

# Tm<sup>2+</sup> 이온이 첨가된 실리카 광섬유의 비선형 광학 특성 Nonlinear optical properties of silica glass optical fibers containing Tm<sup>2+</sup> ions

김윤현, 백운출, 한원택  
광주과학기술원 정보통신공학과 특수광섬유 연구실  
wth@kjist.ac.kr

### 서론

희토류 이온이 첨가된 광섬유는 광증폭 특성 뿐 아니라 큰 공진형 비선형성을 가지고 있어 이를 이용한 광스위칭 소자에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>(1)</sup>. 희토류 이온들의 비선형 특성에 대한 이론적 연구에 의하면, Tm<sup>2+</sup>의 이온이 첨가된 광섬유가 가장 큰 비선형성을 가질 것임이 보고 되었다<sup>(2)</sup>. 최근 본 연구실에서 세계 처음으로 MCVD 공정에서 용액첨가법으로 강한 환원 분위기를 형성시켜 Tm<sup>2+</sup>이 첨가된 실리카 광섬유를 보고한 바 있다<sup>(3)</sup>. 본 논문에서는 Tm<sup>2+</sup>이 첨가된 광섬유의 비선형성 측정 결과를 보고하고자 한다. 본 연구에서는 Tm<sup>2+</sup>이 첨가된 광섬유의 514.5nm 펄프 광원에 대한 1310nm 근방에서의 공진형 비선형성을 광섬유 장주기 격자 쌍<sup>(4)</sup>을 이용하여 측정하였다.

### 실험 및 결과

Tm<sup>2+</sup>이 첨가된 실리카 광섬유(Tm<sup>2+</sup>/Tm<sup>3+</sup> co-doped fiber)는 TmCl<sub>3</sub>(0.04M)과 환원제인 Sucrose(2.2M)를 녹인 수용액을 이용해 MCVD공정에서의 용액첨가법을 활용하여 제조하였다. 또한, Tm<sup>2+</sup>이온의 형성에 의한 광특성의 변화를 비교하기 위해 Tm<sup>3+</sup>이온만이 존재하는 광섬유(Tm<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> co-doped fiber)를 제조하였고, 이를 위해 TmCl<sub>3</sub>(0.04M)과 AlCl<sub>3</sub>(0.2M)의 에탄올 용액을 첨가용액으로 사용하였다. 광섬유를 인출한 후, 백색 광원(White light source)과 광스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer, OSA)를 이용한 Cut-back 방법으로 제작된 광섬유들의 350nm와 1600nm 사이의 광흡수스펙트럼을 측정하였다. 그림 1은 그 측정 결과를 보여준다. 굵은 실선은 전형적인 Tm<sup>3+</sup>이 첨가된 광섬유의 흡수스펙트럼을 보여주고 있다. 반면, Tm<sup>2+</sup>이 첨가된 광섬유에서는 Tm<sup>3+</sup>이 첨가된 광섬유에서 볼 수 없는 350nm에서 900nm에 걸친 넓은 흡수 밴드가 형성되었음을 알 수 있는데, 이것이 Tm<sup>2+</sup>이온에 의해 형성된 것이다<sup>(3)</sup>.

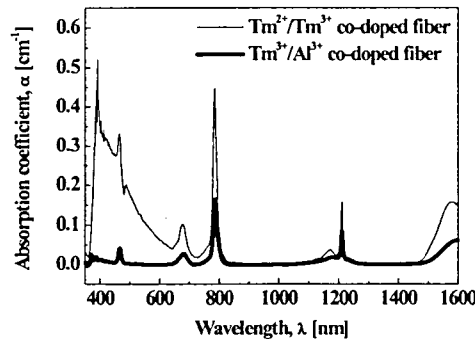


그림 1. Absorption spectrum between 350nm and 1600nm of the Tm<sup>2+</sup>/Tm<sup>3+</sup> co-doped fiber and the Tm<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> co-doped fiber

한편, Tm이 첨가된 광섬유들의 비선형성 측정을 위해 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 격자 주기가 200μm인 amplitude mask와 UV레이저(248nm)를 이용해 한 쌍의 장주기 격자가 새겨진 광섬유를 제작하여, 두 장주기 격자 사이에 코팅을 제거시킨 Tm<sup>2+</sup>이온이 첨가된 광섬유 또는 Tm<sup>3+</sup>이온이 첨가된 광섬유를 연결하였다. 두 격자간 길이(L)는 각각 약 36.5cm와 24.8cm였고 그 중 Tm이 첨가된 광섬유의 길이(L<sub>1</sub>)는 각각 31cm와 16.4cm였다. 또한, 각 격자의 길이(d)는 2cm였다. Ar-ion 레이저(514.5nm)의 펄프 광원과 1310nm LED의 신호 광원을 Fused fiber coupler를 통해 동시에 Tm이 첨가된 광섬유에 입사할 수 있도록 한 후, 펄프 광원의 세기를 변화시키며 장주기 격자 쌍과 Tm이 첨가된 광섬유를 지난 신호 광원(1310nm LED)에 의해 형성된 1305nm와 1320nm 사이에서의 간섭무늬의 파장 이동을 OSA를 통해 관찰하였다. 이 때 OSA의 해상도는 0.05nm였다.

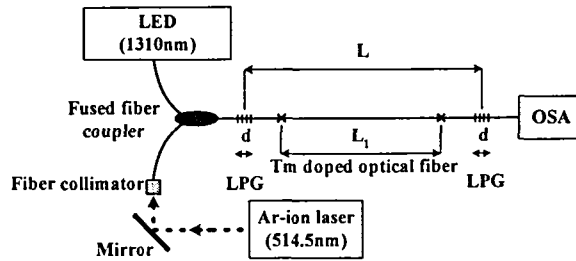


그림 2. Schematic diagram of the experiment setup for measuring the resonant nonlinearity of the  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fibers and the  $Tm^{3+}/Al^{3+}$  co-doped fibers upon the Ar-ion laser pumping.

그림 3(a)는  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber에 대해서 펌프 광원의 세기에 따른 장주기 격자 쌍에 의해 형성된 간섭무늬의 이동을 보여준다. 펌프광원의 세기가 증가함에 따라 간섭무늬가 장파장 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 그림 3(b)는 펌프 광원에 따른 1313nm 근방의 세 개의 소멸 간섭 부분들의 평균적인 이동을 보여준다. 여기서, Error bar는 세 개의 소멸 간섭 부분들의 파장 이동 최대 범위를 나타낸다. 한편,  $Tm^{3+}/Al^{3+}$  co-doped fiber에서는  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber와 달리 펌프 광원의 세기에 따라 거의 파장 이동이 없는 것으로 나타났다. 이는  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber에만 첨가된  $Tm^{2+}$ 이온에 의해 광섬유 코어의 굴절률이 펌프 광원에 의해 변화된 것임을 보여준다<sup>(4)</sup>. 20mW의 입사 펌프 광원에 대한  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber에서의 파장 이동은 약 0.1nm이었으며, 계산결과 비선형 광학 계수( $n_2$ )는 약  $3.5 \times 10^{-15} m^2/W$ 이었다<sup>(4)</sup>.

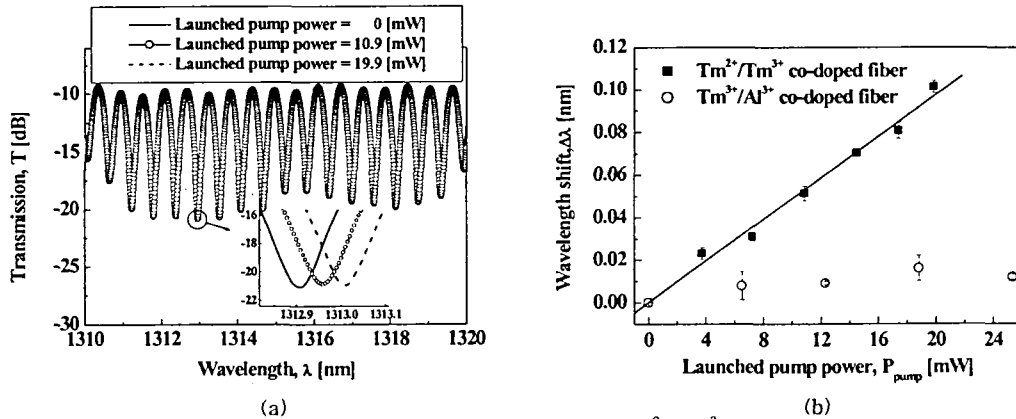


그림 3. (a) The interference fringe pattern of the 31cm long  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber upon pumping at 514.5nm by the Ar-ion laser (b) Average wavelength shift of the three valley points near 1313nm ( $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber) and that near 1310nm ( $Tm^{3+}/Al^{3+}$  co-doped fiber) as a function of the launched pump power (solid line: fitting line of the average wavelength shift for the  $Tm^{2+}/Tm^{3+}$  co-doped fiber, error bar : wavelength shift range of the three valley points)

**결론**

본 연구에서는  $Tm^{2+}$ 이온이 첨가된 실리카 광섬유의 514.5nm 펌프 광원에 따른 1310nm 근방에서의 공진형 비선형성을 광섬유 장주기 격자 쌍에 의해 형성된 간섭무늬의 이동을 통해 확인할 수 있었다.  $Tm^{2+}$  이온이 첨가된 광섬유의 비선형 광학 계수  $n_2$  는 1310nm 근방에서 약  $3.5 \times 10^{-15} m^2/W$ 이었다.

**감사의 글**

본 연구는 광주과학기술원의 초고속광네트워크 연구센터(ERC) 및 교육인적자원부 BK-21 사업의 일부 지원에 의한 것입니다.

**참고 문헌**

1. M. J. F. Digonnet, R. W. Sadowski, H. J. Shaw, and R. H. Pantell, Optical Fiber Technol. 3, 44-64 (1997).
2. J. W. Arkwright, P. Elango, G. R. Atkins, T. Whitbread, and M. J. F. Digonnet, "Experimental and theoretical analysis of the resonant nonlinearity in ytterbium-doped fiber," J. Lightwave Technol. 16, 798-806 (1998).
3. Y. Kim, Y. Chung, U. Paek, W. Han, OFC 2003, Atlanta, 301-302 (2003).
4. Y. H. Kim, B. H. Lee, Y. Chung, U. C. Paek, and W.-T. Han, Opt. Lett. 27, 580-582 (2002).

