

变像管高速摄影

高速摄影之四

徐大纶 主编

科学出版社

1990

内 容 简 介

高速摄影作为科学研究和工程技术各个领域里一种有效的瞬时记录手段,已得到人们的普遍重视和广泛应用。《高速摄影》是一套关于高速摄影的专著,全套共有五个分册:(1)高速摄影总论与间歇式高速摄影;(2)光学补偿高速摄影;(3)转镜式高速摄影;(4)变像管高速摄影;(5)特种高速摄影。

本书为《变速摄影》之四,本书中系统地叙述了变像管元件的物理基础,各种像增强器及变像管高速摄影机,以及电控制系统与图像读出系统。全书共分为八章:概论;光电阴极;电子光学系统;荧光屏;像增强器;变像管高速摄影机;电控制系统;图像读出系统。

本书可供从事变像管高速摄影、光电微光摄影方面的科技工作者及高等学校有关专业的师生阅读和参考。

变像管高速摄影

高速摄影之四

徐大纶 主编

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年1月第一版 开本:787×1092 1/32

1990年1月第一次印刷 印张:10 7/8

印数:0001—350 字数:246,000

ISBN 7-03-001295-X/TB·37

定价:10.90元

前 言

高速摄影是以光子作为图像信息载体,把高速运动和快速变化的空间-时间信息记录在接收器上以供人们观察和分析的技术。而变像管高速摄影,是一种利用变像管来实现图像的光电变换、聚焦成像、脉冲选通、偏转扫描以及图像增强与处理的高速摄影技术。

自1934年霍尔斯特(G. Holst)发明近贴聚焦变像管以来,人们就希望制成一种能产生高速摄影快门作用的脉冲变像管。1942年芬费尔(E. Fünfer)在德国首次实现了单幅变像管高速摄影。1949年,考特尼-普拉特(J. S. Courtney-Pratt)在英国用可变的磁场实现了变像管中像的连续扫描,时间分辨率达到约 10^{-9} s之后,随着具有导电基底的高灵敏度的多碱光电阴极、高发光效率的荧光屏、纤维光学、微通道板以及图像选通偏转技术与图像增强技术的发展,变像管高速摄影日新月异。1969年英国布雷德利(D. J. Bradley)利用在变像管光电阴极附近设置加速网格电极以减少渡越时间和渡越时间弥散的办法,使时间分辨率获得突破,达到5 ps (5×10^{-12} s)。目前,单幅曝光时间达200 ps,多幅摄影频率达 6×10^8 幅/s,采用光纤元件可达 10^{10} 幅/s,扫描摄影的时间分辨率可达 3×10^{-13} s。

由于变像管高速摄影的摄影频率高并能实现波长转换与图像增强,在配备适当的图像读出系统、传输系统、存储系统和处理系统时则可实现图像的实时输出、远距离传输和存储与处理。因此它是目前高速摄影领域内最受重视、最为活跃、

发展最快的部分，是研究 10^{-8} — 10^{-13} s 时间范围内瞬变现象的主要工具。

中国科学院西安光学精密机械研究所自 1963 年开始，先后在龚祖同、侯洵所长的领导下，在一大批优秀的科技人员与技术工人的辛勤努力下，在这一学术领域开展了大量的富有成效的工作，受到国际高速摄影学术界的重视与好评，本书就是在这样一个基础上，经过多年的时间编写而成。本书的内容一部分参考了国外的文献资料，一部分来自国内的工作实践。这里应当特别指出的是参考了中国科学院西安光学精密机械研究所和北京工业学院的有关资料，在此表示衷心的感谢。

参加本书编写工作的是中国科学院西安光学精密机械研究所的徐大纶、曹文钦和徐舜。第一至第六章由徐大纶编写，第七章由曹文钦编写，第八章由徐舜编写，全书由徐大纶负责主编。

全稿由北京工业学院的周立伟教授审阅，他对本书的编写内容提出了许多宝贵意见。邱淑明、姜志超、徐立绘制了全书插图。在此对他们表示感谢。

目前变像管高速摄影正在进一步提高扫描时间分辨率，向量子力学测不准关系式所确定的时间分辨极限前进。其可能的途径是：进一步增大光电阴极处的电场强度（目前已达 $E = 6 \times 10^4$ V/cm），在光电阴极和加速栅极间采用脉冲供电，以减小电子飞行时间的分散，如 $E = 3 \times 10^5$ V/cm 时，则时间分辨率 $\tau \sim 10^{-14}$ s；设计新管型和电控制系统，进一步提高像扫描速度 v ，目前已达 $v \sim 5 \times 10^{10}$ cm/s；采用高空间分辨率和良好的图像对比度的像增强器以减小阴极附近库仑排斥而产生的初速度增量，减小强电流密度对空间分辨率的影响；降低光电阴极表面电阻；研制光电子发射弛豫时间比 10^{-14} s 更短的光电阴极；提高微波扫描系统的谐振频

率,改进偏转板承受极高压的能力,用减小偏转板的几何尺寸和提高加速电压的方法来减小电子在偏转板电场内的飞行时间;设计新型光学系统,校正时间畸变和满足高时间分辨的要求;改进变像管信噪比,提高动态空间分辨率以及创造测量 $\tau = 10^{-14} - 10^{-15} \text{ s}$ 脉冲变像管时间分辨率的方法。

以上都是研究提高时间分辨率的极重要课题。

在积极探索亚皮秒——飞秒(10^{-15} s)高速扫描变像管的同时,研制用于弱光测量的皮秒同步重复扫描变像管相机,研制用于二维图象测量的皮秒分幅变像管相机,研制用于同时测量强度、时间和波长三维信息的变像管瞬时光谱仪,发展对红外与X射线乃至核辐射灵敏的高速摄影变像管以及广泛采用图像的计算机处理,发展实时图像读出系统,利用先进的激光超短脉冲技术、微波技术、光纤技术和快速脉冲电路来改善相机的性能,推广和普及相机的应用等,这些都是当前研制的另一个重要方面。

由于科学和技术的飞速发展,编写人员时间和水平的限制,书中缺点、遗漏和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

徐大纶

1987年6月

目 录

前言

第一章 概论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 变像管高速摄影的基本原理	1
§ 1.2.1 变像管的工作原理	2
§ 1.2.2 高速摄影变像管的工作原理	3
§ 1.3 电子光学高速摄影法和其它高速摄影法的比较	6
§ 1.4 分类	9
§ 1.5 发展概况	10
参考文献	16
第二章 光电阴极	18
§ 2.1 引言	18
§ 2.2 光电发射的物理模型	19
§ 2.2.1 金属的光电发射	19
§ 2.2.2 半导体的光电发射	21
§ 2.3 光电阴极的特性参量	26
§ 2.3.1 灵敏度	26
§ 2.3.2 阈波长	28
§ 2.3.3 暗电流	29
§ 2.3.4 面电阻	30
§ 2.3.5 光电子的初能量分布	32
§ 2.4 实用光电阴极及其性能	35
§ 2.4.1 铯铷光电阴极	35
§ 2.4.2 双碱光电阴极	38
§ 2.4.3 多碱光电阴极	40

§ 2.4.4 银氧铯光电阴极	44
§ 2.4.5 对紫外与X射线敏感的光电阴极	50
§ 2.4.6 负电子亲和势光电阴极	54
参考文献	58
第三章 电子光学系统	61
§ 3.1 电子光学聚焦系统	61
§ 3.1.1 近贴聚焦系统	62
§ 3.1.2 磁聚焦系统	66
§ 3.1.3 静电聚焦系统	71
§ 3.2 电子光学快门与偏转系统	81
§ 3.2.1 快门系统	81
§ 3.2.2 偏转系统	84
§ 3.3 电子光学系统的像差与传递函数	102
§ 3.3.1 横向像差	102
§ 3.3.2 鉴别率与电子光学传递函数	108
§ 3.3.3 时间分辨率、时间传递函数与时间畸变	118
参考文献	129
第四章 荧光屏	131
§ 4.1 引言	131
§ 4.2 晶态磷光体发光机理	131
§ 4.2.1 复合发光的机理	132
§ 4.2.2 分立发光的机理	136
§ 4.3 荧光屏的特性参量	138
§ 4.3.1 发光亮度	138
§ 4.3.2 发光效率	142
§ 4.3.3 鉴别率与调制传递函数	144
§ 4.3.4 燃亮与余辉时间	148
§ 4.3.5 光谱特性及色坐标	152
§ 4.4 几种常用的荧光粉与荧光屏	160
参考文献	166
第五章 像增强器	167

§ 5.1 引言	167
§ 5.2 像增强器的光增益与等效背景输入照度	168
§ 5.2.1 光增益的定义及计算	168
§ 5.2.2 光增益的测量	171
§ 5.2.3 等效背景输入照度及其测试	173
§ 5.3 实用像增强器及其性能	174
§ 5.3.1 云母片夹心型串联式像增强器	175
§ 5.3.2 透射二次发射式像增强器	181
§ 5.3.3 纤维光学耦合级联式像增强器	186
§ 5.3.4 微通道板像增强器	192
参考文献	208
第六章 变像管高速摄影机	210
§ 6.1 引言	210
§ 6.1.1 高速摄影机的主要光学参数	211
§ 6.1.2 空间鉴别率	213
§ 6.1.3 时间分辨率	215
§ 6.1.4 动态范围	220
§ 6.1.5 最小可探测能量密度	221
§ 6.2 单幅变像管高速摄影机	222
§ 6.3 多幅变像管高速摄影机	227
§ 6.4 扫描变像管高速摄影机	244 ¹
§ 6.5 像分解变像管高速摄影机	260
参考文献	264
第七章 电控制系统	266
§ 7.1 电控制系统的功能	266
§ 7.1.1 聚焦控制	266
§ 7.1.2 快门控制	267
§ 7.1.3 偏转控制	268
§ 7.1.4 同步控制	269
§ 7.2 快门脉冲发生器	272
§ 7.2.1 单快门脉冲发生器	272

§ 7.2.2 序列快门脉冲发生器	280
§ 7.3 偏转电压发生器	285
§ 7.3.1 扫描电压发生器	286
§ 7.3.2 阶梯电压发生器	292
§ 7.4 同步电路	306
参考文献	320
第八章 图像读出系统	322
§ 8.1 基本原理	322
§ 8.2 摄像系统	325
§ 8.3 图像数字处理系统	328
§ 8.4 图像读出系统现状	336
参考文献	338

第一章 概 论

§ 1.1 引 言

近年来,现代科学技术的进展大大地促进和推动着高速摄影技术的发展。越来越多的研究领域,例如核爆炸和高速飞行体的研究,高温等离子区和真空放电,高能粒子径迹记录,真空紫外和X射线激光器,皮秒-飞秒激光超短脉冲,激光核聚变以及光生物学,光化学,固体物理研究等,对高速摄影提出了一系列新的要求。对于近代的高速摄影,不仅要求记录速度更快,时间分辨率和空间分辨率更高,而且有些发光过程还要求增强图像的亮度,或者记录X射线直到红外的光谱,此外还要求仪器具有最小的延迟时间及容易调节等性能。这样的任务,一般光学机械高速摄影技术难于胜任,只有通过电子光学高速摄影技术才能解决。

变像管用于高速摄影,由于其记录速度极快,理论上其极限时间分辨率可高达 10^{-14} s,再加上它具有能使光增强以及从红外到紫外、X射线等各种不同波段摄影的能力;因此,它已成为从 10^{-8} 到 10^{-13} s 范围内超高速摄影的主要手段。

§ 1.2 变像管高速摄影的基本原理

高速摄影变像管是指研究瞬变现象的变像管,其主要目的是利用电子光学技术与脉冲选通、偏转扫描技术,来传递和记录瞬变的光学图像,从而对研究快速、不重复的瞬变现象提

供空间和时间信息。为了叙述高速摄影变像管，先谈谈一般变像管的工作原理。

§1.2.1 变像管的工作原理

变像管是一种光电成像器件，它能将光学图像变为电子图像，然后又重新将电子图像变成光学图像。变像管一般由以下三个基本部分组成：光电阴极、电子光学系统及荧光屏。其工作原理如图 1.1 所示。所观察或被拍摄的目标，通过光学系统成像在变像管输入窗上的光电阴极上。光电阴极在光的照射下发射出光电子，逸出的光电子数目正比于照射到阴极面上各点的照度，因此光电阴极面上发射的电流密度将对应于光学图像上各点的亮度分布。这样一来，光学图像便变换成光电子图像。电子光学系统使由光电阴极的一点(物点)发出的电子会聚到荧光屏的一点(像点)上，即完成了所谓“聚焦”作用，同时还保证聚焦后各点的相互位置与光电阴极上原来物点的相互位置对应，即完成了所谓“成像”作用。光电子通过电子光学系统，被加速聚焦到输出窗上的荧光屏上。荧光屏在电子的轰击下发光，而且屏上各点的发光亮度正比于

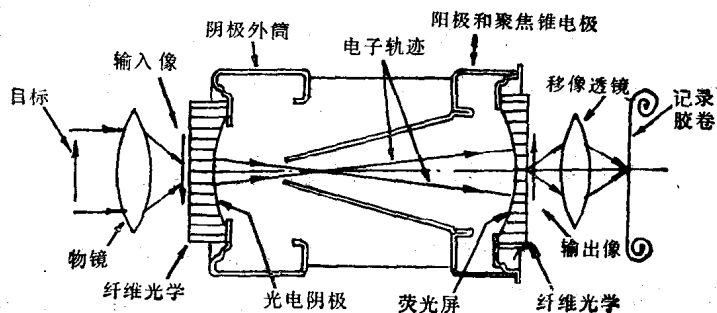


图 1.1 变像管工作原理

落到各点的电子数目和电子的能量。因此屏上亮度的分布，将与原来光学图像的亮度分布相对应，于是电子图像在荧光屏上又变换成供观察或拍摄的可见的光学图像了。由于通常应用很高的加速电压(数千伏至2万伏)，故能获得相当高的亮度增益，这就是一般在直流电压下工作的变像管的原理。

§1.2.2 高速摄影变像管的工作原理

高速摄影用的单幅变像管则是一种脉冲选通变像管，通常，变像管的光电阴极接地，在快门电极上加一负截止电压，于是电子被所形成的拒斥场截止，不能通过快门电极，管子处于关闭状态；当拍摄时，用一矩形正选通脉冲加到快门电极上，于是就可从现象中在我们感兴趣的某个瞬间选通图像。如果把类似的装置组合起来，并按所取的程序顺次地接通它们，则可得到同一现象的一组画幅。

为了实现变像管多幅高速摄影，除采用上述多个变像管组合的方式外，也可在同一变像管中加入适当电极，用来对电子束实行重复开关、偏转并使这些动作适当同步，在荧光屏上获得一组时序图像。

图1.2所出国产JTG-305型通用高速摄影变像管的结构。它是静电聚焦静电偏转的变像管，可以作为快门、分幅和扫描之用。其聚焦系统采用了包括光电阴极、环状快门电极、聚焦电极和阳极的四电极静电聚焦系统。并采用了在同一空间实现两维偏转的圆锥形花样偏转器。该花样偏转器是由四叶结构完全相同的彼此绝缘的花样卷成一圆锥体组成。

当变像管以分幅方式工作时，利用花样偏转器四叶偏转板加以不同偏转电压脉冲，便可实现图像分幅的要求，其原理简述如下：

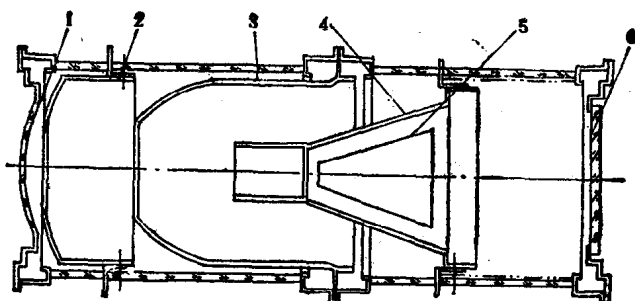


图 1.2 JTG-305 型通用高速摄影

变像管结构: 1——光电阴极; 2——快门电极; 3——聚焦电极; 4——阳极; 5——花样偏转器; 6——荧光屏

假定图像预偏到位置 0 (图 1.3), 而且在四叶偏转板 I、II、III、IV 上分别加上如图 1.4 所示的偏转电压脉冲, 快门电压脉冲同步到每个阶梯电压脉冲的中心, 则在荧光屏上产生如图 1.3 所示的图像时序; 图中箭头表示电子束及图像运动

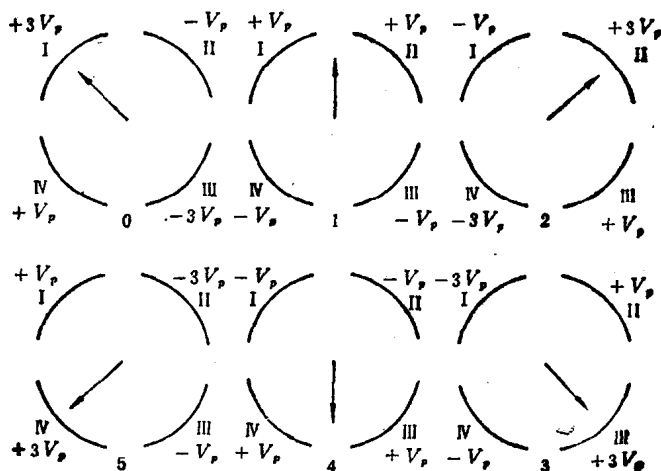


图 1.3 荧光屏上图像时序及各偏转板电位

方向, 图中状态 0 所示的 $+3V_p$ 、 $-V_p$ 、 $-3V_p$ 、 $+V_p$ 分别表示各偏转板与阳极荧光屏的电位差。显然, 在确定尺寸的荧光屏上, 画幅越多, 图像越小, 空间信息减小。这种变像管提供的是二维空间信息, 而时间信息由曝光时间决定。

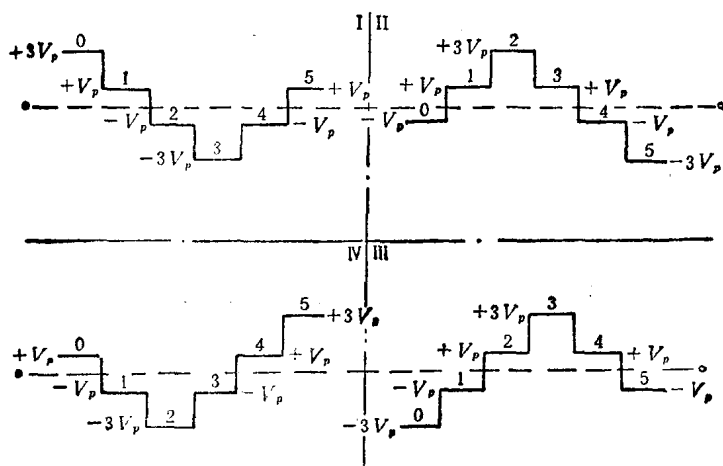


图1.4 JIG-305 型分幅式变像管偏转电压脉冲波形

当变像管以扫描方式工作时, 所研究现象的一维狭缝像被成像在变像管的光电阴极上, 变像管的 I、IV 偏转板短接, II、III 偏转板短接, 与快门脉冲同步, 将一对对称偶相随时间线性变化的高压斜坡电压加到偏转板上, 使电子光学图像沿垂直于狭缝方向横越荧光屏运动, 从而获得所研究现象沿狭缝方向轨迹随时间扩展的函数关系。当然, 在某些变像管(如 ПИМ 型)中, 若采用圆形或椭圆形的扫描方式, 则荧光屏上是圆形或椭圆形的扫描图形。

与普通网格高速摄影原理类似, 将像分解的方法和变像管相结合, 也可实现像分解式变像管高速摄影。其工作过程是: 首先将所研究的光学像进行像分解, 其方法有把光电阴

极做成许多小方点方阵形式实行像分解^[1,2],以及采用微型透镜板^[2]、光学纤维元件^[3]实行像分解等,然后将分解了的像进行扫描,在荧光屏上(尔后传递到胶片上)构成随时间扫描的目标的分解像。最后借助于一个专门设计的译解密码装置破译所拍摄的底片,可以重演所拍摄的目标像。像分解式高速摄影与普通高速摄影变像管相比,可以记录数量多得多的画幅数(40—50),从而可作电影放映,把所研究的过程比实际时间扩大几千万倍,对于持续时间极短的快速现象进行快拍慢放。

§ 1.3 电子光学高速摄影法 和其它高速摄影法的比较

现代的高速摄影仪器按其作用原理和结构来说是极为多种多样的,但基本上可分为以下三种类型:

1. 光学机械高速摄影机;
2. 电子光学即变像管高速摄影机;
3. 采用克尔盒或法拉第快门的电光或磁光快门高速摄影机。

光学机械高速摄影机目前世界上主要发展的有以下三种:

1. 采用间歇运动机构使底片作间歇运动的间歇式高速电影摄影机。这种相机属于低速相机,摄影频率为每秒数十幅至每秒一千幅。

2. 采用输片齿轮系统使底片连续运动以提高摄影频率而用光学补偿装置来获得清晰影像的补偿式高速摄影机,这种相机属于中速相机,摄影频率为每秒数百幅至每秒几万幅。

3. 采用高速旋转反射镜,将被研究对象的图像反射到一

系列向心排列成弧形的透镜组上,当反射光扫过透镜组时,在每个小透镜的焦点处的固定底片上产生一幅图像,这种相机称为转镜式高速摄影机。它属于高速相机,摄影频率可高达每秒 2.5×10^7 幅。这种相机除分幅记录外,还可扫描记录用于条纹式高速摄影,可分辨 10^{-9} 秒,换用光谱头后还可拍摄瞬时光谱。

这三种光学机械高速摄影机,由于它摄影频率范围广,画幅数量多,成像质量高,技术成熟,产品稳定,因而用途很广,产量大,许多国家都有优良而又成熟的产品公开出售。产量约占全部高速摄影机总数的 80% 以上。然而由于材料性能的限制,目前可达的转速为每分钟一百多万转,要想进一步提高转镜的转速,从而提高摄影频率、缩短曝光是极其困难的。此外,这种相机没有亮度增强,因而不适于微光下应用。对于要求单次触发而不是连续运转使用也很困难。

为了解决这些困难,可以分别使用克尔盒高速摄影机和变像管高速摄影机。但是由于克尔盒相机存在着严重的缺陷,例如快门本身对光吸收太大,通光孔径有限,因而在我们最感兴趣的光谱范围内,它的敏感性极其低微;另一方面,由于偏振片的制作和调整,以及盒体本身不易克服的应力,克尔盒会存在漏光现象,而不会完全隔断光线。对于短曝光时间照片,这种漏光所引起的灰雾是非常严重的,有时它甚至掩盖了有用的图像,从而限制了曝光时间的进一步缩短^[28]。

和上述光学机械的或者克尔盒的高速摄影机比较起来,变像管高速摄影机有一系列重大的优点:

1. 首先在原理上,由于用短暂电压脉冲来控制电子束的通和断,而产生一个快门作用,这实际上几乎是无惯性的,因而它的时间分辨率极高,理论上可达大约 10^{-14} s^[4]。

2. 在变像管光电阴极附近加装控制栅极,可以大大地提

高其控制灵敏度,甚至用很微弱的信号,譬如说 3—4 伏的电压脉冲,就可以接通或切断快门管^[5]。因而这种快门控制极简单,完全没有光学机械高速摄影机那样快速的机械运动。

3. 采用多级夹心倍增屏串联的像增强系统或多级纤维光学耦合的级联像增强系统,或者采用“透射式”二次电子发射倍增系统、或者微通道板电子倍增系统做成的像增强器,不但不会使景物细节的亮度减弱,反而会使其亮度大大增强。这一点为变像管高速摄影机所独有,是其它高速摄影机难以比拟的。目前像增强器的灵敏度,已经发展到可以充分地记录下单个光电子的程度了^[6]。

4. 如果在变像管中选用不同的光电发射体和荧光粉材料,就可以用它来进行从红外到紫外的各种不同波段的摄影,充分发挥它的波长转换器的作用。

5. 它允许采用高速摄影的各种方法,例如:单幅曝光;频闪曝光;在荧光屏的不同部分形成图像序列的多幅摄影;连续偏转电子束扫描荧光屏形成的条纹摄影;像分解摄影,等等。并且曝光时间和摄影机的重复速度间具有独立性,也可能在画幅序列中逐幅地改变曝光时间,以及可能用任何选定的幅间时间间隔记录画幅序列。

6. 可以选择记录仅感兴趣的事件,例如和闪烁计数器联用,来记录特殊的珍贵的高能粒子痕迹^[7]。

正是由于变像管具有这一系列的优点,因而它受到了很大的重视,取得了迅速的进展和广泛的应用。但是它也有一些缺点。譬如说:和光学机械高速摄影机相比,它的画幅数少;而克尔盒相机的像质一般比变像管相机的像质要好到一倍左右;在长时期的高温和亮光下,变像管的光电阴极会产生疲劳以至破坏;而感光过度,即所谓光的“过载”,更是在变像管中引起明显的图像畸变;磁场对于克尔盒没有什么影响,但可以改