

激光器件原理与设计

激光器件原理与设计

李适民 等编著

国防工业出版社

激光器件原理与设计

李适民 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. —北京:国防工业出版社,1998.7

ISBN 7-118-01828-7

I. 激… II. 李… III. ①激光器-理论②激光器-设计
IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19085 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20¼ 474 千字

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

近十年来,激光技术及其应用得到迅速普及和发展,各类激光器的性能和商品化程度明显提高,新型激光器不断开拓,从事和应用激光器件的专业人员不断扩大,迫切需要一本既能全面深入反映当前激光器件工作性能和原理,又能介绍典型激光器设计方法的书。作者们在华中理工大学激光技术与工程研究院长期从事激光器件的科学研究和教学实践,有一定的心得和体会,在此基础上,参考了国内外有关书籍和文献,编著成《激光器件原理与设计》一书。希望本书能成为从事激光研究、激光应用的科技人员的良师益友,同时也能成为一本较理想的教学用书。

激光器件种类繁多,内容广泛,不可能一一阐述。本书重点突出常用的典型激光器以及它们中具有共性的原理和设计。第一篇为气体激光器,介绍了气体放电基本原理; CO_2 激光器、He-Ne激光器和 Ar^+ 离子激光器的原理、特性、电源系统及其设计计算。第二篇为固体激光器,介绍了固体激光器的基本原理与特性;以 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器为典型器件的工作特性、结构和设计;新型固体激光器;电源系统。第三篇为其他激光器,介绍了染料激光器,准分子激光器,化学激光器和自由电子激光器。

第一篇由李适民、邬鹤清、韩晏生、黄维玲编写,第二篇由黄维玲、李正佳、王英编写,第三篇由蓝信钜编写。全书由李适民主编。

由于编著者水平有限,难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

本书可用作高等学校光电子技术专业本科生和研究生的教科书,也可供相关专业的师生及有关科技人员参考。

编 著 者

目 录

第一篇 气体激光器

引言	(1)
第一章 气体放电的基本原理	(3)
§ 1.1.1 气体放电的基本过程	(3)
一、气体放电粒子种类及其碰撞的基本规律	(3)
二、激发与电离	(8)
三、复合、吸附与转荷	(13)
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	(20)
一、气体击穿及伏安特性	(20)
二、辉光放电	(23)
第二章 氦氖激光器	(32)
§ 1.2.1 He-Ne 激光器的工作原理	(32)
一、He-Ne 激光器工作物质能级的特点	(32)
二、He-Ne 激光器的激发机理	(34)
§ 1.2.2 He-Ne 激光器的工作特性与输出特性	(37)
一、电子温度	(37)
二、增益	(37)
三、输出功率	(40)
四、输出谱线	(43)
§ 1.2.3 He-Ne 激光器的结构与设计	(45)
一、He-Ne 激光器的结构	(45)
二、He-Ne 激光器的设计	(46)
第三章 氩离子激光器	(50)
§ 1.3.1 Ar ⁺ 激光器的工作原理	(50)
一、Ar ⁺ 的能级结构	(50)
二、Ar ⁺ 激光器的激发机理	(51)
三、Ar ⁺ 激光器的工作特性与结构的特点	(52)
§ 1.3.2 Ar ⁺ 激光器的工作特性	(52)
一、等离子体的参数	(52)

二、抽运效应	(53)
三、阈值电流强度	(54)
§ 1.3.3 Ar ⁺ 激光器的输出特性	(55)
一、输出功率	(55)
二、输出谱线	(58)
§ 1.3.4 Ar ⁺ 激光器的结构与设计	(58)
一、Ar ⁺ 激光器的结构	(58)
二、Ar ⁺ 激光器的设计计算	(61)
第四章 二氧化碳激光器	(63)
§ 1.4.1 CO ₂ 激光器的工作原理	(63)
一、CO ₂ 分子振转能级的结构	(63)
二、CO ₂ 激光器的激发机理	(65)
三、CO ₂ 激光器的弛豫过程	(69)
四、辅助气体	(71)
§ 1.4.2 普通 CO ₂ 激光器的工作特性和输出特性	(73)
一、电子温度	(73)
二、增益	(75)
三、输出功率	(77)
四、输出谱线	(80)
§ 1.4.3 普通 CO ₂ 激光器的结构与设计	(82)
一、结构	(82)
二、小型 CO ₂ 激光器的设计	(83)
§ 1.4.4 高功率 CO ₂ 激光器	(85)
一、高功率 CO ₂ 激光器的特点	(85)
二、轴快流高功率 CO ₂ 激光器	(88)
三、横流高功率 CO ₂ 激光器	(92)
四、慢速流动扩散冷却板条 CO ₂ 激光器	(95)
§ 1.4.5 横向激励高气压 CO ₂ 激光器	(96)
一、TEA CO ₂ 激光器的特点	(96)
二、常用的 TEA CO ₂ 激光器的结构	(97)
三、TEA CO ₂ 激光器的工作特性	(100)
§ 1.4.6 高功率 CO ₂ 激光器的设计举例	(102)
一、实验结果及分析	(103)
二、理论计算	(103)
三、实验结果和理论计算的关系	(105)
四、放电参数的确定	(106)
五、激光能级的激励功率	(107)
六、电子束维持 TEA CO ₂ 激光器	(108)
第五章 高功率 CO₂ 激光器的结构设计	(111)

§ 1.5.1 光学谐振腔的结构设计	(111)
一、高功率 CO ₂ 激光器的谐振腔	(111)
二、谐振腔的机械结构设计	(111)
§ 1.5.2 放电系统的结构设计	(115)
一、横流电激励 CO ₂ 激光器的放电结构	(115)
二、轴快流 CO ₂ 激光器的放电结构	(120)
§ 1.5.3 高功率气体激光器循环系统的结构设计	(121)
一、横流激光器气体循环系统的结构设计	(122)
二、轴快流激光器气体循环系统的结构设计	(124)
§ 1.5.4 热交换系统的计算与设计	(126)
一、常用的热交换器种类	(126)
二、板翅式热交换器的设计与计算	(128)
第六章 气体激光器的电源系统	(131)
§ 1.6.1 连续辉光放电气体激光器对电源系统的要求	(131)
§ 1.6.2 He-Ne 激光器和直管式 CO ₂ 激光器的电源系统	(132)
一、用电阻镇流 He-Ne 激光器电源	(132)
二、无限流电阻的气体激光电源	(132)
§ 1.6.3 横向激励连续 CO ₂ 激光器的电源系统	(134)
§ 1.6.4 针-板式放电横向激励连续 CO ₂ 激光器的放电稳定性	(136)
§ 1.6.5 纵向激励 CO ₂ 激光器的电源系统	(139)
一、封闭型脉冲 CO ₂ 激光器的电源系统	(139)
二、连续放电激励的 CO ₂ 激光器的电源系统	(140)
§ 1.6.6 氩离子激光器的电源系统	(143)
§ 1.6.7 脉冲气体激光器的电源系统	(143)
一、脉冲气体激光器的特点和对电源的要求	(143)
二、获得高压纳秒脉冲的几种方法	(144)

第二篇 固体激光器

第一章 固体激光器工作的基本原理与特性	(148)
§ 2.1.1 引言	(148)
§ 2.1.2 固体激光器的基本特性	(148)
一、固体激光器的基本结构	(148)
二、固体激光器的能量转换	(149)
三、固体激光器的工作特性	(151)
四、最佳透过率	(156)
五、固体激光器的其他特性	(157)
§ 2.1.3 固体工作物质	(158)
一、激活离子和基质	(159)

二、掺杂浓度	(160)
三、工作物质的劣化与破坏	(161)
四、对工作物质质量及加工的基本要求	(162)
五、红宝石	(162)
六、掺钕的钇铝石榴石(Nd^{3+} :YAG)晶体	(164)
七、钕玻璃	(167)
八、红宝石、 Nd^{3+} :YAG 和钕玻璃的比较	(169)
九、其他固体激光材料	(169)
十、固体工作物质的性能参数与测量	(170)
§ 2.1.4 工作物质的热效应	(175)
一、连续激光器的热效应	(176)
二、单次脉冲泵浦下激光棒的热效应	(183)
三、重复脉冲激光器的热效应	(186)
四、热效应的消除及补偿措施	(186)
第二章 固体激光器的设计	(188)
§ 2.2.1 聚光腔	(188)
一、聚光腔的基本类型	(188)
二、能量转换特性	(190)
三、机械设计	(196)
§ 2.2.2 光学谐振腔参数的选择与设计	(199)
一、谐振腔的结构	(200)
二、激光谐振腔的稳定性	(203)
三、有源谐振腔	(203)
四、固体激光器谐振腔的灵敏度	(205)
五、光学谐振腔的机械设计	(208)
§ 2.2.3 泵浦源	(210)
一、惰性气体闪光灯	(211)
二、惰性气体连续弧光灯	(217)
§ 2.2.4 固体激光器的冷却装置	(222)
一、液体冷却	(222)
二、空气或气体冷却	(225)
三、传导冷却	(226)
第三章 典型固体激光器	(227)
§ 2.3.1 中小功率固体激光器	(227)
一、连续固体激光器	(227)
二、脉冲固体激光器	(228)
§ 2.3.2 高功率固体激光器	(229)
§ 2.3.3 板条状固体激光器	(231)
一、灯泵浦板条状固体激光器的工作原理	(231)

二、理论分析	(232)
三、板条状固体激光器装置	(233)
四、现状与发展方向	(234)
§ 2.3.4 新型固体激光器简介	(236)
一、紫翠宝石激光器	(236)
二、掺钛蓝宝石激光器	(237)
三、激光二极管泵浦的固体激光器	(239)
第四章 固体激光器的电源系统	(244)
§ 2.4.1 固体激光器的光源	(244)
一、惰性气体放电灯的电气特性	(244)
二、灯的运行工作特性	(247)
§ 2.4.2 脉冲固体激光器的电源系统	(248)
一、储能网络	(249)
二、充电电路	(255)
三、气体放电灯的触发、预燃及放电开关	(261)
§ 2.4.3 连续固体激光器的电源系统	(264)
一、连续固体激光器对电源的要求	(264)
二、连续固体激光器电源系统的电路结构及各部分的作用	(264)
三、几种常用的主电路	(265)

第三篇 其他激光器

第一章 染料激光器	(268)
§ 3.1.1 概述	(268)
§ 3.1.2 染料激光产生的原理	(268)
一、染料分子的能级结构	(268)
二、染料的吸收和发光过程	(269)
§ 3.1.3 染料激光器的种类及泵浦方式	(270)
一、脉冲染料激光器及泵浦方式	(270)
二、连续波染料激光器及泵浦方式	(274)
§ 3.1.4 染料激光器的波长调谐	(275)
一、光栅调谐	(276)
二、棱镜调谐	(276)
三、法布里-珀罗(F-P)标准具调谐	(276)
四、双折射滤光片调谐	(278)
§ 3.1.5 设计染料激光器应考虑的几个问题	(279)
一、染料的选择	(279)
二、溶剂的选择	(280)
三、染料盒的结构	(281)

四、泵浦源的选择	(281)
第二章 准分子激光器	(282)
§ 3.2.1 概述	(282)
§ 3.2.2 准分子激光器的工作原理	(283)
一、准分子的能态结构及跃迁过程	(283)
二、准分子激光器运转的泵浦要求	(284)
三、电子束泵浦准分子激光器	(285)
四、脉冲放电泵浦准分子激光器	(287)
§ 3.2.3 准分子激光器的结构与设计	(289)
一、电子束泵浦的准分子激光器的结构与设计要点	(289)
二、脉冲放电泵浦准分子激光器的结构与设计	(291)
第三章 化学激光器	(293)
§ 3.3.1 概述	(293)
§ 3.3.2 化学激光器的基本原理	(294)
一、化学激光产生的机理	(294)
二、弛豫(去激活)过程的影响	(295)
三、化学反应动力学	(296)
§ 3.3.3 化学激光器的引发技术	(297)
一、光解引发	(297)
二、电(放电、电子束)引发	(297)
三、热引发	(297)
四、化学引发	(298)
§ 3.3.4 几种主要的化学激光器	(298)
一、连续波 HF(DF)化学激光器	(298)
二、能量转移型化学激光器	(300)
三、电子态跃迁与氧碘化学激光器	(302)
第四章 自由电子激光器	(305)
§ 3.4.1 概述	(305)
§ 3.4.2 自由电子激光产生的原理	(306)
一、自由电子产生光辐射的机理	(306)
二、自由电子激光形成的原理	(307)
§ 3.4.3 自由电子激光器的主要组成部分及其类型	(309)
一、自由电子激光器的主要组成部分	(309)
二、自由电子激光器的主要类型	(311)
三、实例	(315)
主要参考书	(318)

第一篇 气体激光器

引言

任一物质若通过一定的激励手段,使它实现粒子数反转分布,产生光量子放大,并且在结构上做到使它的单程增益超过单程损耗,则利用这种物质就可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……

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。由于是利用这些工作物质的原子、分子和离子产生激光作用,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,目前气体激光器的销售量约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,使大部分的气体激光器能产生接近高斯分布的光束模式。在激光束的相干性、单色性方面,它优于固体、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波段,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,且效率高。气体激光器容易实现工作物质的大体积均匀分布,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万千瓦以上。大部分的气体激光器既能连续工作又能脉冲工作。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、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。但是近年来发展很快,在原理、结构和技术上都有突破;超紧凑型的器件,高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、分子和离子都是以气体或

1107698

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 激光器具有功率大、能量高、种类多、应用范围宽等特点。

气体激光器种类繁多,到目前为止最具典型的是 CO_2 激光器、 $\text{He}-\text{Ne}$ 激光器和 Ar^+ 激光器。它们的用途广,技术成熟,而且还在不断地发展改进。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,有少数气体激光器在第三篇中加以介绍。

第一章 气体放电的基本原理

§ 1.1.1 气体放电的基本过程

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之为气体放电现象。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 $10^{10} \sim 10^{17}/\text{cm}^3$ 。此外,在气体放电现象中还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、化学作用的系统。

一、气体放电粒子种类及其碰撞的基本规律

1. 气体放电粒子的种类

(1) 中性气体粒子

中性气体粒子是指气体没有电离时就已经存在的粒子。它们有一般的原子,如惰性气体原子、金属蒸气原子等;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(Pa)到 10^5Pa 。最高气压甚至可达到 $10^6\text{Pa} \sim 10^8\text{Pa}$ 。对于几百Pa气压来说,中性气体粒子密度范围为 $10^{22} \sim 10^{23}/\text{m}^3$ 。

(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。由于存在化学过程等原因,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,其中电子起主导作用。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 放电时可能产生多种离子,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

由前已知,中性粒子和带电粒子在放电中扮演了主要角色。而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($A^{+'}$)由于存在量子效应,它们会产生光子发射,同时也可能因吸收光子而产生光激发、光电离和受激辐射等过程,从而在激光器及光源中起重要作用。

2. 粒子碰撞的基本规律

(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) 碰撞能量转换的分析

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。

A. 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 。根据弹性碰撞前后总的动能与动量保持不变, 可得下列方程:

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

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

式(1.1.1)和(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

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

令能量损失率 $\Delta = \frac{E_2}{E_1}$, 则

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

以上考虑的是对心碰撞, 所求得的 Δ 是最大值。如考虑非对心碰撞, 则求得的 Δ 最小值近似为零, 故平均能量损失率 $\bar{\Delta}$ 为

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

若 $m_1 \ll m_2$, 如电子与气体原子间发生的弹性碰撞, 电子的平均能量损失率 $\bar{\Delta}$ 很小, 以汞蒸气为例, $\bar{\Delta}$ 只有 5.5×10^{-6} 。这个数值说明, 电子与原子的弹性碰撞次数虽然很多, 但每次碰撞损失能量不大, 因此它从电场中逐步积累能量。例如, 电子在具有相当于能量为一电子伏的速度下, 在气压为 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也是不可忽视的。

若 $m_1 \approx m_2$, 如离子与气体原子发生弹性碰撞, $\bar{\Delta} \approx \frac{1}{2}$, 粒子间大量交换能量。

B. 非弹性碰撞

假设碰撞后 m_1 粒子的一部分动能转化为 m_2 粒子的内能 W , 根据动能定理与动量守恒定律, 可得

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + W \quad (1.1.8)$$

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1.1.9)$$

将式(1.1.8)代入式(1.1.9),可得

$$W = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_1 u_1^2 - \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{m_1 v_1 - m_1 u_1}{m_2} \right)^2 \quad (1.1.10)$$

上式包含两个变量 u_1 及 W , 从 $dW/du_1 = 0$ 可得最大内能的条件为

$$W_{\max} = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_1 \quad (1.1.11)$$

若 $m_1 \approx m_2$, 则 $W_{\max} = E_1/2$;

若 $m_1 \ll m_2$, 则 $W_{\max} = E_1$ 。

由上述规律可见, 两个质量相近的粒子, 如离子和原子, 发生非弹性碰撞时, 离子最多以其动能的一半转化为原子的内能。而质量小的粒子与质量大的粒子, 如电子和原子, 发生非弹性碰撞时, 电子的绝大部分动能可以转化为原子的内能, 使原子发生激发或电离。这就是气体激光器中利用放电激励能获得很高电光转换效率的原因之一。

(3) 碰撞截面、平均自由程和速率系数

碰撞截面 σ , 平均自由程 $\bar{\lambda}$ 和速率系数 R , 都是用来描述粒子间相互作用次数和概率大小的参量。

A. 碰撞截面

以电子与原子碰撞为例, 我们先分析一种最简单的情况。如果认为原子是一个半径为 a 的“弹性球”, 如图 1.1.1 所示。当运动的电子处于“弹性球”的阴影区域时, 电子与原子将发生碰撞, 可以认为碰撞截面为

$$\sigma = \pi a^2 \quad (1.1.12)$$

σ 称为原子被电子碰撞的截面。实际的气体放电是一个大量电子与大量原子的碰撞过程, 因此要用统计平均方法来描述。我们可以把上述的简单概念扩展到一电子束进入气体中发生大量的碰撞来分析。假设, 电子束是均匀的, 其横截面面积为 A , 电子密度为 n , 电子速度为 v , 则电子束的强度(流量) $\Gamma = nv$; 气体中原子的密度为 N , 而每个原子的碰撞截面为 σ , 如图 1.1.2 所示。当电子束进入气体 dx 距离后, 将有多少电子因碰撞而离开电子束? 显然, 在 dx 距离中, 因碰撞而离开电子束流的电子的百分数应该等于电子束

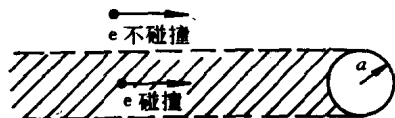


图 1.1.1 碰撞截面概念

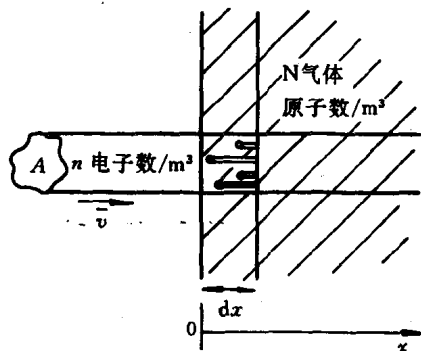


图 1.1.2 电子束在气体中的碰撞

截面中碰撞截面的百分数。即

$$\frac{d\Gamma}{\Gamma} = \frac{dx \text{ 距离中被碰撞的电子数} \times \text{碰撞截面}}{\text{电子束截面}} \quad (1.1.13)$$

$$\frac{d\Gamma}{\Gamma} = - \frac{(NA dx) \times \sigma}{A} = - N \sigma dx$$

求解方程, 电子束强度变化是

$$\Gamma(x) = \Gamma_0 e^{-N\sigma x} \quad (1.1.14)$$

即在 $x=0$ 处有电子束 Γ_0 进入气体, 经过距离 x 之后, 剩下未经碰撞的电子束 (Γx) 随距离增加而按指数下降, 所以碰撞截面 σ 也可解释为电子束能穿过 x 距离而不被碰撞的概率。它代表了大量电子和原子的碰撞概率的统计平均值。

实际粒子间的碰撞不是简单的刚性球的几何接触, 而是相互接近到微小距离时发生的动量、动能或内能的交换。此外, 碰撞粒子中有的带电粒子, 如电子、离子, 因此严格的碰撞截面的计算不仅要考虑粒子的几何尺寸, 而且还要考虑它们的速度(作用时间)、库仑力和粒子的波动性。这时的 σ 值不再是以简单的粒子半径 a 来确定, 而要用量子力学来处理。 σ 的单位是 $[\text{cm}^2]$, 它既有粒子半径概念, 又有相互碰撞概率的概念。

碰撞截面 σ 也可由实验方法测定。碰撞截面在描述气体放电等过程中是非常有用的物理量, 因此许多科学家计算并测定了各种粒子的碰撞截面, 图 1.1.3、图 1.1.4 和图 1.1.5 分别给出了一些惰性气体、分子气体和金属蒸气的弹性碰撞截面 σ_m 与电子能量的关系曲线。

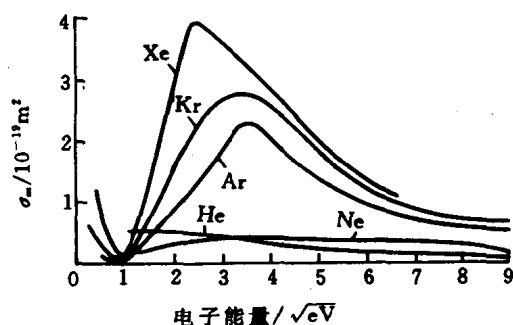


图 1.1.3 惰性气体的弹性碰撞截面

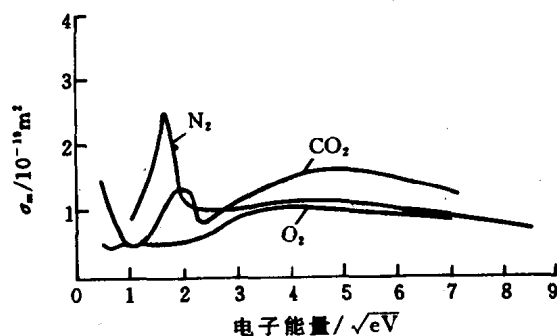


图 1.1.4 分子气体弹性碰撞截面

B. 平均自由程和总碰撞截面

平均自由程 $\bar{\lambda}$ 是指每两次碰撞之间所走路程的平均值。它只能由统计方法求得。由式(1.1.14), 按照求解平均值方法得

$$\bar{\lambda} = \langle x \rangle = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-N\sigma x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-N\sigma x} dx} = \frac{1}{N\sigma} \quad (1.1.15)$$

令 $Q = N\sigma$, 称为总碰撞截面。其物理意义为单位气体体积中所有分子(原子)的碰撞截面之和, 单位为 $[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ 或 $[\text{cm}^{-1}]$ 。由上式得

$$Q = 1/\bar{\lambda} \quad (1.1.16)$$

已知平均自由程 $\bar{\lambda}$ 的倒数为单位长度上的碰撞次数。因此总碰撞截面 Q 等于单位

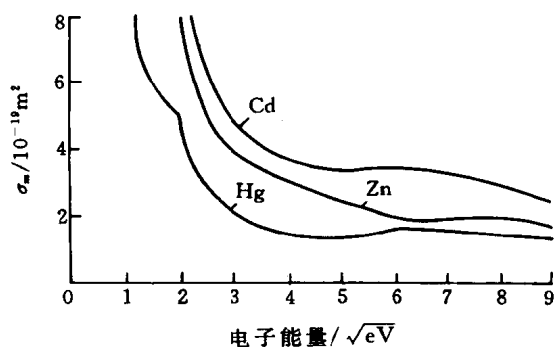


图 1.1.5 金属蒸气弹性碰撞截面

长度的碰撞次数,是平均自由程的倒数,可以用它来衡量粒子间相互作用的碰撞次数和概率。它与气体的压强和温度有关,是一个宏观量。

电子与原子(分子)碰撞可能发生各种弹性碰撞和非弹性碰撞。总碰撞截面为各种碰撞截面,如弹性碰撞截面 Q_m 、激发碰撞截面 Q_e 和电离碰撞截面 Q_i 之和 Q 为

$$Q = Q_m + Q_e + Q_i + \dots \quad (1.1.17)$$

C. 速率系数

表示碰撞概率的另一个基本参量是速率系数 R , 它为单位时间内单位体积发生的碰撞次数。显然:

$$R = \bar{v}\sigma \quad (1.1.18)$$

这里 $\bar{v}$ 表示碰撞粒子间相对速度的平均值。 R 的单位为 $[\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ 。对于非弹性碰撞概率常常用速率系数来加以描述。速率系数类似于描述化学反应的速率常数。例如,粒子密度分别为 n_A, n_B 的两种粒子发生碰撞时,单位时间单位体积内发生的碰撞次数可表示为

$$\frac{dn}{dt} = R n_A n_B \quad (1.1.19)$$

严格一些分析,碰撞截面是相对速度的函数,用 $\sigma(v)$ 来表示。此外,每个粒子的速度都不相等,但可以用一个速度分布函数 $f(v)$ 来表示。因此速率系数的一般表示式应为

$$R = \int_0^\infty v \sigma(v) f(v) dv \quad (1.1.20)$$

大家所熟悉的麦克斯韦速度分布,即在单位体积内,粒子速度在 $v \rightarrow v + dv$ 范围的粒子数为

$$dn_v = 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv \quad (1.1.21)$$

式中 n 为粒子密度, m 为粒子质量, k 为玻耳兹曼常数, T 为粒子温度。粒子速度在 $v \rightarrow v + dv$ 间的概率为

$$\frac{dn_v}{n} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv \quad (1.1.22)$$

令

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \quad (1.1.23)$$