

단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 의 Photoluminescence

권순혁 · 남균*

연세대학교 물리학과, 강원도 원주시 흥업면 매지리 234, 220-710

김철구

연세대학교 물리 및 응용물리 사업단, 서울 서대문구 신촌동 134, 120-749

(2007년 1월 15일 받음, 2007년 2월 12일 최종수정본 받음)

Rutile 구조를 가진 반강자성체 MnF_2 와 단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 의 Infra-Red 흡수 스펙트럼과 Photoluminescence 측정을 했다. 측정된 Data의 분석을 통해서 EuF_3 가 1.5% 첨가된 MnF_2 와 순수한 MnF_2 의 광학적 성질의 차이를 밝혀내고, Eu의 첨가에 의해 나오는 PL은 Eu^{3+} 의 f-d 전이에 의한 것임을 확인했다.

주제어 : 단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$, photoluminescence, infra-red, 광학적 성질, 흡수 spectrum

I. 들어가는 말

Rutile 구조를 가진 MnF_2 는 자기적으로 반강자성체로 Néel 온도는 67.4 K이다[1-4]. MnF_2 에 대한 연구는 자기적인 성질 이외에도 탄성성질과 PL(photoluminescence)을 비롯한 광학적인 성질에 대한 다양한 연구가 이루어져, MnF_2 의 결정체 안에서 Mn^{2+} 이온이 가지고 있는 전자적 구조에 대해 자세하게 이해 할 수 있게 되었다[5-9].

최근에는 MnF_2 에 Eu이나 Er과 같은 소량의 희토류 원소를 넣은 후 PL(photoluminescence)을 측정하는 연구도 관심을 끌었다. 그 이유는 이들 Eu 또는 Er의 희토류 원소가 결정체 내에서 에너지 전이를 효과적으로 해주어 발광소자로 응용될 수 있음이 보고되었기 때문이다[6]. 또한 전이금속과 dioxide(예를 들어 TiO_2) 또는 difluoride로 이루어진 rutile 구조의 화합물이 특별한 관심을 끄는 이유는, 이들 물질에 자외선 빛을 쬐이면 유기물을 비롯한 공해물질을 분해하는 능력도 보유하고 있기 때문이다[3].

단결정이 아닌 polycrystal MnF_2 에 희토류 원소 Eu을 첨가한 PL 측정 결과에 의하면 Mn^{2+} 에너지 전이에 의한 peak 이외에 추가적으로 Eu^{3+} 의 f-d 전이에 의한 peak이 관측되는 것이 보고 되었다[6]. 그러나 기존의 또 다른 연구 보고는 MnF_2 에 소량의 Eu을 첨가하면 Eu의 valence가 +3가 아닌 +2가 임을 보고했다[10]. 일반적으로 MnF_2 에 Eu이 잘 치환 되었다고 가정하면 Eu^{2+} 상태가 Eu^{3+} 보다 더 안정되어 Eu^{2+} 상태로 존재할 수 있을 것으로 기대하는 것이 일반적이다. 왜냐하면 EuF_3 에 Mn이 Eu 대신 치환되면 Mn^{3+} 이

되겠지만, MnF_2 에서 Eu이 Mn 대신 치환되면 당연히 Eu^{2+} 상태가 될 것으로 기대되기 때문이다.

Eu이 +3가일 때와 +2가일 때의 물리적 성질은 큰 차이가 있다. 첫째 자기적으로 +3가일 때의 자기모멘트는 +2가일 때에 비하여 약 1/2 정도이다. 둘째 광학적으로는 여기상태와 기저상태의 에너지 차이가 다르기 때문에 흡수 스펙트럼이나 Luminescence 측정 시 확실히 다른 값을 보일 것이다. 최근 이들에 대한 차이점의 원인을 규명하기 위해 단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 시료를 제조하여 온도에 따른 자기 감수율을 측정한 결과는 MnF_2 에 1.5%의 EuF_3 이 첨가된 경우 Eu이 Eu^{2+} 보다는 Eu^{3+} 상태로 존재하고 있음이 보고되었다[3]. 이 결과는 Mn의 유효자기모멘트 값으로부터 계산된 간접적인 결과이다.

본 연구에서는 단결정체 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 내에서 Eu이 가지고 있는 이온가를 직접적으로 확인하기 위한 방법으로 순수 MnF_2 와 단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 의 파장에 따른 PL을 측정해 비교 분석했다. Luminescence는 원자, 분자, 고분자 및 결정체에 외부 에너지를 인가하면 그 물질 내의 고유한 전자 에너지 상태간의 전이에 의해 흡수된 에너지를 빛의 형태로 방출하며 원래의 평형상태로 되돌아가는 물리적 현상이다. 그러므로 PL의 측정으로 기대할 수 있는 것은 Eu이 첨가된 MnF_2 에서 Eu의 에너지 전이에 의해 발생하는 luminescence의 파장이 Eu의 이온가가 +2가 또는 +3가인가에 따라 달라지므로 Eu의 이온가를 직접 확인할 수 있는 장점이 있다. Eu의 이온가에 따른 에너지 준위에 대한 이론적인 연구는 수없이 많이 이루어졌기 때문에 쉽게 실험결과와 비교분석이 가능하다. 한편 MnF_2 에 대한 현재까지의 연구는 대부분 단결정체가 아닌 분말시료와 같은 polycrystal에 대한 결과이므로 본

*Tel: (033) 760-2299, E-mail: kyunnahm@yonsei.ac.kr

연구에 의해 수행되는 단결정체에 대한 PL 측정은 polycrystal에 대한 PL 결과와의 차이점도 보일 수 있다. 특히 PL 측정은 보통 반도체의 에너지띠를 결정하는데 매우 유용한 실험이지만 고체 내에 f-전자나 d-전자가 놓이게 되면 주변의 원자 등에 의해 결정장의 영향을 받아 갈라지는 에너지준위도 PL을 통해서 연구할 수 있다.

II. 실험

단결정 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 시료는 다음의 과정을 걸쳐 만들어졌다. 첫 순서로 순도 99%의 MnF_2 에 1.5%의 EuF_3 가 첨가되었을 때 phase segregation이 되는 것을 방지하기 위해 막자사발에 분말 형태의 MnF_2 와 EuF_3 를 정확한 mole 비로 섞어 세 시간 동안 갈았다. 다음 단계로 분말시료에 압력을 가하여 직경 13 mm, 두께 8 mm의 알약형태의 시료를 만든 후, 시료를 10^{-6} Torr 진공상태의 quartz 관 안에 넣어 $600^\circ C$ 에서 일주일 동안 열처리했다. 열처리된 시료를 밀봉된 Ta crucible 안에 넣은 후 Bridgeman-Stockbarger 방법을 사용해서 $4.8 mm \times 5.3 mm \times 6.1 mm$ 의 단결정을 성장시켰다[11]. 시료처리를 하는 모든 과정은 Ar 분위기 속에서 진행되었다.

단결정 시료는 투명하였으며, 가시광선으로 비쳐 보았을 때 티 한 점 없이 깨끗한 상태이므로 원래 MnF_2 가 가지고 있는 상(phase) 이외의 또 다른 상의 존재는 없는 것으로 보인다. 그러나 이를 확인하기 위해 순수한 시료 MnF_2 와 단결정 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 의 IR(Infra-Red) 흡수 측정을 통해 새로운 상이 관측되는지를 실험했다. 만약 phase segregation이 되었다면 두 개 이상의 phase에 대한 IR peak을 관측할 수 있기 때문이다. 본 연구에 사용된 IR 측정기기는 보통 근적외선/가시광선/근적외선($0.4 \mu m - 2.5 \mu m$) 영역에서 반사율/투과율을 얻기 위해 사용되는 Varian사의 회절발 분광기(NIR/VIS/UV Spectrophotometer) Cary 5G 이다. 이 장비는 두 개의 회절발 장치를 사용하는 닫힌-루프계 분광기이다. 두 개의 채널을 동시에 사용하기 때문에 시간과 주변 환경에 의한 효과를 무시할 수 있게 해준다. 그리고 Schwarzschild 조합 광학계(coupling optics)를 사용하여 광도계의 노이즈를 줄이고 낮은 투과율의 측정 시에도 정확성을 기해준다. 또한 회절발 장치가 회전하면서 측정하는 기존의 방식에서 벗어나 NMPS(Non-measurement-Phase-Stepping)의 방식을 채용하여 같은 파장에서 동시에 회절발 속도에 관계없이 정확하고 신속한 측정을 할 수 있게 해 준다. 분해능은 VIS/UV에서 $0.031 nm$ 이다.

PL(Photoluminescence) 측정은 Fig. 1과 같은 PL 측정 장치를 이용하여 온도의 변화를 주며 30 K에서 상온 사이의 영역에서 Wilson 등과 같은 방법으로 측정했다[6]. Fig. 1에서

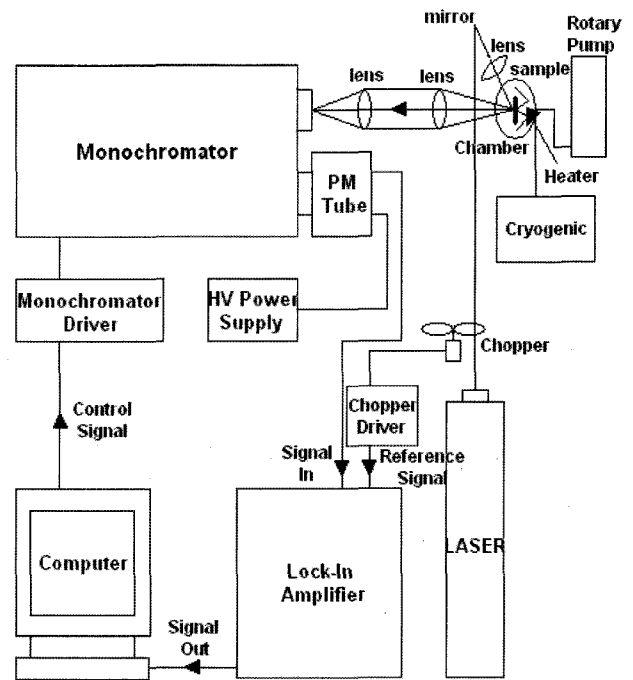


Fig. 1. Photoluminescence experiment system.

Diode laser(468 nm, 20 mW)에서 나온 광자들은 거울에 반사되어 렌즈를 통해 집광되며, 그 광자들은 시료 내의 전자들을 여기 시켜 준다. 여기 된 전자들은 다발적으로 전이를 하게 되는데, 그 때 나오는 에너지들은 빛의 형태로 분광기(600 groove/mm)에 들어가 우리가 원하는 파장에 따른 세기를 측정할 수 있게 된다.

III. 결과 및 논의

MnF_2 에 1.5%의 EuF_3 가 첨가되었을 때 단일 상 또는 두 개 이상의 상이 존재하는 지를 확인하기 위해 300 K에서 IR 측정을 수행했다. Fig. 2는 275 nm에서 600 nm 사이에서 순수 MnF_2 와 단결정체 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 에 대한 흡수 스펙트럼을 측정된 결과이다.

Fig. 2에서 보는 것과 같이 순수한 MnF_2 와 단결정체 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 에서 관측되는 흡수 스펙트럼의 파장은 정확하게 일치한다. 만약 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 에 MnF_2 와는 전혀 다른 새로운 상이 존재한다면 순수한 MnF_2 에서 관측된 흡수 스펙트럼과는 완전히 다른 파장에서 새로운 상에 의한 흡수 스펙트럼이 관측되어야 할 것이다. 그러나 본 연구 결과는 MnF_2 상 이외의 다른 파장에서의 새로운 흡수 스펙트럼은 전혀 관측되지 않음을 보여주고 있다. 따라서 $MnF_2(1.5\% EuF_3)$ 역시 순수한 MnF_2 와 같은 구조를 가진 것으로 생각할 수 있다. 단지 331.5 nm(Fig. 2(b)에서 E로 표시한 peak)에서 관측된 흡수선의 세기가 순수한 MnF_2 에 비해 더 강하게

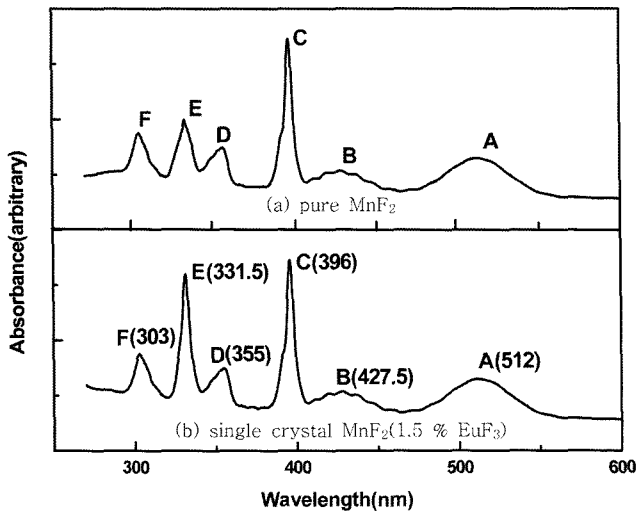


Fig. 2. The absorption spectrum of the pure MnF_2 and the single crystal $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$.

나타난다는 것이 다른 점이다. 이는 순수한 MnF_2 는 분말 시료이지만 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 시료는 단결정 상태이기 때문으로 보인다.

Stout 등의 연구 결과에 의하면 275 nm에서 600 nm 사이에 관측되는 6개의 흡수 스펙트럼은 Mn^{2+} 의 가장 낮은 에너지 상태에서부터 4개의 여기상태로의 전이가 일어나기 때문이다[7]. 5개의 d-전자를 가지고 있는 Mn^{2+} 의 $3d^5$ 에 대한 전자 상태에 대한 계산에 의하면 가장 낮은 에너지 상태는 ${}^6S_{5/2}$ 이다. Mn^{2+} 가 자유이온이라면 가장 낮은 준위인 ${}^6S_{5/2}$ 위로 약 $25,000\text{--}50,000 \text{ cm}^{-1}$ 정도의 위치에 4개의 축퇴된 상태의 4G , 4P , 4D , 4F 준위가 있다. 그러나 결정체 안에서는 Mn^{2+} 이온 중심으로 가장 가까이 있는 주위의 이온이나 또는 molecule 인 리간드에 의한 결정장의 영향을 받아서 이들 축퇴된 4G , 4P , 4D , 4F 준위는 에너지가 갈라진다. 만약 리간드들이 tetrahedron, octahedron 또는 cube의 모서리에 놓여 있다면 리간드 장은 결정장의 세기와 관계되는 단 한 개의 변수 Dq 의 함수로 결정된다. Orgel은 결정체 내에서 Mn^{2+} 이온이 리간드에 의해 생성된 전기적 힘에 의해 degenerate 상태의 d-orbital이 갈라지는 현상을 군론을 이용해서 계산했다[12]. 그 결과가 Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같은 변수 Dq 의 함수로 계산된 4G , 4P , 4D , 4F 상태의 에너지 갈라짐이다. Fig. 3에서와 같이 보는 것과 같이 결정장의 효과 Dq 가 커지면 여기 상태들의 갈라짐의 효과도 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 2에서 A, B, C, D, E, F로 표시된 흡수 스펙트럼은 낮은 준위 상태인 ${}^6S_{5/2}$ 에서 결정체 안에서 갈라진 이들 4G , 4P , 4D , 4F 준위로 전이되는 흡수선이다. 따라서 실험 결과와 Fig. 3을 비교하면 이들 흡수 스펙트럼이 ${}^6S_{5/2}$ 로부터 어떠한 에너지 준위로 전이되는 흡수선인 가를 알 수 있다. 그 결과

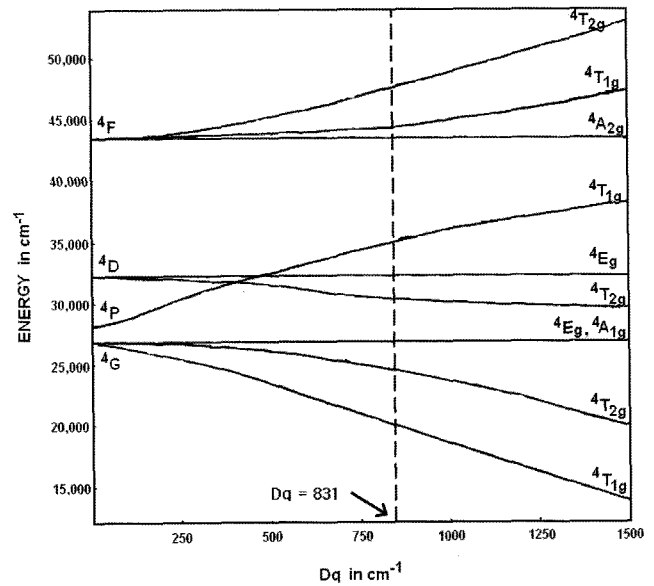


Fig. 3. Energy level diagram for the Mn^{2+} ion in crystal electric field. The broken line indicated the value of Dq found for MnF_2 .

Table I. Energy level by absorption spectrum of MnF_2 .

Peak	Wavelength (nm) (maximum point)	Ref. [7]	Upper level
A	512	514.2	${}^4T_{1g}({}^4G)$
B	427.5	425.3	${}^4T_{2g}({}^4G)$
C	396	397.1	${}^4A_{1g}({}^4G)$
D	355	355.5	${}^4T_{2g}({}^4D)$
E	331.5	330.7	${}^4E_g({}^4D)$
F	303	302.4	${}^4T_{1g}({}^4P)$

가 Table I에 참고문헌 값과 함께 주어졌다. 또한 Fig. 2에서의 측정된 A, B, F 흡수 스펙트럼이 관측된 지점의 파장을 Fig. 3에 대입하면 MnF_2 결정체 내에서 Mn이 받는 결정장의 세기 Dq 를 구할 수 있다. 이들의 평균값은 831 cm^{-1} 로 Fig. 3에서 점선으로(세로) 표시한 위치의 값이다.

Fig. 4는 순수한 MnF_2 와 단결정체 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 에 대한 여러 온도에서 측정된 PL 측정 결과이다. Fig. 4(a)의 순수한 MnF_2 에 대한 PL 측정 데이터는 Banskchikov 등의 PL 연구와 같은 결과로, 이들의 설명에 의하면 600 nm 근처를 정점으로 넓은 영역에 걸쳐 있는 peak은 Mn^{2+} 의 여기상태로부터 낮은 상태로의 에너지 전이 때문이다[8]. $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 의 경우에도 650 nm를 정점으로 넓은 영역에 걸쳐 peak이 나타난다. 이 역시 Mn^{2+} 에 의한 peak으로 MnF_2 에서 보인 Mn^{2+} 이온에 의한 에너지 전이가 단결정체 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 에서도 같은 효과를 보이는 것을 의미하는 것이다. 그러나 Fig. 4(b)에서 보는 것과 같이 단결정 $\text{MnF}_2(1.5\% \text{EuF}_3)$ 에 대한 PL 측정 결과는 순수 MnF_2 에서 나타나는 폭

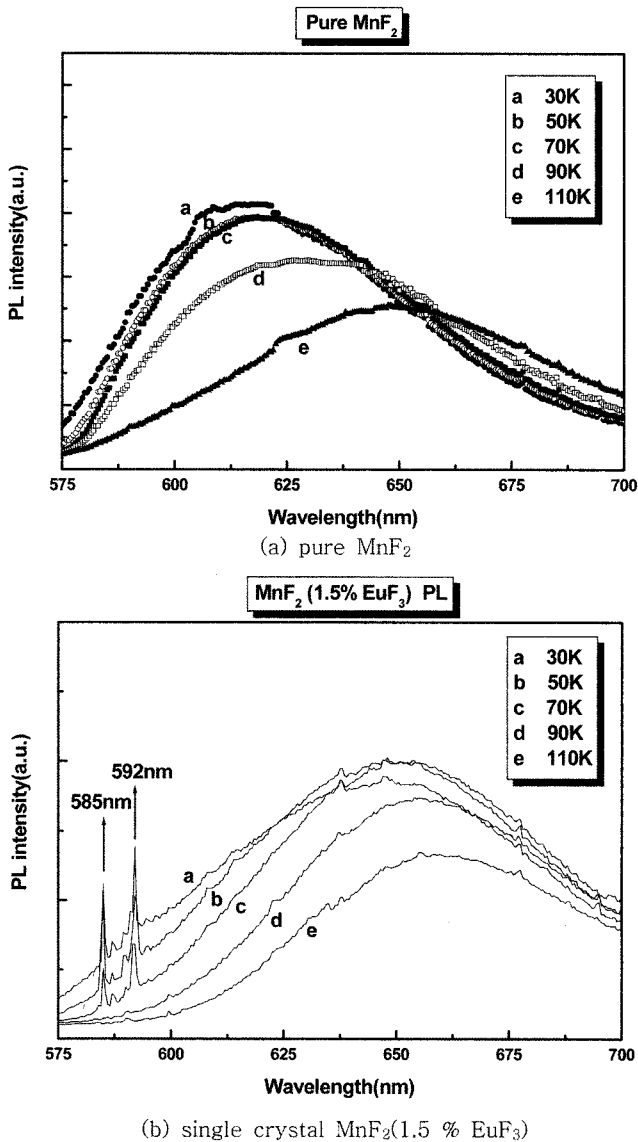


Fig. 4. PL intensities of the pure MnF₂ and the single crystal MnF₂(1.5 % EuF₃) at various temperatures.

넓은 peak의 정점이 600 nm인 것과는 달리 650 nm인 것이 분말 형태의 MnF₂와 다른 점이다. 또한 단결정 MnF₂(1.5 % EuF₃)에서는 585 nm와 592 nm 두 곳에서 날카로운 peak이 추가적으로 더 관측되었다.

따라서 MnF₂에 소량의 EuF₃ 첨가로 추가적으로 585 nm와 592 nm에서 나오는 PL peak은 결정체 안에 놓인 Eu 이온의 에너지 전이에 의한 peak으로 가늠할 수 있다. Eu에 의한 이 peak이 Eu³⁺ 이온에 의한 peak인지 또는 Eu²⁺ 이온에 의한 peak인지를 분석하기 위해서, Mn²⁺ 에너지 준위와 Wilson 등에 의해 연구된 결정장 내에서 갈라진 Eu³⁺의 에너지 준위 그리고 Dorenbos에 의해 연구된 Eu²⁺의 에너지 준위를 Fig. 5에 비교하여 그려 놓았다[13, 14]. 그림에서 보는

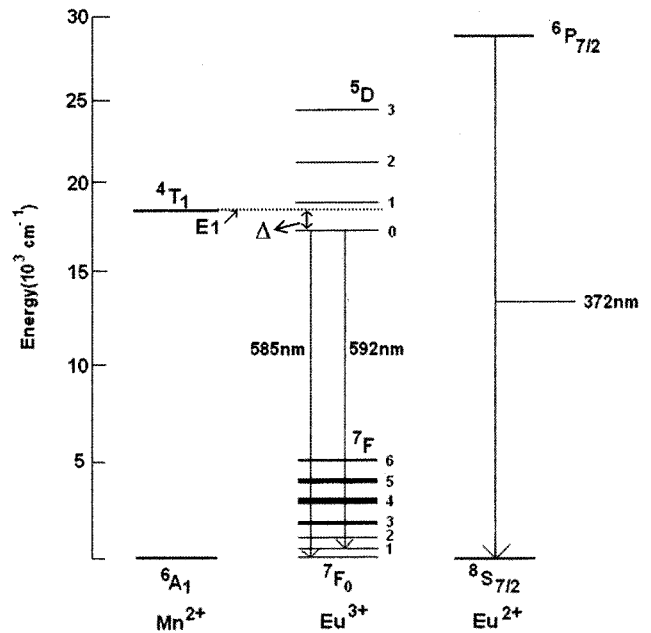


Fig. 5. Energy-level diagram for Mn²⁺, Eu³⁺ and Eu²⁺ [13, 14].

것과 같이 만약 새로운 peak이 Eu²⁺에 의한 즉 ⁶P_{7/2}에서 ⁸S_{7/2}로의 에너지 전이에 의한 것이라면 585 nm나 592 nm가 아닌 약 372 nm 근처에서 발견되어야 한다. 따라서 585 nm와 592 nm에서 관측되는 peak은 Eu²⁺가 아닌 Eu³⁺에 의한 peak임을 명확하게 알 수 있다. 이들 585 nm와 592 nm에서 관측되는 peak이 Eu이 Eu³⁺로 존재한다고 가정하고 또한 f-d 전이에 의한 peak이라면, ⁵D₀로부터 ⁷F_i의 어느 에너지 준위로의 전이인지 확인할 수 있다. Fig. 5에 의하면 정확히 585 nm는 ⁵D₀로부터 ⁷F₀로의 전이에 해당되고, 592 nm의 peak은 ⁵D₀로부터 ⁷F₁의 전이에 해당된다. 이 전이는 ΔJ=0, +1이 되므로 selection rule 역시 만족한다. 따라서 MnF₂에서 Mn이 Eu로 치환되면 Eu²⁺ 상태가 아닌 Eu³⁺의 상태로 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

그런데 단결정 MnF₂(1.5 % EuF₃) 시료에서 첨가된 Eu의 함량이 매우 작으므로 만약 MnF₂ 상과 EuF₃ 상이 분리된 상태로 존재하더라도, 유사한 실험결과가 나올 수 있을 것이 예상된다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 2의 결과와 온도에 따른 자기감수율 측정으로부터 소량의 EuF₃가 MnF₂에 첨가될 때 Eu이 Mn에 완벽하게 치환되었다는 결과로부터 585 nm와 595 nm의 peak은 EuF₃에 의한 peak이 아닌 Mn 자리에 Eu이 치환되어 나오는 peak으로 해석할 수 있다.

585 nm와 592 nm에서 관측된 peak의 세기는 50 K 이하에서는 거의 변하지 않는다. 그러나 온도가 증가함에 따라 세기는 급격히 감소한다. 이는 Fig. 5에서 보인 Eu 이온과 Mn 이온 사이에 작은 에너지 간격 Δ 때문에 일어나는 에너지 전달 효과 때문인 것으로, 그 크기 Δ는 다음의 관계식으로부터

구할 수 있다. 온도에 따른 PL의 세기는 Arrhenius 방정식에 의하면 다음과 같다[6].

$$1/I = c_1 \exp(-\Delta/k_B T) + c_2 \quad (1)$$

이 식에서 I 는 각 온도에서의 peak의 세기이며, k_B 는 Boltzmann 상수이고, c_1 과 c_2 는 상수이다. 실험에서 구한 T^{-1} 에 따른 $\ln(\text{Intensity}^{-1})$ 데이터를 식 (1)에 넣어 최소자승법으로 fitting 한 결과는 Mn의 E1과 Eu의 ⁵D₀ 사이의 에너지 간격이 750 cm⁻¹로 계산되었다. 이 값은 Fig. 5에 보인 에너지 간격과 비슷한 값으로 585 nm와 592 nm에서 측정된 PL의 peak은 MnF₂에서 Mn 대신 치환된 Eu이 Eu³⁺의 상태로 존재함을 재확인할 수 있었다.

IV. 맺는말

순수 MnF₂에 EuF₃이 1.5% 첨가되면 phase segregation이 되어 one phase에서 two phase로 새로운 phase가 생길 것을 예상할 수 있으나 IR 실험을 통해 한 개의 상으로 존재함을 확인했다. 또한 IR 실험을 통해 MnF₂에서 Mn이 받는 결정장의 세기는 Dq의 단위로 크기는 831 cm⁻¹임을 알 수 있었다.

순수 MnF₂와 단결정 MnF₂(1.5% EuF₃)의 PL 측정 결과, EuF₃ 첨가에 의해 나타나는 PL의 peak은 기존의 에너지 준위 계산 결과와 비교하여 Eu이 Eu³⁺ 상태로 존재할 때의 f-d 전이에 의해 나오는 것임을 알 수 있었다. 이는 온도에 따른 PL의 세기 측정 결과를 통해 Eu³⁺의 f-d 전이에 의한 peak임을 재확인했다. 따라서 MnF₂에 EuF₃를 첨가하면 Mn이 Eu으로 치환될 때 Eu이 +3가로 존재함을 확인했다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 한-러 협력연구(2006-8-1005)의 일환으로 수행되었음을 밝힌다.

참고문헌

- [1] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7th Ed., Wiley (1996) p. 467.
- [2] P. Dufek, K. Schwarz, and P. Blaha, Phys. Rev. B, **48**, 12672(1993).
- [3] 이준영, 남균, 김철구, 한국자기학회지, **16**, 261 (2006).
- [4] Ibério de P. R. Moreira, R. Dovesi, C. Roetti, Victor R. Saunders, and R. Orlando, Phys. Rev. B, **62**, 7816 (2000).
- [5] R. L. Melcher, Phys. Rev B, **2**, 733 (1970).
- [6] B. A. Wilson and W. M. Yen, Phys. Rev. B, **19**, 4238 (1979).
- [7] J. W. Stout, J. Chem. Phys., **31**, 709 (1959).
- [8] A. G. Banskchikov, S. V. Gastev, M. Ichida, A. Nakamura, H. Ofuchi, N. S. Sokolov, M. Tabuchi, Y. Takeda, N. L. Yakovlev, and M. V. Zamoryanskaya, J. Lumin., **87-89**, 519-521 (2000).
- [9] R. E. Dietz, A. E. Meixner, H. Guggenheim, and A. Missetich, J. of Lumin., **1-2**, 279 (1970).
- [10] R. W. Alexander, Jr. A. E. Hughes, and A. J. Sievers, Phys. Rev. B, **1**, 1563 (1970).
- [11] J.-S. Kang, K. Nahm, C. K. Kim, C. G. Olson, J. Pelzl, J. H. Shim, and B. I. Min, Phys. Rev. B, **66**, 075108 (2002).
- [12] L. E. Orgel, J. Chem. Phys., **23**, 1004 (1955).
- [13] S. Methfessel and D. C. Mattis, Magnetic Semiconductors in Encyclopedia of Physics Vol. **X VIII/1**, Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg. New York, (1968) p. 30.
- [14] P. Dorenbos, J. Lumin., **104**, 239 (2003).

Photoluminescence of the Single Crystal MnF₂ (1.5% EuF₃)

Soon Hyuk Kwon and Kyun Nahm*

Department of Physics, College of Liberal Arts and Sciences, Yonsei University, Wonju 220-710, Korea

Chul Koo Kim

Institute of Physics and Applied Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 15 January 2007, in final form 12 February 2007)

The IR (Infra-Red) spectrum and PL(Photoluminescence) of the antiferromagnetic pure MnF₂ and the single crystal MnF₂ (1.5% EuF₃) with the rutile structures were measured. The detailed analysis of the measured PL data showed the differences of the optical property between the single crystal MnF₂ (1.5% EuF₃) and the pure MnF₂. It was found that the additional PL peak by the doping of the EuF₃ in MnF₂ is originated from the f-d transition of Eu³⁺ from the temperature dependent intensity measurement.

Keywords : single crystal MnF₂ (1.5% EuF₃), photoluminescence, infra-red, optical property, absorption spectrum