

一种新型高速硅摄像管的设计分析与实验

杨建林

张幼文

(浙江诸暨二轻工业总公司)

(上海交通大学)

摘要——本文以等效电路描绘了硅摄像管的工作机理,从而建立了硅摄像管图象信息传递过程的数学表达式。对硅摄像管的各个结构参数展开了定性的讨论,并在文献[1]、[2]的基础上,对整个器件进行了综合的考虑,提出了新的结构形式。这种形式,可使原摄像管的响应速度加快,信息贮存能力增大。通过理论计算,每秒钟可以传递 250 帧以上的图象。

一、前 言

对摄像器件来说,靶面应能够瞬时地将所贮存的信息输出(读出),所以它必须具备足够的纵向电阻。同时在一帧的时间间隔内,使各象素原有电位值不至于变化,所以又应该有尽可能大的横向电阻。我们分析比较了硅摄像管和超正析象管、硫化铅摄像管、二次电子电导管及分流管等摄像器件,认为硅摄像管具有如下优越性:(1)它由彼此分割的二极管组成象素,既能接收光学图象,又能接收电荷图象;(2)通过增设移象段,可以提高灵敏度;(3)随着微电子学技术及工艺水平的提高,可能进一步完善靶面结构;(4)可以有目的地控制各象素的纵向电阻及象素之间隔离介质,使靶面结构更为完善。

本文提出一种硅摄像管的结构形式。理论计算及初步实验表明,该器件可以达到每帧 300 行电视线的分辨率,传递速度为每秒钟 250 帧以上。

二、硅摄像管的工作机理讨论

硅摄像管中的硅靶是将光学图象(电子图象)转换成按亮度分布的电荷图象,即电位起伏。并在一帧时间内,将象素所贮存的电荷通过电子束的扫描作用转换成视频信号输出。目前通用的硅摄像管的靶面结构是由硅片上的平面二极管列阵组成,每个二极管代表着一个象素,借助于二极管的结电容的“充”、“放”电来完成图象的“记录”与“读出”。其结构如图 1 所示。

制作二极管列阵,需要在硅衬底上生成氧化层,这氧化层既是二极管之间的隔离介质,又是 PN 结的钝化膜。为了使扫描电子束投射到每一个二极管,必须将作为隔离介质的二

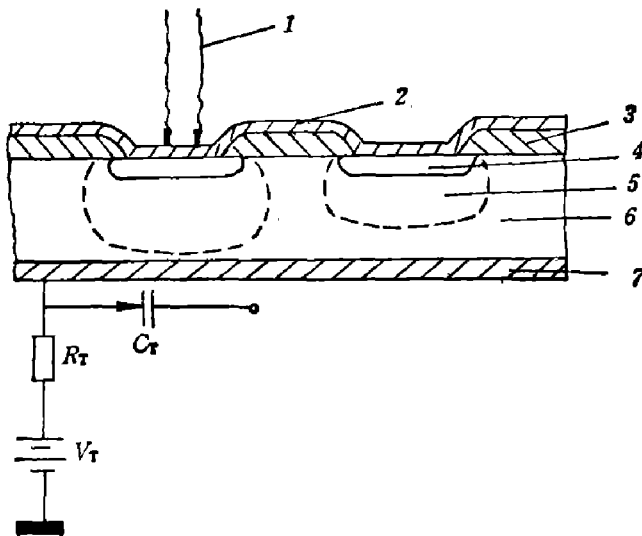


图1 硅二极管列阵靶的横截面

1—电子束；2—CdTe 薄膜；3—SiO₂；4—P⁺-Si
5—耗尽层；6—N-Si 衬底；7—N⁺-Si

Fig. 1 The target cross section of the silicon diode array

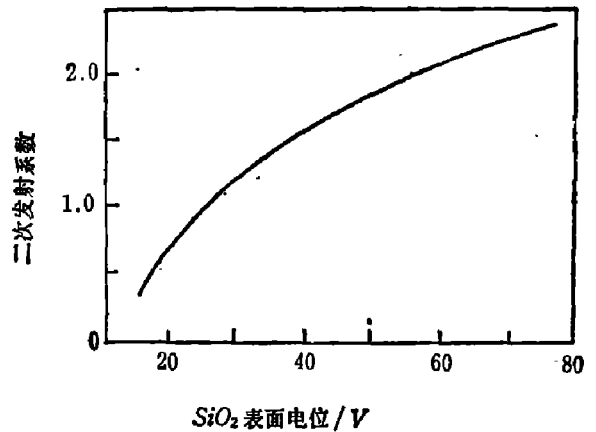


图2 二次发射系数与 SiO₂ 表面电位的关系

Fig. 2 The relationship between the surface voltage of SiO₂ and the second emission

氧化硅表面的积累电荷泄漏掉。为此，又在硅靶表面沉积一层碲化镉薄膜。这一层薄膜使得硅靶每一个象素的纵向电阻增大，而横向电阻变小。这对图象信号的贮存及拾取是十分不利的。为解决这一问题，相继开展了深腐蚀硅二极管列阵靶^[1]与具有金属接触垫靶面^[2]的研究，目的是用来改善靶面的性能，这类结构的靶面与图1的差别仅是将原沉积的碲化镉薄膜废除，而在二极管(P区)的端面上分别以P⁺⁺单晶硅与镀金层所替代，这对改善惰性是有利的，但两者均以裸露的SiO₂作为隔离介质，将严重地影响了图象的质量。这可以从SiO₂的二次电子发射系数 δ_{SiO_2} 与初次电子能量的关系曲线(图2)^[3]来解释。从曲线看出，SiO₂的第一极限电位 V_1 位于27V，而硅靶管的典型靶压均在10V左右，即 $V_T < V_1$ (第一极限电位)，此时 $\delta_{SiO_2} < 1$ 。扫描瞬间进入到SiO₂表面的一次电子数大于离开SiO₂表面的二次电子数，使SiO₂表面平衡到阴极电位，这样将导致SiO₂与N-Si界面处的反型，而形成P型沟道，严重地影响了图象的清晰度。所以国内按文献[1、2]所制作的靶面，至今仍无实用价值。

三、硅靶的等效电路及数学表达式

为讨论电子束扫描硅靶某一象素的瞬时过程，现以图1的通用靶面结构为例，并假定接触电阻，分布电容及电子束的等效内阻等忽略不计，则图1靶面结构某一象素的充电回路的等效电路如图3所示。

现以电子束扫描某一个二极管的瞬间为例进行探讨，此时扫描电子束起到开关的作用。

由于 $R'_{Te} \gg R_{Te}$ ，所以其充电回路可简化(如图4所示)。

为便于简化起见，先求出结电容 C_{PN} 两端的电压 $V_{ab}(t)$ ，然后再换算为信号电压 $V_{RT}(t)$ 。过渡过程的一般表达式为

$$V_{ob}(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (1)$$

式中 A, B 为待定的常数。设 $t=0$ 时, $V_{ob}(t) = V_0$, 即 PN 结的自建电势; 当再一次扫描到某一个二极管时, V_0 应包括剩余电位与自建电势。 $t=\infty$ 时, $V_{ob}(t) = V'_T$, 即 PN 结电阻上的分压值。

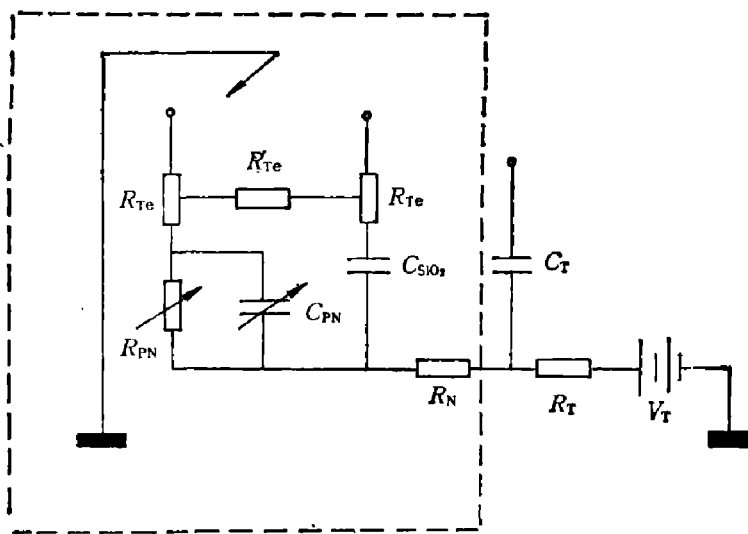


图3 象素单元的等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of the picture element

R_{Te} —CdTe 纵向电阻; R'_{Te} —CdTe 横向电阻; R_{PN} — PN 结的结电阻; R_N — N 型半导体电阻;
 R_T —信号电阻; C_{PN} — PN 结的结电容; C_{SiO_2} —似 MOS 电容; C_T —信号耦合电容
 (虚线框内为等效靶面)

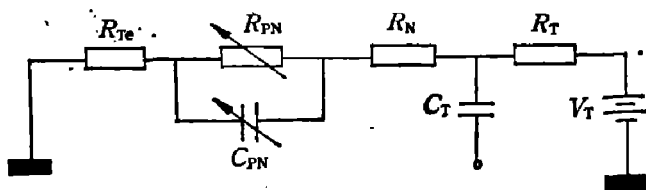


图4 扫描瞬间象素的等效电路

Fig. 4 The equivalent circuit of the picture element during scanning

利用戴维南定理求得上述回路的等效电阻 R_1 及 V'_T 值:

$$R_1 = \frac{R_{PN}(R_N + R_{Te} + R_T)}{R_{Te} + R_N + R_{PN} + R_T};$$

$$V'_T = \frac{R_{PN}V_T}{R_{Te} + R_{PN} + R_N + R_T}.$$

令:

$$R_2 = \frac{R_{PN}}{R_{Te} + R_{PN} + R_N + R_T},$$

则

$$V'_T = R_2 V_T.$$

分别将 $t=0$ 与 $t=\infty$ 时的值代入式(1), 求得

$$V_{ob}(t) = [V_0 - V'_T] e^{-\frac{t}{\tau}} + V'_T; \quad (2)$$

式中,

$$\tau = R_1 C_{PN} = R_1 \pi r_1^2 \left\{ \frac{q \epsilon_s \epsilon_0 N_0}{2[V_0 + V_{ob}(t)]} \right\}^{\frac{1}{2}};$$

N_0 为低掺一侧杂质浓度; q 为电子电荷; r_1 为二极管窗口半径; ϵ_0 为真空电容率; ϵ_s 为半导体材料的介电常数。

电子束扫描某一象素时,可以看作是一个电流脉冲,其脉冲宽度相当于二极管的截面积 S_1 与电子束截面积 S_2 相对位移的时间,可近似表示为

$$t_u \doteq \frac{2(r_1+r_2)}{m \cdot n \cdot l};$$

式中 r_1 为象素的半径; r_2 为电子束半径; m 是扫描行数; n 是扫描帧数; l 为行长。

式(2)经整理后得

$$V_{ob}(t) = V_T R_2 (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}}) + V_0 e^{-\frac{t_u}{\tau}}. \quad (3)$$

由回路定律可以求得信号电阻 R_T 所形成的压降,也即预放级的信号电压:

$$V_{RT}(t) = [V_T - V_{ob}(t)] \frac{R_T}{R_{T_0} + R_N + R_T}. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),经整理后得

$$V_{RT}(t) = [1 - R_2 (1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}})] \frac{R_T}{R_{T_0} + R_N + R_T} + V_0 e^{-\frac{t_u}{\tau}} \frac{R_T}{R_{T_0} + R_N + R_T}; \quad (5)$$

式(5)中,第一项表示某一个象素在扫描间隙中,由于结电容的放电作用(即该象素所捕获的空穴数)使象素表面电位提高。提高数值取决于图象信息的强弱。其不同的电位值又决定了扫描电子束充电电荷量的多少。当充电电流流经 R_T 时,在 R_T 上所造成的电压降越大越好。第二项表示着前一次扫描结束时,由于扫描束充电电荷不足,使象素表面电位与阴极电位仍有一个差值,也就是剩余信息在电阻 R_T 的压降,希望尽快降低为零。

现再就式(5)中各项含义及作用进行分析,并在制作过程中加以利用或控制。

R_T 是摄像管的输出阻抗,同时又是摄像机预放级的输入阻抗,它的大小取决于后级的阻抗匹配,一般在 $10 \text{ M}\Omega$ 以内。 R_N 是 N-Si 的体电阻,它的大小一般在几~几十 Ω ,与其它各值比较,可以忽略不计。 R_{PN} 是 PN 结的结电阻,它的大小一般在几~几十 $\text{M}\Omega$ 。主要决定于制作过程中的工艺条件。要求在扫描一帧的间隙内不产生明显的泄漏电荷。 R_{T_0} 是 CdTe 薄膜镀层与象素二极管所对应的纵向电阻。实验测得方块电阻的统计值在 $10^{11} \sim 10^{13} \Omega/\square$,而镀层厚度为 $0.13 \sim 0.17 \mu\text{m}$,因而其电阻为几百 $\text{M}\Omega$,它是充电回路中的串接电阻,这就严重地影响着充电的速率。

另外也可以从式(4)、(5)看出,要使第二项尽快地趋近于零,必须使 $e^{-\frac{t_u}{\tau}}$ 值趋近于零。也就是增加脉冲宽度 t_u 或者是减小充电常数 τ 。但增加脉冲宽度必将影响图象分辨率,而且还受到其它因素的抑制,因此不可任意变更;而 $\tau = C_{PN} R_1$ 中, C_{PN} 要满足于信号的贮存量,同样不能随便变动;因此唯有 R_1 能够改变。

$$R_1 = \frac{R_{PN}(R_N + R_{T_0} + R_T)}{R_{T_0} + R_T + R_N + R_{PN}},$$

式中, R_{PN} 是与结电容 C_{PN} 相并联;要求它尽可能大,从而只有减小 R_{T_0} 才可能使 R_1 减小。经上述分析看出,要减小硅靶摄像管的惰性、增加图象信号的贮存能力,关键是设法取代硅靶上所沉积的 CdTe 薄膜。

四、硅摄像管的新结构

为提高器件的响应速度,增强电荷的贮存能力,并使其不易产生反型,我们希望改善每一个象素的纵向电阻,提高每一个象素在电子束扫描瞬间的充电速率。为此我们考虑了新

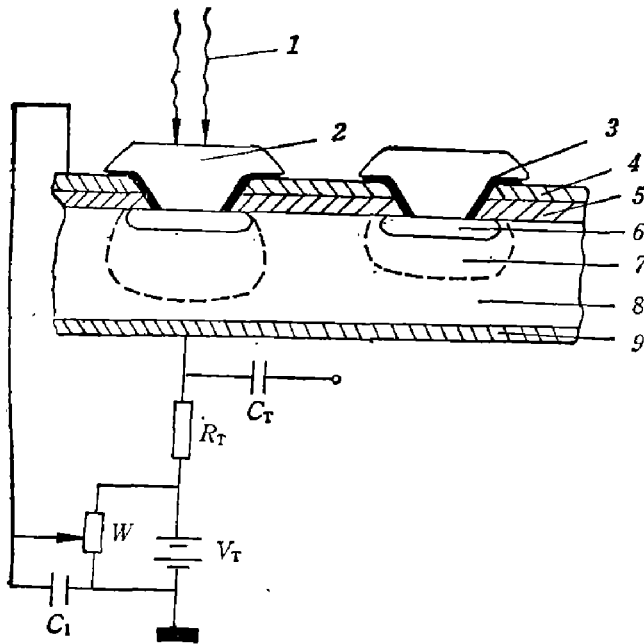


图5 新结构靶面截面

Fig. 5 The cross section of the target of new structure

1—电子束；2—金属镍镀层；3—氮化硅薄膜；4—镍屏蔽层；5—二氧化硅薄膜；6—P⁺-Si 7—耗尽层；8—衬底；9—N⁺-Si

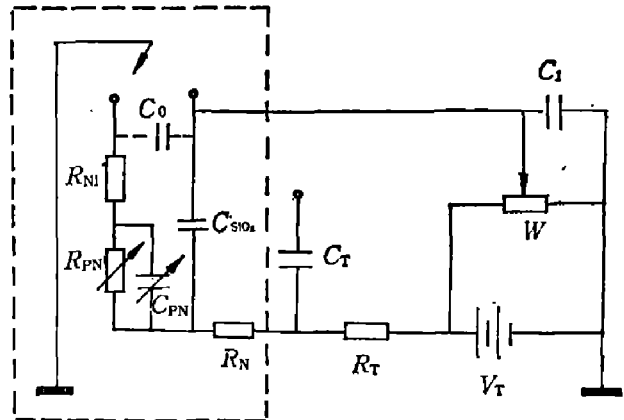


图6 新结构象素单元的等效电路

Fig.6 The equivalent circuit of the picture element of new structure

R_{Ni} —与二极管对应的纵向电阻； R_{PN} —二极管结电阻； C_{PN} —结电容； R_N —衬底体电阻； C_0 —分布电容； R_T —信号电阻； C_T —耦合电容； W —分压电位器； C_{SiO_2} —似MOS电容； V_T —靶反偏压； C_1 —旁路电容；(虚线框内为靶面某一单元的等效电路)

靶面结构(见图5)。

新结构中采用镍与P⁺-Si形成良好的欧姆接触，并且替代了纵向电阻为 $10^9 \Omega$ 的碲化镉，从而提高了图象信号的拾取效率，降低了惰性。同时，镍层对磁场有屏蔽作用，使得移象段的电子轨迹不受偏转磁场的影响。但考虑到电子束扫描靶面是沿靶面顺序进行的，为了使SiO₂表面不积累电荷，所以必须在表面设置泄漏电荷的屏蔽层。并要求屏蔽层与象素之间相互绝缘。增设屏蔽层的目的是为了有效地泄漏落入象素周围的扫描电子；如加上某一电位，可以用来抑制SiO₂与衬底所接触的表面，不致于产生“沟导”，这就提高了图象的分辨率及其过荷能力。改进结构的等效电路如图6所示。

当电子束扫描二极管象素时的等效电路与图4相似，所不同的只是将图4等效电路中的 R_{T_0} 由 R_{Ni} 所更换，再将 R_{Ni} 代入式(5)得

$$V_{RT}(t) = [1 - R_2(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}})] \frac{R_T}{R_{Ni} + R_N + R_T} + V_0 e^{-\frac{t_u}{\tau}} \frac{R_T}{R_{Ni} + R_N + R_T}; \quad (6)$$

式中 R_{Ni} 和 R_N 在欧姆数量级时，与 R_{PN} 、 R_T 相比可以忽略不计，即

$$V_{RT}(t) \approx [1 - R_2(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}})] + V_0 e^{-\frac{t_u}{\tau}}. \quad (7)$$

图1结构中的CdTe薄膜被镍代替后，纵向电阻由原来的 $2.3 \times 10^9 \sim 2.3 \times 10^{10} \Omega$ 降低为几个 Ω ， τ 值也相应下降，使 $e^{-\frac{t_u}{\tau}}$ 变小。可以近似认为，当 $e^{-\frac{t_u}{\tau}} \rightarrow 0$ 时，式(7)为

$$V_{RT}(t) = V_T(1 - R_2) \frac{R_T}{R_{Ni} + R_N + R_T}. \quad (8)$$

将 R_2 代入式(8)并进一步简化，则得

$$V_{RT}(t) \doteq V_T \left(1 - \frac{R_{PN}}{R_{N1} + R_N + R_T + R_{PN}} = V_T \frac{R_T}{R_{PN} + R_T} \right) \quad (9)$$

从式(9)看出,视频信号的幅值,仅仅决定于PN结的反向电阻 R_{PN} 及信号电阻 R_T (讨论中没有考虑电子束的等效内阻)。用物理概念解释: R_{PN} 大,即可以认为结电容的反向漏电流小,这对图象信号的贮存极为有利。在电子束扫描过程中,由于 R_{PN} 大,与它并联的电容 C_{PN} 上分压值也较高,从而提高了对电容 C_{PN} 的充电速率,使得同一回路内串联电阻 R_T 上的电位瞬间变化显著,这对提取信号极为有利。

当电子束扫描到镍屏蔽层时,可以将这一部分看作为P型沟道表面场效应晶体管,它由金属镍-SiO₂-N型Si所组成。只要镍屏蔽层的电位大于零,象素之间就不可能有位移电荷产生,即成为理想的隔离介质。

为了说明问题,对图1与图5两种结构形式的靶面作定性分析。不考虑电子束等效内阻及分布电容等,仅以不同材料CdTe与金属镍所具有的不同纵向电阻值

($R_{Te}=4.52 \times 10^8 \Omega$, $R_{Ni}=12\Omega$)而言,

当 $V_T=8V$, $t=0 \rightarrow 2 \times 10^{-6}S$ 时,

代入式(3)进行运算,运算结果画成图7。从

图中可以看出,若以镍层代替CdTe,即可瞬时地完成充电过程。且使 $V_{ob}(t)$ 接近于靶面的反偏 V_T ,既加快充电的速率,又提高了过荷的能力,几乎瞬间完成图象的传递过程。对于这种结构的硅靶,理论计算每秒钟可以传递250帧以上图象。

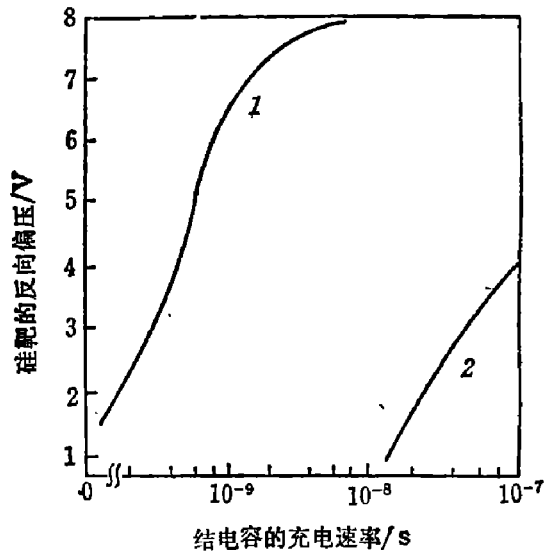


图7 硅靶反偏压与充电速率的关系

Fig. 7 The relationship between the back bias voltage of silicon target and the charge speed

五、实验结果

以图5的结构形式进行了工艺设计。在整个工艺流程中,有两个较关键的环节。其一

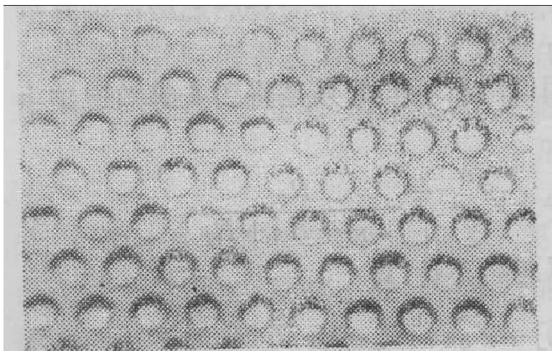


图8 镀镍硅靶显微照片(1×400)

Fig. 8 The microphotograph (1×400) of the silicon target plated by Ni

是使镍蒸镀层与SiO₂及Si₃N₄有足够的附着力,以及良好的真空性能,其二是在直径为8μm的二极管端面镀复Ni层。初步实验结果如下:

1. 沉积镍屏蔽层:本实验采用真空蒸镀法,并将衬底加温,蒸镀的镍层附着力良好。对镀覆的镍层做了耐抗蚀实验。用等离子刻蚀20多分钟,镍层无异常变化,而干法刻蚀Si₃N₄几分钟后就全部腐蚀干净。

2. 镀覆二极管列阵端面的金属镍层。经分析,被镀覆的表面是二极管的P区,以N区与阴极接触,在电镀液中电场的作用下,每一个二极管正好处于正向偏置,内阻很小,可以视为导体,二极管四周覆盖的SiO₂成了理想的绝缘介质,只要稍微更动一下镀液的配方,控制电流密

度,就能将镍离子比较理想地沉积到每一个二极管的端面上。

在 280°C 以下镍与硅的接触属高复合接触。从而镍与每一个二极管形成良好的欧姆接触。为了避免钠离子对硅片的沾污,电镀液采用无钠盐类配制而成,制成的靶面如图 8。靶面具有良好的电学性能,足够的机械强度和化学稳定性,能满足工艺制作的要求。

将上述靶片封入硅靶管进行定性实验,从实验结果看出器件的惰性得到明显的改善,结构的理化稳定性良好,保存一年之久性能并无变化。

致谢——本工作得到了兵器部二〇五研究所庞昌荣、赵文斌、曲东升,西安延河无线电厂陈继东等同志的大力支持,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Schroder D. K. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 2: 66~67.
- [2] **BP1387501**.
- [3] Robert S. S. and Eduard L., *IEEE Trans*, **ED-18**(1971), 4: 229~234.
- [4] 张幼文,红外光学工程,上海科技出版社,1983,516~518.

THE DESIGN ANALYSIS AND EXPERIMENT OF A NEW KIND OF HIGH SPEED SILICON VIDEO TUBE

Yang Jianling

(The Second Light Industry General Corporation of Zhuji, Zhejiang Province)

Zhang Youwen

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University)

ABSTRACT

By using the equivalent circuit method, the principle of the silicon video tube is described and the corresponding equations for transfer of signals are established. A qualitative analysis for the structure parameters of the tube is made. Based on the theory by Schroder D. K. et al. (1973) and BP 1387501, a more general consideration for the whole device is given and a new kind of tube structure is proposed. In this new tube, the response speed will be faster and the ability of signal storage will be larger than in the old one. The transference of more than 250 frames of picture per second would be expected.