

L-band EDFA에서 주입된 C-band laser에 의한 펌프 효과

정희원 김익상*, 김동욱**, 김창봉**

Pump Effect by Injected C-band Laser in L-band EDFA

Ik-Sang Kim*, Dong-Uk Kim**, Chang-Bong Kim** *Regular Members*

요 약

L-band EDFA는 작은 평균밀도반전율에서 동작하기 때문에 C-band에서 상대적으로 높은 흡수율로 인해 펌프 효과를 가지게 된다. 본 논문에서는 980nm의 펌프 입력광파워, C-band 펌프 파장 및 입력광파워에 따라 펌프 효과에 대해 논하고자 한다. 즉, C-band 펌프광의 흡수 또는 후방 자연방출광의 흡수라는 두 가지 다른 메커니즘을 통해 펌프 효과를 야기 시키게 된다. 또한 동일한 소신호 이득 조건하에서 L-band 신호입력광에 의한 포화 특성(포화 광출력, 잡음지수)에 있어서 장파장의 C-band 펌프가 양호한 것으로 나타난다. 전광 고정이득 L-band EDFA에서 C-band 발진의 효과를 검토한 결과 L-band 발진에 비해서 개선된 특성은 없는 것으로 나타난다.

Key Words : L-band erbium doped fiber amplifier, automatic gain control, C-band pump

ABSTRACT

C-band pumping effect appears in L-band EDFA because the absorption in C-band occurs dominant under the condition of such a low average population inversion. In this paper, we show how the C-band pumping effect depends on 980nm pump power, the C-band wavelength, and its input power. The C-band pumping is caused by absorbing C-band injection or backward spontaneous emission power through EDF. If the same small signal condition is given by a C-band pump, the C-band pump of a long wavelength is good for the saturation and noise characteristics of L-band signal. Finally, it is considered that in the aspect of saturation characteristics, C-band compensation is not so much efficient as L-band in Gain-Clamped L-band EDFA having a lossy resonator.

1. 서론

광선로상에서 발생하는 손실을 보상해 주기 위해 C-band EDFA는 1530nm~1550nm의 영역에서 WDM 신호채널들을 증폭시킨다. 반면 L-band EDFA는 1570nm~1610nm의 장파장 영역까지 가용 WDM 채널들을 확장할 수 있도록 했다. L-band EDFA에서 특이할 만한 것 중의 하나는 C-band와

는 달리 낮은 평균밀도반전율(보통 41% 정도)에서 사용하기 때문에 C-band 파장의 광을 펌프로써 재 활용할 수 있다.[1][2] 이러한 현상을 사용하여 전치 EDFA로서 전방향 펌프구조를 가지고 짧은 길이의 EDF를 사용하여 C-band에서 출력되는 전방향 누적 자연방출광을 펌프원으로 후단 L-band EDFA에서 사용하는 저잡음 고효율 2단 L-band EDFA에 대해 발표한 적이 있다.[3],[4] 본 논문의 차별성은

* 배재대학교 정보통신공학과 전자파응용연구실 (iskim@mail.pcu.ac.kr)

** 공주대학교 정보통신공학과, 광통신연구실 (aggie@kongju.ac.kr)

논문번호 : 030448-1014, 접수일자 : 2003년 10월 14일

*본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자 과제(R05-2002-000-01365-0) 지원으로 수행되었습니다.

980nm 펌프광에 의해 형성된 특정 평균밀도반전을 하에서 C-band 광에 의한 펌프효과와 파장 의존성 및 신호광의 포화특성에 대해서 분석하였다. 특히 고정이득 L-band EDFA에서 C-band 광을 발진보상 광으로 사용할 경우에 펌프효과가 성능에 미치는 영향에 대해서 검토해 보았다.

본 논문의 II절에서는 C-band 파장의 빛이 L-band 신호대역의 이득을 상승시키는지의 이유와 C-band 펌프 파장에 따른 이득 상승을 야기시키는 메카니즘에 대해서 논하고자 한다. III절에서는 980nm 펌프광에 의해 소신호 L-band EDFA의 평균밀도반전율의 여러 동작조건하에서 C-band 펌프 파장에 따른 소신호 이득 상승효과에 대해서 논하고자 한다. 또한 IV절에서는 C-band 펌프 파장에 따라 동일한 소신호 이득 조건하에서 L-band 입력 신호광파위에 따른 포화 및 잡음지수 특성에 대해서 논하고자 한다. V절에서는 전광 고정이득 L-band EDFA의 이득 제어를 위해 C-band 파장 및 L-band 파장에서 발진되는 보상광을 사용할 경우 각각 어떠한 특성을 가지는가에 대해서 논하고자 한다. VI절에서는 결론을 맺고자 한다.

II. C-band 파장에 따른 펌프 효과와 메카니즘

광자 flux 보존성은 펌프광의 에너지가 신호광과 전후방 누적자연방출광(ASE, Accumulated Spontaneous Emission), 비도파 자연방출광(USE, Unguided Spontaneous Emission)의 에너지로 전환되는 것을 의미한다. 전체 EDF의 길이에 분포하는 Er 원자의 밀도반전분포는 입사되는 펌프광과 신호광에 의해 결정되고 Er 여기밀도의 전체길이에 대한 평균치를 평균밀도반전율이라 정의한다. 광자 flux 보존성에 근거하면 펌프광자의 감쇠분 $\Delta\bar{q}_i$ 이 L-band 신호광자의 증가분 $\Delta\bar{s}$, 생성된 전후방 ASE 광자 \bar{p} , 전체 EDF 길이에서 방출하는 USE 광자 \bar{u} 의

합과 동일하고 다음과 같이 쓸 수 있다. 이후 사용되는 모든 심볼들은 본 논문의 뒤에 있는 표 3.에 정리하였다.

$$\begin{aligned}
 & [1 - \exp(-\alpha_p(1 - \bar{n}_2)L)] \bar{q}_{in} = \\
 & [\exp(\alpha_s(\bar{n}_2 - r_s^0)L) - 1] \bar{s}_{in} \\
 & + \int NF^+(v; \bar{n}_2) [\exp(\alpha_s(\bar{n}_2 - r_s^0)L) - 1] dV \\
 & + \frac{LAN}{\tau} \bar{n}_2 \tag{1}
 \end{aligned}$$

식(1)에서와 같이 L-band의 신호광이 존재하고 여기에 C-band 광을 추가 입력할 경우에 식(2)와 같이 광자 flux 보존성에 근거하여 표현할 수 있다. 이 때 평균밀도반전율은 C-band 광이 없을 때의 \bar{n}_2 에서 C-band 광이 추가 입력되어 \bar{n}_2' 으로 변화할 것이다. 만약 C-band 광의 흡수율이 평균밀도반전율 \bar{n}_2' 보다 크면 이득을 얻지 못하고 흡수되어 다른 L-band 신호입력광에 이득을 올리는 펌프 효과를 가질 수 있음을 알 수 있다. C-band 광이 펌프 효과를 가질 수 있는 이유는 L-band EDFA에서 동작하는 평균밀도반전율이 30~40%이고 흡수율이 이보다 크기 때문에 C-band 광을 펌프로서 사용할 수 있다는 점이다.

$$\begin{aligned}
 & [1 - \exp(-\alpha_p(1 - \bar{n}_2')L)] \bar{q}_{in} \\
 & + [1 - \exp(\alpha_s(\bar{n}_2' - r_s^0)L)] \bar{c}_{in} \\
 & = [\exp(\alpha_s(\bar{n}_2' - r_s^0)L) - 1] \bar{s}_{in} \\
 & + \int NF^+(v; \bar{n}_2') [\exp(\alpha_s(\bar{n}_2' - r_s^0)L) - 1] dV \\
 & + \frac{LAN}{\tau} \bar{n}_2' \tag{2}
 \end{aligned}$$

먼저 구현된 L-band EDFA는 그림 1과 같이 980nm 파장을 사용하여 양방향 WDM 커플러를 통

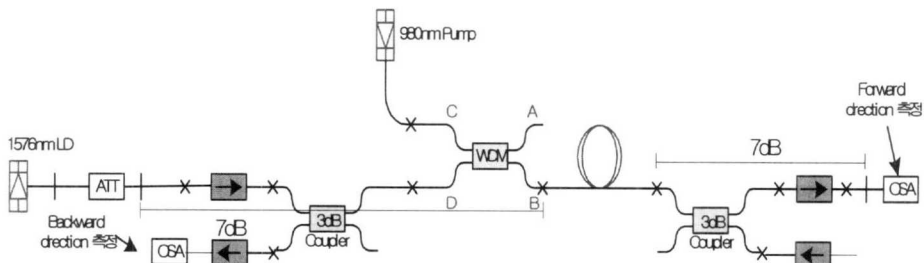
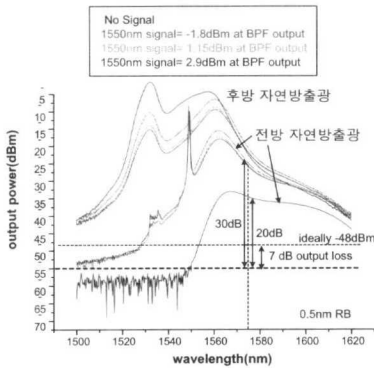
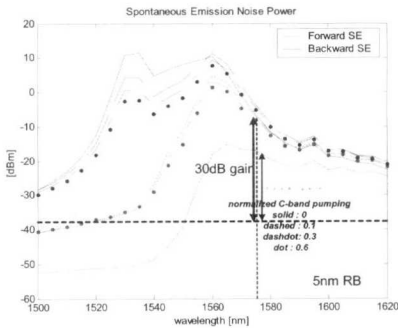


그림 1. 실험 셋업

하여 단일 펌프를 가하고 고밀도 L-band EDF (1530nm에서 흡수계수가 약 13dB/m) 30m를 사용하였다. 입출력 양단에는 OSA(Optical Spectrum Analyzer)를 사용하여 전후방 광출력 스펙트럼을 측정하고 동시에 임의의 입력광을 주입하기 위해 3dB 커플러를 사용하였다. 전후방 출력단의 손실은 분석 결과 약 7dB로 나타난다.



(a) OSA에서 관측된 전후방출력광 스펙트럼



(b) 모의분석한 전후방출력광 스펙트럼

그림 2. C-band 펌프 효과

그림 2.(a)의 제일 하단의 스펙트럼은 그림 1.과 같은 실험 셋업에서 980nm 펌프 LD에 480mA 전류를 가해 대략 190mW의 광파워를 EDF에 주입하였을 때 OSA에 관측된 전후방출력광 스펙트럼의 모습을 보여 준다. 여기서 기저광파워 레벨 P_0 은 $2h\nu\Delta\nu$ 로서 정의되며 1nm안의 파장대역 안에 약 -45dBm의 광파워가 된다. OSA의 0.5nm 파장분해능으로 설정된 측정 스펙트럼의 경우 이보다 3dB 떨어진 -48dBm이 될 것이다. 그림 2.(a)에서 점선으로 표시되어 있는 전후방출력단의 기저광파워 레

벨은 -55dBm으로서 약 7dB의 손실을 나타낸다. 이로부터 1575nm에서 소신호 이득이 20dB 정도로 추정된다. 먼저 980nm 펌프입력광에 대해서 추정된 평균밀도반전율은 약 41%에 해당되고 펌프입력 규격광파워는 약 81.5가 된다. 규격광파워에 대한 정의는 표 3을 참조하기 바란다. 이와 같이 추정할 수 있는 방법은 relaxation 알고리즘에 근거한 모의분석 프로그램을 사용하여 가장 근접한 스펙트럼과 비교하여 나온 결과이다. 모의분석에서 사용된 주요인자는 표 1과 같다.

표 1. 모의분석에 사용된 주요인자

| | |
|---|--------------------------------|
| 길이 L | 30 m |
| 길이 분해능 dz | 0.05 m |
| 파장분해능 dw | 5 nm |
| 규격화 흡수 및 방출계수에 대한 배수 g (1530nm에서 규격화 흡수 및 방출계수 1을 기준으로 함) | 3 1530nm에서 흡수 및 방출계수는 3 m-1 |
| 980nm 펌프광 흡수계수 qa1 | 1.6 m ⁻¹ |
| 1575nm에서 규격화광파워, normp_1575 | 1.3 mW |
| 펌프입력 규격광파워, q1(1) | 81.5 |

이러한 980nm 펌프 조건하에서 1550nm의 DFB LD를 사용하여 전방 입력 시에 L-band에서 전방 자연방출광이 크게 증가하고 그와 동시에 C-band에서 후방 자연방출광은 줄어드는 모습을 그림 2.(a)에서 확인할 수 있다. L-band에서 전방 자연방출광이 크게 증가한다는 것은 이득이 증가한다는 것을 의미한다. 또한 1550nm 광파워를 점점 증가함에 따라서 전방 자연방출광은 약간씩 감소하는 경향을 보여 준다. 그림 2.(b)는 모의 분석 결과에 의한 스펙트럼의 모습을 보여 주는데 점선으로 표시된 기저 광파워레벨은 5nm의 파장분해능으로써 모의 분석하였기 때문에 -38dBm이 된다. 이로부터 실제 측정된 스펙트럼과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

앞서의 경우와 동일한 980nm 펌프 조건하에서 1520, 1540, 1550, 1560nm 파장의 C-band 광의 전방향 입력시에 입력광파워에 따른 소신호이득 상승 효과를 모의분석한다. 그림 3에서 보는 것처럼 C-band 광이 없을 때 평균밀도반전율은 0.41이고 C-band 입력광파워가 점점 커지면서 평균밀도반전율, 즉 이득이 점점 커짐을 볼 수 있다. 특히할 만한 점은 1520, 1540nm의 파장에서는 C-band 입력 광파워에 따라 이득이 점진적으로 증가하는 경향을

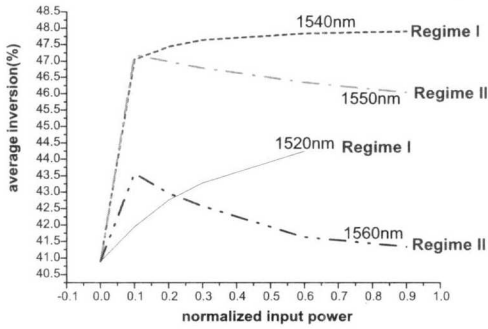
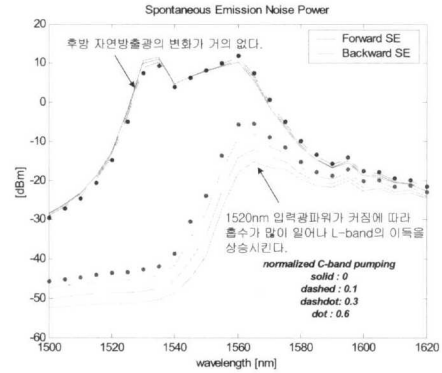


그림 3. C-band 파장에 따른 이득 상승효과

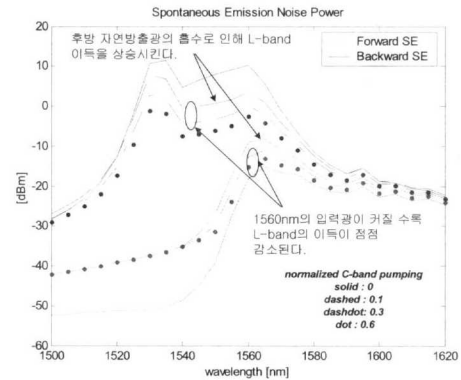
보여 주고(경향 I), 반면에 1550, 1560nm의 파장에서는 특정 C-band 입력광파워에서 최대의 이득상승 효과를 나타내다가 점차 이득이 감소함을 보여 준다(경향 II). 또한 1540, 1550nm의 파장에서 최대의 이득상승 효과를 기할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 C-band 파장에 따라 이득 상승효과에 있어서 두 가지 다른 경향을 보여 주는 것을 경향 I, 경향 II로서 구분하여 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 1520nm 파장에서는 흡수율이 0.55로서 C-band 광이 없을 때의 평균밀도반전을 0.41보다 커서 C-band 펌프광자의 흡수가 많이 일어나지만 절대적인 흡수계수의 크기는 작아 이득 상승효과가 그다지 크지 못하다. 또한 1540nm 파장에서는 흡수율이 0.45로서 C-band 광이 없을 때의 평균밀도반전을 0.41보다 커서 역시 C-band 펌프광자의 흡수가 많이 일어나고 절대적인 흡수계수의 크기가 커서 이득 상승효과가 큼을 알 수 있다. 반면에 1550nm 파장에서는 흡수율이 0.41로서 C-band 광이 없을 때의 평균밀도반전을 0.41과 거의 같다. 또한 1560nm 파장에서는 흡수율이 0.35로서 C-band 광이 없을 때의 평균밀도반전을 0.41보다 작아서 C-band 펌프광자의 흡수가 일어나지 않고 오히려 증폭되는 효과가 생기는데 그림에도 불구하고 이득의 상승효과가 나타나는 이유는 후방 자연방출광이 줄어드는데 요인이 있다.

그림 4.(a)는 1520nm의 광입력 시에 후방 자연방출광의 변화는 거의 없고 전적으로 1520nm의 광의 흡수에 의해 L-band의 이득을 올리는 효과를 보여 준다. 따라서 1520nm의 입력광파워 즉, 규격광파워가 0.1, 0.3, 0.9로서 점점 커짐에 따라 L-band의



(a) 1520 nm



(b) 1560 nm

그림 4. C-band 광입력시의 전후방 광출력 스펙트럼의 모의 분석 결과

이득 상승은 커진다. 반면 그림 4.(b)는 1560nm의 광입력 시에 L-band의 최대 이득을 올리면서 동시에 후방 자연방출광이 많이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 1560nm의 광은 방출이 일어나 아무런 펌프 효과를 나타내지 못하지만 이로 인해 후방 자연방출광이 줄어들어 EDF 초단에서 980nm 펌프 효율을 좋게 해주기 때문인 것으로 설명된다.[5] 또한 1560 nm의 입력광파워가 점점 커지면서 L-band의 이득은 감소됨을 볼 수 있는데 이는 전적으로 1560nm 광에 의해 포화되는 과정이라 볼 수 있다. 이러한 내용을 앞서의 광자 flux 보존성에 근거하여 표 2와 같이 설명할 수 있다. 여기서 L-band EDFA의 낮은 평균밀도반전율로 인해 980nm의 펌프광 감쇠는 펌프 입력광파워가 거의 소진되는 것이 일반적이다.

표 2. C-band 광의 펌프 효과와 경향(regime)

| | |
|---|---|
| C-band 광이 없을 때 | $\Delta \bar{q} \approx \bar{q}_m = \bar{p}^+ + \bar{p}^- + \bar{u}$ |
| $\bar{n}_2 < r_{c1}$ 인 C-band 광입력 (경향 I) | $\bar{q}_m \approx \Delta \bar{c}_1 + \bar{p}_{c1}^+ + \bar{p}_{c1}^- + \bar{u}_{c1}$ $\Delta \bar{c}_1 < 0, \bar{p}_{c1}^+ > \bar{p}^+, \bar{p}_{c1}^- \approx \bar{p}^-, \bar{u}_{c1} > \bar{u}$ |
| $\bar{n}_2 > r_{c2}$ 인 C-band 광입력 (경향 II) | $\bar{q}_m \approx \Delta \bar{c}_2 + \bar{p}_{c2}^+ + \bar{p}_{c2}^- + \bar{u}_{c2}$ $\Delta \bar{c}_2 > 0, \bar{p}_{c2}^+ > \bar{p}^+, \bar{p}_{c2}^- < \bar{p}^-, \bar{u}_{c2} > \bar{u}$ |
| C-band 광이 매우 커서 포화되는 과정 | $\bar{q}_m \approx \Delta \bar{c}_3 + \bar{p}_{c3}^+ + \bar{p}_{c3}^- + \bar{u}_{c3}$ $\Delta \bar{c}_3 \gg 0, \bar{p}_{c3}^+ < \bar{p}^+, \bar{p}_{c3}^- < \bar{p}^-, \bar{u}_{c3} < \bar{u}$ |

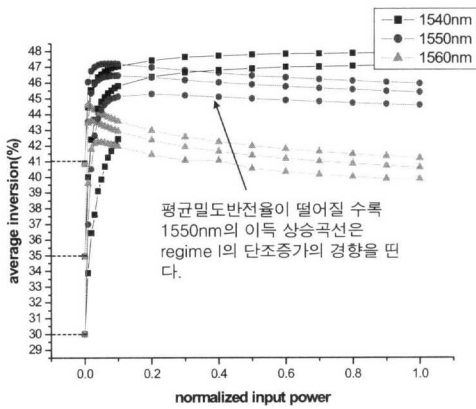


그림 5. 0.41, 0.35, 0.30의 평균밀도반전율에서 C-band 파장에 따른 펌프 효과

이번에는 전방향(즉 980nm 펌프광 주입방향)이 아닌 후방향 C-Band 펌프의 파장에 따른 소신호 이득 상승효과에 있어서 모의실험 결과 전혀 없는 것으로 나타났고 실험 결과도 마찬가지로 나타났다.

III. 980nm 펌프광파워, C-band 파장에 따른 펌프 효과

그림 5.에서와 같이 C-band 입력광이 없을 때 평균밀도반전율이 0.3, 0.35, 0.41에서 1540, 1550, 1560nm의 입력광파워에 따른 펌프 효과는 평균밀도반전율이 작을 수록 경향 I을 보인다. 예를 들면, 평균밀도반전율 0.41에 비해 0.30일 때 1550nm의 이득 상승곡선은 경향 I의 단조증가의 경향을 띤다. 이것은 평균밀도반전율이 작아지면 흡수율이 작은

장파장에서도 흡수가 일어날 수 있고 이로 인해 펌프 효과를 가질 수 있기 때문이다.

개회로 EDFA에서 980nm 펌프 LD에 360mA 주입시 약 38%의 평균밀도반전율을 나타낸다. 그림 6과 같이 양쪽에 광대역여울을 평탄하게 절단된 광섬유의 표면과 잘 밀착시켜 선형공진기를 구성함으로써 공진기의 손실을 보상해 주는 이득을 얻어내도록 함으로써 고정이득 L-band EDFA를 구현할 수 있다.

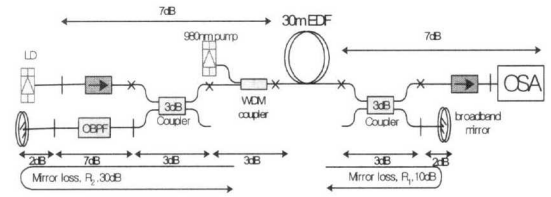


그림 6. 선형공진 고정이득 L-band EDFA

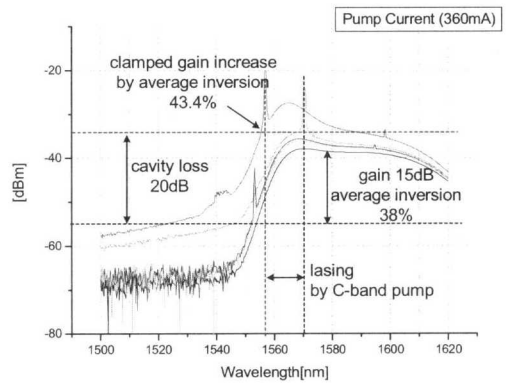


그림 7. 360mA 펌프시 발진 스펙트럼

그림 7과 같이 이미 공진기의 손실 20dB가 980nm 펌프광이 형성하는 L-band에서의 이득 15dB를 상회하기 때문에 발진이 일어나지 않을 것으로 생각된다. 그러나 1555nm에서 1570nm 사이에서 발진이 일어나면서 전체적인 이득, 즉 평균밀도반전율이 올라 갔는데 이는 앞서의 C-band 펌프 효과에 의한 것이다. 1555nm에서 1570nm으로 OBPF(Optical Band Pass Filter)를 조정하면서 발진광의 이득을 추적하면 그림 7에서와 같이 공진기 손실 레벨 -35dBm을 얻을 수 있고 전방관측단의 추정된 기저 광파워레벨 -55dBm으로부터 공진기

손실을 20dB로 추정할 수 있다. 특히 38%의 평균 밀도반전율 근처에서 약간 크거나 작은 흡수율을 갖는 파장에서 펌프 효과가 가장 왕성하게 일어난다. 따라서 1555nm의 경우 흡수율이 0.385로서 0.38보다 약간 커서 흡수에 의한 펌프 효과가 나타나고, 반면 1560nm의 흡수율이 0.35로서 0.38보다 약간 작기 때문에 자체 흡수에 의한 것 보다는 후방 자연방출광의 흡수에 의한 펌프 효과라고 볼 수 있다.

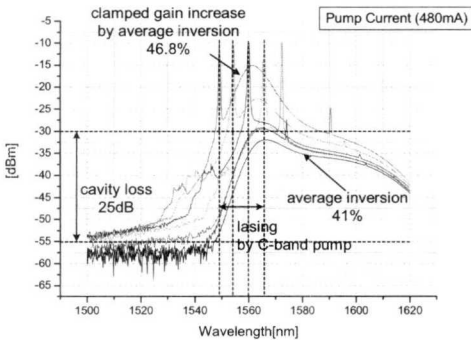


그림 8. 480mA 펌프시 발진 스펙트럼

그림 8.과 같이 980nm 펌프 LD에 480mA 전류를 주입함으로써 앞서에 비해 큰 41%의 평균밀도반전율에서 C-band 펌프 발진파장이 흡수율이 큰 단파장 쪽으로 기운다는 것이다. 이는 당연히 평균 밀도반전율보다 큰 흡수율을 가진 파장에서 펌프 효과를 가질 수 있기 때문이다.

IV. C-band 펌프광에 따른 포화 및 잡음 지수

980nm 펌프광에 의해 41%의 평균밀도반전율을 형성한다. 여기에 1540, 1550, 1560nm의 세 가지 파장의 C-band 펌프에 의해 44%의 평균밀도반전율로 올린다. 이러한 동일한 소신호 이득 조건에서 1575nm 신호입력파위에 따른 포화 특성에 대한 모의실험 결과는 그림 9와 같다. 여기서 1560nm의 C-band 펌프의 경우가 신호입력파에 의해 가장 포화가 느리게 됨을 볼 수 있다. 예를 들면, 1560nm의 C-band 펌프의 경우에 1550nm에 비해서 이득 및 흡수계수, 흡수율이 작아 큰 포화광출력을 가지기 때문에 1550nm에 비해 큰 입력광파위에 의해 동일한 펌프 효과를 가진다. 동일한 1575nm의 신호

입력광파위에 의한 평균밀도반전율의 약간의 감소에 대해 다른 1540, 1550nm 파장에 비해서 1560nm의 경우에 큰 C-band 펌프입력광파위로 인해 더 많이 감소해서 결국 감소분만큼의 에너지를 신호광, 자연방출광들을 크게 유지시킬 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 또한 전후방 잡음지수 특성은 1560nm의 경우 가장 작게 나타난다.

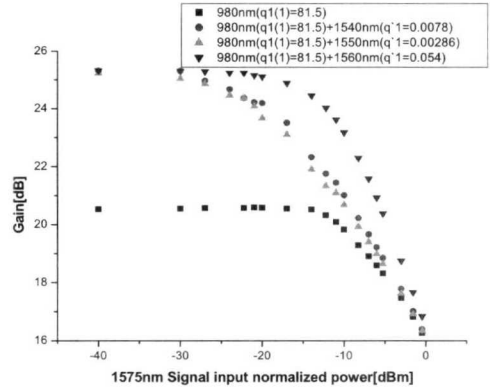


그림 9. C-band 펌프 파장에 따른 1575nm 신호의 포화 특성

V. 고정이득 L-EDFA에서 C-band 발진 효과

공진기의 손실을 보상해 주는 보상광에 의해 이득을 고정시키는 고정이득 L-band EDFA에서 펌프 효과를 가지는 C-band 발진광에 의해 포화광출력을 높일 수 있지 않을까 라는 의문이 제기된다.[6][7] 먼저 공진기의 손실을 극복할 수 있는 이득을 얻어 발진을 하려면 후방 자연방출광의 흡수에 의해 펌프효과를 가지는 경향 II의 경우라고 볼 수 있다. 그러나 이 경우에 이미 C-band 발진광에 의해 포화상태에 있다. 한편, L-band 신호채널이 인가되면 C-band 발진광이 줄어들게 되고 이 경우에도 마찬가지로 L-band 신호채널에 의해 이미 포화상태에 있기 때문에 C-band 광의 펌프 효과는 없다.

이것에 대한 실험 결과는 다음과 같다. 480mA 전류 주입된 980nm 펌프광에 의해 41%의 평균밀도반전율을 가지도록 하고 여기에 현재의 구성된 최소의 공진기 손실을 보상하기 위해 추가적으로 1553nm의 DFB LD를 전방향 입력함으로써 C-band 펌프를 가해 최대의 평균밀도반전율 47.2%를 형성

하였다. 공진기상의 OBPF를 1558nm로 조정하여 공진기 손실 23dB를 보상하는 발진(C-band 발진)을 시켜서 43%의 평균밀도반전율을 형성함으로써 L-band에서 고정이득을 시켰다. 또 하나는 동일한 공진기 손실 23dB에서 OBPF를 1578nm로 조정하여 발진(L-band 발진)을 시켜서 동일한 43%의 평균밀도반전율을 형성함으로써 L-band에서 동일한 고정이득을 시켰다. 그림 10에서 두 발진광에 의한 고정이득 스펙트럼이 동일함을 볼 수 있고 단 차이는 C-band 발진의 경우가 L-band 발진에 비해 C-band에서 전방 자연방출광이 많이 늘어나 있다는 점이다. 이는 L-band 발진에 의한 고정이득이 L-band 신호광의 전방의 소신호 잡음지수가 상대적으로 작음을 의미한다. 또한 이러한 두 가지의 발진 파장에 대해서 1568nm의 신호입력을 가했을 때 이득 특성은 그림 11과 같이 거의 동일함을 알 수 있다.

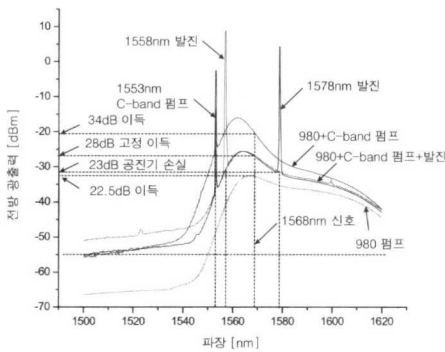


그림 10. 전방 출력광 스펙트럼

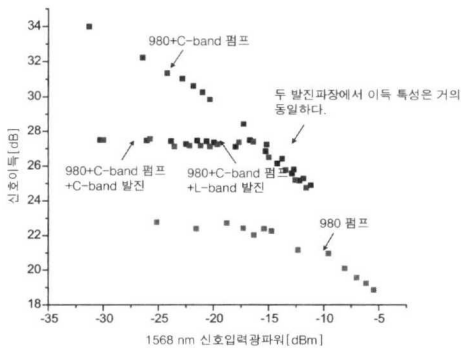


그림 11. 1568nm 신호입력광 대비 이득 특성

VI. 결 론

본 논문에서 다룬 내용은 크게 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째는, 980nm의 펌프 입력광파워 및 C-band 펌프 파장에 따라 이득 상승을 야기시키는 다른 메커니즘을 가지고 있음을 확인하였다. 이로부터 C-band 펌프광이 없을 때의 평균밀도반전율 근처의 흡수율을 가지는 파장에서 가장 적절한 펌프 효과를 기할 수 있다는 사실이다. 둘째는, C-band 펌프광에 의해 상승된 동일한 소신호이득 조건에서 L-band 신호입력광에 의한 포화 특성에 있어서 경향 II에서 동작하는 장파장 C-band 펌프광일 수록 서서히 심화된다는 것과 전후방의 소신호 잡음지수가 줄어 든다는 점이다. 반면 PCE(Power Conversion Efficiency) 측면에서는 효율이 떨어진다. 셋째로, C-band 파장의 발진에 의한 펌프효과로 인해 고정이득 L-band EDFA에서 고정이득을 유지하기 위한 최대 허용 신호 입력광파워의 증가는 없는 것으로 나타났다.

표 3. 사용 기호에 대한 설명

| | |
|-------------------------------|---|
| L, v | EDF 길이, 광주파수 |
| A, τ | 모드단면적, 자연방출광 수명 |
| N, N_1, N_2 | Er 밀도, 기저 Er 밀도, 여기 Er 밀도 |
| $n_2(z), n_1(z)$ | $N_2(z)/N, N_1(z)/N$ 규격화 기저 Er 밀도, 여기 Er 밀도 |
| \bar{n}_2 | $\int_0^L n_2(z) dz/L$, 평균밀도반전율 |
| $NF^{\alpha}(\nu; \bar{n}_2)$ | 전후방 자연방출광 잡음지수 |
| σ_p^e | 펌프광의 유도흡수단면적 |
| σ_s^e, σ_s^e | L-band 신호광의 유도흡수 및 방출단면적 |
| σ_v^e, σ_v^e | 파장에 따른 자연방출광의 유도흡수 및 방출단면적 |
| a_p | Nb_p^e , 펌프광의 흡수계수 |
| a_s | $N(\sigma_s^e + \sigma_s^e) = a_s^e + a_s^e$, L-band 신호광의 흡수 및 방출계수의 합 |
| a_c | C-band 광의 흡수 및 방출계수의 합 |
| a_v | $N(\sigma_v^e + \sigma_v^e) = a_v^e + a_v^e$ |
| r_s^e | $\sigma_s^e/(\sigma_s^e + \sigma_s^e)$, L-band 신호광의 흡수율 |
| r_c^e | C-band 광의 흡수율 |
| r_v^e | $\sigma_v^e/(\sigma_v^e + \sigma_v^e)$, 파장에 따른 자연방출광의 흡수율 |
| P, h | 광파워, Plank 상수 |
| \bar{p} | $P/h\nu$, 광자 flux(단위시간의 광자의 흐름) |
| $\bar{q}_{in}, \bar{q}_{in}$ | 펌프입력광자 flux, L-band 신호입력광자 |

| | |
|---|--|
| | flux |
| \bar{c}_m | L-band 신호입력광자 flux |
| G_p | $\exp[-a_p(1-\bar{n}_2)L]$, 펌프광의 감쇠 |
| G_s | $\exp[a_s(\bar{n}_2-r_c^s)L]$, 신호광의 이득 |
| G_v | $\exp[a_v(\bar{n}_2-r_c^v)L]$, 파장에 따른 감쇠 또는 이득 |
| $\Delta\bar{q}$ | $(1-G_p)\bar{q}_m$, 펌프광자 flux 감쇠분 |
| $\Delta\bar{s}$ | $(G_s-1)\bar{s}_m$, L-band 신호광자 flux 증가분 |
| $\Delta\bar{c}$ | C-band 광자 flux 변화분 |
| \bar{p}^+ | $\int NF^c(v; \bar{n}_2)(G_v-1)d^v$, 전후방 자연방출광자 flux 생성분 |
| \bar{u} | $\frac{LAN}{\tau}\bar{n}_2$, 전체 EDF에서 누설되는 비도파 자연방출광자 flux |
| $P_{norm}(\lambda)$ | $h\nu A/(0^e+0^a)\tau$, 규격화광파워 |
| $\tilde{p}(\lambda)$ | $P/P_{norm}(\lambda)$, 규격광파워 |
| $\Delta\bar{c}_1, \bar{p}_{c1}^+, \bar{p}_{c1}^-, \bar{u}_{c1}$ | 경향 I에서 C-band 광자 flux의 변화, 전후방 자연방출광자 flux 생성, 비도파 자연방출광자 flux 생성 |
| $\Delta\bar{c}_2, \bar{p}_{c2}^+, \bar{p}_{c2}^-, \bar{u}_{c2}$ | 경향 II에서 C-band 광자 flux의 변화, 전후방 자연방출광자 flux 생성, 비도파 자연방출광자 flux 생성 |
| r_{c1}^a, r_{c2}^a | 경향 I, II에서 C-band 광의 흡수율 |

참고 문헌

[1] J. Lee, U. C. Ryu, S. J. Ahn, and N. K. Park, "Enhancement of power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section", IEEE Photon Technol. Lett. vol 11. no. 1, pp. 42-44, 1999

[2] Y. Zhang et al. "Wavelength and power dependence of injected C-band laser on pump conversion efficiency of L-band EDFA", IEEE Photon Technol. Lett. vol 14. no. 3 pp. 290-292, 2002

[3] K. J. Cordina, N. E. Jolley, and J. Mun, "Ultra low noise long wavelength EDFA with 3.6dB external noise figure", OFC/IOOC '99. Technical Digest, vol 2. pp.13-15, 1999

[4] A. Yeniay and R. Gao, "Single stage high power L-band EDFA with multiple C-band seeds", OFC 2002, pp. 457-458, 2002

[5] A. Yeniay and Gao. "L-band EDFA gain and gain flatness enhancement via co-propagating C-band seed technique", ECOC '01. vol 2.

pp. 224 -225, 2001

[6] S. Yamashita and M. Nishihara, "L-band erbium-doped fiber amplifier incorporating an inline fiber grating laser," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol 07, no. 1, pp. 44-48, April 2001

[7] B. Xia, D. Pudo, and L. R. Chen, "Comparison of the static and dynamic properties of single- and double-pass partially gain-clamped two-stage L-band EDFAs," IEEE Photon Technol. Lett. vol 15. no. 4 pp. 519-521, April 2003

김익상 (Ik-Sang Kim)

정회원



1984년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업
 1986년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 석사
 1995년 8월: Texas A&M University Electrical Eng. 공학박사

1987년 5월~1990년 6월: 금성반도체 주임연구원
 1995년 4월~1997년 3월: 한국통신 전송기술연구소 선임연구원
 1997년 3월~현재: 배재대학교 IT공학부 부교수 <관심분야> 광섬유증폭기, 광섬유레이저, 광섬유센서

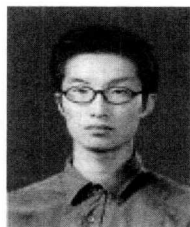
김창봉 (Chang-Bong Kim)

정회원

1983년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업
 1988년 : Florida Tech 전자공학과 석사
 1992년: Texas A&M University Electrical Eng. 공학박사
 1992년~현재: 공주대학교 정보통신공학부 부교수 <관심분야> 반도체레이저, 광섬유레이저, 양방향광전송

김동욱 (Dong-Uk Kim)

학생회원



2001.2 공주대학교 졸업(학사)
 2001.4~2002.12 한국전자통신연구원 위촉연구원
 2004.3~현재 광주 과학기술원 석사과정