

侧向热传导对热释电探测器响应率的影响

徐平茂

(山东大学光学系)

摘要——本文给出了元件光敏面以外的晶体接收或不接收入射辐照时, 悬空型热释电探测器响应率的表达式, 并计算分析了侧向热传导及元件光敏面以外部分所吸收的辐照功率对器件响应率的影响。结果表明: 侧向热导损耗使器件的响应率降低; 光敏面以外的晶体所吸收的入射能量对侧向热导损耗起一定的补偿作用; 对于工作频率较低和光敏面积较小的器件, 这些影响是不可忽视的。

一、引言

热释电探测器的纵向热扩散分析指出, 底板对器件性能有不良影响^[1, 2]。为了提高器件的性能指标, 敏感元件多被悬空装配。对于不带底板的热释电探测器, 侧向热扩散起主要作用。参考文献[3, 4, 5]计算分析了由侧向热导引起的温度噪声及其所决定的噪声等效功率。本文进一步分析了侧向热导对器件响应率的影响程度, 特别是对于工作频率较低和光敏面积较小的探测器的影响。

另外, 在用黑体测量热释电探测器的响应率时, 入射辐照面积通常大于器件的光敏面积。由于多数热释电材料对中红外和远红外辐射吸收系数较高, 所以在测试中, 光敏面以外的晶体也吸收入射辐射的能量, 从而导致光敏面内外温度梯度降低, 因此侧向热导损耗也相应减小。对于不带底板的热释电探测器, 在工作频率较低和光敏面积较小的情况下, 这种影响也是不可忽视的。

由于侧向热导损耗导致了器件响应率的降低, 才使得元件光敏面以外部分所吸收的入射功率对响应率衰减有一定的补偿作用, 因此本文对它们的影响一并予以讨论。文中第二部分用径向热扩散理论给出器件响应率的表达式, 第三部分给出具体计算结果。

二、器件响应率表达式

近几年来, 在热释电探测器的研制中, 为了消除底板对器件性能的不良影响, 多采用悬空结构, 因此本文只讨论悬空器件。设器件为圆柱状薄片, 光敏面为圆形, 结构如图1所示。

图中区域①是带有电极部分,区域②是未镀电极部分。设入射辐射均匀地照射整个探测器表面。由于侧向热扩散对器件响应率的影响主要体现在较低的频段内,所以可以假设器件为厚度小于热扩散长度的薄器件,在其厚度方向上的温度分布是均匀的。

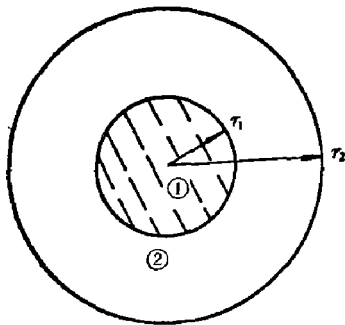


图1 器件结构示意图

设调制的入射功率为

$$W = W_0(1 + e^{j\omega t}), \quad (1)$$

式中 W_0 为平均辐照功率, ω 为调制圆频率。

在稳定情况下,区域①中温度变化的交变部分呈如下形式:

$$\Delta T_1(r, t) = T_1(r) e^{j\omega t}. \quad (2)$$

其中 $T_1(r)$ 满足的热传导方程为

$$\frac{d^2 T_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_1}{dr} - \frac{j\omega c_p \mu}{\kappa} \left(T_1 - \frac{\eta_1 P_0}{j\omega c_p \mu} \right) = 0, \quad (3)$$

式中 c_p 、 μ 和 κ 分别为器件的比热、密度和热导率, η_1 为光敏面的吸收率, $P_0 = \frac{W_0}{Ad}$ 为单位体积内的入射功率, A 和 d 分别为器件的光敏面积和厚度。

方程式(3)的解为

$$T_1 = \frac{\eta_1 P_0}{j\omega c_p \mu} + B_1 I_0(\beta r) + D_1 K_0(\beta r), \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= (1+j) \frac{1}{\delta}, \\ \delta &= \left(\frac{2\kappa}{\omega c_p \mu} \right)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $I_0(\beta r)$ 和 $K_0(\beta r)$ 为零价修正的贝塞尔函数, δ 为热扩散长度。

类似地可以得到区域②中 $T_2(r)$ 的解为

$$T_2 = \frac{\eta_2 P_0}{j\omega c_p \mu} + B_2 I_0(\beta r) + D_2 K_0(\beta r), \quad (6)$$

式中 η_2 为器件光敏面以外部分材料表面吸收率, β 已由式(5)给定。

$T_1(r)$ 和 $T_2(r)$ 应满足以下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} r=0, & \quad T_1 \text{ 有限;} \\ r=r_1, & \quad T_1 = T_2, \\ & \quad \frac{dT_1}{dr} = \frac{dT_2}{dr}; \\ r=r_2, & \quad 2\pi r_2 d\kappa \frac{dT_2}{dr} = G_r T_2 \doteq 0; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 G_r 为辐射热导。

利用边界条件式(7), 定出复常数 B_1 和 D_1 , 可以得到 $T_1(r)$ 为

$$T_1 = \frac{\eta_1 P_0}{j\omega c_p \mu} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \frac{I_0(\beta r) \left[\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} - \frac{K_1(\beta r_2)}{I_1(\beta r_2)} \right]}{\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} + \frac{K_0(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)}} \right\}. \quad (8)$$

由热释电材料参数和器件尺寸不难验证, 在通常情况下, $|\beta r_2| \gg 1$ 。

因此,

$$T_1 = \frac{\eta_1 P_0}{j\omega c_p \mu} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) \frac{\frac{I_0(\beta r)}{I_0(\beta r_1)} \frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)}}{\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} + \frac{K_0(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)}} \right\} \quad (9)$$

$T_1(r)$ 的空间平均值为

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 &= \frac{1}{\pi r_1^2} \int_0^{r_1} T_1 2\pi r dr \\ &= \frac{\eta_1 P_0}{j\omega c_p \mu} \left\{ 1 - 2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) \frac{\frac{K_1(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)}}{\beta r_1 \left[\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} + \frac{K_0(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)} \right]} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

器件的信号电压为

$$\begin{aligned} v &= A\lambda \frac{d}{dt} (\bar{T}_1 e^{j\omega t}) \cdot Z \\ &= \frac{A\lambda \eta_1 P_0 Z}{c_p \mu} \left\{ 1 - 2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) \frac{\frac{K_1(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)}}{\beta r_1 \left[\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} + \frac{K_0(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)} \right]} \right\} e^{j\omega t}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 λ 为材料的热释电系数, A 为器件电极面积, Z 为器件阻抗, $|Z| = R/(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}$, R 和 C 分别为器件的电阻和电容。

于是根据定义可得器件的电压响应率为

$$\mathcal{R} = \frac{|v|}{W_0} = \frac{A\lambda \eta_1 R}{\varepsilon (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} \left| 1 - 2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) \frac{\frac{K_1(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)}}{\beta r_1 \left[\frac{K_1(\beta r_1)}{I_1(\beta r_1)} + \frac{K_0(\beta r_1)}{I_0(\beta r_1)} \right]} \right|, \quad (12)$$

式中 $\varepsilon = c_p \mu A d$ 为器件的热容量。

引用宗量为 $R_1 = \sqrt{2} r_1 / \delta$ 的开尔芬函数, 式(12)可化为

$$\mathcal{R} = \frac{A\lambda \eta_1 R}{\varepsilon (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} \left\{ \left[1 - 2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) E_1 \right]^2 + \left[2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) E_2 \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

$$E_1 = \text{ber}_1(R_1) \text{ker}_1(R_1) - \text{bei}_1(R_1) \text{kei}_1(R_1), \quad (14)$$

$$E_2 = \text{ber}_1(R_1) \text{kei}_1(R_1) + \text{bei}_1(R_1) \text{ker}_1(R_1). \quad (15)$$

设光敏面以外不受入射辐照时器件的响应率为 \mathcal{R}_0 , 即相当于 $\eta_2 = 0$ 时器件的响应率, 由式(13), 令 $\eta_2 = 0$, 则得

$$\mathcal{R}_0 = \frac{A\lambda \eta_1 R}{\varepsilon (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} F, \quad (16)$$

$$F = [(1 - 2E_1)^2 + (2E_2)^2]^{1/2}. \quad (17)$$

F 可以称为由于侧向热导损耗而导致的响应率衰减因子。显然 F 是与材料参数、器件几何尺寸和工作频率有关的函数。

于是可以得到光敏面外有无入射辐照时器件响应率之比为

$$\mathcal{R}/\mathcal{R}_0 = \left\{ \frac{\left[1 - 2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) E_1 \right]^2 + \left[2 \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}\right) E_2 \right]^2}{(1 - 2E_1)^2 + (2E_2)^2} \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

当 $\eta_2 = \eta_1$, 即光敏面内外对入射辐照吸收相同时,

$$\mathcal{R}/\mathcal{R}_0 = \frac{1}{F} \quad (19)$$

式(19)表明没有径向热导损耗时器件响应率与具有径向热导损耗时器件响应率之比。这个比值自然为衰减因子的倒数。式(16)和(19)可用来计算分析径向热导损耗对器件响应率的影响程度。

对于工作频率较高和光敏面积较大的器件,当满足 $\frac{\delta}{r_1} \ll 1$ 时,由式(12)可以得到

$$\mathcal{R} \doteq \mathcal{R}_0 \doteq \frac{A\lambda\eta_1}{\omega\epsilon C} \quad (20)$$

即在这种情况下,径向热导对器件响应率的影响可以忽略不计;光敏面以外热释电材料所吸收的入射辐照对器件响应率的影响也自然不必考虑。这与集总参数模型所得到的结果是一致的。

三、计算结果和结论

应用本文得到的响应率表达式,代入适当的材料参数、器件径向尺寸和工作频率,可以计算分析侧向热导损耗和光敏面以外所吸收的入射辐照功率对器件响应率的影响程度。

我们在计算中取 LATGS 热释电材料参数

为

$$\alpha = 7 \times 10^{-8} \text{ J cm}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ S}^{-1},$$

$$c_p \mu = 2.5 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

图 2 给出了由于侧向热导损耗导致的响应率衰减因子 F 与光敏面半径和频率平方根之积 $\gamma_1 f^{1/2}$ 之间的关系。图 3 给出了器件光敏面以外有入射辐照和无入射辐照时响应率之比 $\mathcal{R}/\mathcal{R}_0$ 与工作频率之间的关系 ($r_1 = 0.3 \text{ mm}$)。

图 4 给出了器件光敏面以外有入射辐照和无入射辐照时响应率之比 $\mathcal{R}/\mathcal{R}_0$ 与器件光敏面半径之间的关系 ($f = 5 \text{ Hz}$)。在图 3 和图 4 中,同时给出了器件光敏面以外部分表面吸收率与

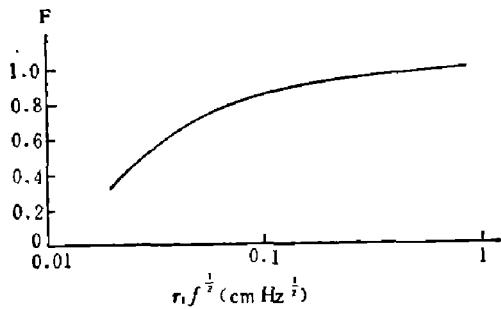


图 2 器件响应率衰减因子 F 与光敏面半径和频率平方根之积 $\gamma_1 f^{1/2}$ 的关系

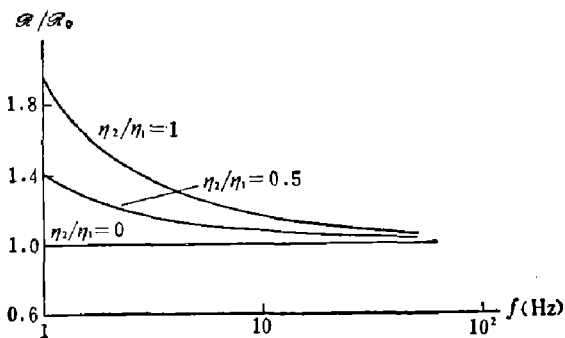


图 3 器件光敏面以外有无入射辐照时响应率之比 $\mathcal{R}/\mathcal{R}_0$ 与频率 f 的关系 ($r_1 = 0.3 \text{ mm}$)

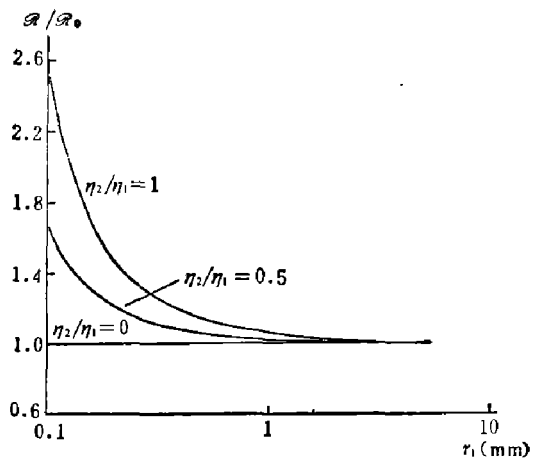


图 4 器件光敏面以外有无入射辐照时响应率之比 $\mathcal{R}/\mathcal{R}_0$ 与光敏面半径 r_1 的关系 ($f = 5 \text{ Hz}$)

光敏面吸收率之比 $\eta_2/\eta_1=1, 0.5, 0$ 三种情况的比较, $\eta_2/\eta_1=1$ 相当于器件无径向热导损耗情况。

根据计算结果可以得到如下结论:

(1) 侧向热导损耗导致器件响应率降低, 对于工作频率较低和光敏面积较小的器件, 这种影响是不可忽视的。器件响应率衰减因子 F 与材料特性、光敏面大小和工作频率有关, 光敏面尺寸的影响程度更大些。当 $\gamma_1 f^{1/2} < 2.8 \left(\frac{\kappa}{c_p l} \right)^{1/2}$ 时, $F < 0.9$ 。

(2) 器件光敏面以外部分所吸收的入射辐照功率对侧向热导损耗有一定的补偿作用, 从而导致器件响应率比光敏面外无辐照时偏高。对于工作频率较低和光敏面积较小的器件, 这种影响也是不可忽视的。严格讲来, 在器件测试中应使入射辐照面积等于器件光敏面积, 否则可通过增大光敏面以外部分的表面吸收率来得到偏高的低频响应率。

(3) 对于工作频率较高和光敏面积较大的热释电探测器, 当 $\gamma_1 f^{1/2} > 5.6 \left(\frac{\kappa}{c_p l} \right)^{1/2}$ 时, 衰减因子 $F > 0.95$, 侧向热导损耗对器件响应率的影响可以忽略不计, 光敏面以外的入射辐照对器件响应率的影响自然可以不必考虑。

参 考 文 献

- [1] van der Ziel, A. J. *Appl. Phys.*, **44**(1973), 516.
- [2] 陈继述, 物理学报, **23**(1974), 429.
- [3] Logan R. M., *Infrared Phys.*, **13**(1973), 91.
- [4] 陈祖培, 红外研究, **1**(1982), 287.
- [5] 陈继述等, 红外研究, **2**(1983), 189.

EFFECT OF LATERAL HEAT CONDUCTION ON PYROELECTRIC DETECTION

XU PINGMAO

(Department of Optics, Shandong University)

ABSTRACT

The responsivities of the suspended-type pyroelectric detectors are calculated according as the radiation covers the whole front face of the element or the electrode area only. The calculations indicate that, (1) the heat loss due to the lateral conduction may reduce the responsivity; (2) the incident power absorbed by the surrounding pyroelectric region which connects the electrode area may compensate the heat loss; (3) these effects on the responsivity can not be neglected for the detector without substrate and with small electrode area at lower frequencies.