

电视摄像器件发展的历史评论(1930—1976)*

摘要: 一个自1942年以来,就在这个领域工作的研究工作者,阐述了1930—1976年间电视摄像器件发展的个人说明。历史从光电摄像管和析象管开始,包括CCD及其变种CID固体传感器。尽管发展属于技术范畴,但为了提供更加综合的考察,细节压到了最低限度。

I 引 言

电视摄像器件的发展,现在几乎变成了电子学的一类问题。其所希望的特性,几十年来已经清楚,但即使在今天,最好的性能还只能用较高成本的复杂器件来达到。虽然低成本的摄像管目前能够得到,但其性能往往达不到要求。这种情况同显象管相反,显象管在若干年前即已达到很好的黑白和彩色性能,成本也不很高。

摄像管发展的这种明显落后,并非由于这个领域研究努力的缺乏。技术上的困难在于设计最佳的工作概念,以及制造高质量图象所要求的充分无缺陷的器件。电视在军事、工业、商业、医学、空间、天文、监视和广播方面的日益增多的互异的应用,对电视摄像器件提出了许多特殊的要求,而这些特殊要求,对于电视系统其它部分,一般是不需要的。

本文所讨论的时间,从30年代光电摄像管和析象管最积极发展的时期开始,当时,电子学电视初步进行了试验。到1976年末,广播兼容的固体摄像管到达商业市场。在这段时期,发展了大量的新型摄像器件。其中的许多仍在应用,如图1的表格所示,有一些已被取代,不过,每一发展都指出某种新的途径,对我们今天所知道的电视作出贡献。与本专刊的任务一致,本文的说明将反映自1942年以来,该领域中的一个参加者的观点。为了讲历史,将只给出足够的细节。

下面所讨论的课题目录,指出过去某一时期,处于均势的两种方案,在许多情况下,两种器件都以某种形式保留着。

1) 电荷储存概念(光电摄像管对析象管)。

2) 低能扫描的发展(正析象管对移象光电摄像管)。

3) 扫描噪声的降低(超正摄像管对分流管)。

4) 用光导管寻求简单性(沉积的薄膜光电导体对硅光电二极管靶)。

5) 低照度电视用的超灵敏的管子(图象增强对低噪声扫描)。

6) 红外摄像管(电子束扫描光导管对热释电光导管对机械扫描非储存光电导体)。

7) 彩色摄像管(单管摄像管对三管摄像管)。

8) 早期的自扫描固体传感器(薄膜对硅阵列)。

9) 新的自扫描传感器(电荷传输CCD对xy寻址CID)。

本文只涉及对普通照明景物响应的电视摄像的发展。单线传感器^[9]和传感器相对景物运动的阵列不包括在内(如象卫星摄像^[10])。如象电影胶片摄像用的“飞点”系统也不讨论^[11]。图象储存管^[12](由摄像管导出)和固体储存^[13](由电荷耦合传感器导出)也必须删去。机械扫描电视的早期发展已在别处概括^[14],比1930年有了惊人的进展。

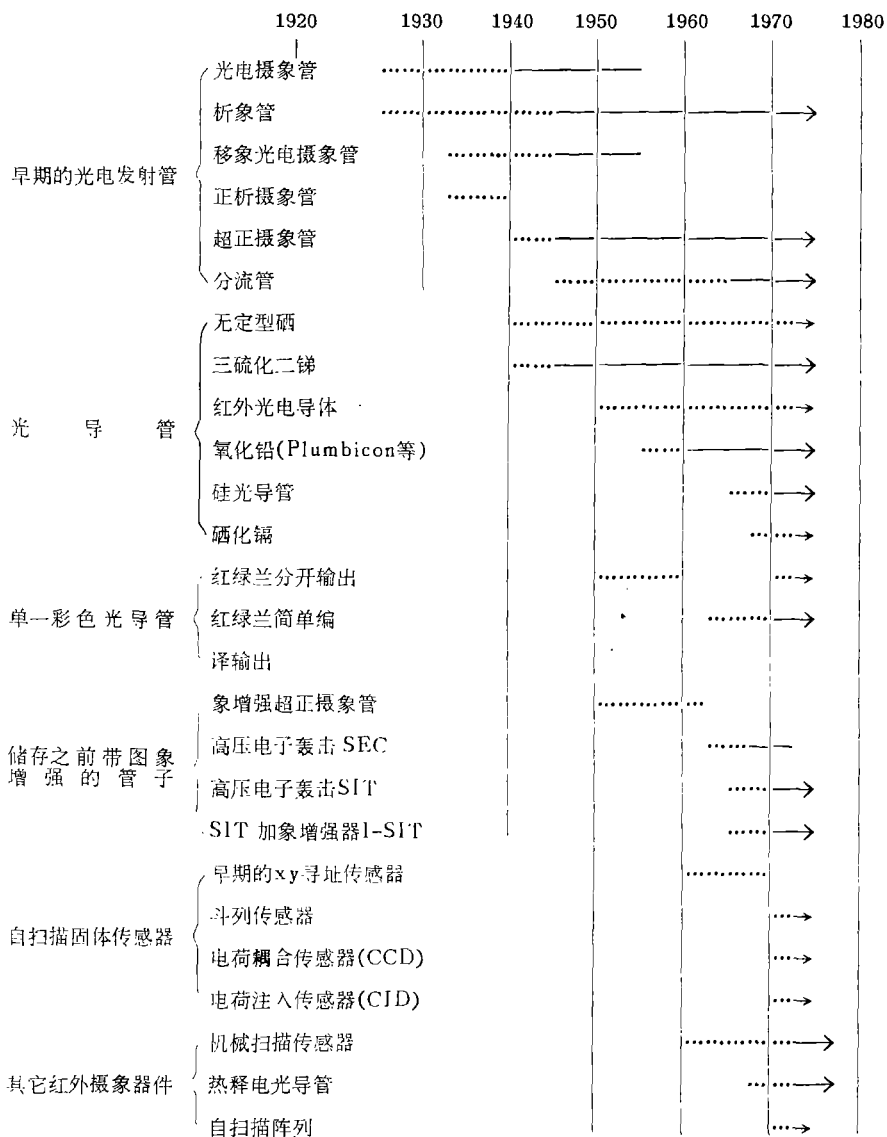


图1 表示本文中所提到的电视摄像器件的发展(虚线)和商业应用(实线)的直线图。

II 光电摄像管与析象管

30年代,电子学电视发展的特征是,以RCA的有名的年轻发明家P.T Farnsworth和以V.K Zworykin为首的研究小组间的激烈竞争。Farnsworth的摄像途径是很巧妙的。通过把光学图象聚焦到光电发射面上,并使总的电子象沿一个小孔扫描,如图2所示,小孔能够顺序地拾取来自每个象元的电子流,从而获得视频信号。不幸,这

种称为析象管的管子^[15]极不灵敏,甚至借助一个放在小孔后面的电子倍增器对信号放大后也是如此。它的弱点在于不能利用在扫描孔拾取瞬间以外的时间,从每一个象元发射的所有电子。Zworykin的光电摄像管^[16](如图3所示)可能远远灵敏得多,因为它引进了一个在全部1/30秒的扫描期间,探测每个象元所发射的总电荷的方法。

在光电摄像管中,景物发出的光成象到一个光电发射镶嵌上,这种镶嵌在一个大的云母片上形成一个电容器阵列。当电子束沿

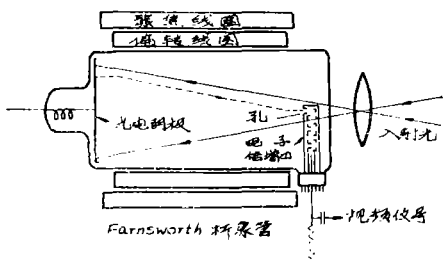


图2 带电子倍增器的析象管截面图, 倍增器装在扫描孔之后^[15]

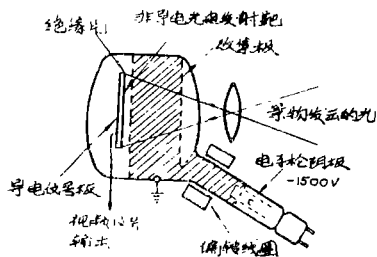


图3 光电摄像管, 即第一个应用储存的摄像管的截面图^[16]

光敏面扫描, 使电容器顺序放电时, 视频信号便在云母片背面的导电板上感应出来。虽然光电摄像管中, 由信号积累产生的灵敏度改善的倍数应象元总数那样大, 但它比析象管灵敏度的实际增加远远小于这个数值。实践中弄清了光电摄像管的工作比所预期的^[5,17]复杂得多。应用高速扫描电子束时 (~1000V), 由于二次发射, 引起被扫象元带正电, 这与光电子发射所引起的充电极性相同。电荷平衡必须通过落回到靶上的二次电子的恒定的再分布来恢复。这种负电子雨在镶嵌的中心是最严重的, 结果, 发射的图象, 从中心到边缘, 黑色电平很不均匀。为了获得满意的图象质量, 需要有外部背景修正线路, 当景物变化时, 线路必须连续调整。

尽管光电摄像管的效率比较差, 它比析象管灵敏度的改善清楚地表明, 在任何利用正常照明的实际电视系统中, 储存是必要的。Farnsworth 的析象管, 尽管灵敏度低, 然而, 它还继续存在着。对于不需要储存的那些特殊应用, 仍然在制作。1950年

前, 光电摄像管用于电影胶片摄像, 但现在不用了。

III 低速扫描、正析象管与移象光电摄像管

到1937年, 事情已经很清楚, 光电摄像管中, 低效的信号产生过程应要求演播室有非常明亮的照明, 靠正常照明作现场拍摄的机会很少。为了通过向管子里加进一个电子象增强器, 来改进光电摄像管, RCA 和其它地方作了巨大的努力^[18]。如图4所示, 光电发射面与储存镶嵌分开, 允许应用更为灵敏的光电阴极, 而光电子向镶嵌加速, 通过镶嵌的二次发射, 产生了电荷图形的适度增加。虽然获得了某些改进, 储存和放电过程的效率仍然受限于高速扫描电子束。由于更为满意的低速扫描途径的促进, 本国很快就放弃了移象光电摄像管; 但是, 称为超光电象管的移象光电摄像管的英国翻版, 在BBC 演播室内用了好多年。

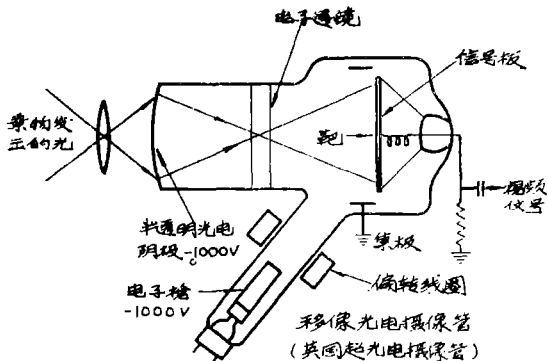


图4 一种早期的移象光电摄像管截面图^[18]

低速电子束的代替, 在摄像管的发展中提供了又一个重大进展, 电子束在镶嵌的前面减速, 只用几伏特的能量打到镶嵌上。这种管型叫作正析象管, 是 Rose 和Iams^[19]在1939年第一次报告的。低速电子束使镶嵌(后来称为“靶”)向负方向充电, 而不是向正方向充电, 因此, 直接中和光电发射所产生的正电荷。由扫描电子束产生的, 落回到靶上的再分布二次电子的消除, 可以使储存效

率增加到100%。虽然这种修正现在显得很
简单，可是它要求精通新式的低能电子光
学。Rose和Iams所发展的聚焦技术（看图
5）与早期在析象管中所用的电子光学有些
类似，在这里，整个管子浸没在均匀的磁
场中。电子沿着由磁力线规定的螺旋轨迹运
动，偏转即可以由磁力线的弯曲产生，也可
以通过加入横向电场来产生。

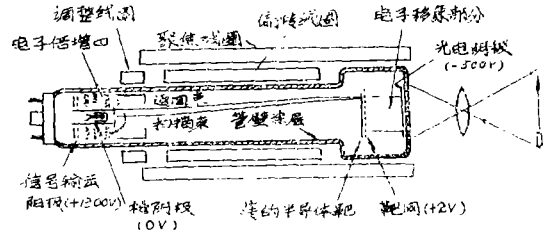


图6 1945—1960年，在美国，几乎全部
现场黑白广播都使用的超正摄像管
的截面图^[20]

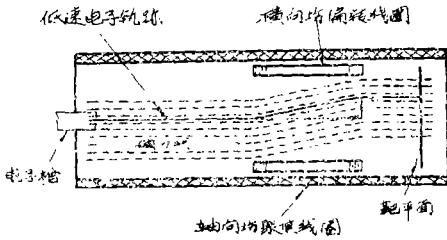


图5 表示低速电子束在轴向磁场中磁偏
转的略图

正析象管的较高的灵敏度，打开了放映
文娱节目的可能性，但摄像机仍需很仔细
地控制，以防止亮的物体将靶的一部分充
电到高于第一交叉电位，在此电位点，整
个靶变得不稳定。这种不稳定性，在几年
后发展的超正析象管中消除了。控制低速
电子束的技术逐步改进，以致实际上后来
所有的摄像管都用了这种技术。

IV 超正析象管和分流管

虽然，电视广播在1939年已在有限的
规模开始，在现场用正析象管，在演播室
用光电摄像管，但由于战争的原因，在其
后的五年间，电视广播大大地削减了。不
过，军队对发展用于侦察和导引方面的电
视感兴趣。因此，RCA实验室在V.K. Zworykin
领导下，继续进行摄像管方面的工作。我
于1942年参加RCA后不久，Harold Law
和我被分配同Albert Rose一起进行超正
摄像管的发展工作。管子的早期模型已为
Rose说明，并产生了很大的兴趣。

最后发展的超正摄像管截面图示于图
6^[20]。Rose原来设计的双面靶是由一个
与细栅网贴得很近的导电玻璃膜构成。光
电阴极发射的电子加速到靶上，电子象在
玻璃靶上形成正电荷图象，而二次电子为
靶网所收集。玻璃靶对着图象那面由于二
次发射造成的电子损失，通过扫描电子束
在反面沉积电子来补偿。玻璃的电导率需
要恰好在1/30秒内足以中和图象电荷，而
又不致通过横向扩散使分辨率降低。电子
束中使靶放电所不需要的那部分电子，返
回到管子的电子枪一端，在这里，返回电
子束进入电子倍增器。于是，被调制的输
出电流，在图象的暗区最大，亮区最小。

在1942—1945年间，利用各种方法对
超正摄像管进行改进，为军事试验，作了
许多样管。最初的管子分辨率和均匀性受
到了220条/吋靶网的限制，靶网在图象上
清析聚焦。Law发展了一种新的电镀过程，
用来生产直到1000条/吋的高透过率铜网
或镍网^[41]。把这些脆弱的靶网撑到金属环
上，这样，它们就可以装配得与玻璃靶很
近，而各处距离均匀。他也发展了一种把
薄的玻璃膜封到可伐环上的方法。这些精
细的装配结构，必须耐受400℃的管子烘
烤，而不破坏或变松，许多早期的管子，
在这一制作步骤损失了。

我的第一个任务是发展一种超正摄像
管所用的，高增益电子倍增器。总增益大
约需

要 500，沿第一级的增益变化要最小。因为返回电子束保持明显的扫描运动，所以倍增器增益的空间变化，将作为发射图象中的背景荫影显出来。在采用一种方便的静电倍增器上，经过了某些没有价值的尝试之后，我决定采用条轮结构，这种结构能够在磁场中给出均匀的增益，并允许有无限多的级数。

我的第二个任务是，改善低速电子束在图象边缘的着陆。对于均匀磁场聚焦，扫描电子束以紧贴着的螺旋形式沿磁力线运动，就像正析象管一样（图 5）。然而，如果电子在通过偏转线圈和靶前的静电透镜时，获得几伏的横向能量，则它们就不能保持足够的纵向上靶能量。这就在图象的边缘产生了黑边效应。可以发现，由于电子通过偏转线圈所产生的额外的螺旋运动，可以为靶透镜所产生的横向力抵消，结果从靶中心到边缘，产生了均匀的着陆。对这些效应作了定量研究^[22]，为后来分流管的发展作出了贡献。

军队作了侦察试验，一种小型的超正摄象管放进了试验炸弹中，炸弹的下落由投下它们的飞机导引。战后，超正摄象管在一次出版会议上宣传了，在这里，众所周知的 NBC 宣传家 Ben Gauer 把它称为“电视原子弹！”，很快它就成了“现场”电视广播的主力，并如此保持了许多年。超正摄象管具有足够的灵敏度对文娱节目进行现场拍摄，对一些难以照明的情况，它也能适用。在景物中存在亮光的情况下，它是完全稳定的，虽然这种超载区往往形成一个包围它们的暗环。这种暗环，以及当存在强烈照明时积累时间的有效自动缩短，是由靶的向着图象一面的二次电子的再分布引起的。

尽管超正摄象管灵敏度很高，但很快就弄清了其中的输出信噪比受限于电子束中的散粒噪声。返回束为信号调制的部分比较小，其极性不幸也很差——暗的部分最大而不是亮的部分最大。我被指定设计某种其它管子，或者没有过分束噪声的工作方式。用返

回来束中的速度选择器作了某些初步试验后，我们惊奇地发现，从靶返回的电子可以分成两类：一类是从玻璃靶镜面反射回来的，一类是在放电作用期间为靶所散射的。因为在图象黑的部分，散射的电子为零，在亮区、散射部分最大，所以假若能够将散射电子从总的返回束中分离出来的话就提供了一种改善信噪比的基础。按照超正摄象管发展期间已经作出的分析^[23]，所设计的分离方法是以束中电子螺旋运动的控制为基础的。图 7 所示的最后的管子称为分流管^[24]。除了倍增的结构不同外，外表很类似于超正摄象管，同时，即能以分流管方式工作，也能以超正摄象管方式工作。获得了很好的图象，噪声特性的改善和所预期的一样。不过，分流管方式的调整有些苛刻，而与此同时，由于应用较高电容的靶，超正摄象管的最大信号电平增加了，因此其信噪比对广播来说是足够的。

直至 1960 年，分流管并没有变成商业产品，因为当时政府对甚低照度电视的兴趣增加。分流管中分离器结构的改进降低了其操作的严格程度，现在，管子已在天文学和低照度摄象方面找到应用。更新近的是，分流管已经同一个小分立的高压象增强器管结合起来，用于最低照度下摄象。

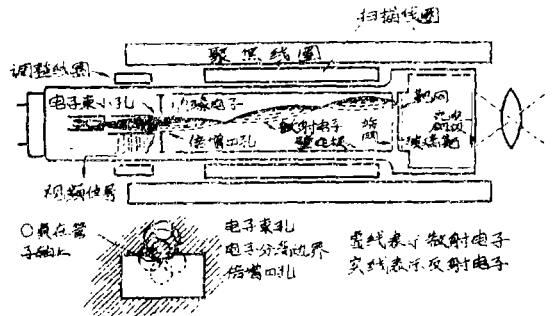


图 7 分流管的截面图，它是一种超正摄象管的修正管型，利用从靶散射的电子移除了电子束噪声的限制^[24]

V 光导管和简易性的寻求

到此为止所描述的摄像管是比较复杂和昂贵的。有许多应用希望有小的，价格不贵的摄像管，同时应该坚固，操作简单。光电导摄像管能够满足这些要求，当然不是新事儿，但是，1930年的早期实验并不是很振奋人心的^[26]。1947年，着手发展一种光电导管。RCA 的 Albert Rose, Richard Bube, Roland Smith 和其他人开始进行光电导的基本研究，特别着重于 CdS 和其它高增益的光电导体^[17,27]。与此同时，作者同 Stanley Forgue 和 R. K. Goodrich 从事一项实验计划，即用真空蒸发方法，在玻璃衬底上沉积各种材料的薄膜，衬底事先已经涂上透明导体。作好的靶放到一个可拆卸的真空系统中，用低速电子束来扫描进行试验。

对于试验所要求的这种形式的光电导体，低速电子束是一种极为有效的工具。我们很快就确定，对于帧储存操作，需要一种其暗电导率如此之高 ($>10^{12}\Omega\text{-cm}$) 的光电导体，以致在正常试验条件下，可能应该叫作绝缘体。我们所找到的最初的绝缘材料之一是 ZnSe，在摄像管工作中，能够产生较好的电荷储存性能。由于怀疑 ZnSe 层在蒸发时已经部分分解，我尝试了蒸发晶态的 Se。当时，我们并未预期晶态的 Se 能够产生以储存方式工作的靶，因为已经报告了它的体电阻率是 $\sim 10^6\Omega\text{-cm}$ 。使我们惊奇的是，所沉积的 Se 层是一种美丽的深红色，当用摄像管内低速电子束扫描时，给出很好的图象。具有清洁的黑色电平，证明其暗电阻率是很高的，分辨率和响应速度都是很好的。灵敏度也是好的，对兰光和绿光，相应于每个光子一个电子，但对红光，响应很低。参考当时流行的关于光电导的书藉表明，红色的 Se 层是一种无定形结构，被说成是非光电导的绝缘体。我们在给物理学评论出版者的通讯中报告了无定形 Se 中光电导的发现，

但是我们后来发现，同样形式的 Se 已被用于硒鼓复印的早期实验中^[29]，而且事实上在硒静电复印和考贝中仍在使用^[20]。

图 8 表示最后的光电导管^[31]的截面图，我们把它叫作光导管。最初的光导管直径为 1 吋，靶的图象面积为 $3/8 \times 1/2$ 吋。这种小的靶面积的应用与低速扫描结合起来几乎与选择光电导体来达到对运动景物有满意的响应时间一样重要。即使对于小的靶，信号电平仍是足够高的，所以倍增器可以免除，大大简化了管子以及与之相联的摄像机的结构。

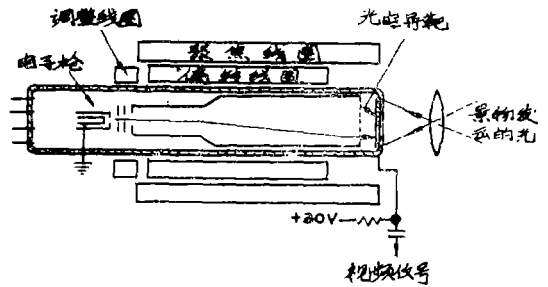


图 8 第一个简单的低造价的摄像管，光导管的截面图^[31]

虽然 Se 光导管的初步试验表明，满意的光电导体已经找到，但很快就发现，在摄像管的稍高的温度下，无定形 Se 逐渐转变为更加导电的金属形式。工作几百小时后，开头干净的图象出现了许多亮斑，靶已经发生了变化。尽管向层中加进其它杂质可以阻止这种变化，但响应时间变坏了。幸运的是 S. V. Forgue 和 R. R. Goodrich 发现在较低的真空中蒸发的 Sb_2S_3 多孔层是一种稳定的光电导体，具有好的光谱响应，在正常照度下惰性适当^[35]。在 γ 值较低和适应靶压变化引起的自动增益控制的能力方面， Sb_2S_3 是明显特殊的，对于固定光圈的廉价摄像机而言，这些特点证明是巨大的优点。

虽然多孔 Sb_2S_3 光电导体在低造价光导管摄像机和电影胶片广播方面，仍然广泛使用，但其灵敏度和惰性对演播室拍摄并不完全可接受的。这种需要已为菲利普实验

室发展的，高质量PbO光导管所满足，他们称之为Plumbicon^[36]。这种管子具有优越的灵敏度和滞后特性，同时，线性的响应和没有移象部分，使其特别适用于三管彩色摄像管（图9）。现在，PbO管也为其它制造者所生产，他们都具有自己的管子名称（Vistacon, Leddicon等等）。

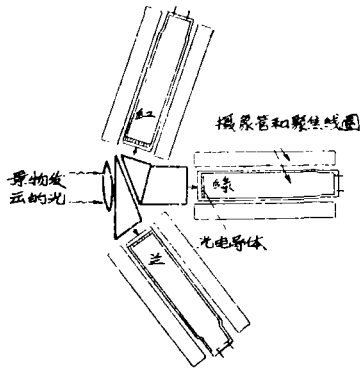


图9 一种应用氧化铅光导管的三管彩色摄像管^[37]

应用这些管子的摄像管^[37]，在60年代开始取代大多数彩色广播用的超正摄像管相机。PbO靶运用反偏压的p-i-n结，其制造比标准Sb₂S₃光导管更为苛刻得多。

寻求光导管^[38]所用的改进的光电导体的工作一直延续到目前，一个例子是CdSe异质结靶。最近也报告了掺As和Te的改进的无定形Se靶^[40]和反偏压的晶态Se靶^[41]。

Crowell及其同事们证实了反偏压硅光

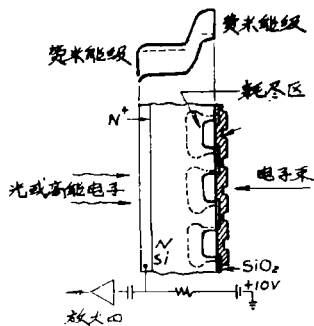


图10 硅光导管靶截面图，表示出在扫描间隔内收集光生空穴的反偏压光电二极管。在SIT增强器管中，同样的靶用高能电子轰击^[43]

电二极管阵列也能作为光导管靶^[42]，这是摄像器件发展的重要里程碑。当然，为了克服分辨率的降低，阵列密度必须很高（每个图象高度1000或更多的二极管）图10表示典型硅靶的截面^[43]，不用冷却硅便能达到适当低的暗电流，这对后来自扫描硅传感器的发展，也是极为令人鼓舞的事实。硅靶甚至比PbO光导管有更高的响应率，特别是对红光和近红外光。它更为可靠得多，能够抗强光和扫描破坏引起的烧伤。硅靶的缺点是，对某些应用，其二极管结构确立了分辨率的上限。在一种特殊的光导管中，用了蒸发的无结构的光电导体^[44]，其分辨率超过10000电视行。

VI 象增强器和低照度电视

与光导管发展的同时，有关光电发射管的工作一直进行着，目的是在最低可能的照度下，达到性能的理论极限。这方面工作的大多数，得到军队的支持，它们需要能在有云的夜间，靠星光照明，来发射可识别图象的摄像管。当然，在储存之前进行图象增强在移象光电摄像管和超正析摄像管中已经应用，但靶的二次发射增益总共只有几倍。理想的是，用多级高压象增强器把被储存的信号增加到初光电发射的散粒噪声超过所有其它扫描噪声源。如果储存前有足够的增益，则返回束中的倍增器或超低噪声放大器就可以不用。早期的多级增强器摄像管利用由荧光屏和沉积在透明薄片背面的光电阴极构成中间增强级^[45]。初光电阴极发射的电子被加速，并成像到中间萤光屏上，结果从第二个紧密耦合的光电阴极上，激起了更多的电子发射。用10000伏的加速电压，获得10—20/级的增益。用两个这种类型的增强级同超正摄像管靶和倍增器迭加起来，低照度性能超过了当时能够得到的任何管子。通过纤维光学面板与摄像管光学耦合起来的单级增强器管^[46]，现在往往用来代替内部增强级。

图象增强的一种方便办法是选择特殊的高增益靶，当用高能电子象轰击时，它能产生增强的电荷图形。SEC 摄像管应用一种多孔 KCL 靶，高能电子在靶中产生内部二次发射增益。一种甚至更好的增强器系统，是用高能电子代替光束照射薄的硅靶。以这种方式使用的硅光导管靶^[44]，在8000V时，提供直至每个光电子2000个电荷的轰击感应增益。不同的公司给这种管子以不同的名称，RCA 的名字是 SIT (硅增强器管)。然而，SIT 管比硅光导管灵敏度的实际增加只是几百倍，因为增强器部分所用的光电阴极的响应率只是硅靶对可见光响应率的五分之一。已经发现，再加一级图象增强级，SIT 管的低照度性能可以进一步改善^[46]。这种称为 I-SIT 的组合很接近于初光电阴极光电发射噪声所确立的理论极限。

Ⅶ 红外摄像管

50年代和60年代，在政府的支持下，各个实验室执行了旨在发展红外灵敏摄像管的广泛的研究计划。RCA以Forgue 为主要研究人员，努力推动最新分出来的称为 IRicon 的红外光导管的发展^[49]，这种管子能对低温物体，如人，进行被动成象，IRicon 的一种类型具有扩展到约 $4.0\mu\text{m}$ 以外的光谱响应，它利用 PbTe 光电导体，为了进行帧储存工作，要冷却到液氮温度。它能够探测景物中大约 1°C 的温差。尽管尚未达到某些非储存机械扫描器的水平，但 IRicon 具有约 $1/30$ 秒的快响应时间，同时在较高辐射照度下，分辨能力近接于普通电视标准。运用冷却的锗二极管阵列靶的红外灵敏光导管已经报告，它们能从环境背景中探测具有 0.2°C 温差的物体。

红外摄像管更新的工作应用了热释电效应，可以在 $8-14\mu\text{m}$ 波段成象，不需要冷却。在这种管子中，光电导体为一种热释电材料薄片所代替，如硫酸三酞钛 (TGS)。

片中的极化随温度而变化^[52]。代替电子束扫描的固体扫描红外成象阵列的发展也受到广泛地重视^[53]。

Ⅷ 单管彩色摄像

50年代，越来越强调彩色电视广播，在普通的三管摄像管中，三只超正摄像管的配准比较困难，发展一种单管彩色摄像管显然是所希望的。在1951年，作者同 Sidney Gray、Harold Borkan、Harry Thompson 及其他人合作，开始了一项旨在发展一种三色光导管的计划^[54]。途径是把一种条形滤光片引到靶上，这种条形滤光片由290组红、绿、兰垂直条构成。对每种原色，选择多层干涉滤光片，因为它们有高的透过率特性，同时其特点与真空管的处理相容。为了制作标准1吋大小的三色光导管，必须发展沉积宽度只有约 15μ 的光学修正滤光片的技术。

因为 NTSC 彩色系统需要每种原色的同时彩色信号，所以考虑了两种从三色光导管中取出信号的方法。所选择的一种方法是把光电导体下面的透明电极分成三组各同每种原色配准的交错电极 (看图11)。虽然这种途径更进一步增加了制靶的困难，但它确实

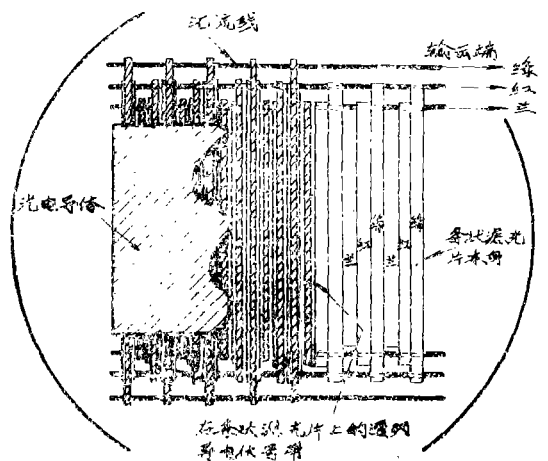


图11 一种早期的三色光导管靶结构，具有870个内部红—绿—兰滤光片条，每种原色，有一个靶输出引线

提供了同时信号，其彩色纯度与电子束扫描精度和电子束聚焦无关。另一种途径应是取出元顺序红绿兰信号，这种信号可以用外部取样线路分离成同时的元信号。我们放弃了后面这种系统，也许是不聪明的，因为我们认为它应该要求额外的指标条，同时感到，用现存的光导管电子束分辨率，不可能获得合适的彩色纯度。

在50年代中期，制成了具有三个输出引线的三色光导管，产生了较好的分辨率，但由于各种原因，彩色纯度不是很适当。总的图象质量和灵敏度比当时所用的三管超正摄影机稍差，因此 RCA 在商业上并没有生产这种管子。最近电子学杂志宣传了应用这种单管三电极光导彩色摄影机的生产^[63]。

后来的单管光导彩色摄影机也应用了管内的垂直色条，但不用分离彩色输出。为了分离信号，发展了改进的单载波和多载波彩色编码系统。尽管这种管子提供了简单、小巧的摄影机，对许多应用给出很好的彩色图象，大多数广播工作者仍然喜欢用三只氧化铅光导管的摄影机，并带有如图 9 所示的分光棱镜和分色滤光片。

分条段的三色光导管靶的制造需要早期发展的精细图形电极技术，作者发现，在后来的薄膜晶体管和积成电路工作中，这种技术是特别有用的。

Ⅸ 自扫描象传感器的初期工作

到1960年，在电视摄影领域中已经感觉到固体革命的开始。这时，摄影机中，摄影管本身是体积最大，功率浪费，寿命短，价格贵的元件。许多人已经想到，集成电路技术，对于用自扫描固体传感器最终代替管子和与之相联的扫描器具，提供了一种合理的可能性。高精度数字寻址系统代替往往发生畸变的扫描电子束光栅的优点，在许多应用中是引人注目的，其中包括彩色电视。一种

低造价的，大量生产的固体传感器能够开发电视的新的应用一事，似乎也是可能的。最终成功的希望很大，以致在60年代初期，RCA，西屋，费尔查尔德及其它地方，在各个政府机关的支持下，都开始了独立的研究。

为了与普通电视的分辨率等同，认识到需要至少有250000个象元，这一点清楚地指出了这条途径的冒险性。当时，一点也不能肯定，硅集成电路技术能否完成所需要的复杂线路。（在1961年，大的集成电路具有25个器件）。硅传感器能否具有所有灵敏摄影器件所需要的1/30秒的电荷储存，当时也不是很显然的。（硅光导管是几年之后才发展的）。

我们在 RCA 实验室，具有薄膜光电导体的先前的经验，使我们有充分理由支持薄膜途径。对我的一个更有力的鼓舞是我的称为 TFT 的薄膜晶体管的最新发明，这一发明，大大改善了制作大面积有源薄膜线路的前景。我特别高兴地考查了这一领域，将这两个课题结合起来的条件是满足的。

然而，其它实验室立即开始了硅的途径，他们开头努力的方向是传感器阵列，而不是积成扫描线路。在莱特实验场空军航空电子学实验室的支持下，RCA 实验室多年来开展了自扫描传感器的研究^[57]。最早部分全部是薄膜，后来逐渐努力扩展到包括硅器件，因为这种技术在工业上变为主导地位。因为 TFT 实际上是 MOS 晶体管的早期形式，所以薄膜和硅这两个途径是密切相关的。薄膜晶体管即可以作成 n 型也可作成 P 型，与之相关的线路都具有它们用硅作成的付本。

最早的而且目前仍然存在的固体阵列扫描途径是把象元排成矩形阵列，用垂直的 x 和 y 寻址条同每个象元接触（见图12）。扫描一般是用与每组寻址条连接的外部数字移位寄存器完成的。来自移位寄存器的脉冲的相合选出了所拾取的象元，视频信号即可从寻址条导出，也可以从公共连接处引出，如基

底。光敏象元的设计存在很大的自由，如图12所示。西屋公司的人应用硅光电晶体管，收集极连到行公共线上，发射极连到列公共线上^[59]。他们发现，图象电荷可以积累到悬空的基极处。费尔查尔德公司的一种早期设计^[60]利用硅 MOS 晶体管阵列，漏极连接到公共列线上，栅极连到行公共线上。图象电荷积累在用作为晶体管源极的反偏压光电二极管处。RCA 的薄膜传感器元是由高增益的光电导体如 CaS-CdSe 与接在行和列公共线间的肖特基二极管串联构成的^[61]。这种类型的象元不适合于电荷储存，但借助于高增益光电导体中的内部激发储存，达到了很高的灵敏度。

在计划的初期阶段，发现我们的薄膜技术能够生产出比迄今为止用硅生产的更大，更为复杂的线路。到1964年，能够在真空系统中用蒸发方法，在半小时内生产一种包括1080个薄膜元件的180级的并联输出移位寄存器^[62]。系统抽空两次，生产出具有 180×180 元的光电导阵列，中心相距 $50\mu\text{m}$ (64000元件)。为了限定图形，将可移动的栅丝蒸发掩膜放在玻璃衬底跟前儿。将含有光敏阵列和两个扫描发生器的三个玻璃衬底联接起来，即完成了自扫描传感器。如图13所示。

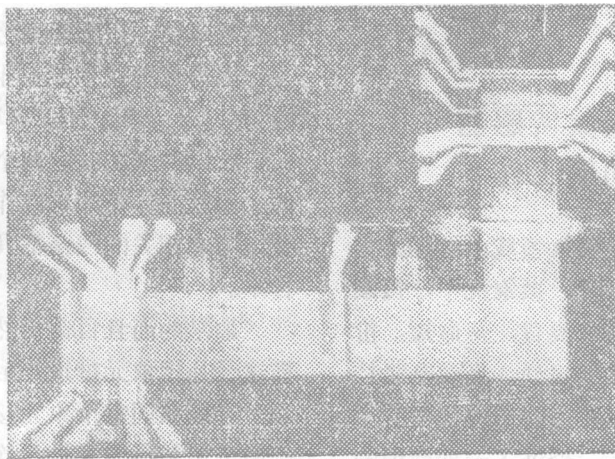
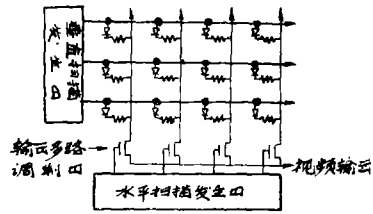
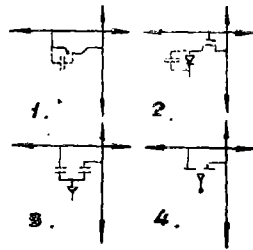


图13 早期的带有扫描用的积成薄膜移位寄存器的 180×180 元的薄膜传感器阵列^[62]

一种早期电源操作的应用 180×180 象元和扫描电路的实验固体摄像示在图19*。视频信号在显示接收机附近发射^[61]。



A. 具有光电导象元的数字扫描xy传感器



B. xy扫描硅传感器元

图12 带xy寻址条的固体象传感器

- (a) 典型的数字读出，具有外部多路信号调制器和光电导阵列^[61]
- (b) 各种类型的硅传感器元。1) 光电晶体管^[59] 2) MOS 光电二极管^[60] 3) 早期的电荷注入光电二极管^[63] 4) 现代CID电荷注入元^[64]

* 原文图19省略

早期的薄膜和硅传感器发射的图象质量，与摄像管和今天的固体传感器相比是很差的。图 20* 表示用 1968 年制作的^[63] 256 × 256 元薄膜传感器发射的图象的质量，较差的均匀性部分是由于制造中的缺陷引起的，部分是由于栅丝掩体的几何不规则引起的。同时代的硅传感器所产生的图象，质量差不多。最初，我们以为，较差的均匀性是数字化的 xy 寻址系统中固有的。不过，后来 xy 扫描技术的改进表明，达到比 60 年代能够指出的性能好得多的结果是可以达到的。

我们的薄膜途径达到了制造和扫描具有 512 × 512 光电象元的 $1\frac{1}{2}$ 吋方形阵列的地步^[65]。到这时，硅的技术对传感器显得更加有希望，因此，我们也考查了这个领域。西屋的人说明了一种 400 × 500 元的光电晶体管摄像机^[66]，但是从一个象元到下一个象元 β 的变化引起了严重的不均匀性问题。费尔查尔德的早期 MOS 途径产生了 100 × 100 元的阵列^[67]，但他们的兴趣后来转到了特殊应用的单线传感器的发展方面。正如所指出的，固体传感器的其次一个重要进展，是由原先没有在这个领域工作的公司发展的。有趣地指出，最初用于固体传感器的薄膜晶体管 TFT，现在，在自扫描显示中用上了^[68]，在这里，器件的面积很容易超过用硅片所提供的大小。

X 固体传感器的新发展

A 用电荷传输进行扫描。

在 1969 和 1970 年报告了两种重要的新器件，使得全新型的固体扫描成为可能。这就是飞利浦公司的 F. L. J. Sangster 发明的斗列电路和贝尔实验室的 Boyle 和 Smith^[70] 发明的电荷耦合器件 (CCD)。这两种器件允许构成简单的能够传输模拟信号的电荷传输寄存器，信号传输损失比较小。斗列电路是由晶体管和电容器的序列构成的，如图 14 的顶部用 MOS 晶体管所表示的^[71]。CCD 寄存器

由一行紧密耦合的 MOS 电容器构成，当用时钟电压驱动时，用来控制少数载流子沿半导体表面的传输。CCD 在概念上是更为大胆的，从电荷传输效率和结构紧凑的观点说，它是比较优越的。图 14 所示的两种集成寄存器的差别主要在于，在斗列电路中，存在扩散孤岛，假如要求门位不多于两个的话，它可以提供电荷流动的方向性。在固体扫描的应用方面，两种器件在概念上是一致的。

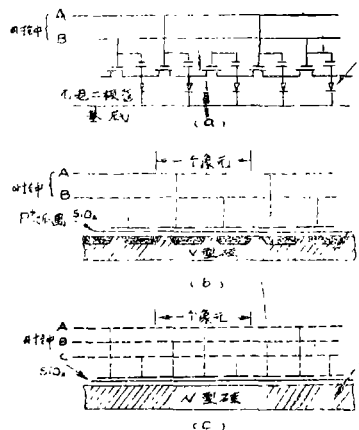


图 14

- (a) 一种 MOS 斗列寄存器的等效电路^[71]
- (b) 集成 MOS 斗列寄存器截面图^[71]
- (c) 三相电荷耦合寄存器截面图^[70]

在能够传输模拟信号的电荷传输寄存器和普通的只能发射 1 和 0 的数字移位寄存器间，必须作出重要的界限。通过简单地使时钟驱动瞬时停止，并按所要求的积累时间直接照明寄存器，电荷传输寄存器可以作为单行象传感器使用。在 CCD 中、与图象对应的少数载流子电荷图形，在半导体表面处的栅极下收集，而在斗列电路中，它们是在扩散孤岛处收集的。图形的读出是通过重新加上时钟电压，使图形向寄存器的末端传输，在这里，依次到达的元电荷包构成视频信号。在传输过程中引进的电荷损失和噪声是很小的。

* 原文图 20 省略

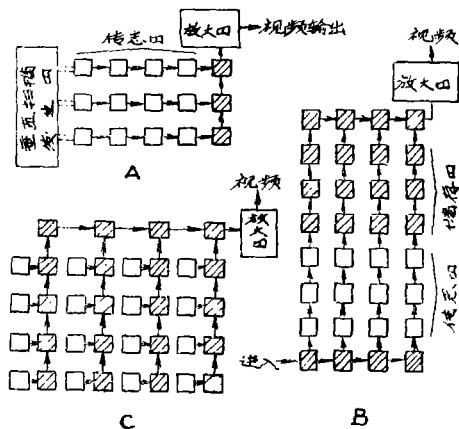


图15 应用电荷传输寄存器扫描的二
维象传感器

- (a) 在一个早期 32×44 元斗列传感器中所
用的水平行传输系统^[73]
- (b) 贝尔实验室最初用的垂直帧传输系统^[74]
- (c) 具有非照明寄存器同时传感器元夹在中
间的CCD传感器

图15表示三种已经用于二维阵列电荷传
输扫描的结构。(a)中所示的是在早期的
 32×44 元斗列传感器中, RCA所用的一种
行传输系统^[72,73]。(b)中所表示的是贝尔实
验室在它们的 128×106 元 CCD 阵列中最初
使用的垂直帧传输系统^[74]。尽管需要制作储
存用的额外的硅面积和稍微复杂的时钟系
统,这种结构仍是相当流行的。C中所示的传
感器是费尔查尔德发展的,具有非照明的寄
存器和夹在中间的传感器元^[75]。这些系统中
的每一个都能达到相当低的噪声,因为集成
放大器输入端的电容无须大于单个象元的电
容。总的扫描噪声小于多路调制 xy 读出的
噪声,如图17所示,在这里,列线加输出线
的总电容大大超过一个象元的电容。具有集
成放大器的 CCD 传感器的噪声,比带有外
部放大器的光导管小得多,因为光导管信号
板加上其输出引线的电容可以比 CCD 寄存
器的输出电容大一百多倍。

具有直到 496×475 元的实验 CCD 传感
器已经报告^[76]。图23* 表示 RCA 固体部制造
的两台应用 512×320 元 CCD 传感器的商业

摄像机^[77]。用这种传感器,在一个实验室设
备中发射的图象示于图24*。

电荷传输扫描的优越的噪声特性曾经使
我们联想到,应用具有分布式低噪声放大
器^[78]的冷却的 CCD 传感器应能达到象增强
的摄像管,如 I-SIT 的低照度性能。现在,这
样的性能能否在不进行像管子所要求的那种
事先图象增强的 CCD 中达到,显然是可疑
的。用高压电子像入射于背面减薄的 CCD
(就像 SIT 管一样) 现正在研究中^[79]。

B 电荷注入传感器 (CID)

1973 年,通用电气公司的 Michon 和
Burke 描述了一种新型的 xy 寻址硅传感
器^[64]。这种传感器以他们称为“电荷注入”
的新方式工作。虽然如图 12(B3) 所示的电
荷注入传感器的早期形式已经被描述^[63], 但
Michon 和 Burke 结构的新的特点是在每个
象元中加进了电荷传输。图 16 表示由两个
MOS 电容器紧密耦合构成的单个象元的截
面图,其中一个电容器接到行公共线上,一
个接到列公共线上。扩散 P⁺ 二极管只是为
了改善每个电容器下的半导体阱之间的耦
合,如果栅电极间距很近,它是不需要的。
工作中,在积累期间,由吸收的光放出的少
数载流子(空穴),在每个电极下的半导体表
面收集。如果把某些电极分别正向偏置到堆

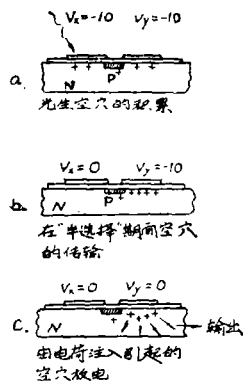


图16 通用电气公司的 Michon Burke 描述
的电荷注入传感器工作的截面图^[64]

* 原图23、24省略

积状态,则在那个电极下储存的少数载流子就简单地进入临近电极的耗尽区。然而,如果两个电极同时变为堆积状态,则储存的少数载流子除了注入到基底,因而通过复合使象元放电外,什么地方也去不了。此时,视频信号即可以从寻址条引出,也可从基底引出。CID的一个独特的特点是,如果希望的话,在注入之前,图象电荷可以非破坏性的读出许多次^[68]。

带有比图16更复杂些的靶结构的电荷注入传感器,直到 188×244 元大小,已有商品出售^[61]。灵敏度、惰性和亮区超载“晕光”对许多应用都是相当满意的。CID传感器的一个重要贡献是证明带有xy寻址条和外部数字移位寄存器的阵列可以具有很好的均匀性,即远比图20*所示的关于这种扫描的早期结果要优越得多。因此、在不需要尽可能有最低扫描噪声的那些应用中,它们可以代替CCD。具有xy寻址条和边缘寻址电路的阵列可以进行无规则扫描,而内部扫描的CCD传感器则限于顺序扫描。用边缘电荷传输寄存器扫描xy阵列的方法也已提出,这种方法保留了内部扫描CCD寄存器的某些噪声优点。对大多数应用,CCD和CID的最终选择可能由经济问题决定,因为在正常照度下,两者都具有好的性能。对于很低照度下的应用,如果运用高压增强级,则噪声的差别可能不是很重要的。

XI 讨 论

尽管过去五十年有了巨大的进展,现代摄像器件中的许多仍是不适宜,不方便或过

于昂贵的。对于这个问题,两种本质上不同的技术都只是部分的成功。无疑,其它技术也将有它们的问题。

摄像器件继续研究的推动力仍是很强的。军队和防务机关将继续对改进低照度传感器和红外传感器感兴趣。简单的、便宜的自扫描传感器可以使电视在许多消费者和工业方面的应用增加。等待已久的电子摄影时代也可以应用一个与简单的视频记录器结合在一起的固体传感器。不论CCD还是CID都将很好地满足这种应用,倘若它们能够以足够低的造价作出的话。为了与差不多图象质量的光导管竞争,必须将它们目前的造价降低大约两个数量级。对于这种复杂器件本身所预期的积成电路造价降低的能力还有待证明。

虽然四十年来,电视摄像器件的工作规范本质上相同,但新的系统要求可能需要全新的途径。恰如早期的摄像管导致模拟储存管^[11]一样,电荷耦合成像器的发展已经引出一些复杂的新型的储存和信号处理器件^[13,38]。显微信息处理机和图象拾取之间的可能很强的相互影响还没有考查。事实上,对这些工作者而言,图象拾取的挑战就像1942年的刺激一样。

译自 IEEE Transactions on
Electron Devices Vol
ED-23 No 7 (1976)

贾欣志 译

注* 原图号重编图 2、3、9、12、15、19、20、23、24,均略去。