

三维薄膜热释电红外探测器的计算机模拟

陈继述 刘维倩 徐平茂 李 潜

(山东大学)

摘要——本文改进了参考文献[3]中提出的三维薄膜热释电探测器性能指标的计算方案,并在计算机上完成了计算。结果表明,由侧向热传导引起的不良效应通常比较小。但是对于性能优良的热释电探测器系统,在低频区,由侧向热传导引起的温度噪声却可能成为主要噪声之一,不可以再忽视。

一、引 言

初等的热释电探测器理论采用集总参数模型,即假设热释电晶体的温度是均匀的^[1]。按照这个理论,晶体愈薄,器件就愈灵敏。后来我们通过一维模型计算,进一步得到这样的结论^[2],即制作优良器件的关键在于采用薄膜晶体,同时尽可能进行悬空封装。为了再进一步研究侧向热传导对器件响应率和噪声谱的可能影响,我们又提出了一个计算三维薄膜热释电探测器性能指标的计算方案^[3]。本文先改进这个计算方案,然后在计算机上完成了计算。结果表明,由侧向热传导引起的不良效应一般是比较小的。因此,我们以前得到的结论^[2],仍具有实际应用价值。但是本文计算还发现,对于性能优良的热释电探测器系统,在低频区,由侧向热传导引起的温度噪声可能成为主要噪声之一。因此,在研制背景限高性能器件时,这部份噪声是不能忽视的。

二、探测器模型

本文计算用的探测器模型见图1。探测器部分是一个厚度为 d ,半径为 r_2 的园形晶体

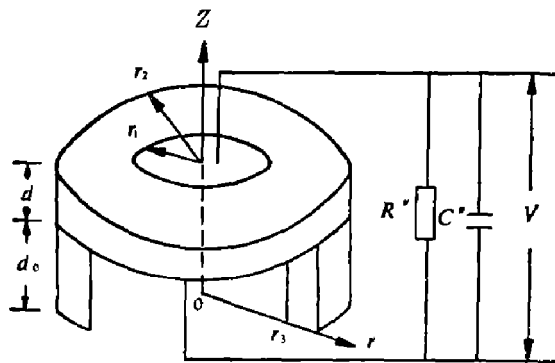


图1 包括前置放大器的面电极器件

薄片, 两面镀有半径为 r_1 的面电极, 并封装在高度为 d_0 、内半径为 r_3 、外半径为 r_2 的空心圆柱形底板上。这样的封装基本上是悬空封装。两个面电极连接到前置放大器的输入端。前置放大器的输入电阻为 R'' , 输入电容为 C'' 。计算时用到的 (r, z) 座标在图 1 中标出。注意 r 是一个极座标。

三、计算方案

第一步:

为了计算强度为

$$W = W_0(1 + \cos \omega t) \quad (1)$$

的入射调制辐射在前置放大器输入端产生的信号电压 V , 我们先求解下述热传导方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{K}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (2)$$

由此求出在入射辐射下, 晶体和衬底中的温度分布 $T(r, z, t)$ 。所用的线性化边条件如下:

在 $d_0 < z \leq d + d_0$, $r = r_2$ 处:

$$-K_1 \frac{\partial T}{\partial r} = 4\alpha\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3a)$$

在 $z = d + d_0$, $r_1 < r < r_2$ 处:

$$-K_1 \frac{\partial T}{\partial z} = 4\alpha\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3b)$$

在 $z = d + d_0$, $0 \leq r \leq r_1$ 处:

$$-K_1 \frac{\partial T}{\partial z} = 4\alpha_1\sigma T_b^3(T - T_b) - \alpha_1 W_0(1 + \cos \omega t) \quad (3c)$$

在 $z = d_0$, $0 \leq r \leq r_3$ 处:

$$K_1 \frac{\partial T}{\partial z} = 4\alpha_1\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3d)$$

在 $0 \leq z \leq d_0$, $r = r_2$ 处:

$$-K_2 \frac{\partial T}{\partial r} = 4\alpha_0\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3e)$$

在 $z = 0$, $r_3 \leq r \leq r_2$ 处:

$$K_2 \frac{\partial T}{\partial z} = 4\alpha_0\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3f)$$

在 $0 \leq z < d_0$, $r = r_3$ 处:

$$K_2 \frac{\partial T}{\partial r} = 4\alpha_0\sigma T_b^3(T - T_b) \quad (3g)$$

上述诸式中, ρ 为热释电晶体(或衬底)的密度; c_p 为热释电晶体(或衬底)的比热; K 为材料的热导率, 对热释电晶体用 K_1 , 对衬底用 K_2 ; α 为晶体表面吸收率; α_1 为电极表面吸收率; α_0 为衬底表面吸收率; σ 为斯忒藩常数; T_b 为环境温度。

我们在计算机上首先把方程(2)和(3a)~(3g)化成差分方程, 然后应用交替方向隐式解法(Alternating direction implicit procedure)^[4], 求出 $T(r, z, t)$ 的数值解。结果很好地符合下述预期的形式:

$$T(r, z, t) = A(r, z) \cos(\omega t + \delta) + B(r, z),$$

即 $T(r, z, t)$ 包含一个调制部分, 再加上一个稳态部分。并且, 算出的空间坐标函数 $A(r, z)$ 和 $B(r, z)$ 的形式也都是合理的。

第二步:

应用算得的温度分布 $T(r, z, t)$, 把参考文献 [2] 给出的公式推广到三维情况, 用来计算器件的响应率 \mathcal{R} , NEP 和噪声谱。

1. 响应率 \mathcal{R}

$$\mathcal{R} = \frac{|v|}{W_0 \pi r_1^2}, \quad (4)$$

其中 v 是前置放大器输入端的信号电压,

$$v = e^{-t/RC} \int_0^t e^{t'/RC} \frac{\pi r_1^2 \lambda}{c} \frac{d\bar{T}}{dt} dt, \quad (5)$$

式中 R 为 R'_{dc} 、 R_{ac} 和 R'' 的并联电阻, $R'_{dc} = \rho'_{dc} \frac{a}{A}$ 为热释电晶体的直流漏电阻, ρ'_{dc} 为漏电阻率, A 为电极表面积, a 为两电极间距, $R_{ac} = \frac{4\pi a}{\omega \epsilon'' A}$ 为介电损耗引起的交流电阻, ω 为调制角频率, ϵ'' 为介电常数虚部的负值, λ 为热释电系数,

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{\pi r_1^2 d} \int_{r=0}^{r=r_1} dr \int_{z=d_0}^{z=d_0+d} dz 2\pi r T(r, z, t)$$

为探测器的平均温度, $c = c' + c''$, $c' = \frac{\epsilon' A}{4\pi a}$ 为热释电晶体电容, ϵ' 为介电常数的实部。

2. NEP

$$NEP = \Delta V_N / \mathcal{R}, \quad (6)$$

其中 ΔV_N 为总噪声电压。

$$\Delta V_N = \sqrt{\Delta V_{Tr}^2 + (\Delta V_J)_\delta^2 + (\Delta V_J)_{R'_{dc}}^2 + (\Delta V_J)_{R''}^2 + \Delta V_i^2 + \Delta V_A^2 + \Delta V_{Tc}^2}, \quad (7)$$

式中 ΔV_{Tr} 为辐射温度噪声, $(\Delta V_J)_\delta$ 为介电损耗引起的热释电晶体的热噪声, $(\Delta V_J)_{R'_{dc}}$ 为晶体直流漏电阻引起的热噪声, $(\Delta V_J)_{R''}$ 为与前置放大器输入电阻有关的热噪声, ΔV_i 为前置放大器的电流噪声, ΔV_A 为前置放大器的电压噪声, ΔV_{Tc} 为侧向热传导引起的温度噪声。

3. 噪声谱¹⁾

侧向热传导引起的温度噪声的表达式为^[5]

$$\Delta V_{Tc} = \frac{\mathcal{R} 2\bar{B}}{\alpha_1} \sqrt{k G_c \Delta f}, \quad (8)$$

式中,

$$G_c = \text{Re} \left[-2\pi r_1 K_1 \int_{d_0}^{d_0+d} \left(\frac{\partial T / \partial r}{T - T_b} \right)_{r=r_1} dz \right],$$

$$\bar{B} = \frac{\omega}{2\pi} \frac{1}{\pi r_1^2 d} \int_0^{2\pi/\omega} dt \int_0^{r_1} dr \int_{d_0}^{d_0+d} dz T(r, z, t) 2\pi r.$$

所有其他部份噪声谱的表达式均见参考文献 [2]。

四、计算结果

计算中采用了两套晶体材料和前置放大器参数。采用第一套参数是为了同参考文献 [2] 的一维计算结果作比较; 采用第二套参数则是因为它更接近于近几年来前置放大器和

1) 文中公式 (8) 引自参考文献 [5], 更正确的表达式请见参考文献 [6]。

LATGS 晶体材料的实际情况。

第一套参数如下：

1. 晶体参数

$K = 6.8 \times 10^{-3} \text{ Jcm}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c_p = 0.97 \text{ Jg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\mu = 1.69 \text{ gcm}^{-3}$, $\lambda = 2 \times 10^{-8} \text{ Ccm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\epsilon' = 50$, $\epsilon'' = 0.16$, $\rho_{dc}' = 10^{12} \Omega\text{cm}$ 。这套参数接近 TGS, 但未考虑 ϵ' 与 ϵ'' 随频率的变化。

2. 衬底参数

$K = 6 \times 10^{-3} \text{ Jcm}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c_p = 0.86 \text{ Jg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\mu = 3 \text{ gcm}^{-3}$, 这套参数接近云母衬底。

3. 前置放大器参数

$R'' = 10^{10} \Omega$, $c'' = 5 \text{ pF}$, $\Delta i_A = 10^{-14} \text{ A}$, $\Delta V_A = 5 \times 10^{-8} \text{ V}$ 。

4. 工艺参数

$r_1 = 0.5 \text{ cm}$, $r_2 = 2 \text{ cm}$, $r_3 = 1 \text{ cm}$, d 从 $1 \mu\text{m}$ 到 $10 \mu\text{m}$, $d_0 = 0.2 \text{ cm}$, $T_b = 300 \text{ K}$, 工作频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 从 1 Hz 到 10^6 Hz , $\Delta f = 4 \text{ Hz}$, $\alpha = \alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.9$ 。

第二套参数：

1. 晶体参数

$K = 7 \times 10^{-3} \text{ Jcm}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c_r = \mu c_p = 2.5 \text{ Jcm}^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\lambda = 3.5 \times 10^{-8} \text{ Ccm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\epsilon' = 35$, $\epsilon''/\epsilon' = 0.002$, $\rho_{dc}' = 10^{14} \Omega\text{cm}$ 。这套参数接近 LATGS, 但也没考虑 ϵ' 与 ϵ'' 随频率的变化。

2. 前置放大器参数

$R'' = 10^{12} \Omega$, $c'' = 5 \text{ pF}$, $\Delta i_A = 10^{-16} \text{ A}$, $\Delta V_A = 1 \times 10^{-8} \text{ V}$ 。

3. 衬底参数和工艺参数: 与第一套参数中的同类参数取值相同。

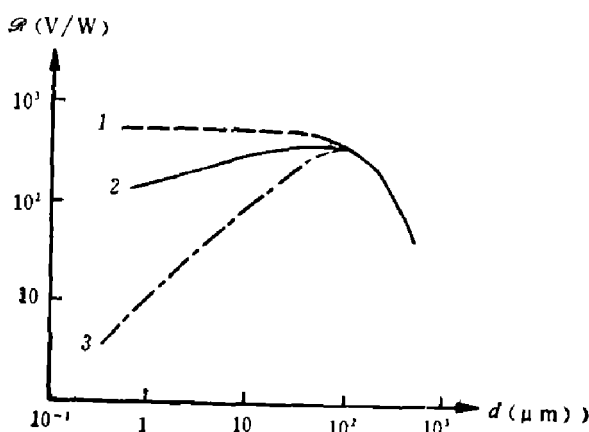


图 2 响应率与器件厚度的关系
(第一套参数 $f = 100 \text{ Hz}$)

- 1—悬空封装, 忽略侧向热传导的计算结果;
- 2—用本文模型, 考虑了侧向热传导的计算结果;
- 3—带厚衬底的器件计算结果

实际上, ΔV_A 约在 100 Hz 以下, Δi_A 约在 10 Hz 以上, 与频率均有依赖关系。但是通常 ΔV_A 在高频区, Δi_A 在低频区才是主要噪声, 为计算方便起见, 它们与频率的依赖关系均可不加考虑。

计算结果如图 2 至图 6 所示。图 2 表示 $f = 100 \text{ Hz}$ 时, 响应率 \mathcal{S} 与器件厚度 d 的关系。图 3 表示 $f = 100 \text{ Hz}$ 时, NEP 与器件厚度 d 的关系。在图 2 和图 3 中, 曲线 1 是忽略侧向热传导时算出的结果, 曲线 2 是用本文模型, 考虑了侧向热传导时算出的结果, 曲线 3 则是对厚衬底算出的结果, 以上计算中均采用第一套参数。图 4 表示, $d = 10 \mu\text{m}$ 的器件的 \mathcal{S} 和 NEP 与工作频率的关系, 图中同时给出了采用两套参数的计算结果。图 5

和图 6 分别表示采用第一套和第二套参数算得的噪声谱。

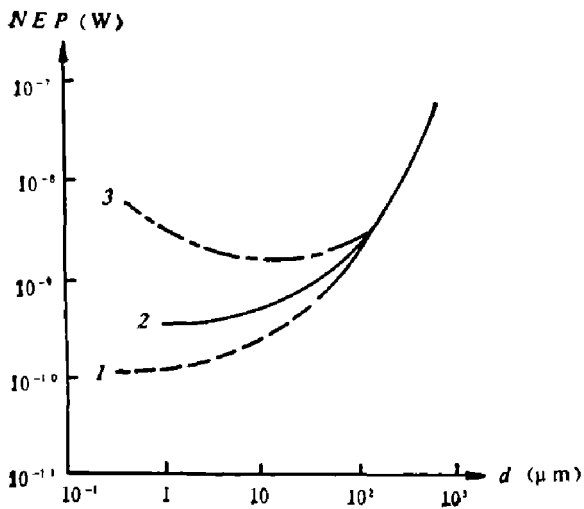


图3 NEP 与器件厚度的关系
(第一套参数, $f=100$ Hz)

- 1—悬空封装, 忽略侧向热传导的计算结果;
- 2—用本文模型, 考虑了侧向热传导的计算结果;
- 3—带厚衬底的器件计算结果

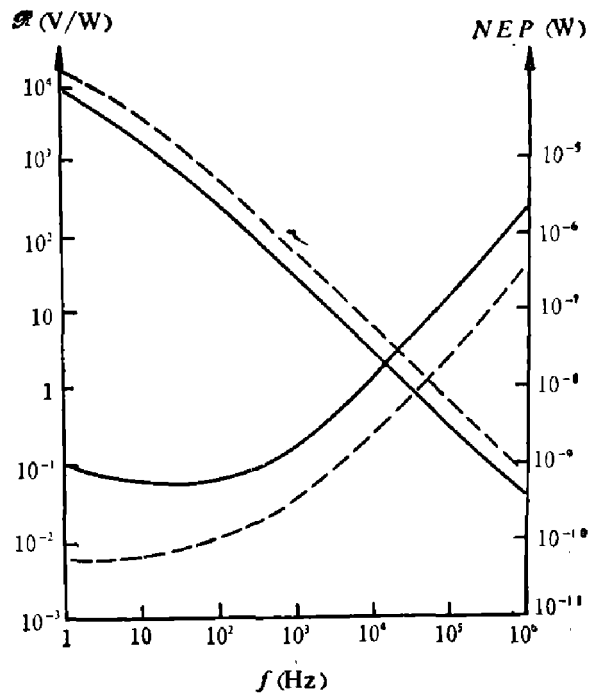


图4 响应率、 NEP 与工作频率的关系
($d=10 \mu\text{m}$, 实线和虚线分别是用第一套
和第二套参数计算的结果)

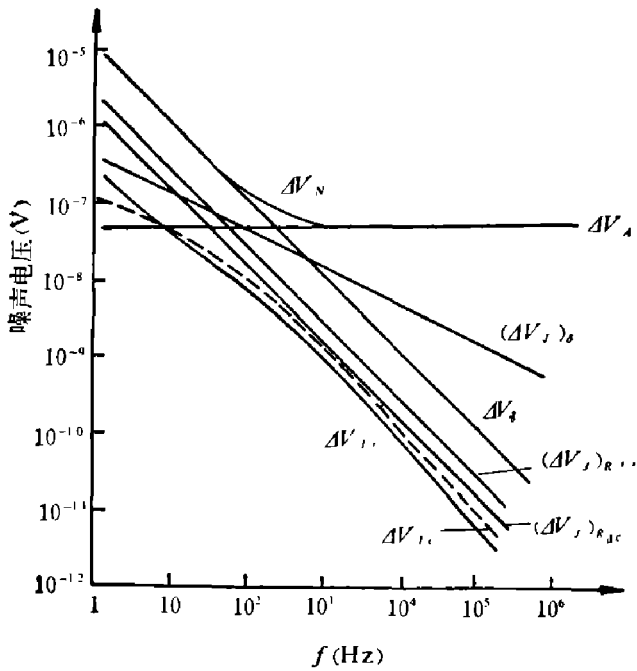


图5 噪声谱(第一套参数, $d=10 \mu\text{m}$)

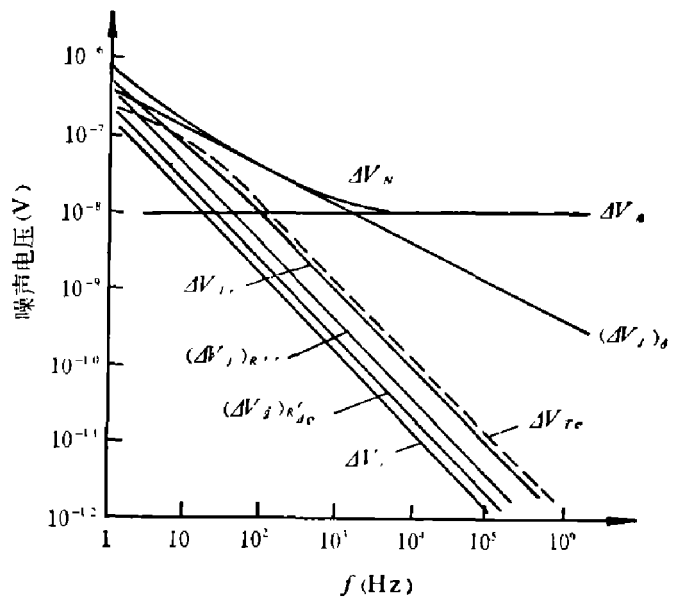


图6 噪声谱(第二套参数, $d=10 \mu\text{m}$)

五、结 论

比较图2与图3即用第一套参数计算的三条曲线可见, 厚衬底和侧向热传导都对器件产生有害的影响, 它们使 S 下降, 同时使 NEP 上升。但是侧向热传导的影响比厚衬底的影响要小得多。因此参考文献[2]中一维计算得到的结论, 对实际三维晶体仍能成立, 即制造

优良热释电探测器的关键主要在于采用薄膜晶体和尽可能进行悬空封装,同时要采用一个低噪声和高阻抗的前置放大器和改进表面处理工艺。这样做了以后,图1所示的TGS探测器,其 D^* 可达 $2 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$,如果进一步改用优良的材料和前置放大器(例如符合第二套参数),即 D^* 可高达 $8 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

由图5和图6还可见,探测器系统的主要噪声通常是放大器噪声和介电损耗引起的热释电晶体的热噪声。对于性能优良的热释电探测器系统(第二套参数),在低频区,由侧向热传导引起的温度噪声 ΔV_{Tc} 和辐射温度噪声 ΔV_{Tr} 亦能接近成为主要的噪声。因此,为了研制背景限高 D^* 值器件,除了上段中提到的技术要点外,还要注意减少侧向热传导引起的不良影响。

参 考 文 献

- [1] Putley.E. H., *Semiconductors and Semimetals*, 5(1970), 259~285.
- [2] 陈继述,物理学报, 23(1974), 6:429; English translation, AD-A015, 134.
- [3] 陈继述,红外物理与技术, (1978), 1:7.
- [4] Croft. D. R. and Lilley. D. G., *Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations*, London: Applied Science Pub., 1977, 227~231.
- [5] Logan. R. M., *Infrared phys.*, 13(1973), 2:91.
- [6] 陈祖培,中国科学, (1981), 11:1329.

COMPUTER SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL THIN FILM PYROELECTRIC INFRARED DETECTORS

CHEN JISHU, LIU WEIQIN, XU PINGMAO, LI QUAN

(Department of Optics, Shandong University)

ABSTRACT

An algorithm given in reference [3] is revised and realized on computer for calculating the performances of three-dimensional thin film pyroelectric IR detectors. The calculations confirm that, in general, the undesirable effects due to sidewise heat conduction are small. Nevertheless, for a high quality pyroelectric detector system, and within the low working frequency regions, the temperature noise due to sidewise heat conduction may become one of the dominant noises of the system, and can no longer be overlooked.