

气体放电物理

徐学基 诸定昌 编著



复旦大学出版社



1718582

气体放电物理

徐学基 诸定昌 编著

复旦大学出版社

气体放电物理

徐学基 诸定昌 编著

出 版 复旦大学出版社

(上海国权路 579 号 邮政编码 200433)

发 行 新华书店上海发行所

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 850×1168 1/32

印 张 12

字 数 345 000

版 次 1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

印 数 1-1 500

书 号 ISBN 7-309-01669-6/O · 165

定 价 15.00 元

本版图书如有印订质量问题, 请向承印厂调换。

内 容 提 要

本书系统地论述了各种气体放电的基本过程、主要特性和相关机理,重点讨论具有应用价值的辉光放电、弧光放电、火花放电、电晕放电和高频微波放电。近年来,随着应用面的拓宽,介质阻挡放电和光学放电的理论也得到了不断的完善,本书中增添了这方面的最新内容。

本书可用作电子离子束物理、真空物理与电光源等专业的本科生教材,也可供相关专业的教师、研究生和科技人员参考。

前 言

气体放电物理是等离子体物理的一个重要组成部分,气体放电现象是电流通过气体以后由电离了的气体表现出来的。研究气体放电的目的是要了解这种电离气体在各种条件下的宏观现象及其规律,同时研究其中所发生的微观基本过程,并进一步把两者联系起来,由表及里地掌握气体放电的机理,用微观过程来分析宏观现象,从复杂的放电现象中寻找规律。可见气体放电物理的主要任务是研究各种气体放电现象的物理过程及其内在规律。

人们对气体放电的研究已有一百多年的历史,目前世界各国有很多人正在从各个方面研究和发展气体放电,在高新技术中应用气体放电给这门学科提供了新的活力。70多年来,气体放电的研究有两个迅速发展的时期。第一个时期是在1930年左右,人们从理论上集中对各种气体放电的性质进行分析和研究,朗缪尔首次提出借用 Plasma(等离子体)这个名词来命名气体放电的主体——正、负带电粒子和中性原子的混合物;第二个迅速发展时期是在1950年以后,当时人们看到利用气体放电等离子体有可能得到廉价的原子弹原料和从海水中提取取之不竭、用之不尽的能源,就着手研究受控热核反应。几十年来,气体放电等离子体研究非常活跃,近代生产和科学技术的发展又大大地促进了各种放电的深入研究,同时,气体放电的研究进展又反过来对生产和科学技术的进一步发展起了巨大的推动作用。尤其是近一、二十年来,在像微电子技术、激光、材料的改性和合成等等高新技术的发展中,气体放电起着相当重要的作用。

在自然界和人们的日常生活中几乎经常会碰到气体放电现象,犹如大气的电离层、太阳风、日冕和闪电等都是自然界里的气体放电现象。气体放电光源(日光灯、高压汞灯、高压钠灯、各种激光器……)、等

离子体切割用的火炬喷枪、等离子体高温炉、磁流体力学发电机、电弧焊炬以及等离子体沉淀和溅射装置等等都是气体放电的实用器件。

迄今人们在实验室和生产实践中或者在模拟自然现象中研究了各种各样的气体放电：汤生放电、辉光放电、弧光放电、火花放电、脉冲放电、电晕放电、高频微波放电以及近几年发展着的介质阻挡放电和光学放电等。当前，对气体放电的研究已经从放电的复杂表面现象深入到它们的内部机理；从放电的光、电、热、磁等宏观特性进入到其中原子、离子、光子和电子之间相互作用的微观基本过程；从定性描述发展到半定量以至定量的了解。但是应该看到，尽管气体放电发展的历史已有一百多年，由于放电的多样性和放电现象的复杂性，对于放电现象的了解基本上还只处于半定量研究阶段，不少现象还有待深入研究。人们希望对各种放电能有定量的了解，况且随着科学技术的进展，新的放电形式不断出现。近年来，随着计算机技术和计算方法的发展，计算机模拟是研究气体放电机理的重要进展。借助计算机不但能模拟繁复的放电现象，并能通过实验验证。利用经过实验验证的机理模型又能预言和发展气体放电的规律，这不仅可以节约大量的实验工作量，有些预言的放电规律甚至还不能由实验证实。总之，气体放电等离子体的研究正在向纵深而广阔的领域扩展。

本书主要从物理方面讨论各种气体放电的基本过程、主要特性和有关的机理。重点是讨论具有应用价值的辉光放电、弧光放电、火花放电、电晕放电和高频微波放电(第四到八章)，由于近些年来，在放电中能有效地生成自由基以及放电在环保方面的应用，对介质阻挡放电的了解有了较大的进展；而且激光等离子体、X 激光器的深入研究也使光学放电增加了新的内容。因此在本书中添加了介质阻挡放电和光学放电的内容(第九、十章)，本书的第一、二章简明扼要地讨论了气体放电的基本过程、基本规律以及等离子体的基本性质，使读者熟悉气体放电必须具备的一些知识和概念。这些是读者能深入放电领域的基础。

本书是徐学基 1979 年来在给复旦大学有关专业本科生讲授《气体放电物理》课程所用的讲义基础上发展起来的，期间朱绍龙、方道腴、王在星、诸定昌等曾先后参与讲授课程，每年都作了改进和总结。王在星

对有关讲义内容做了较多补充。本书最后由徐学基、诸定昌修改并定稿。因此本书是十多年来教学实践的结晶。原先的讲义又经过西安交通大学、东南大学(原南京工学院)等院校有关教师的试用,期间他们还提供了宝贵的意见。成书过程中还得到复旦大学出版社的热情支持,有关同志详细地审阅了全部书稿,并提出了改进意见,作者在此一并表示谢意。

本书涉及内容较为广泛,难免有疏漏和不周之处,恳请读者不吝指正。

作者 一九九五年十月

目 录

前言	1
第一章 气体放电中的基本过程与分类	1
§ 1-1 气体放电中的基本粒子	1
§ 1-2 基本粒子间的相互作用	3
一、相互作用的分类	3
二、碰撞时的能量转移	4
三、碰撞的特征参量	6
四、电子、离子与原子间的弹性碰撞	7
五、气体原子的激发和电离	9
六、气体原子的激发转移和消电离	16
§ 1-3 带电粒子在气体中的运动	22
一、带电粒子的热运动	22
二、带电粒子的扩散运动	23
三、带电粒子的漂移运动	31
四、带电粒子的双极性扩散运动	43
§ 1-4 气体放电的分类	46
第二章 气体放电等离子体的基本性质	50
§ 2-1 气体放电等离子体的基本概念	50
一、等离子体状态的分析	50
二、等离子体的基本参量	53
三、等离子体的基本长度	55
§ 2-2 电中性和德拜屏蔽	57
§ 2-3 等离子体鞘层	61
§ 2-4 等离子体振荡	68
一、电子振荡	68
二、离子振荡和波	70
§ 2-5 等离子体判据	73

§ 2-6 气体放电的相似性原理	75
一、研究相似性原理的目的	75
二、相似性放电	76
三、相似性定律与放电基本过程的关系	80
第三章 汤生放电	87
§ 3-1 汤生放电理论	87
§ 3-2 汤生系数 α 和 γ	94
一、汤生第一电离系数 α	94
二、汤生第三电离系数 γ	101
§ 3-3 气体的击穿——帕邢定律	105
一、帕邢定律	105
二、杂质气体对击穿电位的影响	108
三、电极对击穿电位的影响	115
四、电场分布对击穿电位的影响	116
五、外界电离源对击穿电位的影响	117
§ 3-4 罗果夫斯基空间电荷理论	117
第四章 辉光放电	121
§ 4-1 辉光放电的一般性质	121
§ 4-2 辉光放电阴极区的基本规律	126
一、阴极区的性质	126
二、阴极区主要参量的计算	129
三、阴极的溅射	134
§ 4-3 辉光放电的正柱理论	135
一、正柱中带电粒子密度的径向分布	137
二、电子温度 T_e 与 PR 的关系	139
三、正柱中纵向电场的计算	142
四、正柱中径向电位的计算	143
五、正柱中谱线辐射强度的计算	145
§ 4-4 辉光放电的阳极位降	148
一、阳极位降的分布	149
二、阳极位降区域内离子的生成速率	150

三、阳极区域的伏-安特性	151
§ 4-5 空心阴极放电	153
一、空心阴极放电的产生和主要特征	153
二、空心阴极放电的电流密度	156
第五章 弧光放电	159
§ 5-1 弧光放电的一般性质	159
一、弧光的定义和分析	159
二、辉光向弧光的过渡	163
三、弧光的分类	166
四、弧光的阴极效应	166
五、弧光的阳极特性	171
六、弧光正柱等离子体的热平衡	173
§ 5-2 低气压弧光放电及其分析	179
§ 5-3 高气压弧光放电及其分析	193
一、高气压弧光正柱的特性	193
二、高气压弧光正柱中的温度、电位梯度和发光效率	198
第六章 火花放电	212
§ 6-1 火花放电的一般景象和类型	212
§ 6-2 汤生放电机理的局限性	216
§ 6-3 火花放电的流光理论	217
一、流光的形成	217
二、电子雪崩的空间电荷场	222
三、雪崩的临界尺寸	228
四、流光的形成机理	230
五、火花放电的击穿形成时间滞后	233
六、汤生击穿和流光击穿之间的过渡	240
第七章 电晕放电	243
§ 7-1 电晕放电现象和阈值判据	243
一、电晕放电现象	243
二、电晕放电的阈值判据	245

§ 7-2 电晕放电机理	248
一、正电晕	248
二、负电晕	254
§ 7-3 连续电晕放电的伏-安特性	261
第八章 高频和微波放电	268
§ 8-1 高频放电的一般分析	268
§ 8-2 E型放电的击穿机理	270
一、高频电场的特征	270
二、迁移控制的击穿机理	273
三、扩散控制的击穿机理	280
四、电子吸附控制的击穿机理	290
五、次级电子的共振击穿机理	292
六、高频E型放电击穿机理的总结	296
§ 8-3 H型放电的特性和击穿分析	298
一、H型放电的分析	298
二、H型放电击穿的汤普逊理论	300
三、环状放电的起弧	306
四、无极放电的频率变化特性	307
第九章 介质阻挡放电	309
§ 9-1 介质阻挡放电的一般性质	309
§ 9-2 介质阻挡放电的主要参量	312
§ 9-3 介质阻挡放电的物理过程	323
第十章 光学放电	336
§ 10-1 光学放电的一般性质	336
§ 10-2 气体击穿的多光子吸收模型	339
§ 10-3 气体击穿的串级电离模型	345
§ 10-4 光学放电气体击穿机理的评价	360
参考文献	363
习题	365

第一章 气体放电中的基本过程与分类

通过某种机制使一个或几个电子从气体原子或分子脱离而形成的气体媒质称为电离气体。电离气体中含有电子、离子和中性原子或分子。如果电离气体由外电场产生并形成传导电流,这种现象称之为气体放电。

电离气体按电离程度可分为弱电离气体(只有很少的原子或分子被电离)、部分电离气体(部分原子或分子被电离)和完全电离气体(几乎所有的原子或分子被电离)三种。弱电离气体主要由中性粒子组成,它与完全电离气体在基本机理和行为方面的区别很大。

在研究和分析气体放电时,重要的是要了解和分析气体放电中所涉及的大量粒子和它们的状态。气体放电实际上是一个复杂的粒子运动体系,所以首先要讨论气体放电中的粒子以及各种粒子间的相互作用。

§ 1-1 气体放电中的基本粒子

气体放电过程中一般存在着六种基本粒子:光子、电子、基态原子(或分子)、激发态原子(或分子)以及正离子和负离子。

光子的能量决定于它的频率 ν , 其能量表示为: $\epsilon_\nu = h\nu$, h 是普朗克常数。自由电子的能量由它的运动速度 v_e 决定: $\epsilon_e = \frac{1}{2}mv_e^2$, m 是电子的质量。

从原子和分子的内部结构来分析,根据量子力学原理,它们可以处于大量能态中的任一个能态,这些能态可按能量的大小排列成能级图。

原子的能级图是由原子内部所有的粒子共同决定的,但我们感兴趣的只是原子最外层的电子即价电子的能量,因为气体放电过程,主要是由这些电子参加的。原子通常处于稳定的能级,称为基态;当价电子从外界获得额外的能量时,它可以跳跃到更高的能级,我们就说原子处于激发态。电子停留在激发能级上的时间很短(约 10^{-8} s),然后就跃迁回到基态或另一个较低的激发能级,并以光子的形式辐射出激发时获得的额外能量。也有一些能级(亚稳能级)的寿命比较长,具有这种能级的原子(亚稳态原子),如果不与别的粒子或管壁碰撞,电子就不能从该能级跃迁。当电子获得的能量超过电离能时,电子就与原子完全脱离而成为自由电子,原子则变成正离子。原子的不同能级上有着不同的电子排列,相同能级上电子各种可能的排列数目,叫做该能级的简并度或统计权重。

分子一般是由几个原子组成的,由于这些原子之间的相互影响,分子能级比原子能级复杂,气体分子的激发和电离也与气体原子的激发和电离不同。分子的内能除电子能量外,还有振动能和转动能,这些能级也都是分立的。分子能级的标记相当复杂,但仍可用能级图表示。分子能级的简并度的定义类似于原子的相应定义。

原子或分子的正离子的能态也可用能级图来表示,正离子一次电离的原子的电离能相应于原子产生二次电离所需的能量。

负离子是电子附着到某些原子或分子(特别是那些外电子壳层几乎填满的原子或分子)上而形成的。负离子的能量等于原子或分子的基态能量加上电子亲和能。

气体放电中的中性粒子,是原子或分子。原子可以是惰性气体原子或金属蒸气原子,分子可以是比较简单的双原子分子,也可以是相当复杂的多原子分子。气压的范围可以很大,从零点几帕到几十万帕,相应粒子密度的变化范围达 10^8 数量级。

气体放电中的带电粒子是电子和各种离子。典型的气体放电的电子密度是 10^{16} — $10^{20}/\text{m}^3$ 。气体放电中的正离子和负离子与原来的中性粒子不同(特别是当气体是气体分子时),例如在 N_2 和 O_2 (空气)中的放电会产生大量的离子,其中包括 N^+ , N_2^+ , O^+ , O_2^+ , NO^- , O_2^- , NO_2^- 和

O_3^- 等等。每一种离子都将影响气体放电的电特性,不过电子的作用通常占主导地位。

中性粒子和带电粒子对气体放电的电特性是至关重要的,但是激发的中性粒子和可能的激发离子对于激光、光源和其他发生量子效应的器件,显然也是非常重要的。光子的吸收可引起光激发、光电离和受激发射,光子的发射和吸收对气体放电的分析同样也是十分重要的。

§ 1-2 基本粒子间的相互作用

气体放电中任何一个粒子会通过碰撞过程与其他各种粒子产生相互作用。粒子之间通过碰撞交换动量、动能、位能和电荷,使粒子发生电离、复合、光子发射和吸收等物理过程。粒子间相互作用的过程相当复杂,但可以用相应的碰撞特征参量(如截面、几率等)来表征。这里仅简要介绍放电中粒子间相互作用的种类以及它们的有关特征参量。

一、相互作用的分类

粒子间的碰撞是指它们在各种力场下的相互作用。这里不必像刚体球那样一定要发生它们之间的直接碰撞才称为碰撞。只要粒子受其他粒子影响后,它的物理状态发生了变化,就可以认为这些粒子间发生了碰撞。所以碰撞就是使放电中粒子体系的状态发生变化。例如,粒子的运动状态发生了变化(粒子间交换了动量和动能造成了粒子的扩散和漂移),粒子的位能发生了变化(原子被激发和电离),以及粒子的极性发生了变化(电子的捕获和复合)等。

根据粒子状态的变化,可以把粒子发生的碰撞分成弹性碰撞和非弹性碰撞两大类。

在弹性碰撞中,参与碰撞的粒子其位能不发生变化。如电子和原子之间发生弹性碰撞时,电子只把自己的部分动能交给原子,使两者的运动速度和方向发生变化,而原子不被激发或电离。这类碰撞主要发生在低能粒子间的碰撞中。

在非弹性碰撞中,参与碰撞的粒子间发生了位能的变化。例如,具有足够动能的电子与原子碰撞,原子得到电子交出的动能,而被激发或电离,即原子的位能得到了增加。通常把这种导致粒子体系位能增加的碰撞称为第一类非弹性碰撞。原子与原子、离子与原子、离子与离子之间都可以发生这类非弹性碰撞过程。

具有一定位能的粒子通过碰撞也可以交出自己的位能,同时使被碰粒子的动能得到增加。例如被激发到亚稳态的原子与电子之间的碰撞,通过这种碰撞,原子回到了基态,原子的激发能转成了电子的动能。通常把导致粒子体系位能减少的碰撞称为第二类非弹性碰撞,或称为超弹性碰撞。

光是一种电磁辐射,它的量子性称之为光子。光的发射被吸收可以认为是光子与原子或离子等粒子之间的相互作用,或者是它们之间发生了碰撞。这种碰撞也有人称之为辐射碰撞。

二、碰撞时的能量转移

为了直观地了解碰撞时的能量转移,这里从经典的角度来讨论两粒子体系的碰撞。为使问题简化,设一速度为 v_1 、质量为 m_1 的粒子与另一静止的、质量为 m_2 的粒子发生碰撞。碰撞后,两粒子的速度分别为 u_1 和 u_2 ,它们与原来速度 v_1 方向的夹角分别为 φ 和 θ 。

由能量和动量守恒定律得

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 + Q' \quad (1-1)$$

$$m_1v_1 = m_1u_1\cos\varphi + m_2u_2\cos\theta \quad (1-2)$$

$$0 = m_1u_1\sin\varphi + m_2u_2\sin\theta \quad (1-3)$$

式中 Q' 为碰撞后粒子总位能的增加。由上式消去 u_1 和 φ , 可得

$$\frac{1}{2}m_2\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)u_2^2 - m_2v_1u_2\cos\theta + Q' = 0 \quad (1-4)$$

1. 弹性碰撞时的能量转移

此时, $Q' = 0$, 由(1-4)式可得

$$u_2 = 2v_1\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right)\cos\theta \quad (1-5)$$

粒子 1 交给粒子 2 的动能为

$$\frac{1}{2}m_2u_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2\delta(\theta) \quad (1-6)$$

式中 $\delta(\theta)$ 为粒子 1 与粒子 2 碰撞时的动能损失百分比

$$\delta(\theta) = \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2}\cos^2\theta \quad (1-7)$$

从统计的角度,重要的是需要知道平均能量损失率。设 $\rho(\theta)$ 为粒子 2 在碰撞后进入 θ 到 $\theta+d\theta$ 范围内的几率,可求得

$$\rho(\theta) = \sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta \quad (1-8)$$

于是,平均能量损失率为

$$\bar{\delta}(\theta) = \int_0^{\pi/2} \frac{8m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2}\sin\theta\cos^3\theta d\theta = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1-9)$$

由上式可见,当弹性碰撞发生在电子和重粒子(原子或离子)之间时, $\bar{\delta} \approx 2 \frac{m_1}{m_2} \ll 1$,即电子只给出很少一部分能量。

2. 非弹性碰撞时的能量转移

对于非弹性碰撞, $Q' \neq 0$,由(1-4)式求得

$$u_2 = \frac{1}{2(1 + m_2/m_1)} \left[2v_1\cos\theta \pm \sqrt{4v_1^2\cos^2\theta - \frac{8Q'}{m_2}(1 + m_2/m_1)} \right] \quad (1-10)$$

为使上式有意义,必须有

$$Q' \leq \frac{m_1m_2v_1^2}{2(m_1 + m_2)}\cos^2\theta \quad (1-11)$$

于是,内能的最大值

$$Q'_{\max} = \frac{m_1m_2}{2(m_1 + m_2)}v_1^2 \quad (1-12)$$

当非弹性碰撞发生在电子和重粒子之间时, $m_1 \ll m_2$,由上式可知 $Q'_{\max} \approx \frac{1}{2}m_1v_1^2$,即电子可以交出全部动能,变为重粒子的位能,即电子在激发或电离重粒子时,具有很高的效率。而当非弹性碰撞发生在重粒子之间,即 $m_1 \approx m_2$ 时,由(1-12)式可得 $Q'_{\max} \approx \frac{1}{4}m_1v_1^2$,即重粒子最大可交

出动能的一半来激发或电离其他重粒子,其效率要比电子的低得多。

三、碰撞的特征参量

1. 碰撞截面

对于两个刚体球之间的碰撞,当它们两者之间的距离小于、等于它们的半径之和 $r_1 + r_2$ 时将发生碰撞。考虑到各个方向的运动,通常用截面积 $\pi(r_1 + r_2)^2$ 来表示它们发生碰撞的可能性,简称碰撞截面。对于带电粒子,由于相互之间有库仑力的存在,它们的相互作用范围要远大于两个粒子的半径线度。但在气体放电中,仍经常采用经典的粒子碰撞模型来描述,因其具有直观、方便的长处。为此,这里引进有效碰撞截面的概念。

当一束密度为 n 的单能电子以速度 v 通过某气体时,电子与气体粒子发生碰撞。碰撞的结果使被撞的电子改变动量,并使它偏离电子束。于是在 x 到 $x + dx$ 距离内在单位时间与单位面积上受到碰撞的电子数为

$$\frac{dn}{dt} = -N[\pi(r_1 + r_2)^2]n \frac{dx}{dt} \quad (1-13)$$

式中 N 是气体粒子的密度, r_1 与 r_2 分别是电子与气体粒子的半径。对上式积分有

$$n = n_0 \exp[-N\pi(r_1 + r_2)^2 x] \quad (1-14)$$

n_0 是在 $x = 0$ 处的电子密度, $\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$ 就是这种过程的有效碰撞截面。

从(1-14)可见电子密度会由于碰撞而衰减。在 x 处的电子密度为

$$n = n_0 \exp(-N\sigma x) \quad (1-15)$$

实验可以测量不同距离 x 处的电子流

$$i = i_0 \exp(-\alpha x) = i_0 \exp(-N\sigma x) \quad (1-16)$$

式中 α 是气体对电子的吸收系数。由(1-16)可测定有效碰撞截面 σ 。

实验发现, σ 与电子速度和气体种类有关。对于各种碰撞过程,可以用不同的有效碰撞截面去描写,如有弹性碰撞截面、激发碰撞截面、电离碰撞截面等。 σ 的单位为 \AA^2 (即 10^{-16}cm^2),但也常用 $\pi a_0^2 = 0.88 \text{\AA}^2$