

热释电摄像管的调制特性

罗正发 朱春才 李家璘

(昆明物理研究所)

摘要——本文说明热释电摄像管的调制特性及性能参数,并把描述单元靶面的热释电摄像管的一些公式尽量规一。通过选取各种参数所作的计算,为设计与讨论热释电摄像管的性能提供了方便。

用热释电材料代替视象管中的光电导靶而制成的热释电摄像管,可用于红外电视。目标的热辐射照到热释电靶面上使之温度发生改变,从而引起靶材料的自发极化强度的改变,于是在靶面上产生出电荷分布图案。热释电靶将空间变化的热图象转换成电荷图案,经电子束扫描而变成随时间变化的电信号。

自从 A. Hadni 等人在 1965 年提出上述建议以来,已有许多作者^[1-5]对热释电摄像管的性能进行了描述,并在实践中不断研究了影响其性能的诸因素^[6-9],目前的水平已达到在低空间分辨率的情况下,最小可分辨温差至少已接近 0.1°C 。这些研究者从不同的角度出发,针对不同调制方式、不同靶面结构的热释电摄像管,推证出一些不同的表达式来描述影响热释电摄像管的各种因素。本文对单元靶面的热释电摄像管在平移与正弦调制情况下的调制传递函数作了描述,并引进一些具体参数,作了计算。所得结果比较规一,且能反映出影响热释电摄像管性能的主要因素,计算的结果对设计与讨论热释电摄像管的性能有一定方便之处。

一、理想结果

目标的热辐射分布经过调制而成象在靶面上,如果靶面的温度变化是均匀的,且只通过表面的热辐射与环境发生热交换,不考虑靶面横向热扩散的影响,并认为读取效率为 100%,这时可用描述热释电效应的集总参数模型^[10]求得靶温度的变化 ΔT 。如果靶的辐照面的电位保持恒定,而扫描面的电位发生波动,有 $\Delta V = \Delta Q/C_T$, C_T 为靶电容,而靶面的电荷分布 ΔQ 为

$$\Delta Q = A_T \Delta P_s = A_T \mathcal{P} \Delta T, \quad (1)$$

这是无电场变化与应力变化时的结果。式中 A_T 为靶面积, ΔP_s 为自发极化强度的增量, $\mathcal{P} = \partial P_s / \partial T$ 为热释电系数。

由集总参数模型,并假定在平移调制的情况下,可求得靶的温差 ΔT ,由此得到信号电流

$$\Delta I_{s0} = \frac{\eta \mathcal{P} W A_T}{\mu c_P l} \exp[-j\nu(x-vt)], \quad (2)$$

式中 η 为靶面的吸收系数, W 为辐照度, μ 为靶材料的密度, c_P 为定压比热, l 为靶厚度, $\nu = 2\pi n$ 为空间频率, v 为平移速度。

由式(2)可得,在一帧的时间 τ_f 内因目标的热辐射而使靶放电的电流为

$$i_{s0} = \eta \mathcal{P} W A_T / \mu c_P l, \quad (3)$$

由此可得最大电流响应率的表示式为

$$\mathcal{R}_{i0} = \eta \mathcal{P} / \mu c_P l, \quad [\text{A/W}] \quad (4)$$

或

$$\mathcal{R}_{i0} = 4\sigma \varepsilon_s T_0^3 H \eta \mathcal{P} A_T / \mu c_P l, \quad [\text{A}/^\circ\text{C}] \quad (5)$$

其中 $H = \tau / 4F^2$, τ 为大气与光学系统的平均透过率, F 为光学系统的 F 数, σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, ε_s 为目标的平均发射率, T_0 为环境温度。由这些参数可以将目标的温差 ΔT 所引起的辐照度 W 写成

$$W = 4 H \sigma \varepsilon_s T_0^3 \Delta T_s. \quad [\text{W}/\text{cm}^2] \quad (6)$$

上述结果同热释电探测器用集总模型所得到的结果完全一样,这是在极理想的情况下得到的。用此来描述热释电摄像管的性能是不可能反映出真实情况的。

二、热释电摄像管的调制特性

热释电摄像管的性能实际上要受到靶面热扩散与电子束放电滞后的影响,其影响的程度可用调制传递函数来表示。目标每个象元的信息可表示成一系列正弦波的迭加,若目标的辐射度为 $W_0 (= 4\sigma \varepsilon_s T_0^3 \Delta T_s)$,它在空间以速率 v 传播,如果取 x 方向的一个分量为 $W_0 e^{-j\nu x}$,经过光学系统与时间调制后(假定为平移调制),在靶面与之相应的方向所得到的辐照度就是 $W e^{-j\nu(x-vt)}$,因此靶面的热传播就可用靶对目标图象每个分量的热调制传递函数来表示。

靶悬于真空系统中,假定在横向(即 x 方向)是无限大的,虽然靶的横向尺寸远比热扩散长度大得多,但靶面每个象元的尺寸至少可与热扩散长度相比,因此必须考虑靶面的横向热扩散对性能的衰减,而认为厚度方向(即 z 方向)的温度变化是均匀的,若假定靶表面的辐射热导是主要的,而忽略边界处的热导损失,这时可将热传导方程化为二维方程来求解,并对厚度方向的温度变化求平均。

二维热传导方程为

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

其中 $D = \kappa / \mu c_P$ 为热扩散系数, κ 为热导率。靶面温升 $\Delta T = T(x, z, t) - T_0(x, z, t)$ 。由下述边界条件可以求得该方程的解:

$$\begin{aligned} \kappa \frac{\partial \Delta T}{\partial z} &= \eta W e^{-j\nu(x-vt)} - g_r \Delta T, \quad (\text{辐照面}) \\ \kappa \frac{\partial \Delta T}{\partial z} &= g_r' \Delta T, \quad (\text{扫描面}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 g_r, g'_r 分别为靶的前后表面的辐射热导。

将该方程的解对厚度方向求平均, 就可以得到^[2]

$$T_m(x, t) = \frac{\eta \mathcal{P}}{\mu c_p l} \frac{1}{\nu v} (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\{-j[\nu(x - vt) + \phi_p]\}, \quad (9)$$

其中 $\alpha_p = D\nu/v$ 为热扩散因子, $\phi_p = ctg^{-1} \alpha_p$ 为热滞后相移。

电子束每隔一帧所读取的有效电荷与在相邻两帧之间靶面的平均温差 $\Delta T_m = T_m(t) - T_m(t - \tau_f)$ 有关, 现假定读取效率仍为 100%, 则在相邻两帧之间所读取的电荷 $\Delta Q = A_T \mathcal{P} \Delta T_m$ 与形成的电流 $\Delta I = A_T \mathcal{P} \Delta T_m / \tau_f$ 就可由式(9)得到:

$$\Delta Q = i_{s0} \tau_f (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu v \tau_f / 2}{\nu v \tau_f / 2} \exp\left\{-j\left[\nu\left(x - vt + \frac{v \tau_f}{2}\right) + \phi_p - \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \quad (10)$$

$$\Delta I = i_{s0} (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu v \tau_f / 2}{\nu v \tau_f / 2} \exp\left\{-j\left[\nu\left(x - vt + \frac{v \tau_f}{2}\right) + \phi_p - \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \quad (11)$$

取模数可分别得到它们的峰-峰值。

由式(11)就可求得平移调制情况下的热调制传递函数:

$$MTF_T = \left[1 + \left(\frac{2\pi n D}{v}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \pi n v \tau_f}{\pi n v \tau_f}, \quad (12)$$

它表示热扩散对性能的衰减。

为了求得实际上所能得到的视频信号电流, 就必须考虑电子束放电滞后的影响。设滞后参数为 β , 有

$$\beta = \exp(-\tau_f / \tau_L), \quad (13)$$

式中 $\tau_L = R_b C_T$ 为电子束放电滞后的时间, R_b 为电子束阻抗。 β 代表相邻两帧之间信号衰减的大小。

由式(10)可以得到第 M 和 $M+1$ 帧间所积累的电荷:

$$\Delta Q_M = i_{s0} \tau_f (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu v \tau_f / 2}{\nu v \tau_f / 2} \exp\left\{-j\left[\nu\left(x - v M \tau_f + \frac{v \tau_f}{2}\right) + \phi_p - \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \quad (14)$$

在第 $N+1$ 帧所读取的有效电荷 ΔQ_s 为前一帧所产生的电荷加上以前各帧的剩余电荷^[4], 即

$$\Delta Q_s = (1 - \beta) \sum_{M=1}^N \Delta Q_M \beta^{N-M}. \quad (15)$$

将式(14)代入式(15)得到

$$\begin{aligned} \Delta Q_s = & i_{s0} \tau_f (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu v \tau_f / 2}{\nu v \tau_f / 2} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos \nu v \tau_f)^{\frac{1}{2}}} \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\nu\left(x - N v \tau_f + \frac{v \tau_f}{2}\right) + \phi_p + \theta_p - \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $\theta_p = tg^{-1} \frac{\beta \sin \nu v \tau_f}{1 - \beta \cos \nu v \tau_f}$ 为电子束放电滞后的相移。

由式(16)得视频信号电流为

$$\begin{aligned} \Delta I_s = & i_{s0} (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu v \tau_f / 2}{\nu v \tau_f / 2} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos \nu v \tau_f)^{\frac{1}{2}}} \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\nu\left(x - N v \tau_f + \frac{v \tau_f}{2}\right) + \phi_p + \theta_p - \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可求得电荷与电流的峰值振幅, 其电流的峰值振幅是

$$i_s = i_{s0} (1 + \alpha_p^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \nu \nu \tau_f / 2}{\nu \nu \tau_f / 2} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos \nu \nu \tau_f)^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

根据式(17)就可得到热释电摄像管在受到热扩散与电子束放电滞后影响时的调制传递函数:

$$MTF = \left[1 + \left(\frac{2\pi n D}{\nu} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \pi n \nu \tau_f}{\pi n \nu \tau_f} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi n \nu \tau_f)^{\frac{1}{2}}}, \quad (19)$$

式中最后一项与滞后参数 β 有关, 且随空间频率 n 而变化, 称为滞后调制函数 MTF_L ,

$$MTF_L = \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi n \nu \tau_f)^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

对于正弦调制, 可经过完全相同的讨论而求得相应的调制传递函数。实际上, 只要作一代换 $\nu \nu \rightarrow \omega$ ($\omega = 2\pi f$ 为正弦调制时的频率), 就可将平移调制的结果变成正弦调制的结果。由式(18)、(19)及(20)可得, 正弦调制时的视频信号电流的峰值振幅、热调制传递函数及滞后调制传递函数分别为

$$i_s = \frac{i_{s0}}{2} (1 + \alpha_c^2)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \omega \tau_f / 2}{\omega \tau_f / 2} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos \omega \tau_f)^{\frac{1}{2}}}, \quad (21)$$

$$MTF_T = \left[1 + \left(\frac{2\pi n^2 D}{f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \pi f \tau_f}{\pi f \tau_f}, \quad (22)$$

$$MTF_L = \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi f \tau_f)^{\frac{1}{2}}}, \quad (23)$$

其中 $\alpha_c = D\nu^2/\omega$ 为正弦调制时的热扩散因子。式(22)、(23)正是参考文献[5]中得到的结果, 但这些调制传递函数中出现了与空间频率 n 无关的独立项, 所以只能形式上如此定义, 并借助于讨论这些参数对热释电摄像管性能的影响。若按照调制传递函数的定义, 所求得的正弦调制时的调制传递函数就是

$$MTF = \left[1 + \left(\frac{2\pi n^2 D}{f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

即为参考文献[11, 12]中出现的结果。为了避免这种混淆的情况, 我们采用信号传递函数的概念: 测试图案经时间调制后所得到的视频信号电流的峰值振幅与同一图案在理想情况下所得到的最大电流振幅之比。由式(3)、(18)与(21)可分别求得, 平移调制与正弦调制时的信号传递函数是

$$STF = \left[1 + \left(\frac{2\pi n D}{\nu} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \pi n \nu \tau_f}{\pi n \nu \tau_f} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi n \nu \tau_f)^{\frac{1}{2}}}, \quad (25)$$

$$STF = \left[1 + \left(\frac{2\pi n^2 D}{f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\sin \pi f \tau_f}{\pi f \tau_f} \frac{1 - \beta}{(1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi f \tau_f)^{\frac{1}{2}}}. \quad (26)$$

信号传递函数可以把热扩散与电子束放电滞后对视频信号电流的影响统一起来。从上述两式可以看出, 不同调制方式, 热扩散对信号电流的影响是不同的。

由式(18)及(25)就得到视频信号电流用信号传递函数表示的关系式:

$$i_s = i_{s0} STF(n, D, \nu, \beta). \quad (27)$$

三、热释电摄像管的响应率、噪声与信噪比

根据式(3)、(6)及(27),可以得到热释电摄像管在平移调制时的电流响应率的表达式

$$\mathcal{R}_i = \frac{\eta \mathcal{P}}{\mu c_p l} STF(n, D, v, \beta), \quad (28)$$

或

$$\mathcal{R}_i = 4H\sigma\epsilon_s T_0^3 \frac{\eta \mathcal{P} A_T}{\mu c_p l} STF(n, D, v, \beta). \quad (29)$$

由上述结果知,当信号传递函数为1时就得到理想情况下的结果。

热释电摄像管的噪声主要包括摄像管本身的噪声以及信号处理部分所产生的噪声,前者包括靶的温度噪声、散粒噪声与介质损耗噪声等。

由于热释电靶与环境之间的热交换涨落而引起的温度噪声为

$$i_{nt}^2 = \left(\frac{\mathcal{R}_i}{\eta} \right)^2 (4kT^2 G) \Delta f_v, \quad (30)$$

其中 \mathcal{R}_i 为热释电摄像管的电流响应率, $G \doteq G_r$ 为靶表面的辐射热导, Δf_v 为视频放大器的带宽, k 为波尔兹曼常数。

由于本底电流的起伏而形成的散粒噪声可表示为

$$i_{np}^2 = 2eI_P \Delta f_v, \quad (31)$$

其中 e 为电子电荷量, I_P 为气体离化而产生的本底电流。因介质极化弛豫现象而引起的介质损耗噪声,按照参考文献[13]的讨论可写成

$$i_{no}^2 = \frac{8kT}{R_T} \Delta f_v, \quad (32)$$

其中 R_T 为介质损耗的噪声等效电阻。

讨论靶噪声时未考虑电子束放电滞后效应对噪声的影响。计算表明,靶的主要噪声为散粒噪声及介质损耗噪声。

信号处理部分的噪声包括输入负载电阻的热噪声、预放大器前级晶体管的电流噪声、电压噪声以及栅电容的介质损耗而引起的噪声^[13]等。

输入负载电阻 R_L 产生的热噪声为

$$i_{nj}^2 = \frac{4kT_0}{R_L} \Delta f_v, \quad (33)$$

式中 T_0 为环境温度,与靶温度 T 有差别。

场效应管的介质损耗噪声与式(32)有相同的形式。

前级晶体管的等效电流噪声和等效电压噪声折合到输入端所得到的总噪声为

$$i_{na}^2 = \left[2eI_q + 4kT_0 R_n \left(\frac{1}{R_L^2} + \frac{4}{3} \pi C_L^2 \Delta f_v^2 \right) \right] \Delta f_v, \quad (34)$$

式中 I_q 为场效应晶体管的栅漏电流, $R_n = e_{no}^2 / 4kT_0$ 为噪声等效电阻, e_{no} 为场效应管的等效电压噪声, C_L 为输入电路的电容。对热释电摄像管,等效电流噪声很小,且 $R_n \ll R_L$,所以预放大器的噪声主要是等效电压噪声。

根据以上结果,得到热释电摄像管的主要噪声源是

$$i_n = \left(2e I_a + \frac{8kT}{R_T} + \frac{4kT_0}{R_L} + \frac{16}{3} \pi^2 kT_0 R_n C_L^2 \Delta f_v^2 \right)^{1/2} \Delta f_v^{1/2}. \quad (35)$$

在上述各种噪声源的讨论过程中,都假定了各种噪声源是彼此无关的。

对热释电摄像管而言,噪声不依赖于时间调制方式,但本底电流产生的方法不同,由此而引起的散粒噪声也是不同的。

由式(27)及(35)得到热释电摄像管在平移调制时的视频信噪比为

$$(S/N)_v = \frac{i_{s0} S T F}{\left(2e I_a + \frac{8kT}{R_T} + \frac{4kT_0}{R_L} + \frac{16}{3} \pi^2 kT_0 R_n C_L^2 \Delta f_v^2 \right)^{1/2} \Delta f_v^{1/2}}. \quad (36)$$

若考虑人眼的残留时间,就可得到显示信噪比^[43],由此就可对热释电摄像管的最小可分辨温差 MRT 进行讨论。

四、各种因素对热释电摄像管性能的影响

由信号传递函数的表示式(25)、视频信号电流的表示式(27)、电流响应率的表示式(29)、噪声表示式(35)以及视频信噪比的表示式(36)可以看出在平移调制时,靶面材料、制备工艺、电子枪及测试条件等诸因素对热释电摄像管性能的影响大小。

以常用的靶面材料硫酸三甘肽(TGS)、氘化硫酸三甘肽(DTGS)及氘化氟铍酸三甘肽(DTGFB)为例,假定摄像管工作时靶的温度为 45°C ,则各种靶面材料的参数分别取为

$$\text{TGS: } \mathcal{P} = 14 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2 \cdot \text{K};$$

$$\varepsilon_r = 220;$$

$$D = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s};$$

$$C_v = 2.5 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}.$$

$$\text{DTGS: } \mathcal{P} = 6 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2 \cdot \text{K};$$

$$\varepsilon_r = 60;$$

$$D = 2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s};$$

$$C_v = 2.4 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}.$$

$$\text{DTGFB: } \mathcal{P} = 4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2 \cdot \text{K};$$

$$\varepsilon_r = 25;$$

$$D = 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s};$$

$$C_v = 2.0 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}.$$

其中 $C_v = \mu c_p$ 为定容比热, D 和 C_v 取室温附近的值。各种靶材料的解电损耗 $\text{tg } \delta$ 都取为 2×10^{-3} 。

工艺及电子枪的参数取为:

靶面的吸收系数 $\eta = 1$, 靶厚度分别为 $100 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 及 $10 \mu\text{m}$, 靶直径为 18 mm , 则靶面积 $A_T = 2.54 \text{ cm}^2$, 由此可得到靶电容 $C_T = \varepsilon_0 \varepsilon_r A_T / l$ 。

电子枪分两种情况,取

$$I_p = 20 \times 10^{-9} \text{ A}, T_b = 3000 \text{ K},$$

这相当于交叉电子枪、用充气法提供本底电流的情况;或取

$$I_p = 100 \times 10^{-9} \text{ A}, T_b = 1500 \text{ K},$$

这相当于层流电子枪、用二次发射法提供本底的情况。由此可得到滞后参数 $\beta = \exp(-\tau_e I_p / C_T kT_0)$ 。

测试条件取: $\epsilon_s = 1$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $\tau = 0.9$, $F = 1$, 则 $H = \tau / 4F^2 = 0.225$ 。

计算视频信号时, 若取 $\Delta T_s = 1 \text{ K}$, 则靶的辐照度 $W = 1.38 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 。

预放器参数取: $R_L = 3 \times 10^6 \Omega$; $e_{n0} = 2 \times 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 则 R_n 相当于 250Ω ; $C_L = 20 \times 10^{-12} \text{ F}$; $\Delta f_v = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。

根据上述参数所作的计算结果列于表 1 至表 8。

表 1 以 TGS 为例, 在平移速度 $v = 2 \text{ mm/s}$ 时, 信号传递函数 STF 随 β 值的变化

| β \ n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.2 | 1 | 0.90 | 0.72 | 0.56 | 0.45 | 0.36 | 0.30 | 0.22 | 0.16 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.05 |
| 0.4 | 1 | 0.90 | 0.70 | 0.53 | 0.41 | 0.32 | 0.26 | 0.17 | 0.12 | 0.09 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| 0.6 | 1 | 0.88 | 0.65 | 0.46 | 0.33 | 0.25 | 0.19 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 |
| 0.8 | 1 | 0.79 | 0.48 | 0.29 | 0.19 | 0.13 | 0.09 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

表 2 以 TGS 为例, 在 $l = 30 \mu\text{m}$ 及交叉枪情况下的视频信号电流 i_s ($\times 10^{-9} \text{ A}$) 随平移速度的变化

| n \ v (mm/s) | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 10 |
|------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0 | 1.40 | 1.84 | 1.82 | 1.67 | 1.50 | 1.34 | 1.09 | 0.91 | 0.48 |
| 2.5 | 0 | 0.36 | 0.39 | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.35 | 0.32 | 0.29 | 0.18 |

表 3 以 DTGS 为例, 在交叉枪情况下的电流响应率 \mathcal{A}_i ($\times 10^{-9} \text{ A}/^\circ\text{C}$) 随靶厚度的变化 (以下计算均取 $v = 2 \text{ mm/s}$)

| l (μm) \ n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 100 | 0.88 | 0.81 | 0.67 | 0.54 | 0.43 | 0.35 | 0.29 | 0.20 | 0.14 | 0.11 | 0.08 |
| 50 | 1.76 | 1.59 | 1.26 | 0.95 | 0.71 | 0.54 | 0.42 | 0.27 | 0.18 | 0.13 | 0.10 |
| 30 | 2.92 | 2.55 | 1.85 | 1.27 | 0.88 | 0.63 | 0.47 | 0.29 | 0.19 | 0.13 | 0.10 |
| 10 | 8.76 | 5.54 | 2.90 | 1.67 | 1.06 | 0.73 | 0.52 | 0.31 | 0.20 | 0.14 | 0.10 |

表 4 以 DTGS 为例, 在 $l = 30 \mu\text{m}$ 时, 电流响应率 \mathcal{A}_i ($\times 10^{-9} \text{ A}/^\circ\text{C}$) 随不同电子枪参数的变化

| n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 交叉枪 | 2.92 | 2.55 | 1.85 | 1.27 | 0.88 | 0.63 | 0.47 | 0.29 | 0.19 | 0.13 | 0.10 |
| 层流枪 | 2.92 | 2.72 | 2.29 | 1.87 | 1.54 | 1.30 | 1.10 | 0.84 | 0.66 | 0.54 | 0.44 |

表 5 以 DTGS 为例, 当 D 减小 1/3 (相当于网状靶面), 在交叉枪情况下的电流响应率 \mathcal{A}_i ($\times 10^{-9} \text{ A}/^\circ\text{C}$)

| n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D 不变 | 2.92 | 2.55 | 1.85 | 1.27 | 0.88 | 0.63 | 0.47 | 0.29 | 0.19 | 0.13 | 0.10 |
| D 减小 1/3 | 2.92 | 2.72 | 2.28 | 1.83 | 1.46 | 1.17 | 0.95 | 0.65 | 0.47 | 0.35 | 0.27 |

表 6 三种不同靶材料在 $l=10\ \mu\text{m}$ 、交叉枪情况下的信噪比(S/N)₀。(根据给定的参数, 在 $\Delta f_0=4\times 10^6\ \text{Hz}$ 时, $i_n=12.01\times 10^{-10}\ \text{A}$)

| n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TGS | 16.2 | 3.45 | 1.42 | 0.75 | 0.46 | 0.31 | 0.21 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.04 |
| DTGS | 7.24 | 4.58 | 2.40 | 1.38 | 0.88 | 0.60 | 0.43 | 0.26 | 0.17 | 0.12 | 0.08 |
| DTGFB | 5.79 | 5.02 | 3.62 | 2.48 | 1.73 | 1.25 | 0.93 | 0.56 | 0.37 | 0.26 | 0.20 |

表 7 三种不同靶材料在 $l=10\ \mu\text{m}$ 、层流枪情况下的信噪比(S/N)₀。

| n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TGS | 16.2 | 13.6 | 9.20 | 6.00 | 4.00 | 2.80 | 2.10 | 1.24 | 0.82 | 0.58 | 0.43 |
| DTGS | 7.24 | 6.70 | 5.56 | 4.45 | 3.56 | 2.90 | 2.36 | 1.64 | 1.19 | 0.90 | 0.70 |
| DTGFB | 5.79 | 5.52 | 4.88 | 4.18 | 3.56 | 3.04 | 2.63 | 2.02 | 1.61 | 1.31 | 1.10 |

表 8 三种不同靶材料在 $l=10\ \mu\text{m}$ 、D 都减小 1/3、层流枪情况下的信噪比(S/N)₀。

| n | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TGS | 16.2 | 14.9 | 12.1 | 9.39 | 7.28 | 5.70 | 4.54 | 3.01 | 2.11 | 1.55 | 1.18 |
| DTGS | 7.24 | 7.14 | 6.84 | 6.40 | 5.87 | 5.31 | 4.75 | 3.75 | 2.95 | 2.34 | 1.88 |
| DTGFB | 5.79 | 5.76 | 5.64 | 5.47 | 5.24 | 4.98 | 4.70 | 4.12 | 3.57 | 3.07 | 2.65 |

五、几点讨论

1. 当信号传递函数为 1 时, 所得结果都与理想情况下的结果相同, 这时要讨论热释电摄像管的性能是没有意义的, 因为这意味着 $n=0$ (D 和 β 的影响不起作用) 或 D 和 β 均为 0 (无热扩散和滞后效应的影响), 实际上是不可能做到的。

2. 在平移调制情况下, 有一最佳平移速度存在, 当目标快速变动时, 热扩散的时间就可缩短, 而缓慢变化时, 就减小了滞后效应, 得到高的读出效率, 所以平移速度在热扩散与滞后效应之间有一最佳选择。

3. 在低 n 下, 减小 l , 可使性能大大改进, 特别对低 \mathcal{S} 的靶材料, 其性能改进更显著。但在高 n 下, 由于 l 的减小增加了 β , 厚度的减小使性能变化不大, 对高 ϵ_r 的 TGS 更是如此。若用层流枪来降低 β , 通过减小 l , 就可使高 n 下的性能得到提高。

4. 电子枪及靶面结构的改进对低 n 下的性能影响不大, 因这时的传递函数值已接近于 1, 但在高 n 的情况下, 为了降低热扩散、滞后效应对传递函数的影响, 就必须采用层流枪和网状靶面, 以便改进高 n 下的性能。

5. 在中等空间频率下, 若为交叉枪, 最好用 ϵ_r 较小的 DTGS 或 DTGFB 材料, 若为层流枪, 反而用 TGS 更好, 因这时 β 已较小, 高 \mathcal{S} 的优点可以得到发挥。在高 n 的情况下, 无论何种电子枪结构, 都应采用 ϵ_r 较小的材料, 这样才能使性能有大的改进。虽然靶面结构、电子枪的改进使 TGS 靶的性能提高更多, 但随 n 的增加, 它的性能下降得更严重, 最终的性能仍不如 DTGS 或 DTGFB 靶。

6. 在高 n 时要获得很好的性能, 采用网状结构的 DTGFB 靶面, 并用层流枪来降低 β , 是最好的选择。但从材料制备、成本等因素考虑, 用 DTGS 或许更为合理些。

致谢——对李炽同志同作者所作的讨论以及他的宝贵意见,表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Holeman B. R. and Wreathall W. M., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **4**(1971), 1898.
- [2] Logan R. M. and Mclean T. P., *Infrared Phys.*, **13**(1973), 15.
- [3] Logan R. M., *Infrared Phys.*, **15**(1975), 51.
- [4] Singer B., *Advances in Image Pick-up and Display*, Ed., B. Kazan, Vol. 3, New York: Academic Press, 1977, 1~82.
- [5] Garn L. E. and Petito F. C., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-24** (1977), 1221.
- [6] Conklin T. and Singer B., *IEDM Technical Digest*, 1975, 60.
- [7] Singer B. and Lalak J., *Ferroelectrics*, **10** (1976), 103.
- [8] Pool P. J. and Pedder D. J., *Ferroelectrics*, **27**(1980), 13.
- [9] Warner D. J. and Pedder D. J., *Ferroelectrics*, **33**(1981), 249.
- [10] Putley E. H., *Semiconductors and Semimetals*, Ed. R. K. Willardson and A. C. Beer, Vol. 5., New York: Academic Press, 1970, 259~284.,
- [11] Garn L. E. and Sharp E. J., *IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packag.* **PHP-10** (1974), 708.
- [12] Putley E. H., et. al., *Ferroelectrics*, **9**(1972), 263.
- [13] 陈祖培, *科学通报*, **26**(1981), 1294.
- [14] Hall J. A., *The Infrared Handbook*, Ed. W. L. Wolfe and G. J. Zissis, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington D. C., 1978, 13.1~13.77.

THE MODULATION CHARACTERISTICS OF A PYROELECTRIC VIDICON

LUO ZHENFA, ZHU CHUNCAI, LI JIALIN

(Kunming Institute of Physics)

ABSTRACT

The modulation characteristics and the performance parameters of a pyroelectric vidicon are illustrated. Some formulae describing the pyroelectric vidicon with a single-crystal target are standardized as full as possible. By choosing various parameters the calculated results provide a convenience for designing a pyroelectric vidicon and discussing its performance.