

# 微光夜视——夜战的眼睛

李朝木

(南京电子器件研究所,南京 210016)

本文叙述了微光夜视仪器的性能及应用,详述了现有夜视器件的工作原理及其存在的问题,并提出了发展方向。

## 一、克服人类的夜视障碍

人眼在正常条件下是一个高灵敏、细分辨和快响应的多功能优良器件。白天,人眼能分辨  $0.15\text{mrad}$  的高反差目标。但是在微光条件下,眼睛就只具有非常有限的性能,即看不远、分不清和响应慢,只能分辨  $15\text{mrad}$  以上的目标。因此,人们一直致力于研究人眼如何在夜间见到周围景物<sup>[1,2]</sup>,克服茫茫黑夜所造成的黑暗障碍,达到使人眼昼夜通明可见的最终目的。

夜视技术是建立在物理学、工程光学、电子学、电子光学、仿生信息科学、生物视觉光学以及红外线、热成像、激光、半导体光敏材料和光电器件等现代科学和技术手段的基础上发展起来的新技术。由于宇宙的规律和人类生活环境、生活习惯的影响,人在强光(白天)下有相当的视觉探测能力,而不适应黑夜活动。但是,社会的发展有战争,需要夜间活动,因此微光夜视技术对于军事和国防有着特别的重要意义。例如,微光夜视仪器已成为部队需要的常规装备之一。它能使部队适应夜晚黑暗环境下,不须用人工照明就可以在黑夜看清目标和景物,获得夜间行动和作战的自由。

除上述战争上的应用之外,微光夜视技术还应用于天文学、高速现象的记录、特殊核物理记录、医学诊疗、海洋探查、导航、动物学、冶金、地质学以及交通管理等。在工矿和交通部门从事夜间野外作业或在浓雾中或在严格的灯火管制下从事各种工作的人员,更渴望配上夜视眼

镜。下面仅就夜视仪器的种类及像管的工作原理作一介绍。

## 二、微光夜视

所谓微光,就是夜间微弱的天然光(仍属可见光范围)。根据实验测定,在漆黑的夜间,地面照度可低到  $10^{-4}\text{lx}$  (办公室工作时所需要的照度为  $20-100\text{lx}$ ) 以下,所以“漆黑”也并非绝对无光。这是因为虽然没有月光和星光,天空总是存在着自然辉光。然而,如何将微光所形成的目标景物像充分增强,使它变得十分明亮,能被人眼看清,这就是微光夜视所要解决的问题。因此,微光夜视技术也叫做像增强技术。夜视仪的核心元件是像增强器,如图1所示。它可实现“光—电—光”的转换,其原理是:像增强器的光电阴极接收来自物空间的辐射照度,辐射照度强弱分布在光电阴极面上,光阴极就被激发出光电子,其强弱分布与原先输入的光像的光照度强弱分布相对应。在光电阴极和阳极之间加一电压,然后光电子经聚焦在荧光屏上形成输出的可见图像,供人眼观察。这主要是把微弱的光充分放大,达到在  $10^{-3}\text{lx}$  照度下也能正常工作。由于微光夜视利用的是月光、星光和天然辉光等夜天光,不需要人工光源,因而能充分保持其隐蔽性,不易被敌方发现。

微光夜视仪的性能与白天使用的目视光学仪器大致是相同的,如视距远、图像清晰、分辨率高、视场大,放大倍率适当、体积小、重量轻和稳定可靠等。它们在构造上所不同的仅在于微

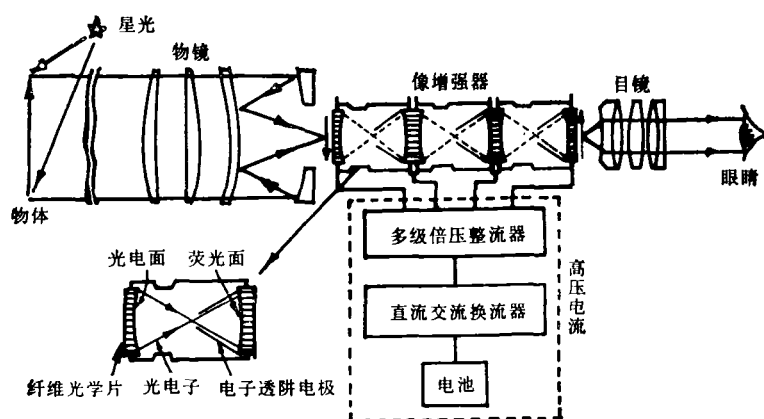


图 1 微光夜视仪的原理图

光夜视仪要具备利用像增强器和将微弱的夜天光充分放大的装置。微光夜视仪，实际上相当于一具夜间望远镜（具备双目系统或单目镜），它是对无穷远的物体成像。当然，根据各种使用条件和不同用途，夜视仪也可以调焦于不同距离上，这在仪器结构上是很容易实现的。

微光夜视仪的生产已经趋向于组件化、系列化和标准化。在军用上的微光夜视瞄准镜，可在  $10^{-6}lx$  照度下工作，而且还可以迅速地更换镜头和有关组件，兼容观察、瞄准和测量等多种性能，适用于多种武器。

### 三、微光电视

由于军事上有提高夜战及全天候的战斗能力的需要，所以不断有研制的新式仪器问世，以适应这种要求。众所周知，光靠特别配备的大型武器系统还不够，还须靠所属的配件或特殊子仪器，通过它们可以至少部分地克服那些坏天气或夜间“障碍”的影响，以便进行 24 小时的昼夜战斗。夜视技术中颇受重视的是被动式仪器，微光电视就是其中之一。

随着电子成像系统的发展，图像的清晰度与摄像机的灵敏度都有很大进展。1970年美国在地球资源卫星中使用了分辨率高达 4500—10000TVL(电视线)的回束电视摄像管(RBV)；同一时期，美国的阿波罗登月飞船里，应用了灵敏度高达  $10^{-4}lx$  的 SEC 摄像管以及微光彩色

摄像系统。这种靶的摄像管称为二次电子传导摄像管 (SEC)，它是利用光电子产生二次电子传导作用进行电子增强的。其结构如图 2 所示。

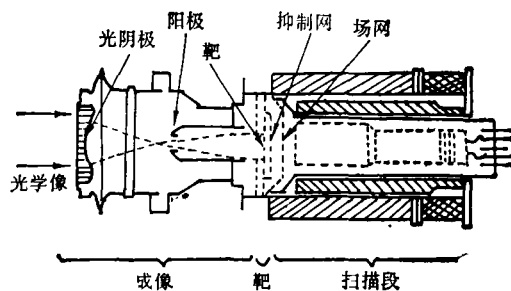


图 2 SEC 摄像管和聚焦线圈的示意图

二次电子传导摄像管由成像段、KCl 靶和扫描段三个部分组成。从光阴极到靶的成像面的部分称为“成像段”（把光阴极上的光学图像转移到靶面上，产生二次电子图像）。KCl 靶有三层<sup>[3]</sup>，第一层是  $Al_2O_3$  膜，起机械支撑作用，厚 500—700 Å；第二层是金属铝膜，加有正电位，起信号板作用，厚 500 Å；第三层是在电子轰击下能产生传导二次电子的 KCl 层。KCl 是在氩气中蒸发形成的，因而呈疏松的纤维状态，其密度只有固体的 1—2%，厚约 15—20 μm，其余 98—99% 都是真空。扫描段：在慢速扫描电子束的作用下，靶的扫描经常稳定在零电位，因此靶的两端承受着一定的靶电压。

实用中，SEC 管普遍采用金属网代替

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 来支撑 KCl 薄膜。因金属网的热容量比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 大, 传热性能较好, 所以可使靶面升温减慢, 避免靶因强光照射电流过大而击穿(烧伤)。

当从光阴极飞来的被加速的光电子打到 KCl 靶上时, 在靶内产生二次电子。实验证明, 在加速电压为 8kV 时, 二次电子增益很高; 如大于 8kV, 因部分光电子穿透靶不产生二次电子, 而使增益降低; 如低于 8kV, 则又使部分光电子没有足够能量穿过 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al 层。如此, 当加速电压为 8kV 时, 约有 2kV 左右的能量损失于穿透 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al 层, 还有 2kV 左右穿透 SEC 靶而未发挥作用, 其余 4kV 左右的能量被靶吸收。该靶大约每消耗 30eV 可产生一个二次电子, 因此 4kV 的电子将能产生 120 个二次电子, 其中仅有一小部分被复合。这些二次电子在靶电场的作用下流向信号板, 在靶上留下一个正电荷图像, 被扫描时受电子束补充回到零位。此时在外电路上产生的脉冲电流, 就是视频信号电流。将该电流输到监视器的荧光屏上, 就呈景物的放大图像。

目前, 微光电视摄像管的各项指标已满足初期提的要求。但是, 高质量的电视广播指望要求更高的超灵敏度摄像管诞生。为此, 人们又研制了电子轰击硅增强靶 (SIT) 摄像管<sup>[4]</sup>。

SIT 管的靶是电荷储存靶, 是属硅二极管阵列, 制法与集成电路相同。SIT 靶的像管结构与 SEC 摄像管相同, 但不用抑制网。在工作中, 两种管子几乎能互换, 它们各有优劣。SIT 管的靶用薄的 n 型硅片制成, 首先对该片进行氧化, 使表面生成一层 SiO<sub>2</sub> 绝缘膜, 用光刻法在绝缘膜上开出几十万个窗口, 通过窗口进行硼扩散, 形成 p 型岛。这样, 就形成了被二氧化硅隔离的几十万个 pn 结。然后, 将受光电子面进行腐蚀, 使硅片厚度减薄到 10—15 μm 左右。之后, 受光电子面上还要进行磷扩散, 形成 n<sup>+</sup> 层, 并进行烧氢。最后, 在扫描面上蒸涂电阻海 (CdTe)。

当从景物发出的光线通过光学镜头聚焦到光阴极面(一般为铯-钠-钾-铷)上, 形成光学图像。光阴极在光子的激发下产生光电发射, 光

电流的大小与照度强弱相对应。光电子(受到 10kV 左右)在加速电场的作用下射到靶的一面, 使得靶的另一面产生电势起伏。从光阴极到靶的成像面, 称为“移像区”。移像的目的在于增强光电子的能量, 从而能够在靶上产生更多的电荷, 借以获得增益, 提高灵敏度。从靶的扫描面到电子枪, 称为“扫描区”。当硅靶受到高能光电子轰击时, 靶内产生许多电子-空穴对。在反向偏压 (5~15V) 的作用下, 受激空穴扩散进入 pn 结二极管中, 于是在靶的扫描面上形成电荷图像。经电子束扫描, 使靶面电荷中和, 同时在外电路中产生视频信号。该信号输出到监视器荧光屏上, 就是景物的放大图像。

在整机应用方面, 由 SEC 摄像管同像增强器耦合制作的微光电视, 已拍摄到夜间无月晴空条件下的“四哩峡谷”的电视图像照片; 该机同电子显微镜耦合, 已拍摄出“T-4 噬菌体”的电视显微照片, 其电流密度低达 10<sup>-12</sup>A/cm<sup>2</sup>, 用 20s 曝光, 获得了五百万倍放大; 在天文观察中, 将该机配在 120 英寸望远镜中, 用来研究巨蟹座脉冲光。

在“人卫激光测距仪”的寻星系统中, 应用了 SIT 增强硅靶摄像管制作的微光摄像系统, 提高了观测星等, 捕捉到离地面 7000km 以上、直径只有 60cm、亮度比北极星暗约 48000 倍的激光地球动力学卫星, 并将其影像清晰地显示在电视屏幕上, 为我国空间技术、远程武器、地球动力学研究, 以及地震预报等作出了贡献。

## 四、红外夜视

红外线对人的肉眼是不可见的, 人们制造了红外夜视仪(或热象仪)来实现夜间观察。红外夜视有主动式和被动式两种。

### 1. 主动式的红外夜视

这种夜视需要配备人工红外线光源, 所以也叫作“有源”红外夜视。红外夜视仪包括红外线光源、电子光学观察镜和电源三个部分。工作时, 红外光源辐射出的红外线光束, 照到目标景物后被反射回来, 被观察镜接收, 然后通过电

子光学系统(变像管),就能够把不可见的红外线目标像转换成可见光的目标像,供人眼直接观察。红外线光源和观察镜的能量是由仪器中的电源供给的。电子光学观察镜是红外夜视仪的主体,它由物镜、变像管和目镜等部分组成。变像管担负“光—电—光”的转换任务,即将红外线目标像转换成可见光的目标像,它是观察镜的核心元件。变像管是一种电真空器件,由光电阴极面、电子光学系统(电子透镜)和荧光屏等部分构成。物镜将目标反射来的红外线图像聚焦在变像管的光电阴极面上。光电阴极为 $S_1$ 型(银-氧-铯)半导体薄膜,具有外光电效应,在红外线作用下能发射出正比于红外线辐射强度的光电子,这些电子构成与红外线图像相应的电子图像。在电子透镜的作用下,电子(图像)在变像管中受到加有高压电极的吸引而加速运动,并获得了很高的能量,轰击荧光屏,使之发出可见光图像。这样,观察者就可通过目镜从荧光屏上看到目标景物。

由于主动式红外夜视需要有红外线光源,当敌方有探测红外线的仪器时,很容易暴露自己,所以主动式红外夜视在军用上已经逐渐被其它夜视手段所取代。不过,这一技术在民用部门有着广阔的发展前途,例如车船夜间驾驶、夜间航海和飞机导航,以及由红外线构成警戒墙等。

## 2. 被动式红外夜视

由于外光电效应的摄像器件的光谱响应的长波阈均低于 $1.2\mu\text{m}$ ,所以在外光电效应夜视仪迅速发展的同时,内光电效应及热敏效应的摄像器件也大批涌现。由于这些器件无需人工光源,所以也叫作“无源”红外夜视。被动式的红外夜视仪,通常称为热像仪(热释电摄像仪)。该仪器使探测波长向红外长波部分大大推进,并促使器件固体化。内光电效应热像仪是利用光子激发光电导体,以改变其电导的原理制成的。如目前应用的热成像的靶面,就是采用了碲镉汞( $\text{HgCdTe}$ )、碲锡铅( $\text{PbSnTe}$ )等材料,其响应波长为 $8-14\mu\text{m}$ 。这个范围与常温

( $300\text{K}$ )下的周围物体的辐射波长的峰值 $10\mu\text{m}$ 相一致。具有热敏效应的材料有:热敏电阻氧化锰( $\text{MnO}$ )、热电材料硫酸三甘钛( $\text{TGS}$ )和铌酸锶钡( $\text{SBN}$ )。它们的光谱响应没有显著的选择性。随着热成像探测器件的出现,各种热成像仪纷至沓来。热成像仪能直接探测目标本身的红外辐射,这种辐射强度非常之大,在常温下周围物体发出的在 $2-20\mu\text{m}$ 波长上的辐射为 $0.04\text{W}/\text{cm}^2$ ,所以能识别伪装,甚至对地下的热目标(红外线辐射源)和隐蔽在树丛中或掩体里的人,都可透过地表或树丛等掩护物探测到,而且还能对目标所处的工作环境进行探测分析和侦察判断。例如,根据发动机不同温度的热辐射在热像图上所显示的差异,可以判断目标(飞机、坦克、战车、舰艇、摩托和汽车等)是长期停的,还是刚刚停留的。高灵敏度和高分辨率的热像仪,能够侦察判断出已经离开现场许久的人的形象(称为残留像)。红外热像仪已成为一种主要的夜视技术手段,目前在民用上,已广泛用于公安海关检查,农业和医疗等。

为了实战的需要,夜视仪已朝着固体化、小型化发展。早在70年代中期就研制成功了电荷耦合摄像器件(CCD),为夜视仪器的全固体化开辟了新的道路,现已投入应用。目前,固体红外电视与固体微光电视已有小批量的商品投放市场。

从发展过程来看,夜视技术是综合微光、红外和激光等技术发展起来的。目前引人注目的研究方向是采用仿生技术,研究能夜视的动物视觉器官的夜视功能,再用工程技术和生理应变的方法,研制“仿生夜视仪”和“仿生夜明眼镜”。人们对此正寄以厚望。夜视技术作为一门新兴的学科,正处于不断地探索和发展的阶段。

- [1] 高鲁山、李朝木,电子学报,14-5(1986),27.
- [2] 李朝木,光学技术, No. 3(1985), 18.
- [3] T. Kawamura et al., *Adv. EEP*, 52(1979), 51.
- [4] S. Miyashiro et al., *IEEE Trans Electron Devices*, ED-18-11 (1971), 1023.