

慢扫描二次电子导电（靶） 光导摄像管系统

这里叙述的是一个慢扫描二次电子导电（靶）光导摄像管（SEC）系统。这个系统被联到 Kitt Peak 国家天文台的 152.4 cm（60吋）McMath 望远镜上。为了用光学方法把立式摄谱仪联结到该摄像管系统上，采用一个图象变换透镜系统。整个摄像管系统的分辨能力是 55 mÅ，而摄谱仪本身的分辨能力就达 50 mÅ。用实际的观察结果评定该系统性能。

I 引言

近年来在天文学上用电子成象装置来积分低光平信号已经得到普及。特别是，已经研制了具有长积分时间能力的灵敏的 SEC 管并应用到天文工作之中了。在使用这种探测器的早期工作中，若干问题妨碍了这种应用，如电子束在靶上非均匀上靶以及存在残余图象。然而，这些缺点现在已经由改进了的操作程序克服了。已经报导具有 1% 精度的定量结果，而且在单次曝光中，能获得优于 5% 的精度。在这篇论文中我们报导一个采用西渥 WX-31958 SEC 管作为探测器的实验“慢扫描，积分”电视系统。为了精确地记录用于天文观测的低电平信号，设计了这个光导摄像管系统。

在第 II 部分中我们提供该系统的技术详情。第 III 部分描述这个系统对在高色散情况下，观察天体光谱的 152.4 cm（60吋）McMath 太阳望远镜的立式摄谱仪的适应性。在第 IV 部分中，我们讨论图象变换光学传输系统，该系统把光谱图象与光导摄像管的图象格式匹配起来。第 V 部分在评价该系统的性能中讨论一些观察结果。在第 VI 部分中，我们讨论在实际操作望远镜上的二次电子光导摄像管系统时遇到的各种问题。

II SEC 管系统的技术详情

SEC 管的原理和它的操作以前曾由其它作者讨论过。西渥 WX-31958 SEC 管具有一个磁聚焦的光电阴极成象部分。这个光电阴极在相对于靶为 7.4 kV 的额定电位下工作。靶由低密度的 KCl 组成并具有 2.5 cm × 2.5 cm 的激活表面。增益约为 50 时，靶的有用工作电压范围略低于 15 V。在低光平应用中，由于前次曝光以及在靶的低光区域非均匀电子束上靶造成的潜象，使得 SEC 管受到污染损害。为了克服这两个问题许多研究工作研制了操作程序的标准化序列。为着手进行一次曝光和读出程序，在这个系统中我们采用的操作程序包括下列步骤：（1）消除由于先前曝光残留的图象；（2）靶准备；（3）施加适当的光电阴极电位来曝光；（4）读出信号。

第（1）步，使靶电位降低几伏，于是电子束在随后的扫描期间散焦。为了达到平衡，在几个内部管电位需要的一段延迟时间之后，在光电阴极处于工作电位下给它提供足够强的光，以使靶饱和。然后发生一系列快速扫描以提取饱和信号。在第（2）步期间，电子枪聚焦场被恢复并且靶电位上升到零点几伏， ΔV 低于在读出步骤（4）强加

于它的电位。然后靶被扫描几次以保证适当的充电。 ΔV 的值由特殊的调定决定, 一般地是在0.3V到0.6V之间。由于在扫描电子束中电子的热能扩散 (~ 0.3 电子伏特), 在步骤(4)靶压的这个增量是必要的。增加的靶压 ΔV 保证了总有足够的电子能上靶。尽管这个操作有可能增加少量背景噪声, 然而均匀电子束上靶的优点却比其它问题重要。

在该系统中, 四个操作阶段由表1概述

的16个步骤组成。根据各自的需要和工作条件, 把四个阶段细分为若干步骤是有点任意的。在通用的系统中, 这些时序步骤由一个硬拉线程序装置来自动地完成。对于程序设计的多样性来说, 显然最好选择微型电子计算机。然而, 一旦决定了适当的程序, 硬拉线程序装置就具有重量轻, 成本低和可靠性较高的优点。在微程序技术商用之前, 该仪器就制造出来了。

用模拟(连续)行扫描和数字(分段)

表1 二次电导管系统的操作步骤

功 能 步 骤	擦 除		靶 准 备				曝 光				读 出						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
程 序 表																	
扫描速率/电子束强度 <i>a</i>	<i>F</i>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	<i>F slo</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>slo</i>		
扫 描 状 态 <i>b</i>	<i>Sc</i>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	<i>Sc</i>	<i>no</i>	<i>no</i>	<i>M</i>	
扫 描 尺 寸 <i>c</i>	<i>O</i>	.....	.....	.....	.....	<i>O N</i>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	<i>N</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>N</i>
扫 描 电 子 束	断开	接通	.....	.....	.....	接通	断开	断开	接通	.....	.....	.....	通	断	断	通
扫 描 电 子 束 聚 焦 <i>d</i>	-- <i>L</i>	<i>L</i>	.....	.....	.....	<i>L</i>	\rightarrow <i>H</i>	<i>H</i>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	<i>H</i>
光 电 阴 极	断	通	通	通	断	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	断	<i>M</i>	断	断
擦 除 光	断	通	通	通	断	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
靶 电 位 <i>e</i>	\rightarrow <i>L</i>	<i>L</i>	.....	.....	.....	.....	\rightarrow<i>Med</i>	<i>Med</i>	.....	.....	.....	.....	<i>Med</i>	\rightarrow <i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>
系 统 状 态 <i>f</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>

- a. *F* = 快扫描和高电子束强度, *slo* = 慢扫描和低电子束强度, *x* = 不相关
- b. *Sc* = 自动地扫描起始, *M* = 手控起始。
- c. *O* = 全扫描, *N* = 正常扫描。
- d. 扫描电子束聚焦由 *EG3/EG4* 控制。在低(*L*)电场下没有聚焦, 在高(*H*)电场下提供聚焦。
- e. 高(*H*)电场和中等(*Med*)电场之间的电压是 $\Delta V = 0.3 \sim 0.6V$, 在中等(*Med*)和低(*L*)电场之间的电压是 $2 \sim 3V$ 标称的高(电场)状态下的电压是 $10 \sim 12V$ 。
- f. *R* = 自动循环, *M* = 人为地控制循环。

帧扫描来完成信号读出。采用连续行扫描是为了简化在脉冲束式操作中涉及的设计问题。当每行均被扫描时, 就在1024个等距离间隔上采样信号并使之数字化。于是该数字数据(12比特分辨率)就被存储在缓冲存储器中并传送到数字磁带记录器上。在每行的信号被处理完后就进行另一行扫描, 等等。

行扫描和帧扫描斜坡信号是由一晶体控制时钟信号产生的。在慢扫描方式中, 行扫

描周期是16.7毫秒(相应的频率是60Hz), 而每一行扫描的起点都与60Hz交流电源的零交叉点同步。为了避免把电路中的小的污染交流信号放大, 特别是当一数字磁带记录器被用来记录这些信号时, 我们发现这种同步是必要的。因为大多数磁带记录器的记录速度比该系统的直接读出速度慢, 并且干扰容易由于来自交流线的失相噪声引起。

在该慢扫描方式中, 时钟频率是

61.440Hz 这个频率与 Princeton 系统的频率相同，并被选作 $1/f$ 散粒噪声和 Johnson 噪声 ($\sim\sqrt{f}$) 之间的折中值。在大多数操作中，我们选择一个包含 740 条线的光栅扫描。在我们的应用中，这种选择是方便的，值得注意的是，Lowrance 和 Zucchini 曾报导过，适当地选择偏转线圈扫描装置可以在 1000 线光栅下给出足够的分辨率。应用 D/A 变换器时，行扫描和帧扫描斜坡信号可由时钟信号产生。行斜坡信号是由一个 10 比特 D/A 变换器得来的。偏转放大器的频率响应有助于克服比特—比特步进跃迁中所有的不均匀性而趋向平滑。然而在帧扫描中我们发现，这种不均匀性可能得到强度不等的信号。为了纠正这一点，采用一个 16 比特 D/A 变换器来提供一个精密的斜坡。比特—比特不均匀性减小到 $1/2^6$ 。

予放大器包括一个采用选择的 Teledyne Philbrick 调幅 101 B 型场效应晶体管运算放大器的输入级，其反馈电阻为 5000 M Ω 。在初始予热之后，这个放大器就显得增益相当稳定，并且在 20 KHz 时噪声大约是 5 pA，在靶增益为 50 的情况下，这相当于每个像素有 16 个光电子。对于予放大器的设计来说，这不是最佳选择，但却是方便于应用的选择。

为了提供地址数据计算能力，连接一个磁带阅读装置，于是来自任意行扫描的信号都能被显示或标绘在绘迹器上。而且，Alden 9279 A 型印刷机已用于该系统，因此在曝光之后，能够立即获得中等质量的中间色调正片。在一些应用中，我们还采用了在 Kitt Peak 国家天文台由 P. R. Vokac 建造的数字扫描转换器。

III 把该光导摄像管系统连接到 McMath 望远镜上。

尽管这个摄像管系统能适于任意能承担约 20 kg 重的摄像机头的望远镜，可是在 Kitt Peak 国家天文台我们最经常地还是把它用

在 152 cm (60 吋) McMath 太阳望远镜的立式摄谱仪上。

在 60 年代初，McMath 望远镜就制造出来了。其设计功能是用最高光谱分辨率来观察太阳。主摄谱仪提供了高分辨率：在第七光栅级，照相孔处弥散是 11 mm/ \AA ，实际上无论是应用照相还是在我们的工作中都达到了 50 m \AA (线性标度是 0.55 mm) 的分辨能力 (在半最大值时满刻度)。

这个望远镜的主镜具有 $f = 56$ 的长焦距比率。为了把它有效地用于天体观测，图象限制器装备有主摄谱仪。一个星光谱的合成图象假定在照相孔处是 2 cm 限定高意，那么在分辨能力为 50 m \AA 情况下，一个可分辨元对应的尺寸就是 0.55 mm。我们的系统中一个像素的线性尺寸是 0.025 mm (25 μm)，并且在 1000 电视行分辨率情况下，SEC 管的典型传递函数约为 50%。为了匹配摄谱仪的分辨能力并提供足够的波长有效范围，我们选取一个 5:1 的缩小因子，这个缩小因子对 50 m \AA 的分辨能力给出 0.11 mm 比例因子。因此无限窄带宽中的一行将具有 4 个像素半最大值时的满宽度。在这样的缩小因子情况下，原则上总计 14 \AA 能被 2.5 cm 靶复盖。然而我们决定避开靶边并选择大约总共 9 \AA 的波长有效范围。这大都由用在传输光学系统中的场透镜尺寸 (直径 10 cm) 来决定。在照相孔处光谱图象被复盖的面积大约是沿弥散方向 (水平方向) 10 cm 乘垂直方向 2 cm。应用球面传输光学，简单地缩小就得到一个 2 cm \times 0.4 cm 的图象。如果沿着扫描光栅调准垂直方向，那么 2 cm \times 0.4 cm 的图象将对应于 120 条扫描线，其中每条线都携带相同的信息。设 N 代表落到 m 条线中相应的像素上的携带相同信息的光子总数。设读出噪声为 p /像素，那么总的噪声是 $\sqrt{N + mp}$ ，得出信噪比 $s/n = N/(\sqrt{N + mp})$ ，于是，减少由光谱复盖的行数 (即把光谱集中到更少的行数上) 就增加了信噪比，直到 $\sqrt{N} \geq mp$ 为止。另一方面，由于考虑到靶污点和其它

噪声,也希望相同的信息能扩展到尽可能多的行数。最后,由于实际原因,我们选 m 值为14。这个 m 值给出, $\sqrt{N} \sim mp$,假设每个像素的光电子的数目是1000(大约是饱和值的一半),那么读出噪声是每象素大约为16个光电子。

因此我们需要一个传输光学系统,其水平缩小因子为5而垂直缩小因子为43。我们已经设计并制造出来一个这样的系统,这个系统将在下一部分充分讨论。可以指出,由于摄谱仪的再次成象光学系统的聚焦比率为56,我们的传输光学的图象输出在弥散方向上其聚焦比率实际为12,而在垂直方向上聚焦比率仅为1.4。

图1表示设置在摄谱仪箱上的整个光导摄像管。在望远镜调整到自动准直位置时,该光学系统靠一激光束调准。这个自动准直方式也允许采用标准灯来进行相对强度和绝对强度定标。这是在许多其它望远镜中无法利用的优点。

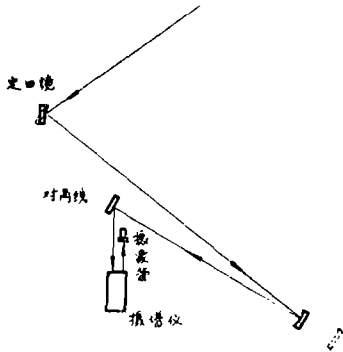


图1 McMath望远镜的光路示意图,虚线位置用来自动地把校准光源引入光学系统。

IV 图象变换传输光学

在第III部分中提到的传输光学包括圆柱形和球形透镜并且能再次成象从照相孔来的最初图象。照相孔的正交缩小比率为 $5:1 \times 43:1$,该光学系统的示意图示于图2。 L_1

是焦距为 f_1 的负圆柱形透镜, L_2 是焦距为 f_2 的球形透镜,而 L_3 是焦距为 f_3 的正半圆柱形的透镜。

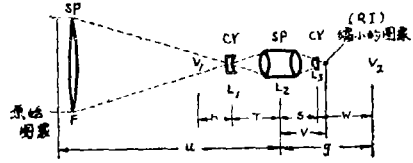


图2 所描述的变换光学系统的示意图。弥散是在与图面垂直的方向上。在水平方向上的原始图象 PI 不受圆柱形透镜(CY)的影响,而由 L_2 成象形成转换图象 RI ,如图所示,物距为 u ,象距为 v 。在垂直方向上,原始图象由 L_1 (负圆柱形透镜)再次成象在 V_1 形成一个虚象,然后,这个虚象由 L_2 再成象在 V_2 形成一个实象。 L_3 把 V_2 处的图象引到 RI 处。

圆柱形透镜由它们的圆柱轴沿着弥散方向调准,以便它们在水平方向上对图象没有影响, L_2 的物距 u 和象距 v 由常用公式 $u^{-1} + v^{-1} = f_2^{-1}$ 确定,缩小比 $= u/v$,圆柱形透镜如此间隔,以便聚焦条件在两个正交方向均被满足。首先假设所有的透镜厚度均可忽略。于是下列方程式就象图2所规定的的那样,把不同透镜参数联系起来来了。

$$\begin{aligned}
 u^{-1} + v^{-1} &= f_2^{-1}; \\
 u/v &= k = \text{缩小比率}; \\
 (u - T)^{-1} + h^{-1} &= f_1^{-1} (f_1 < 0); \\
 (h + T)^{-1} + g^{-1} &= f_2^{-1}; \\
 g^{-1} + W^{-1} &= f_3^{-1}; \\
 s + w &= v.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

这些方程由代入下列参数求解: u ; f_1 ; T ; f_2 ; 和 f_3 。给定缩小比率时, u 就固定了,而各 f 数都是事先确定的透镜参数。这样就剩下 T 成了唯一随便变化的参数。可以证明,垂直缩小比率与 T 几乎无关,但却取决于 f_3 ,正如图3所表示的那样。

各 f 数之间的比率决定该系统的光学特

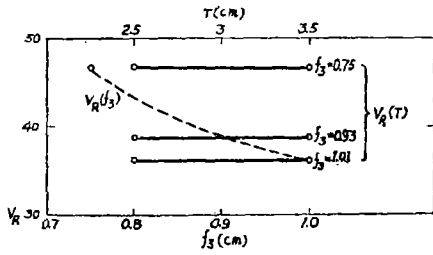


图3 作为 T (见图2) 和 f_3 的函数的垂直缩小比率 V_R

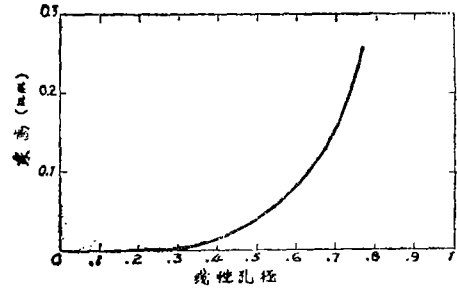


图4 作为线性孔径比率的一个函数象高度。(用在垂直方向上的半球形透镜部分)

性, 同时任意一个 f 值都决定着该系统的物理尺寸。为了避免过大的光学传输系统或复杂的难以制造的圆柱形光学结构, 我们对 F_2 选择一个 $F:2$, 50mm 的 Nikon 透镜 (HC 型) 在感兴趣的波长 (3900\AA) 处, 它的多层镀膜有约 80% 的透过率, 而其线性和分辨率特性相当令人满意。中等成本是其另一优点。根据几个光学制造者的意见, 深度弯曲的圆柱透镜 L_3 有制造方面的问题, 因此我们最后选取了一个半径为 0.68cm 的半球形棒。这种玻璃的折射系数是 1.67, 这就给出一个 $R/(n-1) = 1.01\text{cm}$ 的焦距。根据最后的调定, 可以算出结合的垂直缩小比率在 36 和 42 之间。用经过调焦移动 Nikon $F:2$ 透镜改变 L_2 和 L_3 之间的距离来达到聚焦。

强弯曲的圆柱形透镜 L_3 具有一些与其有关的圆柱形畸变。人们发现最佳的结构是平面一侧面向图象的结构。而聚焦面仅距透镜平的表面 6mm 。对于这个结构为 Hp-65 电子计算机编制了一个简单线扫描计算程序。假设入射线是平行的, 这是个不坏的近似。我们发现, 圆柱形透镜的线性孔径可用到 75%, 同时散焦垂直图象不大于垂直图象的设计宽度。在实际使用中, 仅大约 50% 的线性孔径被利用。而且如果在垂直方向上调准光谱特性, 那么畸变只能延长垂直图象, 而不损失弥散方向上的分辨率。图 4 表示作为线性孔径函数的点图象的计算高度。

V 在 Mc Math 望远镜上测试的结果

曾在 Mc Math 望远镜立式摄谱仪的摄象孔处做过包括传输光学在内的整个系统的测试。做过下列测试:

(1) 圆柱形畸变。传输光学系统旋转 90° 以便扫描线垂直于弥散方向。一条激光束由望远镜自动调准并引入摄谱仪, 于是就记录了合成光谱。图 5 表示光谱高度的轮廓图。在轮廓图峰值处的不规则性对应于 KPNQ 图象限幅器的结构元素。轮廓图一端的小过冲仅仅反映了记录笔的特性。

注意, 在主轮廓之处没有可见的信号。每一翼上轮廓的下降都是相当突然的, 在 5 象素内达到零强度。这表示, 圆柱形畸变是可忽略的。

(2) 整个系统的分辨率。在这项测试中, 传输光学系统是定向的, 因此扫描线与弥散的方向平行。随着望远镜自动校准, 激光的光谱被再次记录。图 6 表示关于各个象素的光谱分布图。可以看出在半最大值处满宽度包含 4—5 个象素用太阳光谱和钨光谱详细分析分辨率, 得到在半最大值处满宽度总共 55\AA 的分辨率。这应该与立式摄谱仪的 $50\text{m}\text{\AA}$ 的设计分辨率相比较。

(3) 天体和太阳光谱的实际观测。我们已经用这种仪器进行了许多天文观测。这

些研究结果正在别处发表。这里，我们将通过把单视频扫描线的轨迹与以前一些作者确定好了的结果进行比较来举例说明该系统特性。图7表示一个采用这个系统获得的在3883 Å处靠近CN光谱带头的太阳光谱的单行视频轨迹，同采用相同摄谱仪和望远镜获得的同一光谱区的光电扫描相比较。在我们的工作中，摄谱仪用在单通路型中（具有衰减因子1000），同时，为了避免散射光，光电扫描用在双重通路型中。图8表示太阳Ca II K线的单行视频痕迹同光电扫描迹相比较。图9表示Arcturus星的Ca II K线的单行视频痕迹，曝光时间为15分。为了进行比较，也画出了在相同光谱区域中Griffin的结果。采用2.5m（100英寸）望远镜时，Griffin报导的曝光时间是159分。当考虑孔径差而不考虑摄谱仪差时，采用直接照相法的增益大约是31。事实上，当我们用于天体工作时，KPNO太阳摄谱仪相当慢。（与效率可高达50%的分级光栅摄谱仪相比较，在第七级中其光栅效率只有4%）。

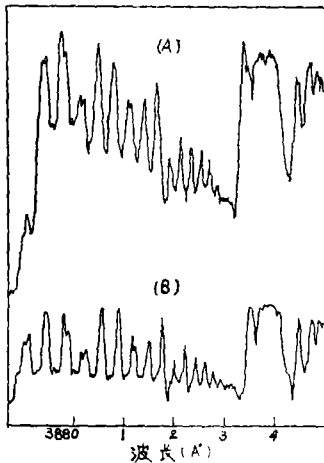


图7 在3883 Å(A)处靠近CN光谱带头太阳光谱的一个典型单线视频扫描迹与采用双重通路型(Kitt Peak Atlas)(B)时，用光电扫描同一光谱区域获得的视频扫描迹相比较。注意，在我们的系统中，在一条光谱中大约有12~16个视频扫描迹。

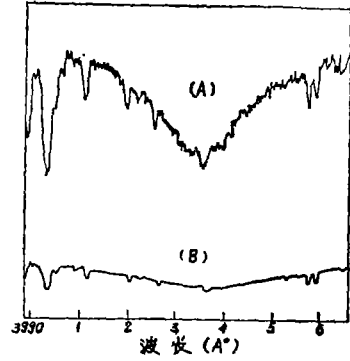


图8 太阳Ca II K线的单行视频迹(A)，同光电扫描迹(B)相比较。

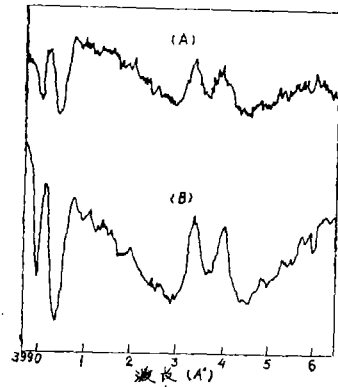


图9 Arcturus星的Ca II K线的单行视频迹(A)，与Griffin得到的光谱(B)比较

从各方面说，电视数据看来要比光电数据有更多的噪音。不过，电视数据是单线视频数据。由于整个帧大约有16条视频线，当处理整个帧时，信噪比大致被改善4倍。确实，经过处理的数据大约具有与光电数据相同的信噪比。

VI 讨 论

尽管SEC管具有长曝光时间，低光平积累，我们还是愿意指出在我们操作该系统期间所遇到的一些问题。

已经引用SEC管的四个极限：低靶增益（大约50）；靶颗粒噪声；非线性响应；低的靶存储能力（大约每象素2000个光电子）。

在我们的实验中，低靶增益的问题现在已经逐步通过改进电子元件和改进予放大器的设计予以克服，探测阈在每个象素大约10个光电子。靶颗粒噪声通常相当于或少于予放器的噪声（见下面）并不显著地表露出来，除非几帧迭加在一起。甚至在数据变换过程中，它可能被除去。同样地，非线性响应能通过数据处理和相应的校准而被除掉。存储能力问题可以通过采用外部大量存储装置（象园盘存储器）来解决。另一方面，我们确实发现与各个管子有关连的三个问题。（甚至在同一时间生产的同一批管子的特性也不一样。）

（1）颤噪声。对WX31958管在60Hz行扫描频率时，靶的谐振频率大约是1500Hz。有时谐振是确定的，并且有些管子对颤噪声比其它管子要敏感得多。当管子光电阴极窗被定向冷气流冷却时，或当周围有机械振动时，这种情况更严重。然而我们已经发现，如果读出从一行到另一行被中断（例如当把输出记入一个数字磁带记录机时），颤噪声趋向于被衰减。

颤噪声是由靶的激励和在偏转场旁的网结构（它们由磁性材料做成）引起的，特别是在扫描的回扫期间。当结构的谐振频率接近偏转频率时，就能引起颤噪声。然而，用中断偏转的办法（当把信号写入数字磁带记录器时），振荡可能被阻尼，因为干扰在行周期的谐波处没有排除。

（2）过度的靶颗粒噪声。尽管在原则上靶噪声可以由数据变换消除，但仍希望它尽可能小。我们已经发现，在一些管子中，当靶压超过12伏时，过度的噪声（大约是予放器噪声的2—3倍）就出现在曝光区域。减小靶压到10伏或更低些，势必减小靶噪声。有些管子确实具有较小的靶噪声。有些管子确实具有较小的靶噪声。

（3）暗噪声。对于由具有低红特性的复强碱材料组成的光电阴极，暗噪声在低于30℃温度时通常可忽略不计。然而我们已经发现，在三强碱情况下（S-20光电阴极），暗噪声限制曝光，除非光电阴极被冷却到0℃或零下。有些管子在用过几小时之后，呈现了由于过度暗噪声造成的光电阴极的永远分离的区域，这种暗噪声不能靠冷却消除。

最后，我们相信，在SIC管的极限范围内，它是在低光平积分应用中用适度冷却的方法能具有高分辨力的唯一可用的视频管。据我们看来，最严重的问题是，没有上面列举的三个问题（起码后二者）的优质管子的产量相当低。摄象管工业的实际经验表明，合乎质量要求的管子生产率仅仅10%。鉴于低光平成象的重要性，或许应做协调一致的努力，以便增加优质管的产量。

译自Applied Optics Vol. 16, No 1

1977 P237~243

（梁玉华 译 黄康卿 校）

注：图5、图6省略