

중성자 조사한 ZnO 박막에 생성된 핵전환 불순물들에 대한 연구

선규태*, 박광수*, 한현수**, 김상식*
 고려대학교 전기공학과*, 한국원자력연구소 하나로이용연구단**

A Study on Transmuted Impurity Atoms Formed
 in Neutron-Irradiated ZnO Thin Films

Kyu Tae Sun*, Kwang Soo Park*, Hyon Soo HAN**, Sangsig Kim,*

Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701., ** HANARO Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Deajeon

Abstract - Transmuted impurity atoms formed in neutron-irradiated ZnO thin films were theoretically identified first and then experimentally confirmed by photoluminescence (PL). ZnO thin films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy were irradiated by neutron beam at room temperature. Among eight isotopes naturally existing in ZnO films, only ⁶⁴Zn, ⁶⁸Zn, ⁷⁰Zn and ¹⁸O were expected to transmute into ⁶⁵Cu, ⁶⁹Ga, ⁷¹Ga, and ¹⁹F, respectively. The concentrations of these transmuted atoms were estimated by considering natural abundance, neutron fluence, and neutron cross section. The neutron-irradiated ZnO thin films were characterized by PL. In the PL spectra of these ZnO thin film, the Cu-related PL peaks were seen, but the Ga- or F-associated PL peaks were absent. This observation demonstrates the existence of ⁶⁵Cu in the ZnO. In this paper, emission mechanism of Cu impurities will be described and the reason for the absence of the Ga- or F-associated PL peaks will be discussed.

1. 서 론

중성자 조사(neutron irradiation)는 반도체 물질에 중성자를 조사시키므로써 핵전환(transmutation)을 통한 불순물 도핑(impurity doping) 효과를 얻는 데에 사용된다. 조사되는 중성자는 열중성자(thermal neutron)와 빠른중성자(fast neutron)로 구성된다. 열중성자는 반도체 구성원자와 핵 반응하여 구성원자의 질량수 하나를 증가시키면서 동위원소를 발생시킨다. 핵반응에 의해서 생성된 동위원소들은 안정한 원소들과 안정하지 않은 원소들이 있다. 이 중에서 안정하지 않은 원소들은 다른 원자로 핵전환되는데, 이 과정에서 β나 γ-recoil이 발생된다. 그러므로 열중성자와 물질이 가지는 원자간의 핵반응에 의해서, 물질이 가지고 있던 원자 자리에 다른 원자가 자리하게 되는 것이다. 이러한 현상을 이용하여 반도체 물질 내에서 도핑효과를 얻을 수 있는데, 이것이 중성자-핵전환도핑(neutron-transmutation doping, NTD)이다. 반면 빠른 중성자는 구성원자의 핵과 충돌함으로써 결정 내에 damage를 가하게 된다. 일반적으로 중성자를 조사한 후에 반도체 물질을 열처리해준다. 열처리는 우선 빠른 중성자에 의해서 생긴 damage를 제거해준다. 그리고 핵전환된 원자가 구성 원자 자리에 자리를 잡도록 열에너지를 공급한다.

중성자-핵전환 도핑(NTD)은 반도체 물질 내에서 불순물(impurity)로 작용하는 다른 원소들을 만들어낼 수 있다. 이 NTD 방법을 통해서 아주 균일한 분포의 불순물들을 원하는 농도로 조절하여 만들어낼 수 있다.

NTD 방법에 의해 도핑된 불순물의 공간적인 분산은, 일반적으로 쓰이는 인시츄 도핑(in situ doping) 보다 10배정도 작다. 게다가 중성자조사시간을 조절함으로써, 원하는 불순물들의 양을 정확하게 doping할 수 있다. 이 NTP 기술은 물질의 특성에 대한 연구에 아주 유용하게 적용된다.

본 논문에서는 ZnO 물질에 중성자를 조사하여 핵전환된 불순물들에 대하여 연구를 하였다. 우선, 핵전환된 원자의 종류를 예측하고 그 농도를 계산하였다. 예측된 불순물들 중 Cu 불순물의 존재를 PL을 통하여 확인을 하였다. Cu 불순물이 발달되는 과정을 간단히 서술하고, 다른 예측된 불순물인 Ga과 F에 대한 논의도 한다.

2. 본 론

2.1 실험

본 연구에 사용된 ZnO 박막은 plasma-assisted molecular-beam epitaxy (PAMBE)방법으로 합성하였다. Sapphire 기판에 GaN을 buffer layer로 성장시킨 후에, 산소 plasma와 solid zinc source를 사용해서 본 ZnO 박막을 성장시켰다. 이 때 사용된 산소 plasma의 조건은 400W, 3.5 sccm이고, ZnO layer의 두께는 0.3 μm이다.

한국원자력연구소에서 중성자 빔을 ZnO 반도체에 조사하였다. 본 연구에서는 핵전환에 주로 관심이 있어서, 열중성자 비율과 빠른중성자 비율이 673대 1인 중성자 빔을 사용하였다. 열중성자를 ZnO 반도체에 $6.73 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 flux로 조사하였다 (빠른중성자의 flux는 $1.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이다). 조사시간을 30분, 1일, 7일로 해서, ZnO에 가해지는 열중성자의 fluence를 다르게 하였다.

중성자 조사된 ZnO 박막은 300~600℃로 산소 분위기에서 30분 동안 열처리하였다. 이렇게 준비된 ZnO 시료들은 8K 온도에서 photoluminescence(PL)를 측정하였다. PL의 광원으로 He-Cd laser를 사용하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 핵전환 과정과 핵전환된 원자들

본 연구를 위하여 4개의 시료를 준비하였다. 중성자빔을 조사하지 않은 ZnO 박막을 시료1로 명명하고, 중성자 fluence을 다르게 해서 조사한 3개의 ZnO 박막을 시료2, 3, 4라고 명명하였다. 본 연구에 사용된 이들 시료에 대한 실험조건을 표1에서 정리하였다.

ZnO 반도체를 구성하는 Zn원자와 O원자는 각각 여러 동위 원소로 존재한다. 표2와 표3에서 보여주듯이 이들 동위 원소는 다른 자연존재비로 존재해있다. Zn원자의 경우는 48.6%가 ⁶⁴Zn이고, O원자의 경우는 99.78%가 ¹⁶O이다. 중성자빔을 ZnO 박막에 조사를 하면, 열중성자들이 ZnO의 구성 원자들과 충돌하여 핵반응이 일어나서 핵전환이 일어난다. 한 특정 원자에 대해서 핵전환이 일어날 확률은 표2에서 보여주는 열중성자의 단면적에 비례한다. 사실 단면적 값은 중성자의 에너지에

따라 다르다. 표2와 표3에서 주어진 단면적 값은 열중성자가 상온(20.43 °C)에 해당하는 열에너지(0.0253 eV)를 가질 때의 값이다. 일반적으로 중성자는 높은 에너지를 가질수록 작은 단면적을 갖는다. 따라서, 0.1 MeV 이상을 가지는 빠른중성자는 Zn와 O 원자의 경우에 거의 0에 가깝다.

표 1.

	조사시간	열중성자 fluence (중성자 수/cm ²)	빠른중성자 fluence (중성자 수/cm ²)
시료1	0	0	0
시료2	30분	1.21x10 ¹⁷	1.80x10 ¹⁴
시료3	1일	5.81x10 ¹⁸	8.64x10 ¹⁵
시료4	7일	4.07x10 ¹⁹	6.05x10 ¹⁶

표 2.

	자연 존재비 (Natural Abundance) (%)	열중성자 단면적 (Cross section) (barns)
⁶⁴ Zn	48.6	0.74
⁶⁶ Zn	-	66
⁶⁸ Zn	27.9	0.9
⁶⁷ Zn	4.1	6.9
⁶⁸ Zn	18.8	0.87
⁷⁰ Zn	0.6	9.11x10 ⁻²

표 3.

	자연 존재비 (Natural Abundance) (%)	열중성자 단면적 (Cross section) (barns)
¹⁶ O	99.78	1.9x10 ⁻⁴
¹⁷ O	0.038	5.4x10 ⁻⁴
¹⁸ O	0.205	1.6x10 ⁻⁴

표4와 표5는 열중성자와 충돌해서 일어나는 동위원소들의 핵반응을 보여주고 있다. 이들 표를 보면, ZnO 반도체에 존재하는 8개의 동위원소들 중에서 ⁶⁴Zn, ⁶⁸Zn, ⁷⁰Zn, ¹⁸O만이 각각 ⁶⁵Cu, ⁶⁹Ga, ⁷¹Ga, ¹⁹F으로 핵전환이 된다. 표4에서 n은 thermal neutron, γ은 감마선(gamma ray), e⁻은 전자, ν은 중성미자(neutrino), β⁻은 베타선(beta ray)을 의미한다.

표 4.

	1차 원자핵반응, 2차 원자핵반응	반감기(half life), 감쇠에너지(decay energy)
⁶⁴ Zn	⁶⁴ Zn+n→ ⁶⁵ Zn+γ, ⁶⁴ Zn+e ⁻ → ⁶⁵ Cu+ν	244.26일, 1.352 MeV
⁶⁶ Zn	⁶⁶ Zn+n→ ⁶⁷ Zn+γ, ⁶⁷ Zn stable	
⁶⁷ Zn	⁶⁷ Zn+n→ ⁶⁸ Zn+γ, ⁶⁸ Zn stable	
⁶⁸ Zn	⁶⁸ Zn+n→ ⁶⁹ Zn+γ, ⁶⁹ Zn→ ⁶⁹ Ga+β ⁻	56.4분, 0.906 MeV
⁷⁰ Zn	⁷⁰ Zn+n→ ⁷¹ Zn+γ, ⁷¹ Zn→ ⁷¹ Ga+β ⁻	2.45분, 2.813 MeV

표 5.

	1차 원자핵반응, 2차 원자핵반응	반감기(half life), 감쇠에너지(decay energy)
¹⁶ O	¹⁶ O+n ¹ → ¹⁷ O+γ, ¹⁷ O stable	
¹⁷ O	¹⁷ O+n ¹ → ¹⁸ O+γ, ¹⁸ O stable	
¹⁸ O	¹⁸ O+n ¹ → ¹⁹ O+γ, ¹⁹ O→ ¹⁹ F+β ⁻	26.91 초, 4.821 MeV

2.2.2 핵전환된 원자들의 농도 계산

ZnO 반도체 내에서 핵전환된 원자들의 농도를 계산할 수 있다. 우선 ZnO 반도체 물질 내의 Zn 원자 농도와 O 원자 농도를 알아야한다. 이들 원자의 농도는

Zn 원자의 농도 (또는, O 원자의 농도)

$$= \frac{\text{ZnO 밀도}}{\text{ZnO 분자의 몰 질량}} \times \text{아보가드로수}$$

$$= \frac{5.66\text{g/cm}^3}{81.37\text{g} \times 6.022 \times 10^{23}} = 4.19 \times 10^{22}/\text{cm}^3$$

로 구해진다. 가장 먼저 ⁶⁵Cu의 농도를 계산하자. 표4에서 알 수 있듯이 ⁶⁵Cu는 ⁶⁴Zn에서 핵전환될 수 있다. ZnO 반도체 내에 존재하는 ⁶⁴Zn의 농도는

$$\begin{aligned} & \text{⁶⁴Zn의 농도} \\ &= (\text{Zn 원자의 농도}) \times (\text{자연 존재비}) \\ &= 4.19 \times 10^{22}/\text{cm}^3 \times 0.486 \\ &= 2.04 \times 10^{22}/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

이다. 시료들 중에서 시료4의 경우만 고려할 때, 핵반응 되어서 생성된 ⁶⁵Zn의 농도는

$$\begin{aligned} & \text{⁶⁵Zn의 농도} \\ &= (\text{⁶⁴Zn의 농도}) \times (\text{열중성자 단면적}) \\ & \quad \times (\text{열중성자 fluence}) \\ &= 2.04 \times 10^{22}/\text{cm}^3 \times 0.74 \times 10^{-24}\text{cm}^2 \\ & \quad \times 4.07 \times 10^{19}\text{ 중성자}/\text{cm}^2 \\ &= 6.14 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

이다. ⁶⁵Zn가 반감기 244.26일로 ⁶⁵Cu으로 핵전환되므로, ⁶⁵Cu의 농도 계산에서 중성자빔 조사 후에 경과된 시간이 중요하다. 본 연구의 경우에 중성자빔 조사 후 20일이 경과된 시점에서 PL 실험을 하였다. 따라서, 이 시점에서의 ⁶⁵Cu의 농도는

$$\begin{aligned} & \text{⁶⁵Cu의 농도} \\ &= \text{⁶⁵Zn의 농도} \times [1 - (1/2)^{(\text{경과시간}/\text{반감기})}] \\ &= 6.14 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \times [1 - (1/2)^{(20/244.26)}] \\ &= 3.4 \times 10^{16}/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

로 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산하면, 시료2와 시료3안에서 생성된 ⁶⁵Cu의 농도는 각각 4.8 × 10¹⁵/cm³과 1.0 × 10¹⁴/cm³로 구해진다.

시료4에 대해서 ⁶⁹Ga, ⁷¹Ga, ¹⁹F의 농도를 구하였다. ⁶⁸Zn과 ⁷⁰Zn으로부터 핵전환된 ⁶⁹Ga과 ⁷¹Ga의 농도도 구할 수 있었다. ⁶⁹Zn와 ⁷¹Zn의 반감기는 각각 56.4분과 2.45분이어서, PL 측정 시점에서 ⁶⁹Zn와 ⁷¹Zn의 모든 원자는 ⁶⁹Ga과 ⁷¹Ga으로 각각 핵전환된다. 따라서, ⁶⁹Ga과 ⁷¹Ga의 농도 값은 각각

$$\begin{aligned}
&^{69}\text{Ga} \text{ 농도} = \\
&\text{Zn농도}(4.19 \times 10^{22}/\text{cm}^3) \times \text{자연존재비}(0.188) \times \text{열중성자 단면적}(0.87 \times 10^{-24} \text{cm}^2) \\
&\times \text{열중성자 fluence}(4.07 \times 10^{19}/\text{cm}^2) \\
&= 2.8 \times 10^{17}/\text{cm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&^{71}\text{Ga} \text{ 농도} = \\
&\text{Zn농도}(4.19 \times 10^{22}/\text{cm}^3) \times \text{자연존재비}(0.006) \times \text{열중성자 단면적}(91.1 \times 10^{-24} \text{cm}^2) \\
&\times \text{열중성자 fluence}(4.07 \times 10^{19}/\text{cm}^2) \\
&= 9.3 \times 10^{14}/\text{cm}^3
\end{aligned}$$

로 계산된다. ^{18}O 로부터 핵전환된 ^{19}F 의 농도는

$$\begin{aligned}
&^{19}\text{F} \text{의 농도} = \\
&\text{O농도}(4.19 \times 10^{22}/\text{cm}^3) \times \text{자연존재비}(0.002) \times \text{열중성자 단면적}(0.16 \times 10^{-3} \times 10^{-24} \text{cm}^2) \\
&\times \text{열중성자 fluence}(4.07 \times 10^{19} \text{ neutrons}/\text{cm}^2) \\
&= 5.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3
\end{aligned}$$

이다.

2.2.3 핵전환된 원자 존재 확인을 위한 PL

중성자를 조사하지 않은 시료1의 PL 스펙트럼과 중성자 조사를 한 시료4의 PL 스펙트럼을 비교하였다. Band edge 파장 영역에서 이들 두 PL 스펙트럼을 보면, 중성자 조사 전과 후의 시료들의 PL 피크들이 동일한 파장 위치에서 나타나고 있다. 이와 다르게, 450 nm부터 550 nm 영역의 PL 스펙트럼을 살펴보면, 중성자 조사 전과 후의 PL 스펙트럼의 형태가 다르다는 사실을 알 수 있다. 중성자를 조사한 시료4의 PL 스펙트럼에서 규칙적으로 반복되는 PL 피크들이 발견되고 있다. 이에 반해서, 중성자를 조사하지 않은 시료1의 PL 스펙트럼에서는 이들 PL 피크들이 전혀 발견되지 않고 있다. 열처리 온도를 높임에 따라, 중성자 조사된 시료4에서 발견된 이들 PL 피크들의 크기가 점점 더 커짐을 알 수 있다. 이들 관측 사실들은 균등한 에너지 간격으로 존재하는 이들 PL 피크들이 핵전환된 원자들에 의해서 생긴 것들이고 열처리함에 따라서 핵전환된 원자의 발광 효율성이 더 좋아짐을 보여주고 있다.

450 nm~550 nm PL 스펙트럼 영역에서 관측되는 PL 피크들은 원자핵 전환된 ^{65}Cu , ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{19}F 원자들 중 하나에 기인한 것이다. Cu, Ga, F 불순물을 첨가한 ZnO를 연구한 참고문헌들을 살펴보면, 중성자 조사한 시료4에서 관측된 PL 피크들은 ^{65}Cu 의 원자에 관련된 PL 피크에 해당하고, ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{19}F 은 이들 PL peak들과 관련이 없음을 알 수 있다. 문헌에 따르면, ^{69}Ga 과 ^{71}Ga 에 관련된 PL은 369 nm에 존재하고, 문헌에 의하면 ^{19}F 에 관련된 PL peak는 510 nm에서 발견된다. 따라서, 본 PL 측정으로부터, 원자핵 전환되어서 ZnO에 형성된 ^{65}Cu 불순물의 존재를 확인할 수 있었다.

ZnO 반도체에 원자핵 전환되어서 형성된 ^{65}Cu 은 발광 센터(emitting center) 역할을 한다. ^{65}Cu 가 ZnO에 존재하는 형태와 발광하는 과정은 다음과 같다. ^{65}Cu 가 ^{64}Zn 로부터 핵 전환될 때, ^{65}Cu 에서 발생하는 되튀김 에너지가 충분히 작다. 따라서, ^{65}Cu 는 Zn site에서 이탈하지 않고, Zn site에 그대로 머문다. Zn site에 있는 ^{65}Cu 는 $\text{Cu}^{2+}(3d^9)$ 의 형태로 존재한다. $\text{Cu}^{2+}(3d^9)$ 가 레이저빔에 의해서 여기되면, ^{65}Cu 는 전하전달에 의해서 $\text{Cu}^{1+}(3d^{10})h$ 의 형태가 된다. $\text{Cu}^{1+}(3d^{10})h$ 는 마치 엑시톤과 같은 성질을 띠게된다. 즉, $\text{Cu}^{2+}(3d^9)$ 에 한 개의 전자가 결합해서 $\text{Cu}^{1+}(3d^{10})$ 가 되고, 결합된 전자는 쿨롱 힘에 의해서 한 개의 정공을 구속한다. 결과적으로, $\text{Cu}^{1+}(3d^{10})h$ 는 $\text{Cu}^{2+}(3d^9)$ 이온에 엑시톤(exciton, 전자-정공 쌍)이 구속된 형태이다. 이 구속된

시톤(bound exciton)이 재결합될 때, ZnO 반도체 시료로부터 발광을 관측될 수 있다.

그림 7의 삽입그림과 그림 8에서, 450 nm위치에 있는 PL 피크는 구속엑시톤이 재결합할 때 방출되는 광자에 의해서 생긴 것이다. 이 PL 피크 보다 낮은 에너지 영역(450 nm~520 nm)에서 같은 에너지 간격으로 떨어진 몇 개의 PL 피크들이 관측된다. 이들 PL peak 사이에 파장 간격은 12 nm이다. 이 에너지는 ZnO의 LO 포논에너지에 해당된다. 따라서, 그림 7의 삽입그림(inset)에서 표시된 PL 피크들은 450 nm PL 피크의 포논 레플리카에 해당된다고 판단된다.

이제 핵전환된 ^{69}Ga 원자와 ^{71}Ga 원자에 대해서 살펴보자. 이들 Ga 원자는 ZnO 반도체에서 도우너 불순물 역할을 한다. 따라서, Ga 원자의 도핑은 ZnO 반도체를 n형 반도체로 만든다. 이 Ga 불순물이 충분히 도핑되면 Ga 원자에 엑시톤이 구속되어, 이 엑시톤이 재결합함으로써 PL 피크를 낼 수 있다. 문헌을 통해서, 이 PL 피크가 369 nm파장에 관측될 수 있다는 실험적 사실을 보여주고 있다. 이 PL 피크는 중성자를 조사하지 않은 시료1에서는 관측될 수 없고 중성자를 조사한 시료4에서만 관측될 수 있는 PL 피크이다. 시료1과 시료4의 PL 스펙트럼에서 band edge 파장 영역의 PL 피크들을 비교하면, 완전히 동일함을 알 수 있다. 다시 말하면, 핵전환된 Ga 불순물에 의한 PL 피크를 관측할 수 없었다. PL 피크의 부재는 Ga 불순물의 농도가 충분하지 않아서 생긴 현상이라고 사료된다. 문헌에서 Ga 불순물 관련 PL 피크는 전자농도가 $10^{18}/\text{cm}^3$ 인 시료에서 관측되었다. 시료4에서의 전자농도는 모든 Ga 불순물이 전자를 낸다하더라도 참고문헌의 경우보다 작다. 따라서, 핵전환된 Ga 불순물 농도가 $10^{18} \sim 10^{19}/\text{cm}^3$ 정도가 된다면, Ga 불순물 관련 PL 피크는 충분히 관측될 수 있다고 본다.

^{18}O 원자로부터 핵전환된 ^{19}F 에 관련된 PL 피크는 510 nm 파장 영역에서 있는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 얻은 PL 스펙트럼에서 이 PL 피크가 관측되지 않았다. 관측되지 않은 이유는 PL 발광이 관측되기에는 충분하지 않은 ^{19}F 원자의 농도가 ZnO에 존재하기 때문이라고 본다. 사실, 반도체 내의 불순물 농도가 앞에서 예측한 값 $5.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 정도이면 일반적으로 PL 관측이 어렵다.

3. 결 론

본 연구에서는 중성자를 조사해서 ZnO 반도체에 핵전환된 원자들을 생성시켰다. 생성될 수 있는 핵전환 원자의 종류를 이론적으로 예측하고 이 원자들의 농도를 계산할 수 있었다.

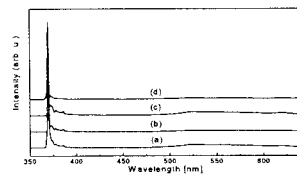


그림 1. 열처리된 ZnO PL 자료

(a) 중성자가 조사되지 않은 시료 (시료 1), 열중성자 fluence, (b) 1.12×10^{17} (시료 2), (c) 5.81×10^{18} (시료 3), (d) 4.07×10^{19} (시료 4)

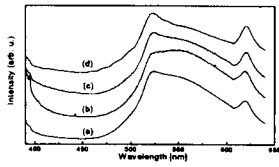


그림 2. 열처리된 ZnO PL 자료
 (a) 중성자가 조사되지 않은 시료 (시료 1), 중성자조사, (b) 30분 (시료 2), (c) 1일 (시료 3), (d) 7일 (시료 4)

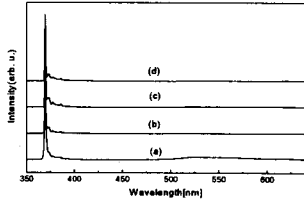


그림 3. 중성자가 조사되지 않은 ZnO PL 자료 (시료 1)
 (a) 열처리전, (b) 열처리 300°C, (c) 열처리 500°C, (d) 열처리 600°C

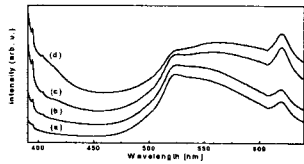


그림 4. 중성자가 조사되지 않은 ZnO PL 자료 (시료 1)
 (a) 열처리전, (b) 열처리 300°C, (c) 열처리 500°C, (d) 열처리 600°C

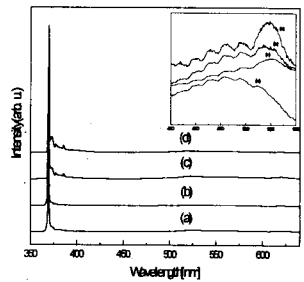


그림 5. 중성자가 조사된 ZnO PL 자료
 열중성자 fluence $4 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ (시료 4)
 (a) 열처리전, (b) 열처리 300°C, (c) 열처리 500°C, (d) 열처리 600°C
 삼입도- 중성자조사에 의한 순수변화량

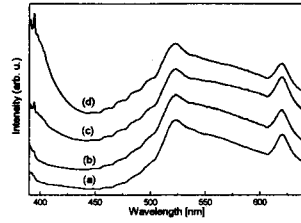


그림 6. 중성자가 조사된 ZnO PL 자료
 열중성자 fluence $4 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ (시료 4)
 (a) 열처리전, (b) 열처리 300°C, (c) 열처리 500°C, (d) 열처리 600°C

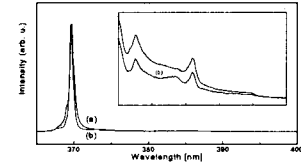


그림 7. 열처리된 ZnO PL 자료
 (슬릿: $200\mu\text{m}$) (a) 중성자조사를 하지 않은 시료(시료 1), (b) 중성자가 조사된 시료(시료 4: 열중성자 fluence $4 \times 10^{19}/\text{cm}^2$)

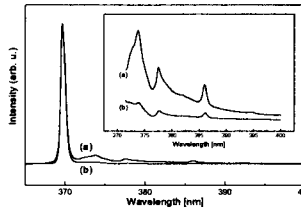


그림 8. 600°C에서 열처리된 ZnO의 PL 자료 (슬릿: $200\mu\text{m}$)
 (a) 중성자조사를 하지 않은 시료 (시료 1), (b) 중성자를 조사한 시료 (시료 4: 열중성자 fluence $4 \times 10^{19}/\text{cm}^2$)

[참 고 문 헌]

- [1] P. J. Dean, D. J. Robbins, S. G. Bishop, J. A. Savage and P. Porteous, "The optical properties of copper in zinc oxide", J. Phys. C : Solid state Phys., Vol. 14, 2847, 1981
- [2] H. J. Ko, Y. F. Chen, S. K. Hong, H. Wenisch, and T. Yao, "Ga-doped ZnO films grown on GaN templates by plasma-assisted molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett. Vol. 77, 3761, 2000