

Erbium Doped 광섬유 증폭기와 그 응용

(Erbium Doped Fiber Amplifiers and their Applications)

이 승 희

(삼성종합기술원 광소자 연구실)

■ 차 례 ■

I. 서 론

II. EDFA의 구조와 원리

III. EDFA용 광소자

IV. EDFA의 잡음특성

V. 결 론

I. 서 론

1960년대 레이저의 출현으로 광주파수대를 이용한 통신에 많은 관심과 노력이 보여졌다. 수백 THz의 캐리어 주파수가 제공하는 통신가능 정보용량은 기존의 마이크로파에 의한 것 보다 수만배 이상 되기 때문이다. 또한 원칙적으로 광자(photon)의 에너지가 열잡음의 에너지보다 매우 높기 때문에 열잡음의 영향에 민감하지 않다는 이유로 광파를 선호하게하는데 기여하였다. 물론 현재의 기술로는 광파를 이용한 시스템도 열잡음의 영향을 다소 받고있는 것이 사실이나 이는 점차적으로 감소할 전망이다. 이외에도 전기로부터의 절연성, 정보의 보안문제등도 광통신의 선호도를 높이는데 기여하였다^[1,2]

초기의 광섬유의 손실특성은(약 1000dB/km) 장거리 통신은 물론 단거리 통신에조차도 그 사용이 불가능했다. 무선통신에 대한 많은 연구와 개발도 이러한 원인들이 크게 작용했다고 볼 수 있다. 1980년대에 들어 실리카를 이용한 광섬유의 발달로, 제3의 광통신 파장대역인 1550nm대에서 0.2dB/km 손실의 광섬유를 얻는데 성공하였으며, 특히 EDFA의 급속한 발달과 맞물려 활발한 연구개발이 진행되고 있다.

광증폭기는 미약해진 광신호에 에너지를 공급하

여, 원하는 세기의 신호로 증폭시키는 장치인데, 코히어런트(Coherent) 통신 시스템 뿐만 아니라 인코히어런트(Incoherent) 또는 Direct Detection 시스템에도 활용이 가능하다. 본 논문에서는 현재 개발이 활발히 진행중인 Erbium Doped Fiber Amplifier(EDFA)의 특성과 구조및 관련 광소자들에 대해 논하고, 특별히 잡음특성에 대하여 검토해 본다.

최초의 광증폭기 개념은 광전(Optoelectruc) 전광(Electro-Optic)변환을 이용하였는데, 이는 엄격한 의미에서의 순수 광증폭(All-Optic Amplification)이라 볼 수는 없으며, 광을 신호전송에 사용하려는 본래의 의도와 장점을 충분히 살리지 못하게 된다. 반도체 레이저 증폭기(Semiconductor Laser Amplifier: SLA)와 EDFA가 광전변환을 배제한 순수광증폭기에 해당된다. SLA의 개발은 반도체 레이저 다이오드의 발달과 함께 급성장하였다.^[3,4] SLA의 장점으로는 넓은 증폭대역폭, 집저과 등을 들 수 있다. SLA의 가장 큰 문제점이던 면반사(LD Facet Reflection)는 반사면의 AR coating과 각도조절로 어느 정도 극복되었다.

최초의 광섬유 증폭기의 개념은 1961년에 E. Snitzer에 의해 제안되었으며,^[5] 1964년에 희토류(Neodymium) 원소를 첨가한 광섬유 증폭기의 실험이 성공되었다.^[6] 저손실 광섬유, 펄핑용 레이저 다이오드, WDM

coupler(Wavelength Division Multiplexing Coupler) 등의 광소자 발달로 광섬유 증폭기는 1980년대 들어 급속히 성능이 개선되었으며, 1550nm의 광통신대역에서의 증폭을 가능케한 EDFA가 1987년에 개발되었다.¹²⁾

그 이후 최근까지 증폭이득과 잡음지수(Noise Figure: NF) 최적화를 위해 광소자 및 EDFA 구조 개선을 위한 많은 연구가 진행 중이다. 한편으로는 Pr^{3+} (Praseodymium)을 첨가한 광섬유 증폭기(PDFA) 등도 1300nm 파장대의 광신호 증폭용으로 활발히 연구되어지고 있다.¹³⁾

II. EDFA의 구조와 원리

EDFA는 기본적으로 광섬유를 증폭매체로 이용한다는 커다란 장점을 갖고 있으며, SLA에 비하여 다음과 같은 면에서의 장점으로 인하여 SLA보다 먼저 실용화가 이루어졌다.¹⁴⁾ 높은 증폭이득과 포화출력, 낮은 삽입손실 및 편파의 준성, 제조의 단순성 등이다. 각각의 장점들에 대한 설명은 그 구조와 함께 기술하도록 하겠다.

EDFA의 기본구조는 펄핑용 레이저 다이오드, WDM coupler, 아이솔레이터(Isolator) 및 EDF(Erbium Doped Fiber)로 이루어진다.¹⁵⁾ 레이저에서와 같이 EDF

가 증폭매체가 되어 펄핑용 레이저 다이오드가 EDF의 상태밀도 반전(Population Inversion)에 필요한 에너지를 공급한다. 펄핑에너지는 광신호와 함께 WDM coupler에 의해 증폭매체인 EDF에 입사된다. 증폭매체를 사이에 둔 접속점(Splice), 광소자 등에 의해 발생하는 반사는 레이저 cavity를 형성하여 신호를 왜곡하게 되는데 아이솔레이터를 사용하여 이를 방지할 수 있다. 프리앰프(Pre-amplifier) 등과 같이 엄격한 잡음특성을 요하는 경우, EDF 뒷단에 좁은 대역폭의 대역통과필터(Narrow Band Pass Filter)를 사용할 수 있다.

일반적으로는 EDFA 구조는 펄핑 레이저 다이오드의 파장과 위치의 차이 구분할 수 있다. 파장에 의한 구분에는 EDF의 5개의 흡수대역(absorption band)를 이용할 수 있는데 이는 532nm, 670nm, 807nm, 980nm 와 1480nm이다(그림 1 참조). 펄핑 파장에 따른 단점을 크게 excited state absorption(ESA)와 스토크스 이동(stokes shift)으로 구분된다.¹⁶⁾ ESA는 3-level 시스템에서의 분해점으로써 여기상태(Excited state)의 전자가 더 높은 준위로 다시 전이하여 펄핑의 효율과 증폭이득을 저하시키는 현상이다.

532nm와 670nm대역의 펄핑광 흡수를 이용한 EDFA의 경우 ESA는 큰 문제가 되지 않으나 스토크스 이동에 의해 효율이 저하되어서 각각 1.35dB/

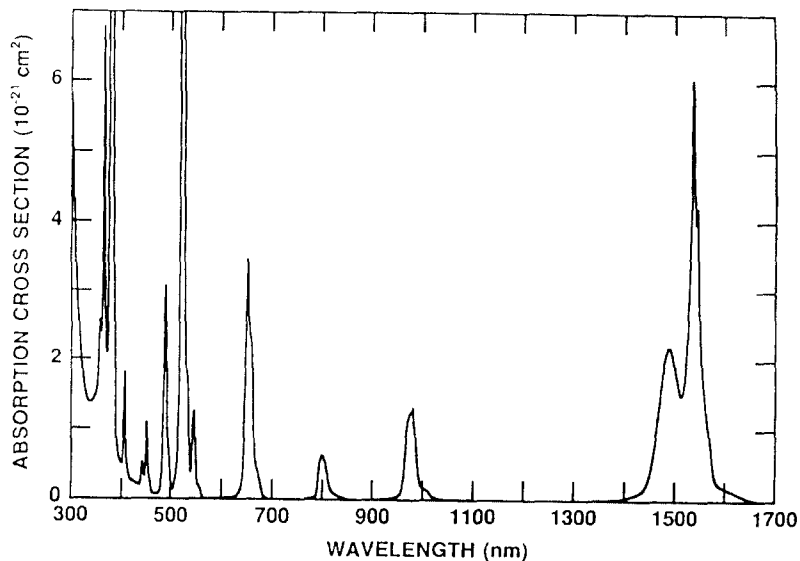


그림 1.

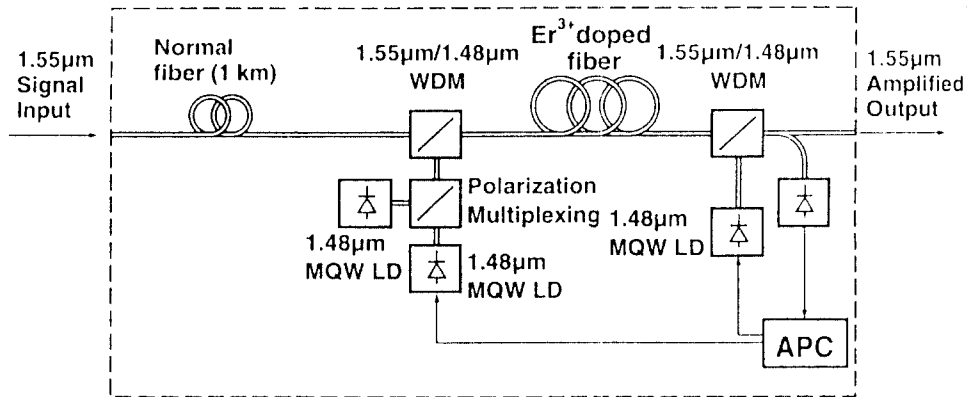


그림 2.

mW와 0.26dB/mW 정도의 증폭계수를 갖게된다.^[11,12]

저가의 고효율 레이저 다이오드가 존재하는 807nm 대의 펌프 레이저 다이오드의 경우 ESA가 가장 큰 효율저하의 원인이 되는데 프리앰프와 같은 저잡음 증폭기로서의 응용가능성이 있다.^[11] EDF의 특성에서 기술하겠지만 30dB 이상의 이득도 실현적으로 얻어진 바 있다.^[15]

현재 일반적으로 사용되는 펌프 파장은 980nm와 1480nm이다. 이 두 파장대 모두 ESA의 영향을 적게 받으며 스토우크스 이동 또한 작다. 이 두 대역에서는 펌프광이 광섬유 내에서 single-mode가 되어, 상태밀도반전을 극대화한다.^[10] 현재 사용화된 대부분의 EDFA가 이 두 파장대를 사용하고 있다.

펌프광의 진행방향에 따른 분류로는 순방향펌핑, 역방향펌핑 및 양방향펌핑으로 구분된다.

그림2에서와 같이 고효율을 필요로 하는 경우에는 WDM coupler의 펌프입력단에 PBS(Polarization Beam Splitter)를 사용하여 두개의 펌프를 Polarization Multiplexing하여 사용하기도 한다.^[16,17] 현재 EDFA의 수명은 펌프 레이저 다이오드에 의해 결정되는데 수명을 연장시키기 위해 저출력에서 작동시키고 그 수를 증가시키거나 펌프의 효율이 높은 반사형(Reflective) 구조를 사용할 수도 있다.(그림3 참조) 반사형 구조는 원칙적으로 펌프의 효율을 두배 가까이 증가시키는데, 그 성능은 Optical Circulator와 반사면의 coating에 따라 크게 좌우된다.^[18,19] 신호대역밖의 잡음도 반사면의 coating design에 의해 일정량 제거할 수 있다.

III. EDFA용 광소자

EDFA의 핵심소자인 EDF의 최적화는 세가지 기술로 요약할 수 있다. 첫째, 희토류 원소의 적절한 doping 농도를 조절하는 기술이다. 고농도 doping으로 EDF의 길이를 최대한 줄이려고 할 때에는, quenching 현상이 발생되므로 이를 피하는 기술이 요구되어진다. 둘째, Erbium을 광섬유의 코어 중앙에 한정시키는 기술로 펌프의 효율을 극대화하는 것이 필요하다. 셋째, 두 다른 희토류원소들(혹은 금속을) co-doping 하는 기술이다. EDFA의 증폭대역폭은 Erbium 이온 주위의 host glass의 특성에 의하여 결정된다.^[20] 연구결과에 따르면 넓은 증폭대역폭을 얻기 위해서는 Aluminium co-doping이 바람직한 것으로 판명되었으며, dual core 광섬유를 이용하여 자발적방출에 의한 광을 여과하는 기술도 등장하고 있다.^[21] Ytterbium을 co-doping시킨 Er/Yb co-doped 광섬유는 800nm대의 펌프광을 이용한 고효율 EDFA를 가능케했다.^[22](그림 4 참조) 30dB 이상의 증폭이득을 800nm대의 펌핑을 통해 얻는 기술도 발표되었는데, 이는 Er³⁺의 낮은 doping농도 즉 확장된 EDF의 길이에 의한 것이다.^[15]

EDFA용으로는 주로 두 가지 타입의 WDM coupler가 사용되고 있는데, fused fiber 타입과 micro-optic 타입이다. Fused fiber 타입은 삽입손실이 적고 편파의존성이 적으며 접속이 용이한 장점들을 갖추고 있으며, interference filter를 사용한 micro-optic 타입은 1480nm 펌프광을 사용할 때 유리한 점을 들 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 반사면들에 의한 신호광과

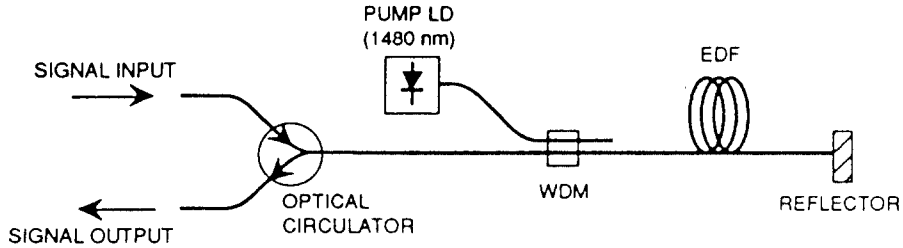


그림 3.

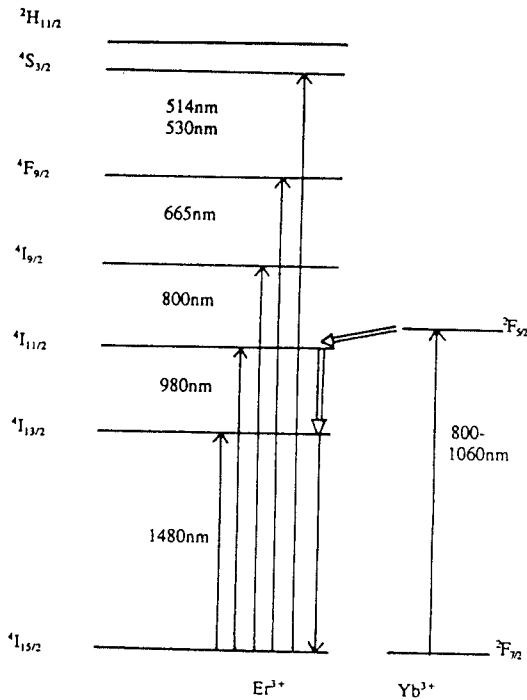


그림 4.

펌프광의 역류에 의한 발진을 방지하기 위하여, 광아이솔레이터를 사용한다. 대표적인 예로 Faraday Rotator를 사용하는 아이솔레이터의 일반적인 구조를 그림 5에 나타내었다. 통신용 EDFA의 경우 광섬유를 통과한 광신호의 무작위적 편파변화(Random Polarization)로 인하여, 편파무의존성(Polarization Independent)을 갖는 아이솔레이터를 사용하여야한다. 현재로는 isolation 60dB이상, 삽입손실 1dB 미만, 편파의

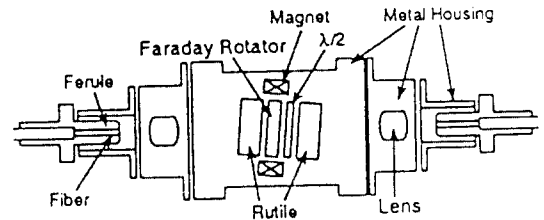


그림 5.

존도(Polarization Sensitivity) 0.2dB 미만의 우수한 특성을 갖는 아이솔레이터가 상품화되어있다. 아이솔레이터의 두가지 중요한 문제점은 EDFA를 cascade시켜서 사용할 때 누적된 편파의존도에 의한 신호광의 왜곡현상이나 편파모드분산에 의한 Bit Error의 증가문제와 아이솔레이터에 사용된 단결정들의 온도 의존성에 의한 isolation 특성이 급격한 변화분배를 볼 수 있다. 안정된 특성을 얻기위한 연구개발이 현재 다각도로 진행 중이다. 최근들어서는 fiber type 아이솔레이터와 WDM coupler의 기능을 동시에 갖는 WDM isolator 등의 새로운 구조들이 발표되고 있다.

IV. EDFA의 잡음특성

광증폭기의 주된 잡음원은 ASE(Amplified Spontaneous Emission)이다. 광증폭기의 양자역학적 모델에 의해 ASE는 간단히 설명된다. 즉 Direct Detection 시스템에서 증폭계수 G의 광증폭기를 통과한 광자는

$$\langle N_{out} \rangle = G \langle N_{in} \rangle + (G - 1) \quad (1)$$

이다. $\langle \rangle$ 는 N의 평균을 나타낸 것이다. 우변의 $(G - 1)$ 항이 ASE의 원인이다. 입력단과 출력단의 신호대 잡

G	증폭기의 증폭계수
$\langle N_{in} \rangle$	증폭기 입력단의 광자의 평균수
$\langle N_{out} \rangle$	증폭기 출력단의 광자의 평균수
h	Planck's Constant
ν	광 주파수
$\Delta\nu$	광 대역폭
μ	Effective inversion parameter
$\sigma_s(\lambda)$	흡수 단면적
$\sigma_e(\lambda)$	방출 단면적
N_1	기저 상태 밀도
N_2	여기 상태 밀도

음비(SNR)를 계산하여 그 비를 구하면 NF이다.

$$NF \approx \frac{4\mu G \langle N_{in} \rangle h\nu (G-1) + 4\{\mu h\nu (G-1)\}^2 \Delta\nu}{2 \langle N_{in} \rangle h\nu G^2} \quad (2)$$

식 1에서 보았듯이(표1 참조) $G(G-1)$ 항은 신호와 ASE 비트잡음(Beat Noise) $(G-1)^2$ 항은 ASE와 ASE 사이의 비트 잡음이다.^[26-28] Effective Inversion Parameter μ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{N_2 \sigma_e(\lambda)}{N_2 \sigma_e(\lambda) - N_1 \sigma_s(\lambda)} \quad (3)$$

신호의 크기가 충분히 크거나 $\Delta\nu$ 가 충분히 작을 경우

$$NF \approx 2\mu \frac{G-1}{G} \quad (4)$$

이다. 또한 $N_2 \gg N_1$ 즉 완전한 상태밀도반전의 경우 $\mu \approx 1$ 이므로 $NF \approx 2$ 이다. 이것이 양자역학적 한계(Quantum Limit)인데 흔히 말하는 3dB 한계이다. EDFA가 3-level 시스템으로 구동할때 이론적으로 $NF = 3dB$ 를 이룰 수 있으며^[29] 실험으로도 이에근접한 결과가 발표되었다.^[22] 1480nm 펌프의 경우 2-level 시스템으로 작동하며 $\sigma_s(\lambda) \neq 0$ 이므로 완전한 상태밀도 반전이 이룩될 수 없어 신호 주파수에서의 재흡수가 일어난다. 이 결과 상태밀도반전에 한계가 생기어 증가된 NF로 나타난다. 실험적으로 5dB 내외의 NF가 발표된 바 있다.^[30]

NF를 증가시키는 또 하나의 원인은 EDF의 MFD(mode field diameter)와 일반 광섬유와의 차이에서 발생하는 손실에 의한 것이다. 이는 fusion splicer를 사용하여 arc 방전의 횡수를 증가시켜 EDF 내의 첨가물을 열확산시킴으로 손실을 감소시킬 수 있다.^[31]

역방향으로 진행하는(Backward ASE) ASE는 증폭기 입력단쪽으로 갈수록 커지면서 여기된 전자를 유도방출시켜 신호의 포화(saturation)을 일으킨다. 그 결과 잡음특성을 저하하여 NF가 증가하는데 EDF 중간에 아이솔레이터(Midway Isolator)를 삽입하면 EDF의 역방향으로 진행하는 ASE는 아이솔레이터까지만 영향을 주며 앞단의 EDF 또한 작은 양의 ASE로 입력단의 신호포화를 방지하여 NF의 개선을 볼 수 있다.^[31]

앞서 기술한 바와같이 ASE의 메카니즘은 다음과 같다. doped 광섬유의 일정 지점에서 발생한 자발적 방출에 의한 광자는 그 진행방향, 위상 그리고 편광특성이 무작위성을 갖고 있으므로 잡음이 되는데 신호와 주파수대역이 같으므로 다른 여기된 전자를 유도방출시킨다. 이렇게 유도방출된 잡음도 계속 여기된 전자들을 유도방출하여 신호광이 유도방출할 수 있는 전자를 고갈시켜 신호포화를 초래한다. 이렇듯 ASE의 메카니즘은 신호광과 함께 EDFA로 입력된 잡음과는 구별된다.

저잡음용 EDFA의 협대역통과필터와 reflective 구조의 selective coating은 신호대역폭밖의 ASE를 제거하는 것이다. 증폭기의 정확한 NF 측정을 위해서 측정장비에 선형편광기(linear polarizer)를 사용할 수 있는데 이는 측정장비의 신호의 편광상태를 알 수 있기 때문이다. 실제의 시스템에서는 증폭기로 입력되는 입력광의 편광상태를 알지 못하므로 잡음제거를 목적으로하는 선형편광기는 사용할 수 없다.

V. 결 론

통신망에 적용되는 EDFA는 그 사용되는 위치에 따라 종류가 달라진다. 일반적으로 크게 나누어 장거리 통신용의 세가지 종류와 분배망에 사용되는 파워 앰프용이다. 장거리 통신용으로는 송신단 뒤에 위치하는 후지증폭용, 중계기를 대체하는 기능을 갖는 선로증폭용 및 수신단의 감도를 증가시키는 전치 증폭용으로 구별되어진다. 또 그 종류에 따라 요구되는 특성들도 모두 달라지게 된다. 후지증폭기는 포화출력을 높이는 것이 바람직하며, 선상증폭기는 감시기능과 루프백(Loop-back) 기능향상이 중요하며, 전치증폭기는 잡음특성을 개선하는 것이 필요하다. 그러나 어느 경우든 간에 효율을 높이는 문제와 증폭대역폭을 넓게 만드는 문제는 공통된 과제라고 할 수 있다.

순수 광증폭기술의 발달은 EDFA에만 그치지 않을 것으로 보인다. 현재 “확실히 연구되고 있는” PDFA와 waveguide 타입의 one-chip 광증폭기, 분산형의 저농도 doping의 광섬유 및 무손실 광소자 등도 미지않아 상용화될 것으로 추측되어진다. 현실적인 문제로는 광소자 가격의 하락이 실현되지 않으며, EDFA나 다른 광증폭기들의 보편화를 이루기가 어렵다는 점이다. 이것은 정밀한 제조기술을 요하는 광소자들의 생산수율 문제와도 무관하지 않다. 향후의 관련기술 발전은 이러한 제조기술 분야에서 이루어져야함을 인식해야할 것이다.

참 고 문 헌

1. G. Keiser, "Optical Fiber Communication," McGraw Hill, New York, 1991.
2. J. Palais, "Fiber Optic Communications 2nd Ed." Prentice Hall, New Jersey, 1988.
3. J. C. Simon, J. LT-5, no.9, 1987.
4. T. Saitoh et al., J. LT-6, no.11, 1988.
5. E. Snitzer, J. Appl. Phys., vol.32, no.1, 1961.
6. C. J. Koester et al., Appl. Opt., vol.3, no.10, 1964.
7. R. J. Mears et al., Technical Digest Series, Sixth International Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, paper W12, OSA, Washington D.C., 1987.
8. Session TuA, Technical Digest Series, Optical Amplifiers and their Applications, Topical Meeting OSA, 1993 참조.
9. E. Desurvire, Scientific American, Jan. 1992.
10. R. I. Laming et al., SPIE vol.1171, Fiber Laser Sources and Amplifiers, 1989.
11. R. I. Laming et al., Electron. Lett., 25 p.12, 1989.
12. C. A. Millar, Tunable Solid State Lasers, paper WD2-1, Williamsburg, 1987.
13. H. Kanamori, Technical Digest, Fourth Optoelectronics Conference, paper 1783-4, 1992.
14. Y. Kimura et al., Electron. Lett., 27 p.146, 1991.
15. M. Nakazawa et al., Electron. Lett., vol.2, no.3, 1990.
16. M. Yamada et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol.2, no.3, 1990.
17. N. Henmi et al., Technical Digest Series, Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting, paper MA3-1, OSA, 1993.
18. S. Nishi et al., Proc. ECOC, 1990.
19. M. Kobayashi et al., Technical Digest Series, Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting, paper MA2-1, OSA, 1993.
20. C. G. Atkins et al., Electron Lett., vol.25, 1989.
21. G. Grasso et al., OFC '91, paper FA3, 1991.
22. S. G. Grubb et al., Technical Digest Series, Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting, paper MA1-1, 1993.
23. T. Watanabe, Proc. 39th International Wire and Cable Symposium, New Jersey, 1990.
24. H.P. Yuen, "Photons and Quantum Fluctuation," E. R. Pike and H. Walther eds., Pl. Hilger, London, 1988.
25. C.R. Giles et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol.1, no.11, 1989.
26. T. Mukai et al., IEEE J. QE-18, no.10, 1982.
27. O. Tonguz et al., J. LT-9, no.2, 1991.
28. R. Loudon, IEEE J. QE-21, no.7, 1985.
29. R. Olsbansky, Electron. Lett., vol.24, 1988.
30. C. Giles et al., IOOC '89, paper 20PDA-5, 1989.
31. S. Yamashita et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol.4, no.11, 1992.



이 승 희

- 1987년 : 고려대학교 전자공학과(공학사)
- 1988년 : 미국 NORTHWESTERN UNIVERSITY 대학원 수료
- 1992년 : 미국 NORTHWESTERN UNIVERSITY 대학원 전자공학과(공학박사)
- 현재 : 삼성종합기술원 광소자연구실 근무(선임연구원)