

논문 2002-11-5-07

**BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 열발광 및 광자극발광 특성**

도시홍\*, 서효진\*, 강갑중\*, 김영국\*\*, 김도성\*\*\*, 김성환\*\*\*\*, 김찬중\*\*\*\*,  
이병화\*\*\*\*, 김완\*\*\*\*, 강희동\*\*\*\*

**Thermoluminescence and Photostimulated Luminescence of BaFBr:Eu<sup>2+</sup> Phosphor**

Sih-Hong Doh\*, Hyo-Jin Seo\*, Kab-Jung Kang\*, Young-Kook Kim\*\*,  
Do-Sung Kim\*\*\*, Sung-Hwan Kim\*\*\*\*, Chan-Jung Kim\*\*\*\*,  
Byung-Hwa Lee\*\*\*\*, Wan Kim\*\*\*\*, and Hee-Dong Kang\*\*\*\*

**요 약**

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체를 제조하고, 이 형광체의 열발광 특성과 광자극발광 특성을 조사하였다. 이 형광체의 열발광 glow 피크 온도는 352 K와 448 K였으며, 주 피크(352 K)에 관여하는 트랩의 활성화에너지는 약 0.96 eV 이었다. 또한 이 형광체의 광자극발광 스펙트럼의 파장범위는 350~450 nm 사이였으며, 광자극발광에 기여하는 트랩의 활성화에너지는 약 0.98 eV 이었다. 열발광트랩과 광자극발광 트랩의 활성화에너지는 실험오차 내에서 일치하였다.

**Abstract**

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> phosphors were prepared, and the thermoluminescence(TL) and photostimulated luminescence(PSL) of the prepared phosphors were measured. Two glow peaks around 352 and 448 K are observed for x-ray irradiated BaFBr:Eu<sup>2+</sup> phosphors, and the activation energy of the main glow peak(352 K) was about 0.96 eV. The spectral range of the PSL was 350~450 nm, and the activation energy of the trap giving rise to PSL was about 0.98 eV. The activation energy of the traps giving rise to TL is agreed to those giving rise to PSL within experimental error.

**1. 서 론**

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체는 매우 좋은 광자극발광 형광체(photostimulated luminescence phosphor)<sup>[1-4]</sup>로서 기존의 X선 필름을 대신하고 있는 영상판(imaging plate : IP) 제작에 사용되며, computed radiography<sup>[5]</sup>, 방사능

측정<sup>[6]</sup>, X선 및  $\gamma$ 선 개인피폭선량계<sup>[7]</sup>, 표면오염측정<sup>[8]</sup>등 여러 분야에 응용되고 있다.

BaFBr:Eu<sup>2+</sup>의 광자극발광 기구는 Taka-hashi 등<sup>[9]</sup>이 처음으로 제안하였다. X선 여기(1차 여기)에 의해 생성된 전자는 Br<sup>-</sup> 이온이나 F<sup>-</sup> 이온 공격자에 포획되어 각각 F(Br<sup>-</sup>), F(F<sup>-</sup>) 중심으로 되며, 정공은 Eu<sup>2+</sup>에 포획되어 Eu<sup>3+</sup>를 만든다. 이와 같은 광자극발광 현상은 형광체 내에 있는 전자트랩, 전공트랩 및 발광중심에 기인하며, 이러한 발광기구는 열발광(thermoluminescence : TL)기구와 매우 유사하다. 따라서 형광체 내의 전자트랩, 전공트랩 및 발광중심들이 열발광과 광자극발광에 어떻게 기여하는지에 대한 의문이 제기되었다. K. Inabe등<sup>[10]</sup>은 BaFCl:Dy와 BaFCl:Cu에서의 열발광특성을, T. Hangleiter등<sup>[11]</sup>은 X-선을 조사한

\* 부경대학교 물리학과(Dept. of Physics, Pukyong National University)

\*\* 경남대학교 물리학과(Dept. of Physics, Kyungnam University)

\*\*\* 대구대학교 과학교육학부(Division of Science Education, Taegu University)

\*\*\*\* 경북대학교 물리학과(Dept. of Physics, Kyungpook National University)

<접수일자 : 2002년 4월 1일>

BaFBr:Eu에서 광자극발광의 온도의존성을 조사하였다. 그리고 V. X. Quang등<sup>[12]</sup>은 Eu를 도우핑한 calcium halophosphate  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl})$ :Eu에 대한 열발광 및 광자극발광 특성을 발표하였고, M. J. Knitel등<sup>[13]</sup>은  $\text{LiYSiO}_4$ :Ce 분말에 대한 광자극발광과 열발광 특성을 발표하였다.

본 연구에서는 BaFBr:Eu<sup>2+</sup>형광체에서 광자극발광에 관여하는 트랩과 열발광에 관여하는 트랩들의 활성화에너지를 구하여 트랩들의 성질을 규명하였다. 열발광에 관여하는 트랩들의 활성화에너지, 발광차수 등의 포획매개변수는 peak shape법과 various heating rate법으로 구하였고, 광자극발광에 관여하는 트랩의 활성화에너지는 온도변화에 대한 광자극발광 강도의 감쇠곡선의 기울기로부터를 구하였다.

## II. 실험

### 1. 형광체의 제작

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체는  $\text{BaF}_2$ 와  $\text{BaBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를 mole비 1:1로 정량하고 이온교환수로 혼합하였다. 그리고 활성화제로  $\text{EuF}_3$ 를, 촉매로  $\text{NH}_4\text{Br}$ 을 첨가하여 혼합한 후 80 °C에서 건조하였다. 이 때  $\text{EuF}_3$ 는 0~1.0 mol%,  $\text{NH}_4\text{Br}$ 은 0~15 mol%로 변화하면서 시료를 제작하였다. 건조한 시료는 알루미늄 도가니에 넣어 수소 분위기에서 소결온도를 600~980 °C로 변화시키면서 소결한 후 급냉시켰으며, 소결시간의 변화는 10~120분이었다. 이 때 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 최적제작조건은  $\text{EuF}_3$ 가 0.5 mol%,  $\text{NH}_4\text{Br}$ 은 5.0 mol%이었고, 소결온도와 소결시간은 각각 940 °C, 30분이었다. 그리고 제작한 형광체는 유봉으로 분쇄한 후 45~75  $\mu\text{m}$ 의 입자를 선별하여 실험에 사용하였다.

### 2. X선 조사 및 측정

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 열발광 특성을 측정하기 위하여 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 분말 25 mg을 유리관(외경 1.0 mm, 내경 0.8 mm)속에 넣어 밀봉하였다. X선 조사는 X선 발생장치(Varian, Ximatron C Series X-ray Unit)와 6 MV X선 발생용 선형가속기 (Mevatron MD67, Siemens Co.)를 이용하여 0.1 Gy 조사하였으며, FS(field size)와 SSD(source to

surface distance)는 각각  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 와 100 cm이었다. 흡수선량 분포는 이온챔버(Capintec PR-06C)와 전위계(Capintec Exposure and Exposure Rate Meter, 192X)으로 측정하였으며, 열발광 glow곡선은 TLD Reader (Harshaw 2000)로 측정하였다.

그림 1은 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 광자극발광 특성을 측정하기 위한 개략도이다. 1차 여기광은 Nd-YAG 레이저(Spectron Laser Sys., SL 800, 3rd harmonics 355 nm, 5 mW)를, 2차 여기광은 He-Ne 레이저(633 nm, 35 mW)를 사용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 He-Ne 레이저를 초퍼 1에 의해 450 Hz로 변조시키고, lock-in amplifier는 초퍼 1에 동기시켰으므로, lock-in amplifier에서는 He-Ne 레이저에 동기되어 일어나는 발광 (광자극발광)만을 증폭한다. 한편 Nd-YAG 레이저는 10 Hz의 초퍼 2에 동기시켰다. 이 때 초퍼 2와 Nd-YAG 레이저의 발진동기위상이 서로 180°가 되도록하여 Nd-YAG 레이저 빛과 Nd-YAG 레이저에 의해 형광체에서 나오는 빛 (photoluminescence : PL)은 초퍼 2의 날개에 가려져서 분광기(SPEX, ARC, 22.5 cm)에 입사되지 않도록 하였다. 분광기에서 분광된 광자극발광 신호는 광전자증배관(Hamamatsu, R928)에서 전기적 신호로 변환시킨 후 전류증폭기(Keithley, 427)에서 증폭하였으며, lock-in amplifier의 출력신호는 컴퓨터에 저장하였다.

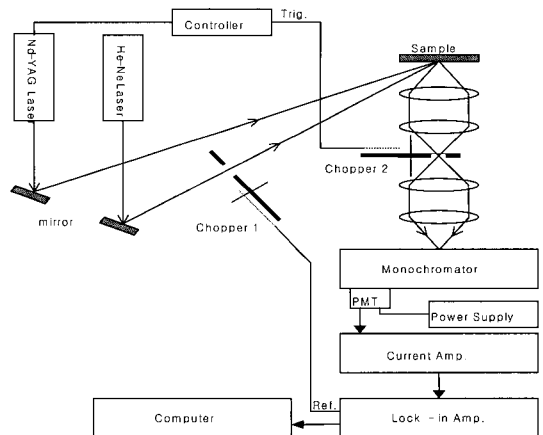


그림 1. 광자극발광 측정장치.

Fig. 1. Schematic diagram of photostimulated luminescence measuring system.

### III. 실험 결과 및 고찰

#### 1. 열발광 포획매개변수

그림 2는 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체에 X선을 조사한 후 실온에서 300 °C까지 4 °C/sec의 선형 가열율로 가열하여 측정된 열발광 glow 곡선이 다. 그림 2에서 보는 바와 같이 glow 곡선은 2개의 피이크로 구성되어 있다. 열발광 glow 곡선의 각 피이크들은 금지대내에 있는 trap 준위에 대한 정보를 가지고 있으며, 이 trap들은 공격자, F중심, 격자간원자 혹은 불순물 등과 같은 격자결함들이다. 그리고 glow 곡선에서 열발광 강도는 trap의 밀도에 비례하며, glow 피이크의 수는 trap 준위에 관계된다. 따라서 각 trap에 대한 포획매개변수(활성화에너지, 진동자인수, 발광차수 등)를 정확히 결정하기 위하여 thermal bleaching 방법으로 glow 곡선을 각각의 단일 피이크로 분리하였으며, 그 과정은 다음과 같다. 열발광 glow 곡선을 측정할 때와 동일한 가열율 4°C/s로 예비가열온도 까지 가열하였다가 실온으로 급냉한 후 다시 시료를 실온에서부터 가열하여 피이크 2의 단일 glow 곡선을 얻었다. 피이크 1의 glow 곡선은 원래의 glow 곡선에서 피이크 2의 glow 곡선을 감산하여 구하였다. 이 때 예비가열온도는 약 105 °C 이었다. 각각의 단일 피이크는 그림 2에서 점선으로 나타내었으며, 피이크 1의 온도는 약 79 °C 이었고, 피이크 2의 온도는 175 °C 부근이었다.

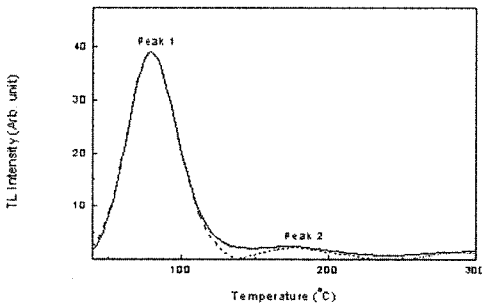


그림 2. 열형광 glow곡선(실선)과 thermal bleaching 방법으로 분리한 단일 glow 피이크(점선).

Fig. 2. Thermoluminescence glow curve(solid line) and isolated glow peaks resolved by the thermal bleaching method(dotted line).

피이크 2의 열발광 강도는 background 정

도의 크기이고, 피이크 1에 비해 매우 작으므로, 포획매개변수는 피이크 1에 대해서만 구하였다. 단일 glow 곡선에서 구한 피이크 1의  $T_m$ ,  $\omega$ ,  $\delta$  및  $\tau$  값은 표 1에 나타내었다.

제작한 형광체의 활성화에너지(trap준위), 진동수인자 및 발광과정의 차수는 peak shape 법<sup>(14,15)</sup>, various heating rate법<sup>(16,17)</sup>을 사용하여 구하였다.

Peak shape법을 이용하여 형광체의 포획매개변수를 구하기 위하여 thermal bleaching 방법으로 분리한 단일 glow 피이크(그림 2의 점선)를 이용하였다. 그림 3은 단일 glow 피이크를 나타내며 피이크 온도를  $T_m$ , FWHM을  $\omega$ ,  $\delta = T_2 - T_m$ ,  $\tau = T_m - T_1$  이라 할 때 열발광과정의 차수는 대칭인자(symmetry factor)  $\mu_g = \delta / \omega$ 에 의해 결정되며,  $\mu_g \approx 0.42$ 이면 1차,  $\mu_g \approx 0.52$ 이면 2차 발광과정<sup>(18)</sup>이다.

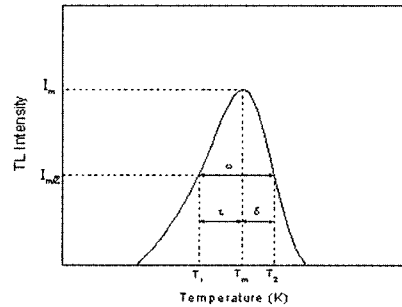


그림 3. 매개변수가  $\omega = T_2 - T_1$ ,  $\tau = T_m - T_1$ ,  $\delta = T_2 - T_m$  인 단일 glow 피이크.

Fig. 3. An isolated glow peak with the parameters  $\omega = T_2 - T_1$ ,  $\tau = T_m - T_1$ ,  $\delta = T_2 - T_m$ .

Chen<sup>(18)</sup>은 단일 glow 피이크로부터 측정된  $T_m$ ,  $\omega$ ,  $\delta$  및  $\tau$ 를 이용하여 다음과 같이 활성화에너지를 구하였다.

$$E_\omega = [2.52 + 10.2(\mu_g - 0.42)] \frac{k T_m^2}{\omega} - 2kT_m$$

$$E_\tau = [1.51 + 3(\mu_g - 0.42)] \frac{k T_m^2}{\tau} - (1.58 + 4.2(\mu_g - 0.42))(2kT_m) \quad (1)$$

$$E_\delta = [0.976 + 7.3(\mu_g - 0.42)] \frac{k T_m^2}{\delta}$$

표 1의  $\omega$ 와  $\delta$ 로부터 구한 대칭인자  $\mu_g$  값이 0.53이므로 제작한 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 발광 차수는 2차이었다. Chen에 의하면 식(1)

을 사용하여 활성화에너지를 결정할 경우 단일 glow 피이크가 1차 발광과정일 때는  $\tau$ 를, 2차 발광과정일 때는  $\delta$ 를 사용하는 것이 이론적 오차를 가장 적게할 수 있으며,  $T_m$ 과  $T_2$ 를 정확히 측정하기 어려울 때는 일반적으로는  $\omega$ 를 사용하는 것이 오차가 가장 적다는 것이 알려졌다<sup>[19]</sup>. 그러므로 표 1의 측정치를 식(1)의  $E_\delta$ 에 대입하여 구한 피이크 1의 활성화에너지는 표 1에 나타낸 바와 같이 약 0.96 eV이었다.

표 1. 피이크 1에 대한 측정치와 포획매개변수.  
Table 1. Measured values and trap parameters for the peak 1.

	Method of analysis		Peak1
Measured values		$T_1$ (K)	333.8
		$T_m$ (K)	352.0
		$T_2$ (K)	372.5
		$\omega$ (K)	38.7
		$\tau$ (K)	18.2
		$\delta$ (K)	20.5
Activation energy (eV)	Peak shape	$E_\delta$	0.93
	Various heating rate	$E$	0.98
		Average value	$E_{ave}$
Symmetry factor		$\mu_g = \frac{\delta}{\omega}$	0.53
Frequency factor ( $s^{-1}$ )	Average value	$S(s^{-1})$	$1.79 \times 10^{15}$

열발광의 세기에 대한 일반적인 방정식은

$$I = s n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[ (\mu_g - 1) \frac{s}{\beta} - \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' + 1 \right] \quad (2)$$

이며, 여기서  $\mu_g$ 는 발광의 차수이고,  $\beta$ 는 가열율이며,  $s$ 는 주파수 인자이다. 식 (2)를 온도  $T$ 로 미분하고 0으로 놓으면

$$\frac{\beta E}{k T_m^2} = s \exp\left(-\frac{E}{k T_m}\right) [1 + (\mu_g - 1)\Delta] \quad (3)$$

으로 되며, 여기서  $\Delta = 2k T_m/E$ 이다.

대칭인자  $\mu_g = 2$ 인 경우에는

$$\frac{\beta E}{k T_m^2} = s \exp\left(-\frac{E}{k T_m}\right) (1 + \Delta) \quad (4)$$

와 같이  $T_m$ 에 대한 2차 발광의 관계식을 얻을 수 있다. 이 식에 활성화 에너지  $E$ 값을 대입하면 주파수 인자  $s$ 를 구할 수 있다.

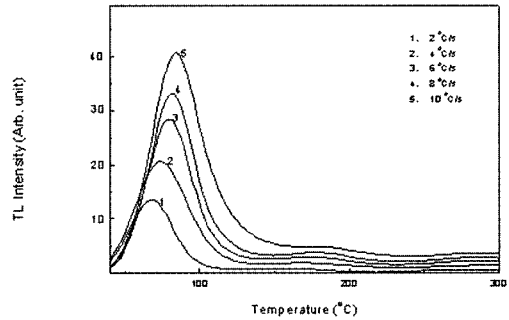


그림 4. 여러 가지 가열율로 측정한 열발광 glow 곡선 : (1) 2 °C/s, (2) 4 °C/s, (3) 6 °C/s, (4) 8 °C/s, (5) 10 °C/s.

Fig. 4. TL glow curves of the phosphor with various heating rates : (1) 2 °C/s, (2) 4 °C/s, (3) 6 °C/s, (4) 8 °C/s, (5) 10 °C/s.

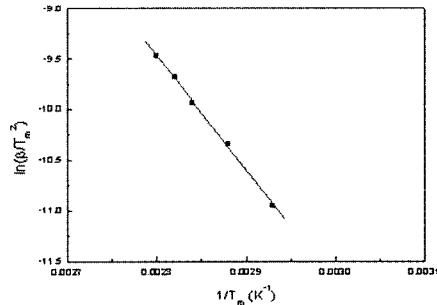


그림 5.  $\frac{1}{T_m}$ 의 함수로 나타낸  $\ln\left(-\frac{\beta}{T_m^2}\right)$ .

Fig. 5. Plot of  $\ln\left(-\frac{\beta}{T_m^2}\right)$  as function of  $\frac{1}{T_m}$ .

그림 4는 various heating rate 법으로 활성화에너지를 구하기 위하여 가열율을 2, 4, 6, 8 및 10 °C/s로 변화시키면서 측정한 glow 곡선이다. 열발광 강도는 가열율의 증가에 따라 증가하였다. 이 glow 곡선들을 thermal bleaching하여 각각의 peak로 분리하고, 각각의 가열율에서 피이크 온도  $T_m$ 을 구하여

$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right)$ 을  $\frac{1}{T_m}$ 에 대해 최소자승법으로 fitting하면 그림 5와 같다. 이 직선의 기울기로부터 활성화에너지를 구하고, 그 값을 식(4)에 대입하여 구한 주파수인자는 표 1에 나타낸 바와 같이  $1.79 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 이었다.

## 2. 광자극발광 트랩의 활성화에너지와 발광스펙트럼

그림 6은 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 광자극발광 스펙트럼과 1차 여기광인 Nd-YAG 레이저 광(355 nm) 및 2차 여기광인 He-Ne 레이저 광(633 nm)의 파장을 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 광자극발광 스펙트럼의 파장범위는 350 ~ 450 nm 사이였으며, 피크 파장은 약 390 nm 이었다.

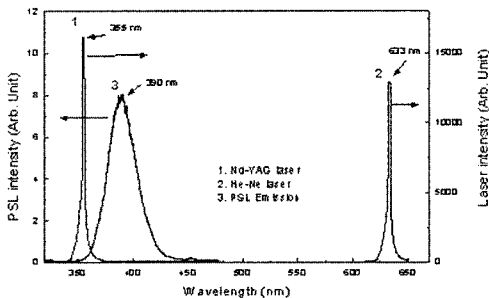


그림 6. BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 여기광 및 광자극발광 스펙트럼.

Fig. 6. Photostimulated luminescence and excitation spectra of BaFBr:Eu<sup>2+</sup> phosphor.

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 광자극발광에 관여하는 트랩들의 활성화에너지를 구하기 위하여 형광체에 X선을 1 Gy 조사한 후 30, 50 및 80 °C의 어두운 곳에 일정시간동안 보관하면서 광자극발광 강도의 감쇠특성을 측정하였다. 그리고 각 온도에서의 감쇠곡선의 기울기를 구하여  $\frac{1}{T}$ 에 대해 최소자승법으로 fitting 하면 그림 7과 같다. 이 직선의 기울기로부터 구한 활성화에너지는 약 0.98 eV이었다. 이 값은 열형광 glow 곡선으로부터 구한 열발광 트랩들의 활성화에너지 값과 잘 일치하므로 광자극발광과 열발광 과정에 관여하는 트랩들은 동일한 것으로 생각된다.

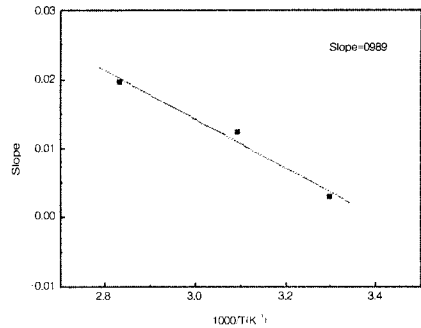


그림 7.  $\frac{1}{T}$ 의 함수로 나타낸 감쇠곡선의 기울기.  
Fig. 7. Plot of slope of decay curve as function of  $\frac{1}{T}$ .

## IV. 결 론

제작된 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 열발광 glow 피크는 352와 448 K에서 나타났으며, 주 피크(352 K)의 활성화에너지는 약 0.96 eV이었고, 주파수인자와 열발광과정의 차수는 각각  $1.79 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$  및 2차이었다.

BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 광자극발광 스펙트럼의 파장범위는 350 ~ 450 nm 사이였으며, 피크 파장은 약 390 nm 이었다. 그리고 광자극발광 준위의 활성화에너지는 약 0.98 eV이었다. 따라서 활성화에너지 값들이 거의 동일한 것을 고려하면 열발광과 광자극발광에 관여하는 트랩은 동일한 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년 한국과학재단에서 지원한 방사선안전신기술 연구센터의 지원을 받아 수행한 연구결과의 일부입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. von Seggern, T. Voigt, W. Knüpfner and G. Lange, "Physical model of photostimulated luminescence of x-ray irradiated BaFBr:Eu<sup>2+</sup>", J. Appl. Phys., 64(3), pp. 1405~1412, 1988.
- [2] Y. Iwabuchi, C. Umemoto, K. Tak-

- ahashi and S. Shionoya, "Photo-stimulated luminescence process in BaFBr:Eu<sup>2+</sup> containing F(Br<sup>-</sup>) and F(F<sup>-</sup>) centers", J. Lumin., 48 & 49, pp. 481~484, 1991.
- [3] F. K. Koschnick, J-M. Spaeth and R. S. Eachus, "The influence of oxide impurity on the generation by x-irradiation of F centers in BaFBr", J. Phys. : Condens. Matter 4, pp. 3015~3029, 1992.
- [4] Wei Chen, Mianzeng Su, Jiaging Song and Jinhua Lin, "Photostimulated luminescence of BaFBr:Eu<sup>2+</sup> phosphors", J. Appl. Phys., 80(9), pp. 5309~5311, 1996.
- [5] M. Sono, M. Takano, J. Miyahara and N. Kato, "Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence", Radiology, 148, pp. 833-838, 1983.
- [6] C. Mori and A. Matsumura, "Radioactivity and geometrical distribution measurements of  $\alpha$ -emitter specimens with the imaging plate", Nucl. Instr. and Meth. A 312, pp. 39~42, 1992.
- [7] A. Yamadera, E. Kim, T. Miyata and T. Nakamura, "Development of high sensitivity x- and  $\gamma$ -ray personal dosimeter using photostimulated luminescent detector", Appl. Radiat. Isot., 46(6/9), pp. 467~468, 1995.
- [8] E. Furuta, Y. Yoshizawa, T. Nataka and M. Takiue, "Radiolumino-graphic monitoring radioactive surface contamination on a rough surface material", Radioisotope, 46 (12), pp. 912~916, 1997.
- [9] K. Takahashi, K. Kohda, J. Miyahara, Y. Kanemitsu, K. Amitani and S. Shionoya, "Mechanism of photostimulated luminescence in BaFX : Eu<sup>2+</sup> (X=PL, Br) phosphors", J. Lumin., 31 & 32, pp. 266~268, 1984.
- [10] K. Inabe, Y. Utsui and N. Takeuchi, "Thermoluminescence of BaFCl:Dy and BaFCl:Cu X-irradiated at room temperature", Phys. Stat. Sol. (b) 138, pp. 493~500, 1986.
- [11] T. Hangleiter, F. K. Koschnick, J. M. Spaeth, R. H. D. Nuttall and R. S. Eachus, "Temperature dependence of the photostimulated luminescence of x-irradiation BaFBr :Eu<sup>2+</sup>", J. Phys.: Condens. Matter 2, pp. 6837~6846, 1990.
- [12] V. X. Quang, N. M. Son, P. T. Yen, T. H. Mai, B. Huttel, U. Troppenz and R. H. Mauch, "Thermoluminescence and photo-stimulated luminescence of calcium halophosphate doped with Eu", Phys. Stat. Sol. (a) 156, pp. 209~214, 1996.
- [13] M. J. Knitel, P. Dorenbos, and C. W. E. van Eijk, "Photostimulated luminescence and thermoluminescence properties of LiY-SiO<sub>4</sub>:Ce", J. Lumin., 72 & 74, pp. 765~766, 1997.
- [14] I. I. Grossweiner, "A note on the analysis of first-order glow curves", J. Appl. Phys., 24(10), pp. 1306~1307, 1953.
- [15] A. Halperin and A. A. Braner, "Evaluation of thermal activation energies from glow curves", Phys. Rev., 117(2), pp. 408~415, 1960.
- [16] G. C. Tayler and E. Lilley, "The analysis of thermoluminescent glow peaks in LiF(TLD-100)", J. Phys. D: Appl. Phys. 11, pp. 567~580, 1978.
- [17] R. Chen and S. A. A. Winer, "Effects of various heating rates on glow curves", J. Appl. Phys., 41

- (13), pp. 5227~5232, 1970.  
 [18] R. Chen, "Glow curves with general order kinetics", J. Electrochem. Soc., 116(9), pp. 1254~

- 1257, 1969.  
 [19] R. Chen and Y. Kirsh, "Analysis of thermally stimulated processes", Pergamon Press, Oxford(1981).

---

 著 者 紹 介
 

---

## 도 시 흥

1944. 9. 29 생  
 1969. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업 (이학사)  
 1972. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 1988. 8. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)  
 1990. 9. - 1991. 9 일본 福井大學 객원교수  
 1980. 11. - 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 교수

## 서 효 진

1981. 2. 경북대학교 자연과학대학 물리학과 졸업(이학사)  
 1983. 2. 부산대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 1987. 8. 부산대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학박사)  
 1991. - 1992. 영국 Strathclyde 대학 객원 교수  
 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 교수

## 강 감 중

1963. 2. 경북대학교 사범대학 물리학과 졸업 (이학사)  
 1982. 2. 부산대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 1989. 2. 영남대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학박사)  
 현재 부경대학교 자연과학대학 물리학과 교수

## 김 성 환

1967. 11. 5. 생  
 1990. 2. 경북대학교 물리학과 졸업(이학사)  
 1993. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 1997. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 박사과정 수료  
 1997. - 현재 대구보건대학 방사선과 조교수

## 김 찬 중

1974. 12. 26. 생  
 2001. 2. 금오공과대학교 자연과학대학 물리학과 졸업(이학사)  
 2001. 3. - 경북대학교 대학원 물리학과 (석사과정)

## 이 병 화

1972. 1. 7. 생  
 1999. 2. 안동대학교 물리학과 졸업(이학사)  
 2001. 2. 안동대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 2002. 3. - 경북대학교 대학원 물리학과(박사과정)

**김영국**

1951. 7. 생  
 1975. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업  
 (이학사)  
 1977. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학석사)  
 1988. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학박사)  
 1990. 1. - 1991. 2 미국 Lehigh Univ. 교  
 환교수  
 1980. 12. - 현재 경남대학교 물리학과 교수

**김도성**

1955. 11. 1. 생  
 1978. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업  
 (이학사)  
 1980. 9. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학석사)  
 1987. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학박사)  
 1981. 3. - 현재 대구대학교 과학교육학부 교  
 수

**김완**

1958. 10. 30. 생  
 1982. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업  
 (이학사)  
 1984. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학석사)  
 1997. 2. 부경대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학박사)  
 1986. 4. - 1997. 6 한국원자력연구소 선임연  
 구원  
 1997. 10. - 현재 경북대학교 방사선과학연구  
 소 연구원

**강희동**

1944. 5. 27. 생  
 1966. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업  
 (이학사)  
 1973. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학석사)  
 1980. 3. 프랑스 Paul Sabatier 대학 졸업  
 (이학박사)  
 1986. 2. - 1989. 3. 한국원자력연구소 책임연  
 구원  
 1989. 3. - 현재 경북대학교 물리학과 교수, 대  
 구지방방사능측정소장, 방사선과학연구소장