

体吸收、边电极热电探测器的分析

徐 平 茂

(山 东 大 学)

1979 年 9 月 19 日收到

提 要

本文用一维热扩散模型推出了体吸收、悬空型、边电极热电探测器响应率的表达式,并计算了 SBN 热电探测器的响应率和 NEP 与材料的吸收系数、器件厚度、工作频率以及前置放大器输入电容之间的关系。本文认为:

1. 体吸收、悬空型、边电极热电探测器具有最佳响应率厚度和最佳 NEP 厚度。两种最佳厚度可以根据本文导出的响应率公式和已知的噪声公式计算出来。

2. 在某些波段,如果能把材料的吸收系数提高到 $5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 以上,就可以研制性能优良的体吸收薄膜器件。

一、引 言

热释电探测器可制成面电极和边电极两种结构形式。在两种形式中,极化轴的方向均应与电极面垂直。对热释电系数大而介电常数实部高的材料(如 SBN)做成边电极器件为宜,这样可以提高响应率,改进高频响应性能^[1,2]。

通常,热释电材料的吸收系数在可见和近红外波段较低,而在大于数微米的中红外波段较高,特别是在某些波长区域则更高^[2-4]。所以对于工作在可见和近红外波段的热电探测器,在其光照面上必须涂有吸收层;而对于工作在数微米以上的中红外波段则可以做成体吸收器件^[2,3]。制作体吸收器件,由于免去了吸收层,不仅消除了不良影响,而且简化了工艺过程。

以往关于体吸收、边电极器件的理论分析^[2,3],均采用表面完全吸收的假定。这种分析的结果自然是器件愈薄性能愈好。但实际上,由于材料的吸收系数有限,器件又薄,难以完全吸收辐照,所以从理论上对体吸收器件的性能和材料吸收系数之间的关系进行分析很有必要。

二、响应率方程

近几年来,在热电探测器的研制中,为了消除底板对器件性能的不良影响,多采用悬空结构。因此本文只讨论体吸收、悬空型、边电极器件,而对于带有底板的体吸收、边电极器件可参照本文做类似的分析。

热电探测器的结构和坐标的选取如图 1 所示。图 1 中, A 为光照面积, A_e 为电极面

积, L , l 和 d 分别为器件的长度、宽度和厚度。

现用一维热扩散模型推导均匀辐照下器件的温度变化规律, 并进而导出响应率 $\mathcal{R}$ 的表达式。设调制入射功率为

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

式中 $\omega = 2\pi f$ 为调制圆频率, f 为调制频率, W_0 为平均辐照功率。

在稳定情况下, 器件温度变化的交变部分的形式应为

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

图 1

$\Delta T(x)$ 满足以下方程和边条件:

$$\frac{d^2 \Delta T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega c_p \mu}{k} \Delta T(x) = -\frac{(1-r)\alpha W_0}{Ak} e^{-\alpha(d-x)}. \quad (3)$$

$$x = 0, \quad Ak \frac{d\Delta T(x)}{dx} = G'_r \Delta T(x), \quad G'_r = 4\beta\sigma T_0^3 A;$$

$$x = d, \quad -Ak \frac{d\Delta T(x)}{dx} = G_r \Delta T(x), \quad G_r = 4\beta\sigma T_d^3 A; \quad (4)$$

$$\beta = 1 - r - \tau_d, \quad (5)$$

式中 α 为材料的吸收系数, r 为光照面的反射率, c_p , μ 和 k 分别为材料的比热、密度和热导率, G_r 和 G'_r 分别为上下表面的辐射热导, T_d 和 T_0 分别为上下表面的温度, σ 为斯忒藩常数, β 为发射率, τ_d 是热电材料厚度为 d 时的透过率^[5]。略去体内反射, 可取 $\tau_d \cong (1-r)e^{-\alpha d}$, 则 $\beta \cong (1-r)(1-e^{-\alpha d})$ 。

方程 (3) 的通解为

$$\Delta T(x) = D e^{\nu x} + B e^{-\nu x} + F e^{-\alpha(d-x)},$$

$$\nu = (1+j) \frac{1}{\delta},$$

$$\delta = \left(\frac{2k}{\omega c_p \mu} \right)^{1/2},$$

$$F = -\frac{(1-r)\alpha W_0}{A(k\alpha^2 - j\omega c_p \mu)}, \quad (6)$$

式中复常数 D 和 B 由边条件 (4) 式确定, 为

$$D = \frac{F[(Ak\alpha - G'_r)(Ak\nu - G_r)e^{-(\nu+\alpha)d} - (Ak\nu + G'_r)(Ak\alpha + G_r)]}{e^{\nu d}(Ak\nu + G_r)(Ak\nu + G'_r) - e^{-\nu d}(Ak\nu - G_r)(Ak\nu - G'_r)}, \quad (7)$$

$$B = \frac{F[(Ak\alpha - G'_r)(Ak\nu + G_r)e^{(\nu-\alpha)d} - (Ak\nu - G'_r)(Ak\alpha + G_r)]}{e^{\nu d}(Ak\nu + G_r)(Ak\nu + G'_r) - e^{-\nu d}(Ak\nu - G_r)(Ak\nu - G'_r)}. \quad (8)$$

前置放大器(以下简称为前放)输入端的交流讯号电压为^[6]

$$v = e^{-t/RC} \int_0^t e^{t/RC} \frac{A_c \lambda}{C} \frac{d\overline{\Delta T}(t)}{dt} dt, \quad (9)$$

式中 R , C 分别是热电材料和前放的并联电阻和电容, λ 为热释电系数。

$$\overline{\Delta T}(t) = \frac{1}{d} \int_0^d \Delta T(x, t) dx. \quad (10)$$

由(2), (6), (9), (10)式和响应率 $\mathcal{R}$ 的定义可得

$$\mathcal{R} = \frac{|v|}{W_0} = \frac{A_e \lambda R \omega}{W_0 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \left| \frac{1}{v d} [D(e^{v d} - 1) + B(1 - e^{-v d})] + \frac{F}{\alpha d} (1 - e^{-\alpha d}) \right|. \quad (11)$$

将 D , B 和 F 的表达式代入上式使得

$$\mathcal{R} = \frac{(1-r)\alpha A_e \lambda R \omega}{A d \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2} \sqrt{k^2 \alpha^4 + \omega^2 c_p^2 \mu^2}} \times \left| \frac{(A k \alpha - G'_r) e^{-\alpha d} \{G'_r [\cosh(v d) - 1] + A k v \sinh(v d)\} - (A k \alpha + G'_r) \{G'_r [\cosh(v d) - 1] + A k v \sinh(v d)\}}{v [A k v (G_r + G'_r) \cosh(v d) + (A^2 k^2 v^2 + G_r G'_r) \sinh(v d)]} + \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha d}) \right|. \quad (12)$$

当 $\alpha \rightarrow \infty$, $r = 0$ 时, 对甚薄器件(12)式便退化为集总参数模型响应率公式

$$\mathcal{R} = \frac{A_e \lambda R \omega}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2} \sqrt{(G_r + G'_r)^2 + \omega^2 (c_p \mu A d)^2}}. \quad (13)$$

三、性能计算

根据本文得到的响应率公式和已知的噪声公式, 代入适当的材料和前放参数, 用电子计算机计算器件的性能指标.

计算响应率 $\mathcal{R}$ 应用(12)式, 式中

$$R = R'_{dc} // R'_{ac} // R'', \quad R'_{dc} = \rho'_{dc} l / A_e$$

为热电晶体直流漏电阻, ρ'_{dc} 为漏电阻率,

$$R'_{ac} = \frac{4\pi l \times 9 \times 10^{11}}{\omega \epsilon'' A_e}$$

为热电材料介电损耗引起的交流电阻, ϵ'' 为介电常数负虚部, R'' 为前放输入电阻;

$$C = C' + C'', \quad C' = \frac{\epsilon' A_e}{4\pi l \times 9 \times 10^{11}}$$

为热电晶体电容, ϵ' 为介电常数实部, C'' 为前放的输入电容; 热电材料的吸收系数

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1-r}{\tau_d} \right),$$

τ_d 是材料厚度为 d 时的透过率, 本文取用 $1\mu\text{m}$ 厚材料的透过率, 记为 $\tau_{1\mu}$.

计算噪声谱应用的公式为

温度噪声

$$\Delta V_T = \frac{\mathcal{R} 2T}{\beta} \sqrt{k(G_r + G'_r) \Delta f}, \quad (14)$$

式中 k 为玻耳兹曼常数, Δf 为放大器带宽, T 为器件的平均温度.

晶体介电损耗引起的热噪声

$$(\Delta V_I)_\epsilon = \sqrt{\frac{4kT \Delta f C' \epsilon''}{\epsilon' \omega C^2}}. \quad (15)$$

晶体直流漏电阻引起的热噪声

$$(\Delta V_J)_{R'_{dc}} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\omega C \sqrt{R'_{dc}}} \quad (16)$$

前放输入电阻引起的热噪声

$$(\Delta V_J)_{R''} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\omega C \sqrt{R''}} \quad (17)$$

前放电流噪声

$$\Delta V_i = \frac{\Delta i_A R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (18)$$

式中 Δi_A 为前放方均根电流涨落.

总噪声电压

$$\Delta V_N = \sqrt{\Delta V_i^2 + (\Delta V_J)_s^2 + (\Delta V_J)_{R'_{dc}}^2 + (\Delta V_J)_{R''}^2 + \Delta V_i^2 + \Delta V_A^2}, \quad (19)$$

式中 ΔV_A 为前放电压噪声.

计算 NEP 应用公式

$$\text{NEP} = \frac{\Delta V_N}{\mathcal{R}} \quad (20)$$

计算中取用的参数如下:

热电材料 (SBN) 参数: $\lambda = 11 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}$, $\varepsilon' = 1800$, $\varepsilon'' = 15$, $\rho'_{dc} = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, $c_p = 0.4 \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}$, $\mu = 5.2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $k = 0.01 \text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$; 取 $r = 0$, $\tau_{1\mu} = 0.5$ (即 $\alpha = 6.93 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$) 和 $\tau_{1\mu} = 0.9$ (即 $\alpha = 1.05 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$).

前放参数: $R'' = 10^{13} \Omega$, $C'' = 0.1 \text{pf}$, $\Delta i_A = 10^{-15} \text{A}$, $\Delta V_A = 5 \times 10^{-8} \text{V}$.

工艺参数和工作条件: $A = 0.5 \times 0.2 \text{cm}^2$, d 为变动量; 环境温度 $T_b = 300 \text{K}$, f 为变动量, $\Delta f = 4 \text{Hz}$.

四、结果分析

1. 在体吸收情况下, 悬空型、边电极器件的性能并非愈薄愈好, 而是存在最佳 $\mathcal{R}$ (响应率) 厚度和最佳 NEP 厚度.

器件的最佳 $\mathcal{R}$ 厚度与材料吸收系数 α 和前放输入电容 C'' 有关, 但与工作频率 f 无关. 当 α 降低和 C'' 增加时, 最佳 $\mathcal{R}$ 厚度变厚. 最佳 NEP 厚度与 α 和 f 有关, 当 α 和 f 降低时, 最佳 NEP 厚度变厚, 当热电材料介电损耗引起的热噪声 $(\Delta V_J)_s$ 和前放电压噪声 ΔV_A 起主导作用时, C'' 对最佳 NEP 厚度也有一定影响.

器件的响应率 $\mathcal{R}$ 和厚度的关系如图 2 所示. 器件的 NEP 和厚度的关系如图 3 所示. 图 3 中同时给出了 $\tau_{1\mu} = 0.9$, $\tau_{1\mu} = 0.5$ 和 $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$ 三种情况的比较. $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$, 即材料的吸收系数 $\alpha = 1.15 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$, 接近于表面完全吸收. 由图 3 可见, 对较薄器件, 材料的吸收系数 α 大时, 性能优些, 器件愈薄, 三种情况的差别愈大, 而对较厚器件, 三种情况的差别则消失.

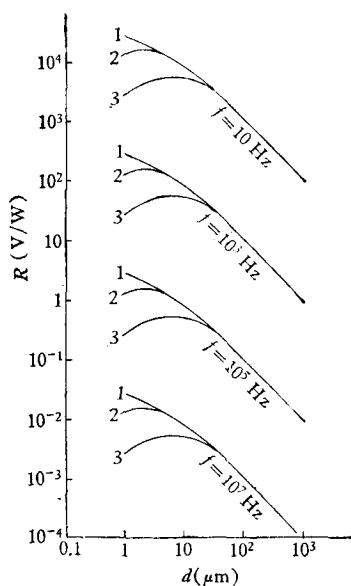


图2 响应率与器件厚度的关系

1— $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$; 2— $\tau_{1\mu} = 0.5$; 3— $\tau_{1\mu} = 0.9$

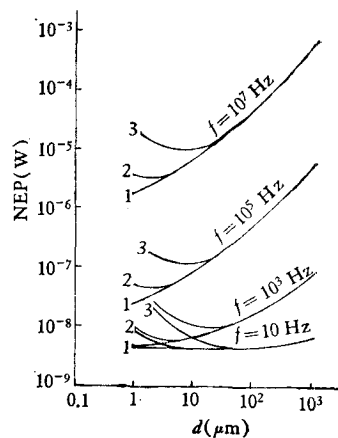
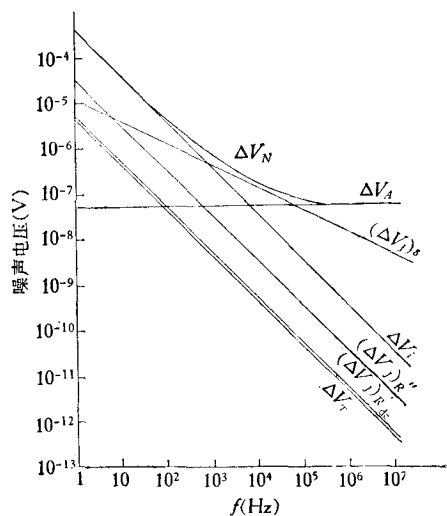
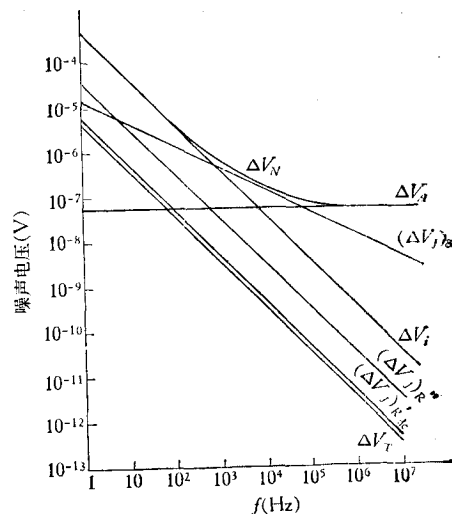


图3 NEP 与器件厚度的关系

1— $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$; 2— $\tau_{1\mu} = 0.5$; 3— $\tau_{1\mu} = 0.9$

总之, 本文认为, 在通常情况下, 非黑化的悬空型边电极器件应采用最佳工作厚度。最佳厚度可根据本文导出的响应率公式和已知的噪声公式计算出来。当热电材料的吸收系数大于 $1 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 时, 器件的最佳响应厚度小于 $2 \mu\text{m}$, 器件的最佳 NEP 厚度 ($f > 5 \text{Hz}$ 时) 小于 $10 \mu\text{m}$, 此时对于厚度为 $10 \mu\text{m}$ 以上的器件可以用表面完全吸收的假定来分析。当材料的吸收系数高达 $5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 时, 计算的器件性能与 $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$ 的情况十分接近, 所以在某些波段如果能将材料的吸收系数提高到 $5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 以上, 便可研制性能优良的体吸收薄膜器件。

图4 噪声谱 ($d = 10 \mu\text{m}$, $\tau_{1\mu} = 0.5$)图5 噪声谱 ($d = 10 \mu\text{m}$, $\tau_{1\mu} = 0.9$)

2. 体吸收、悬空型、边电极器件性能与工作频率之间的关系.

器件的噪声谱如图 4($\tau_{1\mu} = 0.5$) 和图 5($\tau_{1\mu} = 0.9$) 所示. 在本文采用的前放参数下, 低频区的主要噪声是前放的电流噪声 ΔV_i , 高频区的主要噪声是前放的电压噪声 ΔV_A , 中频区的主要噪声是热电材料介电损耗引起的热噪声 $(\Delta V_I)_\theta$.

器件的响应率 $\mathcal{R}$ 与工作频率 f 的关系如图 6 所示. 器件的 NEP 与频率的关系如图 7 所示. 图中同时给出了 $\tau_{1\mu} = 0.9$, $\tau_{1\mu} = 0.5$ 和 $\tau_{1\mu} = 10^{-5}$ 三种情况的比较. 由图可见, 器件的响应率随频率的升高直线下降; 而器件的 NEP, 在低频区与频率的关系甚小, 在中、高频区则随频率的升高增加较快.

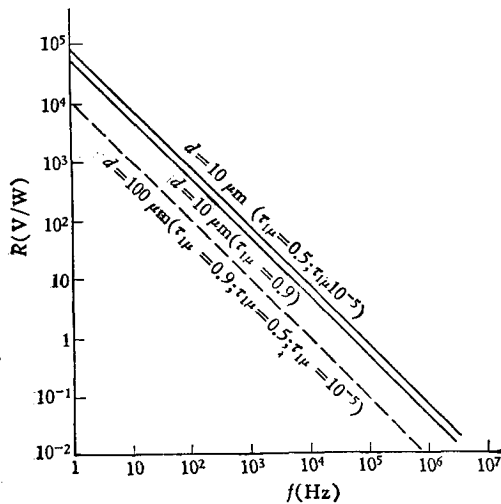


图 6 响应率与工作频率的关系

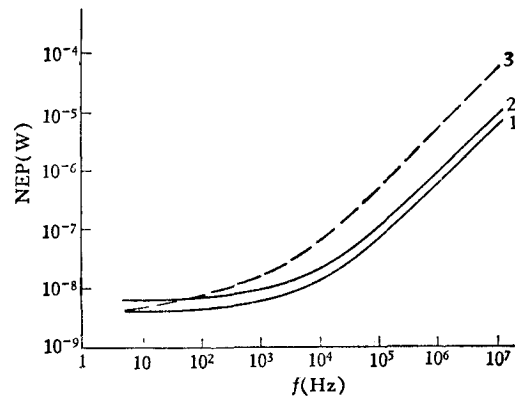


图 7 NEP 与工作频率的关系

1— $d = 10 \mu\text{m}(\tau_{1\mu} = 0.5; \tau_{1\mu} = 10^{-5})$;
2— $d = 10 \mu\text{m}(\tau_{1\mu} = 0.9)$; 3— $d = 100 \mu\text{m}(\tau_{1\mu} = 0.9, \tau_{1\mu} = 0.5, \tau_{1\mu} = 10^{-5})$

3. 体吸收、悬空型、边电极器件性能与前放输入电容之间的关系.

表 1 给出了 C'' 为 0.01 pf, 0.1 pf 和 5 pf 三种情况不同频率时器件的最佳 $\mathcal{R}$ 和最佳 NEP. 与热电晶体电容 C' 相比, 当前放输入电容 C'' 的作用不可忽略时, 降低 C'' 可以提高器件的响应率, 并能使高频 NEP 下降.

表 1 最佳 $\mathcal{R}$ (V/W) 和最佳 NEP (W) 与 C'' 的关系 ($\tau_{1\mu} = 0.5$)

$f(\text{Hz})$	5		10		10^3		10^5	
最佳性能	$\mathcal{R}$	NEP	$\mathcal{R}$	NEP	$\mathcal{R}$	NEP	$\mathcal{R}$	NEP
$C'' = 0.01 \text{ pf}$	7.57×10^4	4.24×10^{-9}	3.80×10^4	4.25×10^{-9}	3.80×10^2	5.60×10^{-9}	3.80	3.39×10^{-8}
$C'' = 0.1 \text{ pf}$	3.16×10^4	4.24×10^{-9}	1.58×10^4	4.25×10^{-9}	1.58×10^2	5.61×10^{-9}	1.58	4.36×10^{-8}
$C'' = 5 \text{ pf}$	1.42×10^3	4.24×10^{-9}	7.12×10^2	4.26×10^{-9}	7.12	9.06×10^{-9}	7.12×10^{-2}	7.04×10^{-7}

本文在整理过程中, 得到陈继述同志的热情指导和帮助; 在计算程序的验证工作中, 得到数学系刘继倩同志的帮助, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] A. M. Glass, *Appl. Phys. Lett.*, **13**(1968), 147.
- [2] A. M. Glass, *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 4699.
- [3] E. H. Putley, The Pyroelectric Detector, Vol. 5 in *Semiconductors and Semimetals* (1970), pp. 259—285.
- [4] H. P. Beerman, *Ferroelectrics*, **2**(1971), 123.
- [5] 例如: American Institute of Physics, *TEMPERATURE; Its Measurement and Control in Science and Industry*, (1941), pp. 18—19. 或 P. W. Kruse *et al.*, *Elements of Infrared Technology*, (1962), pp. 14—15.
- [6] 陈继述, *物理学报*, **23**(1974), 429.

ANALYSIS OF THE BULK-ABSORBING PYROELECTRIC
DETECTORS WITH EDGE ELECTRODES

XU PING-MAO

(Shantung University)

ABSTRACT

The pyroelectric response of the bulk-absorbing and free-bearing pyroelectric detectors with edge electrodes is deduced by using the one-dimensional diffusion theory. The pyroelectric response and NEP of the detectors are calculated as functions of detector thickness and working frequency. It is found that the detectors have optimum thickness of response and NEP. If the absorption coefficient of material can be increased beyond $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, the performance of the bulk-absorbing thin film detectors approach that of surface absorbing ones.