

高等学校电子信息类专业

“十三五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

激光器件

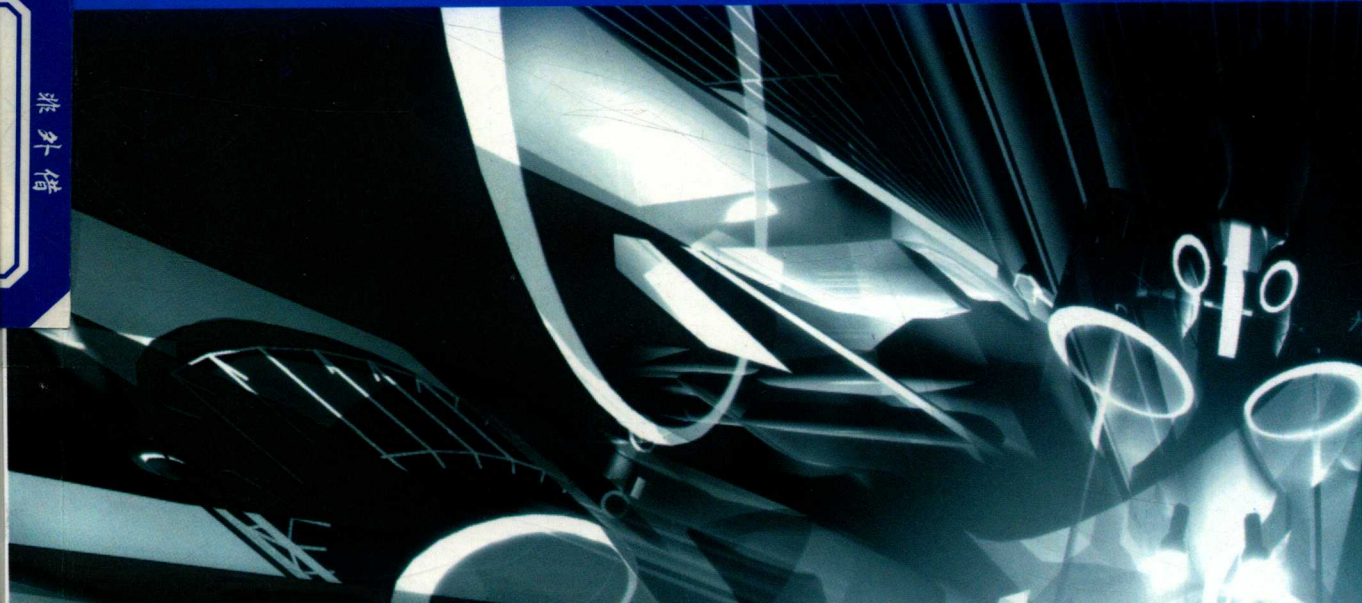
(第二版)

周广宽 葛国库 赵亚辉 顾洁 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

激光器件



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

激 光 器 件

(第二版)

周广宽 葛国库 赵亚辉 顾 洁 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统全面地阐述了各类主要激光器件的工作原理、工作特性、输出特性以及基本的设计方法和应用,涉及的主要激光器件有气体激光器、固体激光器、半导体激光器及其他具有代表性的各类器件。

本书内容编排深入浅出、条理清晰、重点突出、实用性强,反映了近年来国内外激光器件研究及应用的最新成果和最新进展。

本书可作为电子科学与技术、光信息科学与技术、应用物理与技术等专业本科生和研究生的教材,也可作为光电子技术及相关产业的技术人员和其他相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光器件/周广宽等编著. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.6
ISBN 978-7-5606-4947-4

I. ① 激… II. ① 周… III. ① 激光器件 IV. ① TN365

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 117898 号

策 划 云立实

责任编辑 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2018年6月第2版 2018年6月第3次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.5

字 数 435千字

印 数 4001~7000册

定 价 43.00元

ISBN 978-7-5606-4947-4/TN

XDUP 5249002-3

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

众所周知，激光器是 20 世纪人类科技的四大发明之一。五十多年来，激光科学技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的形成和发展，其应用已经遍及科技、军事和社会发展的许多领域，远远超出了当年人们原有的设想。激光器的发明不仅导致了一部典型的学科交叉的创造发明史，而且生动地体现了人类的知识和技术创新活动是如何推动经济、社会的发展，从而造福人类的物质和精神生活的。

随着激光技术的飞速发展，各类激光器件的性能明显提高，激光器件的应用范围不断拓展和扩大，加之电子科学与技术、光信息科学与技术、应用物理与技术、激光技术、近代光学等专业培养规模的扩大及相关产业的发展和进步，从事激光器件的应用研究和开发的技术人员日益增多，广大读者迫切需要系统全面地学习激光器件的相关知识和了解激光器件的新进展。本书在激光原理的基础上，围绕选取什么样的工作物质、选择什么样的谐振腔、采取什么样的泵浦手段构成激光器件，介绍激光器的结构、工作原理、工作特性、输出特性及基本的设计方法。书中各章节的内容编排既注重基本理论知识之间的有机联系，又有大量的实例解析，并配有练习与思考题，便于读者自学。

本书内容取材丰富新颖，既包括了传统激光器件，又反映了近年来国内外激光器件研究及应用的新成果和新进展，具有适应本学科领域发展水平的先进性。经过多年的发展，在传统的氦氖激光器基础上出现的绿光氦氖激光和高功率氦氖激光器，在传统的二氧化碳激光器基础上出现的流动型二氧化碳激光器、TEA 二氧化碳激光器和气动型二氧化碳激光器，在传统的固体激光器基础上发展的可调谐激光和透明陶瓷激光器，在传统的染料激光器基础上发展的随机激光器，在传统的半导体激光器基础上发展的可集成激光和半导体微碟激光器等，这些内容本书中均有体现。本书内容编排循序渐进、深入浅出、条理清晰、通俗易懂、实用性强，总结了编者多年来从事激光器件教学工作的经验和体会，体现了理论指导实践、实践检验理论科学的研究方法，注重启迪读者的独立思考能力、自学能力和创新能力，是一本理想的教学用书，也是相关科技人员的良师益友。

全书共分四篇 16 章。第一篇气体激光器，重点讨论氦氖激光器和二氧化碳激光器的基本结构、工作原理、工作特性、输出特性及基本的设计方法，以及研究新成果和应用新进展，同时还介绍了其他一些重要的气体激光器，如金属蒸气激光器、离子气体激光器、准分子激光器、光泵浦远红外激光器、氮分子激光器等。第二篇固体激光器，重点讨论红宝石激光器、钕玻璃激光器、YAG 晶体激光器的基本结构、工作原理、工作特性、输出特性，同时还介绍了固体激光器的一些重要的新进展，如可调谐固体激光器和透明陶瓷激光器。

第三篇半导体激光器，重点讨论同质结 GaAs 半导体激光器和异质结半导体激光器的基本结构、工作原理、工作特性、输出特性，同时还介绍了半导体激光器的一些新型器件。第四篇其他激光器，介绍染料激光器及其新进展，和一些处于研究阶段的新型激光器，如自由电子激光器、化学激光器、光纤激光器等。

本书的第 1、2、3 章由周广宽编写，第 5~9 章和第 15、16 章由葛国库编写，第 10~12 章由顾洁编写，第 4 章和第 13、14 章由赵亚辉编写，全书由周广宽主编。

本书在编写过程中参阅了大量的国内外文献，在此向这些文献的作者表示诚挚的感谢！

由于编者水平有限，书中可能还存有一些不足之处，敬请读者批评指正，不胜感激！

编 者

2018 年 1 月

目 录

第一篇 气体激光器

第一章 气体激光器的放电激励基础	2	2.4.1 放电管长度和谐振腔长度	39
1.1 气体放电的基本过程	2	2.4.2 反射镜曲率半径	39
1.1.1 气体放电粒子的种类及其 相互作用	2	2.4.3 放电管内径	41
1.1.2 气体放电的基本参量	5	2.4.4 最佳透过率	41
1.1.3 气体放电的形式	8	2.4.5 设计举例	42
1.2 气体放电中的选择激发过程	11	2.5 其他氦氖激光器和其他惰性 气体原子激光器	42
1.2.1 共振激发能量转移	11	2.5.1 其他形式的氦氖激光器	43
1.2.2 电荷转移	13	2.5.2 其他惰性气体原子激光器	45
1.2.3 潘宁效应	13	2.6 金属蒸气原子激光器	46
1.2.4 电子碰撞	13	2.6.1 自终止跃迁激光器	46
1.3 气体激光器的整机效率和 其他激励方式	14	2.6.2 铜蒸气原子激光器	48
1.3.1 气体激光器的整机效率	14	2.6.3 其他金属蒸气原子激光器	52
1.3.2 气体激光器的其他激励方式	15	练习与思考题	55
练习与思考题	16	第三章 分子气体激光器	57
第二章 原子气体激光器	17	3.1 普通型二氧化碳分子 激光器的激励机理	57
2.1 氦氖激光器的工作原理	17	3.1.1 二氧化碳分子能级结构	57
2.1.1 氦氖激光器的基本结构	17	3.1.2 粒子数反转分布的建立	60
2.1.2 氦氖原子的能级结构	19	3.2 普通型二氧化碳分子激光器的 工作特性	65
2.1.3 粒子数反转分布的建立过程	21	3.2.1 普通型二氧化碳分子 激光器的结构	66
2.2 氦氖激光器的工作特性	23	3.2.2 普通型二氧化碳分子激光器的 工作特性	67
2.2.1 氦氖激光器速率方程组	24	3.2.3 辅助气体	71
2.2.2 增益与放电条件的关系	24	3.3 普通型二氧化碳分子激光器的 输出特性	72
2.2.3 增益曲线和增益饱和	27	3.3.1 输出功率	72
2.3 氦氖激光器的输出特性	29	3.3.2 频谱特性	76
2.3.1 氦氖激光器的输出功率	29	3.3.3 选支原理	80
2.3.2 氦氖激光束的发散角	34		
2.3.3 氦氖激光的偏振特性	34		
2.3.4 氦氖激光的频率特性	35		
2.4 氦氖激光器的设计	38		

3.4 中小型二氧化碳分子激光器的设计	84	3.8.4 电子束激励 XeF 准分子激光器	104
3.4.1 放电管长度和腔长	84	3.9 光泵远红外分子激光器	105
3.4.2 腔镜曲率半径	84	3.9.1 光泵浦概念	105
3.4.3 放电管直径	84	3.9.2 光泵远红外分子激光器基本原理	106
3.4.4 输出镜最佳透过率 T_{opt}	84	3.9.3 谐振腔构型	106
3.4.5 估计功率 P	85	3.10 氮分子激光器	108
3.5 流动型二氧化碳分子激光器	85	3.10.1 氮分子激光器激发机理	109
3.5.1 流动型二氧化碳分子激光器的工作特性	85	3.10.2 氮分子激光器的激励电路	111
3.5.2 流动型二氧化碳分子激光器的分类	86	3.10.3 氮分子激光器的输出特性	112
3.6 横向激励高气压型二氧化碳分子激光器	88	练习与思考题	115
3.6.1 TEACO ₂ 分子激光器的特点	88	第四章 气体离子激光器	117
3.6.2 TEACO ₂ 分子激光器的工作特性	89	4.1 氙离子激光器	117
3.6.3 高气压均匀辉光放电技术	93	4.1.1 氙离子的能级结构和激发机理	117
3.6.4 紫外预电离 TEACO ₂ 分子激光器	94	4.1.2 氙离子激光器的结构	119
3.7 气动型二氧化碳分子激光器	95	4.1.3 氙离子激光器的工作特性	121
3.7.1 气动 CO ₂ 分子激光器的工作原理	95	4.2 氦-镉离子激光器	124
3.7.2 气动 CO ₂ 分子激光器的结构	96	4.2.1 镉离子的能级结构和激发	125
3.7.3 气动 CO ₂ 分子激光器的工作特性	97	4.2.2 氦-镉离子激光器的结构	126
3.8 准分子激光器	99	4.2.3 氦-镉离子激光器的工作特性	127
3.8.1 准分子概念及其能级结构	100	4.3 其他金属蒸气离子激光器	129
3.8.2 XeF ⁺ 激光器的工作原理	101	4.3.1 砷金属蒸气离子激光器	129
3.8.3 快放电激励 XeF 准分子激光器	102	4.3.2 氩-氦离子激光器	129
		4.3.3 氦离子激光器	130
		4.3.4 氦-镉-汞离子激光器	130
		4.3.5 氦-铅离子激光器	130
		练习与思考题	130

第二篇 固体激光器

第五章 固体激光器的基本特性	132	5.2.2 固体激光器的增益饱和和饱和光强	135
5.1 固体激光器的基本原理	132	5.2.3 固体激光器的弛豫振荡	135
5.1.1 固体激光器的基本结构	132	5.2.4 固体激光器的输出光束质量	137
5.1.2 固体激光器的能量转换	133	5.2.5 固体激光器的光谱特性	137
5.2 固体激光器的基本特性	134	5.2.6 固体激光器的偏振特性	138
5.2.1 固体激光器的阈值	134	练习与思考题	138

第六章 固体激光器工作物质的性质 ... 139

6.1 固体激光器对工作物质的基本要求 ... 139

6.1.1 基质材料 ... 139

6.1.2 激活离子 ... 141

6.2 红宝石晶体 ... 142

6.2.1 红宝石晶体的物理性质 ... 142

6.2.2 红宝石晶体的激光性质 ... 143

6.3 掺钕钇铝石榴石晶体 ... 145

6.3.1 掺钕钇铝石榴石晶体的物理性质 ... 145

6.3.2 掺钕钇铝石榴石晶体的激光性质 ... 146

6.4 钕玻璃 ... 148

6.4.1 钕玻璃的物理性质 ... 148

6.4.2 钕玻璃的激光性质 ... 148

6.5 其他固体激光工作物质 ... 150

6.5.1 激光陶瓷 ... 150

6.5.2 掺钕钇铝石榴石晶体 ... 153

6.5.3 掺钕钇铝石榴石晶体 ... 153

6.5.4 掺钕铝酸钇晶体 ... 154

6.5.5 掺钛蓝宝石晶体 ... 155

练习与思考题 ... 157

第七章 固体激光器的光泵浦系统 ... 158

7.1 泵浦光源 ... 158

7.1.1 惰性气体放电灯 ... 158

7.1.2 卤钨灯 ... 161

7.1.3 激光二极管 ... 161

7.1.4 太阳光 ... 162

7.2 聚光腔 ... 162

7.2.1 泵浦方式与聚光腔结构 ... 162

7.2.2 聚光腔的能量传输特性 ... 165

7.3 泵浦光源的供电系统 ... 165

7.3.1 脉冲氙灯的供电系统 ... 165

7.3.2 连续氙弧光灯的供电系统 ... 170

练习与思考题 ... 171

第八章 固体激光器的热效应及补偿 ... 172

8.1 固体激光工作物质的热效应 ... 172

8.1.1 连续固体激光器的热效应 ... 172

8.1.2 单脉冲固体激光器的热效应 ... 176

8.1.3 重复率脉冲固体激光器的热效应 ... 176

8.2 固体激光器的散热 ... 177

8.2.1 冷却技术 ... 177

8.2.2 光学补偿方法 ... 179

8.2.3 采用非圆柱形工作物质 ... 179

练习与思考题 ... 180

第九章 固体激光器谐振腔 ... 181

9.1 光学谐振腔的模参数 ... 181

9.1.1 谐振腔的变换矩阵 ... 181

9.1.2 谐振腔的稳定性条件 ... 182

9.2 类透镜介质对激光束的变换 ... 182

9.2.1 类透镜介质 ... 182

9.2.2 类透镜介质对激光束的变换矩阵 ... 183

9.3 热稳腔 ... 185

9.3.1 热稳条件 ... 185

9.3.2 几种典型的热稳腔 ... 187

练习与思考题 ... 190

第三篇 半导体激光器

第十章 半导体激光器的工作原理 ... 192

10.1 半导体物理基础 ... 192

10.1.1 半导体的能带结构 ... 192

10.1.2 电子在能带之间的跃迁 ... 194

10.1.3 辐射复合与非辐射复合 ... 195

10.1.4 PN 结的能带结构 ... 198

10.2 半导体激光器的工作原理 ... 201

10.2.1 半导体激光器的粒子数反转分布条件 ... 202

10.2.2 半导体激光器有源介质的增益系数 ... 203

10.2.3 阈值增益 ... 205

10.2.4 光子反馈方式	205		
练习与思考题	206	第十二章 半导体激光器的输出特性 ..	226
第十一章 半导体激光器的基本构型 ..	207	12.1 半导体激光器的转换效率	226
11.1 异质结激光器	207	12.1.1 功率效率	226
11.1.1 异质结的构型和主要性质	208	12.1.2 量子效率	227
11.1.2 单异质结激光器	212	12.2 半导体激光器的空间模式	228
11.1.3 双异质结激光器	214	12.2.1 垂直方向发散角	228
11.1.4 条形结激光器	216	12.2.2 平行方向发散角	229
11.2 量子阱激光器	217	12.2.3 半导体激光器的像散	230
11.2.1 量子阱	217	12.3 半导体激光器的纵模	231
11.2.2 量子阱激光器	218	12.3.1 纵模模谱	231
11.2.3 应变量子阱激光器	220	12.3.2 影响纵模谱的因素	232
11.3 其他结构的半导体激光器	222	12.3.3 纵模与横模之间的关系	234
11.3.1 分布反馈和分布布拉格反射 半导体激光器	222	12.3.4 LD 的光谱线宽	234
11.3.2 垂直腔表面发射激光器	223	12.4 半导体激光器的动态特性	236
11.3.3 微碟半导体激光器	224	12.4.1 速率方程	236
练习与思考题	225	12.4.2 接通延迟和弛豫振荡	237
		12.4.3 调制特性	238
		12.4.4 噪声特性	239
		练习与思考题	240

第四篇 其他激光器

第十三章 液体激光器	242	第十四章 化学激光器	256
13.1 有机染料分子的光吸收和光发射 ..	242	14.1 化学激光器的工作原理	256
13.1.1 染料分子的能级结构	242	14.1.1 化学激光器的特点	256
13.1.2 染料分子的光吸收和光发射	245	14.1.2 化学激光器的激发机理	257
13.2 脉冲染料激光器	245	14.2 氟化氢化学激光器	258
13.2.1 粒子数反转分布的建立	246	14.2.1 粒子数反转分布机理	259
13.2.2 脉冲激光泵浦染料激光器	247	14.2.2 连续波氟化氢化学激光器的 结构和特性	260
13.3 连续染料激光器	251	14.2.3 脉冲氟化氢化学激光器的 结构和特性	263
13.3.1 染料激光器连续工作条件	251	14.3 氧碘化学激光器	263
13.3.2 连续染料激光器的阈值泵浦 功率密度	251	14.3.1 氧碘化学激光器的激光跃迁及 工作原理	264
13.3.3 典型的连续波染料激光器	252	14.3.2 氧碘化学激光器的结构和 特性	264
13.4 无机液体激光器	254	14.3.3 化学氧碘激光器的发展	267
13.4.1 激光机理	254		
13.4.2 无机液体激光器的 结构和特性	255		
练习与思考题	255		

练习与思考题	268		
第十五章 自由电子激光器	269	第十六章 光纤激光器	280
15.1 自由电子激光器的工作原理	269	16.1 光纤激光器的工作原理	280
15.1.1 自由电子激光器的结构	269	16.1.1 光纤激光器的激光过程	280
15.1.2 自由电子光辐射的产生	271	16.1.2 光纤激光器的谐振腔	281
15.1.3 自由电子激光的产生	274	16.2 光纤激光器的类型	283
15.2 自由电子激光器的主要类型	275	16.2.1 掺稀土元素光纤激光器	283
15.2.1 磁韧致自由电子激光器	275	16.2.2 单晶光纤激光器	284
15.2.2 史密斯-珀塞尔自由电子 激光器	277	16.2.3 塑料光纤激光器	284
15.2.3 受激喇曼自由电子激光器	278	16.2.4 光纤喇曼激光器	285
练习与思考题	279	练习与思考题	285
		参考文献	286

第一篇 气体激光器

由单一气体、混合气体或蒸气等气态物质作为工作物质的激光器称为气体激光器。自从1960年首次研制成氦氖激光器(波长 $1.15\text{ }\mu\text{m}$)以来,相继出现了各种原子、分子、准分子和离子气体激光器,其销售量约占世界激光器市场的60%。气体激光器以其突出的优点,被广泛地应用于工业、农业、国防、医学、计量学和其他科研领域中,如准直导向、计量、全息照相、激光光谱学、激光医学、激光育种、激光加工(切割、焊接)等。气体激光器的主要优点表现在以下三个方面:

(1) 工作物质均匀,输出光束质量优良。由于工作物质均匀一致,能够保证大部分器件产生接近高斯分布的光束模式,其单色性、发散度均优于固体激光器和半导体激光器。

(2) 谱线范围宽。已有数百种气体、蒸气可以产生近万条激光谱线,覆盖范围从亚毫米波、可见光到真空紫外线,甚至X射线、 γ 射线波段。

(3) 输出功率大,既能连续工作又能脉冲工作,且效率高。如二氧化碳激光器是目前效率和连续输出功率最大的器件,氩离子激光器是目前可见光连续输出功率最大的器件。

除此以外,气体激光器还具有结构简单、造价低廉、运行费用低、可采用多种激励手段等优点。由于工作粒子以气体或蒸气的形式存在于工作物质中,因而常采用气体放电激励、热激励、化学激励、核能激励、光泵激励、电子束激励等,其中气体放电激励是气体激光器主要采用的激励方式。

气体激光器的发展方向主要是探索新的波段,发展新器件,拓展应用领域和开发大功率、大能量、高效率、长寿命、高光束质量、高可靠性及小型化的激光器件。

第一章 气体激光器的放电激励基础

由单一气体、混合气体或蒸气等气态物质作为工作物质的激光器称为气体激光器。大多数气体激光器采用气体放电激励。

气体物质在外加电场作用下，产生电离而形成电流的现象，称为气体放电。根据气体电离程度的不同，放电气体可分为弱电离气体和强电离气体。一般而言，气体激光器中的放电气体属于弱电离气体(电离度小于 10^{-4})。利用气体放电过程中粒子的相互作用而实现粒子数反转分布，称为气体放电激励。大多数气体激光器均采用气体放电激励。本章主要讨论气体放电中粒子相互作用的基本过程、气体放电的选择激发过程和气体激光器的其他激励方式。

1.1 气体放电的基本过程

在气体放电过程中，粒子的相互作用决定了放电气体的物理性质，需要采用一些物理量来描述气体放电中粒子的相互作用过程。为了深入了解气体激光器的工作特性，本节简要介绍气体放电的基本概念和基本过程。

1.1.1 气体放电粒子的种类及其相互作用

放电气体中存在的粒子种类取决于气体和外界激励强度。一般来说，弱电离气体中将有电子、正离子、负离子、中性和带电基态粒子、中性和带电激发态粒子、光子等。这些粒子的相互作用，决定了放电气体的力学性质、电学性质、化学性质和光学性质，构成了一个复杂的电、光、化学作用系统。

1. 中性气体粒子

中性气体粒子是指气体没有发生放电时就存在的气体粒子，一般有原子、分子等，其粒子密度随气压变化较大。对于几百帕的气压来说，其粒子密度约为 $10^{22} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ，比半导体和固体的粒子密度低。

2. 带电粒子

中性气体粒子一旦被电离就产生了带电粒子，带电粒子包括电子、正离子、负离子。从带电粒子对放电特性的影响看，电子对气体的电学性质起主导作用。离子可能有多种，如 N_2 和 O_2 气体放电时，就会产生 N^+ 、 N_2^+ 、 O^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 、 O_2^+ 、 NO_2^+ 、 O_3^+ 等，氦气体放电时，就会产生 He^+ 等。离子和中性气体粒子对气体的力学性质的影响起主要作用。

3. 受激粒子和光子

中性气体粒子和带电粒子在气体放电中被激发，形成受激中性粒子以及受激带电粒

子。由于存在量子效应，这些受激粒子会形成自发发射、受激辐射过程，产生自发辐射光子和受激辐射光子，同时也因吸收光子而形成光激发、光电离等过程。

4. 碰撞过程

在气体放电中，决定放电过程的物理因素是多种粒子的运动和它们之间的相互作用。在粒子的相互作用过程中实现了粒子动量、动能、内能和电荷的交换，使粒子发生扩散、电离、激发、复合、吸附等。粒子的相互作用过程相当复杂，但可以运用碰撞特征参量来表征，因此必须对粒子之间的碰撞有正确的理解。

带电粒子的碰撞是指粒子在相互作用过程中，粒子的间距不断减小，到一定距离后，它们的距离又不断增加。在这个过程中，粒子的运动状态发生了变化，即粒子的动量、动能、内能及电荷发生变化，就认为它们之间发生了碰撞。这样的碰撞模型已经被大量实验所证实，如卢瑟福(Rutherford) α 粒子散射实验、X射线 Bragg 衍射实验等。

按照粒子状态的变化，一般将碰撞过程分为弹性碰撞和非弹性碰撞。弹性碰撞过程中，粒子只交换动量和动能，不交换内能，内能不变，即遵守动量守恒和动能守恒；非弹性碰撞过程中，粒子既交换动量和动能，又交换内能，粒子内能发生改变，即遵守动量守恒和能量守恒。粒子之间的弹性碰撞对确定气体放电过程中各种传递系数起主要作用，如热传导系数、电传导系数、扩散系数和漂移系数等；粒子之间的非弹性碰撞对确定气体放电过程中各种电参量和光参量起主要作用，如电子温度、电子密度、各激发能级的粒子数分布等。

非弹性碰撞将引起气体粒子的激发和电离，就其内能改变方式可分为两类。一粒子的动能与另一粒子的内能交换称为第一类非弹性碰撞，如电子-原子(分子)之间的非弹性碰撞；一粒子的动能或内能与另一粒子的内能交换称为第二类非弹性碰撞，如原子(分子)-原子(分子)之间的非弹性碰撞。

设两粒子质量分别为 m_1 、 m_2 ，碰撞前粒子的速度分别为 v_1 、 v_2 ，其中 $v_2 = 0$ 。两粒子发生碰撞后速度分别为 u_1 、 u_2 ，如图 1.1 所示。

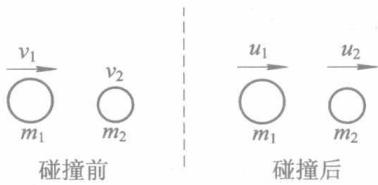


图 1.1 质量分别为 m_1 、 m_2 的粒子的对心碰撞

(1) 弹性碰撞过程。在对心弹性碰撞过程中，两粒子构成的体系满足动量守恒和动能守恒。由动量守恒定律和动能守恒定律可得

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1-1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (1-2)$$

两式联立可得 u_1 、 u_2 为

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \quad (1-3)$$

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (1-4)$$

于是粒子 m_1 传递给粒子 m_2 的动能为

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2} m_2 u_2^2 = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \epsilon_1 \quad (1-5)$$

式中 $\epsilon_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$ 。 m_1 的动能损失率 Δ 定义为

$$\Delta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1-6)$$

考虑非对心碰撞情况, Δ 将减小, 其最小值为零, 故 m_1 的平均动能损失率 $\bar{\Delta}$ 为

$$\bar{\Delta} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{2m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1-7)$$

可以看出, 若 $m_1 \ll m_2$, 则 m_1 的平均动能损失率 $\bar{\Delta}$ 很小。如电子与气体原子之间的弹性碰撞, 电子的平均动能损失率 $\bar{\Delta}$ 很小, 说明电子每次与原子碰撞, 电子损失的动能很少, 因此电子能从电场中不断积累能量。但由于电子频繁地与原子碰撞, 单位时间内电子传递给气体的总动能是不可忽视的, 将引起气体温度升高。

若 $m_1 \approx m_2$, 则 m_1 的平均动能损失率 $\bar{\Delta} \approx \frac{1}{2}$ 。如粒子与粒子之间的弹性碰撞, 将产生大量的动能交换。因此弹性碰撞对确定气体放电过程中各种传递系数起主要作用, 如热传导系数、电传导系数、扩散系数、漂移系数等。

(2) 非弹性碰撞过程。在对心非弹性碰撞过程中, 两粒子构成的体系满足动量守恒和能量守恒。由动量守恒定律和能量守恒定律可得

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1-8)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + W \quad (1-9)$$

其中 W 为粒子 m_2 的内能。两式联立可得

$$W = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_1 u_1^2 - \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{m_1 v_1 - m_1 u_1}{m_2} \right)^2 \quad (1-10)$$

可见, W 随 u_1 的改变而变化。由 $\frac{\partial W}{\partial u_1} = 0$ 知, 当 $u_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$ 时, W 的极大值为

$$W_{\max} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \epsilon_1 \quad (1-11)$$

可以看出, 若 $m_1 \ll m_2$, 则 m_2 获得的内能极大值为 $W_{\max} \approx \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \epsilon_1$ 。如电子与基态原子 A 的非弹性碰撞, 电子的大部分动能转化为原子的内能, 使原子 A 被激发。其反应方程为



式中 A^* 为激发态 A 原子。当 $W_{\max}$ 大于原子 A 的电离能或电离激发能时, 原子将被电离或电离激发, 反应方程为



式(1-12)、式(1-13)、式(1-14)表示的是第一类非弹性碰撞, 是气体放电激励能获得很高的电光转换效率的原因之一。电子与基态离子的非弹性碰撞也有类似情况。

若 $m_1 \approx m_2$, 则 m_2 获得的内能极大值为 $W_{\max} \approx \frac{1}{2} \epsilon_1$ 。如基态原子 A 、 B 之间动能和内

能的转换，使基态原子被激发、电离或电离激发。激发态原子 A^* 与基态原子 B 之间的内能转换也可实现基态原子被激发、电离或电离激发，反应方程为



此为第二类非弹性碰撞，如能量转移、电荷转移、潘宁效应等。

总之，弹性碰撞对确定气体放电过程中各种传递系数起主要作用，非弹性碰撞对确定气体放电的各种电参量和光参量起主要作用，如电子温度、电子密度、激发态的集聚数分布等。

1.1.2 气体放电的基本参量

气体放电中决定放电情况的基本物理因素是电子、原子、分子及离子间的碰撞，描述这种碰撞过程的物理量是碰撞截面、自由程和激发速率。

1. 碰撞截面

所谓碰撞，是指粒子相互接近时，将引起粒子的动量、动能、内能等的变化。以电子与原子的碰撞为例，引进碰撞截面的概念。如图 1.2 所示，如果认为原子是半径为 a 的“弹性球”，当运动的电子处于“弹性球”的阴影区域时，电子与“弹性球”将发生碰撞，可以认为碰撞截面为

$$\sigma = \pi a^2 \tag{1-19}$$

实际的气体放电是大量电子与大量原子的碰撞过程，因此必须用统计平均方法来描述。

假设一束截面积为 A 的电子沿 x 轴以速度 v 通过某种气体，电子与气体粒子发生碰撞，电子的动量改变使电子束偏离，如图 1.3 所示。

在气体中，在 $x \sim x + dx$ 之间单位时间单位体积内受到碰撞的电子数为

$$\frac{dn_e}{dt} = - N n_e \pi a^2 \frac{dx}{dt} \tag{1-20}$$

式中 n_e 为电子数密度， N 为气体粒子数密度， a 为气体粒子半径。对式(1-20)积分可得

$$n_e = n_0 \exp(- N \pi a^2 x) \tag{1-21}$$

其中 n_0 是 $x=0$ 处的电子密度。式(1-21)表明，经过距离 x 后，未被碰撞的电子密度随 x 增大而指数下降。通过实验可以测量不同距离 x 的电子流 i ：

$$i = i_0 \exp(- \alpha x) = i_0 \exp(- N \sigma x) \tag{1-22}$$

其中 i_0 是 $x=0$ 处的电子流， α 是气体对电子的吸收系数。由式(1-22)可测得有效碰撞截面，并可得出 σ 的物理意义。



图 1.2 碰撞截面概念

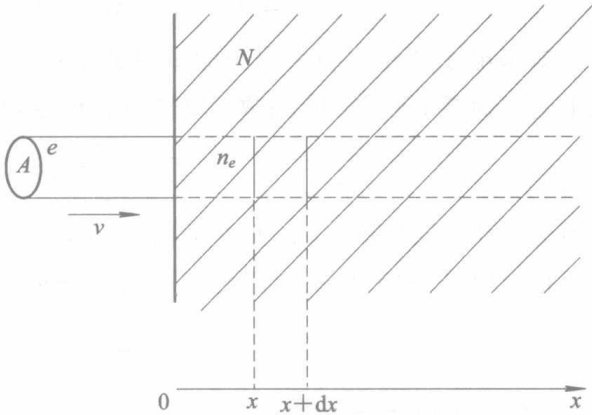


图 1.3 电子束在气体中的碰撞

$N \cdot \sigma$ 表征了电子束穿过气体 x 距离而不被碰撞的概率，称之为总碰撞截面，记为 Q 。 σ 表征了大量电子与气体粒子的碰撞概率的统计平均值，称之为碰撞截面。 σ 的量纲为 m^2 ， Q 的量纲为 m^{-1} 。

Q 和 σ 的计算，不仅要考虑粒子的大小、密度，还要考虑粒子的运动速度、库仑力及波动性，具体计算需用量子力学的方法来处理，通常由实验方法来测定 σ 。实验发现，碰撞截面 σ 与电子的速度和气体种类有关，而与气体粒子密度无关。总碰撞截面 Q 与气体粒子密度有关，即与气压、温度等状态条件有关。

碰撞截面的概念对于描述粒子的碰撞过程及粒子状态都十分有用。粒子的碰撞包括弹性碰撞、非弹性碰撞的激发和电离，因此 Q 可表示为总弹性碰撞截面 $Q_{\text{弹}}$ 、总激发截面 $Q_{\text{激}}$ 和总电离截面 $Q_{\text{电离}}$ 的总和，即

$$Q = Q_{\text{弹}} + Q_{\text{激}} + Q_{\text{电离}} \quad (1-23)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{弹}} + \sigma_{\text{激}} + \sigma_{\text{电离}} \quad (1-24)$$

弹性碰撞截面 $\sigma_{\text{弹}}$ 、激发截面 $\sigma_{\text{激}}$ 和电离截面 $\sigma_{\text{电离}}$ 分别表征了各种碰撞几率的大小。原子系统的电离截面 σ_i 、禁戒跃迁的激发截面 σ_{ex1} 、非禁戒跃迁的激发截面 σ_{ex2} 以及电子随动能的麦克斯韦分布关系曲线，如图 1.4 所示。曲线表明碰撞截面与碰撞前电子的动能有关。各种碰撞截面的数据和电子能量分布函数可由实验测得。

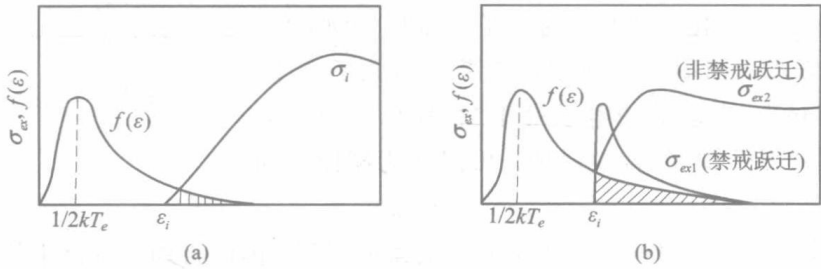


图 1.4 电离截面和激发截面与麦克斯韦分布

如果电子能量 ϵ 小于原子的电离能量 ϵ_i ，就不会发生电离，此时 $\sigma_i = 0$ ；当 $\epsilon > \epsilon_i$ 时，将发生电离碰撞， σ_i 是 ϵ 的函数。单位体积内由电离碰撞产生的电离速率 Z_i 被定义为

$$Z_i = \int N v \sigma_i(\epsilon) n_e f(\epsilon) d\epsilon \quad (1-25)$$

式中 N 为原子数密度， v 为电子的热运动速度， $f(\epsilon)$ 为电子能量分布函数。图 1.4 中的 $f(\epsilon)$ 是以电子温度 T_e 为特征的麦克斯韦分布，即

$$f(\epsilon) = 2 \left(\frac{\epsilon}{\pi} \right)^{1/2} (kT_e)^{-3/2} \exp \left(-\frac{\epsilon}{kT_e} \right) \quad (1-26)$$

因此，要求得电离速率以及激发速率，就必须知道碰撞截面 σ 和电子能量分布函数 $f(\epsilon)$ 。

2. 自由程

所谓自由程 $\bar{\lambda}$ ，是指相邻两次碰撞之间，运动粒子所走过的路程的统计平均值。由统计方法可求出 $\bar{\lambda}$ 为

$$\bar{\lambda} = \langle x \rangle = \frac{\int_0^\infty x \cdot e^{-Qx} dx}{\int_0^\infty e^{-Qx} dx} = \frac{1}{Q} \quad (1-27)$$

$\bar{\lambda}$ 的大小与气体的压强和温度有关, $\bar{\lambda}^{-1}$ 表征单位长度上的碰撞次数。显然 Q 表征了粒子之间碰撞几率的大小。

3. 激发速率

在气体放电过程中, 工作物质粒子数反转分布的建立和维持依赖于电离和激发两种过程, 电离过程是为维持放电所必不可少的(要求提供电子、离子、亚稳粒子), 激励过程是建立反转分布所必需的(要求只对激光上能级有强烈的激发, 而对激光下能级有有效的消激发)。为了描述激发过程建立的快慢, 引入激发速率。激发速率是描述碰撞几率的另一个基本参量, 表示单位时间内、单位体积气体中发生碰撞的次数, 相当于化学反应的速率常数。

在维持电子的来源和激光上能级的激发过程中, 起重要作用的因素是基态粒子密度 n 、电子数密度 n_e 、电子数按能量的分布 $f(\epsilon)$, 以及激发截面。对于碰撞截面为 σ 的某一过程, 反应的速率或激发速率 R 定义为

$$R = n \int_0^{\infty} \sigma(\epsilon) \cdot f(\epsilon) \cdot d\epsilon \quad (1-28)$$

其中: $\sigma(\epsilon)$ 是特定反应的碰撞截面; $f(\epsilon)$ 是粒子按能量 ϵ 的分布函数, 它可能是麦克斯韦分布律, 也可能是得拉维意斯坦分布律, 视等离子体密度而定。

(1) 对于电子碰撞激发过程来说, 工作粒子的某一激发态的电子碰撞激发速率 R_e 为

$$R_e = n \int_0^{\infty} \sigma_e(\epsilon) \cdot f_e(\epsilon) \cdot d\epsilon \quad (1-29)$$

其中: $\sigma_e(\epsilon)$ 是激发态的电子碰撞激发截面; $f_e(\epsilon)$ 是电子按能量 ϵ 的分布函数, 且有

$$\int_0^{\infty} f_e(\epsilon) d\epsilon = n_e \quad (1-30)$$

由于 $\sigma_e(\epsilon)$ 与电子能量的关系通常是不清楚的, 一般将 R_e 写成

$$R_e = n \cdot n_e \cdot \bar{v}_e \cdot \bar{\sigma}_e \quad (1-31)$$

其中 $\bar{v}_e$ 是电子相对于工作粒子的平均速度, $\bar{\sigma}_e$ 是按平均速度 $\bar{v}_e$ 的平均碰撞截面。

(2) 对包含有两种粒子的能量转移激发过程来说, 能量转移激发速率写成

$$R = n_1 \cdot n_2 \cdot \bar{v} \cdot \bar{\sigma} \quad (1-32)$$

其中 n_1 、 n_2 分别代表接受能量的基态粒子和能量载体的粒子数密度, $\bar{v}$ 是粒子相对平均速度, $\bar{\sigma}$ 是按平均速度 $\bar{v}$ 的平均碰撞截面。

(3) R 的量纲为 $m^{-3} \cdot s^{-1}$, 表示单位时间内、单位体积气体中被激发的粒子数。

4. 电子能量分布函数

放电气体中任何粒子的电离几率和激发速率都与电子能量分布函数 $f_e(\epsilon)$ 有关。由于电子是气体放电过程中能量的主要携带者, 电子能量的大小取决于电子在外电场中获得的平均能量, 另一方面电子能量的分布还会受到其他粒子碰撞交换的影响。有关电子能量分布函数的研究工作是从 1913 年开始的, 得拉维意斯坦(Druyresteyn)等研究了低密度 ($n_e < 10^{10} cm^{-3}$) 热平衡态下的电子能量分布函数, 表示为

$$f_e(\epsilon) = 1.63 \chi^{\frac{1}{2}} \exp(-\chi^2) \quad (1-33)$$