

厚底板上薄膜热释电 探测器性能的分析*

李世纯

(山东大学光学系)

摘要——本文比较了一维热扩散理论的简化表达式的计算结果与数值计算结果,进一步讨论了厚底板上薄膜热释电探测器的最佳化问题,指出厚底板上 $1\mu\text{m}$ 厚的最佳化热释电器件的性能与 $10\mu\text{m}$ 厚的悬空器件相近。

一、引 言

根据热释电探测器的集总模型理论^[1],热释电薄膜愈薄则器件性能愈好。在底板上用蒸发或溅射的方法可以制造厚度为 $1\mu\text{m}$ 或更薄的热释电膜,但底板热效应使厚底板上热释电薄膜的响应率降低^[2]。为了分析底板的影响,发展了热释电探测器的一维热扩散理论^[3~5]。用一维热扩散理论对几种底板进行计算机数值计算,结果表明:在厚底板上不可能做出好的热释电薄膜器件^[4]或不宜将膜做得太薄^[5]。

在参考文献[6]中,我们导出了厚底板热释电器件的简化的一维热扩散理论响应率 R 和噪声等效功率NEP表达式,讨论了器件的NEP与探测率 D^* 的最佳化问题。

在本文中,我们用简化的响应率表达式的计算结果与数值计算结果进行比较,证明了该公式的适用性并进一步讨论了厚底板上薄膜热释电器件的最佳化问题,指出如果选择合适的底板,可以在厚底板上制造最佳厚度为 $1\mu\text{m}$ 左右、性能较好的热释电膜,其NEP和 D^* 接近厚度为 $10\mu\text{m}$ 的悬空器件。

二、简化的一维热扩散理论响应率表达式

在以下条件下:

$$l_0 \gg \mu_0 \text{ 即 } e^{-\nu_0 l_0} \approx 0, \quad (1)$$

$$l \ll \mu \text{ 即 } e^{\nu l} \approx 1 + \nu l, e^{-\nu l} \approx 1 - \nu l, \quad (2)$$

本文1986年3月15日收到。修改稿1986年9月4日收到。

* 本文曾在第三届国际红外物理会议上宣读(瑞士,苏黎世)。

底板上热释电膜的响应率为^[6]

$$R = \frac{\eta \lambda l}{\omega \varepsilon \varepsilon_0 \left(H^2 + H H_0 + \frac{1}{2} H_0^2 \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

式(3)即是简化的一维热扩散理论响应率表达式。式(1)~(3)中,

$$\left. \begin{aligned} \nu &= (1+j) \frac{1}{\mu} \\ \mu &= \left(\frac{2K}{\omega S} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \nu_0 &= (1+j) \frac{1}{\mu_0} \\ \mu_0 &= \left(\frac{2K_0}{\omega S_0} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} H &= S A l \\ H_0 &= S_0 A \mu_0 \end{aligned} \right\} \circ \quad (6)$$

式(1)~(6)中 l 、 l_0 分别是热释电膜和底板的厚度; μ 、 μ_0 分别是热释电晶体和底板的热扩散长度; S 、 S_0 分别是热释电晶体和底板的体积比热; K 、 K_0 分别是热释电晶体和底板的热导率; H 、 H_0 分别是热释电晶体和厚度为 μ_0 的底板的热容量; ε 、 ε_0 分别是热释电晶体和真空介电常数; η 是器件上表面的吸收率; λ 是热释电晶体的热释电系数; A 是器件电极面积; ω 是斩光角频率。

我们用式(3)分别计算了 $1 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 厚度的 TGS 晶体在厚石英和云母底板上的 R 值(取 TGS 的 $\lambda = 2 \times 10^8 \text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$, $\varepsilon = 50$), 结果列于表 1。表 1 同时列出用严格的一维热扩散理论响应率表达式进行计算机数值计算得到的结果(前置放大器参数取为 $R'' = 10^{10} \Omega$, $C'' = 5 \text{pF}$)^[4]。

表 1 式(3)与计算机数值计算结果的比较

Table 1 The results obtained from the simple expression of responsivity compared with results predicted by numerical solution.

斩光频率 f (Hz)		1 μm TGS 晶体响应率 R (V/W)				10 μm TGS 晶体响应率 R (V/W)			
		式(3)的结果		数值计算结果		式(3)的结果		数值计算结果	
1	1	1.46×10^2	3.86×10	1.43×10^2	3.85×10	1.46×10^3	3.86×10^2	1.23×10^3	3.5×10^2
10	10	4.61×10	1.22×10	4.52×10	1.23×10	4.61×10^2	1.22×10^2	4.02×10^2	1.30×10^2
100	100	1.46×10	3.86	1.42×10	4.05	4.46×10^2	3.86 $\times 10$	1.21×10^2	5.12×10
1000	1000	4.61	1.22	4.34	1.43	4.61×10	1.22×10	3.08×10	2.72×10

由表 1 可以看出: 当 $10l \leq \mu$ 时, 用式(3)算得的 R 值与数值计算结果符合很好; 当 $l \leq \mu$ 时, 两种算法的结果出现较大差别, 但仍然保持在一个数量级之内。这表明式(3)在低频条件下、而热释电晶体又较薄(如 $l \leq 10 \mu\text{m}$)这一较大范围内是可以使用的(TGS 晶体的 μ 值参见本文表 2)。

表2 不同底板上 TGS 晶体的最佳厚度

Table 2 The optimum thickness of TGS crystal for different substrates.

底板材料	热导率 (J/cm·s·K)	体积比热 (J/cm ³ ·K)	斩光频率 (Hz)	热扩散长度 (μm)	TGS 晶体 最佳厚度 (μm)
云 母	6×10 ⁻³	2.52	1	275	300
			10	87	95
			100	27.5	30
			1000	8.7	9.5
石 英	107×10 ⁻³	2.03	1	1290	1132
			10	410	360
			100	129	113
			1000	41	36
氟-3 塑料	6×10 ⁻⁴	1.67	1	104	75.1
			10	33	23.8
			100	10.4	7.51
			1000	3.3	2.38
泡沫塑料	3×10 ⁻⁵	1.43	1	25	15.3
			10	8.2	5.0
			100	2.5	1.5
			1000	0.82	0.5
TGS	6.8×10 ⁻³	1.64	1	356	
			10	114	
			100	35.6	
			1000	11.4	

三、热释电器件的最佳厚度与最佳 NEP

假设在我们所讨论的频率范围内，始终是热释电晶体的介电损耗引起的热噪声占优势^[6]，噪声电压可表达为

$$(\Delta V_J)_s = \left(\frac{4kTl \tan \delta}{\omega \epsilon \epsilon_0 A} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $\tan \delta$ 是热释电晶体的介电损耗因子， k 为波尔兹曼常数。由式(7)可得厚底板上热释电薄膜探测器的 NEP:

$$NEP = \frac{1}{R} \left(\frac{4kTL \tan \delta}{\omega \epsilon \epsilon_0 A} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

将式(3)代入式(8)，得

$$NEP = \frac{1}{\lambda \eta} \left[4kT \omega \epsilon \epsilon_0 A \tan \delta \left(S^2 l + S S_0 \mu_0 + \frac{S_0^2 \mu_0^2}{2l} \right) \right]^{1/2}. \quad (9)$$

再将 NEP 对热释电晶体厚度 l 求微商，并使该微商为零，即 $\frac{dNEP}{dl} = 0$ ，便可求出热释电晶体的最佳厚度(使器件的 NEP 最小)为

$$l_{opt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{S_0}{S} \mu_0 = \frac{1}{S} \left(\frac{K_0 S_0}{\omega} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得器件的最佳化 NEP :

$$(NEP)_{opt} = \frac{S}{\lambda\eta} (2 + \sqrt{2}) (4kTl_{opt}\omega A\epsilon\epsilon_0 \tan \delta)^{1/2}. \quad (11)$$

最佳化 D^* 为

$$D_{opt}^* = \frac{\lambda\eta}{(2 + \sqrt{2})S} (4kTl_{opt}\omega\epsilon\epsilon_0 \tan \delta)^{-1/2}. \quad (12)$$

而对悬空热释电器件,

$$NEP = \frac{S}{\lambda\eta} (4kTl\omega A\epsilon\epsilon_0 \tan \delta)^{1/2}. \quad (13)$$

比较式(13)与式(11),可以看出厚底板上的热释电薄膜器件在最佳化条件下比同样厚度的悬空热释电器件的 NEP 大 $(2 + \sqrt{2})$ 倍。

表 2 列出 TGS 热释电晶体在不同的底板材料和不同频率下的最佳厚度。由表 2 看出,在石英和云母底板上,一直到 1000 Hz 斩光频率均不宜制作小于 $9\mu\text{m}$ 的热释电膜,换言之,在这两种厚底板上不可能做出好的热释电探测器,这与文献[4]的结论相同。

采用氟-3 塑料底板,在 1000 Hz 斩光频率下,可将热释电膜减薄到 $2\mu\text{m}$; 采用泡沫塑料底板,在 1000 Hz 斩光频率下可将热释电膜减薄到 $0.5\mu\text{m}$,在 100 Hz 斩光频率下可将热释电膜减薄到 $1.5\mu\text{m}$ 。后者的 NEP 接近厚度为 $10\mu\text{m}$ 的悬空热释电器件。这是迄今为止所报道的对厚底板上热释电探测器性能的最好的估计。

参 考 文 献

- [1] Putley E. H., *Semiconductor and Semimetals.*, Vol. 5, 1970, 259~285.
- [2] Roundy C. B. and Byer B. L., *Ferroelectrics*, 10(1976), 215.
- [3] Holeman B. R., *Infrared Physics*, 12(1972), 125.
- [4] 陈继述, 物理学报, 23(1974), 429.
- [5] Van der Ziel, A., *J. Appl Phys.*, 44(1973), 546.
- [6] Li S. C., *Ferroelectrics*, 46(1983), 209.

ANALYSIS OF PERFORMANCES OF PYROELECTRIC DETECTOR ATTACHED ON THICK SUBSTRATE

LI SHICHUN

(Department of Optics, Shandong University)

ABSTRACT

The results obtained from a simple analytic expression of the one dimensional heat conduction theory are compared with the results predicted by the numerical solution. The optimum of the pyroelectric film detector on a thick substrate is discussed. It is pointed out that the NEP of the optimized thick substrate-attached pyroelectric detector with $1\mu\text{m}$ thickness is close to NEP of a suspended pyroelectric detector with $10\mu\text{m}$ thickness.