

光电探测器 激光能量分布的 测试与分析

Test and Analysis of
Laser Energy Distribution on
Electrophotonic Detector

王彦斌 王国良 陈前荣 编著

Wang Yanbin Wang Guoliang Chen Qianrong



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

光电探测器 激光能量分布的 测试与分析

王彦斌 王国良 陈前荣 编著

Wang Yanbin Wang Guoliang Chen Qianrong



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书研究光电探测器激光能量分布的形成机理和测试方法。从光电成像系统的基本知识出发,首先全面分析引起探测器光敏面上激光能量分布的可能因素,研究各因素产生的激光能量分布规律,然后选取合适参数的光学系统和探测器,测试不同条件下光电探测器上的激光能量分布,最后构建光学系统包含镜片/镜筒的完整模型,分析各激光能量分布的形成机理。

本书适用于从事激光传输分析与应用、光电对抗技术分析与应用的技术人员,以及从事激光传输效应、激光与物质相互作用研究的大专院校有关专业师生和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电探测器激光能量分布的测试与分析/王彦斌,
王国良,陈前荣编著. —上海:上海交通大学出版社,
2019

ISBN 978-7-313-21357-0

I. ①光… II. ①王… ②王… ③陈… III. ①光电探
测器—激光能—能量分布—研究 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 106619 号

光电探测器激光能量分布的测试与分析

编 著:王彦斌 王国良 陈前荣

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:218 千字

版 次:2019 年 6 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-21357-0/TN

定 价:58.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:10.5

印 次:2019 年 6 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-31011198

光电成像系统由光学系统和光电探测器组成。光学系统将收集到的目标和背景的光信息会聚到光电探测器上,光电探测器再将光信息转化为电信号,并通过对电信号进行存储、转移、传输、检测、采样、放大、数模转换后生成图像信号,最后由电子接口电路输入电脑或者由智能手机呈现。近年来,随着科学技术的不断进步,特别是新兴材料(如碲镉汞、锗掺杂、量子阱器件等)的大量涌现,探测技术(多波段复合探测技术、数据融合处理技术等)的迅猛发展,以及制作工艺(光敏面的填充比、微透镜技术、制冷技术、大规模集成技术等)的日益完善,光电成像系统越来越多地应用于军事和民用的各个方面。军事方面的光学侦察/导弹预警卫星、光电精确制导武器、机载观瞄设备等,民用方面人们常见的智能手机、数码相机、摄像头、红外夜视仪、行车记录仪等。

光电成像系统的广泛应用,在给人们的生活和工作带来极大便利的同时,也常常侵犯人们的隐私,重要的是军事方面的应用给国家的安全和防御带来极大的威胁。光电成像系统在光学侦察卫星方面的应用,如美国的第六代军事光学侦察卫星“锁眼 KH-12”,在近地点详查模式下对地分辨率可以达到分米量级;光电成像系统在精确制导武器方面的应用,如美国的“小牛”系列红外成像导弹,打击精度可以达到米量级。激光以光速传播,瞬时可击中目标,无须设置提前量,而且方向性极好,可精确地对准某一个方向,发送大量的能量。采用激光有源压制干扰光电成像系统,可扰乱其探测器光敏面上的能量分布,降低生成目标和背景图像的像面层次和清晰度,严重时造成整个像面饱和,难以识别,使光电成像系统无法对目标进行探测、跟踪、瞄准而丧失作战能力。因此,激光有源压制干扰是对抗光电成像系统的有效手段。

近年来,国内外专家学者有关激光有源压制干扰方面的研究,已有大量的文献书籍报道,概括起来主要集中在以下五个方面:① 激光有源压制干扰的战法样式研究,根据光电成像系统的视场范围,运动轨迹,成像方式,与关注目标、区域的相对位置,研究激光源的布站方式、输出能量;② 测量光电探测器的激光干扰阈值,包括软破坏阈值(饱和阈值、过饱和阈值、串扰阈值等)和硬破坏阈值(白点损伤阈值、白线损伤阈值、黑屏阈值、热熔融阈值、光学击穿阈值等);③ 观察激光辐照下光电探测器产生的新现象(包括饱和、过饱和、过饱和串音、黑白屏、反转等),根据半导体理论和激光作用效应理论,研究解释新现象产生的潜在机理;④ 评估激光辐照光电成像系统前后的干扰效果,提出科学评估干扰效果的算法、函数及方法;⑤ 研究光电成像系统抗激光干扰的方式方法,如设置窄带滤光片阻

挡波段外激光的入射,光学镜片选用折射率可变的材料,遇到强光照射折射率迅速增大达到抗激光干扰的效果等。

大量的激光有源干扰试验结果表明,干扰激光经光电成像系统传输在探测器上的能量分布并非只是一个经光学系统会聚的圆光斑或者波动光学中的艾里斑,而经常是包含条纹、点阵、鬼像、散斑等多种杂散光成分的极其复杂的能量分布。有干扰激光经光电成像系统传输在探测器上的能量分布规律及其形成机理研究,国内外可查的书籍文献非常少见,本书从光电成像系统的基本知识(包括结构组成、工作原理)出发,首先全面分析引起探测器光敏面上激光能量分布的可能因素,研究各因素产生的激光能量分布规律,然后选取合适参数的光学系统和探测器,测试不同条件(包括不同激光发射参数、光学系统参数、探测器参数)下光电探测器上的激光能量分布,最后构建光学系统的包含镜片/镜筒完整模型,分析各激光能量分布的产生机理。

全书共分6章。第1章是光电成像系统的组成与工作原理,首先简要介绍光电成像系统的产生、发展和分类,然后分别介绍光学系统和光电探测器的基本构成和工作原理;第2章汇总引起探测器上激光能量分布的光学系统效应,包括干涉效应、衍射效应、散射效应等;第3章阐述光电探测器上激光能量分布的测试,包括光电探测器及其配套光学系统的选型,试验测量方案和数据处理方法,然后测试不同条件下的激光能量分布;第4章介绍光学系统的建模与像质分析,讲述建立光学系统包含镜片/镜筒完整模型的方法,评价光学系统的像质指标;第5章分析探测器上激光能量分布的形成机理,包括主光斑周围的放射斜线、五边形散斑、圆环条纹、规则点阵等;第6章建立涵盖多种光学系统效应的探测器上激光能量分布模型,并与实验数据相比对,进行模型的验证和精度分析,最后是总结与展望。

本书由王彦斌博士、王国良高级工程师和陈前荣研究员执笔。在本书的撰写过程中,国家自然科学基金委员会、中国洛阳电子装备试验中心、哈尔滨工业大学、国防科技大学、上海交通大学出版社等多家机构给予了大量的指导和帮助,在此衷心感谢!洛阳电子装备试验中心吴军辉研究员对本书的选题和架构进行了认真审阅,并提出了许多宝贵意见,借此机会表示感谢!同时还要感谢哈尔滨工业大学王治乐教授在光学系统建模、实验现象分析等方面的帮助和支持。另外对在写作过程提出改进意见和帮助审阅的领导和同事杨森森主任、李华高工、周旋风、任广森、朱荣臻、王敏、刘连伟、邹前进、樊宏杰、陈洁、姚梅、郭豪、梁巍巍、赵宏鹏、殷瑞光、甘霖、李波、许振领、李慧、郭正红、王重阳、肖文健、屈东胜等同志在此一并致谢!最后,诚挚感谢我的父亲、母亲、妻子赵知艳、女儿王睿萱,他们无微不至的关怀,默默无闻的支持,无怨无悔的帮助,时时刻刻的陪伴,是我写作这本书的不懈动力和精神支柱!

由于作者水平有限,加之目前对于光电探测器上激光能量分布的测试与分析研究还处于探索阶段,所以本书可能存在错误或不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

2019年5月

目 录 | Contents

1	光电成像系统的组成与工作原理	1
1.1	光电成像系统	1
1.2	光学系统	4
1.3	光电探测器	6
1.4	CCD 的工作原理及性能	9
1.5	CMOS 的工作原理及性能	21
2	引起探测器上激光能量分布的光学系统效应	25
2.1	干涉效应	25
2.2	衍射效应	39
2.3	散射效应	43
2.4	聚焦性能	48
2.5	光学系统像差	52
2.6	本章小结	54
3	光电探测器上激光能量分布的测试	57
3.1	光电探测器及其配套光学系统的选型	57
3.2	试验测量方案的确定与测量数据分析处理	64
3.3	不同激光发射参数下能量分布的测量	68
3.4	不同光学系统参数下能量分布的测量	94
3.5	不同探测器性能参数下能量分布的测量	98
3.6	本章小结	104
4	光学系统的建模与像质分析	107
4.1	光学系统的拆解与参数测量	107
4.2	光学系统的建模与指标分析	115

5 探测器上激光能量分布的形成分析 120

5.1 主光斑周围放射斜线的形成机理 120

5.2 五边形散斑的形成机理 125

5.3 圆环条纹的形成机理 127

5.4 规则点阵的形成机理 131

5.5 本章小结 146

6 探测器上激光能量分布的建模与校验 147

6.1 涵盖光学系统各种效应下的探测器上激光能量分布模型 147

6.2 探测器上激光能量分布模型的可行性验证 149

6.3 展望与模型应用 151

6.4 可继续深入研究的几个问题 152

参考文献 153

索引 159

1 光电成像系统的组成与工作原理

光电成像系统是由光学系统和光电探测器构成,光学系统将收集到的目标和背景的光信号会聚到光电探测器上,光电探测器再将光信号转化为电信号,并通过对电信号进行存储、转移、传输、检测、采样、放大、数模转换后生成图像信号,最后由电子接口电路输入电脑或者由智能手机呈现。

1.1 光电成像系统

光是丰富多彩的,它是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色混合而成,不同波长的光在人类的眼睛引起不同颜色的感觉,因而给人类呈现了色彩丰富的外部世界图像。然而,人眼也有很多局限,如人眼的观察会受到目标几何参数、灵敏度、对比度和光谱的限制,因为如果目标太小或太远,或太暗,或与周围景物对比度不够,或与人眼响应光谱($0.38\sim 0.78\mu\text{m}$)不匹配,人眼会看不见或看不清。为了让人类的眼睛看得更远、看得更清、看得更多,人类开始了长期的探索研究。

1.1.1 光电成像器件的产生

简单地说,光电成像器件的产生是光电子学和光电成像技术完美融合的结果。追溯到1873年,英国史密斯(W. Smith)首先发现了硒的光电导效应,即半导体受光照而引起电导率的改变。随后在1900年普朗克提出了光的量子性,而后在1916年爱因斯坦完善了光与物质内部电子能态相互作用的量子理论,人类从此揭示了内光电效应的本质。内光电效应是光电效应的一种,主要是由于光量子作用,引发物质电化学性质变化,如电阻率改变,这是与外光电效应的区别,外光电效应则是逸出电子。在随后的大量研究工作中,随着近代物理学尤其是光电子学的发展,建立了半导体理论并研制出各类光电器件。由此带来了内光电效应的广泛应用,开拓了人类探测光子的技术手段,为扩展人眼的视见光谱范围创造了基本条件。

人类在探索内光电效应的同时也探索了外光电效应,1887年赫兹首先发现了紫外辐射对放电过程的影响,第二年哈尔瓦克试验证实了紫外辐射可使金属表面发射负电荷,其后由斯托列托夫和爱因斯坦相继建立了光电发射的基本定律。1929年科勒制成了第一个实用的光电发射体——银氧铯光阴极,随后利用这一技术研制成功了红外变像管,实现

了将不可见的红外图像转换成可见光的图像,此后紫外变像管和 X 射线变像管相继问世,使人类的视见光谱范围获得了更有成效的扩展。铋铯光阴极、铋钾钠铯多碱光阴极和镓砷光阴极这些高量子效率光阴极的出现使微光图像的增强技术达到了实用阶段,人们利用像增强器件,突破了视见灵敏阈的限制。

在光电成像技术的研究过程中,为扩展视界,人类从 20 世纪 30 年代开始致力于电视技术的研究。以弗兰兹沃思开发的光电析像管为起端的电视摄像技术,为人类提供了不必面对目标即可观察的可能性。电视效能所具有的极大吸引力为其带来了极为迅速的进展。在短短的半个多世纪中,电视摄像器件从初期的析像管,逐步提高并发展出众多类型的摄像器件。相继出现的摄像器件有超正析像管、分流摄像管、视像管、硅靶摄像管、热释电摄像管等。因此,正是光电子学中内光电效应和外光电效应与光电成像技术的融合发展,促使了各类光电成像器件的产生。

1.1.2 光电成像器件的发展

图像是通过人眼视觉感受到的一种信息,是人类获取信息的一个重要方面。光电成像器件是获取图像的核心器件,大体上光电成像器件的发展经历了 3 个阶段:第 1 个阶段是 19 世纪发明的照相胶片及其成像技术,把外界的图像信息记录在胶片上;第 2 个阶段是 20 世纪 20 年代发明的真空摄像管及电视成像技术,实现了图像信息的远距离传输,远端多头摄像可以提供多人、多点同时观察;第 3 个阶段是 20 世纪 70 年代发明的以电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)为代表的固态成像器件,诞生了 CCD 摄像机,使今天的数码相机、智能手机得以广泛普及。

1) 照相胶片及其成像技术

典型的照相胶片是在水溶液中经过化学反应形成卤化银颗粒状小晶体(AgBr、AgCl 或 AgBr)悬浮在胶合剂上形成感光乳剂作为有源探测器。曝光后胶片接收入射景物的光子后激发电子,引起颗粒的物理变化,然后经过显影等化学处理显示出景物图像。黑白胶片是一层感光乳剂,彩色胶片是由三层感光乳剂交叠而成。照相胶片及其成像技术的优点是像素多、价格低廉、性能稳定,比如一张 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的底片上,可包含 $10^{11} \sim 10^{12}$ 个晶体颗粒,提供 10^9 个像素,因而发展至今仍被广泛采用;缺点是照相胶片的量子效率仅为 $1\% \sim 5\%$ 、线性度差、动态范围有限。

2) 真空摄像管及电视成像技术

真空电视摄像管主要包括靶和电子枪两个大部分。在管外装有聚焦的偏转线圈与校正线圈,管内有电子枪的灯丝、阴极、控制栅极、加速极和聚焦极等。聚焦极的电压可调,它与加速极形成电子透镜,起辅助聚焦作用。在靶的右边装有网状电极,它使靶前形成均匀的电场,使电子束在整个靶面上都垂直于靶。靶的材料可以是光电导型材料(光照前后引起靶的电阻变化),这种摄像管称为光电导摄像管,也可以是由大量微小光电二极管阵列组成的硅靶,称为硅靶摄像管。无论是光电导靶还是硅靶,均具有光电转换和储存信号的功能。靶位于摄像管的入口处,当光学图像成像到靶面上时,进行光电转换,并形成一

幅与光学图像明暗分布相对应的电位图像(储存过程),然后由真空管中加热的阴极产生的自由电子被电光系统形成细电子束,由偏转线圈对靶依次进行扫描,在一帧时间内逐点完成全靶面的二维扫描,扫描电子束形成的电流被靶面电荷分布所调制,最后从输出端得到景物的视频信号。

3) 固态成像器件及其成像技术

1969 年美国贝尔实验室玻伊尔(W. S. Boyle)和史密斯(G. E. Smith)提出了电荷耦合器件 CCD 的概念,并在 1970 年开发出第一款具有自扫描功能的 CCD,由此诞生了固体摄像器件,使电视摄像技术产生了质的飞跃,小型摄像机飞进了百姓家。20 世纪 70 年代中后期,CCD 首先应用到天文领域,80 年代 CCD 开始进入商业民用领域。CCD 与照相胶片相比,灵敏度高,线性响应、动态范围大和易于防辐射加固,另外,CCD 输出的视频信号能进行降噪和数字化处理,具有即时显示和远程共享等优势。与真空摄像机相比,CCD 除了灵敏度和线性响应等优点以外,还有光谱宽、功耗低、寿命长、噪声低、体积小、重量轻、稳定持久等优点。特别是近年来互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)成像器件的突起,使成像技术进一步走向小型化、低成本化和高清晰化。与此同时,各种特殊用途的成像器件也不断涌现和发展,尤其是在各种红外探测器件出现和获得较大的发展后,采用红外焦平面探测器件的凝视红外热成像技术将人类的视见能力扩展提高到一个新的历史阶段。

1.1.3 光电成像器件的应用

光电成像器件技术及其应用使得人们突破了人类视觉的部分限制,特别是突破了人眼在低照度和有限光谱响应下的视觉限制。视觉功能在时间和空间两个方面都得到了扩展,时间上的扩展主要是指图像记录技术,记录不同时段发生的事件,如数码照相、印刷、静电复印、摄录像等;空间上的扩展主要是指图像传输,如电视、微光观察镜等,可以实现远距离的传输。另外,现在正在发展壮大的视觉识别技术,将超出人类视觉响应能力的红外、紫外图像转换成可见光图像,突破人眼有限光谱响应的限制。表 1-1 按照工作谱段列出了光电成像器件的广泛应用。

表 1-1 光电成像器件技术及其应用

工作谱段	领 域	具 体 应 用
可见光波段 0.4~0.76 μm	警务	监视和记录某个地点暗藏的犯罪活动
	心理学和医学	研究记录病人的行为状态
	军事	空中侦察、遥感重要军事设施和装备
	科研	记录空气动力学、核物理等方面的高速现象,采集试验数据
	材料检查	应变光学
	冶金学和地质学	采用显微镜记录微观的变化数据

续 表

工作谱段	领 域	具 体 应 用
可见光波段 0.4~0.76 μm	动物养殖	研究记录动物的行为状态
	天文学	天象的记录
红外波段 0.76~12 μm	动物学	研究记录动物在夜间的行为状态
	公共安全	管理某个区域,夜间巡视和警戒
	消防	寻找起火的中心区域,研究起火原因
	军事	洲际导弹的探测、识别、跟踪,拦截精确制导武器
	法律调查	证据的检查和提取
	医学	癌症及与温度有关的病变早期诊断
紫外波段 0.1~0.4 μm	物理学	记录等离子现象和高能现象
	冶金地质学	金属和矿物断面检查
	天文学	用装在人造卫星上的望远镜进行天体的紫外照相
	军事	利用紫外辐射的预警、告警
X 射线谱段 0.001~10 nm	材料检查	检查静止和运动物体两者的内部情况,以及超高速运动物体的状态检查
	生物学	利用低辐射强度的放射性跟踪,记录动、植物内部的活动情况
	天文学	利用人造卫星研究 X 射线辐射
	医学	创伤、病变的检查和记录
	机场、海关的安检	违禁品的检查

1.2 光学系统

光学系统,俗称镜头,通过标准接口安装在光电探测器的前端,实现光束的变换,将目标和背景成像在光电探测器上。光学系统的质量和性能直接影响整个光电成像系统的成像质量。最常用的光学系统包括望远系统(观察远方物体)、显微放大系统(观察细小物体)、照相系统、投影系统以及各种计量光学系统。

1.2.1 光学系统的基本构成

光学系统由机械组件和光学镜片组件两个部分构成。其中机械组件包括镜架、光阑、遮光罩等组件,用来固定光学镜片和阻挡、抑制杂散光;光学镜片按照一定的方式组合而成。一般来说,组成光学系统的光学零件分为以下 3 类。

1) 透镜

单透镜按照形状和作用又分为两类：第一类是正透镜，又称凸透镜或者会聚透镜，其特点是中心厚、边缘薄；第二类是负透镜，又称凹透镜或者发散透镜，其特点是中心薄而边缘厚。

2) 反射镜

按形状可分为平面反射镜和球面反射镜，球面反射镜又分为凸面镜和凹面镜。

3) 棱镜

按其作用与性质，可以分为反射棱镜与折射棱镜。

所有的光学零件都是由不同介质(光学玻璃等)的一些折射面和反射面构成。这些面形可以是平面、球面，也可以是非球面。由于球面和平面便于大量生产，因而目前绝大多数光学系统中的光学零件均由球面和平面构成，但随着技术发展与工艺水平的提高，非球面已经得到越来越广泛的采用。如果光学系统中的光学零件完全由球面构成，则这种光学系统称为球面系统，如果光学系统中包含非球面，则称为非球面系统。在球面系统中，如果各球面的球心都位于同一条直线上，则这条直线就是整个系统的对称轴线，也就是系统的光轴，这种系统称为共轴球面系统，没有对称轴的光学系统称为非共轴系统。

1.2.2 光学系统的性能参数

评价镜头的技术性能和像质有许多指标，这里给出以下几个重要的技术指标。

1) 焦距

无限远目标的轴上共轭点是镜头的(像方)焦点，而此焦点到(像方)主面的距离称为焦距。焦距描述了镜头的基本成像规律：在不同的物距上，目标的成像位置和成像大小由焦距决定。

2) 光圈与相对孔径

光圈与相对孔径两者是相关的概念，光圈通常用 F 表示，是相对孔径 $\frac{D}{f}$ (镜头入瞳直径与焦距的比值)的倒数，即 $F = \frac{f}{D}$ 。随着光圈数的加大，孔径变小，光通量也随之减少。光圈每差一级(其数值比都是 1.414)，其光通量就相差一倍。

3) 视场和视场角

视场和视场角是相似的概念，它们都是用来衡量镜头成像范围的。通常光学系统的视场由像平面上具有满意成像质量的圆形区域的直径决定，或由相机所采用的感光器件的感光面尺寸决定。光学系统焦距与视场(2ω)的关系如下：

$$\tan \omega = -\frac{y'}{f} = -\frac{\sqrt{a^2 + b^2}/2}{f} \quad (1-1)$$

其中， y' 表示探测器感光幅面对角线长度的一半； a, b 分别为感光面的长和宽。可见，焦距越小，视场角越大，视场越大。一般在远距离成像中，如望远镜、航拍镜头等场合，镜头

的成像范围常用视场角来衡量,用成像的最大范围构成的张角表示(2ω)。在近距离成像中,常用实际物面的幅面($V \times H$)表示成像范围。

4) 工作距离

镜头与目标之间的距离称为镜头的工作距离。一个实际的镜头并不是对任何物距下的目标都能做到清晰成像(即使调焦也做不到),所以允许的工作距离是一个有限范围。

5) 像面尺寸

一个镜头能清晰成像的范围是有限的,像面尺寸是指能支持的最大清晰成像范围(通常用其直径表示)。超过这个范围成像模糊,对比度降低,所以在给镜头选配 CCD 时,可以遵循“大的兼容小的”原则进行,就是镜头的像面尺寸大于(或等于)CCD 尺寸。

6) 接口

镜头需要和光电探测器配套使用,两者之间的连接方式通常称为接口。为提高各生产厂家镜头之间的通用性和规范性,业内形成了数种常用的固定接口,如 C 口(直径 17.5 mm)、CS 口(直径 12.5 mm)、F 口(直径 46.5 mm)等。

1.3 光电探测器

光电探测器的作用就是光电转换,将光信号转化为电信号,并通过对电信号进行存储、转移、传输、检测、采样、放大、数模转换、生成图像信号,最后由电子接口电路输入电脑或者智能手机呈现图像。本节主要从工作方式和波段两个方面概述光电探测器。

1.3.1 光电探测器的工作方式分类

光电探测器按其工作方式分为如下两大类:直视型光电探测器和电视型光电探测器。

1) 直视型光电探测器

这类器件用于直接观察的仪器中,器件本身具有图像的转换、增强和显示等部分。工作方式是通过外光电效应将入射的辐射图像转换为电子图像,而后由电磁场的聚焦加速作用进行能量增强以及通过二次发射作用进行电子倍增,经过增强的电子图像轰击荧光屏,激发荧光屏产生可见光图像。因此,直视型光电成像器件的基本结构包括光电发射体、电子光学系统、微通道板(电子倍增器件)、荧光屏以及保持高真空工作环境的管壳等。

2) 电视型光电探测器

这类器件用于电视摄像和热成像系统中,功能是完成将二维空间的可见光图像或辐射图像转换成一维时间的视频电信号。获得的电信号经过视频放大处理和传输等环节后,由显像装置还原输出二维空间的图像。其工作方式是:接收二维的光学图像或热图像,利用光电效应或热电效应将其转换为二维电荷图像,并进行适当时间的存储,而后通过电子束扫描或电荷耦合转移等方式,输出一维时间的视频信号。目前应用最为广泛的固定摄像器件,包括电荷耦合摄像器件(charge coupled device, CCD)或者互补型金属-氧

化物半导体摄像器件(complementary metal oxide semiconductor, CMOS),就是这类光电探测器,以下重点介绍这两种探测器的工作原理。

1.3.2 光电探测器的工作波段分类

按照光电探测器对光波段的响应,可以划分为紫外探测器、可见光探测器、红外探测器。发展至今,可见光探测器主要以 CCD 和 CMOS 为主,后续要详细介绍,这里就不赘述了。

1) 紫外探测器

紫外探测器是将紫外辐射能转换为电能或者其他可测物理量的器件,其主要利用紫外辐射与物质的相互作用所产生的热效应或光电效应制成热探测器或光子探测器。热探测器仅应用于绝对辐射的标准测量,而绝大多数军事应用采用的是光子探测器。光子探测器按其工作原理可分为光电发射紫外探测器与半导体紫外探测器两类。

光电发射紫外探测器是一种电真空器件,结构如图 1-1 所示,是由光电阴极和阳极组成真空二极管,在阴极加负偏压,而阳极加正偏压。通常在任何一种稳定的半导体材料内的静电势把电子束缚在带正电荷的原子核周围,使之保持在物质的内部,但当阴极材料吸收大于其阈值(或者功函数)的光子后,光电子可从材料表面逸出,逸出后被外电场或者磁场加速与偏转,穿过真空,最后被阳极收集,至放大器形成电流输出,该电流就是阴极光照水平的度量。

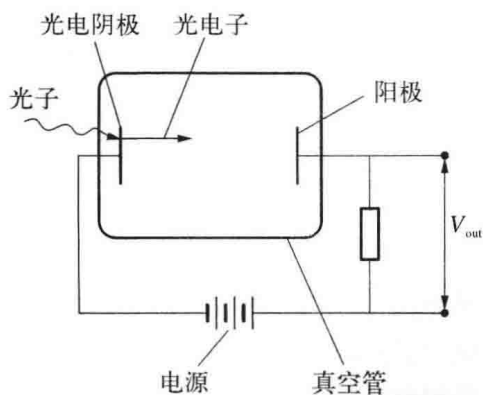


图 1-1 光电发射紫外探测器的结构

半导体紫外探测器的工作原理是基于材料的内光电效应。光子在半导体内被吸收产生光生载流子,而后被电场(自建的电场或者外加电场)分开,产生正比于光子流的电流。它有很多不同类型的工作模式(见图 1-2),包括光电导型、肖特基势垒光电二极管、金属-半导体-金属(MSM)光电二极管、金属-绝缘体-半导体(MIS)结构、PIN 光电二极管和场效应与双极型光电晶体管等不同的结构。半导体紫外探测器具有体积小、质量轻、结实、可靠等优点。在性能上具有线性度好、量子效率高、动态范围大,并能制成大规模成像阵列等优点。在发展过程中, Si、GaP、GaAsP、CdS 等紫外光电二极管得到了应用,但是它们对近红外光或者可见光仍有响应,需要采用滤光片将它们滤掉。直到 20 世纪 90 年代, AlGaIn 紫外探测器的出现,其响应波段可控制在 200~365 nm 范围内,成为纯紫外和“日盲区”应用的紫外探测器。

2) 红外探测器

通常把用来检测红外辐射存在的器件称为红外探测器,其能把接收到的红外辐射转变成体积、压力、电流等容易测量的物理量。真正实用意义的红外探测器,还必须满足两个条件:一是灵敏度高,对微弱的红外辐射能够检测到;二是物理量的变化与受到的辐射

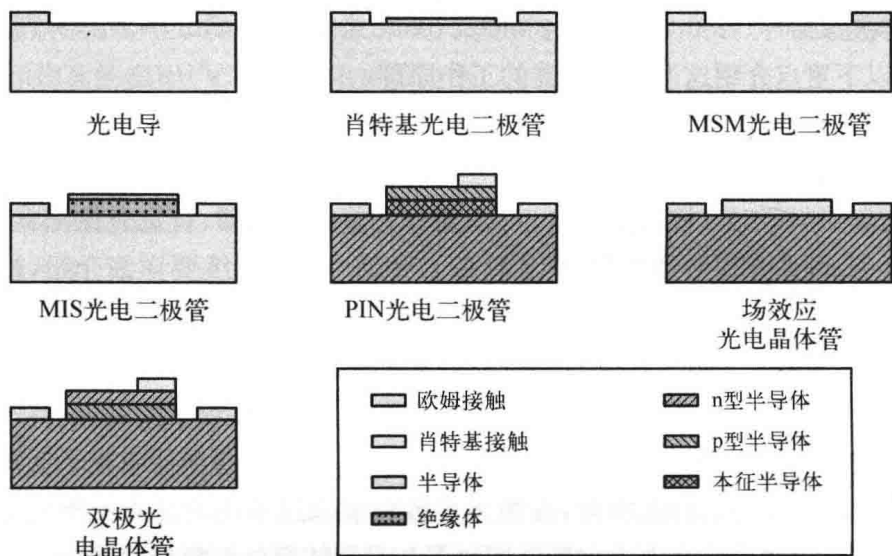


图 1-2 不同半导体紫外探测器的结构

成某种比例,以便定量测量红外辐射。现代红外探测器大都以电信号的形式输出,所以也可以说,红外探测器的作用就是把接收到的红外辐射转换成电信号输出,是实现光电转换功能的灵敏器件。

红外探测器可以分为两大类:一类是热探测器;另一类是光子探测器。工作原理,如表 1-2 所示。热探测器接收红外辐射以后,先引起接收灵敏元的温度变化,温度变化引起电信号(或者其他物理量变化再转换成电信号)输出。输出的电信号与温度的变化成比例,而温度变化是因为吸收热辐射能量引起的,与吸收红外辐射的波长没有关系,即对红外辐射吸收没有波长选择性。

表 1-2 红外探测器的分类

红外探测器	热探测器	气动探测器	利用充气容器接收热辐射后温度升高气体体积膨胀的原理,测量其容器壁的变化来确定红外辐射的强度
		热电偶、热电堆	热电偶是当一个接头受到红外辐射时,与其相连的另一个接头就会处于不同的温度,电路内就产生一个电动势,连接外电路会有电信号输出,从而测量红外辐射。 热电堆是几个热电偶组合在一起,构成一个响应元件
		热敏电阻	原理是受红外辐射以后,温度变化会引起阻值变化,在固定偏压下电流会随之变化,用来检测受到的辐射强度
		热电探测器	利用一类处于极化状态的材料,受到红外辐射以后,材料极化强度随之变化,连接外电路就会有电信号产生
	光子探测器	光伏探测器	采用不同导电型材料制备成 pn 结,形成势垒区,红外激发的电子空穴被势垒区分开而形成光生电动势,接外电路,有电信号输出

续 表

红外探测器	光子探测器	光电导探测器 (俗称光敏电阻)	受红外辐射激发,探测器芯片传导电子增加,电导率增加,在外加偏压下,引起电流增加,增加的电流大小与光子数成比例
		光磁电探测器	红外激发的电子空穴在材料内部扩散运动时,受外加磁场作用而分开运动,连接外电路有电信号输出

红外光子探测器接收红外辐射以后,由于光子直接把材料的束缚态电子激发成传导电子,所以引起电信号输出,信号大小与吸收的光子数成比例。这些红外光子能量的大小必须能达到足以激发束缚态电子至激发态,才能起激发作用,低于电子激发能量的辐射则不能被吸收转变成电信号。所以,光子探测器吸收的红外光子必须满足一定的能量要求,即有一定波长限制,超过能量限制的波长不能吸收,对红外辐射的吸收有波长选择性。

常见的红外光子探测器主要有以下几种。

(1) 硫化铅探测器,是 1~3 μm 波段应用很广的器件,有单元和多元线列器件;该器件优点是阻值适中,响应率高,可以在常温下工作,使用方便;缺点是响应时间常数较大,电阻温度系数大。

(2) 硒化铅探测器,工作在 3~5 μm 波段,有单元和多元器件,可在常温下工作,也可由半导体制冷器制冷。

(3) 铟化铟(InSb)探测器,工作在 3~5 μm 波段,有光电导型与光伏型两种,可在常温下工作,通常工作在 77 K,以光伏型为主,有单元、多元器件,其灵敏度高、响应速度快,是目前 3~5 μm 波段最成熟、应用最广的探测器。

(4) 碲镉汞探测器,碲镉汞(MCT)晶体材料由 HgTe 和 CdTe 按一定比例合成后,在高温炉中提拉生长成的,组成分子式为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$,通过调整组分 x 值,可以连续改变探测器的响应波长,从 1 μm 到大约 30 μm 。

(5) 双色(或者多色)探测器,具有两个或者更多波段光谱响应的器件,可以有单片式,如不同 x 值的 HgCdTe 分层结构,也可以采用不同波段探测器叠层而成。当收到红外辐射时,有两个波段信号输出,如 3~5 μm 和 8~12 μm 。

1.4 CCD 的工作原理及性能

CCD 按照像元的阵列形式可分为两大类:线列 CCD 和面阵 CCD。线列 CCD 仅有一行像元,需要借助扫描景物才能形成二维图像。时间延迟积分(time delay integral, TDI) CCD 虽然像素排列为面阵,但是输出图像仍需扫描,多行像元起累加积分的功能。面阵 CCD 不需要扫描即可形成二维图像。

1.4.1 CCD 的工作原理

CCD 的工作原理见图 1-3。首先是景物的光信息通过光学系统会聚到 CCD 的光敏

面上,以电荷为基本处理信号,具有对信号电荷的产生、收集、传输和检测四项基本功能。传统胶卷相机以机械快门控制曝光量,而面阵 CCD 通过电子快门来控制信号电荷的收集时间;线阵或 TDI-CCD 则可以调整扫描速度与输出频率来调整曝光时间。为了提高 CCD 感光动态范围,信号收集环节还可以采用防饱和技术。为了拍摄景物的传输和播出,面阵 CCD 通常采用行间转移方式的全像素或场、帧读出方式来匹配电视信号的顺序或隔行扫描方式。为降低输出电压信号中的噪声,相关双采样(correlated double sample, CDS)是 CCD 后续处理中常用的关键技术。经过降噪的电压模拟信号经 A/D 处理后转换为数字图像。

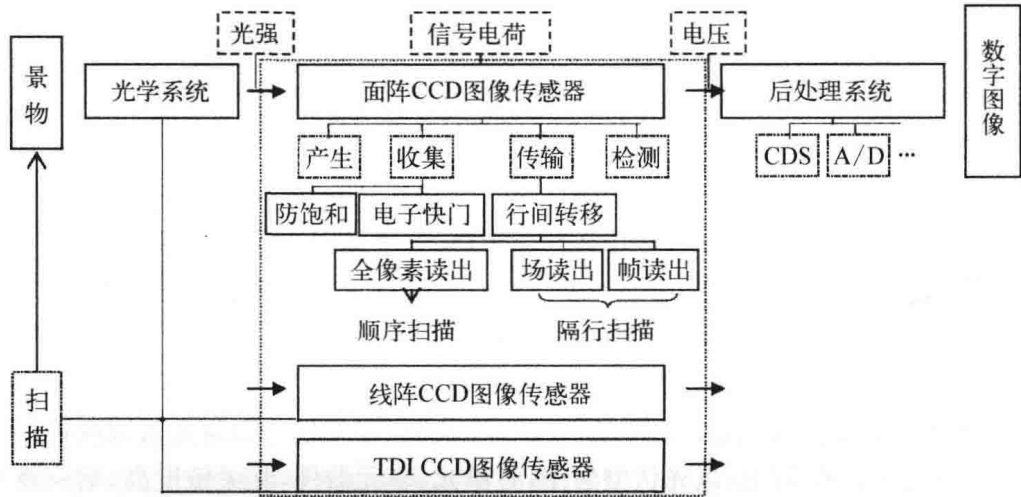


图 1-3 CCD 的工作原理

1) 信号电荷的产生

可见光 CCD 光电子信号的产生,是通过硅单晶的内光电效应实现的。内光电效应的

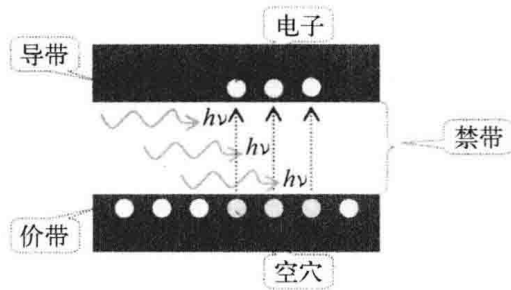


图 1-4 内光电效应原理

原理如图 1-4 所示,即硅单晶中处于价带的一部分电子因吸收光子能量而跃迁到导带成为自由载流子,与此同时,价带中增多等量的带正电的空穴,自由载流子可以在外加电场作用下做定向运动而形成可被检测的电信号。

不是所有光子都能引发硅晶体的内光电效应。只有被吸收的光子能量大于其禁带宽度时,这种效应才能发生。在室温下,硅单晶的禁带宽度约为 1.12 eV;光子具有能量(E)由其频率(ν)决定如下:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \tag{1-2}$$

式中, h 为普朗克常量; c 为光速; λ 为光子的波长。由此式可以算得,能够激发硅单晶中