

# 电学定标热释电探测器横向热扩散 误差的分析与校正

巩嘉隆 于月华

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文从悬空薄器件一维横向热扩散模型出发, 根据电学定标热释电探测器的结构, 分析计算了因横向热扩散引起的有效面积之外热释电晶体温度变化的影响, 给出了横向热扩散误差的修正与不确定度。还根据横向热扩散误差, 讨论了电加热器金电极电阻消耗的电功率, 及引线与其接点加热的影响, 并提出了消除这种影响的方法。

## 一、前 言

电学定标热释电辐射计<sup>[1]</sup>是一种高精度绝对功率计, 其工作基础是电学定标热释电探测器的光电等效性。但由于材料特性和工艺上的限制, 还存在一些光电不等效因素。就热释电探测器自身而言, 不等效的因素有反射损失、有效面积上响应不均匀性、电极引线热效应、光电加热位置差、电加热边界热扩散、热释电响应温度的非线性以及探测器噪声等等。对于这种高精度的定标探测器, 必须对各种不等效因素引起的误差进行分析, 并给以修正, 以对系统进行准确的校正。本文就横向热扩散引入的误差进行了分析, 并给出它的修正与不确定度。

## 二、热释电特性和一维横向热扩散模型

当热释电探测器接受到施加的功率时, 就产生温升, 释放出热释电电流:

$$i_s = A \frac{dp_s}{dt} = Ap \frac{d(\Delta T)}{dt}, \quad (1)$$

式中  $A$  为敏感元薄片两表面电极重叠部分的面积;  $p = \frac{dP_s}{dT}$  为热释电系数;  $T$  为热释电晶体的温度;  $\Delta T$  为热释电晶体的温度变化, 可由敏感元的热状态求解热平衡方程得到;  $t$  为响应时间。

为研究横向热传导对探测器的影响, 必须用三维热扩散模型来描述<sup>[2~5]</sup>。电学定标热

释电探测器是悬空的薄片结构,厚约  $100\ \mu\text{m}$ ,敏感元有效面积和加热器是同一个  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$  正方形结构(参见图 1)。假设在厚度方向上的温度分布是均匀的,这样就将其简化为一维横向热扩散问题。横向热扩散只是对距边界几个热扩散长度内的区域温度分布有影响,距离超出几个热扩散长度时,其影响可忽略不计。可以认为:除四个角点以外,边界上的其他各点热扩散过程是一样的,热流都垂直于边界。取边界上的一点作为坐标原点,通过原点作垂直于边界的  $x$  轴(参见图 2),可认为热流仅沿  $x$  轴方向扩散。

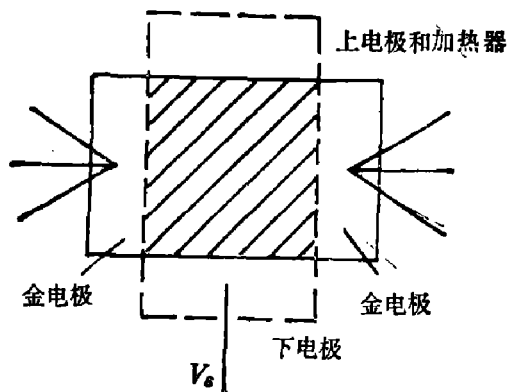


图 1 电学定标热释电探测器敏感面和加热器示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the sensitive area and the heater

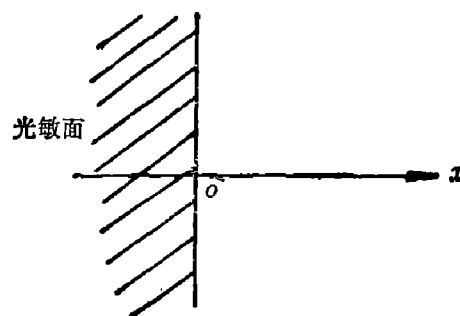


图 2 一维横向热扩散模型  
Fig. 2 One-dimensional model of the transverse heat diffusion

设入射辐射的功率密度为

$$W(t) = \begin{cases} W_0 e^{j\omega t} & (\text{当 } x \leq 0 \text{ 时}), \\ 0 & (\text{当 } x > 0 \text{ 时}). \end{cases} \quad (2)$$

热扩散方程为:

$$\frac{\partial \Delta T(x, t)}{\partial t} = \frac{k}{C_V} \cdot \frac{\partial^2 \Delta T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\eta W(t)}{C_V d}, \quad (3)$$

式中  $k$  为热导率;  $C_V$  为热释电材料的体积比热;  $\eta$  为电极表面吸收率;  $d$  为热释电晶体薄片的厚度;  $\omega$  为调制角频率。用分离变量法得到的式(3)的解如下:

$$\Delta T(x, t) = \Delta T(x) e^{j\omega t}, \quad (4)$$

$$\Delta T_1(x) = A_1 e^{\frac{x}{L_H}} + A_2 e^{-\frac{x}{L_H}} + L_H^2 \frac{\eta W_0}{dk} \quad (x \leq 0 \text{ 时}), \quad (5)$$

$$\Delta T_2(x) = B_1 e^{\frac{x}{L_H}} + B_2 e^{-\frac{x}{L_H}} \quad (x > 0 \text{ 时}), \quad (6)$$

$$L_H = \left( \frac{k}{\omega C_V} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

其中  $L_H$  具有长度量纲,称为热扩散长度;  $\Delta T_1(x)$  为有效响应范围内的温升;  $\Delta T_2(x)$  为有效响应范围外的温升。

采用下述边界条件:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1(0) &= \Delta T_2(0), \\ \frac{\partial \Delta T_1(0)}{\partial x} &= \frac{\partial \Delta T_2(0)}{\partial x}, \\ \frac{\partial \Delta T_1(-\infty)}{\partial x} &= 0, \\ \Delta T_2(\infty) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

求出常数  $A_1, A_2, B_1$  和  $B_2$ , 代入式(5)、(6), 得

$$\Delta T_1(x) = L_H^2 \frac{\eta W_0}{dk} \left(1 - \frac{1}{2} e^{x/L_H}\right) \quad (x \leq 0 \text{ 时}), \quad (9)$$

$$\Delta T_2(x) = \frac{1}{2} L_H^2 \frac{\eta W_0}{dk} e^{-x/L_H} \quad (x > 0 \text{ 时}). \quad (10)$$

对  $\text{LiTaO}_3$  晶体,  $C_V = 3.5 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}$ ,  $k = 3.5 \times 10^{-2} \text{ J/cm} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$ , 当调制频率为  $14 \text{ Hz}$  时, 得到热扩散长度  $L_H = 1.07 \times 10^{-2} \text{ cm}$ 。

### 三、横向热扩散对元件响应的影响

我们制作的电学定标热释电探测器的上、下电极面积均为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 两者正交构成  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的有效响应面积。为计算方便, 设正方形的有效响应面边长为  $a$ , 热释电薄片厚度为  $d$ 。因光敏面吸收率另有修正, 这里假定  $\eta = 1$ 。由式(9)可得有效响应面上的平均温升

$$\overline{\Delta T_1} = \frac{4}{a^2} \int_{-\frac{a}{2}}^0 \int_{-\frac{a}{2}}^0 L_H^2 \frac{W_0}{dk} \left(1 - \frac{1}{2} e^{x/L_H}\right) \left(1 - \frac{1}{2} e^{y/L_H}\right) dx dy. \quad (11)$$

电学定标热释电辐射计工作时, 光照在元件中心半径为  $4 \text{ mm}$  的区域, 光照区的边缘距有效响应面边缘的距离  $x_0, y_0$  大于几个热扩散长度, 式(11)中的  $\frac{1}{2} e^{x/L_H}, \frac{1}{2} e^{y/L_H} \ll 1$ , 所以  $\Delta T_2(x) = 0$ , 这样有效响应面上的平均温升

$$\begin{aligned} \overline{\Delta T_0} &= \frac{4}{a^2} \int_{-\frac{a}{2}}^0 \int_{-\frac{a}{2}}^0 L_H^2 \frac{W_0}{dk} dx dy = \frac{4}{a^2} L_H^2 \frac{W_0}{dk} \int_0^R \int_0^{\frac{1}{2}\pi} r dr d\theta \\ &= \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} \pi R^2 W_0 = \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} W_1, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $W_1 = \pi R^2 W_0$  是辐射功率。

工作时, 电学加热是在元件整个有效响应面上。设均匀的电学加热功率密度为  $W_e$ , 则由式(11)得有效响应面上的平均温升

$$\begin{aligned} \overline{\Delta T_{1e}} &= \frac{4}{a^2} \int_{-\frac{a}{2}}^0 \int_{-\frac{a}{2}}^0 L_H^2 \frac{W_e}{dk} \left(1 - \frac{1}{2} e^{x/L_H}\right) \left(1 - \frac{1}{2} e^{y/L_H}\right) dx dy \\ &= \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} a^2 W_e \left[1 - \frac{L_H}{a} (1 - e^{-a/2L_H})\right]^2 \\ &= \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} W_2 \left[1 - \frac{L_H}{a} (1 - e^{-a/2L_H})\right]^2, \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $W_2 = a^2 W_e$  是电加热功率。

电学定标热释电探测器上、下电极的形状和位置使  $\Delta T_2(x)$  的一部分也会提供热释电电流。元件一端的切面电极示于图 3, 一面电极比另一面电极长出  $b$ 。设热释电晶体是均匀的, 且自发极化  $P_s$  的方向是向上的。在  $y = \frac{d}{b} x$  线上方的  $Q(x, y)$  点温升为  $\Delta T_2(x)$ , 由它引起  $Q(x, y)$  点自发极化的变化为  $\Delta P_s(x, y) = p \Delta T_2(x)$ 。由图可见, 它的  $\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \Delta P_s(x, y)$  分量能引起上、下极板释放自由电荷, 产生热释电信号输出。而  $\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \Delta P_s(x, y)$

分量则由于一端在电极以外的表面上形成束缚电荷,而不能产生信号输出。为便于比较光、电加热,以等效温升进行计算。 $\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \Delta P_s(x, y)$ 分量的影响等效为有效响应面内的

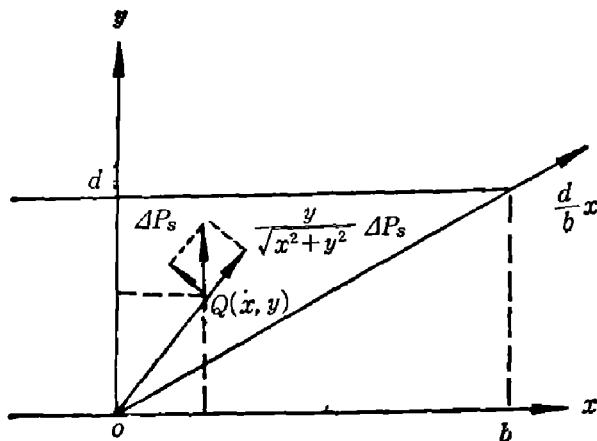


图3  $\Delta T_2(x)$ 影响示意图

Fig. 3 Effect of  $\Delta T_2(x)$  on pyroelectric signal

平均温升,有:

$$\overline{\Delta T_{2e1}} = \frac{4}{a^2} \cdot a \int_0^b \frac{1}{d} \times \int_{\frac{d}{b}x}^d \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \Delta T_2(x) dx dy \quad (14)$$

将式(10)代入式(14)并积分得:

$$\overline{\Delta T_{2e1}} = \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} W_2 \frac{2}{ad} \left[ \int_0^b e^{-x/L_H} \times (d^2+x^2)^{\frac{1}{2}} dx + L_H^2 e^{-b/L_H} \times \left( \frac{b}{L_H} + 1 \right) - L_H^2 \right] \quad (15)$$

式(13)、(15)相加得电加热在有效响应面内的等效总平均温升

$$\overline{\Delta T_e} = \frac{1}{a^2} L_H^2 \frac{1}{dk} W_2 \left[ 1 - \frac{2L_H}{a} + \frac{L_H^2}{a^2} + \frac{2}{ad} \int_0^b e^{-x/L_H} (d^2+x^2)^{\frac{1}{2}} dx - \frac{2}{ad} L_H^2 \right] \quad (16)$$

式(16)与式(12)比较可得横向热扩散误差的修正

$$\alpha = -\frac{2L_H}{a} + \frac{L_H^2}{a^2} + \frac{2}{ad} \int_0^b e^{-x/L_H} (d^2+x^2)^{\frac{1}{2}} dx - \frac{2}{ad} L_H^2 \quad (17)$$

不确定度由  $a$ 、 $b$ 、 $d$  和  $L_H$  的误差决定。因指数  $e^{-x/L_H}$  使  $b$  的影响很小,可忽略不计。由式(17)得不确定度

$$\Delta \alpha = \frac{2L_H}{a} \left( \frac{\Delta L_H}{L_H} + \frac{\Delta a}{a} \right) + \frac{2L_H^2}{a^2} \left( \frac{\Delta L_H}{L_H} + \frac{\Delta a}{a} \right) + \frac{2}{ad} \left( \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta d}{d} \right) \times \int_0^b e^{-x/L_H} (d^2+x^2)^{\frac{1}{2}} dx + \frac{2L_H^2}{ad} \left( \frac{2\Delta L_H}{L_H} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta d}{d} \right) \quad (18)$$

我们制作的  $\text{LiTaO}_3$  电学定标热释电探测器参数为:  $a=1\text{cm} \pm 0.1\%$ 、 $d=0.02\text{cm} \pm 1\%$ 、 $b=0.5\text{cm} \pm 0.1\%$ 、 $L_H=0.0107\text{cm} \pm 10\%$ , 代入式(17)、(18), 得  $\alpha = -0.0069$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0.0023$ 。

## 四、与横向热扩散有关的误差分析

### 1. 电学加热器金电极引入的误差

由图1可知,上电极的中部是电学加热器,在有效响应面之外的两端是金电极,引线从金电极上引出。电学加热时,电流要通过部分金电极。而金电极是具有电阻的,总要消耗一部分电功率。设有效响应面之外几个热扩散长度范围内的金电极消耗的电功率密度为  $W_r$ , 由式(9)、(10)可得:

$$\Delta T_1(x) = \frac{1}{2} L_H^2 \frac{\eta W_r}{dk} e^{x/L_H} \quad (x \leq 0 \text{ 时}), \quad (19)$$

$$\Delta T_2(x) = L_H^2 \frac{\eta W_r}{dk} \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-x/L_H} \right) \quad (x > 0 \text{ 时}), \quad (20)$$

由  $\Delta T_1(x)$  产生热释电信号输出。

类似于式(14), 可得到  $\Delta T_2(x)$  对响应的影响, 等效为有效响应面内的平均温升, 有:

$$\overline{\Delta T_{2r1}} = \frac{2}{a^2} \cdot a \int_0^b \frac{1}{d} \int_{d/2}^d \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \Delta T_2(x) dx dy. \quad (21)$$

由于金电极上这部分电阻与加热器串联, 在电功率的测量中包括了金电极消耗的电功率, 因此修正量是一个负值。为了减小此项误差和不确定度, 金电极电阻必须足够小。

我们制作的电学定标热释电探测器加热器方阻约为  $100 \Omega/\square$ 。要求金电极方阻小于  $0.1 \Omega/\square$ , 其影响大大小于  $0.1\%$ , 可忽略不计。

## 2. 引线及其接点加热引入的误差

由图 1 可知, 为了减小对有效响应面热性能的影响, 要求引线接点距有效响应面尽可能远(大于几个热扩散长度), 并要求接点电阻小于  $0.3 \Omega$ , 这样它的影响完全可以忽略不计。我们的实测结果也证实了这一点。

# 五、测量方法

先使电学定标热释电探测器以正规组态工作(参见图 4), 但不接收调制辐射, 调节电加

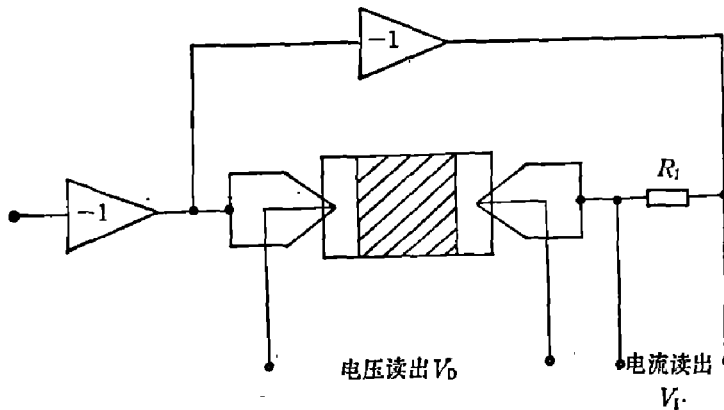


图 4 常规工作状态接线图

Fig. 4 Connection diagram for normal operation state

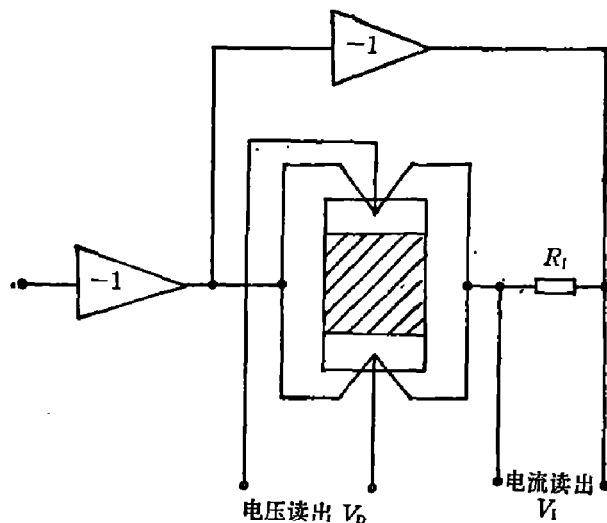


图 5 测量引线加热接线图

Fig. 5 Connection diagram for measuring the effect of wire-heating on output signal

热功率, 测量  $V_D$ 、 $V_I$  以及探测器前置放大器的输出信号。再将探测器换接到引线加热组态 (如图 5 所示), 调节电加热电流, 使  $R_I$  上的电压  $V_I$  与正规组态相同。这样, 两种组态流过导线的电流相同。我们测得在引线加热组态时  $V_D=0$ , 电流不通过电加热器。这时探测器前置放大器的输出信号只取决于引线及其接点加热。我们实测两种组态的前置放大器输出信号  $V_o$ : 前者为 8V, 后者为 0V, 可见这时引线及其接点加热的影响完全可以忽略。

致谢——本文参用了陈祖培同志未正式发表的文章, 并承蒙提出宝贵意见, 谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Hamilton C. A., Day G. W., Phelan R. J. Jr., *N. B. S. Tech. Note*, 678, march, 1976.
- [2] 陈祖培, 红外研究, 1 (1982), 287.
- [3] 陈继述等, 红外研究, 2 (1983), 189.
- [4] 徐平茂, 红外研究, 3 (1984), 161.
- [5] 陈继述, 物理学报, 23 (1974), 429.

## ANALYSIS AND CORRECTION OF TRANSVERSE HEAT DIFFUSION ERROR IN ELECTRICALLY CALIBRATED PYROELECTRIC DETECTORS

Gong Jialong, Yu Yuehua

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Based on the one-dimensional transverse heat diffusion model for electrically calibrated pyroelectric thin film detectors without substrate, the effects of temperature change in the pyroelectric crystal outside the active area of pyroelectric detectors induced by transverse heat diffusion are calculated. The correction for transverse heat diffusion errors and the uncertainty are given.