

红外探测器芯片中的电功率分布

许 生 龙

(昆明物理研究所)

摘要——本文研究红外探测器工作时电功率(焦耳热)在芯片中的分布情况。指出在电极与光敏面交接处电功率发生跃变。最后提出“功率电阻”概念。

一、引 言

在文献[1]中,我们讨论了一种结构的红外探测器芯片的电学特征,并求得电势 $\phi(x, y, z)$ 的分布函数为

$$\phi(x, y, z) = \frac{2V_0}{ac} \sum_{k=0}^{\infty} C_k \sin \alpha_k x \cdot \operatorname{ch} \alpha_k (h-z), \quad (1)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{a}, \\ C_k &= \frac{\sin \alpha_k c}{\alpha_k^2 \operatorname{ch} \alpha_k h}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由此求得电场强度 E 、电流密度 j 、总电流 I 和电阻 R 等一系列电学参数,其中

$$R = \frac{ac}{2\sigma b \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \alpha_k c}{\alpha_k^2} \tan h(\alpha_k h)}. \quad (3)$$

本文继续文献[1]的工作,主要研究电功率 W (焦耳热)在芯片中的分布,并针对 R 提出“功率电阻” R_1 。

二、电功率的分布情况

参看图 1,在芯片内部任选一个长方体积元 $dx dy dz$ 。考查垂直穿越面元 A 的电流密度 j_x 在经历 dx 距离到达面元 B 时所消耗的电功率 dW_x ,则可求得单位体积中的电功率 w

$$\begin{aligned} w &= \frac{dW}{dx dy dz} = \frac{1}{\sigma} [j_x^2 + j_y^2 + j_z^2] = \sigma [E_x^2 + E_y^2 + E_z^2] \\ &= \sigma \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2 \right] \\ &= \frac{2\sigma V_0^2}{a^2 c^2} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_k \alpha_m C_k C_m \{ \cos(\alpha_k - \alpha_m) x \cdot \operatorname{ch}(\alpha_k + \alpha_m)(h-z) + \\ &\quad + \cos(\alpha_k + \alpha_m) x \cdot \operatorname{ch}(\alpha_k - \alpha_m)(h-z) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

由此可见,使 $|E|$ 保持不变的曲面,同样也使得 w 保持不变(参看图 2),并且, w 的最大值在

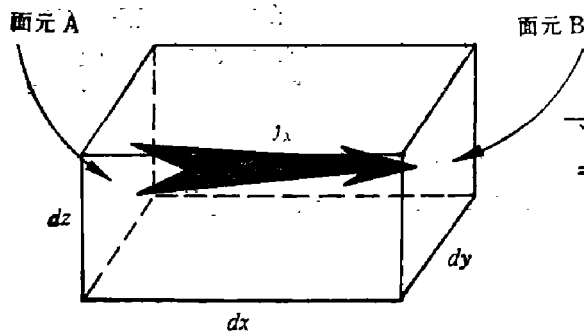


图1 长方体元

Fig. 1 The volume element of rectangle

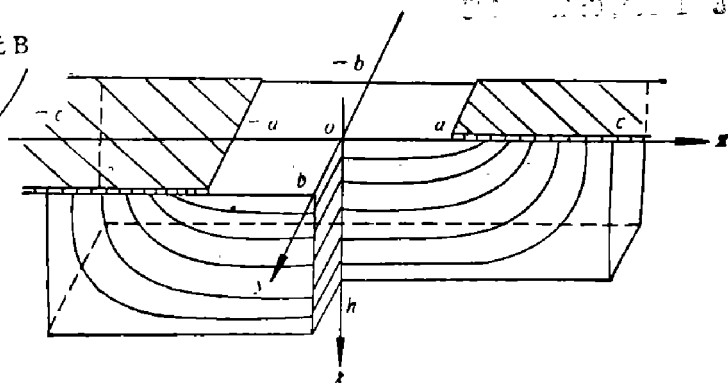


图2 芯片中的等功率曲面

Fig. 2 Isopower curved surfaces in the core piece

$w = z = 0$ 处。

若分别令式(4)中的 $x = \pm a, z = h$ 及 $z = 0$, 就可得知 w 沿芯片表面变化情况。除了两条特殊棱 ($x = \pm a, z = h$) 之外, w 均不等于零。这就意味着有电流沿芯片表面流动。特别值得注意的是上表面 ($z = 0$) 的情况, 由于

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{z=0} = \begin{cases} 0 & (|x| \geq c), \\ \frac{V_0}{c} & (|x| \leq c), \end{cases} \quad (5)$$

因此, 在电极与光敏面相连接的地方 ($x = \pm c$), 电场强度的 x 分量 E_x 是不连续的。其跃变幅度为

$$\delta E_x = \frac{V_0}{c}. \quad (6)$$

于是, 在 $x = \pm c$ 处, w 也同样要发生跃变, 其跃变幅度为

$$\delta w = -\frac{\sigma}{\epsilon^2} V_0^2. \quad (7)$$

如果改用温度 T 来描述, 则可得到芯片内部温度变化率的公式:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{w}{\rho C_v}, \quad (8)$$

式中 C_v 为比热, ρ 为质量密度。由于 $\frac{dT}{dt}$ 是位置函数, 因此在芯片内部必然有热流存在 (我们将另文论述芯片内部温度分布及热流)。

三、功率电阻

芯片中需要制冷的总功率

$$W = \int_{-a}^a dx \int_{-b}^b dy \int_0^h w dz = \frac{2\sigma b (2V_0)^2}{ac^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha_k c}{\alpha_k^3} \tan h(\alpha_k h). \quad (9)$$

由于总功率 W 与电位差 $2V_0$ 的平方成正比, 又可以得到电阻的另一种表达式:

$$R_1 = \frac{(2V_0)^2}{W} = \frac{ac^2}{2\sigma b \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha_k c}{\alpha_k^3} \tan h(\alpha_k h)}. \quad (10)$$

对比式(3)和式(10), 不难看出 R 值与 R_1 值并不相同。也就是说, 在这种供电方式 (参见文献[1]中图1) 下, 由电压-电流关系得到的电阻 R 与由电压-电功率关系所得到的电阻 R_1 并不一致。这种现象体现了芯片中电场的复杂性, 出现了两个物理性质相同、而数值不

等的参数 R 和 R_1 。为了与由欧姆定律得到的电阻 R 相区别, 我们将 R_1 定义为“功率电阻”。为了说明 R 和 R_1 的差异, 定义 R 与 R_1 之比为

$$k = \frac{R_1}{R} = \frac{c \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \alpha_k c}{\alpha_k^2} \tan h(\alpha_k h)}{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha_k c}{\alpha_k^3} \tan h(\alpha_k h)} \quad (11)$$

我们用计算机算得 k 值结果见表 1。

表 1 各种情况下的 k 值
Table 1 k values under different conditions

c/a	h/a			
	0.01	0.5	0.10	0.50
k				
0.001	1.049	1.033	1.029	1.022
0.005	1.101	1.058	1.048	1.034
0.01	1.127	1.073	1.059	1.040
0.05	1.058	1.123	1.100	1.058
0.1	1.028	1.116	1.123	1.012
0.5	1.005	1.028	1.057	1.129

然后对式(8)平均, 得:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{\text{平均}} = \frac{W}{MC_V} = \frac{\sigma}{2\rho C_V} (2V_0)^2 \frac{1}{a^2 c^2 h} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha_k c}{\alpha_k^3} \tan h(\alpha_k h) \quad (12)$$

式(11)表明芯片中温度变化率的平均值 $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{\text{平均}}$ 与电位差 $2V_0$ 的平方成正比。此外, 材料因素 $\frac{\sigma}{2\rho C_V}$ 与芯片的几何形状因子 $\frac{1}{a^2 c^2 h} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha_k c}{\alpha_k^3} \tanh(\alpha_k h)$ 对 $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{\text{平均}}$ 也有影响。当然, 只需适当选择 a, b, c, h 就可以减小 W 。

致谢——作者对杨亚文、冯文清、柳圭如和张庭贵同志的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 许生龙、冯文清, 红外研究, 5(1986), 1: 69.
- [2] 舒泽、刘丽岩、许生龙, 红外与激光技术, (1985), 2: 15.

DISTRIBUTION OF ELECTRIC POWER IN THE CORE PIECE OF INFRARED DETECTOR

Xu Shenglong

(Kunming Institute of Physics)

ABSTRACT

The distribution of electric power (Joule heat) in the core piece of infrared detector is studied. It is shown that the electric power changes suddenly at the boundary between the electrode and the photo-sensitive area. A new concept called power resistance is put forward.