

硅增强靶摄像管：用于夜视

SIT 管优良的低照度性能使得它从警察监视到喷气发动机部件的内部检查很多领域获得应用。

用硅二极管阵列靶作增强管 (SIT)，这个想法近几年来在低照度摄像中已被广泛接受。SIT 管是迄今为止第一流的低照度电视摄像管。本文讨论了 SIT 管的若干性能。R. G. Neuhauser^[1] 论述硅靶用于视像管的文章已在本刊发表。

光电阴极十硅二极管阵列

SIT 管 (图 1) 是一个光电探测器，其光电阴极作为光敏面，硅二极管阵列上储存与光学像相对应的电图像。来自光电阴极的高能电子轰击靶在靶内产生大量电子—空穴对，因而 SIT 管有很高增益。硅视像管中的靶只有入射的一部分光子每个能产生一对电子—空穴，而 SIT 管的靶每个光电子能产生

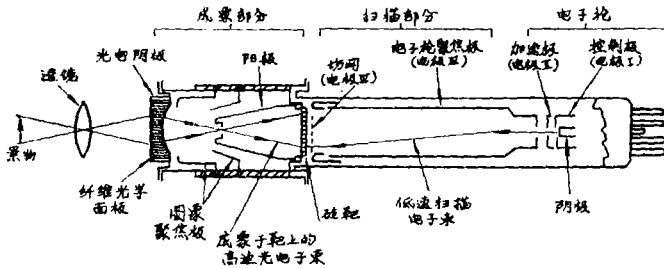


图 1 光线通过纤维光学面板射入 SIT 管，把平面光学像传输到弯曲的光电阴极面上。光再经过聚焦极射到靶上，靶是一个每吋含 1800 个硅二极管的阵列。图像储存在靶上，每隔 1/30 秒用扫描电子束将存储的图像读出。

许多电子—空穴对。增强部分加上 9 千伏的 SIT 管，电子增益可高达 1600 以上。

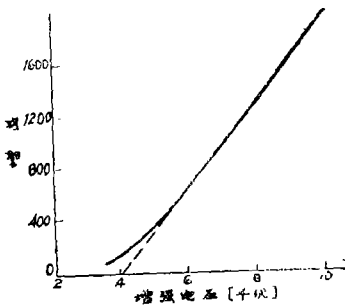


图 2 电子增益 (实线) 基本上是增强电压的线函数。能量吸收缓冲层使得只有大于 3000 伏时才有增益，这时增强部分能正常工作。对直线 (虚线) 的偏离起因于高能光子穿透缓冲层的结果。

增益同增强电压的关系示于图 2。由于在靶光照面形成一能量吸收的“缓冲层”，只有大于 3000 伏时才保持有效的增益特性，这时增强部分能正常进行工作。缓冲层有选择地吸收光电子。如光电子能量相同，则可预期随电压降到截止值增益连续地直线下降。但如图 2 所示低于截止电压仍有一些增益，这是因为一些高能电子穿透缓冲层引起的。

增益 1600、光电阴极灵敏度 140 微安/流明的 SIT 管用钨丝灯照明的灵敏度要比已报导的灵敏度为 4350 微安/流明的硅视像管高 50 倍。

光电阴极

光电阴极面是 S-20 多碱阴极面 (Sd-K)

Na-Cs) 它位于弯曲的纤维光学面板内表面。由于纤维面板对紫外透过很差, 所以SIT管对短波响应较低。由图3的响应曲线可见截止波长为340毫微米。有些使用者为了克服这个缺点在面板外面加装对紫外灵敏的发光体。长波响应受S-20光电阴极的限制; 近期还不能获得采用红增感光电阴极的SIT管。因为硅靶被光电子轰击, 不是如视像管中被光子直接轰击, 所以视像管对近红外有响应, SIT管对近红外则响应很小。

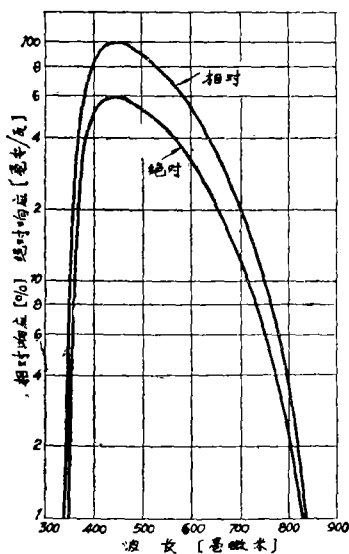


图3 光电阴极短波响应受低紫外透过的纤维光学面板限制 (然而借助对紫外灵敏的发光体可以得到校正)。SIT管没有硅视像管所具有的近红外响应。

成像部分

SIT管的成像部将光学像转变成光电子像并且聚焦到硅靶上。这过程的电子光学要求光电阴极是个球面, 但通常透镜系统聚焦光学像在一平面上。因此需将光学平面像经过纤维光学面板转换到弯曲的光电阴极面上。边缘厚中间薄的面板各处透射不等, 会将一固定的“成荫”信号引入到平面光像里。成荫引起边缘处输出信号下降约17%。

此外将平面像移到球面上使几何畸变增大约2%。这种畸变在监视器上表现为“枕形失真”现象。

分辨力

硅靶的矩阵结构限制了SIT管的分辨性能。现在用的靶每吋有1800个二极管, 或者说有35对线/毫米的分辨力。对于通常16毫米的光学成像面 ($\frac{1}{2} \times \frac{3}{8}$ 吋) 这种结构的靶的极限分辨力约为700行/图像高度。如要获得更高的分辨力, 或者提高二极管密度或者加大靶的尺寸。近来在直径1.5吋的管中已用上27毫米的靶面, 它的极限分辨力超过1000行/图像高度。

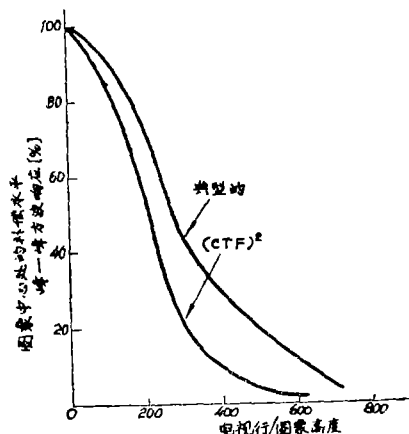


图4 黑白平行条状图响应与线条宽度的关系。曲线称为对比传递函数(CTF)。当管子对点而不是对条摄像时, (CTF)²给出有效幅度响应。

描述分辨性能的有效参数是对比传递函数(CTF)或是方波幅度响应。图4所示曲线是实验得到的, 目标是高对比的黑白条状图。曲线给出了输出信号同线条宽度的关系。线条变细信号降低, 这就直接影响信一噪比, 而信一噪比在决定低照度工作极限时是个重要参数。由于实际景物并不是互相平行的黑白条状图, 所以这个极限要在比予期更强光照时才能达到。当管子对点而不是对线条摄像有效幅度响应近似CTF特性曲线

平方。随光强减弱分辨力下降,这是因为较小的输出信号使信一噪比变坏。图5示出极限分辨力和光强的关系,曲线是对静止的黑白条状图测得的。图中给出两种不同对比度:100%是典型的实验室条件,而30%则更接近实际的野外景物的对比度。

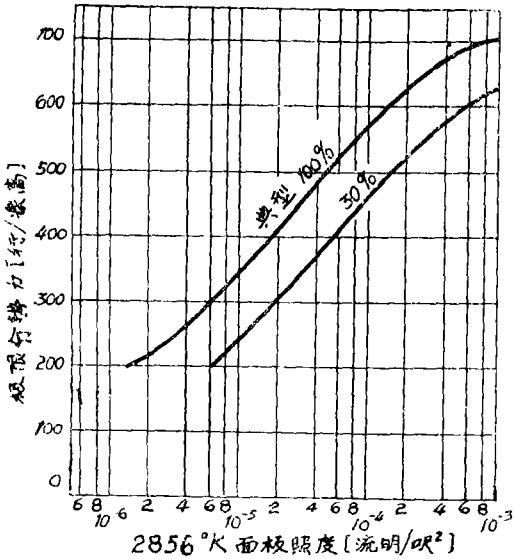


图5 低光照对应低分辨力100%和30%对应实验室环境和野外环境。

惰 性

低照度工作时分辨力是重要特性之一。第二个重要特性是惰性,它随信号降低而变得更坏。停止光照后测得的剩余信号就是惰性,用停止光照扫描第三场后的信号和原来信号的百分比来表示惰性的大小。SIT管无光电导惰性而有电容性惰性,这是由于电子束擦除靶上积累的电荷需要一定时间的缘故。在电压变化不大时高电容靶比低电容靶要储存相对多的电荷 ($C = \frac{d\theta}{dv}$)。此外由于电子束中的电子速度有个分布,因此信号放电时间就更长。正由于这个原因,随光照的降低(电荷减少)惰性增加。图6示出4804管典型的三场后惰性同光照强度的函数关系。

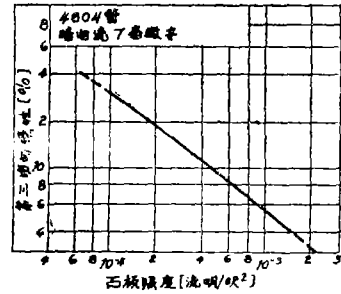


图6 惰性是停止光照扫描第三场后剩余信号的百分数。曲线给出的是标准4804管在停止光照扫描第三场后的惰性。

用入为提高“零信号”电压电子束能更有效地将靶放电就有可能改善惰性。要做到这点,或者增加虚假的暗流(用斜方向照明)或者实际增加暗流(增加靶压或升高靶温)。

暗 电 流

暗电流表现为图像的背景。背景是靶中热激载流子所造成,除了仅在极弱信号时才能觉察到的低亮度点和斑点外,通常它并不成为问题。正常情况我们希望暗流足够小使景物暗图像的电位近乎零。为改善惰性而增加暗流从而获取一折衷性能,这种情况也是存在的。为增加靶压超过正常时的8伏,管子最大的信号容量就增加。但是通常使用者并不关心这个,因为管子一般具有足够的信号储存容量。然而靶压增加最大不能超过15伏,因为那时靶缺陷就变得越来越突出了。图7示出暗流和靶压典型的关系曲线。此时靶工作温度30℃,暗流随靶温度而增加。

低照度下的工作

SIT管基本是个低照度器件。它虽然有如图2所示的可变增益,但没有附加的光控制能力就不能指望它正常工作。若需管子在光照下长时间工作,较好的办法是结合管

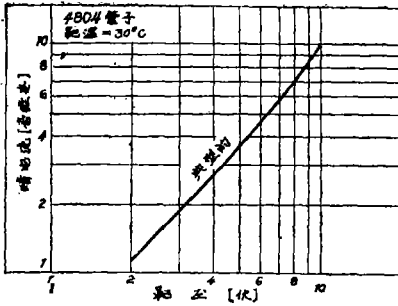


图7 暗电流由靶中热激载流子引起，表现为图像背景。暗电流是靶压和温度的函数。

子的可变增益特性在摄像机设计时加一个反应迅速的自动光控装置(ALC)。如正常工作电压选为4500伏，此时增益约200(透镜光栏比最大增益时小3挡)管子在这个工作点有良好的信—噪比、满意的图像和长的工作寿命。光强在小于1秒时间内强弱变化8倍，电压(增益)从工作点升高或降低使管子仍能正常工作。当光强变化缓慢时，则可通过调节光圈或加滤光片使光强值衰减到允许在4500伏工作。

管子寿命

当十分小心地使用SIT管时，和其它摄像管一样阴极热电子发射变小管子寿命也就完结。计算得到平均有效时间(MTTF)超过5500小时(90%可信赖)，通过近三年来的生产，这个结果得到证实。为延长管子寿命必须控制光照面的曝光量。按下面推荐的摄像机设计考虑，不产生缺损的工作时间为2000小时。为防止两类缺损机构的出现必须有保护措施，这两类缺损是高能电子轰击靶引起的靶损伤和离子轰击引起的光电阴极损伤。

靶损伤

靶损伤的程度除同光照强弱、工作时间长短有关外，还决定于轰击靶的光电子能量

的大小。过量的强光照射使靶对应入射点处暗流永久性地增加。如损伤严重的话，即使完全去掉所加高压，在景物暗处乃至全部暗处烧伤仍都是明显的。如图8所示。损伤同靶信号的大小有关，保持信号在允许范围内就可控制损伤的发生。



图8 强光照射造成的严重的靶烧伤。即使关闭高压损伤仍然是明显的。

损伤最容易发生在强点光源照射的时候。然而在实际应用中通常必须从强点光源周围的暗背景中获取信息，因此实际上不能降低增益使信号维持在靶不受强点光源照射影响的水平上。如必须在这种条件下长时间工作，那么最好是移动摄像机使强点光源不总照在一个位置上。

对没加保护措施的摄像机很容易发生靶损伤。加保护并正常工作的摄像机如在一个小点上过量曝光则在损伤之前发生开花现象，以致到不能用的程度。如过量光照区面积变大又占去了图像区的重要部分，那么光电阴极损伤的机会就增加了。

光电阴极损伤

光电阴极的离子损伤表现为在图像中央有个边缘模糊的暗斑，如图9所示。它实际是光电阴极灵敏度降低的结果，因此在无光照或去掉高压就看不到。光电子和剩余气体分子碰撞使气体分子电离，正离子向着负电位的光电阴极加速并轰击光电阴极，从而造成光电阴极损伤。在通常工作时，光电子数目

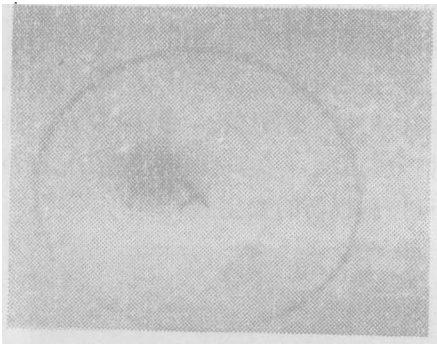


图9 光电阴极由于离子损伤在图像中心产生的暗斑。

决不会多到它所产生的离子会造成光电阴极损伤，只有当光电阴极电流过荷时离子数目才会达到损伤的程度。

产生离子的多少是光电子数的函数，而不是光电子能量的函数。在成像部分即使只加上很小的电压（如100伏），光照虽不能形成图像但光电子流仍是存在的。因此保护光电阴极唯一稳妥的办法是光电阴极完全不加电压或限制光强。

低照度时的信—噪比

低光照时分辨力的下降是同信—噪比紧密相关的。众所周知对一稳定的摄像机系统和有足够灵敏度的摄像管，其性能仅受从景物来的有效光子数的限制。SIT管已接近达到这个目标。在评价低光照工作极限时，包括如下几个因素：探测器的量子效率和对整个有效光子光谱分布的积分，景物的反射率和对比度，透镜的孔径，图像单元相应的立体角和积累时间。在确定靶的信—噪比时，这些因素都是重要的。

当摄像机系统处理信息时，它本身还有附加的噪声，其大小决定于靶实际输出信号的大小。图10示出摄像管和摄像机的典型 S/N 特性曲线。注意当较强光照时， S/N 并不沿着“光电阴极限制的线”继续增加。当摄像管输出饱和信号时，再继续增强光照导致降低增强器电压从而使增益下降。因为增

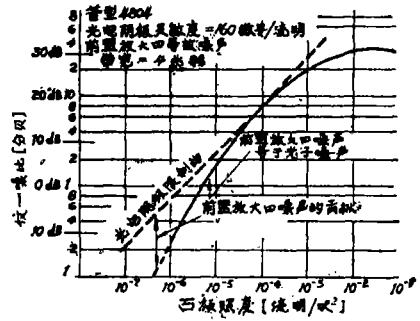


图10 管和摄像机的典型 S/N 特性。较强光照时降低增强电压以限制增益，减少撞击靶的一次光电子数使 S/N 曲线偏离光电阴极限制曲线而变得平缓起来。

强器电压降低影响了光电子能量分布，所以穿过缓冲层撞击靶的一次光电子数仅够维持信号不变，因此 S/N 特性曲线变得平缓了。

信号积累

硅靶能储存电荷像直到电子枪扫描靶为止。对美国广播系统和多数闭路系统来说，积累时间通常是1/30秒。如输入的光子流能积累更长时间，就能存储更多信息，这样就可以改善信—噪比，但要损失一些目标动的感觉。这种延长积累模式 T_1 的工作受到暗流限制，通常暗流正比于积累时间。当管子工作在这种模式时，随着暗流的增加可允许的积累时间约为1秒，若要更长的积累时间，需将靶冷却到约20℃。此外若积累时间要超过十分钟，已发现有效的办法是将电子枪热丝电流关闭一直到要读出信号时为止。这样做可使信号在读出前储存长达8个小时。

开花

强光图像的扩展谓之开花，大多数摄像管都存在这种现象。当图像的一部分受强光

照射而过负荷时就发生开花现象；靶过负荷区的过量电荷就会向邻近区域扩大。低照度景物对开花尤为敏感，这是因为除偶有亮光或闪光外通常低照度景物的细节对比度范围较窄。

最近发展了一种具有低开花特点的靶并获得满意的结果。低开花的4804H管子在极端过负荷时能比通常4804管所能容纳的电荷量大20倍。

然而当点光源强度比正常信号大1000倍时，低开花管的使用者还需考虑下面两种情况：由于透镜的闪光（内反射）使亮点像畸变加重，以及由过负荷区造成的靶损伤。

不同的结构

虽然包括简单的监视在内的多数摄像机可直接使用16毫米SIT管无需作任何改动，但还是有需要附加性能或特点的情形。譬如在野外不加入工照明的极低照度下，摄像器件必须能以极小的噪声接收图像信号，而有效增益必须足够高使得输出信噪比不因放大器噪声而降低。

加单级像增强管能给SIT管以额外的增益使得它能实现在光电子噪声极限下工作。像增强管的纤维光学输出单元通过SIT管的纤维光学面板直接耦合到SIT管的光电阴极上。SIT管光电阴极电流和像增强管光电阴极电流之比即是附加的白光增益达到20:1。

为了尽量多的接收入射光，还可将入射孔径从16毫米增加到40毫米。对空间应用来说需要的SIT管是较小的2/3吋的扫描面积。对要求在像增强部分有门控制或者有图像电子变焦距的少数应用场合，这种管子也是适用的。这时分辨力得到改善，27毫米直径的

靶能提供超过1000电视行/图像高度的分辨力。

应用

除监视应用外许多军事、医学、科学上的应用都促进了采用SIT管的低照度电视摄像机的的发展。

用于火炮射击控制的空中摄像机就是利用了SIT管能在低对比低照度的不利条件下提供有用信息的本领。工作于同样不利条件的机载摄像机能帮助引导飞机着落。船载摄像机用于夜间航行和引航进港。这些应用很少遇见快速运动物体，但要求能控制开花，这是因为在港口上有明亮灯光或别的船上有移动的灯光。水下潜望镜也常用低照度电视摄像机来装备。

应用在私人 and 公共保险领域的停车场监视，这已为大家所熟知，这和在实际法律应用中一样摄像机都是起搜索和监视的作用。

迄今已发现多种工作可使用低照度电视摄像机，包括监控胶卷的冲洗过程和维修期间检查喷气发动机零件的内部情况。在水下帮助石油钻探也可用电视。民航上用具有小剂量X线系统的低照度电视来检查旅客行李。渔民用水上电视观察浮游生物的萤光从而在海洋中寻找鱼群。

科学工作者可以用低照度电视来观察鸟和动物的夜间习性，也可增进科学工作者对天文学方面的认识。在医学上低照度电视可用来作眼底诊断，还可配合小剂量X线系统作其它诊断。

参考文献（略）

译自“SMPTE.J.”Vol 86, No6, 1977, P414.

〔杨晓雯 译 李平辉 校〕