

TGS 초전검출기 제작 및 성능검사*
Fabrication and Performance Test of
TGS Pyroelectric Detectors

김 석 원
한국표준연구소 온도연구실

Pyroelectric TGS(triglycine sulfate) detectors, whose thicknesses are 0.1 mm and 0.2 mm, are fabricated using the grown TGS crystals from aqueous solution. The output power and noise from these detectors are measured as a function of chopping frequency in the range from 10 Hz to 160 Hz with the interval of 10 Hz. Response time, responsivity and detectivity are derived from the measured output power and noise of the detectors. The results show that the response time is about 15ms, responsivity is 100 V/W at 10Hz and the detectivity at the maximum spectral wavelength $D_{\lambda p}^*$ is about $10^7 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$.

1. 서 론

초전(pyroelectric) 검출기는 가시영역, 적외선 영역, 마이크로 파영역, 밀리미터 파영역 등 전 전자 파의 영역에서 검지도가 높은 검출기로써 상용의 적외선분석기, 적외선복사온도 계통의 분석기거나 고출력, 저출력 레이저광의 검출기, 도난경보기, 화재경보기 등에 광범위하게 사용되고 있다.^[1] 이러한 초전검출기는 Y. Ta, A.C. Chynoweth 등이 처음으로 응용을 제안하고 J. Cooper 에 의해 자세한 해석이 이루어졌다.^[2,3]

초전검출기로 사용되는 물질에는 TGS, LiNbO₃, LiTaO₃, SbSI, NaNO₂, PVDF 등이 있으나 그 중에서 TGS의 감도가 가장 큰 것으로^[4,5] 알려져 있으므로 본 연구에서는 TGS 결정을 직접성장, 가공하여 TGS 초전검출기를 제작하고 출력특성과 잡음특성을 측정하였다.

* 본 연구는 1987년도 과학기술처 특성연구 과제사업으로 수행한 것임.

II. 초전검출기 특성이론

초전물질은 자발분극을 가지고 있고, 그 물질의 표면은 대기중의 부유전하(floating charge)를 붙잡아 전기적으로 중성을 유지하고 있다.

그러나 물질의 한쪽 표면에 복사선이 입사되어 이면과의 온도차가 생겼을 때 물질내부의 자발분극(spontaneous polarization)의 크기가 달라진다. 이때 표면전하가 변하는 현상을 초전효과(pyroelectric effect)라 하고 온도변화에 따른 분극의 변화율을 초전계수(pyroelectric coefficient)라 한다.^[1] 따라서 초전검출기는 입사파의 AC 모드 즉, 복사파의 변화를 감지할 수 있다.

검출기의 특성은 감응도(responsivity), 잡음(noise), NFP(noise equivalent power) 그리고 검지도(detectivity) 등 4 가지 요인으로 결정지을 수 있다.^[6]

1. 감응도

초전검출기를 동작시키는 방식에는 전압모드와 전류모드가 있으며 전자는 입사 power 가 작을 때, 후자는 입사 power 가 클 때 사용한다.^[7] 본 논문에서는 전압모드에 국한하여 논하고자 한다.

그림 1과 같은 등가회로로 표시된 초전검출기가, chopping 주파수 f 인 복사파에 노출되었을 때 초전검출기의 전압감응도는 (1) 식과 같이 표현될 수 있다.^[8]

$$R_V = \frac{\eta p A_D \omega}{G_T G_E (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_E^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

여기서 η 는 검출기 표면의 복사율, p 는 초전계수, A_D 는 검출기의 수광면적, G_T 는 검출기의

thermal conductance, 그리고 $\omega = 2\pi f$ 이다.

또한 $\tau_T (= H/G_T, H$ 는 검출기의 열용량)는 열시정수(thermal time constant), $\tau_E (= C/G_E, C$ 는 검출기의 정전용량)는 전기시정수(electrical time constant)이다.

2. 잡음

검출기의 유용성은 감지할 수 있는 최소 입사 power 로 나타내어진다. 이 최소 입사 power 는 감응도와 검출기에서 발생하는 잡음의 함수이다. 따라서 잡음의 분석은 검출기를 이해하는데 필수적이다. Shunt 저항이 따로 연결되어 있는 간단한 초전검출기의 주된 잡음원은 열잡음(thermal noise; V_t), 유전체잡음(dielectric noise; V_d), 저항잡음(resistor noise; V_r) 등이며, 증폭기(대개 FET 를 사용)전압잡음(amplifier voltage noise; V_e) 및 전류잡음(amplifier current noise; V_i) 까지 고려하면 5 가지가 된다. 따라서 검출기 전체잡음 V_n 은

$$V_n^2 = V_t^2 + V_d^2 + V_r^2 + V_e^2 + V_i^2 \quad (2)$$

의 제곱근으로 구해질 수 있으며 chopping 주파수의 증가에 따라 잡음은 감소하는 형태로 나타나게 된다.^{6}

3. NET와 검지도^{6}

검출기의 감도는 항상 NEP 로 표시된다. 이것은 V_n 과 같은 크기의 신호를 발생시키는 입사파의 power 이다. 즉

$$NEP = V_n / R_v \quad (3)$$

로 정의될 수 있다. 또한 검지도는

$$D = (NEP)^{-1} \quad (4)$$

로 정의된다. 그러나 D 는 $(A_D)^{-1/2}$ 에 비례하므로 면적이 서로 다른 검출기들을 같은 조건에서 비교하기 위해서는 규격화된 검지도 D^* 를 다음과 같이 정의한다.

$$D^* = \sqrt{A_D} / NEP \quad (5)$$

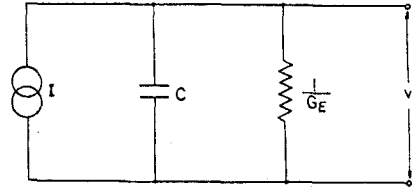


Fig. 1. An equivalent circuit of a simple pyroelectric detector.

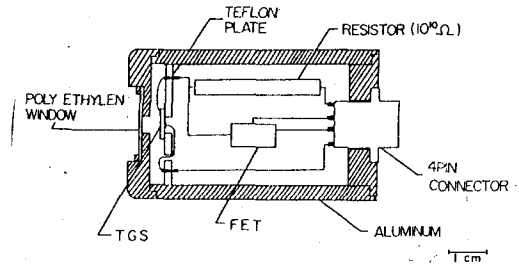


Fig. 2. Design of TGS detector case.

III. TGS 결정성장가공 및 검출기 제작

글리신(glycine; $NH_2 CH_2 COOH$)과 황산($H_2 SO_4$)의 몰비 3:1 의 발열반응 즉, $3NH_2 CH_2 COOH + H_2 SO_4 \rightarrow (NH_2 CH_2 COOH)_3 H_2 SO_4$ 를 이용하여 TGS 분말을 제조하여 과포화 수용액으로 만든 뒤 본 연구실에서 제작한 결정성장기 속에서 TGS 결정을 성장시켰다.^{8}

성장된 TGS 결정들을 벽면에 평행한 방향으로 절단하고 정사각형모양($8 \times 8 mm^2$)으로 다듬고 두께가 각각 0.1 mm 와 0.2 mm 가 되게 polishing 하였다.^{2}

Polishing 이 완료된 결정들의 양면에 전극으로 사용될 금속 코팅을 하였다. 빛을 받지않을 뒷면은 두께가 약 2000 Å 되게 금(Au)코팅을 하였고 빛을 조사시키게될 앞면은, 빛의 흡수가 잘 되게 하기 위해 직경이 5 mm 이고 두께가 2000 Å 되게 gold black 코팅을 하였다.^{9} 전극층착이 된 TGS 결정들은, 앞뒷면의 전극 가장자리에 lead 선으로 직경 0.1 mm 인 구리선을 silver paste 로 붙이고 전기절연이 우수한 테플론판(직경 30 mm, 두께 1 mm)에 고정시켰다. 완성된 검출기 sensor 들은, 양쪽전극 사이에 10 kV/cm 의 전기장을 가해서 자발분극의 방향을 전극에 수직되게 poling 시켰다.

TGS 검출기의 성능검사를 위하여 그림 2 와 같이 검출기 case 를 제작하였다. Case의 재질은 알루미늄이며, 표면은 흑색 무광처리 하였다. 검출기의 창으로는 적외선영역의 투과도가 우수한 (약 80%) 두께 50 μm 인 폴리에틸렌 필름⁽¹⁾을 사용하여 수광면의 직경이 3 mm 가 되게 하였고 shunt 저항(10¹⁰Ω) 과 FET(2N 6659) 는 내장시켜서 검출기가 전압모드로 동작되게 하였다.⁽⁴⁾

IV. TGS 초전검출기의 특성조사 및 논의

제작된 TGS 검출기의 chopping 주파수에 따른 출력신호 및 잡음을 측정하기 위한 실험장치를 그림 3에 나타내었다. 실험에서 흑체로 개구의 직경은 4.8 mm 로 하였으며 light chopper 는 변조인수를 크게하기 위하여 흑체로 개구에 최대한 가까이 설치(10 mm) 하였으며, 개구에서 검출기까지의 거리 D 는 10 cm 가 되게 하였다. 실험시 흑체로의 온도는 400 °C 로 고정하였고 실내온도는 25 °C 였다. 검출기의 출력은 lock-in amp 로 측정하고 잡음은 spectrum analyzer 로 측정하였으며, 측정주파수 영역은 10 Hz 부터 신호가 1/10 이하로 떨어지는 160 Hz 까지로 하고 60 Hz 와 120 Hz 에서 전원에 의한 잡음을 고려하여 data 를 취하지 않았다.

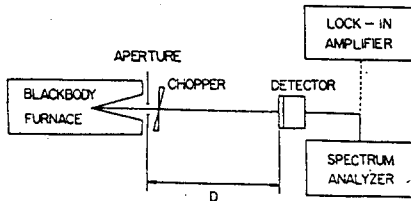


Fig. 3. Experimental set-up for measuring detection parameters of TGS detector.

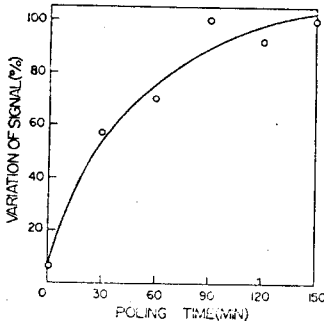


Fig. 4. Variation of signal as a function of poling time.

1. Chopping 주파수에 따른 출력신호 측정 및 반응시간 계산

검출기의 출력신호를 측정하기 전에 적절한 poling 시간을 조사하기 위하여 두께가 0.1 mm 인 sensor 의 poling 시간을 30분씩 늘려가며, chopping 주파수가 10 Hz 일때의 출력을 측정하였다. 그림 4에 측정결과가 나와있는데 poing 시간이 150 분 정도 소요되면서 부러는 poing 에 의한 효과가 포화됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 검출기의 poling 시간은 3시간으로 정하였다. 그림 5에는 두께가 0.1 mm 와 0.2 mm 인 2 종류의 TGS 검출기의 chopping 주파수 변화에 따른 출력신호의 측정결과가 나와있는데(좌측 세로좌표) 주파수가 10 Hz 일때 각각 1.9 mV 와 1.5 mV 를 보이고 주파수가 증가함에 따라 30 Hz 까지는 급격히 감소하다가 나중에는 안전하게 감소함을 보이고 있다. 실선은 고주파근사(high-frequency approximation)⁽¹⁰⁾ 를 사용하여 실험 data 를 curve fitting 한 것이며 이 결과를 이용하여 계산한 반응 시간은 각각 14 ms 와 17 ms 로 나타났다. 따라서 두께 0.1 mm 인 sensor 가 0.2 mm 인 것 보다 반응시간이 3 ms 짧음을 알 수 있다.

2. 감응도 계산

검출기의 감응도를 계산하기 위하여 검출기에 입사되는 총 복사량을 계산하자. Stefan-Boltzmann 법칙에 의해서 검출기의 단위면적당 입사되는 power 는

$$H_{rms} = \frac{\sigma_s}{\pi} \frac{A_B}{D^2} (T_B^4 - T_C^4) \times F_M \quad (6)$$

로 부터 구할 수 있다. 여기서 σ_s 는 Stefan-Boltzmann 상수, A_B 는 흑체개구의 면적, F_M 은 chopper 의 변조인수, D 는 흑체와 검출기간의 거리를 나타낸다. 그리고 T_B 와 T_C 는 각각 흑체의 온도와 chopping blade 의 온도이다. 본 실험에서 $T_B = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $D = 10 \text{ cm}$, 그리고 흑체로 개구의 직경을 4.8 mm 로 하면 $F_M = 0.4$ 에 의해서⁽¹⁰⁾ 직경 3 mm 인 본 검출기에 입사되는 power 는 $1.81 \times 10^{-5} \text{ W}$ 로 계산되어진다.

따라서 앞서 측정한 출력신호를 이 값으로 나누면 검출기의 감응도를 구할 수 있으며, 그 결과는 그림 5의 우측 세로좌표를 이용하여 나타내었다. 이 결과에 의하면 감응도가 10 Hz 에서 약 100 V/W 임을 알 수 있다.

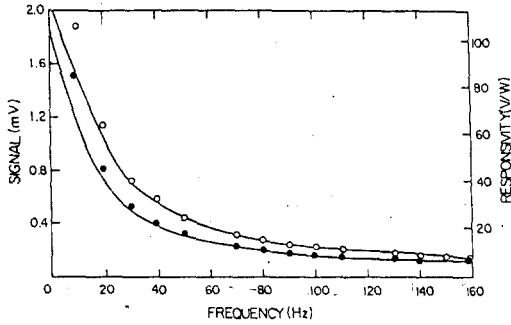


Fig. 5. Output signal and responsivity of the fabricated TGS detectors measured and calculated, respectively as a function of chopping frequency : 0; sensor thickness of 0.1 mm, ●; sensor thickness of 0.2 mm.

3. 잡음 측정

초전검출기의 주된 잡음원은 앞에서 언급한대로 5가지이지만 광각을 분리하여 측정하는 것은 어려운 일이다. 따라서 여기서는 검출기를 완전히 가려서 신호광이 들어가지 않게 하고 출력을 spectrum analyzer 로 측정하여 전체잡음 V_n 으로 하였다. 주파수변조에 따른 잡음의 크기가 그림 6 에 나와있다. 이 결과에 의하면 10 Hz 에서 약 $10^{-6}V$ 의 크기를 보이고 주파수 증가에 따라 천천히 감소하여 160 Hz 에서는 약 $10^{-7}V$ 를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 주된 잡음원들이 ω 의 증가에 따라 감소한다는 이론과 일치함을 나타내는 것이다. 여기서의 실선은 data point 들을 이은 것이다. 실험시 측정주파수의 band폭 $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ 로 고정하였다.

4. 검지도 계산 (11)

검출기의 검지도를 측정한다는 것은 일반적으로 최대 반응파장에서의 검지도 $D_{\lambda p}^*$ 를 측정함을 말한다. 따라서 앞 절에서 구한, 검출기의 출력신호와 잡음을 사용하여 검출기의 특체검지도 DB^* 를 구한뒤 peak conversion factor C를 구하여 최대 반응파장에서의 검지도 $D_{\lambda p}^*$ 를 계산하였다. 본 연구에서는 TGS 결정의 표면에 gold black 을 코팅했으므로 분광흡수가 전체 파장영역에서 일정하다고 가정하면 오직 window 로 사용된 polyethylene film 의 분광 투과도가 conversion factor C

에 관여한다고 볼 수 있으므로 C 는 window 를 썼을때의 신호에 대한 window 를 쓰지 않았을때의 신호의 비율로 대치할 수 있다.

그림 7에는 계산되어진 검지도를 나타내었다. 초전검출기의 경우 chopping 주파수가 증가할수록 신호도 감소하고 잡음도 감소하지만 잡음 감소율이 신호감소율보다 약간 크므로 chopping 주파수의 증가에 따라 $D_{\lambda p}^*$ 는 완만하게 감소하는 경향을 일반적으로 나타내게 된다. 본 연구에서 제작되어진 TGS 검출기들도 $D_{\lambda p}^*$ 가 chopping 주파수의 증가에 따라 완만하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며 대략 $10^7 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 임을 알 수 있다.

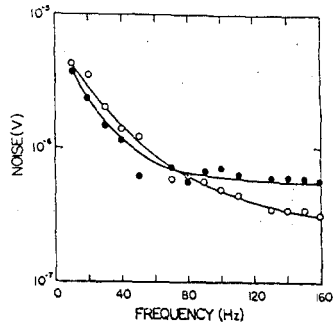


Fig. 6. Noise of the fabricated TGS detectors.

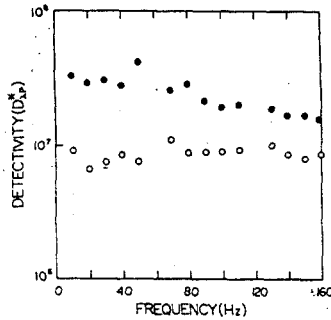


Fig. 7. Calculated detectivity $D_{\lambda p}^*$ of the fabricated TGS detectors.

5. 상용 초전검출기의 성능검사

초전물질 중에서 감도가 가장 우수한 것이 TGS 이다. 그러나 TGS 는 Curie 온도인 49°C 이상의 온도영역에서는 depoling 이 되므로 순수 TGS 로 만들어진 상용검출기는 드물고, 대신 LiTaO_3 나 DTGS 등으로 이루어진 검출기가 나오고 있다.^[7] 따라서 여기서는 LiTaO_3 로 만들어진 일본 Hamamatsu 사의 초전검출기 P2613의 성능검사를 실시

하였다. 이 검출기의 수광면의 직경은 2 mm이며, 분광감응도는 전체 파장영역에서 일정함을 보이고 can형으로 되어있다.

표 1은 chopping 주파수가 10 Hz 일때, 제작된 검출기와 상용검출기의 성능을 정리한 것이다. 제작된 검출기의 반응시간은 상용검출기와 비슷하나 잡음은 약 1/10 임을 알 수 있다. 그리고 감응도는 10 Hz 에서 약 1/4 이며, 검지도는 10~20배 큼을 알 수 있다.

Table I. Measured and calculated detection parameters of the pyroelectric detectors with the chopping frequency of 10 Hz.

detector	response time (ms)	noise (μV)	responsivity (V/W)	detectivity $D_{\lambda p}^*$ ($10^6 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$)
0.1mm TGS	14	4.26	104.4	9.06
0.2mm TGS	17	3.80	83.7	33.21
p 2613	15	27.22	442.9	1.92

V. 결 론

TGS 결정을 성장, 가공하여 두께 0.1 mm 와 0.2 mm 짜리 초전검출기를 제작한 뒤 chopping 주파수를 10 Hz 에서 160 Hz 까지 변환시키며 성능검사를 실시하였다. 성능검사 결과 신호출력은 chopping 주파수의 증가에 따라 1.5 mV 에서부터, 감응도는 약 100 V/W 에서 부터 과감 감소하였고 반응시간은 약 15 ms였다. 또한 잡음출력은 약 10^{-6} V였으며, 최대반응 파장에서의 검지도 $D_{\lambda p}^*$ 는 약 $10^7 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 였으며, 두께에 따른 뚜렷한 차이는 없었다.

참고 문헌

(1) 황규삼, 센서활용 기술 (기전연구소, 서울, 1985), pp.79-86.
 (2) E.H. Putley, Semiconductors and Semimetals Vol. 5(Academic Press, New York, 1970), pp.259-285.

(3) J. Cooper, Rev. Sci. Inst. **33**, 92-95 (1962).
 (4) W. Budde, Optical Radiation Measurements Vol. 4(Academic Press, New York, 1983), pp.121-133.
 (5) E.H. Putley, Semiconductors and Semimetals Vol. 12(Academic Press, New York, 1977), pp.441-449.
 (6) S.G. Porter, Ferroelectrics **33**, 193-206 (1981).
 (7) Application Notes for Pyroelectric Detectors, Barnes Engineering Division.
 (8) B.R. Pamplin, Crystal Growth(Pergamon Press, London, 1975), pp.557-575.
 (9) W.R. Blevin and J. Geist, Appl. Opt. **13**, 1171-1178 (1974).
 (10) R.H. Hudson, Jr., Infrared System Engineering(John Wiley & Sons, New York, 1969), pp. 345-346.
 (11) 한재원, 이충희, 새물리 **28**, 85-91(1988).
 (12) Hamamatsu Catalog (1988).