
Dynamic 방법을 이용한 LiTaO₃ 단결정의 초전특성에 대한 연구

강성준* · 정양희**

A Study on the Pyroelectric Effects of LiTaO₃ Single Crystal by Using the Dynamic Method

Seong Jun Kang* · Yang Hee Joung**

본 연구는 여수대학교 2002년도 학술연구지원비에 의하여 연구되었음.

요 약

LiTaO₃ 단결정의 초전특성에 대한 변조 주파수 의존성을 dynamic 방법을 이용하여 조사하였다. LiTaO₃ 단결정의 초전계수는 $2.1 \times 10^{-8} \text{C/cm}^2 \cdot \text{K}$ 로 나타났으며, 전압감도와 비검출능을 위한 재료평가지수도 각각 $1.31 \times 10^{-10} \text{C} \cdot \text{cm/J}$ 과 $1.47 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm/J}$ 로 매우 우수한 값을 나타내었다. 초전전압에 상응하는 전압감도는 4 Hz 에서 165 V/W로 최대값을 나타낸 후, 20 Hz 이상의 주파수 영역에서는 주파수에 반비례하는 특성을 나타냈고, 잡음등가전력과 비검출능은 같은 주파수 4 Hz에서 각각 $8.4 \times 10^{-9} \text{W/Hz}^{1/2}$ 와 $2.2 \times 10^7 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 의 최소값과 최대값을 나타내었다. 이로부터, LiTaO₃ 단결정이 인체 감지를 위한 저주파 대역에서 우수한 초전특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The modulated frequency dependence on the pyroelectric properties of LiTaO₃ single crystal was investigated by the dynamic method. The pyroelectric coefficient of LiTaO₃ single crystal was $2.1 \times 10^{-8} \text{C/cm}^2 \cdot \text{K}$, and figure of merits for the responsivity and the detectivity were $1.31 \times 10^{-10} \text{C} \cdot \text{cm/J}$ and $1.47 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm/J}$, respectively. The voltage responsivity corresponded with the pyroelectric voltage exhibited the highest value as about 165V/W at 4Hz and then was in inverse proportion to the frequency over 20Hz. The noise equivalent power and the detectivity at 4Hz were $8.4 \times 10^{-9} \text{W/Hz}^{1/2}$ and $2.2 \times 10^7 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, respectively. Therefore, we could found that LiTaO₃ single crystal shows a excellent pyroelectric properties in low frequency region for the human body detection.

키워드

LiTaO₃ crystal, Dynamic method, Pyroelectric coefficient, Figure of merit, Noise equivalent power, Detectivity

1. 서론

21세기의 정보산업사회에서는 보다 많은 정보를 정확하게 인지할 수 있는 기술의 확보가 요체이며, 이는 주변에서 일어나는 모든 물리적 변화를 전기적 신호로 변환시킬 수 있는 다양한 센서의 개발이 핵심이 되고 있다. 그동안 각종 정보의 처리를 담당하는 processor의 발전에 비해, 정보를 송수신하는 감각기관이라 할 수 있는 센서의 기술은 상대적으로 낙후되어 있었다. 최근에는 인간의 두뇌를 모방한 컴퓨터 기술의 비약적인 발달로 전기신호의 처리기술이 향상되어 단순한 자동화 기술에서 성능이 우수하고 기능이 다양한 지능형 센서 개발로의 기술 수요가 나날이 증대되고 있고, 측정대상물로부터 정보를 검출하여 측정량을 전기적 신호로 변환하는 센서소자는 전자, 통신산업 및 여러 응용분야에 필요한 핵심부품으로 자리잡고 있다.

최근, 이러한 센서소자 중에서 강유전체의 온도 변화에 따른 자발분극의 변화 때문에 발생하는 초전효과를 이용한 초전형 적외선 센서는 감도의 파장의존성이 적고 상온에서도 사용이 가능하므로 가정용, 군사용, 의학용에까지 그 활용범위가 확산되어가고 있다.^[1-4] 이러한 초전형 적외선 센서의 감지물질로는 다양한 재료가 사용되어 왔으나, 그중 LiTaO₃ 단결정은 ~620°C 부근의 높은 큐리온도 (T_C)와 전기적·기계적 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있어 초전형 적외선 센서에 유망한 재료로 생각되고 있다.^[5]

초전형 적외선 센서는 온도변화가 없는 열적 평형상태에서 동작하지 않고, 변화하는 입력에 대해서 동작하는 미분형 센서이므로 측정대상물 자체가 이동하거나 아니면 초퍼를 이용하여 적외선을 단속시켜주어야만 동작이 가능하다. 따라서, 측정대상물의 이동 또는 초퍼의 회전에 연관된 주파수와 밀접하게 관계되므로, 초전특성의 주파수 의존성을 연구하는 것은 대단히 중요하다. 초전특성을 측정하는 방법은 크게 static 방법과 dynamic 방법으로 나눌 수 있다. Static 방법은 시료에 직접적으로 온도를 가하여 시료의 온도변화를 통해 발생하는 자발분극의 변화를

초전전류 형태로 감지하는 것으로 주파수 의존성을 조사할 수 없으며, 분극상태가 파괴되는 단점이 있다. 반면, dynamic 방법은 외부에서 에너지가 인가될 때, 미소한 온도차에 의해 변화되는 자발분극의 변화를 초전전압 형태로 감지하는 방법으로 분극상태의 파괴없이 초전특성의 주파수 의존성을 재현성 있게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.^[6-8]

본 논문에서는 적외선의 흡수율을 높이기 위해 black coating 된 LiTaO₃ 단결정으로 제작된 시료에 대하여, dynamic 방법으로 초전전압, 전압감도, 잡음등가전력, 비검출능 등의 초전특성에 대한 주파수 의존성을 조사하였다.

II. 실험방법

LiTaO₃ 단결정을 이용한 측정시료의 제작 단계를 Fig. 1 에 나타내었다.

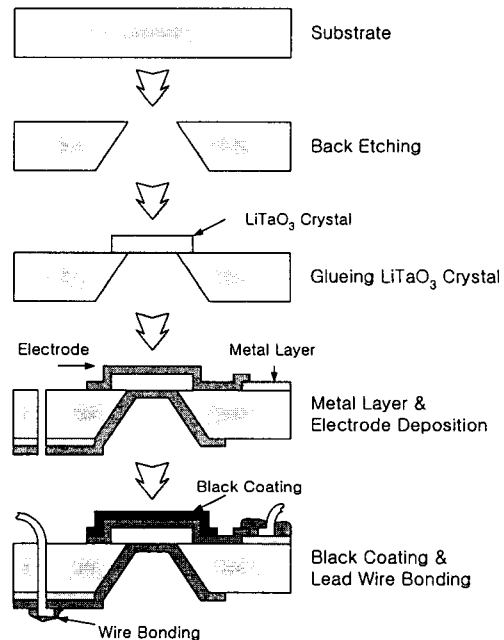


그림 1. LiTaO₃ 단결정을 이용한 측정시료의 제작 공정
Fig. 1 Fabrication process of the specimen using LiTaO₃ single crystal

본 실험에서는 시료의 두께와 지름이 각각 20 μm 와 0.2cm인 측정시료를 제작하기 위해 기판 위 뒷면을 원추형으로 제거한 후, 기판의 전면에 LiTaO_3 를 부착하였으며 초전신호를 검출하기 위한 전극을 전면과 후면에 각각 증착 하였다. 그리고 초전전압응답 특성을 향상시키기 위하여 열선속이 입사되는 시료의 표면에 black-coating 처리를 하여 측정시료의 제작을 완료하였다.

초전특성은 dynamic 방법을 이용하여 측정되었다. 초전응답신호는 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 측정 system을 이용하여 조사되었다.

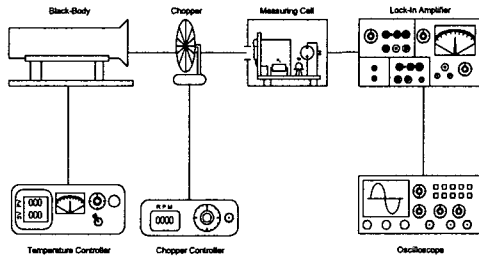


그림 2. 측정 system의 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

측정 system은 black body, temperature controller, optical chopper(SR 540), cell box, lock-in amplifier(EG & G 124A) 및 오실로스코프(Tektronix 2445A)로 구성되어 있다. Black body의 동작온도는 300 $^{\circ}\text{C}$ 이며 temperature controller에 의해 제어된다. Blackbody로부터 방사되는 열선속은 optical chopper를 통해 제작한 cell box 내의 측정 시료에 입사된다. 초전특성을 측정하기 위한 cell box 내의 회로구성을 보면, 부하저항은 4 G Ω 이고 시료와 low-noise JFET(2N4416)은 source follower 회로 형태로 연결되어 있다. 입사된 열선속은 측정 시료에 미세한 온도 변화를 야기시켜 분극의 크기를 변화시킨다. 이때 시료 표면에 전하의 변화가 발생하므로 전기적 신호가 발생하게 된다. 이러한 변화로 발생하는 초전응답신호는 그 값을 측정하는 lock-in amplifier로 들어가고 오실로스코프에서 신호의 형태로 검출된다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 3은 LiTaO_3 단결정으로 부터 비파괴적인 dynamic 방법을 이용하여 측정한 주파수에 따른 초전전압을 나타낸 것이다. $5.26 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 의 열복사 선속이 2 Hz~1 kHz의 주파수 범위로 변조되어 LiTaO_3 단결정에 입사되었다. Fig. 3에서 보듯이, 초전전압은 4Hz에서 2.7 mV 로 최대응답을 나타낸 후, 주파수가 증가함에 따라 감소하는 특성을 나타내었다.

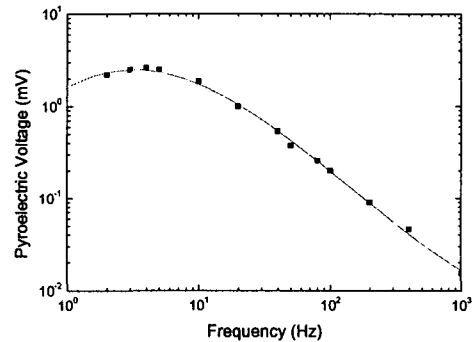


그림 3. LiTaO_3 의 초전전압의 주파수 의존성
Fig. 3 Frequency dependence of the pyroelectric voltage for a LiTaO_3 single crystal

Table 1에 LiTaO_3 단결정의 비유전률, 유전손실, 초전계수 및 재료평가지수를 나타내었다. 재료평가지수 (figure of merit)는 초전재료 자체를 평가하는 매우 중요한 요소인데, 이는 입사적외선 강도, 복사율, 증폭기의 특성 등에 영향을 받지 않고 비유전률, 유전손실, 체적비열, 초전계수와 같은 초전재료의 고유한 물성값에 의해서만 결정되기 때문이다. 식 (1)과 (2)에 각각 전압감도와 비검출능을 위한 재료평가지수를 나타내었다.¹⁹⁾

$$F_V = \frac{d}{c_v \epsilon_r} \quad (1)$$

$$F_D = \frac{d}{c_v \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (2)$$

여기서, p 는 초전계수, C_p 는 LiTaO₃ 단결정의 체적비열 (3.2 J/cm³·K), ϵ_r 은 비유전률, $\tan \delta$ 는 유전손실이다.

표 1. LiTaO₃의 유전특성, 초전계수 및 재료평가지수

Table. 1 The dielectric properties, pyroelectric coefficient and figure of merits of the LiTaO₃ single crystal

항 목		값
비유전률 (ϵ_r)		50
유전손실 ($\tan\delta$)		0.004
초전계수 (p , C/cm ² ·K)		2.1×10^{-8}
재료 평가 지수	F_V (C·cm/J)	1.31×10^{-10}
	F_D (C·cm/J)	1.47×10^{-8}

Table 1에서 보듯이, LiTaO₃ 단결정의 초전계수는 2.1×10^{-8} C/cm²·K로 이 값은 S. A. Hamid^[10]가 조사한 초전계수 1.8×10^{-8} C/cm²·K보다 다소 좋은 결과이지만, A. J. Moulson 등^[11]이 보고한 초전계수 2.3×10^{-8} C/cm²·K보다는 약간 작은 값을 나타냈다. LiTaO₃ 단결정의 유전특성은 LCR meter로 측정되었으며, 이를 토대로 식 (1)과 (2)에 적용하여 전압감도와 비검출능을 위한 재료평가지수를 구하였다. 전압감도와 비검출능을 위한 재료평가지수는 각각 1.31×10^{-10} C·cm/J과 1.47×10^{-8} C·cm/J으로 상당히 우수한 값을 나타내었다.

Fig. 4는 LiTaO₃ 단결정의 전압감도 (R_V)를 구한 것으로, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$R_V = \frac{V_f}{F_0 A_0} \quad (3)$$

여기서, V_f 는 주파수에 따른 초전전압, F_0 는 입사 복사 열 선속, A_0 는 수광 면적이다.

식 (3)에서 보듯이 전압감도는 입사 열 선속과

감지물질의 면적(적외선을 흡수하는 상부전극 면적)으로 초전전압을 나누는 것으로 정의된다.

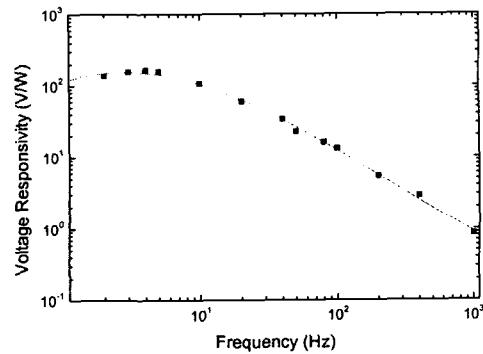


그림 4. LiTaO₃의 주파수에 따른 전압응답
Fig. 4 Voltage responsivity of the LiTaO₃ single crystal with the variation of modulation frequency

Fig. 4에서 보듯이, 전압감도는 4 Hz에서 약 165 V/W로 최고치를 나타낸 후, 20 Hz 이상의 주파수에서는 주파수에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 이는 입사되는 열선속에 의해 시료 내에 미세한 온도차가 발생하므로, 시료 내 분극의 크기에 따라 표면에 초전전하가 야기된다. 이때 발생한 초전전하는 주파수의 증가에 따라 시료 내 분극의 움직임에 제약을 받기 때문에 분극의 감소에 따라 방출되는 초전전하도 감소하기 때문에 전압응답은 선형적으로 감소하는 특성을 나타낸다고 생각된다. 또, 전압감도의 이론적 수식인 식 (4)에 의해서도 설명되어 질 수 있다.^[12]

$$R_V = \frac{p\eta A_0 R_g R_t \omega}{(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_i^2)^{1/2}} \quad (4)$$

여기서, η 는 흡수율, R_g 와 R_t 는 전기적 저항과 열적 저항, ω 는 각변조 주파수, τ_e 와 τ_i 는 각각 전기적 시상수와 열적 시상수이다.

식 (4)에서 보듯이, 주파수가 $1/\tau_i$ 의 경계를 넘어서 고주파로 갈수록 전압감도가 주파수에 반비례하여 변화하게 됨을 알 수 있다.

초전형 적외선 센서의 잡음측정전압 (V_{meas})

이 변조 주파수 따라 측정되었다. 잡음전압 (V_N)은 센서의 출력단에서의 잡음전압이며, 일반적으로 실험치와 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$V_N = V_{meas} / \sqrt{\Delta F_N} \quad (5)$$

$$\Delta F_N = \frac{\pi}{2} \frac{f}{Q} \quad (6)$$

여기서, ΔF_N 은 잡음전압의 중심주파수 편차이고, Q 는 측정시의 f 와 ΔF_N 의 비이다.

LiTaO₃ 단결정에 대하여 대역폭 (V/Hz^{1/2}) 당 잡음 전압의 주파수 의존성을 Fig. 5에 나타내었다.

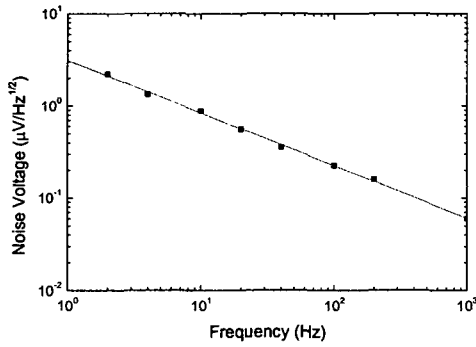


그림 5. LiTaO₃의 주파수에 따른 잡음전압
Fig. 5 Noise voltage of the LiTaO₃ single crystal with the variation of modulation frequency

Fig. 5에서 보듯이, 잡음전압은 주파수의 제곱근에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 이는 식 (7)에 나타낸 잡음전압의 이론적인 수식에 의해 설명될 수 있다.^[13]

$$V_N = \sqrt{\frac{4k_B T R_0 (1 + \omega C_0 R_0 \tan \delta)}{1 + (2\pi f R_0 C_0)^2}} \quad (7)$$

여기서, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다.

잡음전압 (V_N)은 온도 잡음(temperature noise V_t), Johnson 잡음(유전손실잡음 ($\tan \delta$ noise V_d))와 입력저항잡음(input resistance noise V_r)의 총

합이다. 잡음전압 (V_N)이 주파수의 제곱근에 비례하여 감소하는데 이는 Johnson 잡음 중 유전손실잡음 ($\tan \delta$ noise V_d)이 초전형 적외선 센서에서 매우 우세하기 때문이다.^[14]

초전형 적외선 센서의 특성을 나타내는 주요 인자중의 하나가 잡음등가전력(noise equivalent power, NEP)이다. 주어진 적외선 source의 에너지, 변화하는 입력 signal rate 등에 대한 잡음등가전력은 초전형 적외선 센서가 유용한지를 알려주는 하한점을 의미한다. 다시 말해서, 잡음등가전력은 센서잡음과 동일한 출력 신호를 주기 위해 필요한 열전속을 의미하며, 잡음과 신호 출력이 같을 때 센서의 최소 적외선 세기를 나타낸다.

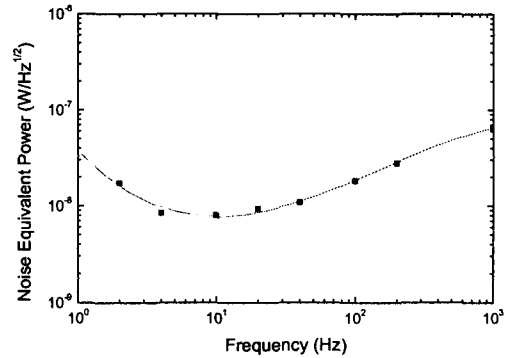


그림 6. LiTaO₃의 주파수에 따른 잡음등가전력
Fig. 6 Noise equivalent power (NEP) of the LiTaO₃ single crystal with the variation of modulation frequency

Fig. 6은 LiTaO₃ 단결정의 잡음등가전력의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 잡음등가전력은 식 (8)과 같이 정의되어진다.^[15]

$$NEP = \frac{V_N}{R_V} \quad (8)$$

잡음등가전력은 잡음전압을 전압감도로 나눈 값으로서 센서에서의 최소복사선속(radiant flux)을 제시한다. 잡음등가전력의 값이 작을수록 센

서의 성능은 우수한 것이며, 4 Hz의 주파수에서 $8.4 \times 10^{-9} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 으로 최소값을 나타내었다.

비검출능 (specific detectivity)은 1 cm^2 의 면적을 가진 센서에 대한 입사 power가 1W이고 잡음을 1 Hz의 electrical bandwidth을 가지고 측정했을 때, 신호 대 잡음비로서, 식 (9)와 같이 표현된다.^[15]

$$D^* = \frac{\sqrt{A_0}}{NEP} \quad (9)$$

센서의 성능은 수광면적이나 측정계에 따라 다르기 때문에 비교하기가 어려우나, 비검출능은 면적으로 규격화되어 있기 때문에 재료 자체의 검출 기능을 비교하기에 가장 적합한 초전특성이다. Fig. 7은 LiTaO₃ 단결정의 주파수에 따른 비검출능 (D^*)을 나타낸 것이다.

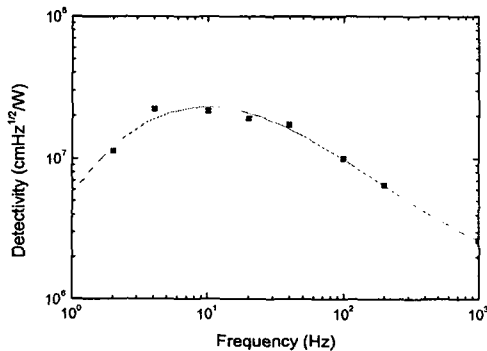


그림 7. LiTaO₃의 주파수에 따른 검출능
Fig. 7 Detectivity of the LiTaO₃ single crystal with the variation of modulation frequency

Fig. 7에서 보듯이, 비검출능은 4 Hz에서 $2.2 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 의 최대값을 나타낸 후, 20 Hz 이상에서의 주파수에서는 주파수의 제곱근에 비례하여 감소한다. 이는 전압감도가 주파수에 비례하여 감소하는 반면 잡음전압은 주파수의 제곱근에 비례하여 감소하기 때문이다.

IV. 결론

본 연구에서는 두께와 지름이 각각 $20 \mu\text{m}$ 와 0.2 cm 인 강유전체 LiTaO₃ 단결정 시료의 초전 특성을 향상시키기 위해 시료 표면에 black coating 처리를 한 후, 초전특성에 대한 주파수의존성을 dynamic 방법을 이용하여 조사하였다. 초전전압은 4 Hz에서 2.7 mV로 최대값을 나타낸 후, 주파수가 증가함에 따라 감소하였다. 또, LaTiO₃ 단결정의 초전계수는 $2.1 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2 \cdot \text{K}$ 이었고, 전압감도와 비검출능을 위한 재료평가지수는 각각 $1.31 \times 10^{-10} \text{ C} \cdot \text{cm/J}$ 과 $1.47 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm/J}$ 로 나타났다. 전압감도는 4 Hz에서 약 165 V/W 로 최고치를 나타낸 후, 20 Hz 이상의 주파수에서는 주파수에 비례하여 감소하는 특성을 나타내었다. 잡음전압은 Johnson 잡음 중, 유전손실 잡음이 우세하기 때문에 주파수의 제곱근에 비례하여 감소하는 경향을 보였고, 잡음등가전력은 4 Hz에서 최소값 $8.4 \times 10^{-9} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 로 나타났다. 잡음등가전력에 반비례하는 경향을 나타내는 비검출능은 4 Hz에서 $2.2 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 로 최대값을 나타내었다.

따라서, 본 연구에서는 LiTaO₃ 단결정이 인체 감지를 위한 저주파 대역에서 우수한 초전특성을 나타냄을 알 수 있었고, LiTaO₃ 단결정이 초전형 적외선 센서에 적용하기에 아주 적합한 물질임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. Saito, *Fine Ceramics*, Ohmsha, pp. 34 (1987)
- [2] S. T. Liu and D. Long, "Pyroelectric Detectors and Materials", *Proceedings of IEEE*, vol. 66, pp. 14~26 (1978)
- [3] R. W. Astheimer, and F. Schwarz, "Thermal Imaging Using Pyroelectric Detectors", *Applied Optics*, vol. 7, pp. 1687~1695 (1968)
- [4] C. B. Roundy, R. L. Byer, "Subnanosecond Pyroelectric Detector", *Applied Physics Letters*, vol. 21, pp. 512~515 (1972)
- [5] C. B. Roundy, R. L. Byer, "Sensitive LiTaO₃

- Pyroelectric Detector", *Journal of Applied Physics*, vol. 44, pp. 929~931 (1973)
- [6] A. G. Chynoweth, "Dynamic Method for Measuring the Pyroelectric Effect with Special Reference to Barium Titanate", *J. Appl. Phys.*, vol. 27, pp. 78~84 (1956)
- [7] R. C. Buchanan and J. Huang, "Pyroelectric and Sensor Properties of Ferroelectric Thin Films for Energy Conversion", *J. E. Ceram. Soc.*, vol 19, pp. 1467~1471 (1999)
- [8] C. M. Wang, U. C. Chen and M. S. Lee, "Pyroelectric Properties of La-modified Lead Titanate Thin Film Detectors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, pp. 2831~2834 (1999)
- [9] Dong Hoon Chang, Seong Jun Kang and Yung Sup Yoon, "Pyroelectric Properties of $Pb_{0.9}La_{0.1}TiO_3$ (PLT(10)) Thin Film on P-Doped Poly Silicon", *Ferroelectrics*, vol. 247, pp. 241~251 (2000)
- [10] S. A. Hamid, "Tourmaline as a Pyroelectric Infrared Radiation Detector", *Zeitschrift für kristallographie*, vol. 151, pp. 67~75 (1980)
- [11] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *Electroceraamics*, Chapman & Hall, pp. 327 (1995)
- [12] M. Kohli, C. Wuethrich, K. Brooks, B. Wliing, M. Forster, P. Muralt, N. Setter and P. Ryser : *Sens. & Actuat. A*, vol. 60, pp. 147, (1997)
- [13] Dae Eun Cha, Dong Hoon Chang, Yung Sup Yoon and Seong Jun Kang, "Frequency Dependence of the Dynamic Pyroelectric Properties of $Pb_{1-x}La_xTi_{1-x/4}O_3$ (PLT) Ferroelectric Thin Films with Various La Concentrations", *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 42, pp.288~293 (2003)
- [14] R. Takayama, Y. Tomita, K. Lijima and I. Ueda, "Preparation Characteristics of Pyroelectric Infrared Sensor Made of c-axis Oriented La-Modified $PbTiO_3$ Thin Films", *J. Appl. Phys.*, vol. 60, pp. 411~415 (1987)
- [15] A. Rogalski, *Infrared Detectors*, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 16 (2000)

저자소개

강성준(Seong-Jun Kang)

1989년 2월 인하대 응용물리학과 졸업(공학사)
1994년 8월 인하대 전자재료공학과 졸업(공학석사)
1999년 2월 인하대 전자재료공학과 졸업(공학박사)
2000년~현재 여수대학교 반도체·응용물리학과 조교수
※관심분야: VLSI 공정, 강유전체 박막 및 신소재

정양희(Ynag-Hee Joung)

1983년 2월 단국대 응용물리학과 졸업(공학사)
1985년 8월 인하대 응용물리학과 졸업(공학석사)
1993년 8월 인하대 전자재료공학과 졸업(공학박사)
1988년~1995년 LG반도체 선임연구원
1995년~현재 여수대학교 전기공학과 부교수
※관심분야: VLSI 공정 및 반도체물성