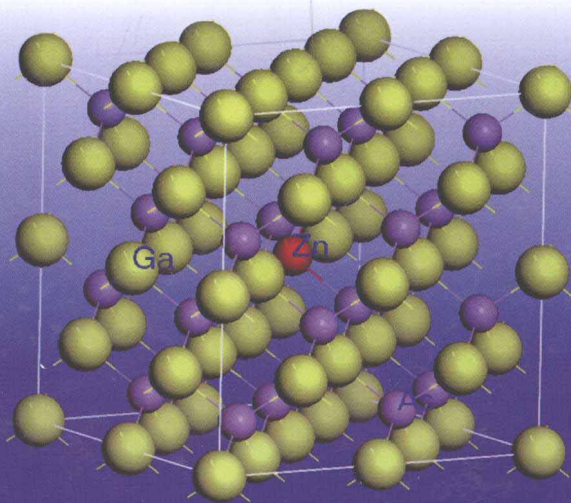


“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

# GaAs光电阴极

常本康 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

# GaAs 光电阴极

常本康 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是著者承担国家科研项目的总结,是论述 GaAs 光电阴极的专著.全书共分 8 章,介绍了三代微光像增强器、GaAs 和 GaAlAs 材料及光电阴极的发展概况;研究了 GaAs 光电阴极的光电发射与光谱响应理论、多信息量测控与评估系统、激活工艺及其优化;提出了变掺杂 GaAs 光电阴极的物理概念,探索了反射式和透射式变掺杂 GaAs 光电阴极理论,在三代微光像增强器中进行了实践;最后针对新一代微光像增强器研究,对 GaAs 光电阴极进行了回顾与展望.

本书可作为大专院校光学工程、电子科学与技术 and 光信息科学与技术等专业本科生和研究生的教学用书,也可供从事光电阴极及电子源研究的科研人员 and 工程技术人员、教师阅读,同时也可供从事光电阴极和电子源生产以及使用光电器件或电子枪的有关人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

GaAs 光电阴极/常本康著,一北京:科学出版社,2012

(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-035696-3

I. ①G… II. ①常… III. ①光电阴极 IV. ①O462.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 234306 号

责任编辑:刘凤娟 尹彦芳/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:蔡敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年12月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张:25

字数:485 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 丛 书 序

长期以来,我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书.如今,在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学与光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下,这样一个愿望终于得以实现,这使我感到由衷的欣慰和喜悦,我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展.

当今世界科学技术发展日新月异.科技创新能力已成为一个地区、一个国家,尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力.在众多纷繁的科技领域中,光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就.不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学,对现代人类社会和人类生活影响甚大的一些技术科学,如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等,都需要光学与光子学的知识.光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学,光学与光子学涉及几乎所有技术前沿的核心技术.中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭.

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》,是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华,也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photonics)的最新研究进展.我和所有编委们一同期望着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度.积跬步至千里,汇小溪成江河.改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上.让我们大家共同努力,以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献.

母国光

2011年1月

# 前 言

夜视技术是利用夜间天空辐射对目标的照射,或利用地球表面景物的自身热辐射,借助科学仪器观察景物图像,其核心是传感器技术,目前夜视成像器材主要有微光像增强器与红外探测器两类.

微光夜视系统发展于 20 世纪 60 年代,它利用目标反射的星光、月光和大气辉光,通过微光像增强器的增强达到人眼能进行观察的目的.微光像增强器是通过光电阴极进行光电转换,1965 年,自 NEA GaAs 光电阴极发明以来,就成为微光探测器件和自旋电子源的关键材料.然而,由于西方对我国的禁运,在微光像增强器中应用的 NEA GaAs 光电阴极材料的设计、制备、评价工作只能依靠我国科技工作者的自身努力.

本书是著作者承担国家多项 NEA GaAs 光电阴极科研项目所开展的原创性研究工作的总结,也是融合著作者指导的数十篇硕士和博士论文的基础上编著而成.全书共 8 章,第 1 章介绍三代微光像增强器和 GaAs 光电阴极的概况及国内外研究现状;第 2 章介绍 GaAs 和 GaAlAs 光电阴极材料的一般性质;第 3 章介绍 GaAs 光电阴极光电发射过程、电子能量分布、均匀掺杂 GaAs 光电阴极量子效率公式的推导、GaAs 光电阴极性能参量对量子效率的影响和评估;第 4 章介绍 GaAs 光电阴极的多信息量测控与评估系统的设计与研制;第 5 章介绍 GaAs 光电阴极 Cs-O 激活机理、激活过程中多信息量监控、Cs、O 激活工艺及其优化;第 6 章介绍反射式变掺杂 GaAs 光电阴极能带结构、量子效率理论、材料外延生长、掺杂结构设计和激活实验研究;第 7 章介绍透射式变掺杂 GaAs 光电阴极能带结构、材料与组件的性能测试、光学性质与结构模拟、光电阴极激活、阴极组件光学性能对光谱响应的影响、阴极组件工艺对 GaAs 光电阴极材料性能的影响、变掺杂 GaAs 光电阴极分辨力特性研究;第 8 章是回顾与展望,简单介绍新一代微光像增强器光电阴极的研究展望.全书的重点是变掺杂 GaAs 光电阴极理论、激活技术、多信息量测试与评估.

本书承蒙微光夜视技术重点实验室学术委员会主任苏君红院士与南京大学郑有焘院士推荐出版,在此表示衷心感谢.

在本书即将出版之际,我还要感谢项目组的魏殿修教授、徐登高教授、杨国伟教授、钱芸生\* 教授、邹继军\* 教授、宗志园\* 副研究员、高频高级工程师、富容国

---

\* 他们在读博期间也对本课题做出了贡献.

副教授、邱亚峰副教授、刘磊副教授、詹启海同志;感谢李蔚博士、杜晓晴博士、刘磊博士、傅文红博士、杨智博士、牛军博士、陈亮博士、杜玉杰硕士、李敏硕士、王惠硕士、欧玉平硕士、王旭硕士、季晖硕士、夏扬硕士、顾燕硕士、叶钧硕士、侯瑞丽硕士、王勇硕士、郭向阳硕士,在 GaAs 光电阴极研究已经走过的 16 年中,他们的出色工作和创新成果,使得我们如期完成了三代微光像增强器 GaAs 光电阴极的研究;我同样要感谢在读的张益军博士、熊雅娟博士、崔东旭博士、石峰博士、赵静博士、任玲博士、王晓晖博士、李飙博士、杜玉杰博士、付小倩博士、徐源博士、王洪刚博士、鱼晓华博士、陈鑫龙博士、金睦淳博士、郝广辉博士、郭婧博士、杨明珠博士,他们同样为三代微光像增强器 GaAs 光电阴极的研究作出了重要贡献,并为他们能陪伴我继续进行新一代微光像增强器 GaAs 光电阴极的研究而感到欣慰.

GaAs 光电阴极仍然在发展之中,尚有许多科学问题没有解决,由于著作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望各位专家和广大读者批评指正.

著 者

2012 年 4 月 16 日

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 三代微光像增强器简介	1
1.1.1 三代微光像增强器的基本原理	1
1.1.2 GaAlAs/GaAs 光电阴极	4
1.1.3 微通道板 (MCP)	5
1.1.4 积分灵敏度	6
1.1.5 分辨力、MTF	6
1.1.6 信噪比	7
1.2 三代微光像增强器的应用领域及国内外发展现状	8
1.2.1 三代微光像增强器的应用领域	8
1.2.2 三代微光像增强器的国内外发展现状	11
1.3 GaAs 光电阴极的发展概况	13
1.3.1 GaAs 光电阴极的发现及特点	13
1.3.2 GaAs 光电阴极的制备	14
1.4 GaAs 光电阴极的国内外研究现状	17
1.4.1 GaAs 光电阴极的材料特性	17
1.4.2 GaAs 光电阴极激活工艺的研究	19
1.4.3 GaAs 光电阴极的稳定性研究	20
1.4.4 GaAs 光电阴极表面模型的研究	22
1.5 国内外 GaAs 光电阴极的性能现状	26
1.5.1 国外 GaAs 光电阴极的技术水平现状	26
1.5.2 国内 GaAs 光电阴极的技术水平现状	29
第 2 章 GaAs 和 GaAlAs 光电阴极材料	31
2.1 GaAs 材料的性质	31
2.1.1 GaAs 的物理和热学性质	31
2.1.2 GaAs 的电阻率和载流子浓度	33
2.1.3 GaAs 中载流子离化率	34
2.1.4 GaAs 中电子的迁移率、扩散和寿命	34
2.1.5 GaAs 中空穴的迁移率、扩散和寿命	37
2.1.6 GaAs 的能带间隙	40

2.1.7	GaAs 的光学函数	41
2.1.8	GaAs 的红外吸收	46
2.1.9	GaAs 的光致发光谱	47
2.1.10	GaAs 中缺陷和缺陷的红外映像图	51
2.1.11	GaAs 的表面结构和氧化	56
2.1.12	GaAs 的腐蚀速率	58
2.1.13	GaAs 的界面和接触	59
2.2	GaAlAs 材料的一般性能	61
2.2.1	GaAlAs 中的缺陷能级	61
2.2.2	GaAlAs 中的 DX 缺陷中心	65
2.2.3	GaAlAs 的光致发光谱	68
2.2.4	GaAlAs 的电子迁移率	70
2.2.5	LPE GaAlAs 中的载流子浓度	72
2.2.6	MOCVD GaAlAs 的载流子浓度	74
2.2.7	MBE GaAlAs 的载流子浓度	75
2.2.8	反应离子和反应离子束对 GaAlAs 的腐蚀速度	76
2.2.9	LPE GaAlAs 的光学函数	76
<b>第 3 章</b>	<b>GaAs 光电阴极的光电发射与光谱响应理论</b>	<b>90</b>
3.1	GaAs 光电阴极光电发射过程	90
3.1.1	光电子激发	91
3.1.2	光电子往阴极表面的运输	92
3.1.3	光电子隧穿表面势垒	95
3.2	GaAs 光电阴极电子能量分布	99
3.2.1	透射式光电阴极电子能量分布	99
3.2.2	反射式光电阴极电子能量分布	102
3.3	GaAs 光电阴极量子效率公式的推导	107
3.3.1	反射式 GaAs 光电阴极	108
3.3.2	背面光照下的透射式 GaAs 光电阴极	108
3.3.3	正面光照下的透射式 GaAs 光电阴极	109
3.3.4	考虑 $\Gamma$ 、 $L$ 能谷及热电子发射的量子效率公式	111
3.3.5	考虑前表面复合速率的量子效率公式推导	114
3.4	GaAs 光电阴极性能参量对量子效率的影响	120
3.4.1	电子表面逸出几率	120
3.4.2	电子扩散长度	120
3.4.3	光电阴极厚度	121



3.4.4	前表面复合速率	122
3.4.5	后界面复合速率	123
3.4.6	吸收系数	124
3.5	GaAs 光电阴极性能参量的评估	125
3.5.1	$P$ 、 $L_D$ 、 $S_{fv}$ 和 $S_v$ 值的确定	125
3.5.2	积分灵敏度的计算	126
<b>第 4 章</b>	<b>GaAs 光电阴极多信息量测控与评估系统</b>	<b>128</b>
4.1	GaAs 光电阴极多信息量测控与评估系统的设计	128
4.1.1	Cs 源电流的原位监测和记录	128
4.1.2	O 源电流的原位监测和记录	128
4.1.3	超高真空系统真空度的原位监测和记录	129
4.1.4	光电阴极光电流的原位监测和记录	129
4.1.5	光电阴极光谱响应的原位监测和记录	129
4.2	超高真空激活系统	130
4.2.1	超高真空激活系统的结构和性能	131
4.2.2	超高真空的获取	134
4.2.3	超高真空系统与国外的差距	134
4.3	多信息量在线监控系统的构建	135
4.4	光谱响应测试仪	138
4.4.1	光谱响应测试原理	139
4.4.2	光谱响应测试仪的硬件结构	140
4.4.3	光谱响应测试仪的软件编制	144
4.4.4	光谱响应测试方式	149
4.5	在线量子效率测试与自动激活系统	149
4.5.1	系统结构	150
4.5.2	系统硬件设计	151
4.5.3	自动激活策略	156
4.5.4	软件设计	158
4.5.5	实验与结果	169
4.6	GaAs 光电阴极表面分析系统	171
4.6.1	X 射线光电子能谱仪	171
4.6.2	紫外光电子能谱仪	173
4.6.3	变角 XPS 表面分析技术	174
4.7	超高真空的残气分析系统	176
4.7.1	四极质谱仪原理与结构	176

4.7.2	HAL201 残余气体分析仪软件	177
4.7.3	超高真空的残气分析	178
4.8	研制的 GaAs 光电阴极多信息量测试与评估系统	184
<b>第 5 章</b>	<b>反射式 GaAs 光电阴极的激活工艺及其优化研究</b>	<b>186</b>
5.1	反射式 GaAs 光电阴极激活工艺概述	186
5.2	Cs 源、O 源的除气工艺	187
5.3	GaAs 表面的净化工艺研究	188
5.3.1	化学清洗工艺	189
5.3.2	加热净化工艺的优化设计	190
5.3.3	GaAs(100) 面净化后的表面模型	191
5.3.4	阴极表面净化与 XPS 分析试验	193
5.4	GaAs 光电阴极 Cs-O 激活机理	196
5.4.1	[GaAs(Zn):Cs]:O-Cs 光电发射模型	196
5.4.2	在 Cs-O 激活中掺 Zn 的富砷 (2×4)GaAs(100) 表面的演变	197
5.4.3	基于 [GaAs(Zn):Cs]:O-Cs 模型的计算	200
5.5	GaAs 光电阴极激活过程中多信息量监控	214
5.6	GaAs 光电阴极的 Cs、O 激活工艺及其优化研究	216
5.6.1	首次进 Cs 量对光电阴极的影响	216
5.6.2	Cs/O 流量比对光电阴极激活结果的影响	220
5.6.3	不同激活方式比较	222
5.6.4	高低温两步激活工艺研究	224
5.6.5	高低温激活过程中光电子的逸出	228
5.6.6	GaAs 光电阴极表面势垒的评估	233
5.6.7	Cs、O 激活工艺的优化措施	237
5.7	GaAs 光电阴极的稳定性研究	238
5.7.1	光照强度与光电流对光电阴极稳定性的影响	238
5.7.2	Cs 气氛下光电阴极的稳定性	241
5.7.3	重新活化后光电阴极的稳定性	243
5.7.4	光电阴极光电流衰减时量子效率曲线的变化	243
5.7.5	重新活化后光电阴极量子效率曲线的变化	246
<b>第 6 章</b>	<b>反射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料与量子效率理论研究</b>	<b>248</b>
6.1	反射式变掺杂 GaAs 光电阴极能带结构理论研究	248
6.1.1	梯度掺杂 GaAs 光电阴极的能带结构	248
6.1.2	指数掺杂 GaAs 光电阴极的能带结构	250
6.1.3	指数掺杂 GaAs 光电阴极的电子扩散漂移长度	251

6.2	反射式变掺杂 GaAs 光电阴极量子效率理论研究	253
6.2.1	指数掺杂光电阴极量子效率公式	253
6.2.2	指数掺杂光电阴极灵敏度与量子效率理论仿真	254
6.2.3	梯度掺杂 GaAs 光电阴极量子效率模型研究	257
6.3	变掺杂 GaAs 光电阴极材料的外延生长	258
6.3.1	GaAs 光电阴极材料的生长方法	258
6.3.2	变掺杂光电阴极材料 MBE 外延生长技术研究	260
6.3.3	MBE 外延变掺杂光电阴极材料测试评价研究	261
6.4	反射式变掺杂 GaAs 光电阴极掺杂结构的设计与制备工艺研究	264
6.4.1	变掺杂 GaAs 光电阴极材料的设计和制备	265
6.4.2	变掺杂 GaAs 光电阴极的激活实验	267
6.4.3	变掺杂 GaAs 光电阴极的激活结果	270
6.4.4	高性能反射式变掺杂 GaAs 光电阴极研究	272
6.5	反射式变掺杂 GaAs 光电阴极的评价方法	276
6.5.1	激活时 Cs 在 GaAs 光电阴极表面的吸附效率评估	276
6.5.2	变掺杂 GaAs 光电阴极的结构性能评估	282
6.5.3	不同变掺杂 GaAs 光电阴极的结构性能对比	285
6.6	反射式模拟透射式变掺杂 GaAs 光电阴极设计与实验	288
6.6.1	MBE 生长的反射式模拟透射式变掺杂 GaAs 光电阴极设计与实验	288
6.6.2	MOCVD 生长的反射式模拟透射式变掺杂 GaAs 光电阴极设计与实验	292
<b>第 7 章</b>	<b>透射式变掺杂 GaAs 光电阴极理论与实践</b>	<b>296</b>
7.1	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极能带结构与材料设计	296
7.1.1	均匀掺杂和指数掺杂 GaAs 光电阴极能带结构比较	296
7.1.2	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极结构设计与制备	297
7.2	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料与组件的性能测试	299
7.2.1	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料的 SEM 测试	299
7.2.2	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料的 ECV 测试	300
7.2.3	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料的 HRXRD 测试	302
7.2.4	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极组件的 HRXRD 测试	303
7.3	透射式 GaAs 光电阴极组件的光学性质与结构模拟	304
7.3.1	透射式 GaAs 光电阴极组件光学性能测试	304
7.3.2	透射式 GaAs 光电阴极组件结构模拟理论模型	306
7.3.3	透射式 GaAs 光电阴极组件光学性能拟合	308
7.3.4	分光光度计测试误差对光学性能的影响	321

7.4	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极激活	321
7.4.1	MBE 生长的透射式变掺杂 GaAs 光电阴极激活	322
7.4.2	MOCVD 生长的透射式变掺杂 GaAs 光电阴极激活	324
7.4.3	透射式变掺杂 GaAs 光电阴极光谱响应的研究	325
7.4.4	MBE 与 MOCVD 生长的透射式变掺杂 GaAs 光电阴极材料与组件的比较	333
7.5	阴极组件光学性能对微光像增强器光谱响应的影响	334
7.5.1	透射式 GaAs 光电阴极光谱响应曲线拟合与结构设计	335
7.5.2	光电阴极组件光学性能对微光像增强器光谱响应的影响	337
7.5.3	国内外微光像增强器 GaAs 光电阴极光谱响应特性比较	338
7.6	阴极组件工艺对 GaAs 光电阴极材料性能的影响	339
7.6.1	反射式和透射式光电阴极的联系和区别	339
7.6.2	光电阴极组件工艺对 GaAs 光电阴极材料性能的影响	342
7.7	变掺杂 GaAs 光电阴极分辨力特性研究	348
7.7.1	均匀掺杂和变掺杂 GaAs 光电阴极理论模型	348
7.7.2	电子扩散长度、掺杂浓度与光电阴极发射层厚度对分辨力的影响	354
7.7.3	均匀掺杂、梯度掺杂与指数掺杂光电阴极调制传递函数的比较	357
7.7.4	微光像增强器的分辨力特性研究	361
<b>第 8 章</b>	<b>回顾与展望</b>	<b>366</b>
8.1	研究工作的简单回顾	366
8.2	研究工作中的纠结	367
8.3	新一代微光像增强器光电阴极的研究展望	367
	<b>参考文献</b>	<b>369</b>

# 第1章 绪 论

GaAs 光电阴极的最大需求是微光像增强器, 本章首先介绍了三代微光像增强器的基本原理、应用领域及国内外发展现状; 其次分析了 GaAs 光电阴极的国内外研究及性能现状.

## 1.1 三代微光像增强器简介

### 1.1.1 三代微光像增强器的基本原理

三代微光像增强器是直视和电视微光夜视系统的核心, 它的主要作用是: 增加像面照度、放大视角及保证合适的视场. 为了使微弱的或不可见的反射辐射图像通过光电成像系统变成可见图像, 微光像增强器本身应能起到变换光谱、增强亮度和成像的作用. 通常采用如图 1.1 所示的结构来达到这些目的<sup>[1]</sup>, 图 1.2 给出了三代微光像增强器/四代微光像增强器及其结构示意图. 三代微光像增强器是一种电真空成像器件, 主要由光电阴极、MCP、荧光屏和电子光学系统组成.

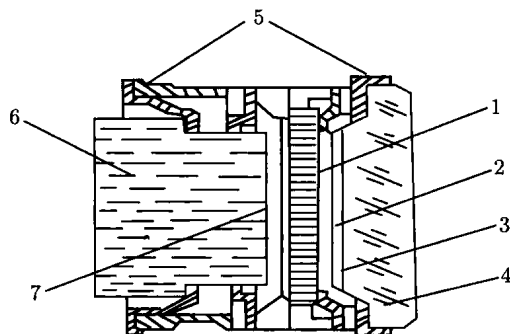


图 1.1 美国 ITT 公司的三代微光像增强器

1. MCP; 2. GaAs/AlGaAs 光电阴极; 3.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 4. 阴极面板; 5. 钢封; 6. 光纤面板; 7. 荧光屏

GaAs/AlGaAs 光电阴极做在阴极面板的内侧, 由  $\text{Si}_3\text{N}_4$  与阴极面板连接. 当被一定频谱的光线照射时, 它能发射出光电子, 而且发射的光电子数量与入射光照强度成正比, 从而将输入到它上面的低能辐射图像转变为电子图像.

电子光学系统采用双钢封平板电容器系统. 由 GaAs/AlGaAs 光电阴极与 MCP 构成第一个平板电容器, MCP 与荧光屏构成第二个平板电容器.

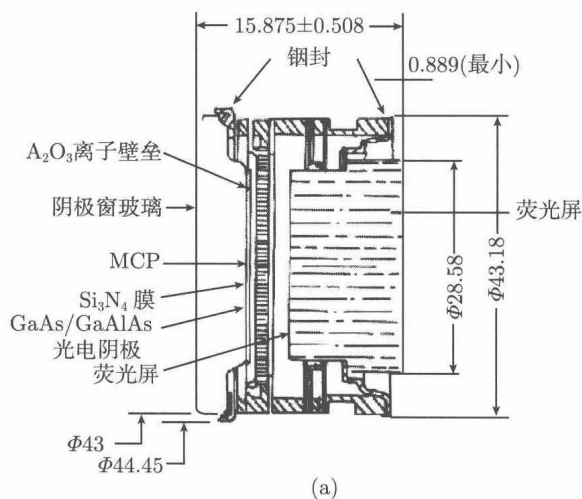


图 1.2 三代微光像增强器/四代微光像增强器及其结构示意图

(a) 结构图 (单位: mm); (b) 外形图

荧光屏做在人眼观察的光纤面板的内侧。

从 GaAs/AlGaAs 光电阴极发射出的光电子经高压加速后打在 MCP 上, 经 MCP 倍增后, MCP 发射的电子打在荧光屏上, 这样就将 GaAs/AlGaAs 光电阴极发射出的电子图像转换成人眼可以观察的光学图像。

从性能和结构上, 微光像增强器已经经历了一代、二代、超二代、三代和四代等发展历程。

第一代微光像增强器的主要特点是: 采用多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$  作为光电阴极以及光纤面板同心球电子光学透镜, 该系统能将自光电阴极逸出的光电子加速并聚焦到荧光屏上, 形成 40~50 倍增强的可见光输出图像。由于单级一代微光像增强器

增益较低,所以,通常需将三级一代微光像增强器通过光纤面板耦合起来使用。

第二代微光像增强器的主要特点是:采用多碱阴极  $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})(\text{S}-20)$  作为光电阴极,使用微通道板为电子倍增器件。与第一代微光像增强器相比,增益得到很大提高,对强输入光照有一定的自动抑制作用,单级使用即可满足要求,外形尺寸也大大缩短,重量明显减轻。

超二代微光像增强器的结构和二代基本相同,通过提高光电阴极的灵敏度(由  $300\sim 400\mu\text{A}/\text{lm}$  提高到  $600\mu\text{A}/\text{lm}$  以上),减小微通道板噪声因数、提高输出信噪比和改善整管的调制传递函数(MTF),使鉴别率和输出信噪比提高到接近标准三代微光像增强器的水平。

三代微光像增强器与其他微光像增强器的主要区别是:1965年,Scheer和Vanlaar发明了负电子亲和势(NEA)光电阴极<sup>[2]</sup>。其灵敏度很高,大部分光谱区波段都比银-氧铯(S-1)和S-20光电阴极高好多倍,在近红外波段有很高的响应,量子效率比S-1光电阴极高几十倍,暗电流仅是S-1光电阴极的千分之一。三代微光像增强器采用光电阴极/MCP/荧光屏双近贴/双钨封结构。这类微光像增强器具有量子效率高、暗发射小、发射电子的能量分布及角分布集中、长波阈可调、长波响应扩展潜力大等优点,三代微光像增强器的灵敏度、分辨力和信噪比较二代微光像增强器有明显的提高。但为了延长器件寿命,需在MCP输入面蒸镀一层防止离子反馈膜,使三代微光像增强器在信噪比方面的优势有所减弱。

三代微光像增强器优缺点有如下几方面。

优点:

- (1) 三代微光像增强器具有高灵敏度、高分辨力、宽光谱响应、高传递特性和长寿命等特点,且结构紧凑,能与二代微光像增强器互换;
- (2) 能充分利用夜天自然光,这是由于三代GaAs光电阴极向近红外波长  $0.9\mu\text{m}$  延伸,在这一光谱区的光电子发射较二代多碱光电阴极约增长4倍;
- (3) 三代夜视仪的作用距离较二代夜视仪提高了50%以上。

缺点:

- (1) 制作三代微光像增强器涉及超高真空技术、表面物理技术、大面积高质量的单晶和复杂的外延生长技术,难度大、价格昂贵;
- (2) 三代微光像增强器采用近贴聚焦,应用平面GaAs光电阴极,面积受到限制。

四代微光像增强器是最近几年出现的最先进的微光器件。其特点是:结构和三代基本相同,仍采用GaAlAs/GaAs光电阴极,但灵敏度由平均  $1500\mu\text{A}/\text{lm}$  提高到  $2000\mu\text{A}/\text{lm}$  以上;分辨力较  $36\text{lp}/\text{mm}$  有大幅度提高;对MCP及其处理技术进行了改进,通过蒸镀离子阻挡膜,或改进MCP材料,减少了气体吸附和离子反馈噪声;加之在电源模块中加入自动门控功能,可使器件昼夜兼容 ( $10^{-4} \sim 10^4\text{lx}$ );器件的

工作寿命由 5000h 延长到 7500~10000h 以上。

各代微光像增强器的性能如表 1.1 所示。

表 1.1 各代微光像增强器的性能比较<sup>[3~10]</sup>

代名	积分灵敏度/( $\mu\text{A}/\text{lm}$ )	分辨力/(lp/mm)	信噪比/ $10^{-4}\text{lx}$	寿命/h
二代	240~350	32	14	2000
超二代	500~700	40~55	21	10000
高性能超二代	700~800	60~64	22	15000
三代	800~1000	40	14~21	10000
高性能三代	1300~2200	45~64	21~25	15000
四代	> 2000	60~90	30	15000

三代及四代微光像增强器的四大关重件包括：透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MCP}$ (带离子壁垒膜的微通道板)、扭像器(或光纤面板)荧光屏和门控选通高压集成电源。

### 1.1.2 GaAlAs/GaAs 光电阴极

GaAs 光电阴极有反射式和透射式两种工作方式，在微光像增强器中普遍采用的是透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极，因为它符合微光成像器件的光路结构。而作为一种最为重要的透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极，是在美国 Varian 公司提出“反转结构”之后才迅猛发展起来的。Varian 公司首先利用“反转结构”制备了透射式 NEA GaAlAs/GaAs 光电阴极，将其粘贴在玻璃衬底上。此后，随着 MOVPE(MOCVD) 外延技术的发展，“反转结构”又得到了进一步完善和提高。

实际的透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极结构比较复杂，其典型结构主要包括台面玻璃窗、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  过渡层、GaAlAs 缓冲层、GaAs 发射层、GaAlAs 阻挡层、GaAs 衬底、Ni-Cr 电极环几个层结构，其中 GaAlAs 阻挡层、GaAs 衬底会在制备过程中的“选择性腐蚀”工艺中采用不同的化学溶剂分别腐蚀掉，因此激活后的光电阴极应该由台面玻璃窗、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  过渡层、GaAlAs 缓冲层、GaAs 发射层和一层很薄的  $(\text{Cs},\text{O})$  激活层构成。可表示为：玻璃/ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ ，再在其上经过  $(\text{Cs},\text{O})$  激活就得到了透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极。

作为与 GaAs 晶格匹配最好的缓冲材料， $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  与 GaAs 的晶格失配最大为 0.2%，因此能有效地降低光电子在后界面的复合。而为了使阴极的短波截止朝蓝光方向延伸，可采用蓝光透射率高的 9741#玻璃取代传统的 7056#玻璃，并减小  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  缓冲层的厚度以及提高 Al/Ga 比例来进一步提高蓝光透射率。这种蓝光延伸的透射式 GaAlAs/GaAs 光电阴极的探测波段为 250~880nm，灵敏度一般可在  $2000\mu\text{A}/\text{lm}$  以上。图 1.3 给出了 ITT 公司蓝光延伸的 GaAlAs/GaAs 光电阴极与普通三代 GaAlAs/GaAs 光电阴极量子效率曲线的比较。



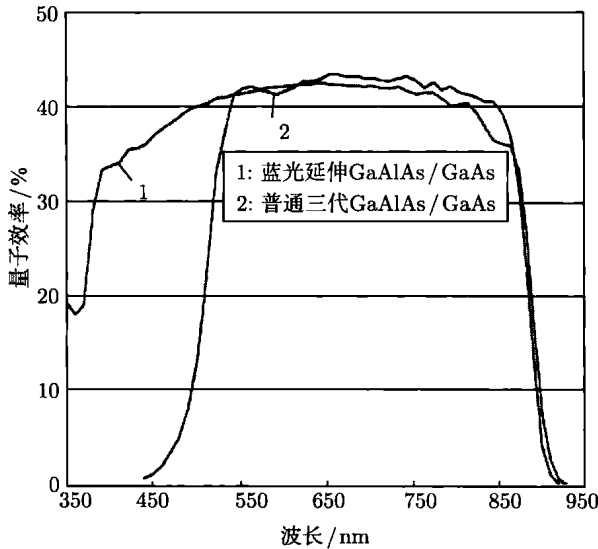


图 1.3 蓝光延伸与普通三代 GaAlAs/GaAs 光电阴极量子效率曲线的比较

### 1.1.3 微通道板 (MCP)

微通道板 (micro-channel plate, MCP) 是一种具有良好的二维空间分辨能力的通道式连续打拿极电子倍增器件, 由可多达数百万个规则紧密排列的细微玻璃通道组成, 每个通道即构成了一个单独连续打拿极倍增单元, 如图 1.4 所示, 两个端面镀有镍铬金属膜层, 其外环是同样镀有镍铬金属膜层的由实体玻璃构成的实体边, 平整的实体边可以提供良好的端面接触以便施加电压. MCP 必须工作于真空环境中, 其工作机理是利用一定能量的电子 (光子、离子或带荷粒子) 碰撞通道内表层而产生二次电子发射的特性, 二次电子在电场的作用下沿通道加速前进, 经过重复多次的碰撞和电子倍增过程, 最后在高电势输出端面有大量的电子输出产生, 这个过程被形象地比喻为“电子雪崩”。

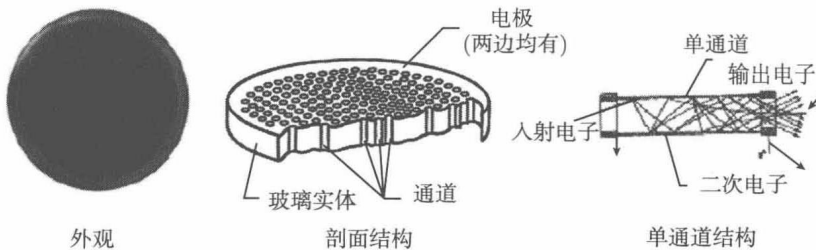


图 1.4 MCP 的结构及工作原理

MCP 有两种工作模式, 一种是模拟模式, 工作于非饱和状态, 即线性输出状态, 输出信号相应于输入光电子事件的数目二维分布, 这就是 MCP 在微光像增强器中