

Reaction Sintering에 의한 ZnO : Al₂O₃ 합성물의 구조 및 광학적 특성

강병모*, 박계춘**, 유용택*

The Structural and Optical Properties of ZnO : Al₂O₃
Compound by Reaction Sintering

Byeong-Mo Kang*, Gye-Choon Park**, Yong-Tek Yoo*

요 약

ZnO 분말과 Al₂O₃ 분말을 1 : 1의 mole 비로 ball milling 시킨 후, 압착하여 펠렛을 제작하였다. 소성시 분위기를 진공으로 유지하기 위하여 각각 3×10^{-5} Torr의 진공도로 석영관에 봉입한 다음 900°C ~ 1200°C로 소성하였다.

실험결과, 900°C ~ 1100°C까지는 ZnO, Al₂O₃ 및 ZnAl₂O₄의 혼합구조를 보이다가 1200°C에서 (311), (220)면등의 주된 피크를 갖는 다결정으로 성장하여 ZnAl₂O₄ 삼원화합물의 구조가 확인되었고, 전자현미경촬영에 의해 화합물의 결정화된 입자들이 관찰되었다. 광흡수측정에 의해 에너지 밴드갭은 약 4.75 eV로 계산되었으며, PL 스펙트럼은 소결온도의 상승에 따라 단파장영역으로 이동하여, 1200°C에서 430nm 부근에서 발광피크를 보였다.

Abstract

ZnO and Al₂O₃ powder were weighed in 1 : 1 mole ratio and ball-milled in ethanol for 3 h. Dried mixture were pressed and then sintered at 900°C ~ 1200°C for 3 h in vacuum (3×10^{-5} Torr).

According to XRD, remnant ZnO and Al₂O₃ not converted to ZnAl₂O₄ were observed up to 1100°C, which were completely changed to ZnAl₂O₄ ternary compound at 1200°C. Optical bandgap is calculated at 4.75 eV. With increasing sintering temperature, PL spectrums shifted to shorter wavelengths and are appeared 430nm at 1200°C.

1. 서 론

II-VI족 화합물, III-V족 화합물, 천이금속 및 희토류원소등은 발광재료로서 이미 많은 연구들이 체계적으로 수행되고 있다. 그러나, 이러한 형광물질 중에서 ZnS, CdS등의 기존의 황화물계 형광체는 특성의 우수

함에도 불구하고 황 등의 가스방출로 인해 소자의 수명이 단축되는 등의 많은 문제점을 안고 있다. 이와 비교하여 최근 화학적으로 안정하여 방출가스가 거의 없고, 전기전도성이 우수한 ZnGa₂O₄와 같은 산화물계 형광체의 연구^{1,2}가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 ZnGa₂O₄ 형광체는 자체활성화에 의한 정색발광이 가능하고 첨가불순물의 종류에 따라 녹색 및 적색발광이 가능하다고 보고되고 있다. 그러나, ZnGa₂O₄ 화합물의 Ga과 이온반경이 매우 유사하고 화학적으로 같은 III_B

* 전남대학교 공과대학 전자공학과 (Dept. of Electronics Chonnam Nat'l Univ.)

** 목포대학교 공과대학 전기공학과 (Dept. of Elec.

Eng. Mokpo Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1998년 4월 8일>

족인 Al을 이용한 ZnAl₂O₄ 화합물에 대한 연구^[3-5]는 아직까지는 미흡한 단계이다.

ZnAl₂O₄ 화합물에 대한 그 동안의 연구를 살펴보면, Wan-Shick Hong 등^[4]은 단상의 ZnAl₂O₄ 분말과 ball milling 및 화학적 침전을 이용하여 각각 제작한 ZnO와 Al₂O₃ 혼합물의 소결반응에 의한 특성을 비교하여 보고하였다. 또한, M. V. Zdujic 등^[5]은 ZnO 분말과 Al₂O₃ 분말을 혼합하여 ball milling한 다음, 이 때 발생한 기계화학적 에너지에 의해 ZnAl₂O₄ 화합물이 형성되어 가는 현상을 연구하였다. 지금까지 ZnO의 에너지 밴드갭은 약 3.2 ~ 3.3 eV^[6], Al₂O₃의 에너지 밴드갭은 약 7.4 eV^[7]로 보고된 바 있으며, ZnAl₂O₄와 같은 spinel 구조이면서 형광체로 사용되어지는 ZnGa₂O₄ 에너지 밴드갭은 4.4 eV^[8]로 알려져 있다. 그러나 ZnAl₂O₄의 에너지 밴드갭 값은 보고된 바가 없다.

본 논문에서는 자체발광력, 고휘도, 저전력등의 특성을 갖는 재료의 우선 확보 및 비교적 저가이면서 취급이 용이한 ZnO 분말과 Al₂O₃ 분말을 이용한 산화물계 화합물의 일종인 ZnAl₂O₄ 소결체를 제작하여 그 구조 및 광학적 특성을 조사하였다.

2. 실험

1 : 1 mole 비의 ZnO 분말(미국, CERAC사)과 Al₂O₃ 분말(일본, Shinyo Pure Chemicals사)을 ethanol에 섞어 stirring bar를 이용하여 혼합시킨 다음, 약 200℃에서 1시간 정도 건조시켰다. 건조시킨 후, 혼합물은 ZrO₂ ball(10mφ)을 이용하여, 약 100 rpm 정도의 속도로 milling 하였으며, 이때 ball과 분말의 무게 비는 대략 5 : 1 정도로 하였다. Ball milling된 혼합분말은 막자사발을 이용하여 다시 한번 가볍게 갈았으며, 유압프레스를 이용하여 1 ton/cm²의 압력으로 혼합물 분말을 가압하여 직경 10mm, 두께 2mm의 펠렛을 성형하였다. 제작된 펠렛을 각각 3×10⁻⁵ Torr 정도로 진공봉입한 다음 고온 전기로를 이용하여 진공분위기로 소성하였다. 이때 소성온도에 따른 ZnAl₂O₄의 구조적, 광학적 특성의 변화를 조사하기 위하여, 소성온도를 900℃~1200℃에서 100℃ 간격으로 하였고 소성시간은 3시간으로 고정하였다. 또한 승온시에는 상온에서 500℃까지는 분당 10℃씩, 그 이상에서는 분당 5℃로 하였고, 냉각은 분당 -20℃로 하였다. 그림 1에 본 실험의 시편 제작과정을 나타내었다.

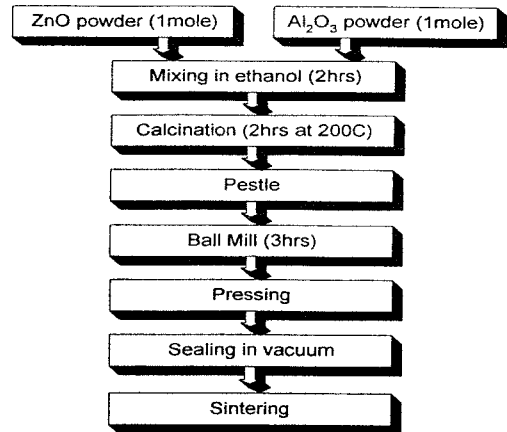


그림 1. 펠렛의 제조과정

Fig. 1. Processing of pellet fabrication

소성된 펠렛의 결정성을 파악하기 위해 X-선 회절 분석(Model D/MAX-2400, Rigaku사)을 하였으며, 측정시 사용한 X-선원은 CuKα₁(파장 1.5405Å), 회절각(2θ)은 20° ~ 80°의 범위에서 조사하였다. 이때 가속전압과 전류는 각각 30kV와 20mA였다. 측정으로부터 얻은 X-선 회절패턴을 JCPDS 카드와 비교하여 결정면들을 결정하였고, Cohen의 방법^[9]을 이용하여 격자상수값을 구하였다.

표면의 미세구조관찰에는 주사전자현미경(JSM 5400, JEOL사)을 이용하였으며, 표면에 수백 Å의 두께로 금을 코팅한 다음, 500배의 배율로 촬영하였다. UV-VIS-NIR Spectro-photometer(U-3501, Hitachi)를 이용하여 광흡수도를 측정하였으며, 측정파장의 범위는 200nm~800nm로 하였다. 광발광특성은 PL 측정장치를 이용하여 조사하였으며, 사용된 여기광원으로는 325nm의 자외선을 발생시키는 He-Cd Laser(LiCONiX, 3650N, USA)가 사용되었다. 방출된 광은 double monochromator(SPEX, 1403, USA)로 분광시킨 다음, GaAs PMT detector (R943-02, USA)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 논의

제작된 소결체의 X-선 회절분석 결과는 그림 2에 나타내었으며, 그림에서 볼 수 있듯이 소성 전에는 ZnO와 Al₂O₃의 피크가 공존하고 있다. 그러나, 900℃로 소성시킨 혼합물에서부터 미약한 ZnAl₂O₄의 피크가 관

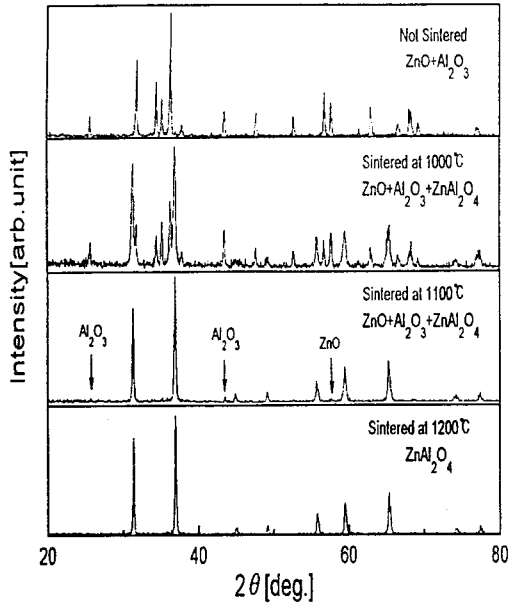


그림 2. 소성온도에 따른 X-선 회절패턴
Fig. 2. XRD patterns at various temperature

측되기 시작하였으며, 온도의 상승에 따라 피크강도가 증가하였다. 이러한 현상은 ZnO와 Al₂O₃사이의 화학반응에 의한 것으로서, 소성온도가 1200°C에 이르르면 강도순으로 2θ가 36.95°, 31.37°, 65.32° 등에서 각각 (311), (220), (440)면 등의 주된 피크를 갖는 다결정으로 성장하여 완전한 ZnAl₂O₄ 화합물이 형성됨을 확인할 수 있었다.

1200°C에서 얻은 X-선 회절분석 결과로부터 참고로 Cohen의 방법⁹⁾을 이용하여 격자상수값을 구한 다음, JCPDS 회절 데이터 카드의 격자상수값과 비교하여 표 1에 나타내었다. 이 결과, 온도별로 제작된 소결체의 격자상수값이 JCPDS 회절 데이터카드의 격자상수값과 거의 일치함을 알 수 있다.

표 1. 1200°C로 소성시킨 ZnAl₂O₄ 화합물의 격자상수값

Table 1. Lattice constant of ZnAl₂O₄ compound sintered at 1200°C

	ZnAl ₂ O ₄ (Spinel Structure)		
	JCPDS Card	Sintered at 1200°C	
	(No.5-669)	Exp. Value	Deviation
a	8.084 Å	8.063 Å	0.013 Å

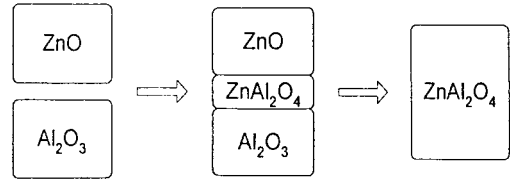


그림 3. ZnO + Al₂O₃ ⇒ ZnAl₂O₄ 반응과정의 표현
Fig. 3. Representation of the reaction process ZnO + Al₂O₃ ⇒ ZnAl₂O₄

Wan-Shick Hong 등¹¹⁾의 연구결과에 의하면, 900°C까지는 ZnO, Al₂O₃ 및 ZnAl₂O₄가 공존하다가 1000°C에 이르면 ZnAl₂O₄ 화합물이 성장됨을 보고하였다. 이 결과는 본 실험과 거의 일치하나, 온도별 성장과정에서 약간의 차이를 보이며, 그 원인은 소결시간을 포함한 제작조건 차이에 비추어 해석된다.

온도가 상승하면 분자들은 그들의 결합을 깨뜨리기에 충분한 에너지를 얻게되며, 새로운 결정을 형성하기 위하여 서로 다른 분자들간에 매우 빠른 반응을 보인다.¹⁰⁾ 이러한 원리에 의하여 Al₂O₃ 결정 내 원자들은 열에너지에 의해 재배열되면서 구조의 변화를 일으키며, 변화된 구조의 내부로 ZnO 분자들이 확산을 일으키게 된다. 초기반응은 표면장력에 의해 distort된 ZnO와 Al₂O₃의 인접면을 통하여 발생하며, 온도가 더욱 상승하게 되면 ZnO 분자는 ZnAl₂O₄ 층을 통과하여 Al₂O₃ 결정내부로 확산된다. ZnAl₂O₄ 화합물은 이러한 현상에 의하여 이루어지며, 이상의 메커니즘을 그림 3에 간략하게 표현했다.

표면의 미세구조를 관찰하기 위하여 소성 전, 900°C 및 1200°C로 소성시킨 후 펠렛의 전자현미경사진을 촬영한 결과를 그림 4에 각각 나타내었다.

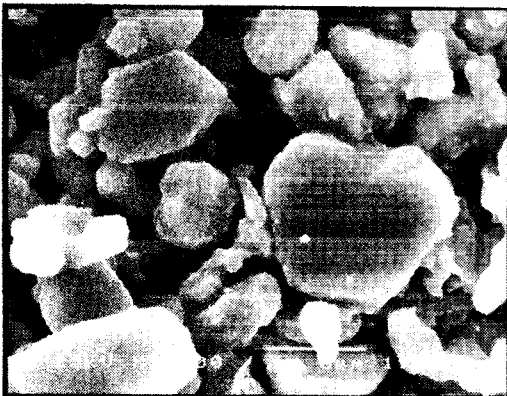
소성시키기 전 그림을 보면 약간의 ZnAl₂O₄ 화합물 입자들이 관찰되어지는데, 이는 calcination 과정에서 발생하는 열에너지에 의해 이미 약간의 결정화가 이루어진 결과임을 알 수 있다. 그러나 X-선 회절분석 결과와 비교하여 보면, 소성 전 펠렛에서는 ZnAl₂O₄의 피크가 발견되지 않았으며, 이는 ZnAl₂O₄의 강도가 ZnO와 Al₂O₃의 강도에 비해 상대적으로 미약하기 때문으로 예측된다. 또한 M. V. Zdujic¹⁵⁾등은 ball milling 과정에서 일어나는 마찰화학작용에 의해 기계화학적 에너지가 발생하여 ZnAl₂O₄ 화합물이 형성됨을 보고하였는데, 본 실험에서도 ball milling에 의한 영향이 ZnAl₂O₄ 화합물의 형성에 다소 작용하였으리라 예측된다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 펠렛의 전자 현미경 사진.

(a) 소성 전, (b) 900°C, (c) 1200°C

Fig. 4. SEM photographs of the pellets.

(a) before sintering, (b) 900°C, (c) 1200°C

일반적으로 소성온도가 높아질수록 결정의 크기는 커지게 된다. 실험결과 온도의 상승에 따라 ZnO와 Al₂O₃ 입자들이 현저하게 줄어들어 관찰되었으며, 상대적으로 ZnAl₂O₄의 입자들의 크기가 커졌음을 확인 할 수 있었다. 또한, 1200°C로 소성시킨 펠렛의 촬영사진에서는 ZnAl₂O₄ 화합물의 결정화된 입자들을 관찰할 수 있으며, 이는 Wan-Shick Hong^[4] 등의 연구결과와 거의 일치한다.

그림 5는 200nm~800nm의 파장영역과 300K의 온도 영역에서 측정된 소결체의 광흡수 스펙트럼이며, 소성온도가 증가할수록 상대적으로 ZnO의 양이 감소하면서 광흡수 세기 또한 감소하는 것을 잘 나타내어 주고 있다. 그러나 Al₂O₃의 에너지 밴드갭에 해당되는 흡수단은 측정영역의 한계를 넘어 나타나지 않았다.

측정된 광학적 에너지 밴드갭의 환산은 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$(\alpha \cdot h\nu)^n \sim (h\nu - E_g) \quad (1)$$

여기서 직접전이형일 경우에는 n=2, 간접 전이형일 경우에는 n=1/2이다. ZnO의 에너지 밴드갭은 직접전이형으로 알려져 있으므로, 입사광의 에너지에 대한 $(\alpha h\nu)^2$ 을 plot한 다음 x축 절편의 값을 외삽법을 이용하여 구하면 에너지 밴드갭을 환산할 수 있다. 이와같은

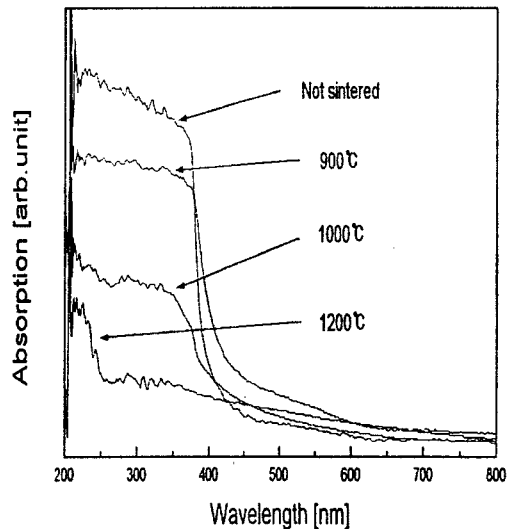


그림 5. 소성온도에 따른 광흡수 스펙트럼

Fig. 5. Absorption spectrums at various temperature

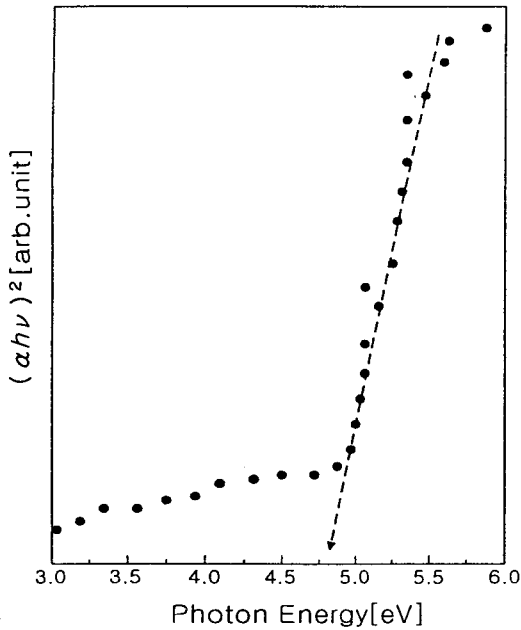


그림 6. 1200°C로 소성시킨 펠렛의 입사광자에너지에 대한 $(ah\nu)^2$ 의 작도

Fig. 6. Plot of $(ah\nu)^2$ vs. the incident photon energy in the pellet sintered at 1200°C

방법을 사용하여 구한 ZnO 분말의 에너지 밴드갭 값은 3.20 eV였다. 또한 그림에서 나타나는 바와 같이 소성 전 혼합물과 900°C ~ 1000°C로 소성시킨 소결체의 광흡수 스펙트럼에서는 ZnO에 해당하는 흡수단만이 관측되어지며, 식 (1)에 의하여 환산된 에너지 밴드갭 값은 3.2~3.1 eV였다. 그러나 1100°C 이상으로 소성시킨 소결체에서는 250nm의 단파장영역에서 새로운 흡수단을 관측할 수 있다. 이것을 X-선 회절분석의 결과와 비교해 보면 ZnAl₂O₄ 화합물의 형성에 기인한 흡수단이라 예측할 수 있으며, 식 (1)을 이용하여 에너지 밴드갭 값을 환산하면 ZnAl₂O₄ 소결체의 광학적 에너지 밴드갭 값은 약 4.75 eV로 계산되었으며, 그림 6에 나타내었다.

광발광특성은 PL 측정장치를 이용하여 상온에서 측정하였으며, 그 파장범위는 350nm~900nm였다. 그림 7은 제작된 소결체의 온도별 PL 스펙트럼이다. 그림에서 보여주는 것처럼 소성 전에는 자외선영역인 385nm와 가시영역인 540nm에서 주된 피크를 나타낸다. 이를 X-선 회절분석결과와 비교하여 보면 ZnO와 Al₂O₃가 구조적으로 공존하고 있으므로, 이로 인해 ZnO의 발광

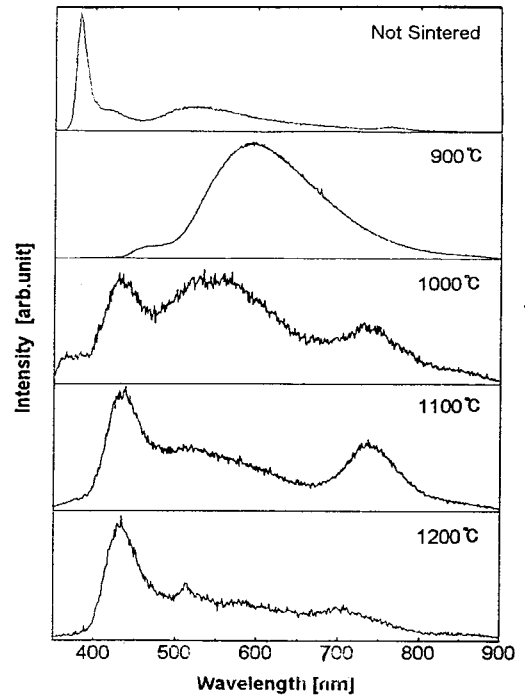


그림 7. 소성된 펠렛의 광발광 스펙트럼

Fig. 7. Photoluminescent emission spectra of sintered pellets

과 Al₂O₃의 발광이 중첩되어 나타나고 있음을 예상할 수 있다.

900°C로 소성한 소결체의 PL 스펙트럼을 살펴보면 385nm의 피크가 소멸되었음을 확인할 수 있으며, 이의 분석을 위해 제작에 사용된 ZnO 분말을 별도로 1000°C에서 소성하여 보았는데, 385nm의 피크가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 온도의 상승에 따라 가시영역(540nm)과 자외선영역(385nm)의 피크가 감소하면서, 385nm의 피크가 장파장대로 이동함을 보고한 R. E. Shrader 등^[11]의 연구와 비교해 보면 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 이로 인해 900°C에서 보여지는 피크의 변화는 ZnO 분말의 소성에 의한 영향의 결과임을 알 수 있다.

그러나 각 온도별 PL 스펙트럼을 비교하여 보면 소성온도의 상승과 더불어 PL 스펙트럼의 피크가 단파장대와 장파장대로 나뉘어 이동함을 볼 수 있다. 이는 ZnAl₂O₄ 화합물 생성단계에서 발생하는 ZnO와 Al₂O₃의 화학적 합성으로 인한 영향으로 보여지며, 1100°C로 소성된 소결체의 PL 스펙트럼에서는 900°C에서 보인

스펙트럼과는 완전히 다른 430nm와 740nm근방의 피크를 관찰할 수 있다. 비교를 위하여 1000°C의 PL 스펙트럼을 살펴보면, 600nm근방에서 피크를 보인 900°C로 소성된 소결체가 1000°C에서는 550nm근방으로 이동하면서 세기가 약해지며, 430nm와 740nm근방에서 새로운 피크가 관찰되었다. 1100°C에 이르러서는 550nm의 피크가 더욱 약해지며 상대적으로 430nm와 740nm근방의 피크들이 뚜렷하게 관찰되었으며, 1200°C가 되면 430nm의 피크만이 관찰되었다. ZnO와 Al₂O₃의 화학적 결합에 의해 ZnAl₂O₄ 화합물이 형성됨은 X-선 회절분석 결과 이미 확인되었으며, 이러한 결정구조의 변화 또한 PL 대역의 변화에 영향을 미친다.^[10] 본 실험에서는 hexagonal 구조의 ZnO와 Al₂O₃가 반응하여 spinel 구조의 ZnAl₂O₄ 화합물로 결정화하는 동안, PL 방출 스펙트럼의 재배열로 인해, 온도가 상승할수록 방출대역이 단파장 대역으로 이동함을 확인하였다.

1100°C에서의 X-선 회절분석 결과에 의하면, ZnAl₂O₄ 화합물의 피크들과 함께 아주 약한 ZnO와 Al₂O₃의 피크들도 관찰된다. 한편 1100°C 소결체의 PL 스펙트럼을 살펴보면 430nm와 740nm근방에서의 피크가 관찰되며, 이는 ZnAl₂O₄ 화합물에 의한 발광스펙트럼이 ZnO와 Al₂O₃의 발광에 의해 대공간에 영향을 받고 있음을 의미한다. 그러나 같은 온도에서의 광흡수는 전혀 다른 새로운 흡수단이 관찰된다. 결과적으로 1100°C의 온도에서 ZnAl₂O₄로 결합되지 못하고 남아있는 소량의 ZnO와 Al₂O₃는 광흡수에는 거의 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다.

이상의 결과는 대기상태에서 소성시킨 ZnAl₂O₄ 화합물의 PL이 온도상승에 따라 장파장대역으로 이동하였던 연구결과^[12]와 큰 차이를 보였으며, ZnS 형광체에 관한 보고에서 물질이 결정화하는 동안 온도, 결정구조, 냉각속도, 가스상태 등 여러 가지 조건에 의해 발광대역이 이동된다고 보고한 S. Rothschild^[13]의 연구결과와 비교하여, 소성시 조건이 다른 가스분위기에 따라 광발광현상이 커다란 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 그러므로 제작조건을 달리한 많은 실험을 통하여 특성을 파악하고, 원인규명을 위한 지속적인 연구가 앞으로 계속되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 실험에서는 비교적 저가이면서 취급이 용이한

ZnO와 Al₂O₃ 분말을 혼합한 다음, reaction sintering을 이용하여 소성온도에 따른 소결체의 구조적특성과 광학적특성을 조사하였다. 소성시 가스분위기는 3×10^{-5} Torr 정도로 하여 진공봉입한 다음 고온 전기로를 이용하였다.

X-선 회절분석결과에 의하면, 1000°C까지의 소성온도에서는 ZnO, Al₂O₃ 및 ZnAl₂O₄가 공존하고 있으나, 1100°C에서는 ZnO, Al₂O₃의 아주 약한 피크가 관찰되었다. 결국 1200°C에서 (311), (220), (440)면 등의 주된 피크를 갖는 다결정으로 성장하여 완전한 ZnAl₂O₄ 삼원화합물을 확인할 수 있었다. 소성 전 펠렛의 전자현미경 사진을 촬영한 결과 calcination 과정에서 발생되는 열에너지에 의하여 이미 약간의 결정화가 이루어졌음을 알 수 있었으며, 1200°C에서의 촬영사진에서 결정화된 ZnAl₂O₄ 화합물의 미세구조를 볼 수 있었다. 광흡수측정에 의하여 광학적에너지 밴드갭은 약 4.75 eV로 추측되었으며, 소성온도의 증가에 따라 상대적으로 ZnO의 광학적 흡수가 감소하면서 세기 또한 감소하였다. 또한 광발광특성을 조사한 결과, 900°C에서는 600nm에서 주된 피크를 보이나, 온도의 상승에 따른 PL 방출스펙트럼의 재배열로 인해 방출대역이 단파장대역으로 이동하여, 1200°C에 이르면 ZnAl₂O₄ 화합물의 형성에 따른 430nm의 피크가 관찰되었다. 이는 750nm근방에서 피크를 보인 대기상태에서 소성시킨 소결체와는 전혀 다른 결과를 보이는데, 소성시 가스분위기 등 여러 가지 조건에 의해 방출대역이 변화된 것으로 추측되며, 이러한 원인의 규명에는 보다 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Chang Feng Yu, Pang Lin, "Manganese-activated luminescence in ZnGa₂O₄", J. Appl. Phys., Vol. 79(9), 1996.
- [2] I. J. Hsieh, K. T. Chu, C. F. Yu, and M. S. Feng, J. Appl. Phys., Vol 76, pp. 3735, 1994.
- [3] C. Leblud, M. R. Anseau, E. di Rupo, F. Cambier and P. Fierens, "Reaction Sintering of ZnO-Al₂O₃ Mixtures", J. Mater. Sci., Vol.16, 539-44, 1981.
- [4] Wan-Shick Hong, Lutgard C. De Jonghe, Xi Yang, Mohamed N. Rahaman, "Reaction Sintering of ZnO-Al₂O₃", J. Am. Ceram. Soc, Vol.78[12], pp.3217-24, 1995.

- [5] M. V. Zdujić, O. B. Milosevic, Lj. C. Karanovic, "Mechanochemical treatment of ZnO and Al₂O₃ powders by ball milling", *Materials Letters*, Vol. 13, pp.125-129, 1992.
- [6] F. C. M. Van De Pol, F. R. Blom, and Th. J. A. Popma, "R. F. planar magnetron sputtered ZnO films. I. structural properties", *Thin Solid Films*, Vol. 204, pp. 349-364, 1991.
- [7] B. G. Yacobi, D. B. Holt, "Cathodoluminescence of Microscopy of Inorganic Solids", Plenum Publishing Corporation, 1990.
- [8] Su-Hua Yang and Meiso Yokoyama, "Improvement of Catholuminescence for ZnGa₂O₄ Phosphor by Second Fired Process", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.36, pp. 5145-5150, 1997.
- [9] B. D. Cullity, "Elements of X-ray Diffraction", (Addison-Wesley Pub. Co., Inc., 1977)
- [10] Humbolt W. Leverenz, "An Introduction to Luminescence of Solid", Dover Publications Inc., 1968
- [11] R. E. Shrader and H. W. Leverenz, "Cathodoluminescence Spectra of Zinc-Oxide Phosphors", *J. Optical Soc. Am.*, Vol.37, No.11, pp.920-923, 1947.
- [12] Byeong-Mo Kang, Gye-Choon Park, "The Structural and Optical Properties of ZnAl₂O₄ Ternary Compound" *Journal of the Mokpo National University Engineering Research Institute*, Vol.7, p77-88, 1997.
- [13] S. Rothschild, "The Luminescent Spectra of Zinc Sulphide and Zinc Cadmium Sulphide Phosphors", *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 42, No. 290, 635-642, 1946.

 著 者 紹 介

**강 병 모**

1968년 11월 5일생, 1994년 2월 조선대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1998년 2월 전남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년~현재 동대학원 박사과정

박 계 춘

『센서학회지 제2권 제1호』 논문 93-12, p.94 참조
현재 목포대학교 전기공학과 교수

유 용 택

『센서학회지 제2권 제1호』 논문 93-12, p.94 참조
현재 전남대학교 전자공학과 교수