

## Ho<sup>3+</sup> 첨가 비정질 유전체 : 1.6 μm 형광의 방출 및 여기 스펙트럼

최 용 규<sup>†</sup>

한국항공대학교 항공재료공학과  
(2004년 6월 18일 접수; 2004년 7월 2일 승인)

## Ho<sup>3+</sup>-Doped Amorphous Dielectrics : Emission and Excitation Spectra of the 1.6 μm Fluorescence

Yong Gyu Choi<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Hankuk Aviation University, Gyeonggi 412-791, Korea  
(Received June 18, 2004; Accepted July 2, 2004)

### 초 록

플로라이드, 설파이드 및 셀레나이드 유리에 각각 첨가된 홀뮴 이온의 <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>7</sub> 전자천이에 기인하는 1.6 μm 형광의 여기 스펙트럼을 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 준위가 위치하는 ~900 nm 대역에서 측정하였다. <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위로의 상향전이가 발생하는 특정 파장대역에서 1.6 μm 발광의 여기효율이 감소하는 현상이 플로라이드 및 설파이드 유리에서 관찰되었으나 셀레나이드 유리에서는 <sup>5</sup>I<sub>8</sub>→<sup>5</sup>I<sub>5</sub> 흡수 스펙트럼과 여기 스펙트럼의 모양이 유사하였으며, 이러한 현상은 각 비정질 유전체 재료의 광학적 비선형성과 단파장쪽 투과단의 차이에 기인한다. 한편, Tb<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup> 또는 Nd<sup>3+</sup> 이온을 공동 첨가함으로써 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위의 형광수명을 효과적으로 감소시킬 수 있으나 Eu<sup>3+</sup> 이온을 제외한 나머지 공동 첨가제는 기저상태 흡수를 통하여 1.6 μm 대역에서의 흡수 손실을 크게 한다. 따라서 형광수명 감소 효과가 Tb<sup>3+</sup> 이온보다 크지는 않지만 추가적인 흡수 손실이 없는 Eu<sup>3+</sup> 이온이 공동 첨가제로 더 적합하다.

### ABSTRACT

Excitation spectra of the 1.6 μm emission originating from Ho<sup>3+</sup>: <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>7</sub> transition in fluoride, sulfide, and selenide glasses were measured at wavelengths around 900 nm where the fluorescing <sup>5</sup>I<sub>5</sub> level is located. In specific energy range where the frequency upconversion populating <sup>5</sup>F<sub>1</sub> state happens, the excitation efficiency of the 1.6 μm emission was deteriorated in fluoride and sulfide hosts. In selenide, however, spectral line shapes of the excitation spectrum and the <sup>5</sup>I<sub>8</sub>→<sup>5</sup>I<sub>5</sub> absorption spectrum looked seemingly identical to each other. Differences in optical nonlinearity as well as electronic band gap energy of the host glasses used are responsible for the experimental observations. On the other hand, codoping of rare earths such as Tb<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup>, and Nd<sup>3+</sup> was effective in decreasing the terminating <sup>5</sup>I<sub>7</sub> level lifetime. However, at the same time, some of the codopants increased unnecessary absorption at the 1.6 μm wavelengths via their ground state absorption. Though the lifetime quenching effect of Eu<sup>3+</sup> was moderate, it exhibited no additional extrinsic absorption at the 1.6 μm band.

**Key words :** Trivalent holmium, Fluoride glasses, Sulfide glasses, Selenide glasses, Lasers and amplifiers

### 1. 서 론

최근 들어 홀뮴 이온이 첨가된 비정질 무기 유전체로부터 방출되는 1.6 μm 대역의 형광을 파장분할 다중화 방식을 활용하는 광통신 시스템의 U 밴드용 광섬유 증폭기로 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1,3)</sup> Ho<sup>3+</sup>: 1.6 μm 형광은 <sup>5</sup>I<sub>5</sub>→<sup>5</sup>I<sub>7</sub> 전자천이로 인하여 발생하는데, 형광발생 준위인 <sup>5</sup>I<sub>5</sub>와 최근접 하위 준위인 <sup>5</sup>I<sub>6</sub>과의 에너지 간격이 비교적 작아서 형광수명에 대한 기지재료

의 포논 에너지의 영향이 큰 편이다. 본 형광의 전반적인 광 특성은 플로라이드 유리와 설파이드 유리를 대상으로 이미 보고된 바 있다.<sup>1,2)</sup> 본 논문에서는 기존 보고에서 언급되지 않았던 1.6 μm 형광의 여기 스펙트럼과 상향전이 현상과의 관계를 광학적 비선형성과 단파장쪽 투과단 특성이 상이한 플로라이드, 설파이드 및 셀레나이드 유리를 대상으로 측정한 결과를 중점적으로 기술하고자 한다.

비정질 유전체에서 Ho<sup>3+</sup>: 1.6 μm 형광의 광 특성은 다음과 같이 세가지로 요약될 수 있다. 첫째, 전술한 바와 같이 형광방출 준위와 최근접 하위 준위와의 에너지 간격이 ~2600 cm<sup>-1</sup>로 비교적 작기 때문에 비복사 다중포논 완화율이 크게 작용한다. 따라서 최대 포논 에너지가 1000 cm<sup>-1</sup> 이상인 일반적인 실리케이트 조성의 유리는 기지재료로

<sup>†</sup>Corresponding author : Yong Gyu Choi  
E-mail : ygchoi@hau.ac.kr  
Tel : +82-2-300-0169 Fax : +82-2-3158-3770

적합하지 않다. 플로라이드 유리와 셀파이드 유리의 대표적인 포논 에너지는 각각  $\sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 와  $\sim 350 \text{ cm}^{-1}$ 로써 다중 포논 완화현상에 의한 Ho<sup>3+</sup> : <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 준위의 형광수명 감소를 작게 할 수 있다. Ge-As-S 시스템과 같은 일부 셀파이드 유리는 열적 안정성이 뛰어나서 양호한 광 특성을 가지는 광섬유로 인선할 수 있다.<sup>4)</sup> 그러나 셀파이드 광섬유는 일반적으로 1.6 μm 파장대역에서 얻을 수 있는 이론적 투과 손실이 플로라이드 광섬유보다 크며, 광섬유 소자로 활용할 수 있는 수준으로 광섬유 제작공정이 최적화되지 않은 상태이다. 반면, 플로라이드 광섬유는 이미 제작공정이 확보되어 현재 어븀 또는 프라세오디뮴 이온 등을 첨가한 다양한 광섬유 증폭기가 상용화되어 있다. 둘째, 홀뮴 이온의 4f 궤도의 기저 준위인 <sup>5</sup>I<sub>8</sub>로부터 형광방출 준위인 <sup>5</sup>I<sub>5</sub>로의 흡수 밴드가 고출력 레이저 다이오드를 쉽게 구할 수 있는  $\sim 900 \text{ nm}$  대역에 존재한다. 그러나 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 천이에 기인하는 흡수밴드가  $\sim 450 \text{ nm}$  대역에 위치하기 때문에  $\sim 900 \text{ nm}$  대역의 여기광이 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 준위 뿐만 아니라 <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위까지 들뜨게 하는 상향전이 현상이 발생해서 1.6 μm 형광의 여기효율을 저하시킬 가능성이 있다. 본 논문에서는 이러한 상향전이 현상이 1.6 μm 형광의 여기 스펙트럼에 미치는 영향을 주로 기술하고자 한다. 셋째, 1.6 μm 형광의 하위 준위인 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>의 형광수명이 상위 준위인 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 보다 현저히 길기 때문에 레이저나 증폭기로 응용하고자 할 때 그 특성을 저하시킬 수 있다. 이러한 경우, 여타 희토류 이온을 공동 첨가함으로써 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위의 형광수명을 감소시키는 것이 비교적 쉬운 해결책이 될 수 있다. 이미 앞선 논문에서 Tb<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup> 및 Nd<sup>3+</sup> 이온을 단독으로 또는 공동으로 첨가하는 것이 하위 준위인 <sup>5</sup>I<sub>6</sub>과 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>의 형광수명을 줄이는데 효과적임을 보고하였으나<sup>1)</sup> 본 논문에서는 이러한 공동 첨가의 부수적인 효과를 구체적으로 기술하고자 한다.

## 2. 실험방법

ZBLAN 조성의 플로라이드, Ge-Ga-As-S 조성의 셀파이드 및 Ge-Ga-As-Se 조성의 셀레나이드 유리를 대상으로 공히 홀뮴을 소량 첨가한 샘플을 제작하였다. 각 조성의 샘플에 대한 제작 공정은 여타 논문에서 확인할 수 있다.<sup>1,2,5)</sup> 각 샘플을 동일한 조건으로 절단하고 연마하여 흡수 스펙트럼, 방출 스펙트럼 및 형광수명 등을 측정하였다.<sup>6,7)</sup> 형광방출 스펙트럼 및 형광수명 측정 시, radiation trapping 현상으로 인한 데이터의 왜곡을 최소화하기 위하여 각 샘플의 표면 바로 아래 부분에 여기광원의 초점을 위치시킴으로써 발생한 형광의 샘플 내 이동거리를 최소로 유지하였다.

## 3. 결과 및 고찰

홀뮴 첨가 플로라이드 샘플에  $\sim 900 \text{ nm}$  대역의 파장을

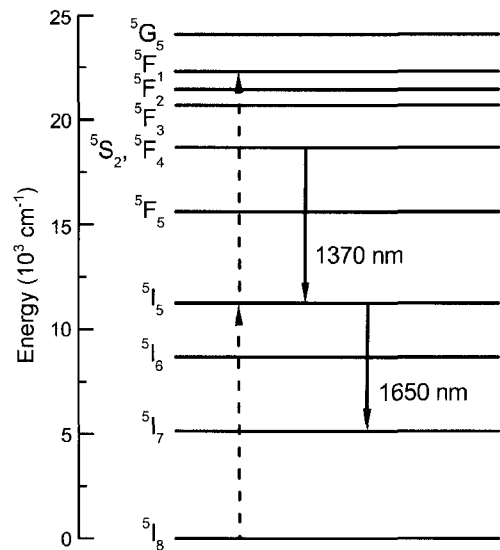
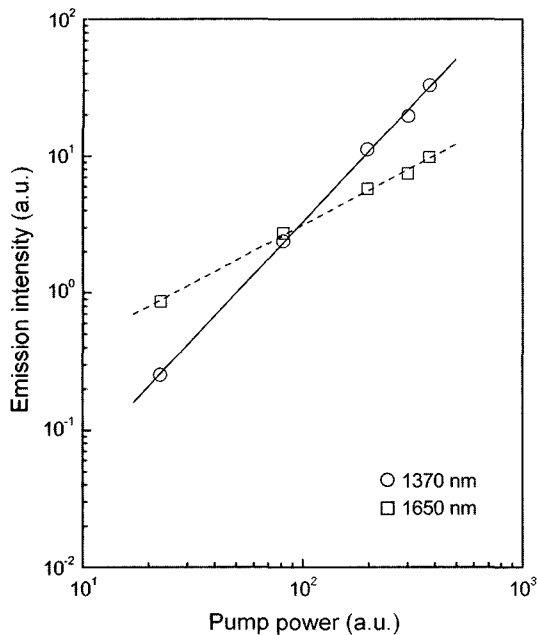


Fig. 1. Schematic energy level structure of trivalent holmium in fluoride glasses. Note that the frequency upconversion to the <sup>5</sup>F<sub>1</sub> state, denoted by the upward dotted arrows, results in the 1370 nm luminescence from (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>) → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> transition.

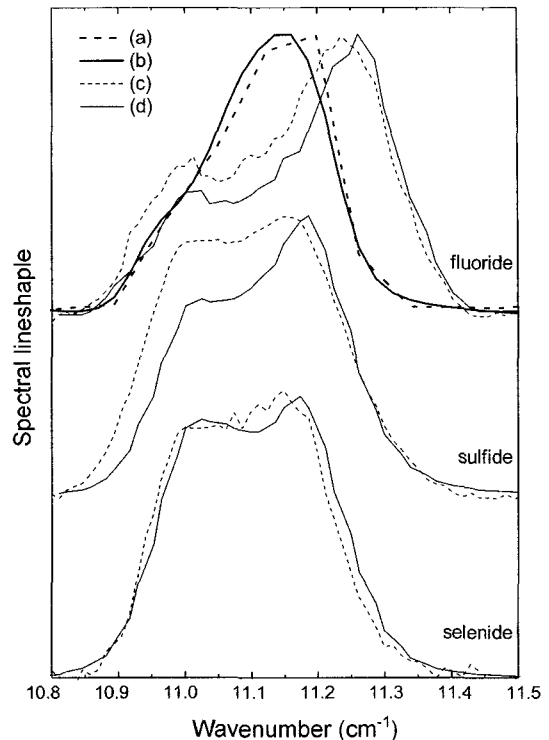
가지는 여기광을 조사하면 각각 광통신 투과창에 속하는  $\sim 1370 \text{ nm}$  형광과  $\sim 1650 \text{ nm}$  형광이 방출된다.<sup>1)</sup> 이러한 두 형광은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 각각 (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>) → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 천이와 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> → <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 천이에 기인한다. 그런데 (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>) 준위는 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 준위보다 높은 에너지 상태에 있기 때문에  $\sim 900 \text{ nm}$  대역 파장의 여기광을 조사하는 경우 한 개의 홀뮴 이온을 (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>) 준위로 들뜨게 하기 위해 최소한 두 개 이상의 여기 광자가 필요하게 된다. 한 개의 1370 nm 형광 광자를 방출하기 위해서 몇 개의 900 nm 광자가 필요한지 확인하기 위하여 펌프광의 세기에 대하여 1370 nm 형광 세기를 조사하였으며 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 이로부터 1370 nm 형광은 펌프광의 two-photon absorption 과정에 의해 발생하나, 예상한 바와 같이 1650 nm 형광은 펌프광의 single-photon absorption 과정에 기인함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 1에 점선으로 도시한 바와 같이,  $\sim 900 \text{ nm}$  대역의 여기광은 한 개의 홀뮴 이온을 <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위로 들뜨게 하고, 들뜬 홀뮴 이온은 비복사 과정을 통해 일부 에너지를 잃고 (<sup>5</sup>S<sub>2</sub>, <sup>5</sup>F<sub>4</sub>) 준위로 들뜬 상태가 됨을 알 수 있다. 한편,  $\sim 1370 \text{ nm}$  형광을 발생시키는 two-photon process에 의한 상향전이 스펙트럼은 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 흡수 천이 스펙트럼과는 무관하며 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 흡수 천이 스펙트럼의 모양과 일치함을 Fig. 3을 통해 알 수 있다. 따라서 <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위를 들뜨게 하는 상향전이 스펙트럼의 에너지 대역이 1650 nm 형광을 발생시키는 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 흡수 천이 스펙트럼의 에너지 대역과 일부 겹치기 때문에 해당 파장에서 1650 nm 형광의 여기 효율이 저하될 것임을 알 수 있다. 즉, <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위로의 상향전이 현상이 없다면 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 흡수 스펙트



**Fig. 2.** Pump power dependency of the emission intensities at 1370 nm and 1650 nm. Note that the sample used was fluoride glass doped with 0.3 mol%  $\text{Ho}^{3+}$ , and pump wavelength was set to 900 nm. Lines were obtained from least squares fits to the data. Slopes of the solid and dotted lines are  $1.71 \pm 0.03$  and  $0.85 \pm 0.02$ , respectively.

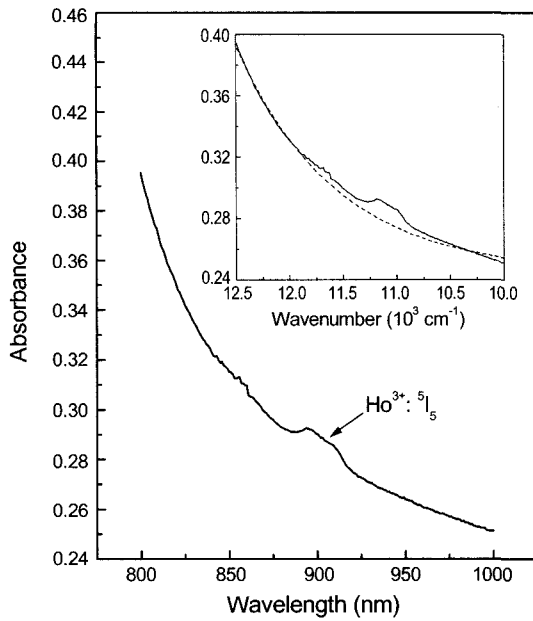
럼의 모양과 1650 nm 형광의 여기 스펙트럼의 모양은 일치할 것이나 상향전이 현상이 발생함으로써 상기한 바와 같이 두 스펙트럼의 모양이 달라지는 것이다. 결국  $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{I}_5$  흡수 스펙트럼과 1650 nm 형광의 여기 스펙트럼의 차이가 커질수록  $^5\text{F}_1$  준위로의 상향전이는 활발히 발생함을 알 수 있다. 각각 흡물이 첨가된 플로라이드, 설파이드 및 셀레나이드 샘플을 대상으로 측정된 두 스펙트럼을 Fig. 3에서 서로 비교할 수 있다. 동일한 조건에서 측정했을 때, 두 스펙트럼의 차이가 플로라이드 유리에서보다 설파이드 유리에서 더 크다는 것을 확인할 수 있으며 이로써 설파이드 유리에서 상향전이가 더욱 활발히 발생함을 알 수 있다. 따라서 1.6  $\mu\text{m}$  형광의 여기 효율은 플로라이드 유리가 설파이드 유리보다 우수하다는 것이다. 한편, 셀레나이드 유리에서는 두 스펙트럼의 차이가 가장 작은 것으로 측정되었으며, 예상에 반하는 이러한 측정결과에 대한 이유를 이하 기술한다.

이미 보고한 바와 같이, 본 연구에서 관찰된 상향전이 현상은 소재의 3차 광학적 비선형성과 관련된다.<sup>1)</sup> 즉, two-photon absorption의 세기는 여기광의 세기뿐만 아니라 소재의 3차 비선형 광학계수와 비례하며, 3차 비선형 광학계수는 셀레나이드 > 설파이드 > 플로라이드 유리 순서로 작아진다는 것이 잘 알려져 있다.<sup>9)</sup> 따라서 여기광의 세기 등을 포함한 여타 측정 조건이 동일하다면, 셀레나



**Fig. 3.** Spectral lineshapes that show the effects of the frequency upconversion on the excitation efficiency of the 1.6  $\mu\text{m}$  emission : (a) spectrum for the upconversion excitation to the  $^5\text{F}_1$  state, (b) spectral lineshape of the  $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{F}_1$  transition drawn at half the original energies, (c) spectrum for the  $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{I}_5$  absorption, and (d) the excitation spectrum for the 1.6  $\mu\text{m}$  emission. Note that all the spectra were normalized to their maximum intensity.

이드 유리에서 상향전이 현상이 가장 크게 관찰되어야 할 것으로 예상되나, Fig. 3에 도시한 바와 같이 셀레나이드 유리에서는 두 스펙트럼의 차이가 나머지 두 유리보다 작았다. 이는 각 유리의 구성원소가 형성하는 밴드 갭 에너지와 관련하여 설명할 수 있다. 즉, two-photon absorption 현상을 관찰하기 위해서는 여기광의 에너지가 소재의 밴드 갭 에너지보다 작아야 하며, 본 실험에서 사용한 플로라이드 유리 및 설파이드 유리 자체의 전자 천이에 기인하는 단파장쪽 흡수단은 각각  $\sim 220$  nm와  $\sim 550$  nm에 위치하기 때문에<sup>6,8)</sup>  $\sim 900$  nm 대역의 여기광에 대한 single-photon absorption의 영향은 배제할 수 있다. 그러나 셀레나이드 유리의 경우 Fig. 4에 도시한 바와 같이 single-photon absorption의 크기가  $\sim 900$  nm 대역에서 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 소위 'weak absorption tail'이며 셀레나이드 유리와 같은 밴드 갭 에너지가 작은 비정질 유전체에서 관찰된다.<sup>10)</sup> 따라서  $\sim 900$  nm 대역은 셀레나이드 유리의 single-photon absorption 영역에 속하기 때문에 two-photon absorption 과정에 참여하는 여기광의 세기가 매우 작아지는 'weak pumping regime'이 되어 상향전



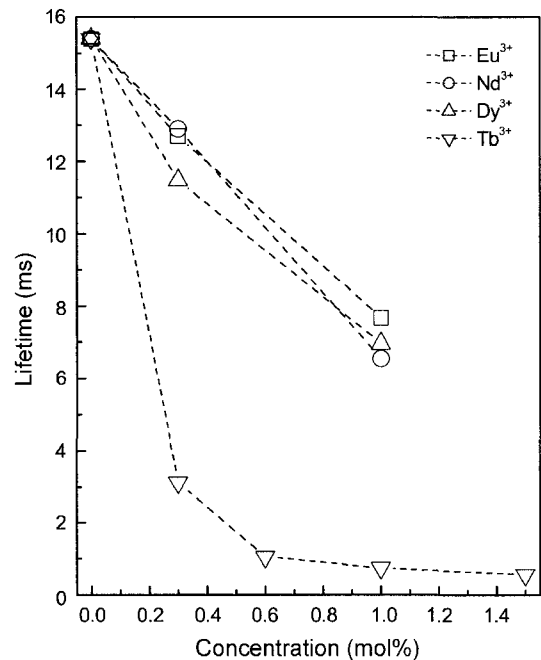
**Fig. 4.** Absorption spectrum of a 0.3 mol% Ho<sup>3+</sup>-doped selenide glass sample at around the wavelengths where the weak absorption tail of the host prevails. The inset denotes the absorption spectrum (solid line) and its exponential fit (dotted line) as a function of wavenumber. Note that except the extrinsic absorption due to the presence of Ho<sup>3+</sup>, the absorption lineshape exhibits a good exponential behavior, which confirms that at ~900 nm region the weak absorption tail of selenide glass is not trivial at all.

이 현상의 발생이 어렵게 된다. 즉, 여기광의 대부분의 에너지는 첨가된 희토류 이온에 의해 흡수되지 않고 셀레나이드 유리에 직접 흡수되는 것이며 이렇게 흡수된 여기광은 열 에너지 형태로 변환되어 국부적인 온도 상승을 유발함으로써 결국 소재의 국부적인 용융 및 휘발을 초래하게 된다. 이러한 현상 때문에 셀레나이드 샘플을 대상으로 하는 실험에서는 여기광의 세기 및 조사 시간의 조절에 상당한 제약을 받았으며 따라서 셀레나이드 유리는 1.6 μm 형광의 활용을 목적으로 사용될 수 없음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이, 실파이드 유리는 ~900 nm 대역에서 single-photon absorption이 없으나 광학적 비선형성이 플로라이드 유리보다 커서 상향전이가 더 많이 발생하기 때문에 여기 파장의 선택에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

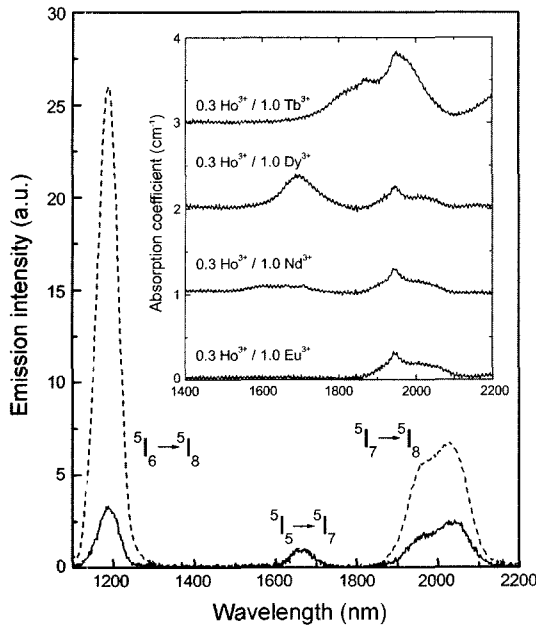
한편, 홀륨 이온간 비복사 에너지 전달의 한 형태로서 <sup>5</sup>I<sub>5</sub> : <sup>5</sup>I<sub>5</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub> : <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 과정에 해당하는 교차 완화 현상이 활발히 발생하면 한 개의 여기 광자로 홀륨 이온을 <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위로 들뜨게 할 수 있다. 그러나 이와 같은 교차 완화 현상이 발생하면 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> → <sup>5</sup>I<sub>5</sub> 흡수 스펙트럼과 1650 nm 형광의 여기 스펙트럼의 모양이 차이가 없을 것으로 판단된다. 또한 1370 nm 형광의 여기 스펙트럼은 기저 상태 흡수가

없는 ~20700 cm<sup>-1</sup> 대역에서도 발생하는데 이 에너지 대역은 <sup>5</sup>F<sub>3</sub> 준위가 가지는 에너지의 1/2에 해당된다.<sup>8)</sup> 이로써 본 연구에서 관찰된 <sup>5</sup>F<sub>1</sub> 준위로의 상향전이 현상에 미치는 홀륨 이온간 교차 완화의 영향은 크지 않은 것으로 생각할 수 있다.

레이저나 증폭기를 구성할 때 고려해야 될 인자중의 하나가 상위 준위와 하위 준위 사이의 밀도 반전이다. 즉, 정상 상태에서 상위 준위 상태의 이온이 하위 준위 상태의 이온보다 많아야 효율적인 연속 발진 동작을 기대할 수 있다. 각 준위로 들떠 있는 이온의 숫자는 해당 준위의 형광 수명에 비례하기 때문에 홀륨 이온으로부터 발생하는 1.6 μm 형광을 활용하기 위해서는 하위 준위인 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위의 형광 수명이 짧은 것이 바람직하다. 따라서 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위가 가지는 에너지와 유사한 에너지 대역에서 흡수를 나타내는 여타 희토류 이온을 첨가함으로써 비복사 공명 에너지 전달 현상을 유발시킬 수 있고 결과적으로 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위의 형광 수명을 감소시킬 수 있게 된다. 본 연구에서는 Tb<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup> 이온을 공동 첨가제로 시도하였으며 공히 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 준위의 형광 수명의 감소 효과가 관찰되었으며(Fig. 5), Tb<sup>3+</sup> 이온을 첨가했을 때 가장 큰 효과를 나타내었다. 따라서 Tb<sup>3+</sup> 이온이 공동 첨가된 샘플에서 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub> 천이의 형광 방출 강도는 단독 첨가 샘플의 경우보다 크게 감소하게 된다



**Fig. 5.** Measured lifetimes of <sup>5</sup>I<sub>7</sub> level, that is, the first e-folding times, as a function of rare-earth concentration in the fluoride glass host. Note that the Ho<sup>3+</sup> concentration was fixed at 0.3 mol% in all the codoped samples. Magnitude of uncertainties involved in the lifetime determination is not marked for clarity of the presentation, however the uncertainties are less than 0.5 ms for all the measurements.



**Fig. 6.** A representative example of the effects of codoping of other rare-earths : Solid line represents emission spectrum obtained from a 0.3 mol%  $\text{Ho}^{3+}$ /1.0 mol%  $\text{Tb}^{3+}$ -codoped fluoride sample, while dotted line from a 0.3 mol%  $\text{Ho}^{3+}$ -single-doped fluoride. Note that the two spectra are normalized with respect to the emission intensity of the  $^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{I}_7$  transition. The inset denotes the absorption spectra of the codoped samples.

(Fig. 6). 그러나 공동 첨가제가 1.6  $\mu\text{m}$  대역에서 지나치게 큰 흡수를 가진다면 상위 준위의 형광수명 역시 감소시키며 신호광의 세기를 현저히 낮추기 때문에 엄밀한 검토가 필요하다. 1 mol%  $\text{Tb}^{3+}$  이온은 1650 nm에서  $\sim 0.02 \text{ cm}^{-1}$ 의 흡수를 유발한다(Fig. 6). 이 값은  $\sim 8 \text{ dB/m}$ 에 해당하는 추가 손실을 의미하며 일반적인 플로라이드 광섬유 증폭기에서 5~20 m 길이의 광섬유가 사용되기 때문에 결코 작지 않은 값이다. 따라서  $\text{Tb}^{3+}$  이온이 밀도 반전 효과는 가장 크지만 1.6  $\mu\text{m}$  대역에서의 흡수가 작지 않기 때문에 밀도 반전 효과는 상대적으로 작지만 추가적인 흡수 손실이 없는  $\text{Eu}^{3+}$  이온이 공동 첨가제로 더 바람직하다. 일반적인 공정을 통하는 경우 ZBLAN 조성의 플로라이드 유리의 희토류 용해도는  $\sim 5 \text{ mol\%}$ 에 달하기 때문에 첨가량 변화를 통한 밀도 반전의 추가적인 조절이 가능하다.

#### 4. 결 론

홀륨 이온의  $^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{I}_7$  전자천이에 기인하는 1.6  $\mu\text{m}$  형광을 발생시키기 위하여  $\sim 900 \text{ nm}$  대역에 위치한  $^5\text{I}_5$  준위로 들뜨게 하는 경우 그 효율을 향상시키기 위해서는  $^5\text{F}_1$  준

위로의 상향전이가 발생하는 특정 파장대역에서 벗어난 파장의 여기광을 사용하는 것이 좋다. 셀레나이드 유리는 단파장쪽 흡수단이 길어서  $\sim 900 \text{ nm}$  대역의 여기광을 사용하는 것이 바람직하지 않다.  $\text{Tb}^{3+}$  이온을 공동 첨가하면 하위 준위의 형광수명의 감소가 가장 크게 발생하나 기저상태 흡수를 통하여 1.6  $\mu\text{m}$  대역에서의 흡수를 크게 하기 때문에 추가적인 흡수 손실이 없는  $\text{Eu}^{3+}$  이온을 공동 첨가제로 활용하는 것이 더 적합하다.

#### 감사의 글

저자는 각각 샘플제작과 1.6  $\mu\text{m}$  형광의 여기 스펙트럼 측정에 대하여 ETRI의 박봉제와 POSTECH의 이태훈에게 감사 드립니다. 본 논문과 관련된 대부분의 실험은 저자가 재직했던 ETRI에서 정보통신부의 재정적 지원을 통하여 이루어 졌습니다.

#### REFERENCES

1. Y. G. Choi, B. J. Park, and K. H. Kim, "1.6- $\mu\text{m}$  Emission from  $\text{Ho}^{3+}$ -Doped Fluoride Glasses," *Opt. Lett.*, **28** [8] 622-25 (2003).
2. T. H. Lee, J. Heo, Y. G. Choi, B. J. Park, and K. H. Kim, "Optimized Combination of  $\text{Ho}^{3+}$  and Sulfide Glass for U-Band Fiber-Optic Amplifiers," *Chem. Phys. Lett.*, **384** 16-9 (2004).
3. T. H. Lee, J. Heo, B. J. Park, Y. G. Choi, and K. H. Kim, "Spectroscopic Properties of  $\text{Ho}^{3+}$ -Doped Chalcogenide Glasses for 1.6  $\mu\text{m}$  (U-Band) Fiber-Optic Amplifiers," *Proc. of SPIE*, **5061** 70-4 (2003).
4. J. Kobelke, J. Kirchof, M. Scheffler, and A. Schwuchow, "Chalcogenide Glass Single Mode Fibres-Preparation and Properties," *J. Non-Cryst. Solids*, **256&257** 226-31 (1999).
5. Y. G. Choi, K. H. Kim, B. J. Park, and J. Heo, "1.6  $\mu\text{m}$  Emission from  $\text{Pr}^{3+}$ : ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ )  $\rightarrow$   $^3\text{H}_4$  Transition in  $\text{Pr}^{3+}$ - and  $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -Doped Selenide Glasses," *Appl. Phys. Lett.*, **78** [9] 1249-51 (2001).
6. Y. G. Choi, K. H. Kim, S. H. Park, and J. Heo, "Comparative Study of Energy Transfers from  $\text{Er}^{3+}$  to  $\text{Ce}^{3+}$  in Tellurite and Sulfide Glasses under 980 nm Excitation," *J. Appl. Phys.*, **88** [7] 3832-39 (2000).
7. Y. G. Choi and J. Heo, "1.3  $\mu\text{m}$  Emission and Multiphonon Relaxation Phenomena in  $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  Glasses Doped with Rare-Earths," *J. Non-Cryst. Solids*, **217** 199-207 (1997).
8. Y. G. Choi, B. J. Park, and K. H. Kim, " $\text{Ho}^{3+}$ : ( $^5\text{S}_2$ ,  $^5\text{F}_4$ )  $\rightarrow$   $^5\text{I}_5$  Transition in Fluoride Glasses," *Chem. Phys. Lett.*, **354** 69-74 (2002).
9. M. Yamane and Y. Asahara, "Glasses for Photonics," Cambridge University Press, pp. 174-79 (2000).
10. D. L. Wood and J. Tauc, "Weak Absorption Tails in Amorphous Semiconductors," *Phys. Rev. B*, **5** [8] 3144-51 (1972).