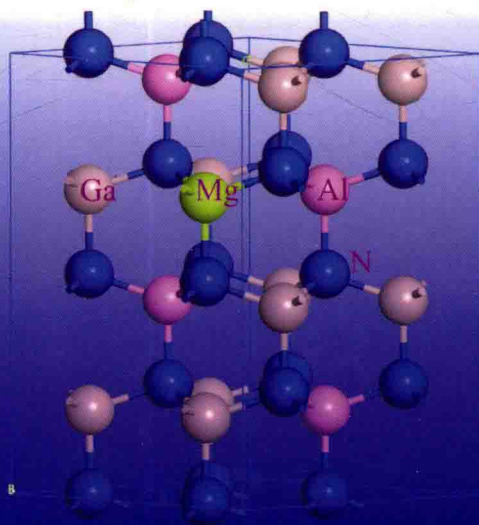


GaN基光电阴极

常本康 著



科学出版社

紫外光

GaN 基光电阴极

常本康 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者承担国家科研项目的总结,全书共10章,介绍了实用的紫外光电阴极、NEA GaN 基光电阴极以及研究方法与实验基础、GaN 基光电阴极材料;研究了 GaN 和 AlGaIn 光电阴极的能带结构、光学性质、光电发射理论和表面模型;探索了 GaN 和 AlGaIn 光电阴极的制备技术;最后对 GaN 基光电阴极研究进行了回顾与展望。

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的本科生及研究生教学用书,也可供从事光电阴极及电子源研究的科研人员和工程技术人员、教师阅读,还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

GaN 基光电阴极/常本康著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-058186-0

I. ①G… II. ①常… III. ①光电阴极—研究 IV. ①O462.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 140878 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 杨 然

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕 者

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 25

字数: 500 000

定价: 169.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

二十多年来,为了推进 GaN 基紫外焦平面列阵探测器的研制,美国国防高级研究计划局 (DAR-PA)、美国航空航天局 (NASA) 等投入了巨大的财力。美国 Nitronex 公司与北卡罗来纳大学、Honeywell 技术中心以及美国军队夜视实验室,早在 1999 年就研制成功基于 AlGaIn pin 型背照射 32×32 列阵焦平面探测器数字照相机。2005 年美国西北大学的 R. McClintock 等报道了可以成像的 320×256 日盲型 AlGaIn 紫外焦平面器件,许多国家已经研制出多种结构的 GaN 基紫外探测器,如光电导型、pn 结型、pin 型、 $p\pi n$ 型。

20 世纪 90 年代中期,针对微弱紫外探测存在的问题,欧美国家开展了 GaN 光电阴极的研制,2000 年左右,美国西北大学、普林斯顿大学、斯坦福大学等多家研究机构相继发布了 p 型 GaN 可以通过典型的 Cs 或 Cs、O 激活工艺获得负电子亲和势状态的报道,从而在真空探测器器件中拉开了 NEA GaN 光电阴极的研究序幕。NEA GaN 光电阴极的出现大大提高了紫外光电阴极的量子效率,是满足微弱紫外探测要求的非常理想且非常具有发展潜力的新型紫外光电阴极,在众多领域都显示出明显的优势和潜力。

尽管国内近年来将 GaN 紫外探测器件的研究提上了日程,但大多把研究重点放在了固体探测器件的研究上,对具有高量子效率的 NEA GaN 基紫外光电阴极的光电发射机理和制备技术的研究报道尚鲜见,这在很大程度上限制了我国紫外探测器件水平的提高。NEA GaN 基紫外光电阴极在国内 GaN 基材料应用领域内的研究亟待弥补。

本书源于国家自然科学基金青年基金项目(项目编号:60701013)、国家自然科学基金面上项目(项目编号:60871012)、微光夜视技术国防科技重点实验室基金项目(项目编号:BJ2014002)等,在研制过程中涉及 GaN 和 AlGaIn 光电阴极的研究,因此定名为《GaN 基光电阴极》。全书共 10 章,第 1 章介绍了实用的紫外光电阴极和 NEA GaN 基光电阴极的研究进展;第 2 章介绍了研究方法 with 实验基础,以及采用第一性原理进行材料性能表征,利用我们目前的 GaN 基光电阴极实验系统进行了验证;第 3 章介绍了 GaN 和 AlGaIn 晶体以及纤锌矿结构 GaN 基(0001)光电发射材料生长;第 4、第 5 章分别研究了 GaN 和 AlGaIn 光电阴极的能带结构和光学性质;第 6、第 7 章研究了 NEA GaN 基光电阴极光电发射理论;第 8、第 9 章研究了 GaN(0001)和 AlGaIn(0001)光电阴极的制备;第 10 章给出了回顾与展望。全书的重点是 GaN(0001)基光电阴极理论、激活技术、多信息量测试与评估。

在本书即将出版之际，感谢国家自然科学基金委员会对项目研究的支持；感谢有关研究机构和政府部门对该研究领域的资助；同时要感谢微光夜视技术国防科技重点实验室在项目（项目编号：BJ2014002）及实验方面的支持。

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、刘磊教授、宗志园副研究员、高频高级工程师、富容国副教授、邱亚峰副教授和詹启海工程师；感谢宗志园博士、钱芸生博士、李蔚博士、杜晓晴博士、刘磊博士、傅文红博士、邹继军博士、杨智博士、牛军博士、陈亮博士、张益军博士、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、王贵圆博士、TRAN HONG CAM 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、郭向阳硕士等，Ga₂N 基光电阴极取得的成果建立在 GaAs 基光电阴极研究基础之上，他们的出色工作和创新成果，使得我们如期完成了 Ga₂N 和 AlGa₂N 光电阴极的初步研究。

Ga₂N 基光电阴极研究仅处于起步阶段，尚有许多科学问题没有解决。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，殷切希望各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2017 年 10 月 26 日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 紫外辐射的分类	1
1.2 实用的紫外光电阴极	2
1.2.1 400~200nm 范围的光电阴极	2
1.2.2 200~105nm 范围的光电阴极	3
1.2.3 低于 105nm 的光电阴极	3
1.3 NEA GaN 基光电阴极的研究进展	3
1.3.1 GaN 光电阴极的研究进展	4
1.3.2 AlGaN 光电阴极的研究进展	13
参考文献	19
第 2 章 研究方法 with 实验基础	29
2.1 单电子近似理论	29
2.1.1 绝热近似	29
2.1.2 Hartree-Fock 近似	30
2.2 密度泛函理论	31
2.2.1 Hohenberg-Kohn 定理	31
2.2.2 Kohn-Sham 定理	32
2.2.3 局域密度近似和广义梯度近似	33
2.3 平面波赝势法	33
2.4 光学性质计算公式	35
2.5 第一性原理计算软件	36
2.6 GaN 基光电阴极实验系统简介	36
2.6.1 表面分析系统	37
2.6.2 超高真空激活系统	38
2.6.3 多信息量测试系统	40
参考文献	43
第 3 章 GaN 基光电阴极材料	46
3.1 GaN 晶体	46
3.1.1 GaN 的晶格结构和主要参数	46

3.1.2	GaN 晶体的电学特性及能带结构	47
3.1.3	GaN 本征载流子浓度	49
3.1.4	GaN 材料的光学特性	50
3.2	AlGaIn 晶体	51
3.2.1	AlGaIn 的晶格结构和主要参数	51
3.2.2	AlGaIn 结构特性	52
3.2.3	AlGaIn 材料的光学特性	53
3.2.4	AlGaIn 晶体的极化效应	55
3.2.5	AlGaIn 晶体极化效应对阴极迁移率的影响	59
3.2.6	电子扩散长度对 AlGaIn 光电阴极量子效率的影响	61
3.2.7	后界面复合速率对 AlGaIn 光电阴极量子效率的影响	62
3.2.8	AlGaIn 晶体异质结构对电子运输的影响	63
3.3	纤锌矿结构 GaN 基 (0001) 光电发射材料生长	66
3.3.1	衬底及缓冲层的选取	66
3.3.2	GaN 材料的生长技术	67
3.3.3	$Al_xGa_{1-x}N$ 材料生长	67
3.3.4	p 型 $Al_xGa_{1-x}N$ 材料制备	69
	参考文献	69
第 4 章	GaN 光电阴极的能带结构和光学性质	74
4.1	能带理论的基本方法	74
4.2	GaN 电子结构与光学性质理论研究	76
4.2.1	GaN 电子结构和光学性质	76
4.2.2	计算结果与讨论	77
4.3	空位缺陷对 GaN 光学性质的影响	83
4.3.1	理论模型和计算方法	83
4.3.2	计算结果与讨论	84
4.4	Mg 掺杂对 GaN 电子结构和光学性质的影响	89
4.4.1	理论模型和计算方法	89
4.4.2	结构与讨论	89
4.4.3	光学性质	92
4.5	Al 组分对 GaN 电子结构和光学性质的影响	97
4.5.1	理论模型和计算方法	97
4.5.2	计算结果分析	97
4.6	GaN(0001) 表面电子结构和光学性质	102
4.6.1	理论模型和计算方法	102

4.6.2	计算结果与讨论	103
4.7	GaN(000 $\bar{1}$) 表面电子结构和光学性质	108
4.7.1	理论模型和计算方法	108
4.7.2	计算结果与讨论	108
4.8	Mg 掺杂对 GaN(0001) 表面电子结构和光学性质的影响	113
4.8.1	理论模型和计算方法	113
4.8.2	计算结果与讨论	114
4.9	空位缺陷对 GaN(0001) 表面电子结构和光学性质的影响	117
4.9.1	理论模型和计算方法	117
4.9.2	计算结果与讨论	118
	参考文献	120
第 5 章	AlGa_xN 光电阴极的能带结构和光学性质	123
5.1	日盲型 Al _x Ga _{1-x} N 光电阴极组件结构设计	123
5.1.1	不同 Al 组分 Al _x Ga _{1-x} N 材料的性质研究	123
5.1.2	日盲型光电阴极组件结构设计	129
5.2	p 型掺杂的 Al _x Ga _{1-x} N 光电阴极的原子结构和电子结构研究	133
5.2.1	Mg 掺杂与 Mg-H 共掺杂对 Al _x Ga _{1-x} N 材料电子与原子结构的影响	133
5.2.2	Be 掺杂及 Be-O 共掺杂 Al _x Ga _{1-x} N 材料的电子与原子结构研究	144
5.2.3	点缺陷对 Al _x Ga _{1-x} N 的原子结构和电子结构的影响	154
5.3	Al _x Ga _{1-x} N 光电阴极的表面特性及表面清洗研究	161
5.3.1	Al _x Ga _{1-x} N (0001) 极性表面的原子结构与电子结构研究	161
5.3.2	Al _x Ga _{1-x} N(10 $\bar{1}$ 0) 和 (11 $\bar{2}$ 0) 非线性表面的原子结构与电子结构研究	171
5.3.3	Al _x Ga _{1-x} N 光电阴极表面氧化及表面清洗研究	175
	参考文献	182
第 6 章	NEA GaN 基光电阴极光电发射理论	186
6.1	NEA AlGa _x N 光电阴极的光电发射机理概述	186
6.2	NEA AlGa _x N 光电阴极的结构以及工作模式	189
6.3	NEA AlGa _x N 光电阴极光电发射过程	191
6.3.1	光电子激发	191
6.3.2	光电子往阴极表面的运输	192
6.3.3	光电子隧穿表面势垒	194
6.4	NEA GaN 光电阴极的量子效率表达式	197
6.4.1	量子效率与光谱响应	197
6.4.2	反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率公式	198
6.4.3	透射式 NEA GaN 光电阴极量子效率公式	199

6.5	影响 NEA GaN 光电阴极量子效率的因素	201
6.5.1	GaN 发射层吸收系数 $\alpha_{h\nu}$	201
6.5.2	电子表面逸出几率 P	202
6.5.3	电子扩散长度 L_D	202
6.5.4	GaN 发射层的厚度 T_e	203
6.5.5	后界面复合速率 S_v	203
	参考文献	205
第 7 章	GaN (0001) 面光电发射模型	207
7.1	GaN 晶体及 (0001) 表面结构	207
7.1.1	GaN 晶体体结构及主要参数	207
7.1.2	GaN (0001) 面结构	208
7.2	GaAs (100) 面光电发射模型	210
7.2.1	NEA 光电阴极的表面模型	210
7.2.2	GaAs (100) 面结构	213
7.2.3	[GaAs(Zn)-Cs] : [O-Cs] 双偶极子模型	214
7.3	GaN (0001) 面光电发射模型	217
7.3.1	[GaN(Mg)-Cs] : [O-Cs] 双偶极子模型	217
7.3.2	GaN (0001) 与 GaAs (100) 表面光电发射模型对比	224
7.4	Cs/GaN(0001) 表面吸附特性研究	225
7.4.1	理论模型和计算方法	225
7.4.2	计算结果与讨论	226
7.5	Cs/GaN(000 $\bar{1}$) 表面吸附特性研究	232
7.6	Cs 在 Mg 掺杂 GaN(0001) 表面吸附特性研究	235
7.6.1	理论模型和计算方法	235
7.6.2	计算结果与讨论	236
7.7	Cs 在 GaN(0001) 空位缺陷表面吸附特性研究	240
7.7.1	理论模型和计算方法	240
7.7.2	计算结果与讨论	241
7.8	“yo-yo” 激活过程模拟与激活实验	242
7.8.1	理论模型和计算方法	242
7.8.2	计算结果与讨论	243
7.9	GaN (0001) 面光电发射模型的验证	246
	参考文献	247
第 8 章	GaN(0001) 光电阴极制备	249
8.1	反射式 GaN 光电阴极结构设计	249

8.1.1	不同 p 型掺杂浓度的反射式 GaN 光电阴极	249
8.1.2	梯度掺杂的反射式 GaN 光电阴极	250
8.2	透射式 GaN 光电阴极结构设计	253
8.2.1	采用 AlN 作为缓冲层的透射式 GaN 光电阴极	253
8.2.2	采用组分渐变 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 作为缓冲层的透射式 GaN 光电阴极	255
8.3	GaN (0001) 表面化学清洗研究	256
8.3.1	表面净化意义	256
8.3.2	实验过程	258
8.3.3	实验结果分析	259
8.4	GaN 在超高真空中二次加热研究	261
8.4.1	二次加热 GaN 光电阴极实验的意义	261
8.4.2	实验过程	262
8.4.3	实验结果分析	263
8.5	不同光照下 GaN 光电阴极的激活	264
8.5.1	不同光照激活实验的意义	264
8.5.2	实验过程	265
8.6	反射式 GaN 光电阴极的性能评估	266
8.6.1	不同掺杂浓度反射式 GaN 光电阴极的性能	266
8.6.2	梯度掺杂反射式 GaN 光电阴极的性能	268
8.6.3	反射式 NEA GaN 光电阴极衰减及恢复性能	270
8.7	透射式 GaN 光电阴极的性能评估	272
8.7.1	不同缓冲层结构透射式 GaN 光电阴极的性能	272
8.7.2	不同发射层厚度透射式 GaN 光电阴极的性能	274
8.7.3	透射式与反射式 GaN 光电阴极性能的对比	275
8.8	制备工艺对 GaN 光电阴极性能的影响	276
8.8.1	不同化学清洗方法净化后 GaN 光电阴极的性能	276
8.8.2	二次加热对 GaN 光电阴极性能的影响	278
8.8.3	不同光照下激活后 GaN 光电阴极性能的对比	279
	参考文献	282
第 9 章	AlGaN (0001) 光电阴极制备	285
9.1	AlGaN 光电阴极材料结构设计	285
9.1.1	变掺杂 AlGaN 光电阴极材料	285
9.1.2	变 Al 组分 AlGaN 光电阴极发射层结构设计	287
9.1.3	变 Al 组分 AlGaN 光电阴极材料的能带结构分析	290
9.1.4	AlGaN 光电阴极缓冲层结构设计	292

9.2 变 Al 组分 AlGa _x N 光电阴极材料生长与质量评价	293
9.2.1 变 Al 组分 AlGa _x N 光电阴极材料生长	293
9.2.2 AlGa _x N 晶体 Al 组分分析方法	296
9.2.3 变 Al 组分 AlGa _x N 光电阴极发射层晶体中 Al 组分分析	298
9.2.4 变 Al 组分 AlGa _x N 光电阴极发射层晶体中薄膜厚度分析	301
9.3 AlGa _x N 光电阴极材料的清洗工艺	304
9.3.1 GaN 保护层的腐蚀工艺	305
9.3.2 AlGa _x N 材料的化学清洗工艺	307
9.3.3 AlGa _x N 材料的热清洗工艺	312
9.4 激活过程中 AlGa _x N 光电阴极光电流变化与光谱响应特性	316
9.5 反射式 AlGa _x N 光电阴极的性能评估	318
9.5.1 内建电场对 AlGa _x N 光电阴极性能的影响	318
9.5.2 不同激活条件下 AlGa _x N 光电阴极的性能参数	320
9.5.3 不同化学清洗条件下 AlGa _x N 光电阴极的性能参数	325
9.5.4 不同热清洗温度条件下 AlGa _x N 光电阴极的性能参数	326
9.6 透射式 AlGa _x N 光电阴极性能评估	327
9.6.1 不同发射层厚度的 AlGa _x N 光电阴极性能参数	327
9.6.2 变 Al 组分 AlGa _x N 光电阴极的性能参数	330
9.7 反射式和透射式 AlGa _x N 光电阴极的光谱响应对比	331
9.8 NEA Al _x Ga _{1-x} N 光电阴极的表面 Cs、O 激活机理研究	332
9.8.1 Al _{0.25} Ga(Mg) _{0.75} N(0001) 表面的单 Cs 激活机理研究	333
9.8.2 Cs、O 在 Al _{0.25} Ga(Mg) _{0.75} N(0001) 和空位缺陷表面吸附特性研究	341
9.8.3 Cs、O 在 Al _{0.25} Ga(Mg) _{0.75} N(10 $\bar{1}$ 0) 和 (11 $\bar{2}$ 0) 非极性表面吸附特性研究	347
参考文献	349
第 10 章 回顾与展望	352
10.1 GaN 基光电阴极的研究基础	352
10.1.1 GaAs 光电阴极	352
10.1.2 窄带响应 AlGaAs 光电阴极	354
10.1.3 近红外响应 InGaAs 光电阴极	355
10.1.4 GaAs 光电阴极及其微光像增强器的分辨力	355
10.2 GaN 基光电阴极研究工作的简单回顾	356
10.2.1 GaN 光电阴极	356
10.2.2 AlGa _x N 光电阴极	362
10.3 GaN 和 GaAs 光电阴极的比较	366

10.3.1 GaN 和 GaAs 材料的性质	366
10.3.2 GaN 和 GaAs 的表面结构	366
10.3.3 GaN 与 GaAs 激活过程中光电阴极光电流的对比	368
10.4 新型 GaN 基光电阴极的研究展望	370
参考文献	371
后记	384

第1章 绪 论

本章介绍紫外辐射的分类，实用的紫外光电阴极以及负电子亲和势 (NEA) GaN 基光电阴极的研究过程和研究进展。

1.1 紫外辐射的分类

太阳是强烈的紫外辐射源，紫外波段的辐射能量占据了太阳辐射总能量的7%。在电子波谱中，紫外波段的范围是10~400nm，虽然紫外波段的波长范围比较窄，但是不同波段的紫外光在地球大气中的传输特性却相差很大^[1,2]。如图1.1所示，波长小于200nm的紫外光会被大气中的氧气吸收，所以该波段的光只存在于真空中，被称为真空紫外或超紫外(VUV)；大气层的臭氧层对波长200~280nm的紫外光有强烈的吸收作用，无法到达地球表面，该波段的紫外光称为日盲紫外或远紫外(UVC)；虽然臭氧层能够吸收波长为280~315nm的紫外光，但是该波段内仍有约10%的紫外光可以到达地球表面，该波段的紫外光被称为中紫外(UVB)；波长315~400nm的紫外光可以透过云层，照射到地球表面，这部分波段的紫外光被称为近紫外(UVA)。

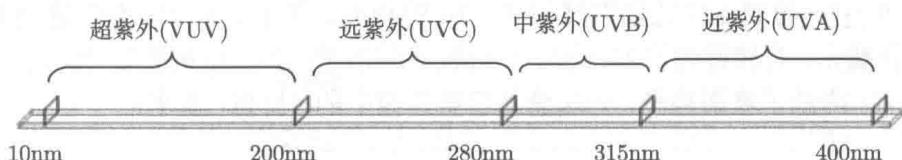


图 1.1 紫外辐射的分类

臭氧层对日盲波段辐射具有强烈的吸收作用，使波长小于280nm的太阳辐射光无法到达地球表面，为响应波段小于280nm的紫外探测器提供了良好的探测背景条件^[3~5]。因此，日盲型紫外探测器可忽略太阳辐射对目标信号的影响，具有全方位探测能力，从探测目标选择与识别等方面优于可见光和红外探测^[6,7]。同时，在大气层内部也存在较多的日盲波段的紫外辐射源，如超音速飞行物体、闪电、高压电晕放电、火灾和紫外通信设备等，这些辐射源与人们日常生活有着密切的联系。研制紫外辐射探测器件，在天文观测、航空航天和导弹预警等领域具有重要的应用。

1.2 实用的紫外光电阴极

适用于近紫外光范围的光电阴极，通常讨论的光波区域为 100~400nm。在紫外范围几乎所有实用光电阴极都有较高的量子产额。这类光电阴极在普通光电器件中，其紫外性能受光窗透过率的限制。由于宇宙探测光电子能谱技术的发展，对紫外光电子发射以及测量技术的研究越来越多。在宇宙探测中常要求“日盲”，即对紫外光灵敏，而对太阳的其他辐射不敏感。“日盲”在紫外光电阴极研究中非常重要，紫外光电阴极向短波延伸是研究的重要课题。

在外层空间工作的光电阴极，其阈波长小于 200nm；在大气层工作的光电阴极，阈波长小于 350nm。与可见光范围实用光电阴极相比，多数紫外光电阴极的量子效率较低，一般为 0.05 电子/光子^[8]。

1.2.1 400~200nm 范围的光电阴极

400~200nm 范围的透过光窗材料主要是石英和硼化玻璃，质量最好的玻璃甚至可以透过 150nm 的紫外光。

1. 碲化铯 (Cs_2Te)

在 400~200nm 范围，碲化铯 (Cs_2Te) 和碲化铷 (Rb_2Te) 量子效率较高， Cs_2Te 光电阴极的量子效率如图 1.2 所示，光子能量在 5.5eV 左右时， Cs_2Te 的峰值量子效率约为 0.1，光电阈定义为禁带宽度 E_g 与电子亲和势 E_a 之和， $E_g + E_a = 3.5\text{eV}$ 。 Rb_2Te 的制备工艺和性能与 Cs_2Te 的相近。图中 I 是 Cs 不过量，阈值较高，很快截止，有较好的日盲特性。II 有较高的量子产额，但阈值过低，这是因为较多的 Cs 降低了表面势垒，无法满足宇宙探测中的“日盲”要求。

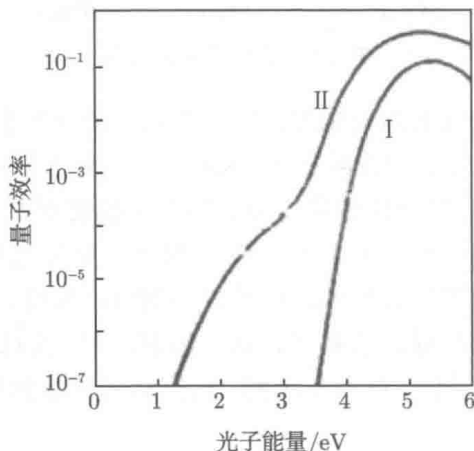


图 1.2 Cs_2Te 光电阴极的量子效率

Cs₂Te 的制备工艺类似于 Cs₃Sb 光电阴极:

- (1) 在石英基底上先蒸积一层金属薄膜;
- (2) 将 Te 蒸镀到石英基底, 白光透过率降低 95%;
- (3) 用 Cs 蒸气激活 Te 层, 直到光电流达到最大值。

2. 金 (Au), 钯 (Pd) 和钽 (Ta) 薄膜

蒸积在石英窗上的纯金、钯、钽等金属薄膜, 在紫外光范围有较好的光电发射特性, 适用于经常暴露在大气中的动态系统。

当 Au 用 Cs 处理时, 会生成 CsAu 化合物, 量子产额可达 0.1, 但阈值较低。在石英窗上使用, 量子产额不如 Cs₂Te。

1.2.2 200~105nm 范围的光电阴极

200~105nm 范围的光子能量适用的透过光窗材料是氟化锂 (LiF) 和氟化钙 (CaF₂), 用得较多的是 LiF。

响应低于 200nm(光子能量高于 6eV) 的光电发射材料, 其 ($E_g + E_a$) 值应该超过 6eV。高的量子产额, 则还须满足 $E_g > E_a$, 即只有选用禁带宽度 $E_g > 3eV$ 的绝缘体材料才能获得高的量子效率。

碘化铯 (CsI) 可能是最好的远紫外光电发射材料, E_g 为 6eV, E_a 为 0.3eV, 其量子效率为 0.1, 它是较好的日盲阴极。CsI 是一种稳定的紫外光电发射材料, 对可见光是透明的, 可以在大气中喷涂不被氧化, 化学性质很稳定, 当它们暴露于氧气或干燥空气时, 不会被破坏, 这对于制造和使用都是很大的优点。但 CsI 易溶于水, 应注意防潮。

1.2.3 低于 105nm 的光电阴极

如此高的光子能量, 没有材料可以用来作为光窗, 而且这个范围的光子也不能透过大气, 故称其为真空紫外范围。适用的光电阴极不能在具有光窗的真空管中制备。当光子能量大于 12eV 时, 几乎所有的碱卤化物都具有较高的量子效率。LiF 最常用作光电阴极, 阈波长 ($E_g + E_a$)=12eV。也可用 CaF₂、BaF₂ 和 MgO 等材料作为光电阴极。

1.3 NEA GaN 基光电阴极的研究进展

真空紫外探测器以紫外光电阴极为主要敏感探测元件, 最早采用的材料包括 Cs₂Te、Rb₂Te 等, 由于材料本身的限制, 所制备的光电阴极量子效率最高只能达到 15% 左右, 离实用化还差得比较远^[9]。随着 GaN 材料 p 型掺杂的实现^[10,11], GaN 及其与 Al、In 构成的三元、四元合金半导体作为第三代半导体的典型代表, 由于具

有禁带宽度大、热导率高、击穿电压高、量子效率高以及化学性能稳定等优点，成为研制紫外探测器的首选材料。尤其是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料，其禁带宽度在 $3.4\sim 6.2\text{eV}$ 连续可调，对应的波长范围在 $200\sim 365\text{nm}$ ，因此通过调整 Al 组分含量，完全可以实现 $200\sim 280\text{nm}$ 的“日盲”探测目标。

1.3.1 GaN 光电阴极的研究进展

国外在 GaN 光电阴极研究方面起步比较早，早在 1974 年，普林斯顿大学的 Pankove 等^[12] 就对 GaN 材料的光电发射性能进行了研究，但当时由于 GaN 材料的 p 型掺杂还未获得突破，他们主要针对 n 型以及半绝缘 GaN 材料的光电发射性能进行了研究，并得到了半绝缘 GaN 材料经过铯化可以实现负电子亲和势这一重要结论。GaN 材料高浓度 p 型掺杂实现后^[10,11,13~17]，GaN 光电阴极的研究也日趋活跃，国外在此方面研究成果突出的主要是美国和日本的科研机构，其中包括美国的西北大学、加州大学伯克利分校、斯坦福大学和日本的滨松光子学株式会社等。

图 1.3 给出了美国航空航天局戈达德航天中心 (NASA Goddard Space Flight Center) 使用的超高真空系统和 GaN 光电阴极的 Cs、O 激活过程^[18]。该系统可用来铯化阴极材料，进行铯化后相关的光电阴极校验。在 350°C 下经过 24h 的烘烤之后，系统可获得小于 $1.33\times 10^{-7}\text{Pa}$ 的真空水平。据 2003 年戈达德航天中心 Timothy Norton 等研究者报道，通过对 GaN 进行铯化处理，在 185nm 处获得了大于 40% 的量子效率。

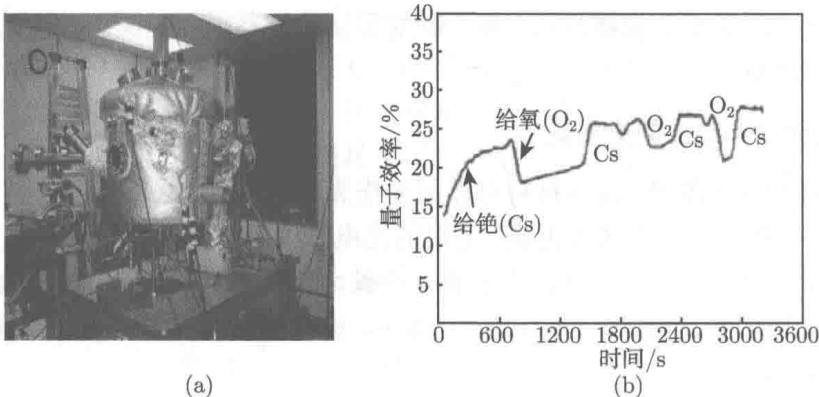


图 1.3 戈达德航天中心使用的超高真空系统 (a) 和 GaN 光电阴极的 Cs、O 激活 (b)

材料生长技术的进步保证能得到高质量的 p 型掺杂薄膜，Siegmond、Ulmer 以及 Uchiyama 等研究者已经取得了有关 GaN 光电阴极令人鼓舞的结果^[19~24]。图 1.4 中给出了美国西北大学采用 $1\mu\text{m}$ 厚的 Mg 掺杂 p 型 GaN 外延层作为阴极材料，利用铯化处理制备的 GaN 光电阴极反射模式下的量子效率，在波长 200nm 处获得了 56% 的最高量子效率，制备的 GaN 光电阴极透射模式下的量子效率也已

达到 30%^[25]。美国西北大学的研究人员发现通过提高 GaN 材料的电导率可以进一步提高阴极的量子效率，甚至具有高达 90% 的理论值。

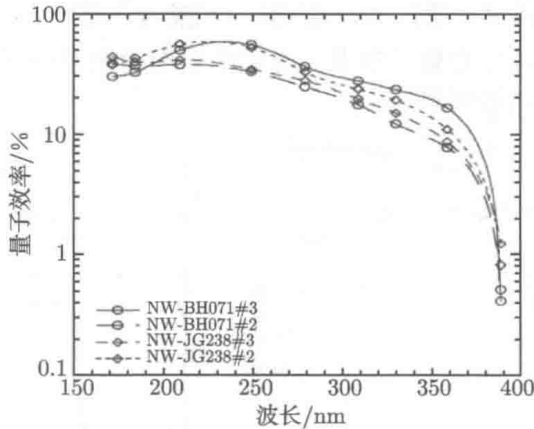


图 1.4 美国西北大学制备的反射模式 GaN 光电阴极量子效率

美国西北大学的 Ulmer 以及加州大学伯克利分校的 Oswald 等在 NASA 项目的支持下，通过分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 和金属有机化学气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术生长了多种不同结构的 GaN 材料样品并进行了 GaN 光电阴极的制备^[19~21,25~27]。这些结构中也包含了参考我们课题组提出的梯度掺杂结构设计出的新型结构，通过激活获得了较好的量子效率结果。其最新实验结果是反射式 GaN 光电阴极在 120nm 处获得了 80% 的量子效率，半透射式结构在 240~360nm 范围内获得了 20% 左右的量子效率，如图 1.5 所示。通过对激活后的 GaN 光电阴极进行多次高温表面净化和再激活实验证明 GaN 光电阴极的量子效率在多次处理后仍能维持较高的水平。

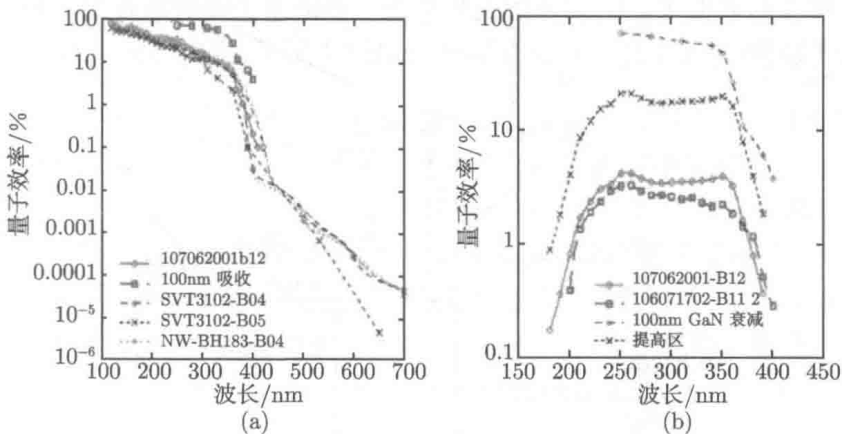


图 1.5 Oswald 等制备的不同结构 GaN 光电阴极的量子效率

(a) 反射式; (b) 透射式