

红外薄膜热电探测器分析*

陈 继 述

(山东大学光学系)

提 要

本文用一维扩散模型推出了热电探测器响应率的表达式,并计算了悬空的和有底板的TGS热电探测器的响应率和NEP的数值(作为器件厚度和工作频率的函数)。根据数值计算的结果,分析了薄膜热电探测器的发展前景。本文认为:

(i) 必须用薄膜底板。底板和热电晶体的厚度最好都在0.1微米以下。底板宜选用比热和密度尽量小的材料。这样的薄膜器件,其低频NEP可能比10微米厚的悬空器件降低一个数量级。

(ii) 如底板厚度超过热扩散长度,薄膜器件响应率便下降,同时温度噪声上升,NEP上升。这样的薄膜器件,其低频性能将显著地不如10微米厚的悬空器件。

一、引 言

象硫酸三甘肽(TGS)、铌酸锶钡(SBN)等热电晶体,在外电场和应力都为零的情况下,本身有自发电极化。自发电极化强度 \mathbf{P}_s 随温度上升而下降。在垂直于 \mathbf{P}_s 的晶体表面上,面束缚电荷密度为 $\sigma_s = P_s$ 。这些面束缚电荷通常被晶体内部和空气中的自由电荷所中和,不能察觉。今设有调制的红外光照射热电晶体,调制频率为 f ,则晶体的温度、 P_s 以及 σ_s 均将以频率 f 作周期变化。只要 f 不是过分低,自由电荷将来不及中和周期变化的 σ_s ,结果便在晶体的两个垂直于 \mathbf{P}_s 的外表面之间出现开路交流电压。在这两个表面上镀上电极,再联结到前置放大器(如附图1),则只要有调制红外光照射热电晶体,在前置放大器输入端便会出现交流讯号电压,整个装置就成为一个红外热电探测器。

初等的热电探测器理论^[1],采用集总参数模型,即把热电晶体的温度看作是均匀的。根据这种理论,热电晶体愈薄,器件就愈灵敏。用研磨、抛光的方法加工晶体,厚度很难达到10微米以下。如果改用快速蒸镀或者溅射等方法,则可能在底板上制出比0.1微米更薄的近乎单晶的热电探测器。是否这样

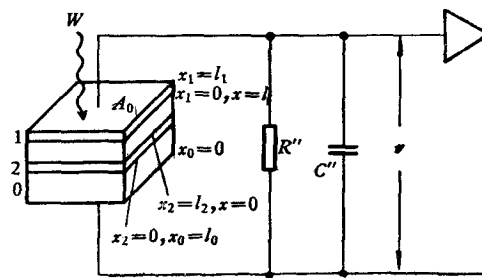


图 1

* 1973年9月19日收到。

的薄膜器件愈薄就愈灵敏? 其发展前途究竟如何? 本文的目的就是要从理论上探讨这方面的问题。

二、热电探测器的响应率公式

本节用一维扩散模型^[2-4]推导响应率 \mathcal{R} 的表达式。我们只讨论面电极器件, 见附图 1。器件共分四层, 其中 1 表示上电极, 厚度 l_1 ; 2 表示下电极, 厚度 l_2 ; 0 表示底板, 厚度 l_0 ; 热电晶体厚度为 l 。 A_0 为光敏面积, W 为入射红外辐射功率, R'' 和 C'' 为前置放大器输入电阻和输入电容。不难证明, 在调制入射功率

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

的辐照下, 前置放大器输入端的交流讯号电压为

$$v = e^{-t/RC} \int_0^t e^{t'/RC} \frac{A\lambda}{C} \frac{d\overline{\Delta T}(t')}{dt'} dt', \quad (2)$$

式中 $R = R'_{ac} // R'_{ac} // R''$ 为三个并联电阻; $R'_{ac} = \rho'_{ac} \frac{a}{A}$ 为热电晶体直流漏电阻, ρ'_{ac} 为漏电阻率, A 为电极面积, a 为电极间距; $R'_{ac} = \frac{4\pi a}{\omega \varepsilon'' A}$ 为热电晶体介电损耗引起的交流电阻, ω 为调制圆频率, ε'' 为介电常数负虚部; $C = C' + C''$, 其中 $C' = \frac{\varepsilon' A}{4\pi a}$ 为热电晶体电容, ε' 为介电常数实部; λ 为热电系数; ΔT 为晶体温度与环境温度之差;

$$\overline{\Delta T}(t) = \frac{1}{l} \int \Delta T(x, t) dx, \quad (3)$$

其中 x 是沿晶体厚度方向的坐标。

假设红外光在器件上表面被完全吸收, 则稳定后, 上电极中温度分布(略去时间因子 $e^{j\omega t}$) 可以记为

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= D_1 e^{\nu_1 x_1} + B_1 e^{-\nu_1 x_1}, \\ \nu_1 &= (1+j) \frac{1}{\delta_1}, \\ \delta_1 &= \left(\frac{2K_1}{\omega C_{p_1} \mu_1} \right)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 D_1, B_1 为两个复常数, δ_1, K_1, C_{p_1} 和 μ_1 分别为上电极的热扩散长度、热导率、比热和密度。晶体中的温度分布可以记为

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= D e^{\nu x} + B e^{-\nu x}, \\ \nu &= (1+j) \frac{1}{\delta}, \\ \delta &= \left(\frac{2K}{\omega C_p \mu} \right)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

D, B 为两个复常数, δ, K, C_p 和 μ 为晶体的热扩散长度、热导率、比热和密度。下电极中温度分布可记为

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_2 &= D_2 e^{\nu_2 x_2} + B_2 e^{-\nu_2 x_2}, \\ \nu_2 &= (1+j) \frac{1}{\delta_2}, \\ \delta_2 &= \left(\frac{2K_2}{\omega C_{p_2} \mu_2} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

底板中温度分布可记为

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_0 &= D_0 e^{\nu_0 x_0} + B_0 e^{-\nu_0 x_0}, \\ \nu_0 &= (1+j) \frac{1}{\delta_0}, \\ \delta_0 &= \left(\frac{2K_0}{\omega C_{p_0} \mu_0} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6), (7) 式中诸符号的意义和 (4), (5) 式完全类似.

这里器件的响应率 \mathcal{R} 定义为讯号幅值 $|v|$ 与平均辐照功率 W_0 之比. 由 (2), (3) 和 (5) 式使得:

$$\mathcal{R} \equiv \frac{|v|}{W_0} = \frac{A \lambda R \omega}{W_0 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \left| \frac{1}{\nu l} [D(e^{\nu l} - 1) + B(1 - e^{-\nu l})] \right|, \quad (8)$$

式中的复常数 B 和 D 由下列边界条件和衔接条件确定(参看附图 1):

(1) 在 $x_1 = l_1$ 处(上表面):

$$\begin{aligned} A_0 K_1 \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x_1} + \left(G_r + \frac{\pi r^2}{d} K_m \right) \Delta T_1 &= \alpha W_0, \\ G_r &= 4\alpha \sigma T_{(x_1=l_1)}^3 A_0, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 α 为上表面吸收率, σ 为斯忒藩常数, $T_{(x_1=l_1)}$ 为上表面温度, r, d, K_m 分别为金属引线的半径、长度和热导率. 金属引线一端接电极面, 另一端接在室温导体上, 这里忽略了引线侧向的散热.

(2) 在 $x = l, x_1 = 0$ 处(晶体和上电极分界面):

$$\Delta T = \Delta T_1, \quad K \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = K_1 \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x_1}.$$

(3) 在 $x = 0, x_2 = l_2$ 处(晶体和下电极分界面):

$$\Delta T = \Delta T_2, \quad K \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = K_2 \frac{\partial \Delta T_2}{\partial x_2}.$$

(4) 底板上下两面的边界条件可合并为在 $x_2 = 0$ 处:

$$A_0 K_2 \frac{\partial \Delta T_2}{\partial x_2} = g'_r \Delta T_2,$$

其中

$$g'_r = A_0 K_0 \nu_0 \frac{(A_0 K_0 \nu_0 + G'_r) e^{\nu_0 l_0} - (A_0 K_0 \nu_0 - G'_r) e^{-\nu_0 l_0}}{(A_0 K_0 \nu_0 + G'_r) e^{\nu_0 l_0} + (A_0 K_0 \nu_0 - G'_r) e^{-\nu_0 l_0}} + \frac{\pi r^2}{d} K_m, \quad (10)$$

$$G'_r = 4\alpha' \sigma T_{(x_0=0)}^3 A_0 \quad (11)$$

α' 为下表面吸收率, $T_{(x_0=0)}$ 为下表面温度.

从这些边界条件最后算得:

$$D = \frac{\alpha W_0 \left[(A_0 K \nu + g'_r) + \left(\frac{K \nu}{K_2} g'_r + A_0 K_2 \nu^2 \right) l_2 \right]}{2M}, \quad (12)$$

$$B = \frac{\alpha W_0 \left[(A_0 K \nu - g'_r) + \left(\frac{K \nu}{K_2} g'_r - A_0 K_2 \nu^2 \right) l_2 \right]}{2M}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M = & \left[g_r g'_r + A_0^2 K^2 \nu^2 + \left(g_r A_0 K_2 \nu^2 + A_0 g'_r \frac{K^2 \nu^2}{K_2} \right) l_2 \right. \\ & \left. + \left(g'_r A_0 K_1 \nu^2 + A_0 g_r \frac{K^2 \nu^2}{K_1} \right) l_1 \right] \text{sh}(\nu l) \\ & + \left[A_0 K \nu (g_r + g'_r) + \left(g_r g'_r \frac{K \nu}{K_2} + A_0^2 K \nu K_2 \nu^2 \right) l_2 \right. \\ & \left. + \left(g_r g'_r \frac{K \nu}{K_1} + A_0^2 K \nu K_1 \nu^2 \right) l_1 \right] \text{ch}(\nu l), \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$g_r = G_r + \frac{\pi r^2}{d} K_m. \quad (15)$$

公式(8)–(15)构成热电探测器响应率的计算公式。

附带指出,这些公式对现有热电晶体,在下列三种情况下过渡成为集总参数模型公式:

- (a) $l \ll \delta, l_0 = 0$ (悬空薄器件);
- (b) $l \ll \delta, l_0 \ll \delta_0$ (薄底板上薄器件);
- (c) $l \gg \delta$ (厚器件).

所以应用集总参数模型应该以上列三种情况为限.文献[4]误认为 $G'_r \rightarrow 0$ 是应用集总参数模型的条件之一,这个条件是不需要的.

三、热电探测器性能计算

本节把热电晶体和底板的物性参数以及前置放大器性能参数等代入上节响应率公式和已知的噪声表达式,用电子计算机算出各种不同参数下热电探测器(包括薄膜器件)的性能指标.从计算得到的图线就可以探讨薄膜热电探测器的发展前景.采用的参数值如下:

(1) 热电晶体的参数: $K = 6.8 \times 10^{-3}$ 焦耳/厘米·秒·K, $C_p = 0.97$ 焦耳/克·K, $\mu = 1.69$ 克/厘米³, $\lambda = 2 \times 10^{-8}$ 库伦/厘米²·K, $\epsilon' = 50$, $\epsilon'' = 0.16$, $\rho'_{ac} = 10^{12}$ 欧姆·厘米.这套参数接近 TGS,但未考虑 ϵ' 和 ϵ'' 随频率的变化.

(2) 底板参数取两套.第一套 $K_0 = 6 \times 10^{-3}$, $C_{p_0} = 0.86$, $\mu_0 = 3$,这套参数接近云母底板.第二套 $K_0 = 107 \times 10^{-3}$, $C_{p_0} = 0.78$, $\mu_0 = 2.6$,这套参数接近石英底板.

(3) 前置放大器参数: $R'' = 10^{10}$ 欧姆, $C'' = 5$ pF, $\Delta i_A = 10^{-14}$ 安, $\Delta V_A = 5 \times 10^{-8}$ 伏.

(4) 工艺参数: $A_0 = A = 10^{-2}$ 厘米², $\alpha = \alpha' = 1$, $l = a$ 从 0.1 到 10^3 微米. 工作温度 $T = 300\text{K}$, 频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 从 10 到 10^7 赫, $\Delta f = 1$ 赫.

计算响应率与器件厚度的关系应用公式 (8)–(15), 但略去了上下电极和引线的影响, 又底板均指 $l_0 \gg \delta_0$ 的厚底板. 计算结果如附图 2 所示. 图中对应每一个频率的曲线在器件厚度 l 小的时候分为三支, 响应率最高的一支为悬空器件, 其次为云母底板上器件, 再次为石英底板上器件.

计算 NEP 与器件厚度的关系应用下列熟知的公式:

$$NEP = \frac{\Delta V_N}{\mathcal{R}}, \quad (16)$$

$$\Delta V_N = \sqrt{\Delta V_T^2 + (\Delta V_J)_\delta^2 + (\Delta V_J)_{K'_{dc}}^2 + (\Delta V_J)_{K''}^2 + \Delta V_i^2 + \Delta V_{i,}^2}$$

其中, ΔV_T 为温度噪声. 对悬空器件或薄底板上器件:

$$\Delta V_T = \frac{\mathcal{R}2T}{\alpha} \sqrt{k \left(G_r + G'_r + \frac{2\pi r^2}{d} K_m \right) \Delta f}; \quad (17)$$

对厚底板上器件:

$$\Delta V_T = \frac{\mathcal{R}2T}{\alpha} \sqrt{k \left(G_r + \frac{A_0 K_0}{\delta_0} + \frac{2\pi r^2}{d} K_m \right) \Delta f}; \quad (18)$$

一般情况:

$$\Delta V_i = \frac{\mathcal{R}2T}{\alpha} \sqrt{k(g_r + \text{Re } g'_r) \Delta f},$$

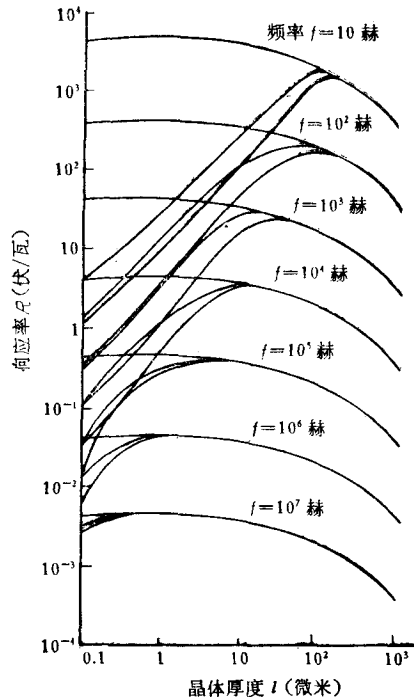


图 2 响应率与器件厚度关系

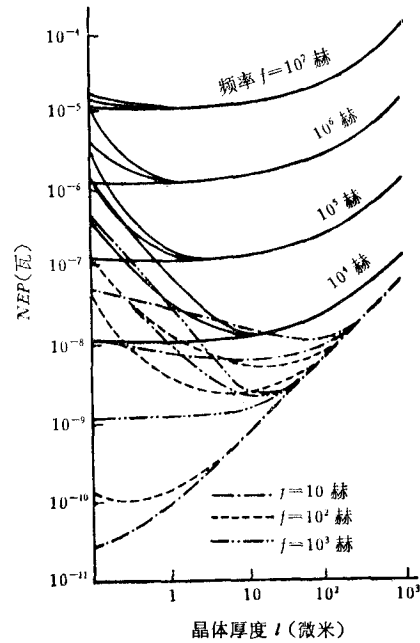


图 3 NEP 与器件厚度关系

上述诸式中, k 为玻尔兹曼常数. $(\Delta V_J)_\delta$ 为热电晶体介电弛豫引起的热噪声:

$$(\Delta V_J)_\delta = \sqrt{\frac{4kT\Delta f C' \epsilon''}{\epsilon' \omega C^2}}; \quad (19)$$

$(\Delta V_J)_{R'_{dc}}$ 为晶体直流漏电阻引起的热噪声:

$$(\Delta V_J)_{R'_{dc}} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\omega C \sqrt{R'_{dc}}}; \quad (20)$$

$(\Delta V_J)_{R''}$ 为与前置放大器输入电阻有关的热噪声:

$$(\Delta V_J)_{R''} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\omega C \sqrt{R''}}; \quad (21)$$

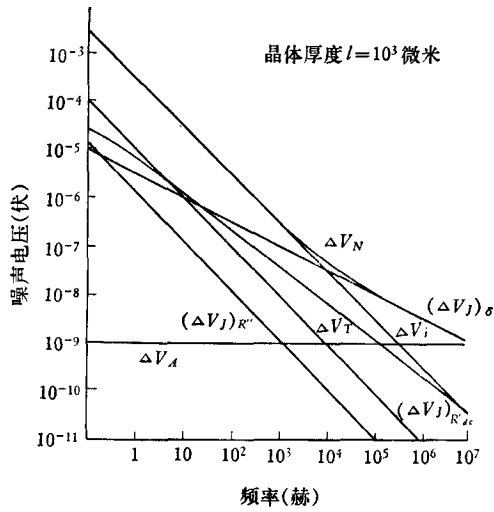


图 4

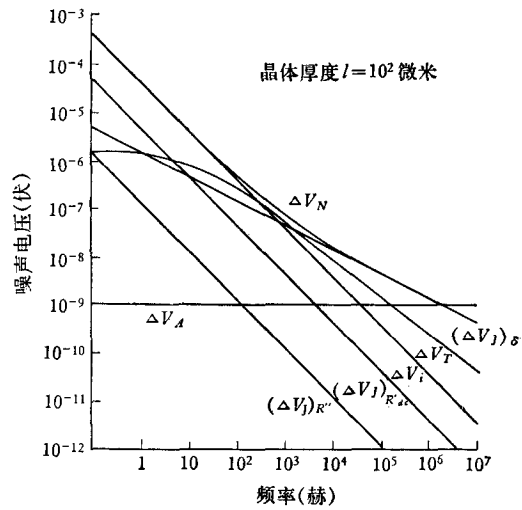


图 5

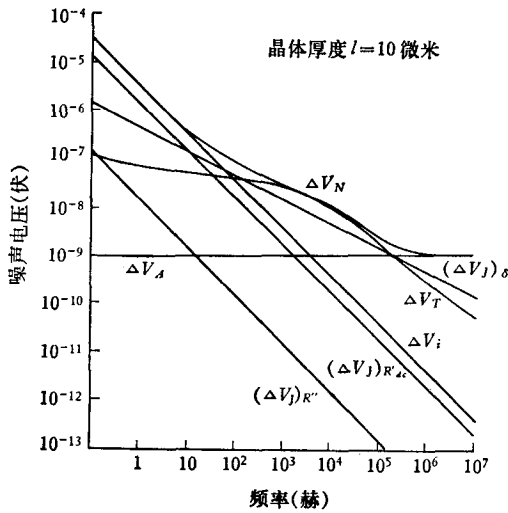


图 6

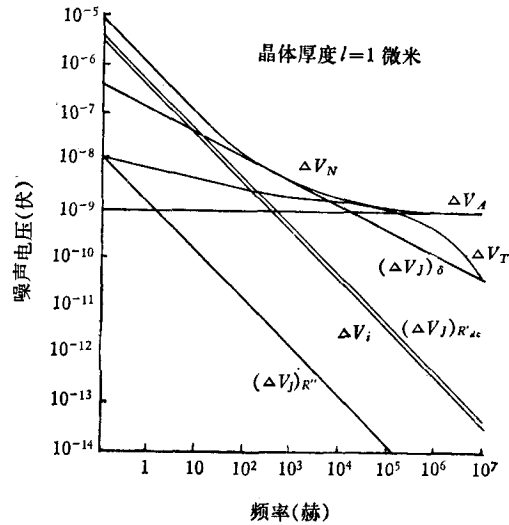


图 7

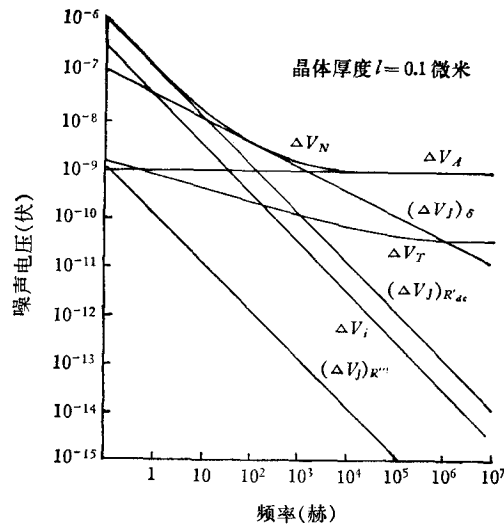


图 8

ΔV_i 为前置放大器电流噪声:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta i_A R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad (22)$$

其中 Δi_A 为方均根电流涨落, ΔV_A 为前置放大器电压噪声。

计算结果, NEP 和器件厚度的关系如附图 3 所示。图中对应每一个频率的曲线在器件薄时分为三支, NEP 最低的一支为悬空器件, 其次为云母厚底板上器件, 再次为石英厚底板上器件。

我们还计算了厚石英底板上不同厚度器件的各种噪声频谱。计算时, 前置放大器性能参数采用下述理想的值: $R'' = 10^{15}$ 欧姆, $C'' = 0.1$ 微微法, $\Delta i_A = 10^{-15}$ 安培, $\Delta V_A = 10^{-9}$ 伏。计算结果如附图 4—8 所示。

四、结 论

从附图 2 与 3 及相应的计算公式可见:

(1) 厚底板 (即 $l_0 \gg \delta_0$ 的底板) 使器件的性能下降: 响应率降低, NEP 上升。工作频率越低, 晶体越薄, 底板材料的 $K_0 C_p \mu_0$ 的值越大, 这种影响就越厉害。

(2) 文献[5]正确地指出, 薄膜器件的底板愈薄愈好, 但同时又建议晶体厚度不要太薄, 最好几微米厚, 底板材料要选用 $K_0 C_p \mu_0$ 尽量小的材料。这两项建议, 事实上只适用于厚度超过热扩散长度的底板, 即我们所谓厚底板的情况。而此时, 即使采用了上述建议之后, 器件性能仍比 10 微米厚的悬空器件差, 低频 (一二十赫) 下 NEP 可能要高一个数量级左右。所以我们认为, 厚底板上薄膜器件没有发展的前途。

(3) 制成低 NEP 的薄膜器件的关键在于采用四周边缘固定, 本身基本上悬空的薄膜底板。底板厚度最好小到 0.1 微米以下, 热晶体厚度也要小到 0.1 微米。底板材料选用

$C_p \mu_0$ 值尽量小的材料。这样的薄膜器件,其性能接近于 0.1 微米厚的理想悬空器件。它和 10 微米厚的实际悬空器件比较,响应率虽然差不多,但低频 NEP 可能降低一个数量级。

从图 4—8 可见:

(4) 低频区的主要噪声通常是前置放大器的电流噪声。高频区的主要噪声最后是前置放大器的电压噪声。在中等频率区间, $(\Delta V_j)_s$ 常成为主要噪声,但有些情况下厚底板引起的温度噪声也可成为主要噪声。文献 [5] 认为 $(\Delta V_j)_s$ 始终是主要噪声,温度噪声完全可以忽略,并由此推论 D^* 在中等频率区间应该保持不变。这些论断未必能符合厚底板上器件的所有实际情况。

本文的主要目的是给出热电探测器的响应率的计算公式 (8)—(15) 和分析薄膜器件的发展前景。对后一个问题的简单结论是:在厚底板上制造薄膜器件没有什么发展前途,但如能采用悬空薄膜底板制成薄膜器件,则其低频 NEP 可能比现有最好的器件 (10 微米悬空器件) 再降低一个数量级。

文中的数值计算工作由本校计算机教研室的同志完成,对此我们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] J. H. Putley, The Pyroelectric Detector, vol. 5 in *Semiconductors and Semimetals* (1970), pp. 259—285.
- [2] H. Blackburn and H. C. Wright, *Infrared Phys.*, **10** (1970), 191.
- [3] B. R. Holeman, *Infrared Phys.*, **12** (1972), 125.
- [4] A. van der Ziel and S. T. Liu, *J. Appl. Phys.*, **43** (1972), 4260.
- [5] A. van der Ziel, *J. Appl. Phys.*, **44** (1973), 546.

THEORY OF THIN PYROELECTRIC FILM DETECTORS

CHEN CHI-SHU

(Shantung University)

ABSTRACT

The pyroelectric response and NEP of pyroelectric detectors with and without a substrate are calculated as functions of detector thickness and working frequency, using the one-dimensional diffusion theory. It is found that in order for a thin pyroelectric film detector to have better low frequency performance, it is essential that the substrate should be effectively free-bearing and very thin, preferably less than 0.1μ thick. The pyroelectric layer should also be thin, preferably as thin as the substrate. As concerns the substrate material, the product of its specific heat and density should be as small as possible.