

산소 결함이 ZnGa₂O₄:Mn 형광체 발광 특성에 미치는 효과



Effect of Oxygen Defects on Luminescent Characteristics of ZnGa₂O₄:Mn Phosphors

박용규*, 한정인*, 광민기, 한종근, 주성후

(Yong-Kuy Park, Jeong-In Han, Min-Gi Kwak, Jong-Keun Han, Sung-Hoo Ju)

Abstract

Low voltage phosphor, ZnGa₂O₄:Mn, was synthesized and sintered at the high temperature in Ar or vacuum. By XRD analysis, it is confirmed that poly crystalline ZnGa₂O₄:Mn solid solution was formed. From EPMA analysis of the samples prepared in Ar and vacuum, the change of oxygen content was investigated and as a result, it was observed that the oxygen amounts were reduced in ZnGa₂O₄:Mn prepared in vacuum. It caused the deficiency in oxygen amounts in the phosphor and then consequently, it results in the formation of the energy level near 513 nm. It contributes to the improvement of the brightness of ZnGa₂O₄:Mn.

Key words(중요 용어) : ZnGa₂O₄:Mn, Phosphor(형광체), Oxygen Defect(산소 결함)

1. 서 론

ZnGa₂O₄ 형광체는 높은 전기 전도성과 저 진공 하에서 안정성 때문에 저 전압 구동 표시 소자용 형광체로 유력시되어 많은 연구가 이루어지고 있다.^{1,2)} ZnGa₂O₄는 DC 30 V에서 구동하였을 경우에 0.7 lm/W의 효율을 나타내고, 고온에서 동작하였을 경우에 수명 시간이 매우 길고 안정되어 있는 것으로 보고되고 있다.³⁾ ZnGa₂O₄는 ZnO와 Ga₂O₃의 화합물로서 spinel 구조를 이루고 있고, 에너지 띠 간격이 약 4.4 eV로서 첨가된 물질이 없는 경우에 ZnGa₂O₄ 자체 활성화에 의한 청색 발광을 보이고 있다.⁴⁾ 또한 ZnGa₂O₄에 Mn이 첨가되면 510 nm를 주된 peak로 하는 녹색 발광 형광체로서 널리 알려져 있는 물질이다.^{5,6)} 현재까지 ZnGa₂O₄ 형광체에 관한 연구는 시료의 제작 조건 및 음극선 발광 스펙트럼 분석 등의 기본적인 현상에 관하여는 보고되고 있으나, 실용화를 위한 휘도 향상의 노력은 부족한 상태이다. 따라서 발광 세기에 영향

을 미치는 발광 기구 해석과 형광 모체의 결함 특성에 관한 연구를 필요로 한다.

본 연구에서는 ZnO와 Ga₂O₃ 분말을 1:1의 몰 비로 혼합하고 여기에 Mn을 첨가하여 Ar 이나 진공 분위기에서 소성하여 ZnGa₂O₄:Mn을 합성하였다. 제작된 ZnGa₂O₄:Mn의 발광 스펙트럼, 표면 사진 및 성분비를 측정하여 산소의 성분 변화가 발광 특성에 미치는 영향에 관하여 규명하고자 하였다. 또한 저온의 photoluminescence(PL) 스펙트럼으로부터 Mn 주위의 대칭성이 발광 스펙트럼에 미치는 영향에 대하여 설명하였다.

2. 실험

시료의 제작은 ZnO (99.999%)와 Ga₂O₃ (99.999%) 분말을 1:1의 몰 비로 1 시간 동안 혼합한 후 1 ton/cm²로 가압하여 ZnGa₂O₄ 펠렛을 제작하였다. 펠렛은 전기로를 이용하여 Ar을 200 cc/min으로 흘리면서 상온에서 700 ℃까지는 분당 10 ℃씩 올리고 그 이상의 온도에서는 분당 5 ℃씩 올려 900 - 1500 ℃의 온도에서 10 시간 동안 유지시킨 후 10 ℃/min으로 상온까지 내리는 방법으로 ZnGa₂O₄ 시료를 제작하였다. 또한 진공 분위

* : 전자부품종합기술연구소(KETI) 부품연구1팀
접수일자 : 1996년 8월 1일
심사완료 : 1996년 9월 21일

기에서 펠렛을 소성하기 위하여 한쪽이 밀봉된 석영관에 펠렛을 넣고 10^6 torr의 진공으로 배기한 후 봉입하여 Ar 분위기에서 제작한 시료와 동일한 방법으로 온도를 조절하여 시료를 제작하였다. $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 형광체는 ZnO 와 Ga_2O_3 분말을 1:1로 혼합한 것에 Mn (99.9%, 금속 분말)을 0.001 - 0.01 몰 첨가하여 위에서와 동일한 방법으로 시료를 제작하였다.

ZnGa_2O_4 의 결정성을 조사하기 위하여 X-선 회절기를 이용하여 X-선 회절 무늬를 측정하였다. 이 때 사용한 X-선의 파장은 1.54 Å인 Cu K α 선이고, 회절각 2θ 는 20° 에서 60° 까지 주사하여 얻은 회절 무늬를 관측하였다. PL 스펙트럼을 측정하기 위한 광원으로는 0 - 500 W까지 가변할 수 있는 수은등을 이용하였고, 이를 253.7, 289, 313, 334 및 365 nm의 필터를 사용하여 여기 광원의 파장을 조절하였다. 발광된 빛은 분광기로 분광하여 광 증배관으로 받아 신호를 광자 계수기에 연결하여 처리하였다. PL의 저온 측정은 9 K까지 내릴 수 있는 Cryostat 저온 장치를 사용하여 9 K까지 온도를 내린 후 다시 가열하여 상승시키는 방법으로 온도를 조절하였다. 각 조건에서 제작한 ZnGa_2O_4 의 발광 휘도는 Minolta 사의 Model CS-100을 이용하여 측정하였고, 결정 입자의 크기와 성분비는 주사형 전자 현미경(SEM)과 EPMA를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 논의

그림 1은 ZnGa_2O_4 의 결정성을 알아보기 위하여 X-선 회절기를 이용하여 측정한 X-선 회절 무늬를 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 ZnGa_2O_4 에 대한 JCPDS 카드를 기준으로 하여 그린 입방 구조의 X-선 회절 무늬이고, 그림 1(b)는 ZnO 와 Ga_2O_3 분말을 1:1로 혼합하여 10 시간 동안 소성한 시료의 X-선 회절 무늬이며, 그림 1(c)는 ZnGa_2O_4 에 Mn을 첨가하여 소성한 시료의 X-선 회절 무늬를 나타낸 것이다. 그림 1(b)와 (c)에 나타낸 X-선 회절 무늬는 그림 1(a)에서 보여진 ZnGa_2O_4 의 X-선 회절 무늬와 일치하는 것으로 (311), (511)과 (220) 등의 peak를 갖는 다결정으로 성장하였음을 볼 수 있다. Mn을 첨가하지 않은 경우와 Mn을 첨가하여 소성한 경우에 모두 완전한 ZnGa_2O_4 의 고용체를 형성하고 있음을 알 수 있다.

Ar 분위기와 진공 분위기에서 소성한 ZnGa_2O_4 와 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 을 상온에서 253.7nm의 파장으로 여기 시켜 발광되는 PL 스펙트럼들을 그림 2에 나

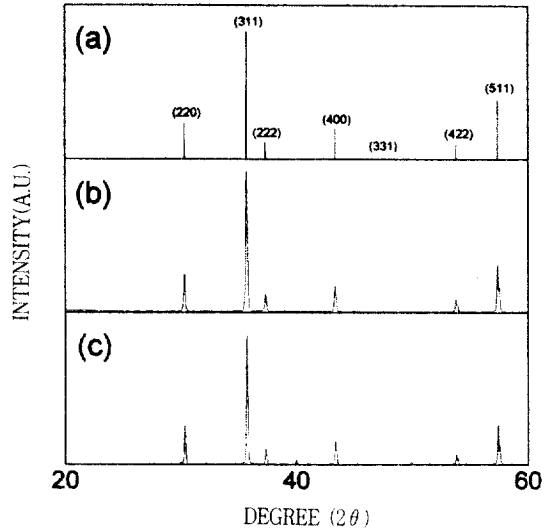


그림 1. (a) ZnGa_2O_4 의 JCPDS card, (b) ZnGa_2O_4 와 (c) $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 분말에 대한 X-선 회절무늬.

Fig. 1. X-ray diffraction pattern for (a) JCPDS card of ZnGa_2O_4 , (b) ZnGa_2O_4 and (c) $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ powder.

타내었다. Ar 분위기에서 소성한 ZnGa_2O_4 는 세기가 매우 약하고 반폭폭이 넓은 100 nm 이상의 발광 스펙트럼을 나타내고, 진공 분위기에서 소성한 ZnGa_2O_4 는 Ar 분위기에서 소성한 시료와 유사한 형태의 발광 스펙트럼을 보이나 세기가 향상된 발광을 보이고 있다. 이와 같은 ZnGa_2O_4 의 발광은 자체 활성화에 기인되어 발광되는 것으로 널리 알려져있다.⁴⁾ ZnGa_2O_4 에 Mn을 첨가하여 Ar 분위기에서 소성한 경우의 발광 스펙트럼은 504 nm를 중심으로 하는 발광 peak를 나타내고, 진공 분위기에서 소성한 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 의 발광 스펙트럼은 509 nm를 중심으로 하는 강한 발광 peak를 나타낸다. 504 nm와 509 nm를 중심으로 하는 강한 녹색 발광 peak는 형광 모체인 ZnGa_2O_4 로부터 Mn 이온으로의 에너지 천이에 의하여 Mn^{2+} 이온의 에너지 준위로 부터 발광하는 것으로 설명할 수 있다.⁶⁾ Mn을 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우 모두 진공 분위기에서 제작된 시료는 Ar 분위기에서 제작된 시료와 비교할 때 휘도가 향상되고, $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 의 경우에 발광 peak는 Ar 분위기에서 504 nm peak가 진공 분위기에서 509 nm peak로 변화하는 것처럼 보인다. 이 현상은 Ar 및 진공 분위기에서 제작된 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ 의 발광 스펙트럼은 모두 504 nm와 513 nm인 두 개의 peak로

구성되어 있으나, Ar 분위기에서 소성한 경우 주된 발광의 위치가 504 nm peak를 갖고, 진공 분위기에서 소성한 경우는 513 nm peak의 세기가 증가하게 되어 504 nm와 513 nm peak의 중첩으로 주된 위치가 변화하는 것처럼 보이고, 513 nm peak의 세기가 증가된 만큼 휘도가 증가하게 된다. 발광 스펙트럼에서 peak가 분리되는 현상은 다음과 같이 설명된다. Mn을 ZnGa₂O₄에 첨가할 경우에 2+ 이온으로 존재하게 되고 Zn 자리를 대체하여 들어가므로^{6,7)}, Mn 이온을 둘러싸고 있는 이온들은 사면체를 이루는 부분적인 대칭성을 가지게 된다. 따라서 Mn²⁺ 이온이 형성하는 3d에 위치한 전자의 바닥 상태인 ⁶A₁의 에너지 준위는 결정장이 변화된 형광 모체와의 상호 작용으로 분리되고, 여기된 전자가 ⁴T₁ 준위에서 두개로 분리된 ⁶A₁ 에너지 준위로 천이되면서 두개의 peak로 분리된다. 이때 분리된 각 에너지 준위로의 천이 확률은 형광 모체에 의하여 결정되므로, 형광 모체의 변화는 각각의 천이 확률을 변화시켜 각 peak의 세기가 변화하게 된다.

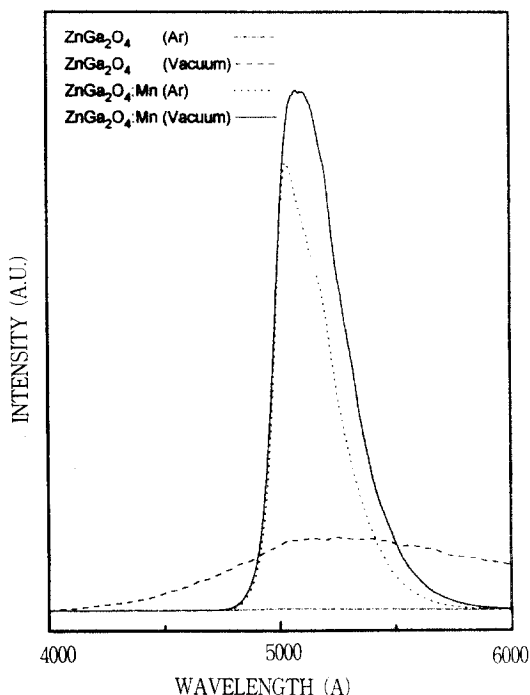


그림 2. Ar 및 진공분위기에서 소성된 ZnGa₂O₄와 ZnGa₂O₄Mn의 PL 스펙트럼.

Fig. 2. Photoluminescence spectra of ZnGa₂O₄ and ZnGa₂O₄Mn phosphor sintered in Ar and vacuum.

진공분위기에서 제작된 시료의 발광 휘도가 향상되는 원인을 알아보기 위하여 Ar 및 진공 분위기에서 제작한 시료에 대하여 EPMA를 이용하여 성분의 조성비를 측정하였다. Ar 분위기에서 소성한 ZnGa₂O₄는 Zn : Ga : O의 원자비가 14.2 : 28.9 : 56.9로 측정되었다. ZnGa₂O₄의 이론적인 원자 조성비가 1 : 2 : 4의 비율로 조성될 때 원자비는 14.3 : 28.6 : 57.1로 구성된다. 이론적인 원자의 조성비와 Ar 분위기에서 제작된 시료의 조성비를 비교할 때 조성비가 거의 일치하고 있다. 반면에 진공 분위기에서 소성한 시료는 18.5 : 37.4 : 44.1로 이론적인 조성비와 많은 차이를 보이고 있다. Ga/Zn을 보면 경우에 2 정도로 조성비가 이론치와 거의 일치하고 있다. O/(Zn+Ga)는 Ar 분위기에서 소성한 경우에는 1.32인 반면 진공 분위기에서 소성한 경우는 0.79로 이론치인 1.33과 비교하여 볼 때 Ar 분위기에서 소성한 시료는 별다른 변화가 없으나, 진공 분위기에서 소성한 시료는 산소가 현저히 감소하는 것을 보이고 있다. 이것으로 부터 Ar 분위기에서 소성한 시료는 거의 환원이 일어나지 않으나, 진공 분위기에서 소성된 시료는 환원이 일어나고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 주사형 전자 현미경으로 Ar 및 진공 분위기에서 제작된 시료의 표면 사진을 촬영한 것이다. 그림 3(a)는 Ar 분위기에서 소성한 것이고 그림 3(b)는 진공 분위기에서 소성한 것이다. 그림 3(a)와 (b)를 비교하여 보면 Ar 분위기에서 제작된 시료는 결정의 크기가 작고 조밀하게 분포되어 있으나 진공 분위기에서 제작한 경우에는 결정의 크기가 2 μm로 크게 성장되었음을 볼 수 있다. EPMA와 주사형 전자 현미경의 결과로부터 진공 분위기에서 제작된 시료는 ZnGa₂O₄ 형광 모체내 산소가 감소하여 조성이 변화되고 결정 크기가 2 μm로 성장하게 된다. 이 결과는 진공 분위기에서 제작된 시료의 산소 결함으로 인하여 513 nm의 발광 준위가 효율적으로 발광에 기여하게 되어 휘도가 증가하는 것으로 설명된다. 그러나 Ar 분위기에서 결정의 크기에 따른 발광 휘도의 변화를 관측하기 위하여 소결 온도 및 시간을 증가시켜 5 μm 정도로 성장된 시료를 얻을 수 있었으나, 산소의 함량 변화나 발광 휘도의 향상은 관측 되지 않았다.

그림 4는 ZnGa₂O₄에 첨가된 Mn의 함량이 변화함에 따라 변화되는 발광 휘도를 그린 것이다. 첨가된 Mn의 몰 비가 증가함에 따라 발광의 휘도가 증가하여 Mn량이 0.003 몰 분당에서 최대의 휘도를 나타내고, 0.003 몰보다 많은 양이 첨가되면 발

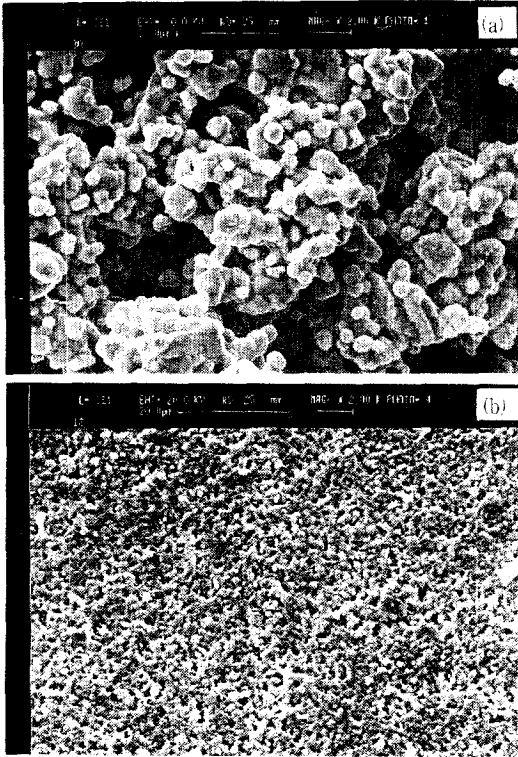


그림 3. (a) Ar 과 (b) 진공 분위기에서 소성된 ZnGa₂O₄:Mn 형광체의 주사형 전자 현미경 사진.

Fig. 3. SEM photograph of ZnGa₂O₄:Mn phosphor sintered with (a) Ar and (b) vacuum.

광의 세기는 감소하는 경향을 보인다. Mn 량이 0.003 몰보다 많이 첨가된 경우에 발광 세기가 감소하는 것은 "concentration quenching"에 의하여 나타난 결과이다.⁶⁾ 첨가된 Mn의 농도가 증가함에 따라 활성제의 밀도가 점차 증가하게 되어 발광 천이 확률이 증가하게 되므로 일정 범위까지는 발광 휘도가 증가하게 된다. 그러나 Mn의 농도가 보다 증가하게 되면 에너지 천이 확률이 발광 확률을 초과하게 되어 여기 에너지를 하나의 활성제 이온으로 부터 다른 활성제 이온으로 이동하게 되어 발광을 저해하는 요인으로 작용하게 되므로 발광의 세기를 감소시키는 요인으로 작용한다.

그림 5는 진공 분위기에서 제작된 ZnGa₂O₄:Mn 형광체의 온도 변화에 따른 PL 스펙트럼을 측정된 결과이다. 진공 분위기에서 제작된 ZnGa₂O₄:Mn의 PL 스펙트럼은 온도 변화에 따라 상온(300 K)에서는 509 nm를 중심으로 하나의 peak처럼 보이던 것이 저온(9 K)으로 내려감에 따라 504 nm와 513

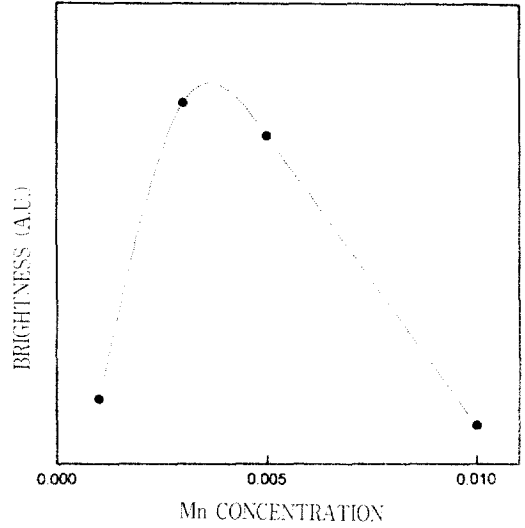


그림 4. Mn 농도 변화에 따른 ZnGa₂O₄:Mn의 발광 휘도.

Fig. 4. Brightness of ZnGa₂O₄ as a function of Mn concentration.

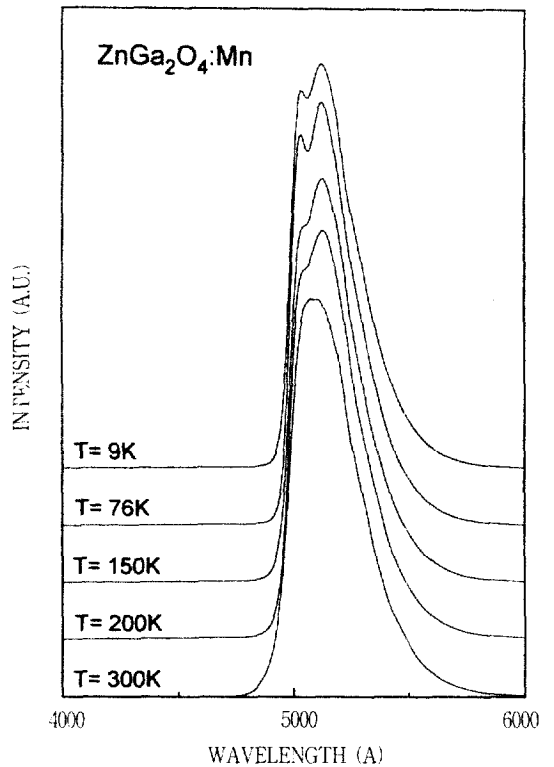


그림 5. 진공 분위기에서 소성된 ZnGa₂O₄:Mn 형광체의 온도 변화에 따른 PL 스펙트럼.

Fig. 5. Photoluminescence spectra at various temperature of ZnGa₂O₄:Mn phosphor sintered in vacuum.

nm로 peak가 명확하게 분리됨을 볼 수 있다. Ar 분위기에서 제작된 시료는 저온으로 내려감에 따라 약간의 peak 분리 현상을 나타내고는 있으나, 진공 분위기에서 제작된 경우와 비교하면 peak 분리 현상이 미약하다.

그림 6은 진공 봉입하여 소결한 시료의 온도를 9 K로 유지한 상태에서 수은 등에서 나오는 빛을 253.7, 289, 313, 334 와 365 nm의 필터를 사용하여 여기 파장을 변화시켜 PL 스펙트럼을 측정함으로써 세기를 규격화하여 그린 것이다. 9 K에서 여기 파장을 변화시키기에 따라 스펙트럼들의 모양이 변화되는 것을 볼 수 있다. 365 nm의 파장으로 여기시킨 경우 513 nm를 주된 발광 peak로 나타나고 있으나 여기서 파장이 점차 단파장으로 이동함에 따라 발광 스펙트럼은 504 nm의 발광 peak의 세기가 점차 증가하게 되어 504 nm와 513 nm의 peak로 분리되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기 파장이 단파장으로 변화됨에 따라 장파장 일대와 비교하여 보다 깊은 준위에 위치한 전자가 여기되어 단파장의 발광에 효과적으로 기여하게 된다. 따라서 Mn의 발광 준위인 504 및 513 nm의 발광은 단파장으로 여기 에너지를 변화시키기에 따라 504 nm의 발광 세기가 513 nm의 발광 세기보다 증가하게 된다. Ar 분위기에서 제작된 시료에 대하여도 여기 파장을 변화시켜 발광 스펙트럼을 관측한 결과 진공 봉입하여 제작한 시료와 거의 유사한 형태로 나타났다.

그림 5와 6의 결과를 종합하여 볼 때 온도 변화 및 여기 에너지에 따른 스펙트럼은 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 그림 5에서 스펙트럼은 온도가 내려감에 따라 발광을 저해하는 요인으로 작용되는 격자 진동 에너지가 감소하여 Mn 이온에 의한 513 nm 발광의 peak가 증가하게 된다. 이와 같은 결과로 504 nm와 513 nm의 발광 스펙트럼이 명확히 분리되어 관측된다. 반면에 Ar 분위기에서 제작된 시료의 경우는 구성 원자들의 함량비가 정량적으로 조성되어 격자 진동 에너지에 의한 발광의 영향을 거의 받지 않으므로 진공 분위기에서와 같은 peak 분리 현상은 나타나지 않는다. 그림 6의 저온 PL 스펙트럼에서 여기 에너지가 증가함에 따라 두 개의 peak로 분리되는 것은, 여기 에너지가 감소하게 되면 513 nm의 천이 확률에는 영향을 미치지 않으나 504 nm의 천이 확률이 감소하게 되어 peak의 분리는 관측되지 않고 peak의 중심이 504 nm로 부터 509 nm로 점차 이동된다. 이것은 여기 에너지가 감소하게 되면 504 nm의 발광 세기가 감소되고 513 nm 위치의 발광 세기는 감소되

지않고 있어 두개의 peak가 중첩되는 최대값의 위치로 변화하게 되어 504 nm 와 513 nm로 점차 이동되는 것을 관측된다.

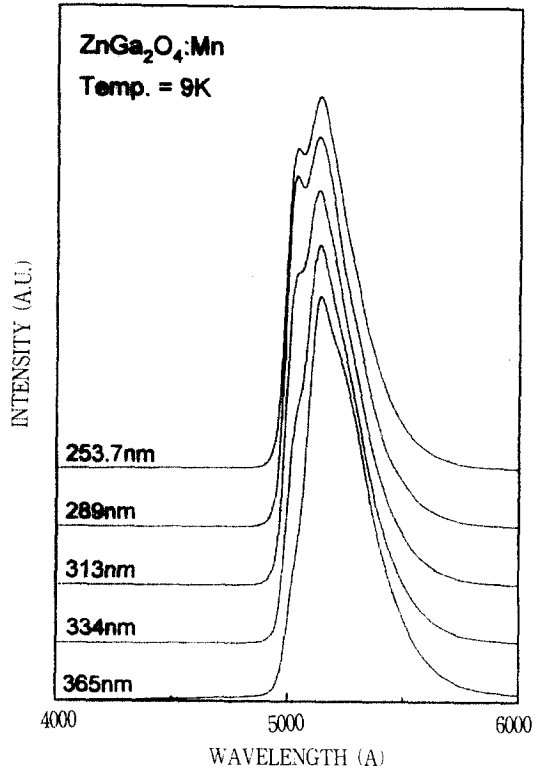


그림 6. 진공 분위기에서 소성된 $ZnGa_2O_4:Mn$ 형광체의 여기파장 변화에 따른 PL 스펙트럼.

Fig. 6. Photoluminescence spectra at various excitation wavelength of $ZnGa_2O_4:Mn$ phosphor sintered in vacuum.

결론적으로, $ZnGa_2O_4$ 는 단위 세포당 Zn 이온을 둘러싸고 있는 64개의 사면체 구조와 Ga 이온을 둘러싸고 있는 32개의 팔면체 구조가 혼합된 spinel 구조를 이루고 있다. 따라서 Mn을 첨가할 경우에 Mn이 Zn 자리를 대체하여 들어가게 되면 주위의 원자와 사면체의 구조를 이루게 되고, Ga 자리를 Mn이 대체하여 들어가면 팔면체의 구조를 형성하게 된다.²⁾ $ZnGa_2O_4$ 에 Mn을 첨가할 경우에 대부분의 Mn은 2- 이온으로 존재하게 되고 Zn 자리를 대체하여 들어간다.^{5,7)} 그러므로 Mn은 $ZnGa_2O_4$ 형광모체 내에서 사면체의 site Symmetry를 형성하게 된다. PL 스펙트럼에서 나타난 510 nm를 중심으로 하는 발광 peak는 Mn^{2+} 이온이 형

성하는 3d에 위치한 전자의 4T_1 준위에서 6A_1 준위로의 천이에 의하여 나타나는 것이다.⁸⁾ $ZnGa_2O_4$ 모체의 Zn 자리에 이온 반경이 다른 Mn이 들어감에 따라 주위의 원자들과의 Coulomb's 힘이 변화되어 에너지 준위가 변화하게 된다. 따라서 결정장의 영향으로 바닥 상태의 6A_1 의 에너지 준위는 두개로 분리되고, 여기된 전자가 4T_1 준위에서 분리된 6A_1 에너지 준위로 천이되면서 두개의 분리된 peak를 나타낸다. 두개로 분리된 504 nm와 513 nm peak 사이의 에너지 차이는 43 meV 정도를 나타내고 있으며, 이러한 peak의 분리는 Mn이 Zn 자리에 위치하게 되어 사면체의 site symmetry 구조인 C_{3v} 를 형성하게 되어 나타난 결과로 볼 수 있다.

4. 결 론

ZnO와 Ga_2O_3 powder를 1 : 1의 몰비로 혼합하여 $ZnGa_2O_4$ 형광체를 합성하였고, 동일한 방법으로 Mn의 몰비를 변화시켜 Ar과 진공 분위기에서 $ZnGa_2O_4:Mn$ 형광체를 제작하였고, XRD를 측정함으로써 $ZnGa_2O_4$ 의 고용체가 형성되었음을 확인하였다. EPMA를 분석한 결과 Ar 분위기에서 제작한 시료는 산소의 함량이 57 % 정도인 반면 진공 분위기에서 제작한 시료는 산소의 함량이 44 % 정도로 구성됨을 확인하였다. 따라서 서로 다른 분위기에서 시료를 제작하여 산소 조성비를 제어할 수 있었다. 또한 표면 사진을 측정하여 진공 분위기에서 소성한 시료의 결정 크기가 2 μm 정도로 증가되었음을 확인하였다. 성분 분석과 표면 사진의 결과로부터 진공 분위기에서 제작된 시료는 $ZnGa_2O_4$ 형광 모체내 산소가 감소하게 되면, 결정의 크기가 2 μm 정도로 성장하게 되고 발광 휘도도 증가하게 된다. 저온 PL 측정으로 부터 스펙트럼이 504 nm를 중심으로 하는 것과 513 nm를 중심으로 하는 것으로 분리되어 있다는 것을 확인하

였고, 이러한 것은 Mn이 $ZnGa_2O_4$ 의 Zn를 대체하여 사면체의 site symmetry로 형성됨으로서 나타난 결과로 43 meV 정도의 에너지 차이를 가지고 분리된다. 결론적으로 $ZnGa_2O_4:Mn$ 형광체내의 산소 성분 결핍은 513 nm 발광을 효율적으로 일어나게 하여 발광의 세기를 증가시키는 요인으로 작용됨을 알 수 있다.

※ 본 논문은 정보통신부에서 수행하는 96년도 FED 국책기술개발 사업의 연구비로 수행되었습니다.

Reference

1. T. Omato, N. Ueda, K. Ueda and H. Kawazoe, Appl. Phys. Lett., 64(9), 1077 (1994).
2. I. J. Hsieh, K. T. Chu, C. F. Yu and M. S. Feng, J. Appl. Phys. 76(6), 3735(1994).
3. I. J. Hsieh, M. S. Feng, K. T. Kuo, and P. Lin, J. Electrochem. Soc., 141(6), 1617(1994).
4. S. Itoh, H. Toki, Y. Sato, K. Morimoto and T. Kishino, J. Electrochem. Soc., 138(5), 1509(1991).
5. W. Jia, H. Liu, S. Huang, X. Wu, L. Lu and W. M. Yen, J. Electrochem. Soc. 142(5), 1637(1995).
6. L. E. Shea, R. K. Datta and J. J. Brown, Jr., J. Electrochem. Soc., 141(7), 1950(1994).
7. L. E. Shea, R. K. Datta and J. J. Brown, Jr., J. Electrochem. Soc., 141(8), 2198(1994).
8. T. K. Tran, W. Park, J. W. Tomm, B. K. Wagner, S. M. Jacobsen, C. J. Summers, P. N. Yocom and S. K. McClelland, J. Appl. Phys., 78(9), 5691(1995).

저자소개



박용규

1961년 9월 15일생. 1984년 2월 단국대학교이공대학 물리학과 졸업(이학사). 1986년 2월 중앙대학교대학원 물리학과 졸업(이학석사). 1995년 2월 중앙대학교대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1986 - 1992 (주)퍼시픽콘트롤즈 기술연구소

차장. 1995 - (현) 전자부품종합기술연구소 부품연구1팀 선임연구원



한중근

1969년 11월 28일생. 1995년 2월 단국대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학사). 1995 - (현) 단국대학교 대학원 석사과정. (현) 전자부품종합기술연구소 연구생



한정인

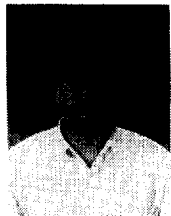
1961년 1월 19일생. 1983년 2월 연세대학교 금속공학과 졸업(학사). 1985년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1989년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사). 1989 - 1992 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 1992 - (현)

전자부품종합기술연구소 선임연구원.



주성후

1967년 11월 15일생. 1990년 2월 중앙대학교 물리학과 졸업(학사). 1992년 2월 중앙대학교대학원 물리학과 졸업(이학석사). 1992 - (현) 중앙대학교 대학원 박사 과정. 1995 - (현) 전자부품종합기술연구소 연구원.



곽민기

1968년 3월 1일생. 1991년 2월 인제대학교 물리학과 졸업(학사)

1996년 2월 경북대학교대학원 물리학과 졸업(이학석사). 1996 - (현) 전자부품종합기술연구소 연구원.