

광섬유격자를 이용한 Erbium 첨가 광섬유 증폭기의 광학적 이득제어*

박 회 갑

전북대학교 물리학과

(1996년 7월 19일 받음)

광섬유격자를 이용하는 단순구조의 발진 loop를 구성하여 erbium 첨가 광섬유 증폭기를 발진시킴으로써 광섬유 증폭기의 동작이득을 제어하는 방식을 제안하고 실험하였다. 하나의 광섬유격자가 loop내에서 발진 파장을 선택하는 기능과 함께 발진광이 출력단으로 나오지 못하도록 차단하는 기능의 두가지의 역할을 수행하도록 loop가 구성되었다. 광섬유 증폭기의 동작이득이 발진 loop의 손실과 같은 크기에 고정되어 입력광 파워의 변화에 무관하게 일정하게 제어되었으며, 가변형 결합기로 loop 손실을 변화시킴으로써 동작이득의 조절이 가능하였다. 이러한 loop 구성방식으로 이득제어된 erbium 첨가 광섬유 증폭기는 WDM 시스템에서 여러 가지의 장점을 가질 수 있다.

I. 서 론

Erbium 첨가 광섬유 증폭기(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)는 1.55 μm 광통신 대역의 넓은 파장 범위에 걸쳐 높은 이득으로 광신호의 증폭이 가능하므로 광통신에서 광전력 증폭기, 전치 광증폭기 및 광중계기로서 활용이 이루어지고 있다.^[1] 특히 서로 다른 파장의 광신호들을 거의 누화(crosstalk)없이 한꺼번에 증폭할 수 있으므로 파장분할다중화(WDM: Wavelength Division Multiplex) 방식에 매우 유용하다. 따라서 WDM 방식의 초대용량 국간 전송망이나 가입자(subscriber)용 광통신 시스템의 핵심요소로 자리를 잡아가고 있다.^[2]

그런데 WDM 방식의 광통신 시스템에서 각 파장 채널들이 독립적으로 임의로 on/off 되는 경우나 add/drop이 이루어지는 경우를 가정한다면, EDFA의 입력 신호광 파워 (모든 채널 신호광 파워의 합) 레벨이 상당한 범위에 걸쳐 운용중에 시간적으로 변화할 수 있다. 이러한 경우에는 EDFA의 이득이 채널들의 on/off 또는 add/drop 상태에 따라 이득 포화로 인하여 상당한 범위에 걸쳐 흔들림이 있게 된다. 따라서, 어느 특정 채널에 대한 증폭 이득이 다른 채널들의 on/off에 따라 영향 받게 되며, 이와 같은 이득의 불안정성은 전체 시스템의 운용에도 지장을 초래하는 상황이 존재할 수 있다.^[3]

이러한 문제점을 해결하기 위한 한 가지 방법은 EDFA를 신호광 파장 이외의 특정 파장에서 발진시켜 일종의 레이저로 동작시킴으로써, 신호광 파장에 대한 EDFA의 이득이 입력 신호광 파워 레벨의 변화에도 불구하고 일정치에 묶여 안정화되도록 제어하는 것이다.^[4,7] Zirngible^[4] 및 Okamura^[5]는 EDFA의 출력광의 일부를 입력단으로 귀환시키는 링 공진기(ring resonator)를 구성함으로써 EDFA를 링 레이저 형태로

발진시키고, 링 내부의 손실을 변화시켜 증폭 이득을 제어하는 방식을 제안하였다. 또한 Delevaque 등은 EDFA를 발진시키기 위한 방법으로 EDFA의 입력단과 erbium 첨가 광섬유(EDF)의 출력단측 단말에 각각 광섬유격자를 부착시켜 Fabry-Perot형 공진기를 구성하여 특정 파장에서 발진시키는 방식을 제안하였다.^[6]

그런데 링 형태의 발진 구조^[4,5,7]에서는 링 내부에 제어 이득을 조절하기 위한 가변 광감쇄기와 함께 발진 파장을 선택하기 위한 대역투과 필터가 필요하다. 또한 WDM 시스템에서 중계 증폭기로서 여러단 연결하여 사용하려면 발진광이 증폭된 신호광과 함께 출력단으로 나가지 못하도록 발진광 파장의 빛을 차단시키고 그 외의 신호광 파장 대역의 빛은 투과시키기 위한 노치 필터(notch filter)가 별도로 요구된다. 따라서 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 한편, Delevaque의 방식^[6]에서는 2개의 광섬유격자를 사용하여 발진 구조를 단순화시켰다는 이점은 있으나, Fabry-Perot 구조이므로 EDFA내에서 발진광 경로와 신호광 증폭 경로가 일치하게 된다. 이러한 이득 제어형 EDFA에서는 제어 이득의 조절을 위해 발진광 손실을 신호광 손실과 독립적으로 조절하는 것이 필요한데, 이 방식에서는 발진광 경로와 신호광 경로가 일치하므로 제어 이득의 조절이 용이하지 않은 단점이 있다.

이 논문에서는 EDFA의 이득 제어를 위하여, 앞에서 설명한 단순한 링 형태의 발진 구조를 광섬유격자를 이용할 수 있도록 변형함으로써, 제어 이득의 조절이 가능하고 더욱 단순화된 새로운 발진 loop 구조를 제안하고 실험하였다. 제안된 발진 loop는 단 하나의 광섬유격자를 사용하며, 이 광섬유격자가 loop내에서 발진파장을 선택하는 기능과 함께 발진광이 출력단으로 나가지 못하도록 차단하는 기능의 두 가지 역할을 동시에 수행할 수 있도록 구성되었다. 따라서 넓은 파장 대역에 걸쳐 신호광이 분포되어 있는 WDM 시스템에서 중계 증폭기로서 연결하여 사용하기에 적합한 구조이다.

* 이 논문의 실험에 도움을 주신 충남대의 이동한 교수와 한국전자통신연구소의 광파통신 연구실원 여러분께 감사를 드립니다. 이 연구는 교육부지원 전북대 기초과학연구소와 한국과학재단 지정 광전자 연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

II. 구조 및 동작 원리

이 논문에서 제안하는 이득 제어형 EDFA의 구조는 그림 1과 같다. EDFA의 입력단과 출력단에 각각 방향성 결합기(directional coupler)를 두었으며, 그림 1에서 출력측 방향성 결합기(DC2)의 3번 단말에 광섬유격자가 연결된다. 광섬유격자는 특정 파장, 즉, Bragg 파장에서 반사율이 거의 100%인 것을 사용한다. 또한 출력측 방향성 결합기(DC2)의 2번 단말과 입력측 방향성 결합기(DC1)의 2번 단말을 연결하여 loop를 이루도록 한다. EDFA는 일반적으로 입출력 양단에 광 isolator를 포함하기 때문에 단방향성 loop가 되며, 반사형 필터인 광섬유격자와 함께 레이저 공진기를 이룬다.^[8]

우선 신호광의 경로부터 살펴보면, 입력 신호광이 입력측 광섬유 결합기와 광 isolator를 거쳐 EDF에 입사되어 증폭된 후 광섬유격자를 지나 출력단으로 나오게 된다. 광섬유격자는 Bragg 파장의 파장대역에서는 100%에 가까운 높은 투과율을 가지므로 증폭된 신호광은 광섬유격자에서 대부분 투과되어 출력단으로 나오게 된다.

한편, EDF에서 방출된 자연방출광 중 광섬유격자의 Bragg 파장 성분은 광섬유격자에서 반사한 후 연결된 loop 경로를 따라 순환하며 증폭되는데, EDF에서의 증폭이득이 loop 전체의 손실과 같아지면 레이저로서 발진하게 된다.(여기서 loop 전체의 손실이라 함은 두 개의 방향성 결합기에서의 분할로 인한 손실 및 모든 광섬유 연결부위의 접속손실을 포함하여 발진광이 겪는 총손실을 의미한다.) 그러나 발진광은 광섬유격자의 반사파장이므로 광섬유격자를 투과하여 출력단으로 나오지 못한다.

일반적으로, EDFA는 정상상태(steady state)에서 동작하게 되는데, 정상 상태의 경우에 레이저 발진은 증폭 이득이 loop 전체의 손실과 같은 크기에 묶여 고정된 채로 이루어진다. 일단 EDFA가 광섬유격자의 Bragg 파장에서 레이저로서 발진하게 되면, 상온에서 homogeneous line broadening의 성질이 우세한 erbium의 분광학적 특성^[9]으로 인하여 분광선 내의 다른 파장(신호광 파장)에 대해서도 이득이 특정한 값에 묶여 고정된다. 따라서, 정상상태로 동작하는 경우에 EDFA가 발진하는 한도 내에서는 입력 신호광 파워 레벨이 변화하더라도 신호광 파장에 대한 이득이 변화하지 않고 일정하게 유지된다.

정량적으로 살펴 보기 위하여, 그림 1에서와 같이 입력측 방향성 결합기의 광파워 분배 비율을 $\alpha:1-\alpha$, 출력측 방향성 결합기의 광파워 분배 비율을 $\beta:1-\beta$ 라 하자. 또한 loop를 이루지 않은 상태에서의 EDFA의 이득을 g 라 하자. 신호광의

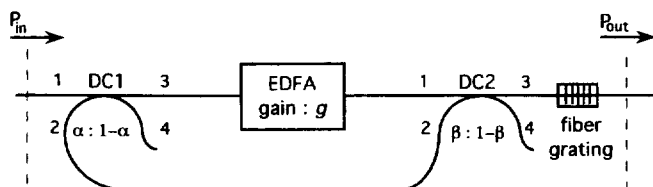


그림 1. EDFA 이득제어를 위한 발진 loop 구성 개념도. (DC: directional coupler)

증폭 경로상에서 이득과 방향성 결합기에서 분배로 인한 손실을 고려하고, 광섬유격자에서의 손실과 다른 손실요인들을 무시하면 광증폭기 전체의 입출력 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{out} = g(1-\alpha)(1-\beta)P_{in} \quad (1)$$

한편, loop를 이루어 정상 상태로 발진시킨 경우에 EDFA의 이득 g 는 loop내의 총손실과 같은 크기 $g=1/\alpha\beta$ 에 묶여 고정된다. 따라서 발진상태에서 (1)식은

$$P_{out} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha\beta} P_{in} \quad (2)$$

으로 다시 쓰일 수 있으므로 발진 파장에서의 순이득은

$$G = (1-\alpha)(1-\beta)/\alpha\beta \quad (3)$$

이 된다. 발진 파장에서의 이득이 고정되면 homogeneous line broadening의 성질로 인하여 그 밖의 다른 신호광 파장에 대해서도 어느 특정치에 고정된다.

한편, 본 실험에서는 결합 비율을 가변시킬 수 있는 광섬유 결합기를 출력측 방향성 결합기로 사용하였는데, 이로써 β 의 값을 변화시켜 loop의 손실을 증감시킴으로써 EDFA의 제어된 동작 이득을 변화시킬 수 있었다.

III. 실험 및 결과

발진 loop를 이용한 이득제어형 EDFA 실험 장치의 구성을 그림 2에 나타내었다. 실험에 사용한 EDF는 Al이 함께 첨가된 것으로서, erbium의 첨가밀도가 약 300 ppm, 길이는 35 m 이고, LP₁₁ 모드의 차단 파장이 1.0 μ m, 코어와 클래딩간 굴절률차 $\Delta n=0.023$, 그리고 1.53 μ m 파장에서의 흡수계수가 3.7 dB/m이다. 펌프 광원으로는 1.48 μ m 파장의 InGaAsP laser diode(LD)를 사용하였으며, 파장분할다중(WDM) 소자를 통해 신호광 방향과 반대 방향으로 EDF내로 입사시켰다. 불필요한 반사광의 역류로 인한 발진을 막고 한 방향으로만 발진이 일어나도록 EDF의 양단에 각각 광 isolator를 두었다. 광신호 입력측의 방향성 결합기는 $\alpha=0.1$ 인 용융형 광섬유 결합기(fused fiber coupler)를 사용하였으며, 출력측에는 결합 비율이 가변되는 연마형 광섬유 결합기(tunable polished fiber coupler)를 사용하여 출력 레벨과 증폭기의 이득을 조절하였다.

광섬유격자는 Bragg 파장이 1558 nm인 것으로서 반사율이 99.1%, 반사파장 선포이 약 0.1 nm인 것을 사용하였다. 신호

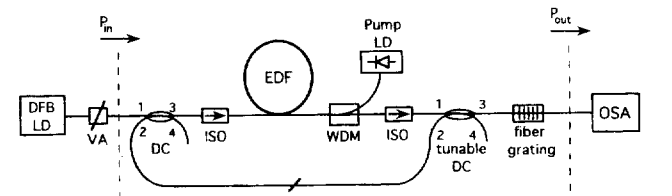


그림 2. EDFA 이득제어 특성 측정을 위한 실험장치 구성도. (VA: variable attenuator, DC: directional coupler, ISO: isolator, OSA: optical spectrum analyzer)

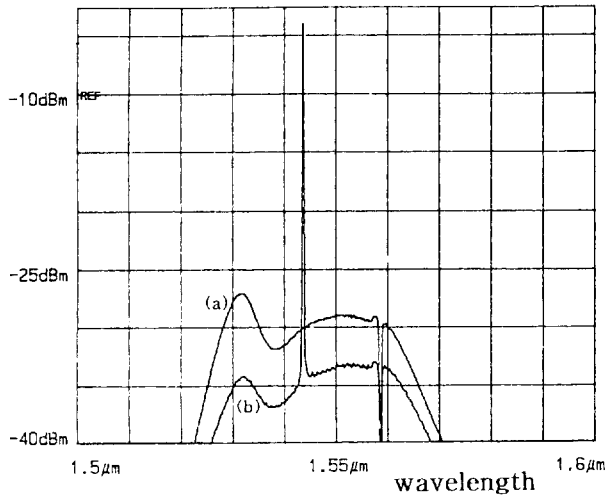


그림 3. 발진 loop를 연결하지 않은 경우의 출력 스펙트럼. (펌프 파워: 25 mW)
(a) 입력 신호광이 없는 경우, (b) 입력 신호광이 있는 경우. (신호광 파장: 1543 nm, 입력 신호광 파워: -13 dBm)

광원으로서 1543 nm 파장의 DFB-LD를 사용하였으며, 신호광 입력 레벨을 가변 광감쇄기로 조절하여 EDFA에 입사시켰다. 출력단에서 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 증폭된 출력의 스펙트럼을 측정하였다.

그림 3은 loop를 연결하지 않은 상태에서 입력 신호광이 없는 경우와 있는 경우에 대해 EDFA 출력 스펙트럼을 각각 측정하여 함께 나타낸 것이다. Loop가 이루어지지 않았으므로 loop의 손실은 무한대이며, 따라서 발진하지 않는 상태에서의 출력 스펙트럼이다. 이때 펌프 파워는 25 mW였으며, 1543 nm 파장의 신호광 입력 파워는 $P_{in} = -13$ dBm(50 μ W)였다. 입력 신호광이 없는 경우에는 넓은 파장범위에 걸쳐 증폭된 자연방출광(ASE: Amplified Spontaneous Emission)만이 출력으로 나타나고 있다. 그림 3의 스펙트럼상에서 출력이 급격히 감소한 부분은 광섬유격자의 Bragg 파장(1558 nm)에 해당하는데, 이 파장에서 광섬유격자가 차단필터의 역할을 하기 때문이다. 입력 신호광이 존재하는 경우에는 ASE와 함께 증폭된 신호광 출력이 나타난다. 그런데 ASE 레벨이 입력 신호광이 없는 경우와 비교하여 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. ASE 레벨의 변화로부터 신호광 파장외의 다른 파장에서의 소신호 이득 변화를 알 수 있는데, 파장에 따라 4 dB에서 7 dB까지의 이득 감소가 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 비교적 대신호인 입력 신호광이 증폭되면서 증폭기의 반전밀도를 감소시키기 때문이며, 이는 서론에서 언급했듯이 WDM 시스템에서 다른 파장 채널의 이득을 변화시켜 불안정성과 누화를 초래할 수 있는 요인이 될 수 있다.

이와 비교하여, 그림 4는 loop를 연결하였을 때 입력 신호광이 없는 경우와 있는 경우의 출력 스펙트럼을 함께 나타낸 것이다. Loop를 연결한 것 외의 다른 조건은 그림 3의 경우와 동일하며, 발진 loop의 총손실이 약 20dB인 경우이다. 광섬유격자의 Bragg 파장에서 레이저 발진이 일어났으며, 이는 출력

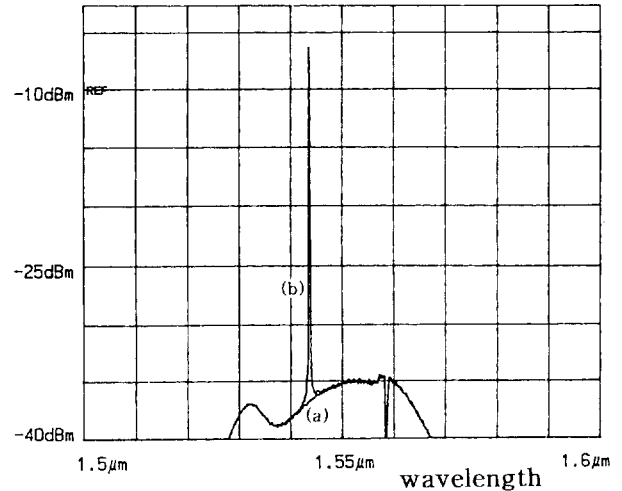


그림 4. 발진 loop를 연결하여 발진시킨 경우의 출력 스펙트럼. (loop 총손실: 20 dB)
(a) 입력 신호광이 없는 경우, (b) 입력 신호광이 있는 경우. (신호광 파장: 1543 nm, 입력 신호광 파워: -13 dBm)

측 방향성 결합기의 4번 단말에서 스펙트럼을 관찰함으로써 확인할 수 있었다. 다만 그림 4의 결과에는 광섬유격자가 발진광을 차단하므로 여전히 dip 형태로 나타나 있을 뿐이다. 그림 4에서 주목할 것은 신호광 파장외의 다른 파장영역에서 입력 신호광이 있는 경우와 없는 경우의 두 ASE 스펙트럼이 완전히 일치한다는 점이다. 즉, 입력 신호광 유무에 따라 ASE광에 대한 이득이 전혀 변화하지 않았음을 볼 수 있다. 따라서, 입력 신호광을 on-off 하더라도 EDFA가 발진하는 한 이득 스펙트럼은 일정하게 유지시킬 수 있음을 알 수 있다.

동작 이득의 제어 특성을 살펴보기 위하여, open loop로 발진시키지 않은 경우와 loop를 이루어 발진시킨 경우에 대하여 신호광에 대한 증폭기의 순이득(P_{out}/P_{in})을 입력 신호광 파워를 변화시키며 측정하였다. 그림 5는 loop의 손실이 ∞ (open loop), 23 dB, 20 dB인 3가지 경우에 대하여 측정한 결과로서, 이때 펌프 파워는 25 mW였다. Open loop의 경우에 -30 dBm의 소신호 입력에 대해 19 dB의 이득을 가지나, 입력 신호광 파워가 증가함에 따라 이득이 감소하게 된다. 그러나 loop를 이루어 발진시켜 loop의 총손실이 23 dB인 경우에는 -13 dBm까지의 입력 신호광 파워 범위에 대하여 증폭기 전체의 이득이 14.5 dB수준에서 일정하게 유지되고 있다. 그 이상의 입력 신호광 파워에 대해서는 EDFA가 발진하지 않았으며 open loop의 결과를 좇아 감을 볼 수 있다. 또한 loop의 총손실이 20 dB인 경우에는 -9 dBm까지의 입력 파워 범위에 대하여 증폭기 전체 이득이 11.5 dB 수준에서 제어되어 유지되었다. Loop 손실 변화와 제어된 동작이득 변화가 일치하였으며, loop의 손실을 크게하여 낮은 이득에서 동작시킬 때 이득 제어가 가능한 입력 파워 범위는 넓어졌다. 이와 같은 방식의 이득제어에 의해 얻을 수 있는 부수적 효과는 지속적으로 변조된 대신호가 EDFA에서 증폭될 때 일반적으로 발생하는 파형왜곡 현상¹⁰⁾을 막을 수 있다는 점이다. 출력파형의 이

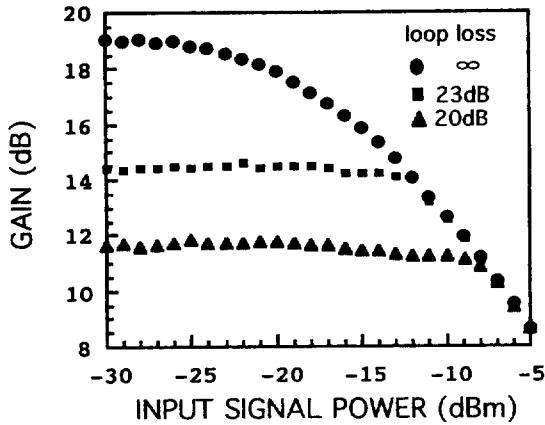


그림 5. 입력 신호광 파워에 따른 동작 이득의 변화. (펌프 파워: 25 mW, 신호광 파장: 1543 nm)

러한 왜곡특성을 조사하기 위하여, EDFA에 약 1 KHz의 사각파(square wave)로 변조된 신호광을 입사시키고 증폭된 출력파형을 관찰하였다. 이 때 입력 신호광의 평균 파워는 -13 dBm이고 펌프 파워는 25 mW였다. 그림 6의 (a)는 EDFA에 입사한 광신호의 파형이며, (b)는 발진 loop를 연결하지 않은 경우, 즉, 발진시키지 않은 상태의 출력파형이고, (c)는 loop를 이루어 발진시킴으로써 이득제어가 된 경우의 출력파형이다. Loop를 이루지 않은 (b)의 경우, 즉, 종래 방식의 EDFA 경우, 신호가 '0' 상태에서 '1' 상태로 변화한 직후에는 밀도반전이 충분히 이루어진 상태이므로 높은 이득으로 증폭되지만, '1' 상태가 긴 시간 동안 유지되면 반전밀도가 감소하여 이득도 감소한다. 따라서 출력파형이 그림과 같이 변형된 결과를 얻게 된다. 그러나 발진 loop를 연결하여 발진시킨 상태 (c)에서는 매 순간의 이득이 loop의 총손실과 같은 크기에 고정되어 제어되므로 신호파형에 왜곡이 발생하지 않았다. 다만, 신호 레벨이 변화할 때 반전밀도가 급격히 변화하므로 이 때문에 (c)의 파형에 잔물결 형태의 이완진동(relaxation oscillation)이 관찰되었다.

일반적으로, EDFA를 이용하는 WDM 중계 시스템을 구성하는 경우에, EDFA의 증폭 가능한 파장대역 중에서 비교적 평탄한 이득 스펙트럼을 갖는 1545-1565 nm의 파장영역이 선호된다. 그 이유는 작은 이득차이가 여러단의 증폭기를 거치면서 큰 출력차이로 나타나기 때문이다. 그런데 EDFA로부터의 ASE 스펙트럼을 보면, 그림 3에서도 볼 수 있듯이 1532 nm 부근의 peak가 있는데 이 파장 대역의 ASE가 여러단의 EDFA를 거치면서 증폭되어 뒷단의 EDFA를 포화시킬 수 있다. 따라서 WDM 방식의 중계증폭 시스템에서 각 단의 EDFA마다 1530 nm 부근의 ASE를 차단하는 광필터를 포함하게 된다. 이러한 관점에서, 이 논문에서 제안하는 이득제어 방식을 WDM의 중계증폭 시스템에 적용하고자 할 때, 발진 파장(광섬유격자의 Bragg 파장)을 1530 nm 대역에 맞추고 전 반사하는 파장 범위가 10 nm 정도로 넓은 것을 사용하는 것이 바람직할 것이다. 이렇게 하면 이득의 안정화 제어를 이룰 수 있음은 물론, 이 파장대역 전체의 ASE를 발진광과 함께 차단함으로써 EDFA의 이득 포화를 막을 수 있고, WDM 채

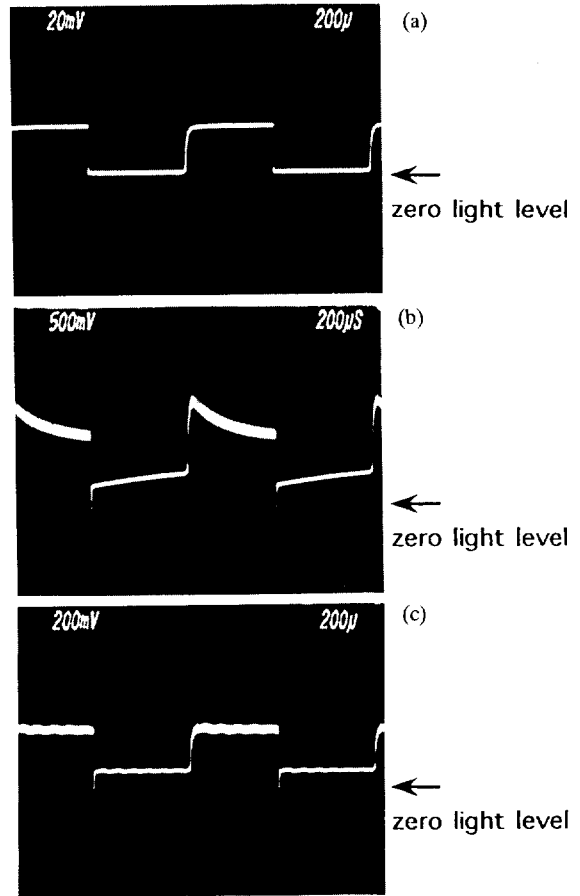


그림 6. 사각파 신호광 입력 파형(a)에 대한 EDFA 출력 파형. (b) loop를 연결하지 않은 경우, (c) loop를 이루어 발진시킨 경우

널로서 가용한 파장대역을 더욱 효율적으로 사용할 수 있는 등 여러 가지 장점을 동시에 얻을 수 있을 것이다.

IV. 결 론

광섬유격자를 이용하는 귀환 loop를 구성하여 EDFA를 광섬유격자의 Bragg 파장에서 발진시킴으로써 EDFA의 동작 이득을 광학적으로 제어할 수 있었다. 발진 loop내에서 광섬유격자가 자연 방출광의 일부를 파장 선택적으로 귀환시켜 EDFA를 발진시키는 역할과 함께, 발진광이 신호광과 함께 출력단으로 나오는 것을 차단하는 역할의 두 가지 기능을 동시에 수행하도록 구성되었다. 이로써 이득 제어를 위한 발진 loop의 구성을 종래에 비하여 보다 단순화할 수 있었으며, EDFA의 동작 이득이 입력광 파워의 변화에 무관하도록 안정화 제어할 수 있었다. EDFA의 동작 이득은 발진 loop의 손실과 같은 크기에 고정되어 제어되었으며, 가변형 광섬유 결합기를 사용하여 loop 손실을 변화시킴으로써 동작 이득과 EDFA의 출력 레벨을 조절할 수 있었다. 이러한 광섬유격자 방식의 발진 loop를 WDM 중계 시스템의 EDFA에 적용하고자 할 때, 광섬유격자의 반사 파장과 선폭을 적절히 선택하면

이득 제어와 함께, 불필요한 ASE를 차단함으로써 EDFA의 포화를 막을 수 있고 WDM 채널로서 가용한 파장대역을 더욱 넓힐 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1994).
- [2] W. I. Way, S. S. Wagner, M. M. Choy, C. Lin, R. C. Menendez, H. Thome, A. Yi-Yan, A. C. Von Lehman, R. E. Spicer, M. Andrejco, M. A. Saifi, and H. L. Lemberg, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2**, 665 (1990).
- [3] K. Inoue, H. Toba, N. Shibata, K. Iwatsuki, and A. Takada, *Electron. Lett.* **25**, 594 (1989).
- [4] M. Zirngible, *Electron. Lett.* **27**, 560 (1991).
- [5] H. Okamura, *Electron. Lett.* **27**, 2155 (1991).
- [6] E. Delevaque, T. George, J. F. Bayon, M. Monerie, P. Niay, and P. Bernage, *Electron. Lett.* **27**, 1112 (1993).
- [7] 김호삼, 박희갑, *한국광학회지* **5**, 291 (1994).
- [8] 김택중, 박희갑, 이동한, *한국광학회지* **6**, 296 (1995).
- [9] E. Desurvire, C. R. Giles, and J. R. Simpson, *IEEE J. Lightwave Technol.* **7**, 2095 (1989).
- [10] E. Desurvire, C. R. Giles, and J. R. Simpson, *Proc. SPIE*, **1171**, 103 (1989).

All-Optical Gain Control in Erbium-Doped Fiber Amplifier Using a Fiber Grating

Hee Gap Park

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea

(Received: July 19, 1996)

A new, simple lasing loop configuration employing a fiber grating was proposed and demonstrated for all-optical gain control of erbium-doped fiber amplifier. The lasing loop was designed such that the fiber grating acts as a notch filter to cutoff the lasing light as well as selects the lasing wavelength. The operating gain was clamped to the same level as the loop loss and it could be varied with a tunable directional coupler in the loop. It is believed that this type of gain-controlled erbium-doped fiber amplifier can have several advantages when used in wavelength-division-multiplexed transmission systems.