# New Glasses for Fiber-optic Amplifiers at 1.3$\mu$m

포항공과대학

교 수 허 종

# New Glasses for Fiber-Optic Amplifiers at 1.3 $\mu$m

포항공과대학교 재료금속공학과
허 종, 박세호

## 요 약

전 광속 전송 (all optical circuits transmission) 시스템을 구성하는 광섬유 증폭기 중 1.3 $\mu$m 파장 대역의 광증폭을 위한 $Pr^{3+}$ 및 $Dy^{3+}$ 함유 신조성 유리 (new glass)와 광섬유의 개발 현황 및 전망에 관해 기술하였다. 1.3 $\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기는 격자 진동 완화에 의한 손실을 최소화하기 위해 격자 진동 에너지가 낮은 신조성 유리가 기지 재료로 사용되어야 한다. 이러한 신조성 유리에는 중금속 산화물 유리, fluoride계 유리, sulfide계 유리, chalcohalide계 유리가 있다. 현재까지는 전손실의 광섬유 제조가 가능한 fluoride 유리가 주로 사용되고 있으나, 광 증폭 효율 측면에서 sulfide계 및 chalcohalide계 유리가 유리한 것으로 전망된다. 그러나, $Pr^{3+}$ 함유 sulfide계 유리 및 $Dy^{3+}$ 함유 chalco-halide계 유리의 경우, 광섬유 제조 및 기타 시스템 적용을 위해 조성의 최적화, preform 제조 공정의 개선, 불순물 제거 등에 대한 기술 개발이 필요하다.

## I. 서론

최근 광섬유를 이용한 통신 기술의 비약적인 발전에 힘입어 장거리 기간 통신망 뿐만 아니라 케이블 TV 및 정보 분야에서도 광섬유의 사용이 활발히 이루어지고 있다. 특히 초고속 멀티미디어 정보 통신망의 구축은 향후 국가 경쟁력을 결정하는 중요한 요소로 인식되어 선진 각국에서는 많은 연구·개발이 이루어지고 있다. 국내에서도 중요 광소자의 국산화를 위한 연구를 수행한 바 있으며, 광섬유 접속 모

듈 등의 기초 소자 및, 최근에는 fiber grating, EDFA($Er^{3+}$-doped fiber amplifier), 펌프용 laser diode와 같은 광통신 핵심 소자의 국산화에 성공하였다. 그러나 원천 재료 개발에 대한 노력은 상대적으로 미흡하였으며, 특히 PDFA($Pr^{3+}$-doped fiber amplifier)와 같은 새로운 소재의 연구 개발은 원천 기술의 조기 확보 측면에서 대단히 중요한 과제이나, 전체 시스템 연구에 비해 미약하였다.

광섬유 증폭기(fiber optic amplifier)는 장거리 전송으로 약화된 광 신호를 증폭하는 장치로, 광-전-광 (optic-electro-optic) 전환을 거치지 않는 all optical circuits transmission system을 구성하는 중요한 소자이다. 즉 반도체 소자를 이용한 과거의 증폭 장치와 달리, 레이저의 유도 방출 (stimulated emission) 원리에 의해 광 신호를 광섬유 내에서 직접 증폭하여, 광학 계열만으로 구성된 초고속 전송을 가능하케 한다. 이러한 광섬유 증폭기는 희토류 (rare-earth) 이온을 함유한 광섬유를 사용하여 제조하며, 대표적으로 $Er^{3+}$ 이온을 함유한 EDFA ($Er^{3+}$-doped fiber amplifier)는 1.55 $\mu$m 파장 대역, $Pr^{3+}$ 이온을 함유한 PDFA ($Pr^{3+}$-doped fiber amplifier)는 1.3 $\mu$m 파장 대역에서 사용이 가능하다.

한편 1990년대 광전송 속도의 폭발적 증대는 1) 광대역 (wide band) 저손실 (low-loss) 광섬유 증폭기인 EDFA의 보급, 2) 파장 분할 다중화 (WDM; wavelength division multiplex) 전송을 통한 다중 채널의 동시 전송, 3) 광 분산에 의한 신호 왜곡과 비선형 효과를 조절하는 기술에 기인한다[1]. 이상의 기술을 채용한 전 광속 전송 (all optical circuits transmission) 시스템의 전송 용량은 1994년에 10 Gbps ($10^9$ bit/sec)에서 1998년에는 1~2 Tbps ($10^{12}$ bit/sec)[2,3]로 증가하기에 이르렀다. 이러한 전 광속 전송 시스템은 $SiO_2$ 유리 광섬유의 최저 손실이 발생하는 1.55 $\mu$m 파장 대역을 사용하며 주로 대륙간 장거리 통신에 사용되고 있다. 그러나 1.55 $\mu$m 파장 대역에서는 광분산에 의한 신호 왜곡이 발생하며, 이러한 분산이 최소화되는 파장은 1.3 $\mu$m 영역으로 현재 전세계적으로 가장 많이 설치되어 있는 광섬유는 1.3 $\mu$m 영역을 기준으로 제조된 것이다. 그러나, 이 파장 영역에서는 1.55 $\mu$m 파장 대역의 EDFA에 필적할 만한 광섬유 증폭 재료가 상용화되어 있지 않아 집중적인 연구 개발이 필요한 분야이다.

$Ce^{3+}$에서 $Yb^{3+}$에 이르는 희토류 이온들은 유리 내에서 각각 특정한 에너지 준위를 가지고 있다. Fig. 1은 대표적으로 1.55 $\mu$m 형광을 방출하는 $Er^{3+}$과 1.3 $\mu$m 형광을 방출하는 $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 이온의 에너지 준위를 나타낸 것이다. 각각의 이온들이 여기

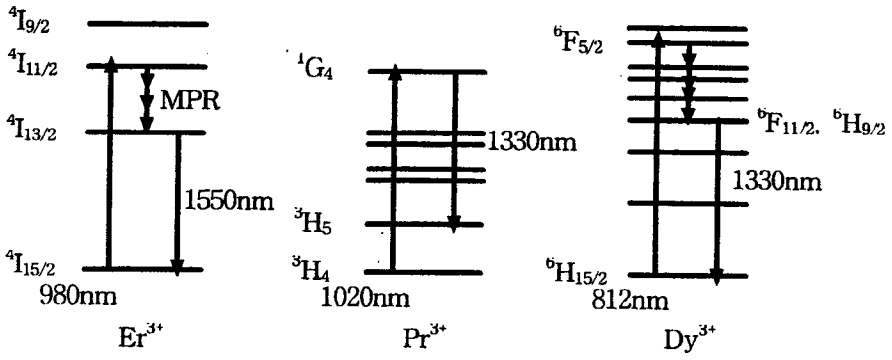


Fig. 1. $Er^{3+}$, $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 이온의 에너지 준위와 pump 광원 및 형광 파장.

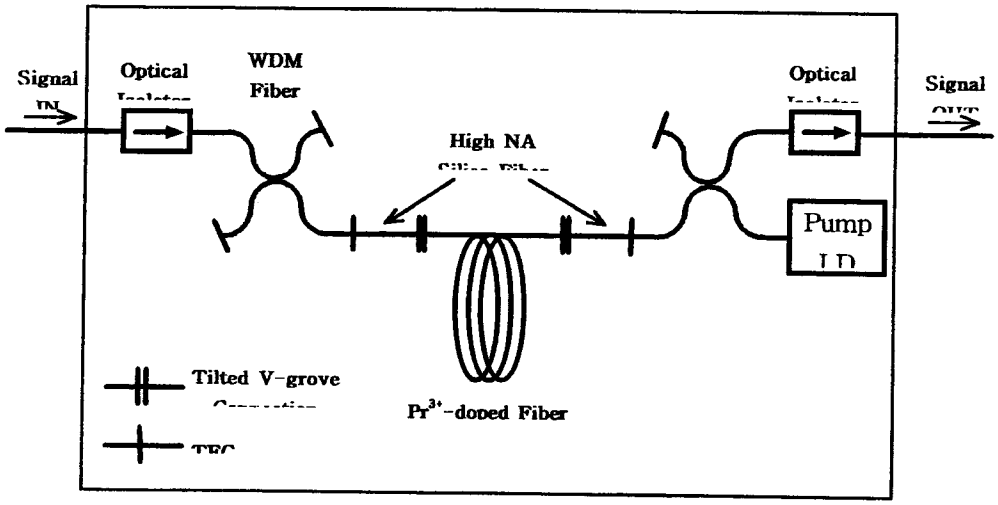


Fig. 2. Laser Diode를 이용한 PDFA($Pr^{3+}$-doped fiber amplifier) module 구성도.

광원의 에너지를 흡수하여 상위 준위로 여기되면, 이온은 하위 준위로 형광을 방출하면서 에너지를 잃고 기저 준위로 돌아가게 된다. Fig. 2는 광섬유 증폭기의 개념을 나타낸 것으로, 희토류 이온이 함유된 광섬유의 한쪽 끝으로 여기광을 입사하면 광섬유 내에 희토류 이온이 이를 흡수하여 상위 준위로 여기된다. 동시에 한쪽 끝으로 입사된 신호 광이 이 광섬유를 통과하면서, 희토류 이온은 형광을 유도 방출하고, 이 형광은 신호광과 합쳐져 신호 광의 강도가 증폭된다. 이러한 광섬유 증폭기 모듈을 일반 실리카 광섬유 사이에 접속하여 장거리 전송으로 약화된 신호 광을 증폭하는 것이다. 광 이득은 상위 준위에 존재하는 이온 밀도에 비례하므로, 상위 준위의 이온 밀도가 증가할수록 광섬유 증폭기는 높은 광 증폭 효율을 나타낸다. 그러므로, 효율적인 광증폭을 위해서는 상위 준위의 이온 밀도 최대화가 중요하다.

상위 준위의 이온 밀도는 격자 진동 완화 (MPR, multiphonon relaxation)에 의해 가장 크게 영향을 받는다[4]. 격자 진동 완화란, 여기된 이온의 에너지가 기지 재료 내 격자 진동의 영향에 의해 빛이 아닌 열 에너지 형태로 방출되는 비복사 천이 (non-radiative transition) 현상의 하나이다. 격자 진동 완화 확률($W_{MPR}$)은 상위 준위와 바로 아래 준위의 에너지 차이($\Delta E$)가 적을수록 다음 식(1)과 같이 지수적으로 증가하며, 기지 재료의 격자 진동 에너지($\hbar\omega$)가 낮을수록 지수적으로 감소한다[4].

$$W_{MPR} = W_0 \exp\left\{-\frac{\Delta E}{\hbar\omega}\left(\ln\frac{\Delta E}{\hbar\omega}\frac{1}{g(n+1)}-1\right)\right\} \quad (1)$$

여기에서 g, n은 각각 전자-격자 결합 상수, Bose-Einstein 분포 함수이다.

$Er^{3+}$의 경우 1.55$\mu$m 형광의 상위 준위는 바로 하부 준위와의 에너지 차이($\Delta E$)가 7000$cm^{-1}$ 이상으로 두 에너지 준위간의 격자 진동 완화 확률은 무시할 수 있을 정도로 매우 낮다. 그러나 $Pr^{3+}$와 $Dy^{3+}$의 경우는 $\Delta E$가 각각 3000$cm^{-1}$, 1900$cm^{-1}$으로 $Er^{3+}$에 비해 매우 적어 화위 주위로의 격자 진동 완화 현상이 활발하게 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 식(1)에서 예상할 수 있는 바와 같이 격자 진동 에너지($\hbar\omega$)가 낮은 기지 재료를 사용하여야 하며, 이 경우 실리카 유리는 사용이 불가능하며, 실제로 $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 등을 실리카 유리 기지에 첨가했을 경우 1.3$\mu$m 형광은 발견되지 않았다.

Table I 은 여러 가지 기지 유리에서의 격자 진동 에너지와 $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$의 여기 준

위에서의 격자 진동 완화 확률을 비교한 것으로, 격자 진동 에너지가 큰 실리카 유리에서는 $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 내 격자 진동 완화 확률이 대단히 높음을 알 수 있다. 그 결과 여기 상태 이온 밀도가 급속히 감소하게 되며, 이로 인해 여기 상태 형광 수명(fluorescence lifetime)이 감소한다. 한편 비복사 천이 확률($W_{NR}$)을 포함한 총 천이 확률($W_t$)에 대한 복사 천이 확률($W_R$)의 비율을 복사 양자 효율($\eta$, radiative quantum efficiency)이라 하며, 식 (2)와 같이 복사 형광 수명의 계산 값($\tau_R$)에 대한 측정 형광 수명($\tau_m$)의 비율로써 나타낸다[5].

$$\eta = \frac{W_t}{W_R} = \frac{W_R + W_{NR}}{W_R} = \frac{\tau_m}{\tau_R} \tag{2}$$

이로부터 격자 진동 에너지가 높은 실리카 등 일반 산화물 유리에서는 $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 이온 내 격자 진동 완화 확률이 너무 높아, 복사 양자 효율이 매우 낮게 되어 광증폭을 위해 필요한 여기 상태 이온 밀도를 얻을 수 없다. 따라서 $Pr^{3+}$ 또는 $Dy^{3+}$을 함유한 1.3 $\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭 재료를 개발하기 위해서는 격자 진동 에너지가 낮은 fluoride, sulfide, chalcohalide 등 신조성 유리 (new glass)를 사용하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 1.3 $\mu$m 파장 대역 광 증폭을 위한 대표적인 신조성 유리와 그 연구 개발 과정 및 향후의 전망을 기술하였다.

Table I. 유리 재료의 격자 진동 에너지와 격자 진동 완화 확률 [5].

| Glass System | Phonon Energy ($cm^{-1}$) | Multiphonon Relaxation Rate ($s^{-1}$) | |
|---|---|---|---|
| | | $Pr^{3+}$ ($^1G_4$) | $Dy^{3+}$ ($^6F_{11/2}$, $^6H_{9/2}$) |
| Silicates | 1200 | ~$10^6$ | >$10^8$ |
| Phosphate | 1500 | ~$10^7$ | >$10^8$ |
| Germanate | 1000 | ~$10^5$ | >$10^8$ |
| PbO-$Bi_2O_3$-$Ga_2O_3$ | 500 | 4000 | ~$10^6$ |
| Fluoride (ZBLAN) | 500 | 3000 | ~$10^6$ |
| Sulfide (GeGaS) | 350 | 800 | $10^4$ |
| GeGaS/CsBr | 300 | 0 | 0 |

## II. 신조성 유리를 통한 광섬유 증폭 재료 개발 현황

### 1) $Pr^{3+}$ 함유 중금속 산화물 (Heavy Metal Oxide) 유리

격자 진동 에너지가 낮은 유리에 관한 연구는 1960년대 이후 적외선 투과 유리 개발을 목적으로 시작되었다[6]. 중금속 산화물 유리 역시 적외선 투과도가 높은 유리의 개발을 위해 연구가 시작된 후[7], 최근에는 희토류 첨가를 통해 레이저 재료의 개발 연구가 진행되었다[8]. 대표적인 조성으로는 $PbO-Bi_2O_3-Ga_2O_3$[7] 계를 들 수 있으며, 산화물 유리 중 격자 진동 에너지가 $500cm^{-1}$으로 가장 낮아 산화물 유리로는 유일하게 $Pr^{3+}$의 1.3$\mu$m 파장의 형광 방출(fig. 3)이 발견되었다[8]. 한편 $Pr^{3+}$내 1.3$\mu$m 파장의 광 증폭 효율 계수(figure of merit)는 유도 방출 단면적(emission cross-section)과 형광 수명의 곱($\sigma_e \tau_m$)으로 나타낼 수 있는데[9], $PbO-Bi_2O_3-Ga_2O_3$ 유리의 경우 $3.2\times10^{-25}cm^2s$으로 fluoride계 유리와 근사하여, 산화물 유리를 이용한 1.3$\mu$m 파장 대역 광 증폭의 가능성을 제시하였다[8]. 그러나 중금속 산화물 유리는 OH기 오염에 취약하고, 광섬유 제조 시 결정화가 발생하는 문제점이 있어 이의 개선이 요구되고 있다. OH기 제거를 위해서는 환원 분위기 하에 광섬유를 제조하는 방법 개발이 필요하며 결정화 현상의 억제를 위해서는 소량의 $SiO_2$, $GeO_2$ 등의 첨가에 대한 연구가 진행되었다[7].

### 2) $Pr^{3+}$ 함유 fluoride 유리

$Pr^{3+}$ 함유 fluoride 유리는 가장 많은 연구가 진행되어 있으며, 대표적으로 $ZrF_4$를 기본으로 한 ZBLAN($ZrF_4-BaF_2-LaF_3-AlF_3-NaF$), ZBLYALiPb($ZrF_4-BaF_2-LaF_3-YF_3-AlF_3-LiF-PbF_2$), ZBLYALiN($ZrF_4-HfF_4-BaF_2-LaF_3-YF_3-AF_3-LiF-NaF$) 유리와 $InF_3$을 기본으로 한 IZBSC($InF_3-ZnF_2-BaF_2-SrF_2-CdF_2$), IBSPZ($InF_3-BaF_2-SrF_2-PbF_2-ZnF_2$) 유리가 있다[10]. 이러한 복잡한 조성은 $500\sim700cm^{-1}$의 낮은 격자 진동 에너지를 유지하면서도 화학적 내구성을 높이기 위한 결과이다. 한편 ZBLAN 유리에서의 $Pr^{3+}$의 복사 양자 효율은 약 8%로 낮은 편이나, 투과 손실이 0.01dB/m 정도로 매우 낮은 광섬유 제조가 이미 가능하여 가장 먼저 광섬유 증폭기로 사용되었다. 1997년 일본의 NTT는 $Pr^{3+}$

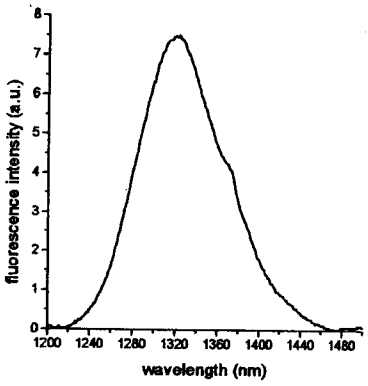


Fig. 3. $Pr^{3+}$ 함유 $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}Ga_2O_3$ 유리의 1.3 $\mu$m 파장 대 형광 스펙트럼[8].

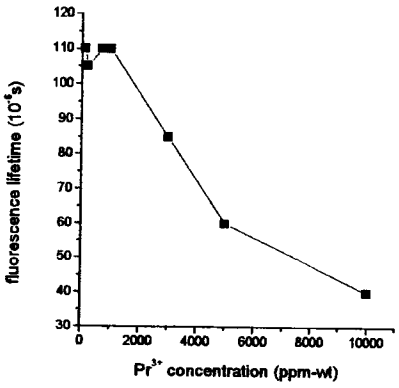


Fig. 4. ZBLAN 유리내 $Pr^{3+}$ 농도 증가에 따른 1.3 $\mu$m 파장 형광 수명[10].

함유 ZBLAN 광섬유를 이용하여, 0.24dB/mW의 internal gain coefficient와 30dB의 이득 특성을 가지는 상용 PDFA 모듈을 시험하였다[11]. -3dB signal compression에 -10dBm의 signal input power를 이용한 경우, 상기 PDFA 모듈의 1.3$\mu$m 파장 대역의 폭은 약 35nm로 EDFA에 필적하는 좋은 결과를 나타내었다.

Fluoride계 유리는 1.5~1.7의 굴절률을 나타내어 실리카 광섬유와의 접속이 용이하며, 투과 손실이 낮은 장점이 있는 반면, internal gain coefficient가 낮아 약 500mW의 pump power가 필요하여 고출력 레이저 다이오드가 사용되어야만 하는 문제점이 있다. 이의 극복을 위해, $Pr^{3+}$ 농도를 증가시키거나, $Pr^{3+}$와 $Yb^{3+}$을 복합 첨가한 광섬유에 관한 연구가 수행되었다[11,12]. 그러나, Fig. 4와 같이 $Pr^{3+}$ 농도가 증가함에 따라 교차 완화 (cross relaxation) 현상으로 인해 형광 수명 감소하며, 이 때문에 광증폭 효율이 급속히 감소하였다[11]. 한편 $Yb^{3+}$ 복합 첨가의 경우, fig. 5와 같이 $Yb^{3+}$ 농도 증가에 따라 $Yb^{3+}$로부터 $Pr^{3+}$으로의 에너지 전달이 일어나, $Pr^{3+}$의 형광 수명 증가가 관찰되었으나, internal gain coefficient는 0.016dB/mW로 오히려 감소하였다[12]. 이는 전달된 에너지가 $Pr^{3+}$의 여기 상태 흡수 (ESA, excited state absorption)를 유발시켜 광증폭 효율을 감소시켰기 때문으로 생각된다. 따라서 PDFA의 internal gain coefficient를 향상시키기 위해서는 근본적으로 격자 진동 완화에 의한 손실을 감소시킬 필요가 있으며, 이를 위해 fluoride계 유리보다 낮은 격자 진동 에너지를 가진 유리가 PDFA의 기지로 사용되는 것이 바람직하다.

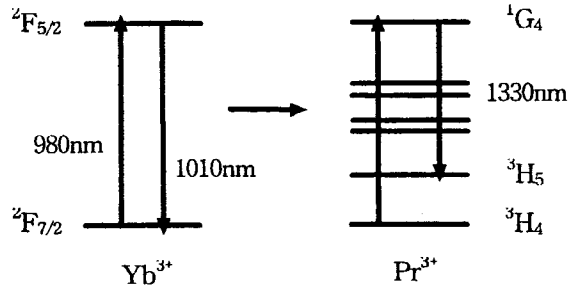


Fig. 5. 복합 첨가된 $Yb^{3+}$에서 $Pr^{3+}$으로의 에너지 전달 현상.

3) $Pr^{3+}$ 함유 sulfide 유리

Sulfide계 유리는 격자 진동 에너지가 ~350$cm^{-1}$으로 매우 낮아 fluoride계 유리 보다 높은 광증폭 효율을 얻을 것으로 기대된다. Sulfide계 유리에서 $Pr^{3+}$의 복사 양자 효율은 60~70%로 fluoride계 유리보다 높은 장점이 있으나, 희토류 용해도가 낮다. 따라서 초기에는 희토류 용해도가 높은 Ga-La-S[13], Ge-Ga-S[14] 조성이 연구되었으나, 광섬유 제조 시 결정화가 발생하여, 최근에는 결정화에 대한 안정성이 높은 As-Ga-S[15], Ga-Na-S[16], Ge-As-Ga-S[17] 조성이 활발히 연구되고 있다. Fig. 6은 Ge-Ga-S 유리와 Ge-As-Ga-S 유리의 결정화 특성을 비교한 것으로, Ge-As-Ga-S 유리의 결정화 peak의 폭이 Ge-Ga-S 유리보다 넓고 결정화 속도가 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 Ge-As-Ga-S 유리가 광섬유 제조에 보다 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Ge-Ga-S 유리에서 $Pr^{3+}$의 1.3$\mu$m 파장대 광증폭 효율 계수를 나타낸 것으로, 1330nm 파장에서 최대 $33.7\times10^{-25}cm^2s$을 나타내어 ZBLAN 유리의 $3.83\times10^{-25}cm^2s$에 비해 약 8.8배의 높은 효율을 나타내었다[18]. 따라서 sulfide계 광섬유를 이용한 PDFA는 매우 높은 1.3$\mu$m 파장 대역 광증폭 효율을 얻을 것으로 기대된다. 최근 일본의 Hoya Glass는 투과 손실이 0.1dB/m인 $Pr^{3+}$ 함유 Ga-Na-S 광섬유를 이용해, 약 0.81dB/mW의 internal gain coefficient를 얻었으며, 200mW의 pump power에서 38dB의 이득을 실현하였다[16].

한편 기존의 sulfide계 광섬유는 용융체로부터 직접 광섬유를 제조하는 crucible drawing법이 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 crucible drawing법으로 preform을 제조한 후, 이 preform을 redrawing하는 방법으로 투과 손실을 최소화하는 공정이 보고되었다[19]. 또한 환원 분위기에서 초고순도의 원료 합성 및 정제에 관한 연구도 수행되고 있다[20].

4) $Dy^{3+}$ 함유 chalcohalide 유리

$Dy^{3+}$은 1.3$\mu$m 파장에서 유도 방출 단면적이 $Pr^{3+}$의 3배 이상을 나타내나, 여기 준위간의 에너지 간격이 약 1900$cm^{-1}$으로 작아 격자 진동 완화 확률이 매우 높은 단점이 있다[21]. 따라서 복사 양자 효율은 10% 미만이며, 3레벨 유형의 레이저를

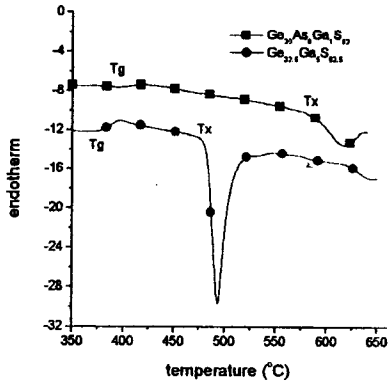


Fig. 6. $Ge_{32.5}Ga_5S_{62.5}$ 유리와 $Ge_{30}As_8Ga_1S_{62}$ 유리의 결정화 특성. 승온 속도 10℃/min.

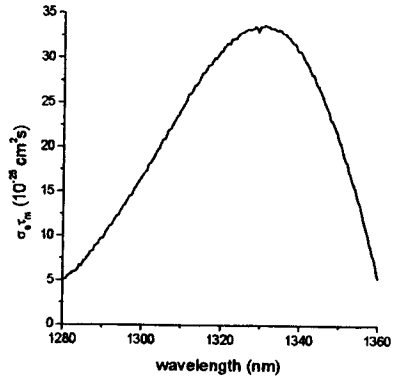


Fig. 7. $Pr^{3+}$ 함유 $Ge_{32.5}Ga_5S_{62.5}$ 유리의 1.3 $\mu$m 파장 대역 광 증폭 효율 계수[18].

구성하므로 ground state absorption이 크게 발생한다. 따라서 $Dy^{3+}$을 이용한 1.3$\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기에 대한 연구는 미약한 상태이다. 그러나, 최근 Ge-Ga-S 유리에 CsBr을 첨가한 chalcohalide 유리에서 격자 진동 완화 확률의 급격한 감소가 관찰되었다[22]. Fig. 8은 Ge-Ga-S 유리와 Ge-Ga-S/CsBr 유리에 첨가된 $Dy^{3+}$의 형광을 나타낸 것으로, CsBr의 첨가로1.3$\mu$m 형광 강도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 형광 수명도 1.58ms로 CsBr이 첨가되기 전의 0.035ms에 비해 50배 정도 증가하였다. 그 결과 $Dy^{3+}$의 복사 양자 효율이 약 100%로 나타나, $Pr^{3+}$을 능가하는 1.3$\mu$m 파장 대역 광증폭 재료로써 매우 우수한 특성을 가진 것으로 판단된다. 또한 $Dy^{3+}$ 함유 chalcohalide 유리는 기존의 halide 유리에 비해 상대적으로 높은 화학적 내구성을 가지고 있으며, 열적 특성이 sulfide 유리에 비해 우수하므로 향후 광섬유화에 대한 연구가 완료되면 새로운 1.3$\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기 재료로 사용될 가능성이 매우 높다.

5) 향후 전망

Table II는 이상의 신조성 유리에 첨가된 $Pr^{3+}$ 및 $Dy^{3+}$의 1.3$\mu$m 파장 대 복사 양자 효율을 비교한 것이다. 전체적으로 fluoride계 광섬유보다 sulfide 및 chalcohalide계 광섬유에서 광증폭 특성이 우수하므로 향후 1.3$\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기의 좋운 재료가 될 것으로 기대된다. 그러나 sulfide 및 chalcohalide계 광섬유가 실용화되기 위해서는 다음과 같은 문제점들이 극복되어야 한다. 첫째, sulfide 및 chalcohalide 유리는 굴절률이 2.0 이상으로 실리카 유리와의 접속이 어려우며 열특성이 현저히 상이하여 splicing 등에 대한 새로운 기술 개발이 요구된다. 둘째, 광섬유 제조에 있어서 결정화 문제를 해소하기 위해 최적 기지 조성의 개발 및 광섬유 제조 기술의 혁신이 필요하다. 셋째, fluoride계 광섬유에 비해 투과 손실이 높으며 이의 원인이 되는 oxide 및 metalic impurity의 제거 공정의 개발이 요구된다. 마지막으로 chalcohalide계 광섬유의 경우, 수분에 의한 화학적 열화 현상이 예상되므로, 적절한 보호 coating 재료의 개발이 필요하다.

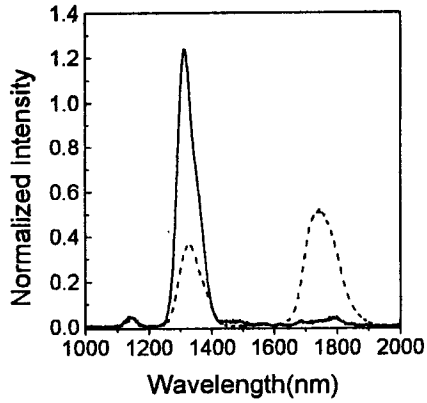


Fig. 8. $Ge_{25}Ga_{10}S_{65}$ 유리(점선)와 $90Ge_{25}Ga_{10}S_{65}/10CsBr$ 유리(실선)에 첨가된 $Dy^{3+}$의 1.3 $\mu$m 파장대 형광 스펙트럼[22].

Table II. 신조성 유리에 첨가된 $Pr^{3+}$ 및 $Dy^{3+}$의 1.3 $\mu$m 파장의 복사 양자 효율[5,22].

| New Glass System | Radiative Quantum Efficiency (%) | |
|---|---|---|
| | $Pr^{3+}$ ($^1G_4$) | $Dy^{3+}$ ($^6F_{11/2}$, $^6H_{9/2}$) |
| $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}Ga_2O_3$ | 7 | < 1 |
| ZBLAN | 8 | < 1 |
| $Ge_{25}Ga_{10}S_{65}$ | 66 | 17 |
| $90Ge_{25}Ga_{10}S_{65}/10CsBr$ | 100 | 100 |

## III. 결론

이상에서 1.3$\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기를 위한 신조성 유리의 개발 현황과 전망에 관해 기술하였다. Fluoride계 광섬유는 처음으로 상용 PDFA 모듈 개발에 성공하였으며, 현재 sulfide계 및 chalcohalide계 광섬유에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 잠재적으로 sulfide계 및 chalcohalide계 광섬유를 이용한 1.3$\mu$m 파장 대역 광섬유 증폭기는 1.55$\mu$m 파장 대역과 경쟁할 수 있는 파장 분할 다중화 (WDM) 전송 대역폭을 가질 것으로 기대된다. 또한 $Dy^{3+}$ 함유 chalcohalide 유리 역시 높은 고 효율의 1.3$\mu$m 파장 대역 광증폭 소재로 사용될 것으로 기대된다. 이의 실용화를 위해 광섬유 제조 기술, 원료의 정제 및 시스템 구성에 기술이 확보되어야 한다.

## IV. 참고 문헌


[1] A. E. Willner, IEEE J. Quant. Elect. **34**(11), 2053 (1998).

[2] A.K. Srivastava, Y. Sun, J.W. Sulhoff, C. Wolf, M. Zirngibl, R. Monnard, A.R. Chraplyvy, A.A. Abramov, R.P. Espindola, T.A. Strasser, J.R. Pedrazzani, A.M. Vengsarkar, J.L. Zyskind, J. Zhou, D.A. Ferrand, P.F. Wysocki, J.B. Judkins, S.W. Granlund, Y.P. Li, PD10 - 1 Tb/s Transmission of 100 WDM 10 Gb/s Channels Over 400 km of TrueWave Fiber, OFC'98, USA (1998).

[3] C.D. Chen, I. Kim, O. Mizuhara, T.V. Nguyen, K. Ogawa, R.E. Tench, L.D. Tzeng, P.D. Yeates, PD21 - 1.2 Tb/s WDM Transmission Experiment over 85 km Fiber using 40 Gb/s Line Rate Transmitter and 3R Receiver, OFC'98, USA (1998).

[4] T. Miyakawa and D.L. Dexter, Phys. Rev. **B1**, 2961 (1970).

[5] R. Reisfeld, Structure and Bondings, ed. J.D. Dunitz, Springer-Verlag, Berlin (1975).

[6] P.W. France, Fluoride Glass Optical Fibres, ed. P.W. France, Blackie, Glasgow (1990).

[7] W.H. Dumbaugh and J.C. Lapp, J. Am. Ceram. Soc. **75**(9), 2315 (1992).

[8] Y.G. Choi and J. Heo, J. Non-Cryst. Solids **217**, 199 (1997).

[9] M.J.F. Digonnet, IEEE J. Quant. Elect. **26**(40), 1788 (1990).

[10] Y. Ohishi, T. Kanamori, M. Shimizu, M. Yamada, Y. Terunuma, J. Temmyo, M. Wada and S. Sudo, IEICE Trans. Commun. **E77-B**(4), 421 (1994)

[11] M. Yamada, T. Kanamori, Y. Shishi, M. Shimizu, Y. Terunuma, S. Sato and S. Sudo, IEEE Photon. Tech. Lett. **9**(3), 321 (1997).

[12] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Nishi, S. Takahashi and E. Snitzer, IEEE Photon. Tech. Lett. **3**, 990 (1991).

[13] J.A. Medeiros Neto, E.R. Taylor, B.N. Samson, J. Wang, D.W. Hewak, R.I. Laming, D.N. Payne, E. Tarbox, P.D. Maton, G.M. Roba, B.E. Kinsman and R. Hanney, J. Non-Cryst. Solids **184**, 292 (1995).

[14] K. Wei, D.P. Machewirth, J. Wenzel, E. Snitzer and G.H. Sigel Jr., J. Non-Cryst. Solids **182**, 257 (1995).

[15] Y. Ohishi, A. Mori, T. Kanamori, K. Fujiura and S. Sudo, Appl. Phys. Lett. **65**(1),

13 (1994).

[16] H. Tawarayama, E. Ishikawa, K. Itoh, H. Aoki, H. Yanagita, K. Okada, K. Yamanak, Y. Matsuoka and H. Toratani, PD1 - Efficient Amplification at 1.3 $\mu$m in a $Pr^{3+}$-doped Ga-Na-S Fiber, OFC`97 (1997).

[17] Se Ho Park, Jong Heo, unpublished data.

[18] S. H. Park, Y. B. Shin, Y. S. Kim, J. Heo, H. S. Kim and D. W. Shin, "1.3 $\mu$m Emission and Energy Transfer Phenomena in Ge-Ga-S Glasses Doped with $Pr^{3+}$," Proc. of Int`l Cong. on Glasses, San Francisco, July 4-9th, 1998.

[19] J. Kobelke, J. Kirchhof, M. Scheffler and A. Schwuchow, EP14 - Chalcogenide Glass Single Mode Fibres - Preparation and Properties, Proc. of 11th Int`l Symp. on Non-Oxide & New Optical Glasses, Sheffield, UK, Sept. 6-10th, 1998.

[20] X. Liu, B.B Kale, V.K. Tikhomirov and A. Jha, GP12 - Reduction of OH-Related Photolumescence Quenching in Pr-doped $GeS_2$-Based Glasses by Means of Purification, Proc. of 11th Int`l Symp. on Non-Oxide & New Optical Glasses, Sheffield, UK, Sept. 6-10th, 1998.

[21] J. Heo and Y. B. Shin, J. Non-Cryst. Solids **196**, 162 (1996).

[22] J. Heo, Y.B. Shin and H.S. Kim, "$Dy^{3+}$-Doped Ge-Ga-S-KBr(or CsBr) Glasses for the 1.3 $\mu$m Fiber Amplifier Materials," OFC/IOOC`99, San Diego, USA, Feb. 21-26th, 1999.

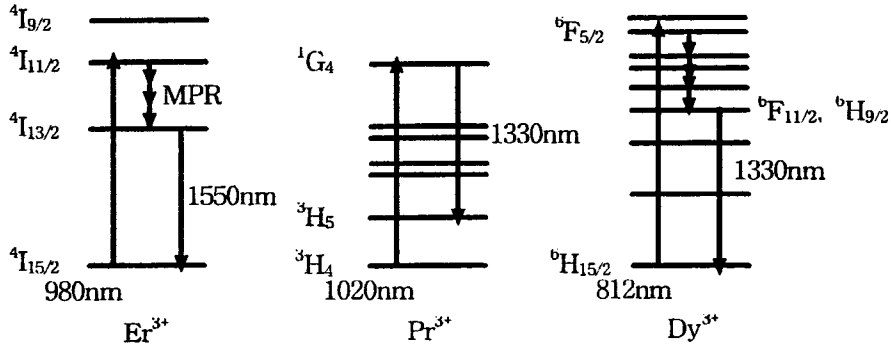


**Fig. 1. $Er^{3+}$, $Pr^{3+}$, $Dy^{3+}$ 이온의 에너지 준위와 pump 광원 및 형광 파장.**

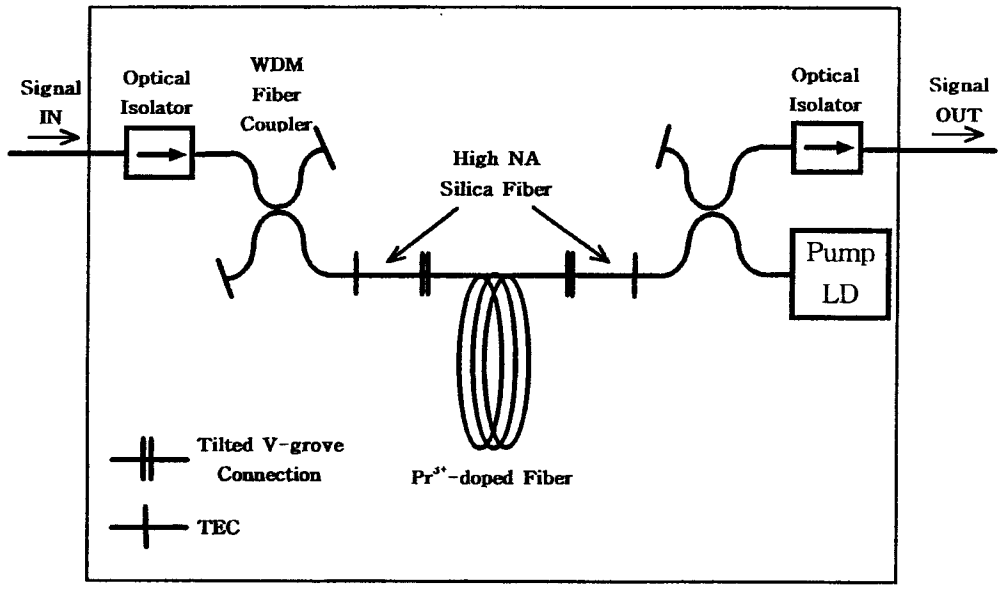


Fig. 2. Laser Diode를 이용한 PDFA($Pr^{3+}$-doped fiber amplifier) module 구성도.

Table I. 유리 재료의 격자 진동 에너지(phonon energy)와 격자 진동 완화 확률 (multiphonon relaxation rate) [5].

| Glass System | Phonon Energy ($cm^{-1}$) | Multiphonon Relaxation Rate ($s^{-1}$) | |
|---|---|---|---|
| | | $Pr^{3+}$ ($^1G_4$) | $Dy^{3+}$ ($^6F_{11/2}$, $^6H_{9/2}$) |
| Silicates | 1200 | $\sim 10^6$ | $>10^8$ |
| Phosphate | 1500 | $\sim 10^7$ | $>10^8$ |
| Germanate | 1000 | $\sim 10^5$ | $>10^8$ |
| $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}Ga_2O_3$ | 500 | 4000 | $\sim 10^6$ |
| Fluoride (ZBLAN) | 500 | 3000 | $\sim 10^6$ |
| Sulfide (GeGaS) | 350 | 800 | $10^4$ |
| GeGaS/CsBr | 300 | 0 | 0 |

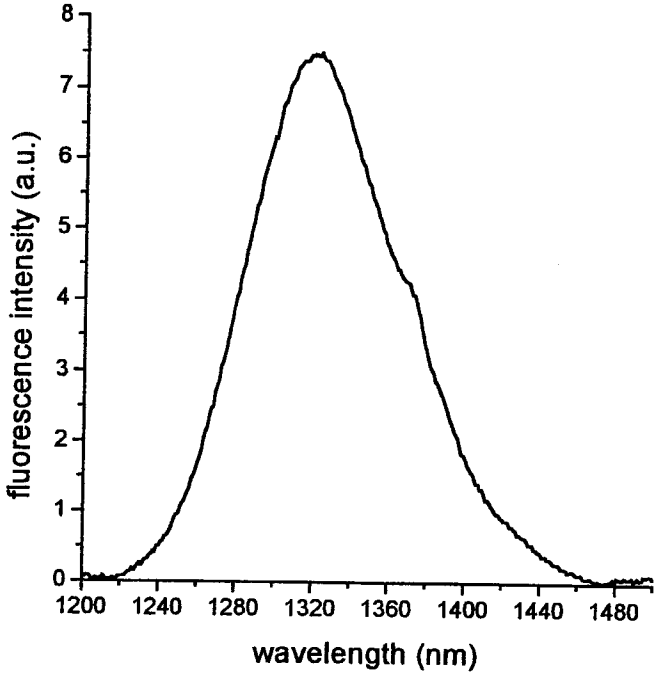


Fig. 3. $Pr^{3+}$ 함유 $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}Ga_2O_3$ 유리의 1.3 $\mu$m 파장 대 형광 스펙트럼[8].

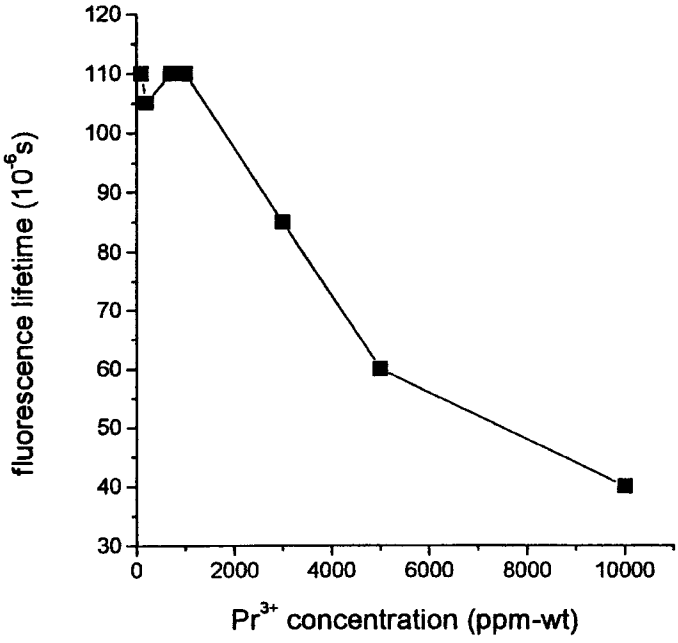


Fig. 4. ZBLAN 유리내 $Pr^{3+}$ 농도 증가에 따른 1.3 $\mu$m 파장 형광 수명[10].

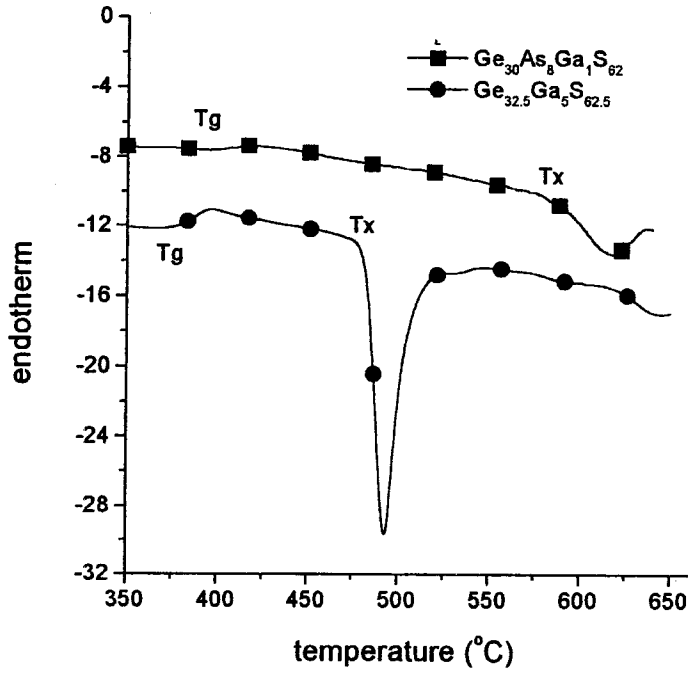


Fig. 6. $Ge_{32.5}Ga_5S_{62.5}$ 유리와 $Ge_{30}As_8Ga_1S_{62}$ 유리의 결정화 특성. 승온 속도 10℃/min.

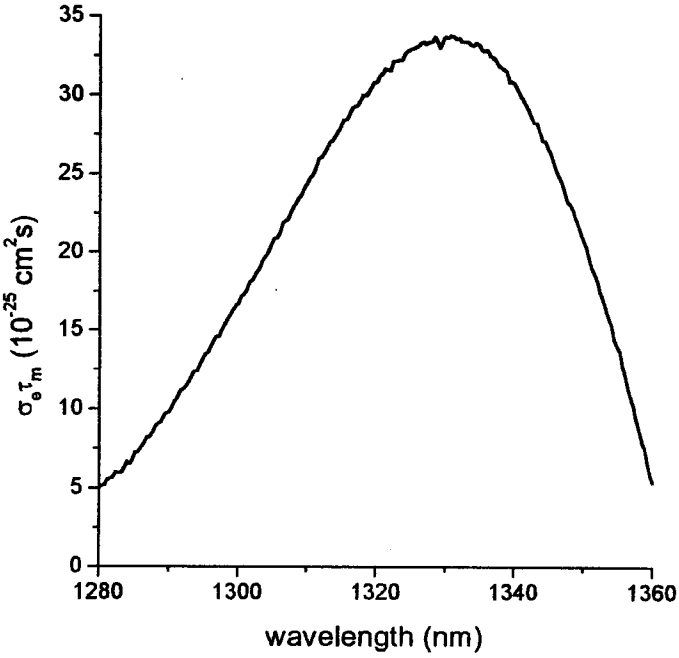


Fig. 7. $Pr^{3+}$ 함유 $Ge_{32.5}Ga_5S_{62.5}$ 유리의 1.3 $\mu$m 파장 대역 광 증폭 효율 계수 [18].

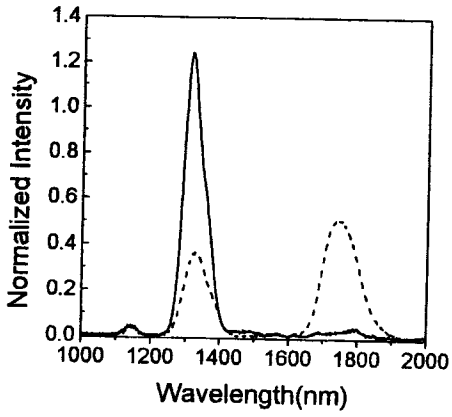


Fig. 8. $Ge_{25}Ga_{10}S_{65}$ 유리(점선)와 $90Ge_{25}Ga_{10}S_{65}/10CsBr$ 유리(실선)에 첨가된 $Dy^{3+}$의 1.3 $\mu$m 파장대 형광 스펙트럼[22].

Table II. 신조성 유리에 첨가된 $Pr^{3+}$ 및 $Dy^{3+}$의 1.3 $\mu$m 파장의 복사 양자 효율 [5,22].

| New Glass System | Radiative Quantum Efficiency (%) | |
|---|---|---|
| | $Pr^{3+}$ ($^1G_4$) | $Dy^{3+}$ ($^6F_{11/2}$, $^6H_{9/2}$) |
| $PbO\text{-}Bi_2O_3\text{-}Ga_2O_3$ | 7 | < 1 |
| ZBLAN | 8 | < 1 |
| $Ge_{25}Ga_{10}S_{65}$ | 66 | 17 |
| $90Ge_{25}Ga_{10}S_{65}/10CsBr$ | 100 | 100 |