

# 积累和贮存状态下SEC靶分辨率的理论计算

贾欣志

## 摘 要

本文对积累和贮存状态下SEC靶的电荷泄漏及管子的背景信号对SEC靶调制度的影响进行了理论分析,从靶的基本电位方程及初始边界条件出发,导出了贮存,有背景及无背景信号积累三种情况下,靶表面电位图象调制度的近似表达式,并利用电子计算机进行了数值计算。

## 一、前 言

SEC摄像管具有极好的图象积累和贮存性能,因此在天文观测及某些极低照度成象问题的研究中很有用。SEC管子的上述特点主要是由SEC靶材料和结构使其具有很高的电阻率决定的。实验表明某些SEC靶的电阻率至少可达 $10^{17}$ 欧姆一厘米以上<sup>[1]</sup>当然,管子的处理工艺有可能使靶电阻率在很大范围变化,因此各个SEC管子的积累与贮存性能也不尽相同。某些作者曾对超正摄像管靶及早期的光电摄像管靶的极限分辨率作过分析。<sup>[2][3]</sup>但SEC靶电阻率及背景信号与管子性能间的定量关系并不清楚,本文对贮存,有背景及无背景积累三种情况下SEC靶的分辨率进行了定量分析与计算。分析与计算的基本出发点是假定均匀的,100%对比度的黑白条形分布的光信号在靶表面引起相应的,100%对比度的条形电位分布,然后考虑该分布由于靶漏电及背景信号造成的电位图象对比度衰减。因为只考虑靶本身的分辨率,不涉及扫描电子束拾取过程,所以分析中未考虑Krittman效应<sup>[4]</sup>。

## 二、SEC靶的电位分布

为研究不同分辨率下SEC靶表面电位分布对比度随时间的变化,假定黑白相间的,均匀条状图形投到管子光电阴极上,从而在靶表面形成条状电位分布。此分布的起始对比度假设为100%坐标系统可以这样选择,使Z轴与黑白条平行,Y轴与靶表面垂直, $Y=0$ 面为信号板, $Y=D$ 面为靶表面, $D$ 表示靶的厚度,如图1所示。

在上述条件下,靶中的电位分布显然是周期性的,因此考查一个间隔 $0 < x < 2d$ 中的情况就足够了。图1中 $d$ 为一个黑条或白条的宽度。由于对称性原因,将 $X=0$ 放在条的中心较方便。另外,一个周期的尺寸比整个靶的尺寸小很多,所以可以近似地将 $Y=0$ 和 $Y=D$ 视为无穷大平面,同时电位分布与Z轴无关,

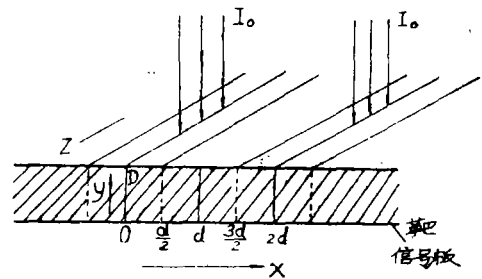


图1 SEC靶截面示意图

所以求解电位分布问题简化为二维问题。

假定 SEC 靶为均匀连续介质，靶内无空间电荷，因此任意时刻，靶内任意一点的电位  $\Phi(x, y, t)$  由二维拉普拉斯方程及相应的边界条件决定，即：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\Phi(x, 0, t) = V_T \quad (2)$$

$$\Phi(x, D, t) = \varphi(x, t) \quad (3)$$

其中  $V_T$  为靶压（信号板电压）， $\varphi(x, t)$  为任意瞬间靶表面电位分布。为求解上述问题，可令  $\Phi_1$  与  $\Phi_2$  的线性迭加，其中  $\Phi_1, \Phi_2$  分别满足一个带有齐次边界条件的二维拉普拉斯方程。即：

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

$$\Phi_1(x, 0, t) = V_T \quad (6)$$

$$\Phi_1(x, D, t) = 0 \quad (7)$$

及

$$\frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

$$\Phi_2(x, 0, t) = 0 \quad (9)$$

$$\Phi_2(K, D, t) = \varphi(x, t) \quad (10)$$

从(5)、(6)、(7)式不难求出：

$$\Phi_1 = -\frac{V_T}{D}y + V_T \quad (11)$$

从(8)、(9)、(10)式可得到：

$$\Phi_2(x, y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \sinh(\alpha y) f(\alpha, t) d\alpha \quad (12)$$

这里  $f(\alpha, t)$  可由边界条件(10)确定，根据：

$$\varphi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \sinh(\alpha D) f(\alpha, t) d\alpha$$

或

$$\varphi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} F(\alpha, t) d\alpha$$

可导出

$$F(\alpha, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\beta x} \varphi(\beta, t) d\beta \quad (13)$$

将(13)代入(12)得

$$\Phi_2(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\alpha e^{i\alpha x} \frac{\sinh(\alpha y)}{\sinh(\alpha D)} \int_{-\infty}^{\infty} d\beta e^{-i\beta x} \varphi(\beta, t) \quad (14)$$

将(11)、(14)代入(4)式得：

$$\Phi(x, y, t) = -\frac{V_{\tau}}{D} y + V_{\tau} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} da e^{i a x} \frac{\sinh(\alpha y)}{\sinh(\alpha D)} \int_{-\infty}^{\infty} d\beta e^{-i\beta a} \varphi(\beta, t) \quad (15)$$

这就是 SEC 靶中电位分布的一般表达式。

### 三、贮存状态下 SEC 靶的分辨率

所谓贮存状态是指某一瞬间 ( $t = 0$ ) 在 SEC 靶表面建立起具有一定周期的黑白条形电位分布  $\varphi(x, t)$ ，由于电荷在纵横方向的泄漏，对比度将从初始时刻的 100% 开始衰减，本节的目的就是导出对比度衰减的规律。

首先，将  $\varphi(x, t)$  展开为付立叶级数，同时根据对称性的考虑，可以合理地假定：

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t) \cos(n\pi x/d) \quad (16)$$

其中  $d$  为黑条或白条宽度，展开式的系数可以确定如下，首先将 (16) 式代入 (15) 式，得：

$$\varphi(x, y, t) = -\frac{V_{\tau}}{D} y + V_{\tau} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} da e^{i a x} \frac{\sinh(\alpha y)}{\sinh(\alpha D)} \int_{-\infty}^{\infty} d\beta e^{-i\beta a} \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t) \cos\left(\frac{n\pi}{d} \beta\right)$$

经过整理，并利用  $\delta$  函数的性质：

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\beta a} d\beta = 2\pi \delta(a)$$

得到：

$$\Phi(x, y, t) = -\frac{V_{\tau}}{D} y + V_{\tau} + \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t) \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{d} y\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi}{a} D\right)} \cos\left(\frac{n\pi}{d} x\right) \quad (17)$$

其次，引进连续性方程：

$$C \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

这里  $C$  为靶电容， $\rho$  为靶材料电阻率。在靶表面，方程变为：

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right) y = D = -\frac{1}{\rho c} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) y = D \quad (18)$$

将 (17) 式代入 (18) 式则：

$$\sum_{n=0}^{\infty} f'_n(t) \cos\left(\frac{n\pi}{d} x\right) + \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t) \frac{n\pi}{d\rho c} \cdot \coth\left(\frac{n\pi}{d} D\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{d} x\right) = \frac{V_{\tau}}{D\rho c}$$

等式两端同乘以  $\cos\left(\frac{n\pi}{d} x\right)$ ，并在一个周期上积分，则：

$$f'_s(t) + f_s(t) \frac{n\pi}{d\rho c} \coth\left(\frac{n\pi}{d}D\right) = 0$$

此微分方程的通解为:

$$f_s(t) = f_s(0) e^{-\left[\frac{n\pi}{d\rho c} \coth\left(\frac{n\pi}{d}D\right)\right] \cdot t}$$

假定靶表面的初始电位分布为:

当  $0 < x < \frac{d}{2}$  和  $\frac{3}{2}d < x < 2d$  时:

$$\varphi(x, 0) = V_0$$

当  $\frac{d}{2} < x < \frac{3}{2}d$  时:

$$\varphi(x, 0) = 0$$

则利用付立叶级数展开可得:

$$n = 0 \text{ 时, } f_0(0) = \frac{V_0}{2}$$

$$n \geq 1 \text{ 时, } f_n(0) = \frac{2V_0}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

这样最终求得的表面电位为:

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) = & \frac{V_0}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{2V_0}{(2n+1)\pi} \cdot \\ & e^{-\left[\frac{(2n+1)\pi}{d\rho c} \coth(2n+1) \frac{\pi}{d}D\right] \cdot t} \\ & \cdot \cos(2n+1) \frac{\pi}{d} x \end{aligned} \quad (19)$$

令  $M_s$  表示当黑白条中心间距一定时, 任意时刻的电位图象对比度, 则

$$\begin{aligned} M_s = & \frac{\varphi(0, t) - \varphi(d, t)}{\varphi(0, t)} \\ = & \frac{2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} e^{-\left[\frac{(2n+1)\pi}{d\rho c} \coth(2n+1) \frac{\pi}{d}D\right] \cdot t}}{\frac{\pi}{4} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} e^{-\left[\frac{(2n+1)\pi}{d\rho c} \coth(2n+1) \frac{\pi}{d}D\right] \cdot t}} \end{aligned} \quad (20)$$

#### 四、积累状态下的 SEC 靶分辨率

与贮存状态不同, 在积累状态下, 靶表面初始电位为 0, 在积累期间, 黑白相间的条状分布电流不断使靶充电, 与此同时, 图象电荷又不断泄漏。利用与 Devore 类似的分析方法<sup>[2]</sup>, 获得任意时刻靶表面的电位分布为:

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) = & \frac{GI_0}{C_1} \left[ \frac{t}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos(2n+1) \frac{\pi}{d} x}{k(2n+1)^2 \coth(2n+1) \frac{\pi}{d} D} \right. \\ & \left. \left( 1 - e^{-\left[ k(2n+1) \coth(2n+1) \frac{\pi}{d} D\right] t} \right) \right] \end{aligned}$$

其中  $k = \frac{\pi}{\rho dc}$ ,  $G$  为靶增益,  $C_1$  为白条的靶电容,  $I_0$  为流向白条的充电电流。同样, 令  $M_t$  表示积累状态下, 一定分辨电位图象的对比度, 则:

$$M_t = \frac{\varphi(0, t) - \varphi(d, t)}{\varphi(0, t)}$$

$$M_t = \frac{\pi kt}{4} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2 \coth \frac{(2n+1)\pi D}{d}}$$

$$\frac{(1 - e^{-\left[ k(2n+1) \coth \frac{(2n+1)\pi D}{d} \right] t})}{(1 - e^{-\left[ k(2n+1) \coth \frac{(2n+1)\pi D}{d} \right] t})} \quad (21)$$

## 五、存在背景信号时, 积累状态下的 SEC 靶分辨率

上节的讨论是指只有有效信号电流  $I_0$  的理想情况, 实际上, SEC 管积累图象过程中, 总是存在与有效信号并存的背景信号, 如光电阴极的热电子发射, 管内另件的场发射, 残余气体离子引起的光电阴极二次电子发射, 杂散光引起的光电发射等。所有这些电流造成一个均匀背景, 使图象对比度降低。

分析中可以将背景信号电流的影响视为使图象的初始对比度降低。上节关于图象累积过程对比度随时间变化的讨论中, 假定图象的初始对比度为 100%, 因此有背景信号的情况下可以简单地将上节的结果乘上一个对比度降低因子而得到。假设  $I_b$  为背景信号电流, 根据前节的讨论,  $I_0$  为使亮条充电的电流, 这样, 图象的原始对比度  $M_b$  可以为:

$$M_b = \frac{I_0}{I_0 + I_b} = \frac{1}{1 + \frac{I_b}{I_0}} + \frac{1}{1 + m} \quad (22)$$

$$m = \frac{I_b}{I_0}$$

如果有背景信号积累情况下的图象对比度以  $M_{tb}$  表示, 则:

$$M_{tb} = M_b \cdot M_t \quad (23)$$

## 六、计算结果与讨论

SEC 靶在贮存状态下应用时, 能够维持图象细节时间的长短以及无背景信号或背景信号可以忽略不计情况下, 能够长时间积累图象的能力取决于靶电容大小和靶电阻率的高低。尽管不同 SEC 管靶电容可能不同, 但一般变化范围不大, 其典型值为 100PF。如前所述, 靶电阻率取决于靶的材料, 结构及管子处理工艺, 一般变化范围较大。图 2 表示当靶电容取 100PF, 黑白条宽度  $d = 2 \times 10^{-3}$  cm (相当于 500 电视行) 时, 贮存状态下, 电位图象对比度随时间变化的计算结果。从图中可以看到, 为维持较好的图象细节长达几小时以上, SEC 靶的电阻率至少要  $= 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$  以上。这与文献 [1] 的估计一致。

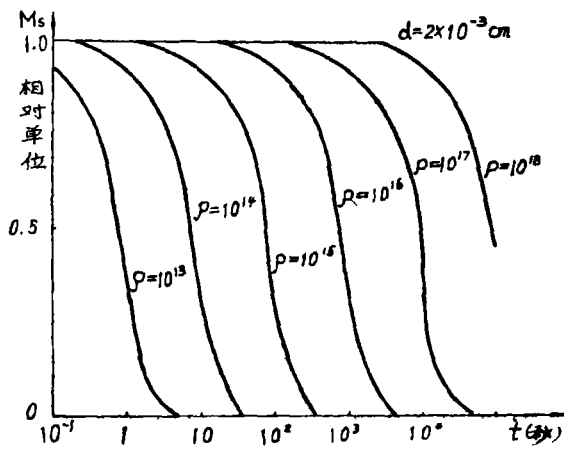


图2 贮存状态下, 不同电阻率时, 图象(电位浮雕象)对比度随时间的变化

图3表示黑白条宽度分别为:  $d = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}$  和  $d > 6 \times 10^{-3} \text{ cm}$  时, 电位图象对比度的变化, 看出当分辨率较高时, 对比度衰减得快, 因为此时电荷沿靶表面横向扩散明显, 反之, 当分辨率较低时, 则纵向漏电起主导作用, 当  $d > 6 \times 10^{-3} \text{ cm}$  时, 对比度衰减随分辨率变化很小的计算结果说明了这个问题。

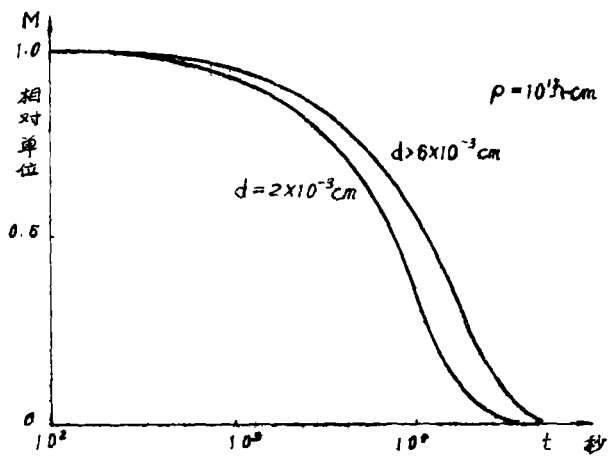


图3 贮存状态下, 不同分辨率图象对比度的变化

图4表示不考虑背景信号, 当  $d = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}$  时, 不同靶电阻率情况下, 图象对比度随时间的变化。图5表示当  $d = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}$  电阻率  $\rho = 10^{14} \Omega - \text{cm}$  时, 贮存与积累两种状态下, 图象对比度变化情况的比较。结果表明, 贮存状态下对比度衰减的较快, 这是因为贮存状态只有电荷泄漏过程起作用, 而积累状态下, 存在电荷的建立与泄漏两种相反的过程。

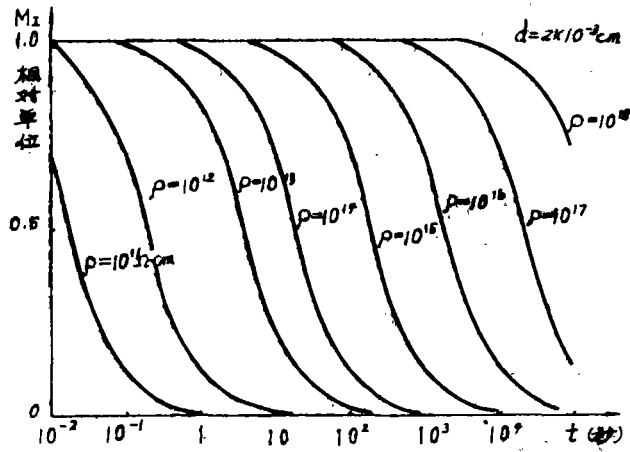


图4 积累状态下, 不同电阻率时, 图象对比度的变化

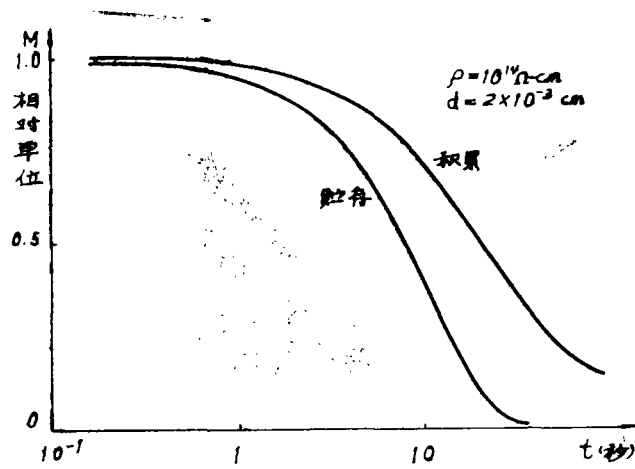


图5 积累与贮存状态图象对比度随时间变化的比较

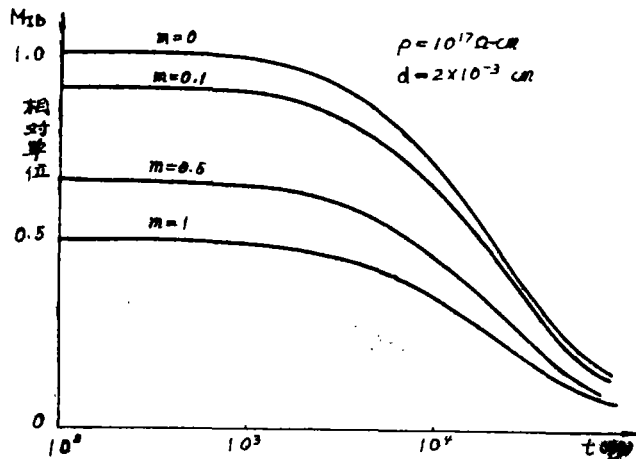


图6 背景电流对积累过程中图象对比度变化的影响

图 6 表示图象积累期间背景信号电流的影响。图中绘出了背景电流与有效信号电流之比  $m$  为三种不同值的对比度变化与无背景理想情况 (即  $m = 0$ ) 的比较。从图中看出背景电流的影响是明显的。为使积累图象细节只受限于靶电阻率, 则背景电流至少要比有效信号电流低两个数量级。

本文的分析与计算中, 假设 SEC 靶为均匀连续介质, 实际的 SEC 靶, 为了提高表面第一交叉电位, 增加稳定性, 表面还蒸涂 Ag 薄层, 所以实际情况要更复杂。尽管如此, 本文的计算结果对 SEC 管的性能分析和改进是有意义的。

#### 参 考 文 献

- [1] A.H.Boerio, A.V.E.E.P, Vol 22 A, 229 (1966)
- [2] De Vore H.B.Proc.IRE, Vol 36, 335 (1948)
- [3] Schagen.P.Philips Res.Reports, Vol 10, No 3, 231 (1956)
- [4] Iriwin M.Krittman, IEEE Trans Vol ED-10 404 (1963)