

热敏电阻红外探测器的计算机模拟

陈继述 徐平茂

(山东大学光学系)

摘要——本文采用比较接近实际的物理模型,对热敏电阻进行了计算机模拟计算,算出了不同材料与不同工艺的热敏电阻的性能参数。结果表明,提高此器件性能的有效途径有三个:一是在应用许可的情况下尽量减少受辐射面积;二是尽可能采用薄膜衬底或悬空结构;三是采用使 NEP 最佳的热敏层厚度。

一、引言

以往关于热敏电阻的理论分析工作,都把热敏电阻的温度看作是均匀的,并忽略了衬底对器件性能的影响。这种分析是相当粗糙的,对改进实际制造工艺帮助不大。本文考虑到热敏层、胶合层、衬底层中的吸收和热传导过程,同时计入了偏置电流热效应的影响,这是比较接近实际的物理模型。根据这个模型,用电子计算机进行数值计算,得到了器件的响应率和 NEP 相对于热敏层厚度、受辐照面积、衬底厚度和工作频率等参数的一系列关系曲线。

二、物理模型

热敏电阻的物理模型和坐标选取法如图1所示。其中第一层为热敏层,其厚度为 d_1 。第二层为胶合层,其厚度为 d_2 。第三层为衬底,其厚度为 d_3 。器件的长度和宽度分别为 a 和 b 。

热敏电阻在使用中,常接成桥式电路(图2),其中接收红外辐照的元件叫主元件,不接收辐照的屏蔽元件叫补元件。主元件和补元件的形状、结构、特性均相同。 R_0 为限流电阻, E 为偏置电压。

没有红外辐射照射时,主元件和补元件电阻相等,温度分布也完全相同,桥式电路处于平衡状态,开路电压 $V_s = 0$,即没有信号输出。

今设入射到主元件上的红外辐射功率为

$$W = AI_0(1 + e^{i\omega t}) \quad (1)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为调制圆频率, f 为调制频率, I_0 为平均辐照度, A 为探测器面积。工作达到稳定以后,主元件的温度 T_a 、电阻 R_a 和补元件的温度 T_b 、电阻 R_b 都将随时间作周期变

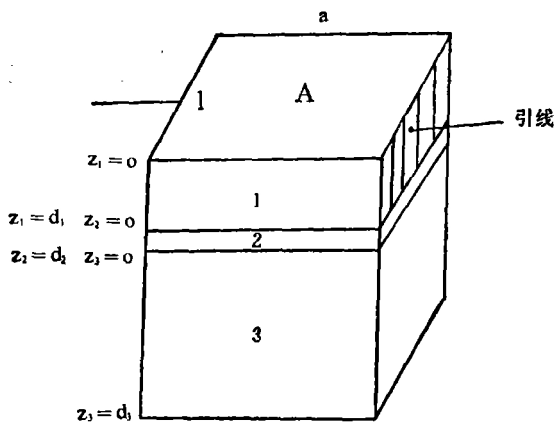


图1 器件结构

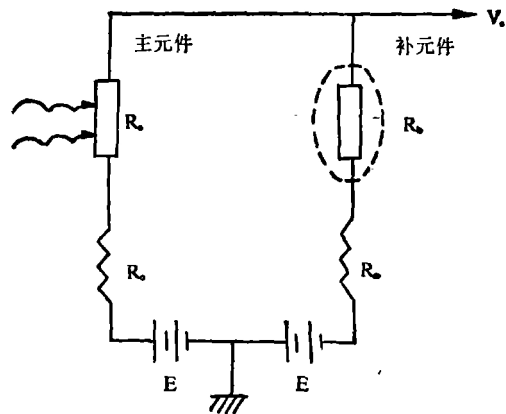


图2 桥式电路

化。元件温度同时还是空间坐标的函数。由于主元件吸收红外辐射，破坏了桥式电路的平衡状态，因而产生了开路电压 V_0 。开路电压的大小与器件参数、工作条件和辐照情况都有关，本节的目的就是要找出计算 V_0 的公式。

通常情况下器件较薄，我们可以忽略侧向热导的影响，用一维热传导模型建立热传导方程。结果如下：

1. 对主元件

热传导方程为：

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 C_{p1} \frac{\partial T_{a1}}{\partial t} &= K_1 \frac{\partial^2 T_{a1}}{\partial z_1^2} + Q_a + Q_1, \\ \mu_i C_{pi} \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} &= K_i \frac{\partial^2 T_{ai}}{\partial z_i^2} + Q_i, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中第一式为热敏层的热传导方程。第二式中 $i=2, 3$ ，分别为胶合层和衬底层的热传导方程。主元件的边界条件为：

$$\left. \begin{aligned} z_1=0, AK_1 \frac{\partial T_{a1}}{\partial z_1} &= \alpha_1 \sigma (T_{a1}^4 - T_0^4); \\ z_1=d_1, z_2=0, T_{a1} &= T_{a2}, \\ K_1 \frac{\partial T_{a1}}{\partial z_1} &= K_2 \frac{\partial T_{a2}}{\partial z_2}; \\ z_2=d_2, z_3=0, T_{a2} &= T_{a3}, \\ K_2 \frac{\partial T_{a2}}{\partial z_2} &= K_3 \frac{\partial T_{a3}}{\partial z_3}; \\ z_3=d_3, -AK_3 \frac{\partial T_{a3}}{\partial z_3} &= \alpha_3 \sigma (T_{a3}^4 - T_0^4), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中， μ_i 、 C_{pi} 、 K_i 分别为第 i ($i=1, 2, 3$) 层材料的密度、比热和热导率。 T_{ai} 为主元件第 i ($i=1, 2, 3$) 层的温度。 T_0 为环境温度。 α_1 、 α_3 分别为热敏层上表面和衬底层下表面的热辐射效率。 σ 为斯忒藩常数。 Q_a 为热敏层中由偏置电流引起的焦耳热， Q_i 为第 i ($i=1, 2, 3$) 层中单位体积吸收的辐射功率。容易验证，

$$Q_a = \left(\frac{I}{d_1 l} \right)^2 \rho (T_{a1}). \quad (4)$$

式中, I 为偏置电流强度, $\rho(T_{a_i})$ 为热敏层的电阻率, 其形式为:

$$\rho(T_{a_i}) = \rho_0 e^{\beta} \left(\frac{1}{T_{a_i}} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (5)$$

其中, ρ_0 为温度 T_0 时热敏层的电阻率, β 为材料常数。

考虑到辐射在各层中多次反射、吸收和透射以后, 导出各层中单位体积内吸收的辐射功率为:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \lambda_1 \tau_0'' e^{-\lambda_1 z_1} [1 + r_1'' e^{-2\lambda_1(d_1 - z_1)}] I_0, \\ Q_2 &= \lambda_2 \tau_0'' e^{-\lambda_2 d_2} \tau_1'' e^{-\lambda_2 z_2} [1 + r_2'' e^{-2\lambda_2(d_2 - z_2)}] I_0, \\ Q_3 &= \lambda_3 \tau_0'' e^{-\lambda_3 d_3} \tau_1'' e^{-\lambda_3 d_2} \tau_2'' e^{-\lambda_3 z_3} [1 + r_3'' e^{-2\lambda_3(d_3 - z_3)}] I_0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} r_2' &= r_2 + \frac{\tau_2^2 r_3 e^{-2\lambda_3 d_3}}{1 - r_2 r_3 e^{-2\lambda_3 d_3}}, \\ \tau_2' &= \frac{\tau_2}{1 - r_2 r_3 e^{-2\lambda_3 d_3}}, \\ r_1'' &= r_1 + \frac{\tau_1^2 r_2' e^{-2\lambda_2 d_2}}{1 - r_1 r_2' e^{-2\lambda_2 d_2}}, \\ \tau_1'' &= \frac{\tau_1}{1 - r_1 r_2' e^{-2\lambda_2 d_2}}, \\ \tau_0'' &= \frac{\tau_0}{1 - r_0 r_1'' e^{-2\lambda_1 d_1}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为热敏层、胶合层和衬底层的吸收系数; r_j 、 τ_j ($j=0, 1, 2, 3$) 分别为第 j 个界面的反射系数和透射系数, 其值可根据界面两边材料的折射率和入射角由费涅耳公式求得。对本文讨论的垂直入射情况, $r_j = (n_{j+1} - n_j) / (n_{j+1} + n_j)$, $\tau_j = 2n_j / (n_{j+1} + n_j)$, n_j 和 n_{j+1} 分别为第 j 个界面上、下两侧材料的折射率。

2. 对补元件

热传导方程为

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 C_{p_1} \frac{\partial T_{b_1}}{\partial t} &= K_1 \frac{\partial^2 T_{b_1}}{\partial z_1^2} + Q_b, \\ \mu_i C_{p_i} \frac{\partial T_{b_i}}{\partial t} &= K_i \frac{\partial^2 T_{b_i}}{\partial z_i^2}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中第一式为热敏层的热传导方程, 第二式中 $i=2, 3$, 分别为胶合层和衬底层的热传导方程。焦耳热项 $Q_b = \left(\frac{I}{d_1 l} \right)^2 \rho(T_{b_1})$ 。

边界条件同式(3), 只需用 T_b 取代 T_a 即可。

3. 主元件和补元件的温度分布及其阻值

根据以上方程和边界条件进行计算, 采用图2所示的桥式电路, 容易证明, 信号电压为:

$$V_s = - \frac{2E(R_b + R_0) \Delta R}{(R_a + R_b + 2R_0)^2}, \quad (9)$$

ΔR 为计算得到的主元件和补元件的电阻值 R_a 与 R_b 之差。

本文只考虑通常情况下起主导作用的热噪声, 其噪声电压为:

$$V_N = \sqrt{4kTR' \Delta f}. \quad (10)$$

式中, $R' = (R_0 + R_a) // (R_0 + R_b)$, k 为玻尔兹曼常数, Δf 为放大器带宽。

器件的响应率由下式定义:

$$\mathcal{R} = |V_s| / (AI_0) \quad (11)$$

器件的噪声等效功率则为:

$$NEP = V_N / \mathcal{R} \quad (12)$$

三、电子计算机数值计算结果

本文采用隐式计算方法。首先将元件所处的空间和所考虑的时间分成许多网格和步长,然后用差分方程代替偏微分方程,并利用初始条件和边界条件将差分方程化为三对角线方程组,由此就可计算出稳定后主元件和补元件的温度分布并进而计算器件的性能参数。计算中应用的偏微分方程和边界条件已在上节物理模型部分给出。计算中所用的参数值如下:

热敏层材料(Mn、Ni、Co氧化物)参数: $\mu_1 = 4.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $C_{p_1} = 0.75 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$, $K_1 = 5 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot (\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K})^{-1}$, $\lambda_1 = 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $n_1 = 3$, $\rho_0 = 280 \Omega \cdot \text{cm}$, $\beta = 3600$ 。

胶合层材料参数: $\mu_2 = 2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $C_{p_2} = 0.75 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$, $K_2 = 8.5 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot (\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K})^{-1}$, $\lambda_2 = 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $n_2 = 2.5$ 。

衬底材料参数: $\mu_3 = 2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $C_{p_3} = 0.78 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$, $K_3 = 0.107 \text{ J} \cdot (\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K})^{-1}$, $\lambda_3 = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $n_3 = 1.7$ 。

工艺参数和工作条件: $d_2 = 1 \mu\text{m}$, $R_0 = 10^5 \Omega$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ 。 a , l , d_1 , d_3 , f 均为变动量。

我们先计算热敏电阻的伏安特性,计算结果见图3。在电流 I 很小时,图线是线性的。

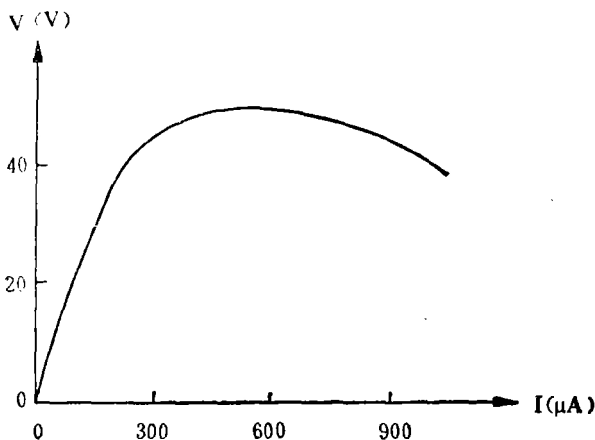


图3 热敏电阻伏安特性($d_1 = 10 \mu\text{m}$, $A = 10^{-2} \text{ cm}^2$)

电流逐渐增大时,图线发生弯曲,到某一电流值时端电压 V 达到最大值。此后电流继续增大,端电压反而下降,出现微分电阻为负值的负阻区。这些结果都是符合实际情况的,因为在电流很小时,由电流引起的焦耳热甚小,所以元件阻值变化甚微,基本上符合欧姆定律。随着电流的增大,焦耳热也增大,导致元件阻值下降,结果使伏安特性曲线偏离线性并出现负阻区。

器件的响应率和 NEP 随工作频率之变化计算结果见图4。由图可见,随着频率的增加,响应率不断下降, NEP 不断上升,在低频区变化较慢,到高频区变化加快。器件的噪声谱如图5所示。由于本文只考虑热噪声,所以噪声谱是平坦的。实际上,元件在使用时,有偏置电流,因而存在 $1/f$ 噪声,低频区的噪声应该较大。

器件的响应率和 NEP 与热敏层厚度之间的关系计算结果见图6。由图可见,随着热敏层厚度的增加,器件的响应率单调下降,但器件的 NEP 却在某一厚度出现极小值,也就是说热敏电阻具有使 NEP 取最佳值的热敏层厚度。

器件的响应率随辐照面积的变化,计算结果见图7。随着器件面积的缩小,响应率增

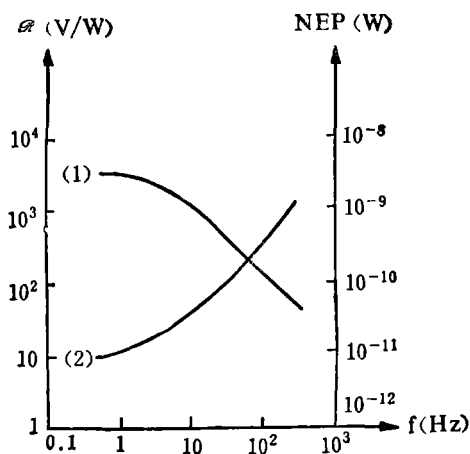


图4 (1) 响应率与工作频率关系
 $(d_1=10\mu\text{m}, d_3=10^2\mu\text{m}, A=10^{-2}\text{cm}^2)$
 (2) NEP 与工作频率关系
 $(d_1=10\mu\text{m}, d_3=10^2\mu\text{m}, A=10^{-2}\text{cm}^2)$

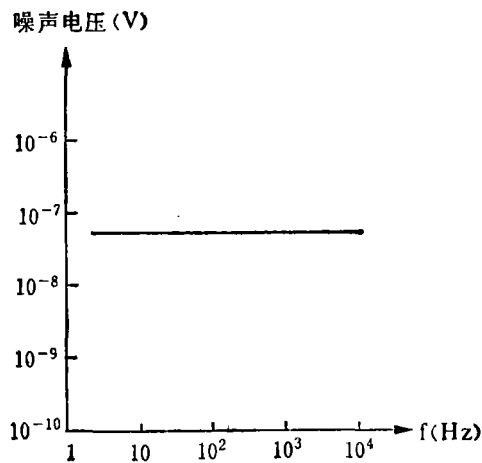


图5 噪声谱(只计热噪声)

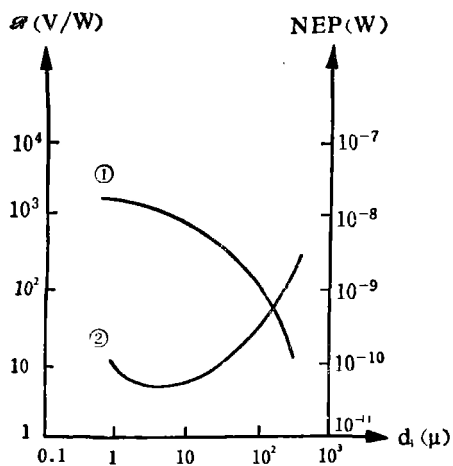


图6 (1) 响应率与器件厚度关系
 $(f=10\text{Hz}, d_3=10^2\mu\text{m}, A=10^{-2}\text{cm}^2)$
 (2) NEP 与器件厚度关系
 $(f=10\text{Hz}, d_3=10^2\mu\text{m}, A=10^{-2}\text{cm}^2)$

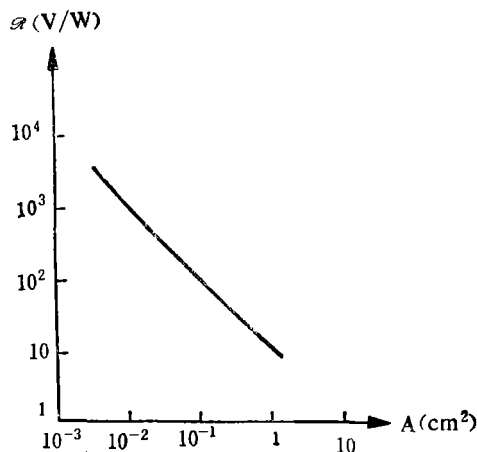


图7 响应率与辐照面积的关系
 $(f=10\text{Hz}, d_1=10\mu\text{m}, d_3=10^2\mu\text{m})$

加相当快,近似于 $S \propto A^{-1}$ 。我们这一结果与实验相符。以往的理论分析,由于忽略了许多因素,只得出器件的响应率和面积的平方根成反比的关系,与实际情况有较大偏离。

器件的响应率和 NEP 与衬底厚度之间的关系计算结果见图8。由图可见,随着衬底厚度的增加,器件的响应率下降, NEP 上升,即器件的性能变坏。

对以上所有计算结果进行综合分析,我们得出如下结论:欲提高热敏电阻性能,比较有效的途径有三个:一是在应用许可的情况下尽量减少受辐照面积;二是尽可能用薄膜衬底或悬空结构;三是采用使 NEP 取最佳值的热敏层厚度。我们这些结论的实用价值如何尚有待于实践的考验。

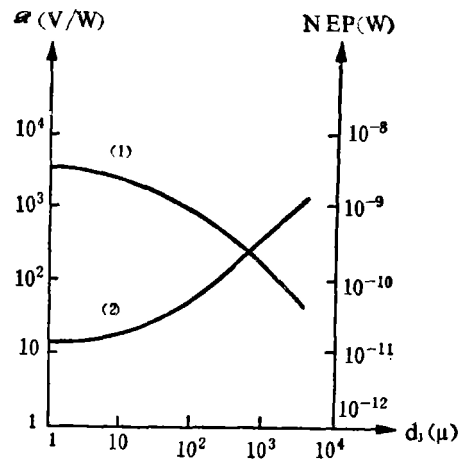


图8 (1) 响应率与衬底厚度关系($f=10\text{ Hz}$, $d_1=10\text{ }\mu\text{m}$, $A=10^{-2}\text{ cm}^2$)
 (2) NEP 与衬底厚度关系($f=10\text{ Hz}$, $d_1=10\text{ }\mu\text{m}$, $A=10^{-2}\text{ cm}^2$)

致谢——中国科学院上海技术物理研究所蒋晓华等同志曾为本文计算提供数据，作者表示衷心的感谢。

COMPUTER SIMULATION OF THERMISTORS

CHEN JISHU, XU PINGMAO

(Department of Optics, Shandong University)

ABSTRACT

A computer simulation of thermistors is carried out with a rather realistic model. The conclusion arrived at is that there are three possible ways to improve the performances of thermistors: minimizing the exposure area, decreasing the substrate thickness and employing the optimal thickness of bolometric sensitive layer.