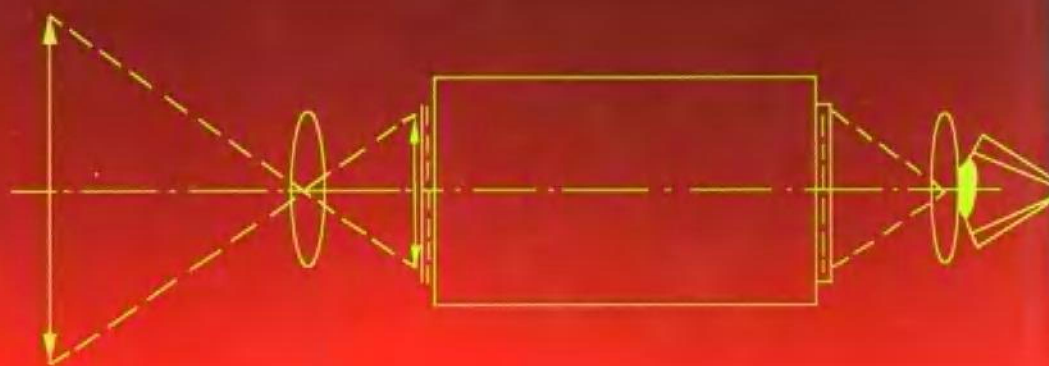


光电子成像器件原理

The Principle of Photoelectronic Imaging Devices

向世明 倪国强 编著



国防工业出版社

TN15

1

光电子成像器件原理

The Principle of Photoelectronic Imaging Devices

向世明 编著
倪国强

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

光电子成像器件原理/向世明,倪国强编著. —北京:
国防工业出版社, 1999.4

ISBN 7-118-02004-4

I. 光… II. ①向… ②倪… III. 成像-光电器件 IV.
TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98) 第 26808 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 $\frac{3}{8}$ 286 千字

1999 年 4 月第 1 版 1999 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1 - 1500 册 定价: 21.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘书长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

光电子成像是以光子、光电子作为信息载体,研究图像转换、增强、接收、传输、处理、显示及存储等物理过程的一门综合性学科。它的发展历史,如果自 1934 年 G. Holst 等人发明了第一只红外变像管算起,已有六十余年了。六十年来,光电子成像取得了惊人的发展,显示出极为辉煌的前景。其原因大概可归纳为三点:首先是对黑暗的征服。透过烟雾水汽,可在极微弱光线下不借助照明来观察景物,或利用景物本身的热辐射来获得图像信息。这二者构成了夜视领域中极为重要的微光与红外热成像技术。军事上的需要推动着作为光电子成像技术的一个重要组成部分——夜视技术迅猛的发展。其次是对娱乐完美的向往。广播电视与未来家庭影院的发展有赖于高清晰度、高信噪比电视摄像管的进展。而“图像信息”的获取与处理已成为现代文明社会发展的标志之一。三是对视觉的开拓。如记录超快速现象(纳秒、皮秒、直到飞秒),以及除热成像外,捕捉和增强 γ 射线、X 射线、紫外、红外、亚毫米等非可见辐射图像的探测、识别与处理。正因为如此,光电子成像器件在国防、工业、医学、核物理学与天文学上获得广泛的应用,具有很强的生命力。

由向世明研究员、倪国强教授编著的《光电子成像器件原理》一书共有十八章,内容涉及到光电子成像器件的物理基础与工作原理,书中对构成器件的元部件如光阴极、电子光学、发光显示、微通道板和红外热像探测器等有详尽的叙述。特别对器件与系统的总体分析、性能测试、特性评价给予更多的注意。此外还评述了光电子成像的当前进展和发展水平。书中不仅深入浅出的阐述器件的原理与一些复杂的理论问题,而且考虑到读者的需要,列出了不

少对于设计、选型、研制有参考价值的曲线、数据与图表,应该说内容是丰富和全面的。

每一位撰写非基础类的技术书刊的同志(包括我在内)都会有这样的体会:由于出版周期长,书籍出版后,总感到这是一件“遗憾”的工作,因为随着科学技术日新月异的发展,书中有一些内容(特别是数据、图表)已“落后”了。因此我向两位作者建议,在器件与系统的基本原理、设计方法与特性分析的叙述上下功夫,使读者树立正确的概念与坚实的分析能力。看来两位作者是下了功夫的。由于他们两位处于教学与科学研究的第一线,书中有不少地方是他们的经验与教学科研的总结,具有自己的特色。总之,本书的出版是对有关光电子成像器件(包括微光夜视、红外热成像)等技术类的著作与书籍的补充。特此我向有关光电子成像、电子物理、电子器件、半导体物理、电真空物理等专业的大学生、研究生,以及研究技术人员、大学教师推荐,是为序。

周立伟

1998年7月

前 言

光电子学(Photoelectronics)是专门研究信息载体——光子、光电子或电子/空穴对之间相互转换、增强、处理、发送、接收和显示物理过程的一门学科。光电子成像是光电子学的重要组成部分。它能弥补或改善人眼在空间、时间、灵敏度和响应波段等方面分辨能力的局限,大大扩展了人眼的视野,把人眼天生不能看见或不易看见的微弱光、红外光、X光、紫外光及其他电磁辐射下的静态和瞬态景物,变为可视图像。因此,作为现代信息科学的一个重要内容,光电子成像技术一直受到人们的普遍关注,发展异常迅速,在军事侦察、公安侦破、天文观测、医疗诊断、水下勘探和航天开发及物理、化学、生物、医学、环保等学科研究活动中,已经为人们创造和将要创造巨大的社会效益和经济效益。同时,上述所列应用领域和学科的不断发展和进步,又为光电子成像技术本身的更新换代,注入了新的活力,提供了茁壮成长的沃土。

随着我国经济改革的深入和综合国力的不断增强,用高科技武装和促进现有工农业发展,加速部队装备的现代化,已经不只是一个口头禅,更是作为人们搞规划、定计划、见行动的指导思想了。作为高科技的一个重要分支,光电子成像技术及其核心器件和仪器已经引起愈来愈多的工程技术人员、管理人员、领导干部、解放军指战员以及求知若渴的大学生、研究生的广泛兴趣,他们期望更快、更多地了解这一高新技术的基本内容,发展动态和在各自领域里开发应用的价值。这种强烈的社会需求,正是我们编著本书的契机和依据。

全书共十八章,分别深入浅出地介绍了各类光电子成像器件的工作原理、基本构成、性能评价和总体应用等问题;评述了国内

外这一高新技术的近期发展动态和水平;列举了对研制、设计、生产、选型和应用工作有参考价值的若干基本公式、数据、曲线和图表。

本书的特点是信息量大,涉及面广,说理充分,条理清楚,感兴趣的读者可从中得到光电子成像器件、系统中图像信息传递各环节之机理和作用的清晰概念,深信本书的出版发行会对他们的研究、开发相关技术产品的工作,有所补益和帮助。

值得特别提出的是,北京理工大学周立伟教授是编写本书的最早倡导者,在本书成文出版的过程中,一直给予了很多关心和支持,审阅了全部手稿,提出了宝贵意见和建议,并为本书做序。对此,深表谢意。

本书是积我们多年的科研、教学活动的部分经验体会,参考了《电光学手册》、《像管》等大量的文献资料后编著而成的。对已被本书引证的上述参考文献和书籍个别内容的作者表示谢意。

此外,西安应用光学研究所张季涛、梁燕熙两位研究员和其他国内同行为本书提供了各种指导和帮助,致以深切的谢意。书中的大部分插图由黄忆澄、赵林霞、檀萍和卞丽艳等同志描绘,对他们的帮助,表示感谢。

本书第四章、第八章由北京理工大学倪国强教授执笔,其余各章及全书统稿由向世明教授负责。

热忱希望同行及广大读者对本书的遗漏、不足或错误之处,提出批评、指正。

编著者

1998.6

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 光电子成像技术的意义和作用	1
§ 1.2 光电子成像系统原理、构成和分类	3
§ 1.3 微光夜视器件技术发展简况	6
§ 1.4 红外热成像器件技术发展简况	9
§ 1.5 光电子成像器(部)件原理概言表	12
第二章 辐射源	18
§ 2.1 引言	18
§ 2.2 电磁波谱	18
§ 2.3 辐射源特性及其度量	20
§ 2.4 辐射源分类	22
§ 2.5 绝对黑体及其基本定律	23
§ 2.6 常见辐射源	26
§ 2.7 激光器原理及其应用	29
§ 2.8 辐射能在大气中的传播	33
第三章 光学系统和光学传递函数	37
§ 3.1 引言	37
§ 3.2 光电子成像光学系统功能及特点	37
§ 3.3 成像光学系统特征参数	40
§ 3.4 光学传递函数像质评价简介	42
§ 3.5 光电子成像用物镜的类型和特点	49
§ 3.6 物镜参数优选设计考虑	52
§ 3.7 透镜衍射受限的 MTF 和动像 MTF	54

第四章 光电子成像器件中的电子透镜	58
§ 4.1 引言	58
§ 4.2 静电透镜引论	60
§ 4.3 近贴聚焦电子透镜	62
§ 4.4 同心球聚焦电子透镜	65
§ 4.5 静电阴极透镜	68
§ 4.6 旋转对称系统的近轴光学	70
§ 4.7 磁透镜引论	71
§ 4.8 电磁聚焦电子透镜	73
第五章 微光像增强器	77
§ 5.1 引言	77
§ 5.2 像增强器原理及功能	79
§ 5.3 像增强器主要特性参数	81
§ 5.4 微光像增强器典型结构和技术特点	85
第六章 电视摄像管	96
§ 6.1 引言	96
§ 6.2 电视摄像管工作原理	97
§ 6.3 电视摄像管性能参数	100
§ 6.4 常见电视摄像管的典型结构和技术特点	103
§ 6.5 典型电视摄像器件性能简录	111
第七章 固体摄像器件	114
§ 7.1 引言	114
§ 7.2 CCD 工作原理	115
§ 7.3 CCD 特征参数及其评价	120
§ 7.4 微光 CCD	126
第八章 光电子成像器件电子透镜像质评定	129
§ 8.1 像差来源及分类	129
§ 8.2 阴极透镜的横向像差	130
§ 8.3 阴极透镜轴上点的一阶近轴横向色球差	131
§ 8.4 电子逸出的初角度分布与初能量分布	134

§ 8.5	锐聚焦系统轴上点一阶横向色球差的 均方根半径	137
§ 8.6	静电阴极透镜轴外像差的确定	139
§ 8.7	阴极透镜电子光学鉴别率	142
§ 8.8	微光像增强器 <i>MTF</i> 特性分析	143
§ 8.9	近贴聚焦像管电子透镜 <i>MTF</i>	145
§ 8.10	锐聚焦像管电子透镜 <i>MTF</i>	148
§ 8.11	微光像增强器焦深与公差分析	150
第九章	光阴极	156
§ 9.1	引言	156
§ 9.2	光阴极机理	157
§ 9.3	光阴极特性参数及其制约因素	162
§ 9.4	光阴极量子效率的一般表达式	169
§ 9.5	实用光阴极	172
第十章	微通道板电子倍增器 (MCP)和纤维光学成像元件	177
§ 10.1	引言	177
§ 10.2	MCP 工作原理	178
§ 10.3	MCP 特性参数	183
§ 10.4	MCP 电流增益特性方程和信噪比特性	186
§ 10.5	MCP 的应用	190
§ 10.6	光学纤维成像元件工作原理	192
§ 10.7	光学纤维传像元件技术特点和典型应用	193
§ 10.8	光学纤维传像元件特性参数	194
第十一章	图像显示器件	196
§ 11.1	引言	196
§ 11.2	电子束显示器件中的荧光屏	197
§ 11.3	平板显示器件	202
§ 11.4	大屏幕显示	207
§ 11.5	立体图像显示	211

第十二章	光电子成像器件测试原理	213
§ 12.1	引言	213
§ 12.2	能量转换传输特性测试	214
§ 12.3	图像质量传输特性测试	216
§ 12.4	信噪比传输特性测试	221
§ 12.5	器件环境适应性测试	224
第十三章	光电子成像系统性能评价和分析	226
§ 13.1	引言	226
§ 13.2	人眼视觉特性	226
§ 13.3	系统能量传递链评价法	230
§ 13.4	系统对比度 (MTF) 传递链评价法	232
§ 13.5	系统信噪比传递链评价法	237
§ 13.6	系统信息率传递链评价法	245
第十四章	红外热成像器件	247
§ 14.1	引言	247
§ 14.2	红外探测器原理和结构	249
§ 14.3	红外探测器特性参数	262
§ 14.4	红外热成像器件总体评价	265
第十五章	第三代微光像增强器	270
§ 15.1	引言	270
§ 15.2	第三代微光成像器件的技术特色	270
§ 15.3	第三代微光像增强器的典型结构和关键技术	272
§ 15.4	GaAs 光阴极材料特性	275
§ 15.5	透射式 GaAs 光阴极组件	276
§ 15.6	GaAs 光阴极的预处理和 Cs、O 激活	278
§ 15.7	第三代微光像增强器用 MCP 特性	280
§ 15.8	第三代微光像增强器用光纤扭像器特性	281
§ 15.9	第三代微光像增强器用小型集成电源特性	281
第十六章	超二代微光像增强器	
	—— $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 光阴极晶膜生长监控原理	283

§ 16.1	引言·····	283
§ 16.2	II ⁺ 多碱光阴极晶膜生长的光学/光电监控 原理要点·····	283
§ 16.3	多碱光阴极薄膜生长反射光监控的理论基础·····	284
§ 16.4	多碱光阴极薄膜的 $R(d)$ 、 $R(\lambda)$ 特性 ·····	285
§ 16.5	多碱光阴极电子逸出深度 L 和逸出概率 $P(w,0)$ 的确定 ·····	287
§ 16.6	高灵敏度多碱光阴极薄膜生长的实际监控·····	289
第十七章	微光图像光子计数器·····	298
§ 17.1	引言·····	298
§ 17.2	MCP 微光管中的噪声源及其脉冲高度分布 (PHD) ·····	300
§ 17.3	MCP 微光管中噪声的抑制 ·····	304
§ 17.4	单光电子脉冲高度分布·····	305
§ 17.5	图像光子计数器工作原理·····	308
§ 17.6	微光图像光子计数器特性参数和测试评价·····	311
§ 17.7	微光图像光子计数器的应用·····	315
第十八章	X 线成像器件·····	317
§ 18.1	引言·····	317
§ 18.2	实用 X 线源及其辐射、透射和吸收特性 ·····	318
§ 18.3	X 线荧光转换屏成像原理·····	323
§ 18.4	X 线光阴极·····	325
§ 18.5	X 线成像中的 MCP ·····	331
§ 18.6	X 线像增强器原理·····	332
§ 18.7	X 线成像器件特性参数及其测试·····	335

Contents

Cpt.01	Brief Survey	1
1.1	Significance and Functions of Photoelectronic Imaging Technology	1
1.2	Principle, Constitution and Classification of Photoelectronic Imaging Systems	3
1.3	Brief Introduction to Low-Light-Level (LLL) Image Intensifier Technology	6
1.4	Brief Introduction to Infrared (IR) Thermal Image Devices	9
1.5	Summary of the Principles of Photoelectronic Image Devices and their Components	12
Cpt.02	Radiation Sources	18
2.1	Brief Description	18
2.2	Electromagnetic Wave Spectrum	18
2.3	Performances of Radiation Sources and their Metrologies	20
2.4	Classification of Radiation Sources	22
2.5	Absolute Blackbodies and their Fundamental Laws	23
2.6	Common Radiation Sources	26
2.7	Lasers and their Applications	29
2.8	Radiation Energy Transmission through the Atmospheric Media	33
Cpt.03	Optical Systems and Optical Transfer Function	37

3.1	Brief Description	37
3.2	Functions and Features of Optical Systems in Photoelectronic Imaging Technology	37
3.3	Characteristic Parameters of Imaging Optical Systems	40
3.4	Brief Explanation of the Modulation Transfer Function (MTF) for Image Quality Assessment	42
3.5	Classification and Features of the Objective Lens for Photoelectronic Imaging	49
3.6	Optimal Considerations of the Objective Lens Parameters	52
3.7	Diffraction-Limited MTF and Image-Moving MTF of Photoelectronic Imaging Systems	54
Cpt.04	Electron Lenses in Photoelectronic Imaging Devices	58
4.1	Brief Description	58
4.2	Introduction to Electrostatic Lenses	60
4.3	Electrostatic Lens with Proximity-Focusing System ...	62
4.4	Electrostatic Lens with Concentric Spherical Focusing System	65
4.5	Electrostatic Cathode Lens	68
4.6	Paraxial Optics of Axially Symmetric Electron Lenses	70
4.7	Introduction to Magnetic Lenses	71
4.8	Electromagnetic Focusing Lenses	73
Cpt.05	Image Intensifiers	77
5.1	Brief Description	77
5.2	Principles and Functions of Image Intensifiers	79
5.3	Characteristic Parameters of Image Intensifiers	81
5.4	Typical Constructions and Technical Features	