

LiTaO₃ crystal Dynamic 초전 특성과

그 주파수 의존성

이원재, 윤영섭

인하대학교 전자재료공학과

Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882

Dynamic Pyroelectric Properties and Their Frequency Dependences of LiTaO₃ Crystal

Won Jae Lee and Yung Sup Yoon

Dept. of Electronic Materials and Devices Engineering, Inha University

Inchon 402-751, Korea

Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882

Abstract

In this paper, we have investigated the pyroelectric characteristics of the 20 μ m-thick LiTaO₃ single crystal with black coating by using the nondestructive dynamic method. The LiTaO₃ shows the maximum pyroelectric coefficient (γ) of 1.56×10^{-8} C/cm²K at 40Hz and the responsivity (R_V) is 488 V/W at 2Hz. The noise equivalent power (NEP) is obtained as 3.95×10^{-10} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 40Hz. The detectivity (D^*) is obtained divided by the sample area and estimated to be 5.6×10^8 cm² $\sqrt{\text{Hz}}$ /W at 40Hz. These results, shows that the LiTaO₃ single crystals are the best candidates to pyroelectric IR sensors.

I. 서론

측정 대상물로부터 정보를 검출하여 측정량을 전기적 신호로 변환하는 센서 소자는 자동화, 정밀화, 고속화 등 전자, 통신 산업의 기술 고도화에 필요한 핵심 부품이다. 이들 중에서 적외선 센서는 광전도 효과,

광기전력 효과 등을 이용하는 양자형과 적외선을 일단 열로 변환하고 저항변화나 기전력 등의 형태로 출력하는 열형으로 구분된다. 열형 중 강유전체의 온도 변화에 따른 자발분극의 변화 때문에 발생하는 초전효과 (pyroelectric effect) 를 이용한 초전형 적외선 센서는 신뢰성 향상, 응답속도의 고속화, 고감도화, 저가격화, 저잡음 및 전원전압을 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있어 가전기기, 공장자동화, 로봇, 항공기기, 적외선 분석기, 고출력 레이저 펄스 감지기, 군사용, 의학용에 까지 그 활용범위가 확산되어 가고 있다.^[1] 이러한 초전형 적외선 센서의 감지물질로 PZT, PLT, LiTaO₃, PbTiO₃, TGS 등과 같은 물질을 사용되는데 그중 LiTaO₃ 단결정은 618~620 $^{\circ}$ C 의 높은 큐리온도와 전기적·기계적 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있어 초전형 적외선 센서에 유망한 재료로 생각되고 있다.^[2] 초전형 적외선 센서의 성능을 나타내는 중요한 특성들에는 초전계수 (γ), 재료평가지수 (F_V), 잡음 등가 전력 (NEP), 비검출능 (D^*) 등이 있다. 이들 특성을 측정하는 방법에는 static 방법과 dynamic 방법이 있다. Static 방법은 시료에 직접적으로 온도를 가하여 온도 변화에 따른 초전 전류를 감지하는 것으로써 분극상태가 파괴되는 단점이 있다. 반면에,

dynamic 방법은 외부에서 에너지가 인가될 때, 미소한 온도차에 의해 변화되는 자발분극을 초전응답으로 감지하는 것으로서 초전 물질의 분극 상태가 파괴되지 않는다는 장점을 가지고 있다.^[3] 본 연구에서는 검출도를 높이기 위해 20 μ m 의 두께와 2.5cm 의 지름을 가지는 LiTaO₃ 표면에 black coating 처리를 한 후, dynamic 방법을 사용하여 초전 특성을 측정하였다.

II. 이론적 배경

초전형 적외선 센서에서, 흡수된 radiation 이 주파수 (Ω) 와 진폭 (F_0) 을 가지고 초전 소자에 공간적으로 작은 온도 증가 (θ) 를 야기하므로, 적외선 감지물질에서의 열방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(c\theta) + G\theta = \epsilon_1 F(t) \quad (1)$$

여기서, ϵ_1 은 초전소재의 흡수율, θ 는 평균 온도증가, G 는 열적 손실계수, c 는 초전 소자의 단위 체적당 비열, $F(t) = F_0 A_0 (1 + e^{i\Omega t})$ 는 열선속, A_0 는 소자의 면적을 나타낸다.

감광소자 (Sensitive element) 의 전압 U 와 전류 I 사이의 관계를 식 (3) 에 나타내었다.

$$\frac{d(UC_{cr})}{dt} + \frac{U}{R_{cr}} = I \quad (2)$$

여기서 C_{cr} 과 R_{cr} 은 시료의 캐패시턴스와 저항이다.

초전전압은 radiation flux 의 동작 조건에 따라서 변화하기 때문에 식 (3) 의 형태로 표현이 가능하다.

$$U = \frac{\gamma A_0 F_0 R_0 \epsilon_1}{cd \sqrt{1 + \left(\frac{4\pi\epsilon_1 \sigma T_s^3}{\Omega cd}\right)^2} \sqrt{1 + \Omega^2 C_{cr}^2 R_0^2}} \quad (3)$$

식 (3) 은 초전전압 $U_{p,r}$ 을 구하는 식으로, d 는 감광성 소자의 두께, T_s 는 주변온도이다.

초전 전압은 부하 저항에 따라 두개의 영역으로 나눌 수 있으며, 자세한 식은 다음과 같다.

1) Pyroelectric Current regime ($\Omega C_{cr} R_0 \ll 1$)

$$\Omega < 1 \text{ kHz} \rightarrow R_{L1} \leq 10^6 \Omega, (20 \leq C_{cr} \leq 80) \text{ pF}$$

$$U_{p,c} = \left(\frac{\gamma}{H_0}\right) \frac{\eta A_0 F_0 R_0}{d} \quad (4a)$$

2) Pyroelectric Voltage regime ($\Omega C_{cr} R_0 \gg 1$)

$$\Omega < 1 \text{ kHz} \rightarrow (10^9 \leq R_0 \leq 10^{10}) \Omega, (20 \leq C_{cr} \leq 80) \text{ pF}$$

$$U_{p,v} = \left(\frac{\gamma}{H_0 \epsilon_r}\right) \frac{\eta F_0}{\epsilon_0 \Omega} \quad (4b)$$

Quality factor 는 초전물질에 있어서 매우 중요한 변수이며 식 (5) 에 나타내었다.

$$M_1 = \frac{\gamma}{c} = \frac{U_{p,c} d}{\epsilon_1 A_0 F_0 R_0}, M_2 = \frac{\gamma}{c \epsilon} = \frac{U_{p,v} \epsilon_0 \Omega}{\epsilon_1 F_0} \quad (5)$$

식 (5) 로부터 시료의 비유전율을 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{M_1}{M_2} = \frac{U_{p,c} d}{U_{p,v} \epsilon_0 R_{L1} \Omega} \quad (6)$$

앞에서 언급한 식 (3) 과 식 (6) 으로부터 구한 초전계수는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{U_{p,r} c d}{\eta_1 F_0 A_0 R_{L2}} \sqrt{1 + \left(\frac{R_{L2} U_{p,c}}{R_{L1} U_{p,r}}\right)^2} \quad (7)$$

식 (3) 의 전압응답을 주파수의 변화에 따라 입사되는 열선속으로 나누면 전압감도를 구할 수 있다.

$$R_r = \frac{R_{L2} \gamma \epsilon_1}{d c_1 \sqrt{1 + \left(\frac{R_{L2} U_{p,c}}{R_{L1} U_{p,r}}\right)^2}} \quad (8)$$

잡음등가전력 (Noise Equivalent Power) 은 센서의 잡음 출력과 신호 출력이 같게 될 때 센서의 최소 적외선 세기를 나타내므로 다음 식으로 나타내었다.

$$NEP = \frac{2R_{L1} A_0 F_0 \sqrt{kT_s}}{U_{p,c} \sqrt{R_{L2}}} \quad (9)$$

비검출능 D^* 은 초전 센서의 성능을 결정하는 S/N 비를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$D^* = \frac{\sqrt{A_0}}{NEP} = \frac{U_{p,c} \sqrt{R_{L2}}}{2R_{L1} F_0 \sqrt{A_0 kT_s}} \quad (10)$$

III. 실험 방법

본 연구에서는 측정 시료를 제작하기 위해 기관워 닷면을 원추형으로 제거한후, 기관의 전면에 LiTaO₃ 를 부착하였으며 초전 신호를 검출하기 위해 전극을 전면과 후면에 각각 증착하였다. 또한, 응답 특성을 개선시키기 위하여 열선속이 입사되는 시료 표면을 black-coating 하였다. 초전특성을 측정하기 위한 주변 회로에서, 저항 R 은 100 K Ω 으로 고정되었으며, 부하 저항 R_{L1} 과 R_{L2} 는 각각 1M Ω 과 17.3 G Ω 이 사용되었고, 시료와 JFET (KP 303A) 소스 폴로워 회로에 병렬로 연결되었다. 완성된 측정시료와 회로를 Fig. 1 의 측정 cell 에 고정시킨후, 실험을 수행하였다.

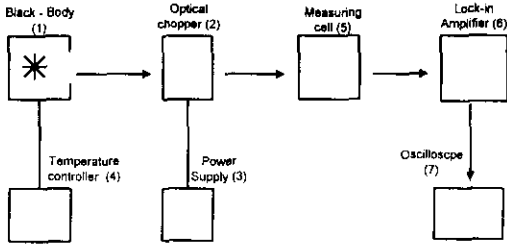


Fig. 1. Schematic diagram of measuring system

Fig. 1 의 측정 시스템에 대한 동작 원리는 다음과 같다. 흑체 (Black-body)로부터 나오는 열선속이 초전 소자에 입사되는 광원으로 사용되었다. 초파와 회전선에 의해 cooling 과 warming 을 반복하여 초전 소자에 입사되는 열선속이 작은 온도 변화를 야기시키도록 분극을 변화시키는 원인이 된다. 이러한 변화로 발생하는 초전 신호가 lock-in amp. (124A) 와 오실로스코프 (Tektronix 2445A) 에 검출된다. 이때 lock-in amp. 의 초파 주파수는 광학 초파 (SR 540) 와 동일한 과정을 가지며, 그에 따른 초전 특성을 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

Dynamic method 를 이용하여 측정된 LiTaO₃ 단결정의 전압응답을 Fig. 2 에 나타내었다. 17.3 GΩ 의 부하저항이 사용된 초전전압영역에서의 전압응답은 2 Hz 부터 지수적으로 감소하나 1 MΩ 정도의 부하저항이 사용된 초전전류영역의 전압응답은 초전전압영역에서의 전압응답에 비해 broad 한 특성을 나타내었다. 이런 현상은 전압응답이 시료 저항 크기와 주파수에 관하여 언급한 다른 group 의 결과와 유사하였다.^[1]

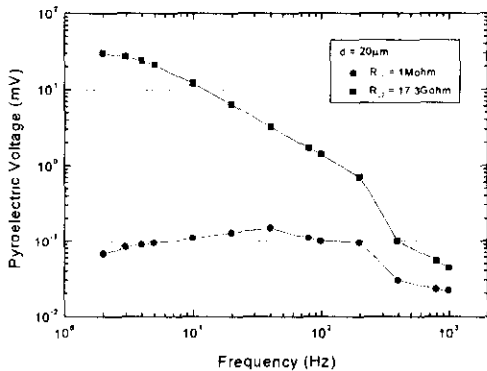


Fig. 2. Pyroelectric voltage of LiTaO₃ crystal with a various load resistors

Fig. 3 은 두께가 20μm 인 LiTaO₃ crystal 의 주파수 변화에 따른 초전계수를 나타내었다. 초전계수는 앞에서 측정된 전압응답과 식 (7) 을 이용하여 구하였다. Fig. 3 으로부터 초전계수는 40Hz 에서 1.56×10⁻⁸ C/cm²K 이었으며, LiTaO₃ crystal 이 2.3×10⁻⁸ C/cm²K 의 높은 초전계수를 나타낸다는 다른 group 의 결과와 유사하므로 적외선 센서의 제작에 적합한 것을 알 수 있었다.^[5]

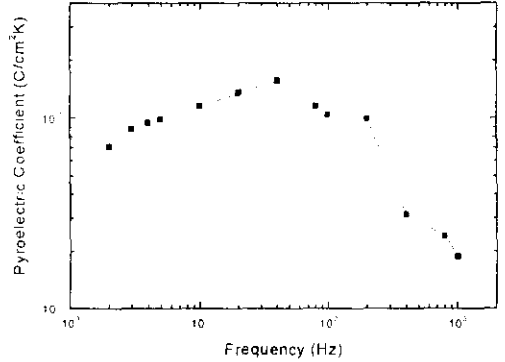


Fig. 3. Pyroelectric coefficient of LiTaO₃ crystal

Fig. 4 에서 전압감도 (R_v) 는 주파수의 증가에 따라 감소하였다. 식 (8) 에서 보듯이 높은 전압감도를 얻기 위해서는 재료의 초전계수와 유전율 그리고 저항이 높아야 한다. 초전형 적외선 센서의 특성을 나타내는데 있어서 전압감도의 중요성은 측정시 NEP 와 비결합성 (D*) 에도 많은 영향을 주기 때문이다.^[6]

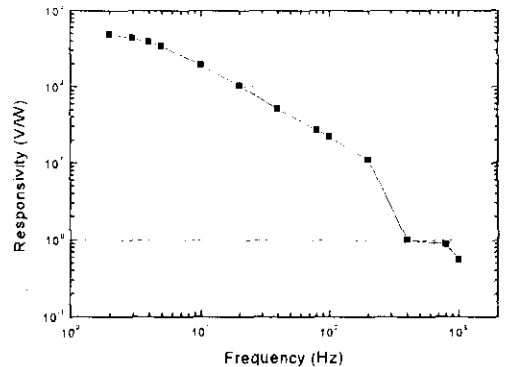


Fig. 4. Voltage Responsivity of LiTaO₃ crystal

Fig. 5 에 나타낸 NEP 는 센서 잡음과 동일한 출력 신호를 주기 위해 필요한 열선속을 의미하며, LiTaO₃ crystal 의 경우, 40Hz 에서 최소인 3.95×10⁻¹⁰ W/√Hz 이었다. 식 (9) 에서 보듯이, 초전전류영역의

전압응답에 반비례하기 때문에 주파수의 증가에 따른 초전응답과는 반대로 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었다.

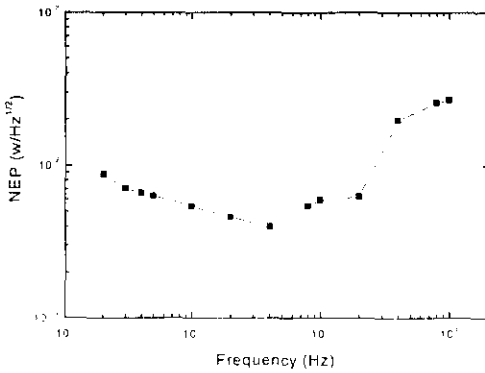


Fig. 5. Noise equivalent power (NEP) of LiTaO₃ crystal

Fig. 6 은 두께가 20 μ m 인 LiTaO₃ crystal 의 비검출능 (D') 을 나타낸 것이다. Fig. 6 에서 보듯이, 2~40Hz 사이에서 높은 비검출능을 나타내고 40Hz 이후의 주파수에서 검출도가 점차 낮아지는 경향을 나타내었다. 식 (10) 으로부터 알 수 있듯이, 이 경향은 Fig. 5 의 NEP 와는 반대의 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

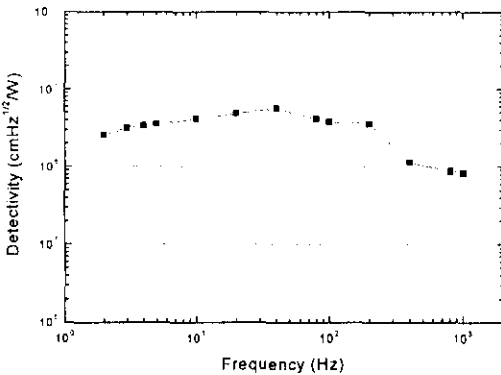


Fig. 6. Detectivity of LiTaO₃ crystal

V. 결론

본 연구에서는 비파괴적인 dynamic method 를 이용하여 black coating 처리가 된 두께 20 μ m 의 LiTaO₃ 단결정의 초전특성을 조사하였다.

측정된 LiTaO₃ 단결정의 전압응답은 초전전압영역

($R_L = 17.3 \text{ G}\Omega$) 에서 지수적으로 감소하나 초전전류영역 ($R_L = 1 \text{ M}\Omega$) 에서는 broad 한 특성을 나타내었다. 두께가 20 μ m 인 LiTaO₃ crystal 의 주파수 변화에 따른 초전계수는 측정된 전압응답을 이용하여 40Hz 에서 $1.56 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2\text{K}$ 임을 알 수 있었다. 전압감도 (R_v) 도 주파수에 따라 488 V/W 로부터 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. NEP 는 센서 잡음과 동일한 출력 신호를 주기 위해 필요한 열선속을 의미하며, LiTaO₃ crystal 의 최소 NEP 는 40Hz 에서 $3.95 \times 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다. 식 (9) 에서 보듯이, 초전전류영역의 전압응답에 반비례하기 때문에 주파수의 증가에 따른 초전응답과는 반대로 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 식료면적에 대해 NEP 를 나누어 비검출능 (D') 을 구했다. 2Hz ~ 40Hz 의 주파수 대역에서 높은 비검출능을 나타내고 40Hz 이후의 주파수에서 검출도가 점차 낮아지는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- [1] S. Saito, Line Ceramics, Ohmsha LTD, 34 (1987)
- [2] S. T. Liu, Proceedings of IEEE, vol. 66, pp. 11~26 (1978)
- [3] A. G. Chynoweth, J. Appl. Phys., vol. 27, pp.78~84 (1956)
- [4] Wen-Yaw Chung, Tai-Ping Sun, Yung-Lung Chin and Yuan-Liang Kao, Proceedings of IEEE, pp. 225~228 (1996)
- [5] Yuhuan Xu, Ferroelectric Materials and Their Applications, North-Holland, pp.231~235 (1991)
- [6] C. B. Roundy and R. L. Byer, J. Appl. Phys., vol. 44, pp.927~931, (1993)