

# 热释电探测器音频噪声的研究

俞志毅 陈祖培 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——在室温下测量了 LATGS 悬空自由支撑结构热释电探测器在 1~200 kHz 频率范围内的噪声电压频谱, 观察到噪声峰结构。进而在室温下测量了 LATGS 响应元在 1~100 kHz 范围内的介质损耗频谱, 发现与噪声峰位置对应的峰结构, 峰的位置不随测量时间和外加直流电场的改变而变化。从热释电探测器的噪声理论和热释电状态方程出发, 对实验结果进行了讨论。

## 一、引 言

LATGS 悬空自由支撑结构热释电探测器是一种高性能器件。目前, 探测器的低频响应率比理论极限尚低 1 个数量级, 在音频范围则低 2~3 个数量级, 而中红外傅里叶变换光谱仪及热成像系统中探测器的工作频率恰恰在音频附近, 因而, 研究热释电探测器音频范围性能很有必要。热释电探测器的性能直接受其噪声限制, 噪声研究历来是提高器件性能的关键, 同时, 搞清噪声机理对热释电物理也具有重要的学术价值。

我们在室温下测量了 LATGS 悬空自由支撑结构热释电探测器在音频区的噪声电压频谱及介质损耗频谱, 发现两者均存在峰结构, 峰的位置不受时间和外加直流电场的影响。本文利用热释电探测器噪声理论计算了这种热释电探测器的介质损耗噪声电压, 得到了与实测值较一致的结果。由热力学状态方程导出了探测器响应元的复介电常数表达式, 对音频噪声峰结构的物理起因进行了探讨。

## 二、实 验

### 1. 悬空自由支撑结构热释电探测器

将采用旋转平板法生长的 LATGS 晶体切割后沿  $b$  面((010)面)解理成薄片(此时晶体极化轴垂直于薄片平面), 然后将薄片研磨、抛光后, 再经化学腐蚀使之减薄到  $10\mu\text{m}$  左右。将此光敏响应元固定在内径为 2~4 mm 的陶瓷圆环上, 两表面用真空镀膜技术淀积金属电极, 然后固定在红外窗口下面, 再用冷钢封技术封装在  $10^{-3}\text{Pa}$  的真空中。这样便制成了悬空自由支撑结构 LATGS 热释电探测器。

本文 1986 年 9 月 20 日收到。

## 2. 噪声电压频谱的测量

热释电探测器噪声测量装置方框图示于图 1。

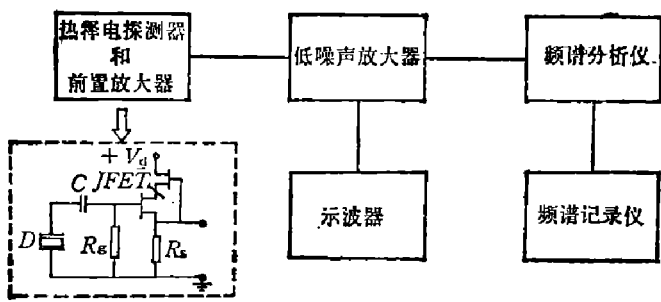


图 1 噪声频谱测量装置

Fig. 1 Diagram of experimental set-up for measuring the noise spectra of pyroelectric detectors.

图中虚线方框内为热释电探测器及其前置放大器电路, 其中  $D$  代表探测器,  $C=1000\text{ pF}$ ,  $R_g=11^{11}\ \Omega$ ,  $R_f=2\text{ k}\Omega$ ,  $V_d=+12\text{ V}$ 。LATGS 探测器的噪声电流由阻抗变换前置放大器转换成电压信号输入增益为  $A_v=10^3$  的 EG&G 5003 型低噪声放大器放大, 其输出噪声电压信号  $V_n$  由 B&K 2010 型外差频谱分析仪读出, 同时由 OS-1352 型示波器监视。利用 B&K 2010 机械传动装置驱动 B&K 2307 频谱记录仪, 便可自动记录噪声电压频谱。

测量过程中, 用金属套筒屏蔽探测器和前置放大器, 以排除外界热源和电磁干扰。

室温下 LATGS 探测器在  $1\sim 200\text{ kHz}$  频域内噪声电压频谱的典型测量结果示于图 2。图 2 表明, LATGS 探测器的噪声电压随频率增加而下降, 并逐渐趋于平坦。在某些频率位置, 出现了尖锐的峰结构, 这种现象至今尚未见报道。反复测量表明, 噪声峰的位置稳定。

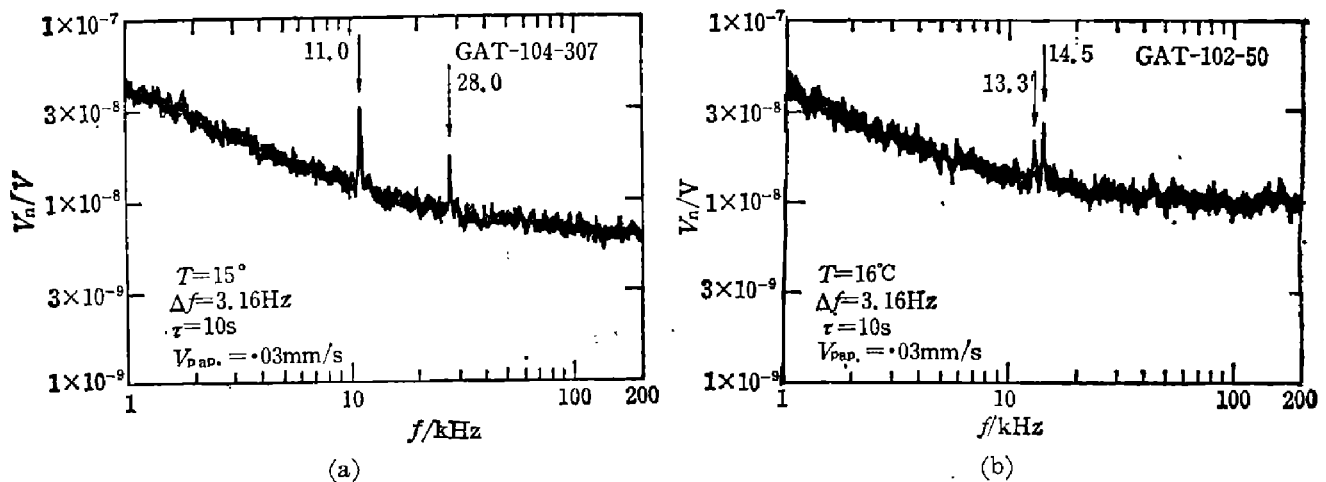


图 2 悬空自由支撑结构热释电探测器音频噪声电压频谱

Fig. 2 Noise voltage spectra at audio-frequency of freely-suspended LATGS pyroelectric detectors.

## 3. 响应元介质损耗频谱的测量

用 GR 1621 型精密电容测量系统测量 LATGS 探测器响应元的介质损耗。测量采用屏蔽三端连接法, 施加在响应元上的交流电压为  $0.02\sim 0.05\text{ V}$ , 满足小信号测量条件。当电桥平衡时读出电容  $C$  及电导  $G$ , 由公式  $\tan \delta = G/\omega C$  算出响应元的介质损耗。将  $1\sim 100\text{ kHz}$  内逐点测得的  $C$ 、 $G$  等数据输入单板机运算, 打印出最后结果。亦可将数据从单板机输入 IBM PC, 运算后由绘图仪作出介质损耗  $\tan \delta$  与频率  $f$  的关系曲线, 典型结果示于图 3。由图 3 可知, 响应元的介质损耗频谱也是由基线和峰结构组成的, 而且介质损耗峰及噪声峰的位置有较好的对应关系。表 1 给出了 4 个 LATGS 探测器的噪声峰位置与介质损耗峰位置的对应情况。图 4 给出了 GAT-102-50 探测器的响应元在正反外直流电场和无

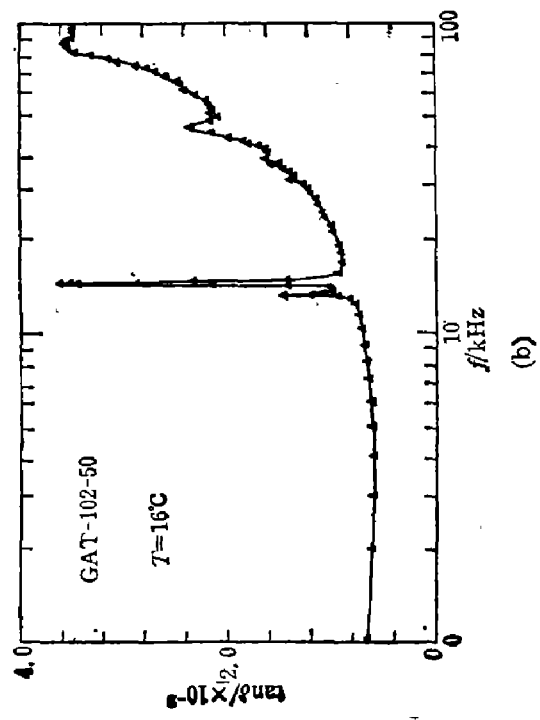
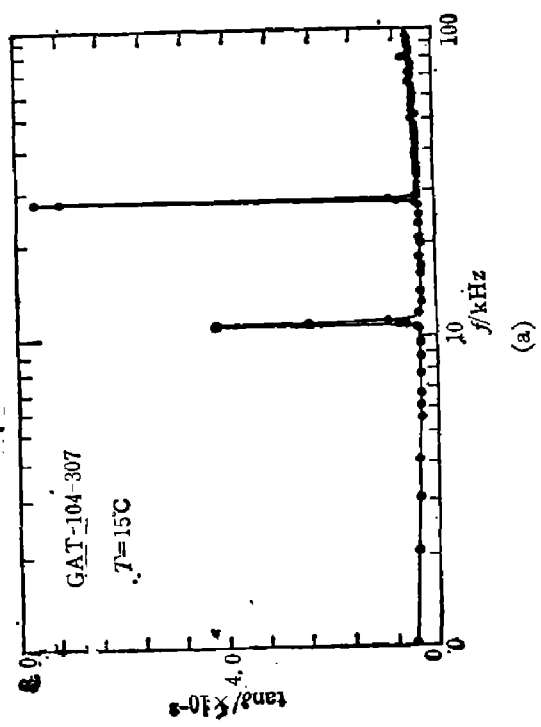


图 3 LATGS 探测器响应元件的介质损耗频谱  
Fig. 3 Dielectric loss spectra of LATGS elements.

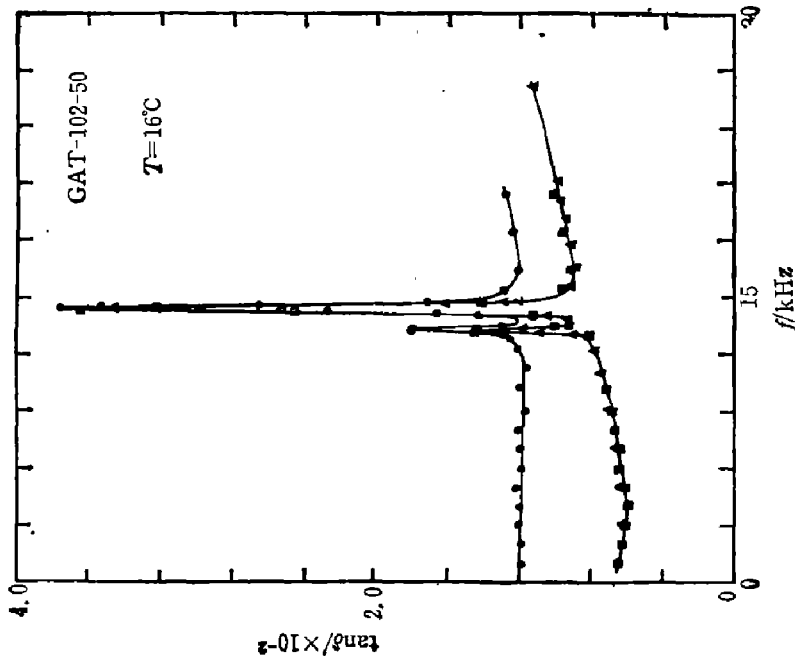


图 4 GAT-102-50 探测器响应元件在不同外直流电场下的介质损耗频谱  
Fig. 4 Dielectric loss spectra of GAT-102-50 under different external bias voltages.

表1 LATGS 探测器噪声峰及对应的介质损耗峰的位置  
 Table 1 Frequencies of noise voltage peaks and dielectric loss peaks of LATGS detector.

探测器编号	GAT-102-50	GAT-102-60	GAT-102-370	GAT-104-307
噪声峰位置(kHz)	13.3, 14.5	9.4, 18.0, 21.0	13.1, 28.3	11.0, 28.0
介质损耗峰位置(kHz)	13.33, 14.49	9.70, 17.73, 20.95	13.09, 29.25	11.07, 27.79

外电场情况下的介质损耗频谱。比较发现, 响应元在与自发极化方向一致的外加直流电场(即正电场)下的介质损耗与无外电场时几乎相同, 而在反向直流电场下介质损耗明显上升。值得注意的是, 在正向电场、反向电场及无外电场这三种情况下, 介质损耗峰位置均未发生漂移。反向直流电场作用下介质损耗的增加经过足够长时间后会自行消失, 这就是介电弛豫<sup>[7]</sup>。实验观察到噪声亦有类似的弛豫现象。

### 三、讨 论

#### 1. LATGS 探测器的音频噪声与响应元的介质损耗

分析表明<sup>[1~3]</sup>, 悬空自由支撑热释电探测器在音频范围主要受响应元介质损耗噪声的限制。频率更高时, 前置放大器输入级结型场效应管(JFET)的沟道热噪声将起主要作用。响应元及前置放大器 JFET 组合件的介质损耗噪声电压为;

$$V_n = [4kT(C_a \tan \delta_a + C_g \tan \delta_g) \Delta f / \pi f]^{1/2} / (C_a + C_g), \quad (1)$$

式中,  $C_a$ 、 $C_g$  分别为响应元电容和 JFET 栅极电容,  $\tan \delta_a$ 、 $\tan \delta_g$  分别为响应元介质损耗角正切和 JFET 栅极电容的介质损耗角正切。 $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $f$  为测量频率,  $\Delta f$  为测量带宽。由式(1)可计算 LATGS 探测器的介质损耗噪声, 结果示于图 5。图中实线为计算结果(取  $C_g = 3 \text{ pF}$ ,  $\tan \delta_g \ll \tan \delta_a$ ), 黑圆点取自图 2, 计算结果与实测结果符合较好。这说明 LATGS 探测器的音频噪声确实主要来自响应元的介质损耗, 峰和基线均如此。同时, 还可以看出, GAT-104-307 探测器的噪声电压在频率大于 10 kHz 时的测量值明

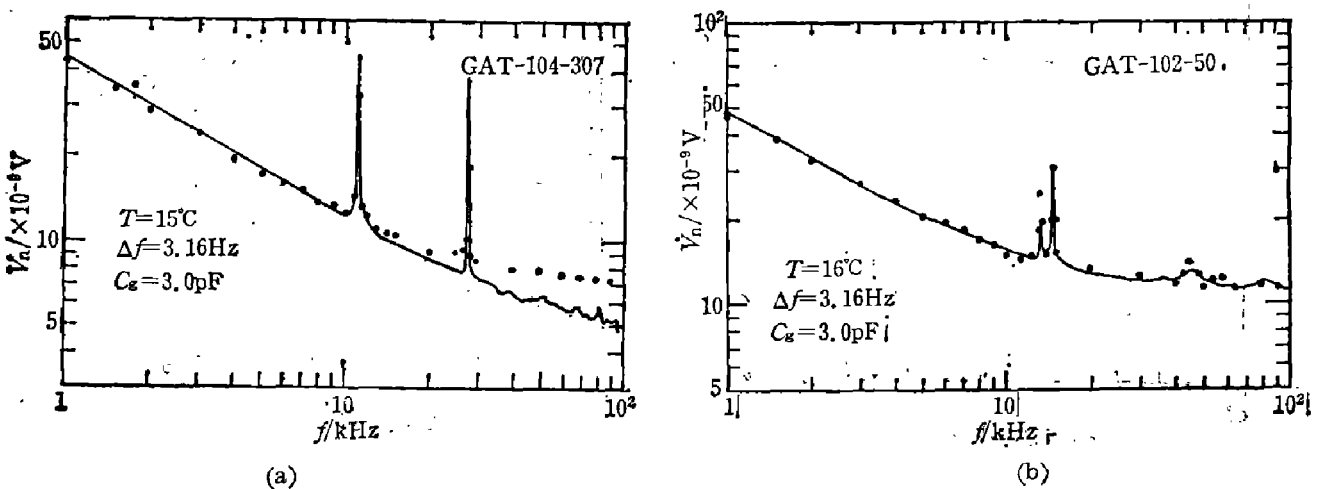


图5 LATGS 探测器音频噪声与介质损耗噪声

Fig. 5 Comparison between the measured audio-frequency noise voltage and the calculated dielectric loss noise voltage in LATGS detectors.

显大于计算值。这是由于前置放大器输入级 JFET 的沟道热噪声开始起主要作用的缘故。

已有不少文献报道热释电晶体的介质损耗是由其中的杂质、缺陷及电畴的运动引起的<sup>[4~6]</sup>，图 4 及观察到的弛豫现象证实了这一点。由于 LATGS 响应元内部存在内偏场而基本呈单畴结构，因而加正向直流电场时只是对响应元内电畴的单畴性略加改善，不会使介质损耗产生明显变化。加反向直流电场时，响应元内部出现一定数量的相反畴，这些微畴的运动和演化会增加响应元的介质损耗，使介质损耗频谱曲线上移。但介质损耗频谱中峰结构的产生机制却难以用杂质、缺陷及电畴运动来加以解释，需要从其它方面来认识。

## 2. LATGS 响应元的复介电常数与弹性耦合损耗

根据热释电晶体状态方程及部分夹紧条件导出 LATGS 探测器响应元的复介电常数  $\epsilon$  的表达式(参见附录):

$$\epsilon = \epsilon_{22}^{PO} = \epsilon_{22}^{s,T} - d_{2j}^T m_j^T \quad (j=1, 3, 5), \quad (2)$$

定义弹性损耗为  $\tan \delta_M \equiv e_{2j}^{T''}/e_{2j}^{T'}$ ，压电损耗为  $\tan \delta_d \equiv d_{2j}^{T''}/d_{2j}^{T'}$ ，则有

$$\tan \delta \equiv \epsilon''/\epsilon' = \tan \delta^{s,T} + \left[ \frac{d_{2j}^T (m_j^T - e_{2j}^T)}{\epsilon_{22}^{s,T} - (m_j^T - e_{2j}^T)} \right] (\tan \delta^{s,T} + \tan \delta_M - 2 \tan \delta_d) \quad (j=1, 3, 5), \quad (3)$$

通常情况下  $\tan \delta_d$  很小，可以忽略，式(3)可简写成

$$\tan \delta = \tan \delta_s + \alpha \tan \delta_M, \quad (4)$$

其中  $\tan \delta_s = (1 + \alpha) \tan \delta^{s,T}$  为响应元内杂质、缺陷及电畴运动等原因引起的介电损耗， $\alpha \tan \delta_M$  为弹性耦合损耗，系数  $\alpha$  与响应元的介电常数、压电常数及弹性常数的实部有关。式(4)表明，实际响应元的介质损耗不仅包括杂质、缺陷及电畴运动等因素引起的介电损耗，还包含了响应元弹性耦合损耗的贡献，这是以往报道中所忽略的。事实上，弹性耦合损耗在一定条件下可能是很重要的损耗因素。可以想象，如果在某些频率下响应元的弹性损耗骤然增大，介质损耗频谱中就会出现尖锐峰结构。

对 LATGS 响应元压电谐振频率的理论估算表明，悬空自由支撑薄响应元易在音频发生厚度弯曲模谐振。E. H. Putley<sup>[6]</sup> 曾对厚度为  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  的类似悬空自由支撑结构 TGS 探测器响应元进行了低频声学测量，发现在  $10 \sim 20 \text{kHz}$  存在弯曲模压电谐振。显然，响应元发生谐振时，晶体中的分子或离子的位移急剧增大，从而使弹性损耗急剧增加，最终导致总介质损耗迅速增加，在响应元压电谐振频率处便出现了峰结构。因此，悬空自由支撑结构 LATGS 探测器的音频噪声峰结构很可能来自响应元的厚度弯曲模压电谐振，这一点尚待进一步验证。

## 四、结 论

1. 悬空自由支撑结构 LATGS 探测器的音频噪声频谱中存在峰结构，其响应元的音频介质损耗频谱亦存在相应的峰结构，且峰的位置不随测量时间和外直流电场的变化而改变。
2. 计算表明，悬空自由支撑结构 LATGS 探测器的音频噪声主要来自响应元的介质损耗。
3. 实际 LATGS 响应元的介质损耗不仅与晶体内电畴运动等因素有关，还包含了弹性耦合损耗的贡献。

4. LATGS 悬空自由支撑探测器的音频噪声峰很可能来自响应元的厚度弯曲模压电谐振。

致谢——本文所有介质损耗频谱均由杨惠芳同志协助测量，本所三室工艺组为本项研究提供了样品，马继富同志在测试工作中给予了大力支持，作者在此致以衷心的感谢。

## 附 录

在选取应力  $X$ 、应变  $x$ 、电场  $E$ 、电位移  $D$ 、温度  $T$  和熵  $S$  作为热力学变量时，可定义 8 个热力学势函数。自变量分别为  $X, E, T$  和  $x, E, T$  的  $G$  势和  $G_2$  势常被用来描述热释电状态方程。对于  $G$  势，可得状态方程：

$$dx_i = s_{ij}^{E,T} dX_j + d_{in}^T dE_n + \alpha_i^E dT, \quad (A1)$$

$$dD_n = d_{nj}^T dX_j + \varepsilon_{nn}^{E,T} dE_n + p_n^E dT, \quad (A2)$$

$$dS = \alpha_j^E dX_j + p_j^E dE_n + C_V^{E,T} dT/T. \quad (A3)$$

对于  $G_2$  势，相应的状态方程为：

$$dX_i = c_{ij}^{E,T} dx_j - e_{ni}^T dE_n - \lambda_j^E dT, \quad (A4)$$

$$dD_n = e_{nj}^T dx_j + \varepsilon_{nn}^{E,T} dE_n + p_n^E dT, \quad (A5)$$

$$dS = \lambda_j^E dx_j + p_n^E dE_n + C_V^{E,T} dT/T. \quad (A6)$$

以上各式中  $i, j=1\sim 6$ ,  $m, n=1\sim 3$ ,  $s, c$  分别为晶体弹性柔顺张量和弹性刚度张量， $d, e$  分别为晶体压电应力张量和压电应变张量， $\alpha, \lambda$  分别为热膨胀系数和热膨胀张量， $\varepsilon$  为介电张量， $p$  为热释电矢量， $C_V$  为体积比热。方程中采用了爱因斯坦求和记号。

将式(A1)代入式(A5)可得自由状态下热释电晶体的介电张量为

$$\varepsilon_{mn}^{E,T} = \varepsilon_{mn}^{E,T} + e_{mi}^T d_{in}^T. \quad (A7)$$

对于单斜晶体 LATGS，极化轴为  $b$  轴， $j=4, 6$  时  $d_{2j}^T=0, e_{2j}^T=0$ ，所以有

$$\varepsilon_{22}^{E,T} = \varepsilon_{22}^{E,T} + d_{2j}^T e_{2j}^T \quad (j=4, 6). \quad (A8)$$

对于悬空自由支撑结构 ALTGS 探测器，其响应元并非完全自由，而是处于部分夹紧状态。由式(A1)及部分夹紧(PC)条件  $X_2=0, dx_1=dx_3=dx_5=0$  和  $T=\text{const.}$  可得：

$$dX_j = -m_j^T dE_2 \quad (j=1, 3, 5) \quad (A9)$$

代入式(A2)即得：

$$\varepsilon_{22}^{E,T} = \frac{\partial D_2}{\partial E_2} = \varepsilon_{22}^{E,T} - d_{2j}^T m_j^T \quad (j=1, 3, 5), \quad (A10)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} m_1^T &= \frac{\Delta_{m_1}}{\Delta}, \\ m_3^T &= \frac{\Delta_{m_3}}{\Delta}, \\ m_5^T &= \frac{\Delta_{m_5}}{\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (A11)$$

式中

$$\Delta = \begin{vmatrix} s_{11}^{E,T} & s_{13}^{E,T} & s_{15}^{E,T} \\ s_{31}^{E,T} & s_{33}^{E,T} & s_{35}^{E,T} \\ s_{51}^{E,T} & s_{53}^{E,T} & s_{55}^{E,T} \end{vmatrix}, \quad \Delta_{m_1} = \begin{vmatrix} d_{21}^T & s_{13}^{E,T} & s_{15}^{E,T} \\ d_{23}^T & s_{33}^{E,T} & s_{35}^{E,T} \\ d_{25}^T & s_{53}^{E,T} & s_{55}^{E,T} \end{vmatrix}, \quad \Delta_{m_3} = \begin{vmatrix} s_{11}^{E,T} & d_{21}^T & s_{15}^{E,T} \\ s_{31}^{E,T} & d_{23}^T & s_{35}^{E,T} \\ s_{51}^{E,T} & d_{25}^T & s_{55}^{E,T} \end{vmatrix}, \quad \Delta_{m_5} = \begin{vmatrix} s_{11}^{E,T} & s_{13}^{E,T} & d_{21}^T \\ s_{31}^{E,T} & s_{33}^{E,T} & d_{23}^T \\ s_{51}^{E,T} & s_{53}^{E,T} & d_{25}^T \end{vmatrix}.$$

## 参 考 文 献

- [1] 陈祖培, 红外研究, 1(1982), 287.
- [2] Burdick G. C. and Arnald R. J., *J. Appl. Phys.*, **37**(1966), 3223.
- [3] Ziel A. Van der and Liu S. T., *Physica*, **61**(1972), 589.
- [4] Fousek J. and Janousek V., *Phys stat. Sol.*, **13**(1966), 195.
- [5] Choe H. M. et al., *Ferroelectrics*, **7**(1978), 521.
- [6] Putley E. H., in *Semiconductors and Semimetals*, Eds. R. K. Willardson and A. C. Beer, New York, Academic Press, 1970, Vol, 5, 259.
- [7] 杨惠芳、朱中权, 第三届全国电介质物理会议论文摘要, 1985, P. 71.

## STUDY OF AUDIO-FREQUENCY NOISE IN PYROELECTRIC DETECTORS

YU ZHIYI, CHEN ZUPEI, TANG DINGYUAN  
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

The noise voltage spectra of freely-suspended LATGS pyroelectric detectors are measured in the frequency range of 1~200 kHz at room temperature. The sharp noise peaks are observed. The dielectric loss spectra of LATGS detector elements are also measured from 1~100 kHz at room temperature, in which the dielectric loss peaks are observed at about the same frequencies as for those peaks in the noise voltage spectra. The frequency positions of the peaks are quite stable during the repeated measurements as well as under the external dc bias voltages. The experimental results are discussed with the noise theory for pyroelectric detectors and the equations of state for pyroelectric elements.