

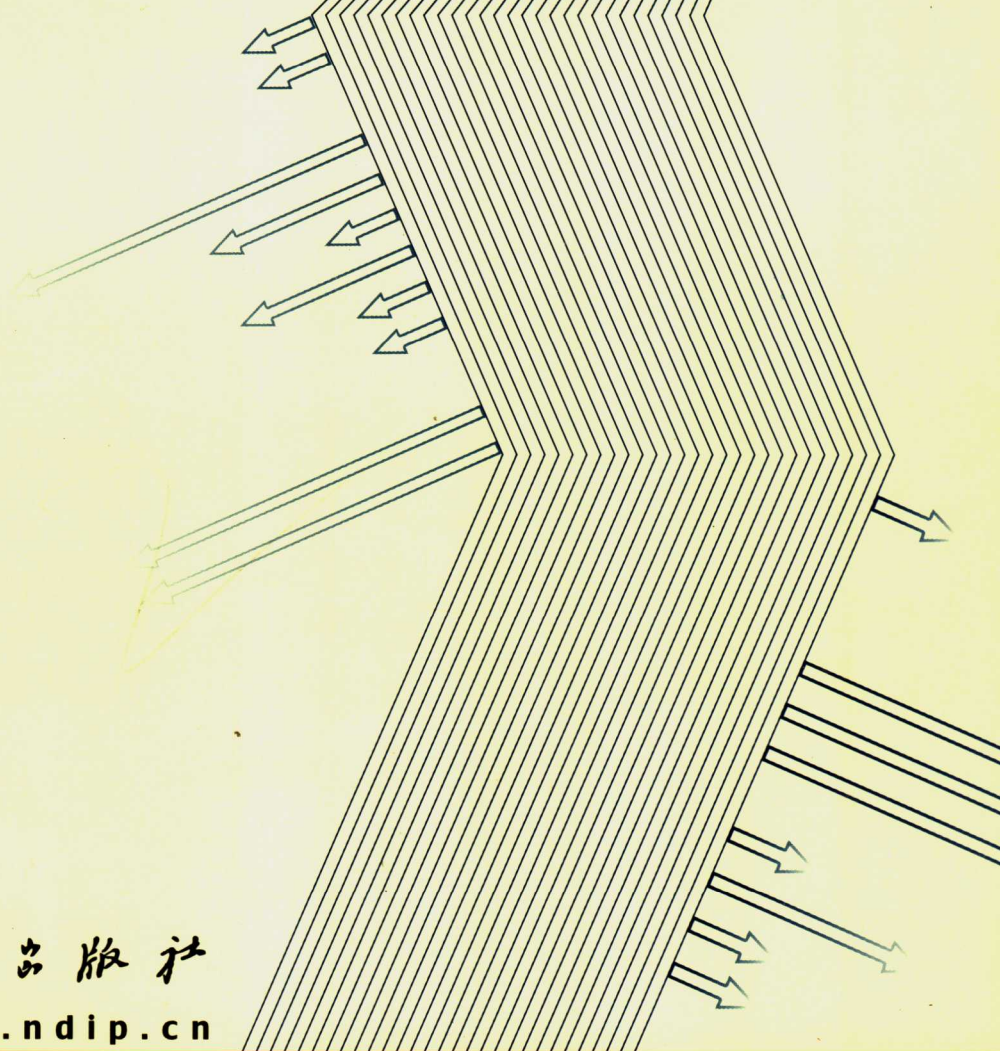


普通高等教育“十五”国家级规划教材

激光器件原理与设计

(第2版)

李适民 黄维玲 等 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

激光器件原理与设计

（第二版）

张祖德 廖建忠 编 张祖德 主编

清华大学出版社
Tsinghua University Press

普通高等教育“十五”国家级规划教材

激光器件原理与设计

(第2版)

李适民 黄维玲 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

激光器件原理与设计 / 李适民等编著. —2 版.

北京:国防工业出版社,2005.1

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-118-03590-4

I. 激... II. 李... III. 激光器-高等学校-教材

IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 082029 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27¼ 628 千字

2005 年 1 月第 2 版 2005 年 1 月北京第 3 次印刷

印数:4501—9500 册 定价:36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

再版前言

本书系 1998 年 7 月由国防工业出版社出版的《激光器件原理与设计》一书的第 2 版,并经国家教育部审定列为普通高等教育“十五”国家级规划教材。

随着激光器件的技术进步及其应用的进展,新型激光器不断开拓创新,从事激光器件与应用研究的人员日益增多。广大读者迫切需要了解 and 掌握比较成熟又有广泛应用的各类激光器的基本结构、工作原理、输出特性、主要参数和器件设计的基本知识。本书全面阐述常用激光器件的原理,并能从中获得有关设计、制造以及激光器应用的基本知识。

本书由华中科技大学激光技术与工程研究院李适民教授担任主编,黄维玲教授担任副主编。编著者在华中科技大学激光技术与工程研究院长期从事常用激光器件的研究与教学工作,具有丰富的理论与实践经验。书中除包括了国内外最新内容外,还总结了编著者多年来的研究工作成果。内容新颖丰富、循序渐进、深入浅出、通俗易懂、实用性强。既以基础理论为主线,又密切联系实际,启迪读者的独立思考与自学能力;既是一本理想的教学用书,也是从事激光器件应用研究、开发、设计的科技人员的良师益友。

本次修订对 1998 年第 1 版的内容进行必要的修改补充,删除了陈旧内容,增加了近几年来国内外激光器件研究的新成果和应用研究的新进展,特别增补了当前发展较快且应用广泛的“半导体激光器”以及“二极管泵浦固体激光器”等内容。保持本书具有与本学科领域科学技术发展水平相适应的先进性。

本书由原来的 3 篇增为 4 篇。其中第 1 篇“气体激光器”由李适民、邬鹤清、韩晏生、黄维玲等编著;第 2 篇“固体激光器”由黄维玲、李正佳、王英等编著;第 3 篇“半导体激光器”由王海林编著;第 4 篇“其他激光器”由蓝信钜编著。国防工业出版社的编辑在编审成书过程中细致耐心,一丝不苟的工作,付出了辛勤劳动,为本书的出版做出了巨大贡献。本书在修订与出版过程中,获得华中科技大学教材基金资助,保证本书能按时完成。在此一并谨表诚挚的感谢。

受编著者水平所限,再版难免仍有不足之处,殷切期盼广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 篇 气体激光器

第 1 章 气体放电基本原理	2
1.1.1 气体放电基本过程	2
一、气体放电粒子种类及其碰撞基本规律	2
二、激发与电离	7
三、复合、吸附与转荷	12
四、带电粒子在电离气体中的运动	15
1.1.2 气体击穿与各种放电形式	19
一、气体击穿及伏安特性	20
二、辉光放电	22
第 2 章 氦氖激光器	32
1.2.1 氦氖激光器的工作原理	32
一、氦氖激光器工作物质能级的特点	32
二、氦氖激光器的激发机理	34
1.2.2 氦氖激光器的工作特性与输出特性	36
一、电子温度	36
二、增益	37
三、输出功率	39
四、输出谱线	42
1.2.3 氦氖激光器的结构与设计	44
一、氦氖激光器的结构	44
二、氦氖激光器的设计	45
第 3 章 氩离子激光器	48
1.3.1 氩离子激光器的工作原理	48
一、氩离子的能级结构	48
二、氩离子激光器的激发机理	49
三、氩离子激光器的工作特性与结构特点	50
1.3.2 氩离子激光器的工作特性	50
一、等离子体的参数	50
二、抽运效应	51
三、阈值电流强度	52
1.3.3 氩离子激光器的输出特性	53

一、输出功率	53
二、输出谱线	56
1.3.4 氙离子激光器的结构与设计的	56
一、氙离子激光器的结构	56
二、氙离子激光器的设计计算	58
第4章 二氧化碳激光器	61
1.4.1 二氧化碳激光器的工作原理	61
一、二氧化碳分子振转能级结构	61
二、二氧化碳激光器的激发机理	63
三、二氧化碳激光器弛豫过程	67
四、辅助气体	69
1.4.2 普通二氧化碳激光器的工作特性和输出特性	71
一、电子温度	71
二、增益	73
三、输出功率	75
四、输出谱线	78
1.4.3 普通二氧化碳激光器的结构与设计的	80
一、结构	80
二、小型二氧化碳激光器的设计	81
1.4.4 高功率二氧化碳激光器	83
一、高功率二氧化碳激光器的特点	83
二、轴快流高功率二氧化碳激光器	85
三、横流高功率二氧化碳激光器	90
四、慢速流动扩散冷却板条二氧化碳激光器	95
1.4.5 横向激励高气压二氧化碳激光器	95
一、TEA 二氧化碳激光器的特点	95
二、常用的 TEA 二氧化碳激光器的结构	96
三、TEA 二氧化碳激光器的工作特性	99
1.4.6 高功率二氧化碳激光器设计举例	102
一、实验结果及分析	102
二、理论计算	102
三、实验结果和理论计算的关系	104
四、放电参数的确定	106
五、激光能级激励功率	106
六、电子束维持 TEA 二氧化碳激光器	108
第5章 高功率二氧化碳激光器的结构设计	110
1.5.1 光学谐振腔的结构设计	110
一、高功率二氧化碳激光器的谐振腔	110
二、谐振腔的机械结构设计	110

1.5.2 放电系统的结构设计	114
一、横流电激励二氧化碳激光器的放电结构	114
二、轴快流二氧化碳激光器的放电结构	119
1.5.3 高功率气体激光器循环系统的结构设计	120
一、横流激光器气体循环系统的结构设计	120
二、轴向快流激光器气体循环系统的结构设计	122
1.5.4 热交换系统的计算与设计	128
一、常用的热交换器种类	128
二、板翅式热交换器的设计与计算	129
第6章 气体激光器的电源系统	133
1.6.1 连续辉光放电气体激光器对电源系统的要求	133
1.6.2 氦-氟激光器和直管式二氧化碳激光器的电源系统	134
一、用电阻镇流的氦-氟激光器电源	134
二、无限流电阻的气体激光电源	134
1.6.3 横向激励连续二氧化碳激光器电源系统	136
1.6.4 针-板式横向放电激励连续二氧化碳激光器的放电稳定性	138
1.6.5 纵向激励二氧化碳激光器的电源系统	141
一、封闭型脉冲二氧化碳激光器的电源系统	141
二、连续放电激励的二氧化碳激光器电源系统	142
1.6.6 氙离子激光器的电源系统	145
1.6.7 脉冲气体激光器的电源系统	145
一、脉冲气体激光器的特点和对电源的要求	145
二、获得高压纳秒脉冲的几种方法	146
主要参考文献	149

第2篇 固体激光器

第1章 固体激光器工作的基本原理与特性	150
2.1.1 固体激光器的基本特性	150
一、固体激光器的基本结构	150
二、固体激光器的能量转换	151
三、固体激光器的工作特性	153
四、最佳透过率	158
五、固体激光器的其他特性	160
2.1.2 固体工作物质	161
一、激活离子和基质	162
二、掺杂浓度	163
三、工作物质的劣化与破坏	164
四、工作物质质量及其加工的基本要求	165
五、红宝石	165

六、掺钕的钇铝石榴石($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)晶体	167
七、钕玻璃	170
八、红宝石、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和钕玻璃的比较	172
九、其他固体激光材料	173
十、固体工作物质的性能参数与测量	173
2.1.3 工作物质的热效应	179
一、连续激光器的热效应	179
二、单次脉冲泵浦下激光棒的热效应	187
三、重复脉冲激光器的热效应	189
四、热效应的减小及补偿措施	190
第2章 固体激光器的设计	191
2.2.1 聚光腔	191
一、聚光腔的基本类型	191
二、能量转换特性	193
三、机械设计	199
2.2.2 光学谐振腔参数的选择与设计	202
一、谐振腔的结构	202
二、激光谐振腔的稳定性	205
三、有源谐振腔	206
四、固体激光器谐振腔的灵敏度	208
五、光学谐振腔的机械设计	211
2.2.3 泵浦源	213
一、惰性气体闪光灯	215
二、惰性气体连续弧光灯	221
2.2.4 固体激光器的冷却装置	226
一、液体冷却	226
二、空气或气体冷却	228
三、传导冷却	230
第3章 典型固体激光器	231
2.3.1 中小功率固体激光器	231
一、连续固体激光器	231
二、脉冲固体激光器	232
2.3.2 高功率固体激光器	233
2.3.3 板条状固体激光器	235
一、灯泵浦板条状固体激光器的工作原理	235
二、理论分析	236
三、板条状固体激光器装置	237
四、现状与发展方向	238
2.3.4 新型固体激光器简介	240

一、紫翠宝石激光器	240
二、掺钛蓝宝石激光器	241
三、Er:YAG 激光器	243
四、Ho:YAG 激光器	245
第 4 章 二极管泵浦固体激光器	247
2.4.1 二极管激光器的光耦合技术	247
一、光纤耦合	247
二、阶梯镜耦合	248
三、平行反射镜耦合	248
四、不同种类镜片耦合	248
2.4.2 二极管泵浦固体激光器泵浦方式	249
一、端面泵浦	249
二、侧面泵浦	249
三、圆片状激光器	253
第 5 章 固体激光器的电源系统	255
2.5.1 固体激光器的光源	255
一、惰性气体放电灯的电气特性	255
二、灯的工作特性	257
2.5.2 脉冲固体激光器的电源系统	259
一、贮能网络	259
二、充电电路	267
三、气体放电灯的触发、预燃及放电开关	272
2.5.3 连续固体激光器的电源系统	275
一、连续固体激光器对电源的要求	275
二、连续固体激光器电源系统的电路结构及各部分的作用	275
三、几种常用的主电路	276
主要参考文献	278

第 3 篇 半导体激光器

第 1 章 半导体激光器概况	279
3.1.1 半导体激光器发展	279
一、半导体激光器出现的理论基础	279
二、1962 年出现半导体激光器	280
三、实现半导体激光器在室温下连续工作(1962 年—1970 年)	280
四、半导体激光器的飞速发展	280
五、能带工程使半导体激光器产生新的飞跃	282
3.1.2 半导体激光器的广泛应用	282
一、(1300~1550)nm 激光器应用状况	282
二、(790~1020)nm 激光器应用状况	283

三、(600~780)nm 激光器应用状况	284
第2章 半导体激光器的物理基础	285
3.2.1 半导体中能带的基本概念及电子在能带之间的跃迁	285
一、能带的基本概念	285
二、电子在能带之间的跃迁	286
三、辐射复合与非辐射复合	289
3.2.2 半导体激光器的基本工作原理	292
一、半导体激光器的粒子数反转条件	293
二、半导体激光器有源介质的增益系数	295
三、阈值增益	296
3.2.3 光子反馈谐振	297
一、光子反馈的意义和方式	297
二、激光振荡条件	298
第3章 半导体激光器的特性	301
3.3.1 半导体激光器的阈值特性	301
一、器件结构的影响	301
二、材料的影响	301
三、温度的影响	301
四、阈值电流的测定	302
3.3.2 半导体激光器的效率	303
一、功率效率	304
二、外微分量子效率或斜率效率	305
3.3.3 半导体激光器的空间模式	305
一、半导体激光器的光束发散角	306
二、半导体激光器的像散	308
3.3.4 半导体激光器的纵模	310
一、纵模模谱	311
二、影响纵模谱的因素	312
三、激光器的单纵模工作条件	314
四、纵模与横模之间的关系	315
五、动态单纵模	316
3.3.5 半导体激光器的线宽	316
3.3.6 半导体激光器的动态特性	318
一、张弛振荡与类谐振现象	318
二、寄生电容和电感	320
三、啁啾限制	321
3.3.7 半导体激光器的热特性	321
一、半导体激光器的热耗散功率	322
二、半导体激光器的致冷	322

3.3.8 半导体激光器的可靠性	324
一、半导体激光器的退化和失效	324
二、可靠性试验	325
第4章 典型半导体激光器	328
3.4.1 分布反馈半导体激光器	328
一、DFB 激光器结构	329
二、DFB 激光器的输出特性	330
3.4.2 异质结半导体激光器	335
一、双异质结激光器(DH)	335
二、条形激光器	335
3.4.3 量子阱半导体激光器	337
一、能带工程	338
二、量子阱和量子阱激光器	339
三、应变量子阱	342
3.4.4 表面发射激光器	343
一、VCSEL	344
二、VCSEL 的应用前景	347
3.4.5 激光二极管阵列	348
一、基本结构	349
二、二极管线阵和阵列条	349
三、二维面阵	350
四、光谱特性和工作寿命	351
第5章 半导体激光器电源系统	354
3.5.1 正向浪涌	354
一、产生浪涌的原因	354
二、静电对半导体激光器的影响	355
3.5.2 半导体激光器的驱动电源	356
一、稳定电源的组成和工作原理	356
二、半导体激光器电源中的保护电路	358
主要参考文献	359

第4篇 其他激光器

第1章 染料激光器	360
4.1.1 染料激光产生的原理	360
一、染料分子的能级结构	360
二、染料的吸收和发光过程	361
4.1.2 染料激光器的种类及泵浦方式	362
一、脉冲染料激光器及泵浦方式	362
二、连续波染料激光器及泵浦方式	366

4.1.3 染料激光器的波长调谐	368
一、光栅调谐	368
二、棱镜调谐	369
三、法布里-珀罗(F-P)标准具调谐	369
四、双折射滤光片调谐	370
4.1.4 设计染料激光器应考虑的几个问题	372
一、染料的选择	372
二、溶剂的选择	373
三、染料盒的结构	374
四、泵浦源的选择	375
第2章 准分子激光器	376
4.2.1 准分子激光器的工作原理	377
一、准分子的能态结构及跃迁过程	377
二、准分子激光器运转的泵浦要求	378
三、电子束泵浦准分子激光器	379
四、脉冲放电泵浦准分子激光器	382
4.2.2 准分子激光器的动力学过程	384
一、电子束泵浦的稀有气体激光器的动力学过程	385
二、电子束泵浦稀有气体卤化物激光器的动力学过程	385
三、放电泵浦稀有气体卤化物激光器的动力学过程	386
4.2.3 准分子激光器的结构与设计	386
一、电子束泵浦的准分子激光器的结构与设计要点	386
二、脉冲放电泵浦准分子激光器的结构与设计	388
第3章 化学激光器	391
4.3.1 化学激光器的基本原理	392
一、化学激光产生的机理	392
二、弛豫(去激活)过程的影响	393
三、化学反应动力学	394
4.3.2 化学激光器的引发技术	395
一、闪光光解引发技术	395
二、电(放电、电子束)引发技术	395
三、热引发	396
四、化学引发	397
4.3.3 几种主要的化学激光器	397
一、连续波 HF(DF)化学激光器	397
二、能量转移型化学激光器	400
三、电子态跃迁的氧碘化学激光器	401
第4章 自由电子激光器	406
4.4.1 自由电子激光产生的原理	407

一、自由电子产生光辐射的机理	407
二、自由电子激光形成的原理	409
4.4.2 自由电子激光器的主要组成部分及其类型	411
一、自由电子激光器的主要组成部分	411
二、自由电子激光器的主要类型	417
三、实例	421
主要参考文献	423

第 1 篇 气体激光器

任何物质若能通过一定的激励手段,使它实现粒子数反转状态,产生光量子放大,并且在结构上能做到使单程增益超过单程损耗,则可利用这种物质制成实际的激光器件。已经发现的具有实用价值的激光物质很多,有气体、固体、半导体、液体等。

以单一气体、混合气体或蒸气作为激光工作物质的激光器称为气体激光器。这些工作物质可以是利用原子、分子或离子产生激光作用,因此气体激光器一般又可分为原子激光器、分子激光器和离子激光器三大类。自从 1961 年首次报道研制成氦氖激光器以来,相继出现各种原子、分子、离子激光器。气体激光器是种类最多、应用最广泛的一类激光器。据统计,目前气体激光器占世界激光器市场的 60%。

气体激光器的优点主要表现在:

① 工作物质均匀一致 它保证了激光束的优良光束质量,大部分的气体激光器能产生接近高斯分布的光束模式。激光束的相干性、单色性都优于固体、半导体激光器。

② 谱线范围宽 有数百种气体和蒸气可以产生激光,已经观测到的激光谱线近万余条。谱线覆盖范围从亚毫米波到真空紫外线,甚至 X 射线、 γ 射线波段。

③ 输出激光功率大,既能连续又能脉冲工作,效率高。气体激光器容易实现大体积均匀的工作物质,且工作物质的流动性好,因此能获得很大功率输出。例如高功率电激励 CO_2 激光器连续输出功率已达数万瓦以上。大部分的气体激光器既能连续又能脉冲工作。目前 CO_2 激光器的电光转换效率已达到 25%,而 CO 激光器在低温条件下可达到 50%。

气体激光器还具有结构简单、运行费用低等优点,因而在工农业生产、科学研究、国防应用、材料加工、医疗、测量、能源、通信、信息等领域有广泛的应用价值。

与半导体、固体激光器相比较,气体激光器中的气体或蒸气的粒子密度较低,因此,一般来说气体激光器的体积较大,不容易做到大能量的脉冲输出。但是近年来的发展在原理、结构和技术上都有突破;超紧凑型的器件,高气压大能量脉冲激光器不断开拓出来,开始能与固体激光器件进行竞争。

气体激光器的发展方向是探索新的波段,发展新的激光器件和应用领域;同时,在原有激光器的基础上继续研制大功率、大能量、高光束质量、高效率、长寿命、高可靠性及小型化的器件。

气体激光器的激励方式很多。由于产生激光作用的原子、分子或离子都以气体或蒸气的形式存在于激光物质之中,因此通常都用气体放电作为激励手段,使之达到粒子数反转状态。气体放电激励方式简便有效,但在某些条件下它不能达到理想效果,这时也可以用其他激励手段,这些激励方式有热激励、化学激励、光泵激励、核能激励、电子束激励等。一种气体激光器能用许多不同的激励方式来泵浦,非常灵活,这也是气体激光器的优点之一,例如 CO_2 激光器几乎能用上述各种激励技术来泵浦,因此 CO_2 激光器能做到功率大、

能量大、种类多、应用范围大等特点。

气体激光器种类繁多,到目前为止最具典型的、用途广、技术成熟但仍在不断发展改进的是 CO_2 激光器、氮氛激光器和氩离子激光器。本篇重点阐述气体放电的基本原理和这些典型激光器的原理、结构、工作特性、设计计算及其电源系统。由于 CO_2 激光器种类多,技术发展快,我们用两章的篇幅来介绍。其他气体激光器有少数在第4篇介绍。

第1章 气体放电基本原理

1.1.1 气体放电基本过程

气体放电是气体激光器的主要激励方式。在外加电场作用下,气体中产生电流形成电离气体称为气体放电现象。常用的气体激光器属于弱电离气体放电,气体电离度很少有超过0.1%的,电子密度范围约 $(10^{10} \sim 10^{17})/\text{cm}^3$ 。即使是最简单的气体放电现象,其中也会产生多种粒子以及它们之间的相互作用过程。所以说,气体放电是一个复杂的电、光、化学作用系统。

一、气体放电粒子种类及其碰撞基本规律

1. 气体放电粒子种类

(1) 中性气体粒子

中性气体粒子是指气体没有电离时已经存在的粒子。它们有一般的原子,如惰性气体粒子、金属蒸气粒子等;有一般的分子,如 N_2 、 O_2 或 CO_2 等;有较复杂的分子,如 CH_3F 等。它们的气压范围变化较大,通常为几帕到 10^5Pa 。最高气压也有达到 $(10^6 \sim 10^8)\text{Pa}$ 。对于几百帕气压来说,中性粒子密度为 $(10^{22} \sim 10^{23})/\text{m}^3$ 范围。

(2) 带电粒子

中性气体粒子一旦被电离就产生了电子和正离子。由于化学过程等原因,气体中也能形成负离子。这些带电粒子都对放电特性产生影响,其中电子的作用起主导地位。离子与原来的中性粒子有很大差别,尤其在分子气体中,如 He 放电时可能产生 He_2^+ , N_2 和 O_2 放电时可能产生许多种的离子,它们是 N^+ 、 N_2^+ 、 O^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 、 O_2^- 、 NO_2^- 、 O_3^- 等。

(3) 受激粒子和光子

在分析气体放电的电特性时,中性粒子和带电粒子扮演了主要角色。但是放电中产生的受激中性粒子(A' 和 AB')以及可能出现的受激离子($A^{+'}$)按照量子效应,它们会发射光子,也能吸收光子实现光激发、光电离和受激辐射,从而在激光器及光源中起着重要作用。

2. 粒子碰撞基本规律

(1) 弹性碰撞和非弹性碰撞

碰撞是指两个或两个以上粒子相互作用引起动量、动能或者内能变化的过程。一般

可以将碰撞分成弹性碰撞和非弹性碰撞两大类。弹性碰撞是指相互发生碰撞的粒子间只交换动量和动能,不交换内能,即碰撞前后粒子的内能不变,粒子间遵守动量和动能守恒定律。非弹性碰撞是指相互发生碰撞的粒子间既交换动能也交换内能,即碰撞前后粒子的内能改变,粒子间遵守动量和能量守恒定律。

弹性碰撞在确定气体放电的各种传递系数中起主要作用,如热传导、电传导、扩散、漂移等系数。非弹性碰撞在确定气体放电的各种电参量和光参量中起主要作用,如电子温度或能量、电子密度、各种受激能级的粒子数分布等。

(2) 碰撞能量转换分析

以最简单的对心碰撞为例来分析不同质量粒子碰撞时能量的转换。

① 弹性碰撞

假设两个粒子的质量分别为 m_1 和 m_2 ,碰撞前速度分别是 v_1 和 0,碰撞后速度分别为 u_1 和 u_2 。由于弹性碰撞前后总的动能与动量保持不变,可得

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (1.1.1)$$

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1.1.2)$$

式(1.1.1)和式(1.1.2)的解

$$u_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \quad (1.1.3)$$

$$u_2 = 2v_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (1.1.4)$$

由此得第一粒子传递给第二粒子的动能为

$$E_2 = \frac{1}{2} m_2 u_2^2 = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \times \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1 \quad (1.1.5)$$

令能量损失率 $\Delta = \frac{E_2}{E_1}$, 则

$$\Delta = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1.1.6)$$

以上考虑是对心碰撞,求得的 Δ 是个最大值,如考虑到非对心碰撞时, Δ 的最小值近似为零,则平均能量损失率 $\bar{\Delta}$ 为

$$\bar{\Delta} = 2 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1.1.7)$$

若 $m_1 \ll m_2$,如电子与气体原子发生弹性碰撞时,电子的平均能量损失率 $\bar{\Delta}$ 很小,以汞蒸气为例, $\bar{\Delta}$ 为 5.5×10^{-6} ,这个数值是微不足道的。电子与原子的弹性碰撞虽然次数很多,但每次碰撞损失能量不大,因此它还是能从电场中逐步积累能量。例如,电子在相当于能量为 1eV 的速度下,当气压为 133Pa 的气体中,每秒钟要与气体原子碰撞 10^9 次,尽管电子与气体原子的每次弹性碰撞损失的能量很小,但由于碰撞极其频繁,因而对电子来说,每秒钟传递给气体原子的总能量又是不可忽视的。