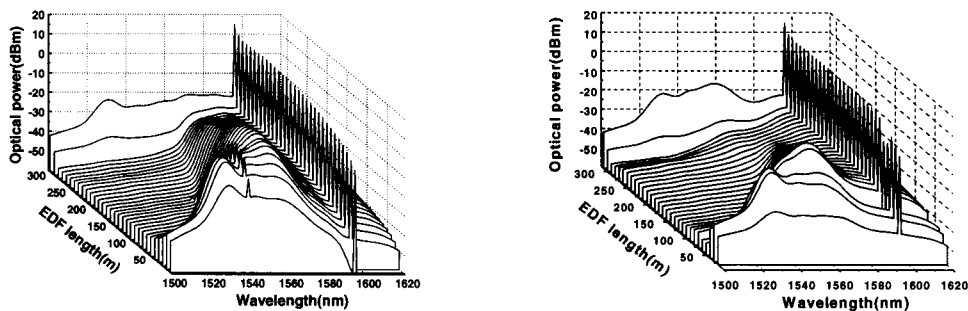


그림 1-4. (a) 커플 구조와 (b) 일반 구조에서 L-EDFA 섹션에서 순방향으로 진행하며 증폭되는 신호의 모양 (RBW = 1 nm)

L-EDFA에서 강하게 생성되는 역방향 ASE에 의해 훨씬 빨리 고갈되게 된다.

L-EDFA에서 생성되는 순방향 ASE의 스펙트럼의 진행을 살펴보면 또 하나의 두드러진 특징을 발견할 수 있다. L-EDFA의 입력 쪽에서 보면 ASE는 거의 C-밴드에서 생성되고 있는데, 순방향 신호들이 진행하면서 고갈되자마자 ASE 신호의 패임 이후 부분에 새롭게 생성된 ASE 신호들이 L-밴드 포톤을 일차적으로 구성하고 있음을 보여주는 것이다. 이러한 두 구조를 비교하였을 때, 효율의 차이는 커플 구조에서의 seed로 작용하는 포톤이 L-밴드 신호 증폭을 위한 펌프 파워의 저장고로써 작용하는 것에서 기인함을 알 수 있다.

1.3 결론

본 장에서는 C-밴드의 역방향 ASE 신호를 L-밴드 EDFA로 주입함으로써 추가적인 펌프 광원 없이 증폭기의 성능을 향상시킬 수 있는 광대역 증폭기 구조를 제안하고 이 구조의 특성을 실험적으로 살펴보았다. 실험결과 L-EDFA의 이득이 2.6dB 이상 증가하였고 0.6dB 정도의 잡음지수가 감소하였으며, 이 때 C-EDFA와 L-EDFA 간의 채널 크로스토크는 거의 무시할 만 한 수준이었다. 실험 결과를 재확인하기 위하여 C+L 밴드의 EDFA 시뮬레이션을 주파수 영역에서 공간적으로 진행하는 과정을 따라가며 살펴보았고 이를 통해 L-밴드 EDFA의 내부 역학의 이해를 심화할 수 있었다.

2. 라만 증폭기

2.1 서론

유연한 대역 선택성을 가지는 라만 광섬유 증폭기(raman fiber amplifier : RFA)는 최근 고출력을 요구하는 펌프 광원 문제가 해결되면서 미래의

DWDM시스템에 응용이 가능한 차세대 증폭기로 주목받고 있다 [8]. 그러나 상관된 상미분방정식에 기초한 기존의 RFA 모델링 방법은 RFA에서 고려되어야 하는 긴 증폭 거리와 넓은 이득 대역으로 인해 정확한 예측을 하기 위해서 엄청난 계산 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 average power analysis의 적용이 가능하도록 라만 광섬유증폭기의 전송 방정식을 재구성하여, 그 결과 동일한 정확도와 급격히 단축된 소요 시간을 유지하면서 시스템 성능을 예측할 수 있음을 보인다. 또한 OTDR(Optical Time Domain Refelctometry)을 사용하여 distributed 라만증폭기의 이득을 결정하는 내부 파라미터인 유효거리(effective length)를 측정하는 새로운 방법을 개발하였다. 그리고 다중펌프를 사용하여 구성된 라만 증폭기에서 펌프상호작용에 의한 유효거리의 변화를 개발된 방법으로 측정하였다.

2.2 라만 수치해석 이론

라만 광섬유 증폭기에서 전방, 후방의 파워 진행을 설명하고 레일리 산란, 온도의존성등의 다양한 영향을 포함하는 전파방정식은 다음과 같이 모델링 될 수 있다. [9,10]

$$\frac{dP^{\pm}(z,v)}{dz} = \pm \left\{ \left[-\alpha(v) + A(z,v) - B(z,v) - D(z,v) \right] P^{\pm}(z,v) + 2h\nu\Delta\nu \left[C(z,v) + \frac{\gamma(v)P^{\mp}(z,v)}{2h\nu\Delta\nu} \right] \right\}$$

$$A(z,v) = \sum_{\zeta > v} \frac{g_r(v-\zeta)}{K_{eff} A_{eff}} \left[P^{\pm}(z,\zeta) + P^{\mp}(z,\zeta) \right]$$

$$B(z,v) = \sum_{\zeta < v} \frac{g_r(v-\zeta)}{K_{eff} A_{eff}} \left[P^{\pm}(z,\zeta) + P^{\mp}(z,\zeta) \right]$$

$$C(z,v) = \sum_{\zeta > v} \frac{g_r(v-\zeta)}{2A_{eff}} \left[P^{\pm}(z,\zeta) - P^{\mp}(z,\zeta) \right] \left[1 + \frac{1}{e^{h(\zeta-v)/kT} - 1} \right]$$

$$D(z,v) = \sum_{\zeta < v} \frac{g_r(v-\zeta)}{A_{eff}} \left[2h\zeta\Delta\zeta \left[1 + \frac{1}{e^{h(v-\zeta)/kT} - 1} \right] \right]$$

계산의 간결함을 위해서 파라미터 A, B, C, D는 위와 같이 정의 되었다. 위의 식은 파워에 관련된 파라미터 A(z,v), B(z,v), C(z,v), D(z,v)로 인해 해석적인 해가 아닌 수치해석적인 적분으로 풀어야

한다. 첫째로 전체 라만 광섬유 증폭기를 직렬로 연결된 여러 조각의 단위 증폭기 섹션으로 나누어야 한다. EDFA에서의 분석과 비슷한 방법으로[11], 신호와 ASE의 파워는 각 단위 증폭기 섹션 안에서 길이에 대한 평균치로 계산되어 대입하고 파라미터 $A(z,v)$, $B(z,v)$, $C(z,v)$, $D(z,v)$ 를 상수값 $A(v)$, $B(v)$, $C(v)$, $D(v)$ 로 바꿔서 이득과 spontaneous emission 파워를 계산할 수 있다. 그리고 각 섹션에 대하여 수렴할 때까지 iteration이 수행된다. 이런 과정 후에, relaxation method를 통하여 증폭기의 출력파워가 전반적인 이득 수렴과 경계 조건을 만족할 때까지 전체 길이에 대한 광섬유에서의 파워 분포가 계속 수정된다.

2.3 라만 수치해석 결과

Average power analysis에 대한 시뮬레이션 결과는 단위 증폭기 섹션의 수에 크게 의존한다. 그림 2-1은 특정 동작 조건에서의 수렴 테스트로서, 수치 적분(4차 Runge-Kutta method)으로 구한 결과에 대하여 average power analysis로 구한 전방과 후방 파워를 증폭기 섹션 개수의 함수로 표시한 결과이다. 필요한 증폭기 섹션의 수가 RFA의 작동 조건에 의존하지만 정확도의 측면에서 20~30개 정도면 충분하다. 시뮬레이션 시간은 단위 증폭기 섹션

의 수에 비례하였다. 비교를 위해 20개의 단위 증폭기 섹션으로 average power analysis방법을 통해 시뮬레이션 한 것이 직접 적분하는 방법보다 228배 빨랐다. 따라서 더욱 긴 길이의 라만 광섬유 증폭기에 대해서도 100~1000 정도의 시뮬레이션 시간을 아낄 수 있다.

라만 증폭기에 대한 average power analysis의 타당성을 확인하기 위해 이전에 보고된[12] 실험 파라미터와 유사한 파라미터들로 다중 파장의 펌프를 사용하는 distributed Raman amplifier를 시뮬레이션 해 보았다. 여기서 우리는 25km의 전송용 광섬유, 12 파장의 후방 펌프소스(1405, 1412.5

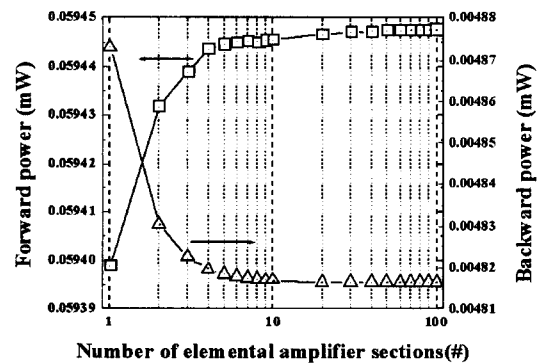


그림 2-1. 단위 증폭 섹션의 함수로 표현되는 전방과 후방 파워의 수렴도

1420, 1427.5, 1435, 1442.5, 1450, 1457.5,

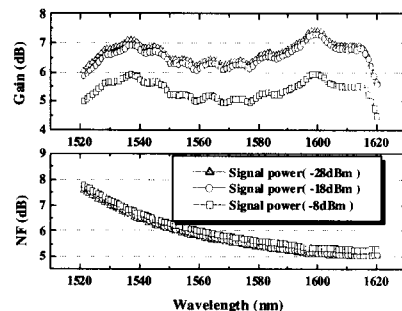


그림 2-2(왼쪽) 다양한 신호 파워에서의 이득, 잡음지수 시뮬레이션 결과

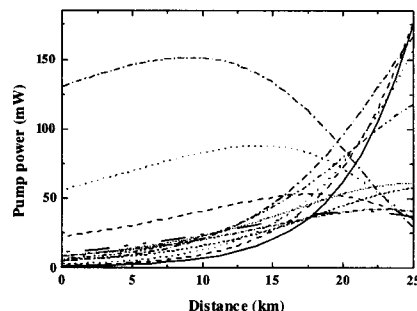


그림 2-3(오른쪽) Distributed RFA에서 거리에 따른 펌프 파워 진행

1465, 1480, 1495, 1510 nm), 그리고 다양한 파워의 100개의 입력 채널을 가정하였다. 그림 2-2는 입력파워를 변화시킴에 따른 광이득과 잡음지수 스펙트럼의 시뮬레이션 결과이다. -8dBm의 신호파워에 서는 적절한 펌프파워 조합으로 98nm에 걸쳐서 이득 차이가 1dB 미만이었다. 그러나 잡음지수(NF)의 스펙트럼은 펌프 대역 근처의 짧은 파장 채널의 경우가 긴 파장의 경우보다 노이즈 축적이 심각하였다. 그림2-3 은 RFA에서 펌프의 거리에 따른 진행을 보여주는데, 여기서 라만 펌프사이의 상당한 파워 전이가 있음을 알 수 있다.

2.4 라만 OTDR 실험

그림 2-4는 본 연구에서 제안된 유효거리 측정을 위한 실험 구성도이다. 1420nm, 1435nm, 1450nm의 출력 파장을 가지는 펌프 LD(Laser Diode)를 각각 2 개씩 사용하였다. 편광의존성을 제거하기 위해서 편광조절기(PC: Polarization Controller)와 편광유지접속기(PMBC: Polarization Maintaining Beam Combiner)를 사용하여 같은 파장의 LD 2개의 출력을 편광접속(Polarization Multiplexing)하여 사용하였다.

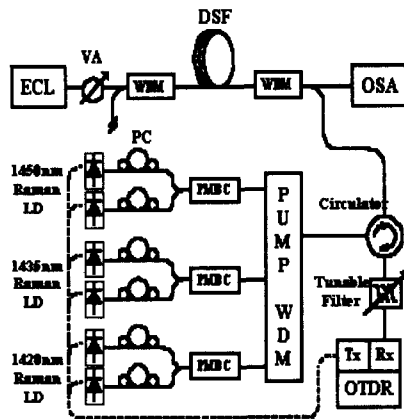


그림 2-4 실험구성도

다음으로 펌프광원들의 출력은 펌프 파장분할접속기 (Pump WDM: Wavelength Division Multiplexer)로 합쳐진 후 신호광원의 역방향으로 분산천이광섬유(DSF: Dispersion Shifted Fiber)에 입력된다. 사용된 DSF의 길이는 총 40km로 각각20km의 길이의 광섬유 spool 두 개를 용착접속하여 구성하였다. 또한 각각의 펌프 LD 들은 상용 OTDR (HP6058A)에서 trigger 신호를 받아 OTDR 광원으로도 사용된다[13]. 광회전기 (Circular)는 펌프출력은 DSF로 입력시키고, DSF에서 레일라이 후방산란된 빛은 OTDR로 입력시키는 역할을 한다.

그림 2-5는 DSF 내부에서 각 파장의 펌프파워가 진행하면서 변화하는 양상을 하나의 펌프만 동작시키는 상황에서 OTDR로 측정한 결과이다. 이 때 유효 거리는 다음과 같이 표현된다[14].

$$L_{eff} = \int_0^L P_p(z) / P_p(L) dz$$

이 때 L은 광섬유의 길이이며, 는 신호광원이 입사된 지점으로부터 거리가 z인 곳의 펌프파워를 나타낸다. 펌프광원은 신호광원과 반대방향으로 광섬유에 합쳐되므로, $P_p(L)$ 은 광섬유로 입력된 펌프파워가

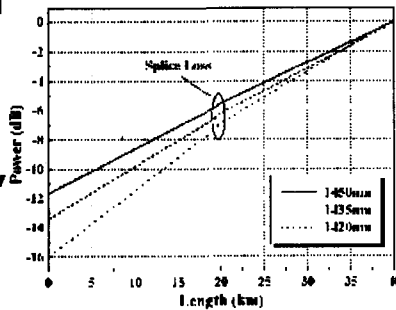


그림 2-5 단일펌프에 대한 파장별 OTDR 측정결과

된다. 위의 식과 같이 는 입력된 펌프파워의 광섬유 길이에 대한 변화 비의 적분으로 표현되므로, 그림 2-5의 결과를 대입하여 L_{eff} 를 계산할 수 있다. 1420nm, 1435nm, 1450nm의 세 파장에 대해서 계산된 는 각각 11.9km, 12.9km, 14.3km이다. 그림 2-5에서도 볼 수 있듯이 1.4 m 대역에서는 장 파장으로 갈수록 광섬유 내에서 광손실이 감소하므로 가 증가하게 된다. 그림 2-6, 2-7은 각각 세파장의 펌프를 모두 사용하는 경우에 1450nm와 1420nm에서의 OTDR 측정결과이다. 그림 2-6에서 볼 수 있듯이 1450nm의 경우는 1420nm와 1435nm에서의 펌프광으로 인한 유도라만산란에 의해 증폭되어 실선으로 나타낸 단일펌프의 경우보다 광섬유내부에서의 펌프파워가 증가한다. 도 증가하여 1420nm와 1435nm의 펌프광의 파워에 따라서 19.5km에서 20.8km의 값을 가진다. 반면 1420nm의 경우는 1435nm와 1450nm의 펌프광을 증폭시켜주는 역할을 하게 되므로 그림 2-7에서와 같이 반대로 펌프파워가 감소하게 된다. 앞서의 경우와 마찬가지로 는 감소하여, 다른 파장의 펌프파워에 따라서 8.6km에서 9.6km의 값을 가진다.

2.5 결론

우리는 라만 광섬유 증폭기의 직접 적분 방법을 상대적으로 간단한 average power analysis 방법으로 대체하였고, 이것은 시뮬레이션 시간 면에서 강력한 장점이 있음을 보였다. 비슷한 정확도에 백 배 이상의 시뮬레이션 시간 감소는 실제 시스템 성능 예측을 위한 도구로써 응용될 것이다. 이와 더불어 복잡한 라만 증폭시스템에서 내부 파라미터를 직접 측정하지 않고 개조된 OTDR로 얻은 데이터를 바탕으로 이득에 바로 관계되는 파라미터인 유효거리 L_{eff} 를 측정하여 위의 시뮬레이션 도구와 더불어 라만 증폭시스템의 성능 예측을 가능하게 하였다.

3. 튜브 증폭기

3.1 서론

최근 몇 년간 S+ 대역(1450-1480nm)과 S 대역(1480-1530)을 증폭하기 위한 thulium-doped fluoride fiber amplifiers(TDFFA)에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 이는 L-band EDFA, 라만 증폭기 그리고 다른 여러 종류의 희토류 원소가

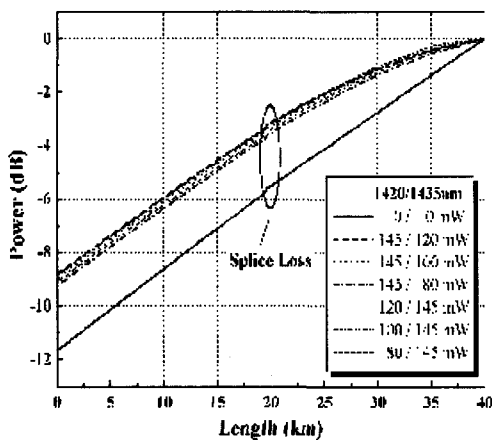


그림 2-6. 다중펌프에 대한 1450nm의 OTDR 결과

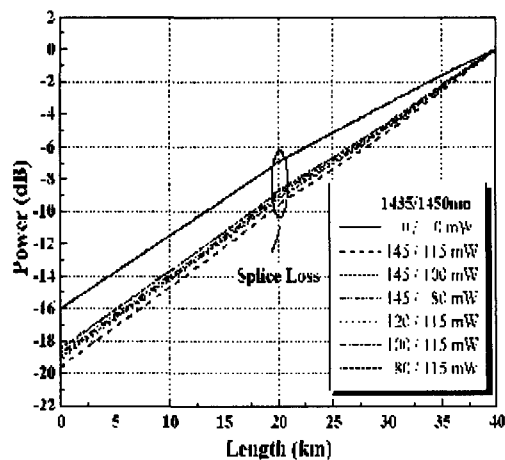


그림 2-7. 다중펌프에 대한 1420nm의 OTDR 결과

도핑된 증폭기 연구와 함께 차세대 증폭기 연구의 주요한 부분을 이루고 있다 [15-17]. TDFFA에 대한 실험적인 결과가 몇몇 발표되었으나 [18,19] TDFFA의 경우 여러 에너지 레벨로 구성된 복잡한 dynamics 의 영향을 받는다는 점과 materials 및 characterization tools의 부족으로 인한 파라미터 측정의 어려움 때문에 그 모델링이 상당히 힘들게 여겨졌다. 이번 절에서는 TDFFA의 수치해석적 모델을 제시하고 이를 이용해 TDFFA 성능의 업 컨버전 펌프 파장 의존도를 밝혀보겠다. 한편으로 최근 연구의 초점을 이루는 1.4um/1.5um 의 듀얼 펌핑을 이용한 TDFFA의 성질을 실험을 통해서 얻어진 데이터를 바탕으로 지능화된 WDM 광 네트워크 상에서 꼭 선행되어야 할 연구인 add/drop에 의한 이득 이탈과 보상에 대하여 논하겠다.

3.2 불륨 증폭기의 모델방정식

ZBLAN을 기반으로 한 TDFFA 정상상태 모델의 완전한 set은 TDFFA의 축약된 방정식 set 및 Tm3+의 중요한 분광학적 데이터에 기반을 둔 article들의 확장을 통해서 이루어졌다[18,20,21]. rate-equations와 propagation-equations에

는 다음과 같은 점이 첨가되었다:

3H6-3H5의 펌프 ground state absorption(GSA), 3F4-(3F2, 3F3)와 3H4-1G4의 펌프 excited state absorption(ESA), 3F4-3H4의 신호의 stimulated transition, 3H6-3F4의 1.8 μm 대역 transition, 3H6-3H4의 0.8 μm 대역 transition 및 그 밖의 radiative / non-radiative transition (그림 3-1). 이러한 모델에 의해서, TDFFA의 동작을 나타내는 방정식을 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} &= -(W_{p1} + W_{e1} + W_{a1})N_0 + (W_{10} + A_{10} + r_1)N_1 + A_{20}N_2 + (W_{30} + A_{30})N_3 + A_{40}N_4 + A_{50}N_5 \\ \frac{dN_1}{dt} &= W_{p1}N_0 - (W_{p2} + W_{10} + W_{e1} + A_{10} + r_1)N_1 + (A_{21} + r_2)N_2 + (W_{31} + A_{31})N_3 + A_{41}N_4 + A_{51}N_5 \\ \frac{dN_2}{dt} &= W_{p2}N_0 - (A_{21} + A_{20} + r_2)N_2 + (A_{32} + r_3)N_3 + A_{42}N_4 + A_{52}N_5 \\ \frac{dN_3}{dt} &= W_{e1}N_0 + W_{11}N_1 - (W_{e3} + W_{30} + W_{31} + \sum_{i=0,1,2} A_{3i} + r_3)N_3 + (A_{43} + r_4)N_4 + A_{53}N_5 \\ \frac{dN_4}{dt} &= W_{e2}N_1 - \left(\sum_{i=0,1,2,3} A_{4i} + r_4 \right)N_4 + (A_{54} + r_5)N_5 \\ \frac{dN_5}{dt} &= W_{e3}N_3 - \left(\sum_{i=0,1,2,3,4} A_{5i} + r_5 \right)N_5 \end{aligned}$$

$$N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$$

where $W_i = \int \frac{\Gamma(\lambda)\sigma_i(\lambda)P(\lambda)}{h\nu A_p(\lambda)} d\lambda$

$$\begin{aligned} \frac{dP^\pm(\lambda)}{dz} &= \pm P(\lambda)^\pm \Gamma(\lambda) \left(\sum_{(1,2)} \sigma_{12}^+(\lambda)N_1 - \sigma_{12}^-(\lambda)N_1 - \sigma_{31}^-(\lambda)N_0 - \sigma_{32}^-(\lambda)N_1 - \sigma_{33}^-(\lambda)N_3 \right) \\ &\quad \pm 2h\nu \Delta\nu \Gamma(\lambda) \left(\sum_{i=0,1,3} \sigma_{i0}^-(\lambda)N_i + \sigma_{i1}^-(\lambda)N_i \right) \mp \alpha(\lambda)P^\pm(\lambda) \end{aligned}$$

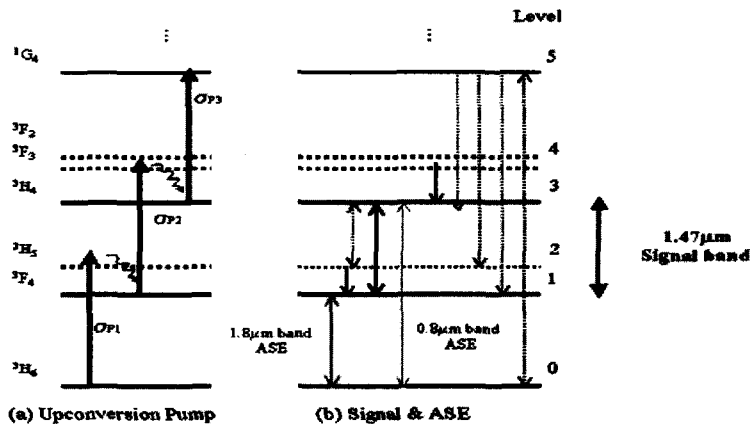


그림 3-1. Tm3+ 에너지 레벨 도표와 (a) 펌프 전이 과정 (b) 신호와 ASE등의 전이과정

위에서, 각 에너지 레벨 i 와 j 에 대해서, N_i 는 i 레벨의 population을 나타내고 N 은 cm^3 당 Tm^{3+} 이온의 개수를, W_{ij} 는 absorption ($i \rightarrow j$) and emission ($j \rightarrow i$)의 transition rate를, W_p 는 펌프 absorption rate를, σ_{ij} 는 cross-section을, A_{ij} 는 spontaneous emission 확률을, r_i 는 multi-phonon 감쇠 비율을, Γ 는 overlap factor를, α 는 back ground loss를 나타내며, 식에서의 + 부호는 앞쪽에서의 진행을, -부호는 뒤쪽에서의 진행을 나타낸다. 이 모델에서는 다른 적절한 transition sets와 마찬가지로 ${}^3\text{H}_4 - {}^3\text{F}_4$ 대역 사이의 신호 transitions의 추가적인 영향을 완전히 분석하기 위해서, 펌프 GSA와 펌프 ESA가 첨가되었다. 이러한 방법을 통해서, Tm^{3+} 의 여기레벨과 신호 대역의 self-terminating nature사이의 신호 전이로 인한 현상들을 모델에 포함하였다.

시뮬레이션을 위한 파라미터들은 이미 발표된 데이터를 바탕으로 주의 깊게 선택했으며, 몇몇의 발표되지 않은 secondary parameters들은 Tm^{3+} 의 과거 논문들을 바탕으로 이론적 분석을 통해서 산출하였다. Lifetimes 및 branching ratios는 Judd-Ofelt 이론을 바탕으로, multi-phonon decay rate는 에너지 갭 법칙을 바탕으로 산출하였

다. 이미 발표된 cross-sectional 데이터 또한 본 모델에 포함하였으며, 인덱스의 차이나 코어 지름과 같은 모드 파라미터들 역시 포함하였다. 이렇게 구성된 모델은 매우 다양한 조건에서의 측정을 바탕으로 이미 발표된 논문과 일치하는 결과를 보여주었으며, 이로부터 본 모델을 이용한 TDFFA 시뮬레이터의 타당성을 검증할 수 있었다[18, 22, 23].

앞에서 언급했던 펌프 파장 의존성을 조사하기 위해서, Tm^{3+} 도핑 농도가 1000 ppm인 10m' s TDF로 구성된 TDFA 모델을 구성하였다[18]. WDM에 적용된다는 가정 하에서, 그림3-2은 150mW로 파워가 고정된 순방향 펌프의 파장을 1040nm에서 1080 nm까지 변화시켰을 때 -20 dBm 채널 입력을 갖는 13 WDM 채널의 이득과 잡음지수(NF) 스펙트럼의 변화를 보여준다. 1045nm 펌프 파장 근처에서 전력변환효율(PCE)의 향상이 관찰되었다. 펌프 파워는 고정된 채 이보다 더 긴 펌프파장에 대해서, dropped peak-gain과 broadened 3dB-bandwidth를 관찰하였다. 그림 3-2는 이러한 경우에 대한 잡음지수 값을 보여주는 데, 그림으로부터 잡음지수의 펌프파장 의존도는 거의 무시할 만 함을 알 수 있다.

그림3-3은 펌프파장 변화에 따른 최대 채널 이득

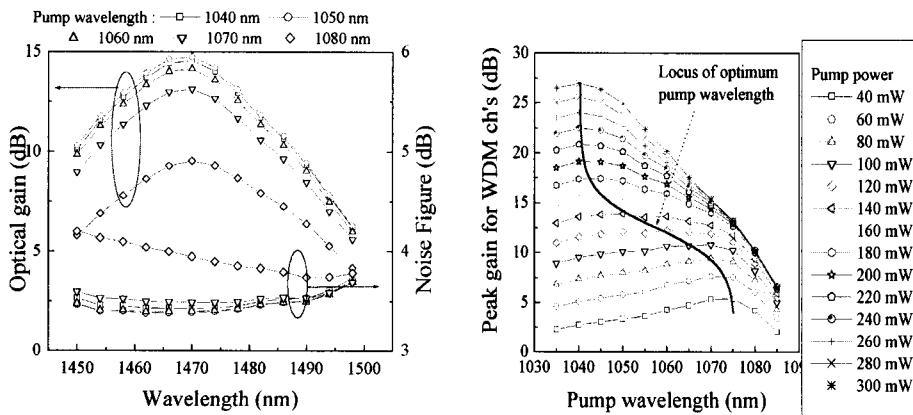


그림 3-2 (왼쪽) 이득 과 잡음지수(NF) 스펙트럼 (WDM 환경, -20 dBm 채널 파워, 150 mW 전방 펌프)

그림 3-3 (오른쪽) 펌프 파장, 파워에 따른 Peak gain의 변화.

을 보여주며, 이때 각 곡선은 다른 순방향 펌프 파워를 통해 구한 결과이다. 그림 3-3에 포함된 최적 펌프 파장의 궤적을 통해서, 펌프 파워가 비교적 작을 경우 최적의 펌프 파장은 1070nm 근처이며, 펌프 파워를 키움에 따라서 최적값은 1045nm 근처로 옮겨감을 알 수 있다.

3.3 (1.4um/1.5um) 두 파장으로 펌핑된 TD add/drop 상황에 대한 이득 이탈과 보상에 대한 연구

방식이라고 통일할 수 있다[18, 19, 24, 25]. 또한 TDFA의 S-band 증폭을 위한 펌프조합들이 상당부분 연구된 현 시점에서는, 증폭기의 효율 향상을 목적으로 하는 연구뿐만 아니라 현실적인 의미에서 유용성, 즉 시스템측면의 기능 제공성 및 다이내믹 해석 등의 다양한 고찰이 병행되어야 할 시점이다. 그러한 의미에서 본 논문의 펌핑방식인 1.4μ m/1.5μ m의 main/sub 펌핑방식은 신호 에너지준위인 3F4, 3H4 각각을 상당히 독립적으로 여기할 수 있는 여지가 있어, 시스템 요구사항을 만족시키기 위한 이득제어 또는 틸트 보상 등의 문제 해결에 용이하다고 판단

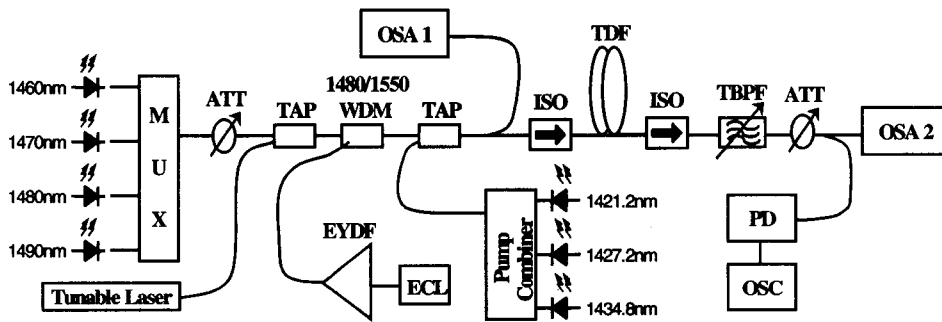


그림 3-4. 듀얼 펌핑 실험 셋업

다양한 천이 대역을 가지는 TDFA의 특성에 의해 S-band 증폭을 위한 여러 가지 펌핑 방식이 발표되고 있으나, 이들은 기본적으로 신호대역인 3H4-3F4의 빠른 lifetime을 극복하고 population을 주는

된다. 1550 nm 주변파장의 보조펌프는 신호대역만을 직접 펌핑하는 1400nm 주변파장의 주 펌프와 동시에 사용될 때 크게 두가지 형태로 작용하여 TDFA

| | Gain Excursion (dB) | | | | Compensation Power (mW) | |
|----------------|---------------------|---------|---------|---------|-------------------------|---------|
| | 1460 nm | 1470 nm | 1480 nm | 1490 nm | 1420 nm | 1540 nm |
| 1480nm channel | 3.89 | 3.19 | drop | 1.68 | 39.37 | 17.36 |
| | 2.64 | 1.95 | drop | 0.89 | 41.32 | 12.21 |
| 1480nm drop | 0.59 | 0.24 | drop | 0.05 | 0 | 1.9 |
| 1470nm channel | 1.4 | drop | 0.97 | 0.74 | 23.25 | 8.45 |
| | 0.34 | drop | 0.82 | 0.56 | 13.87 | 6.04 |
| 1470nm drop | 0.9 | drop | 0.47 | 0.32 | 19.57 | 2.57 |

표3-1 채널 drop 시의 펌프 보상값

특성에 영향을 준다. 먼저 이득이 발생하는 에너지 준위 사이에 능동적으로 동작하는 이온의 절대량을 결정하게 된다. 이는 inversion factor에도 영향을 주기 때문에 TDFA이득의 측면에서 상보관계가 이루어진다.

본 연구의 실험구성은 그림 3-4로 표현된다. 신호 광은 1460~1490nm 사이 10nm 간격의 튠 신호 네파장과 파장 가변 LD로 구성되고, 62mW@1421.2nm 64mW@1427.4nm 69mW@1434nm의 중심파장을 가지는 주펌프와 1540~70nm대역의 가변 펌프는 YFL로 펌핑한 EYDF(Erbium-Ytterbium codoped fiber)가 사용되었다. 입출력 모니터로 OSA1과 2를 사용하였다.

그림 3-5는 1540nm 보조펌프 파워변화에 대한 입력 신호의 이득변화 그래프이다. 파워가 증가하면서 평탄한 출력이 peak은 우측으로 이동하고 tilt function은 기울기도 증가한다. 일단 바닥상태에서 신호로 여기된 이온은 Thulium의 lifetime차이로 인하여 약 10여 배의 효율을 가지므로 극히 적은 양의 GSA라도 줄 수 있는 보조 펌프가 있는 경우 효율은 급격히 증가하고, 전체 inversion은 유지되어 유사한 이득 곡선을 나타내고, 보조 펌프 파워 변화에 대해 gain tilt가 상당히 일정하게 유지된다.

그러나 보조펌프가 약 10 mW 정도를 기준으로 그 이상이 되면 신호의 3F4 level 에 누적되는 Tm 이온들에 의하여 펌프가 고갈되고 인버전이 나빠지면서 이득특성이 1490nm 이상 파장으로 이동한다. 그러나 inversion이 나빠지는 경우에도 3F4-3H4 transition에 참여하는 이온의 개수가 증가한 상황이므로 최대 이득 값은 크게 변동하지 않아, EDFA의 L-band 효율보다 좋은 Gain-shift 특성을 가지게 된다.

여기서 1540nm 펌프 파워에 따른 tilt 변화와 91.4 μ m 주펌프의 평균이득레벨의 변화를 이용하여 채널 add-drop시의 이득과 tilt를 동시에 보상이 가능하고, 실제 보상값은 표3-1 에 제시되었다. 표에

서 1540nm 펌프가 10mW 이상인 경우 1480nm 채널이 drop 되는 경우의 excursion이 1470nm 채널 drop 경우보다 큰 영향을 받고, 펌프 보상 파워도 커진다. 이 경우는 이미 장파장이 이득을 받는 inversion영역에 있으므로 tilt function이 이미 1480nm 영역에서는 상당히 이동하므로 단일 펌프로는 보상이 어려운 영역이고, 본 연구에 사용된 방식으로도 약 20%의 excess power가 필요하였다. 그림 3-6은 위에서 언급한 compensation algorithm을 이용하여 채널 drop시 이득, tilt 보상을 한 결과를 나타낸 것이고, 0.1 dB 이내의 이득 오차와 tilt 보상을 확인하였다.

3.4 결론

이 절에서는 TDFA의 수치해석 모델에 대해서 살펴 보았으며, TDFA 성능의 펌프 파장 의존도를 조사해 보았다. 최적의 펌프 파장은 펌프의 파워가 커짐에 따라서 1070nm에서 1045nm로 이동함을 관찰할 수 있었다. 따라서, 일반적인 1064nm 펌프를 높은 펌프 파워로 사용하는 시스템의 경우 PCE에 상당한 손실이 발생함을 확인하였다.

또한 현재 주류를 이루고 있는 1.4 μ m/1.5 μ m 파장의 main/sub 펌핑 방식을 사용한 TDFA의 구성을 통해서, 펌프 다인믹스와 관련된 이득, 틸트 보상방법을 고찰하였다.

4. 요약

이 논문에서 우리는 서로 다른 증폭 메카니즘과 이득대역을 갖는 세 가지 다른 종류의 광 증폭기에 대하여 수치 해석적인 결과와 그의 응용 예를 제시하였다. 비록 각각의 증폭기에 대한 모델링을 다른 섹션에서 다뤘지만 hybrid 증폭기를 위한 증폭기는 단순히 위의 모델을 합치기만 하는 것이므로 간단하다고 할 수 있다. 증폭기에서의 과도응답에 대한 수치해석

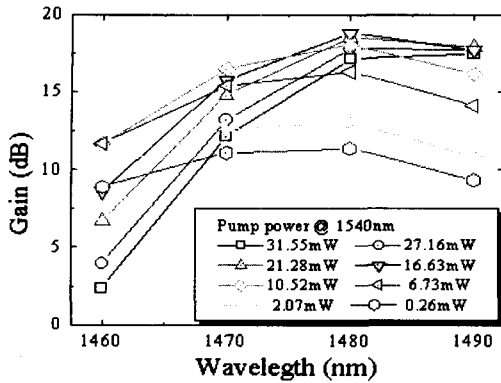


그림 3-5 1540nm 펌프파장 변화에 따른 파장별 이득변화

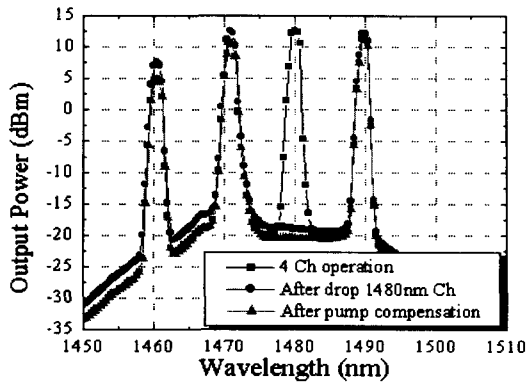


그림 3-6 1480nm 채널 drop 시에 gain, tilt 보상 결과

은 시간에 관련된 average inversion model을 필요로 하는데 이 논문의 경우는 생략하였다. 이 경우 EDFA와 RFA의 경우는 간단하다. 또한 블랙박스 모델이 생략되었는데 이것은 측정된 외부 실험 데이터들로부터 증폭기의 성능을 예측하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 수치해석적인 분석에서, 이렇게 얻은 파장영역에서의 데이터는 시간 영역 시뮬레이션 도구에서 정확한 Q factor를 얻거나 전송시스템 디자인을 위해 파워마진이나 BER을 예측하는데 적용될 수 있다.

5. REFERENCES

- [1] M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, "Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.55 μm -band and a 1.58 μm -band Er^{3+} -doped fiber amplifier in a parallel configuration," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 710-711, 1997.
- [2] Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, T. A. Strasser, J. R. Pedrazzani, C. Wolf, J. Zhou, J. B. Judkins, R. P. Espindola, and A. M. Vengsarkar, "80 nm ultra-wideband erbium-doped silica fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 23, pp.1965-1967, 1997
- [3] J. Nilsson, S. Y. Yun, S. T. Hwang, J. M. Kim, and S. J. Kim, "Long-wavelength erbium-doped fiber amplifier gain enhanced by ASE end-reflectors," *IEEE Photon. Technol. Letter.*, vol. 10, no. 11, pp. 1551-1553, 1998
- [4] J. Lee, U. C. Ryu, S. J. Ahn, and N. Park, "Enhancement of power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section," *IEEE Photon. Technol. Letter.*, vol. 11, no. 1, pp. 42-44, 1999
- [5] Y. Sugaya, S. Kinoshita, M. Takeda, C. Ohshima, and T. Chikama, "1.58 μm band Er^{3+} -doped fibre amplification with a 1.55 μm -band light injection", *OECC' 98 Tech. Dig.*, pp.498-499, paper 16C2-4.
- [6] H. Yoon, S. Bae, S. J. Ahn, and N.

- Park, "Reference level free multi-channel gain equalization and transient gain suppression of EDFA with differential ASE power monitoring," *IEEE Photon. Technol. Letter.*, vol. 11, no. 3, pp. 1-3, 1999.
- [7] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications*. New York: Wiley, 1994.
- [8] S. V. Chernikov, S. A. E. Lewis, and J. R. Taylor, "Broadband Raman amplifiers in the spectral range of 1480~1620 nm," in *OFC'99 Tech. Dig.*, 1999, pp. 117~119.
- [9] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjaona, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," *IEEE Photon Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 530-532, May 1999.
- [10] W. A. Reed, W. M. Coughran, and S. G. Grubb, "Numerical modeling of cascaded CW Raman fiber amplifiers and lasers," *AT&T Bell Laboratories, Tech. Memo.*, 1994.
- [11] T. G. Hodgkinson, "Improved average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1273-1275, Nov. 1992.
- [12] Y. Emori and S. Namiki, "100-nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes," *OFC'99 Tech. Dig.*, 1999, pp. PD19-1, PD19-3.
- [13] P. H. Kim et. al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 1136-1138, (2001).
- [14] T. Hoshida et al., *OFC'01, MI3*, (2001).
- [15] Bumki Min, Hosung Yoon, Won Jae Lee, and Namkyoo Park, "Coupled Structure for Wideband EDFA with Gain and Noise Figure Improvement from C to L-band ASE Injection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 480-482, May 2000.
- [16] J. Kani, M. Jinno, "Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fibre amplifier and fibre Raman amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1004-1006, 1999.
- [17] Bumki Min, Won Jae Lee, and Namkyoo Park, "Efficient Formulation of Raman Amplifier Propagation Equations with Average Power Analysis," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp.1486-1488, 2000
- [18] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, "Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm ," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [19] T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "Novel 1.50- μm band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier by using dual wavelength pumping of 1.05 μm and 1.56 μm ," *Proc. OAA'99, PDP1*, 1999.

- [20] M. J. F. Digonnet, Ed., Rare earth doped fiber lasers and amplifiers, Marcel Dekker, New York, USA, 1993, chapter 2, 10.
- [21] J. Sanz, R. Cases, and R. Alcala, "Optical properties of Tm³⁺ in fluorozirconate glass," J. Non-crystal. Solids, vol. 93, pp 377-386, 1987.
- [22] T. Sakamoto, S. Aozasa, T. Kanamori, K.Hoshino, M. Yamada, M. Shimizu, "Gain-equalized thulium doped fiber amplifiers for 1460 nm-band WDM signals," Proc. OAA'99, Nara, Japan, WD2, 1999.
- [23] T. Sakamoto, M. Yamada, M.Shimizu, T. Kanamori, Y. Terunuma, Y. Ohishi, S.Sudo, "Thulium-doped fluoride amplifiers for 1.4 μ m and 1.6 μ m operation," Proc. OAA'96, Monterey, CA, USA, ThC3, 1996.
- [24] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Laser-diode pumping highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510nm band," Proc. OFC'2000, TuQ4, 2000
- [25] F. Roy, F. Leplingard, L. Lorcy, A Le Sauze, P. Baniel, and D. Bayart, "48% power conversion efficiency in a single-pump gain-shifted thulium doped fiber amplifier," Proc. OFC'2001, PD2, 2001

박 남 규

1997년부터 서울대학교 교수 역임 현 서울대학교 부교수 재직 현재 IEEE Photonics Technology Letter Associate Editor와 Academic Press의 Optical Fiber Technology의 Associate Editor로 활동 중.



지 삼성전자 선임 연구원으로 근무.

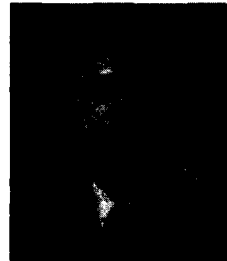
박 종 한



1994년 캘리포니아 공과대학 응용물리 박사학위 취득, 1988년 브라운 대학 물리학 석사학위 취득, 1987년 서울대학교 물리학과 학사학위 취득, 94~96년까지 AT&T 벨 연구실 선임 연구원으로 근무, 96~97년까지

2002년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 학사학위 취득 현 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사 과정 재학 중. 관심 분야: Raman Fiber Amplifier 등의 광대역 광증폭기 기술, All optical regeneration technique

이 한 석



2001년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 학사학위 취득 현 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사 과정 재학 중. 관심 분야: Optical Code Division Multiplexing Algorithm, Optical Time Domain Reflectometry 측정 기술

김 나 영



1999년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 학사학위 취득 2001년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사학위 취득 현 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사 과정 재학 중. 관심 분야: Polarization Mode Dispersion에 의한 광

전송 시스템의 Penalty와 그 보상 알고리즘, 광전송 라인의 특성에 대한 수치해석 연구