

高等学校试用教材

气体导电 上册

GASEOUS CONDUCTION

高树香 陈宗柱 编

南京工学院出版社

气 体 导 电

上 册

高树香 陈宗柱 编

南京工学院出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了气体导电的基本原理，全书共十二章。上册七章，内容主要包括粒子间碰撞的基本规律、气体粒子的激发与电离、带电粒子在气体中的运动行为、带电粒子的转化和消失、汤生导电理论、流光击穿理论及几种特定条件下的击穿机制。

下册五章，内容主要包括辉光放电、弧光放电、电晕放电、高频放电、脉冲放电、外电极放电、等离子体物理基础与诊断及气体导电应用综述。书末附有思考题与习题以及必要的附录。

本书可用作激光、电光源、电子物理与器件、真空技术等专业本科生的教材，也适用于上述有关专业的教师、研究生、科研和工程技术人员参考。

气 体 导 电

上 册

高树香 陈宗柱 编

南京工学院出版社出版

南京市四牌楼2号

江苏省新华书店发行 江苏省高淳印刷厂印刷
开本787×1092毫米 1/32 印张10.0625 字数226千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7—81023—037—9

TN·4 定价：1.70 元

责任编辑：张世杰

前 言

气体导电是物理电子学的一个分支，它是一门主要研究电流通过气体时的现象与规律的学科，其内容丰富，应用也极为广泛。

气体导电研究的内容大致可分为五个方面：

1. 气体导电的基本过程。
2. 气体的击穿。
3. 气体导电的各种形式。
4. 等离子体。
5. 气体导电的应用。

本书是编者在讲授“气体放电”、“气体电子学”课程的讲义基础上加以整理，充实而成。

早在五十年代，南京工学院就开始了气体导电方面的教学与科研工作，二十多年来编者一直从事这方面的工作，积累有一定的经验。

本书共十二章，分上、下册。上册七章，内容为气体导电的基本过程和气体击穿。高树香编写第三、第五、第六、第七章，陈宗柱编写第一、第二、第四章。下册五章，内容为气体导电的各种形式、等离子体及气体导电的应用。陈宗柱编写第九、第十、第十二章，高树香编写第八、第十一章。

本书主审人为南京工学院魏先任教授，他对本书进行了认真细致的审阅与修改，并提出了许多宝贵的意见和建议，谨

此致以谢忱。

由于编者水平有限，书中难免有不妥与错误之处，恳请读者不吝指正。

编者于南京工学院

1986.3

目 录 (上册)

第一章 粒子间碰撞的基本规律

- § 1.1 弹性碰撞与非弹性碰撞 (1)
 - 1.1.1 球体的对心碰撞 (2)
 - 1.1.2 球体的非对心碰撞 (4)
- § 1.2 碰撞截面 (8)
- § 1.3 微分碰撞截面 (14)
- § 1.4 碰撞截面的实验研究举例 (19)
 - 1.4.1 粒子碰撞总截面的实验测量 (19)
 - 1.4.2 电离碰撞截面的实验测量 (21)
- § 1.5 碰撞截面与速率系数 (24)

第二章 气体粒子的激发与电离

- § 2.1 原子及分子的量子态 (29)
 - 2.1.1 原子的量子态 (30)
 - 2.1.2 分子的量子态 (34)
- § 2.2 电子碰撞气体粒子引起的激发与电离 (38)
- § 2.3 激发几率与电离几率 (56)
- § 2.4 正离子碰撞气体粒子引起的激发与电离 (64)
- § 2.5 激发原子碰撞气体粒子引起的激发与电离 (63)
 - 2.5.1 共振转移 (69)
 - 2.5.2 潘宁电离 (72)
- § 2.6 热电离与热激发 (74)

§ 2.7	光致激发与光致电离	(82)
§ 2.8	放射性射线引起的激发、电离与剩余电离...	(88)
2.8.1	放射性射线引起的激发和电离	(88)
2.8.2	剩余电离	(90)

第三章 带电粒子在气体中的运动

§ 3.1	带电粒子在气体中的热运动	(91)
3.1.1	平均能量与速度分布	(92)
3.1.2	粒子自由程分布律	(94)
3.1.3	杂乱电流密度	(97)
§ 3.2	带电粒子在气体中的漂移运动	(98)
3.2.1	漂移运动的特征	(98)
3.2.2	离子漂移率	(100)
3.2.3	电子漂移率	(109)
3.2.4	漂移率的实验测量	(115)
§ 3.3	带电粒子的扩散运动	(119)
3.3.1	扩散运动的基本规律	(119)
3.3.2	漂移率与扩散系数之间的关系	(127)
3.3.3	带电粒子浓度的玻尔兹曼分布	(129)
§ 3.4	双极性扩散运动	(130)

第四章 带电粒子的转化和消失

§ 4.1	负离子的形成和破坏	(136)
§ 4.2	电荷转移	(145)
§ 4.3	复合的种类及复合系数	(150)
§ 4.4	电子与正离子的空间复合	(153)
4.4.1	两体复合	(153)
4.4.2	三体复合	(155)
§ 4.5	正负离子空间复合	(157)

4.5.1	两体复合	(158)
4.5.2	三体复合	(158)
§ 4.6	复合引起带电粒子浓度的衰减	(162)
第五章 气体击穿——汤生理论		
§ 5.1	气体导电的特征与发展过程	(168)
§ 5.2	汤生放电理论	(170)
5.2.1	汤生电离系数	(170)
5.2.2	电子雪崩	(171)
5.2.3	气体击穿	(174)
§ 5.3	汤生第一电离系数	(178)
§ 5.4	汤生第三电离系数	(186)
5.4.1	金属表面势垒	(186)
5.4.2	二次电子发射	(188)
5.4.3	γ 系数的实验曲线	(191)
§ 5.5	气体击穿——罗果夫斯基理论	(194)
5.5.1	空间电荷对放电的影响	(194)
5.5.2	自持放电的稳定过程	(197)
§ 5.6	巴那定律	(199)
§ 5.7	击穿电压的影响因素	(206)
§ 5.8	气体导电的伏安特性	(208)
§ 5.9	气体放电的相似定律	(212)
5.9.1	相似放电中各种参量之间的关系	(218)
5.9.2	相似放电中基本过程之间的关系	(218)
第六章 气体击穿——流光理论		
§ 6.1	火花放电中的现象	(223)
§ 6.2	汤生放电理论的局限性	(225)
§ 6.3	流光理论的定性说明	(226)

§ 6.4	雷特和米克判据	(231)
6.4.1	雷特判据	(231)
6.4.2	米克判据	(235)
§ 6.5	流光击穿理论公式	(240)
§ 6.6	流光形成的几率	(245)
§ 6.7	汤生击穿与流光击穿之间的过渡	(248)
§ 6.8	气体击穿时滞	(252)
第七章 几种特定条件下的气体击穿		
§ 7.1	混合气体击穿	(258)
7.1.1	混合气体放电中的电现象	(259)
7.1.2	潘宁气体击穿	(268)
§ 7.2	毛细管中的气体击穿	(280)
7.2.1	毛细管中放电现象	(280)
7.2.2	毛细管中击穿过程的物理图象	(283)
§ 7.3	激光引起的气体击穿	(287)
7.3.1	概述	(287)
7.3.2	多光子电离	(288)
7.3.3	级联电离	(290)
7.3.4	激光击穿实验	(295)
7.3.5	激光触发的火花间隙	(298)
上册习题和思考题		(300)
附录一 常用物理常数		(307)
附录二 常用单位换算表		(308)
参考文献		(309)

第一章 粒子间碰撞的基本规律

导电气体中存在电子、正离子、气体原子或气体分子等粒子。所谓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。气体中粒子间经常不断地发生着碰撞,粒子间的碰撞,特别是电子和原子的碰撞,是产生电离与激发的外因。要发生激发、电离、转荷、复合等基本过程,都离不开粒子间的碰撞。近代粒子碰撞现象方面的研究工作与气体激光器、受控热核反应以及气体动力学、大气物理学、天文物理学等领域的发展有关。

本章将讨论弹性碰撞与非弹性碰撞、碰撞截面的理论与实验研究以及碰撞截面与速率系数的关系等内容。这些内容的学习,对于研究气体导电十分重要。

§1.1 弹性碰撞与非弹性碰撞

我们可以将碰撞分成弹性碰撞(或弹性散射)和非弹性碰撞(或非弹性散射)两大类。发生弹性碰撞时,碰撞粒子间遵守动量和动能守恒定律,碰撞粒子之间只有动量和动能的交换而无内能的变化。一般情况下,气体原子之间的碰撞大多数是弹性碰撞。发生非弹性碰撞时,碰撞粒子之间遵守动量和能量守恒定律,碰撞粒子间既交换动能也交换内能,即碰撞前后,粒子的结构或量子态发生变化。例如,快速电子与中性原子碰撞,有可能使电子的动能转化成中性原子的内能,

并使中性原子中的一个价电子脱离原子核的作用而变成一个自由电子和一个正离子。实际上,导电气体中电子、正离子、气体原子间的大量相互碰撞中既有弹性碰撞也有非弹性碰撞。对我们来说,最关心的是了解粒子碰撞前后能量交换的关系。为此我们首先讨论球体的对心碰撞,因为这种碰撞最简单、最直观,但所得分析结果却能说明一些问题。

1.1.1 球体的对心碰撞

一、弹性碰撞

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

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

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1-2)$$

式(1-1)和(1-2)的解

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

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

由此得第一粒子传递给第二粒子的动能为

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{1}{2} m_2 u_2^2 = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \times \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \\ &= \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1 \end{aligned} \quad (1-5)$$

从上式看出：

若 $m_1 \approx m_2$ ，则 $E_2 \approx E_1$ ；

若 $m_1 \ll m_2$ ，则 $E_2 \approx 4 \frac{m_1}{m_2} E_1 \ll E_1$ ，

即

(1) 两个质量相近的粒子(如电子与电子或正离子与气体原子)发生弹性碰撞时，大量交换能量；

(2) 质量小的粒子与质量大的粒子(如电子与气体原子)发生弹性碰撞时，质量小的粒子(如电子)的能量损失就非常少。

二、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 ，根据能量与动量守恒定律，可得

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + W \quad (1-6)$$

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-6)可得

$$W = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_1 u_1^2 - \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{m_1 v_1 - m_1 u_1}{m_2} \right)^2 \quad (1-8)$$

上式包含两个变量 u_1 及 W ，从 $\frac{dW}{du_1} = 0$ 可得

$$W_{\max} = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_1 \quad (1-9)$$

若 $m_1 \approx m_2$, 则 $W_{\max} = \frac{1}{2}E_1$

若 $m_1 \ll m_2$, 则 $W_{\max} = E_1$

即

(1) 两个质量相近的粒子(如正离子和原子)发生非弹性碰撞时, 第一粒子(正离子)最多以其动能的一半转化为第二粒子(原子)的内能。

(2) 质量小的粒子与质量大的粒子(如电子与原子)发生非弹性碰撞, 质量小的粒子(电子)的绝大部分动能可以转化为质量大的粒子(原子)的内能, 并使质量大的粒子产生激发或电离。

在球体的相互碰撞中, 大多数情况下发生的是非对心碰撞, 而对心碰撞只是相互碰撞中的一个特例。下面我们讨论球体的非对心碰撞。

1.1.2 球体的非对心碰撞

假设两个表面光滑的弹性球, 其质量分别为 m_1 及 m_2 , 碰撞前速度分别为 v_1 与 0, 碰撞后速度分别为 u_1 与 u_2 , 如图 1-1 所示。取坐标系统的 Z 轴与 v_1 方向平行, θ 表示入射角(它是两球体连心线与 v_1 之间的夹角, 若 $\theta = 0$, 即为对心碰撞), ψ 表示散射角(它是速度 u_1 的方向与碰撞前速度 v_1 方向之间的夹角), 碰撞后球体 m_2 沿连心线运动。在 XY 平面上与 X 轴的夹角为 φ 。在这个例子中, 散射角的分布与角 φ 无关。另外设两个球体接触时, 球心间的距离为 D 。

在弹性碰撞情况下, 根据动能及动量守恒定律, 可得

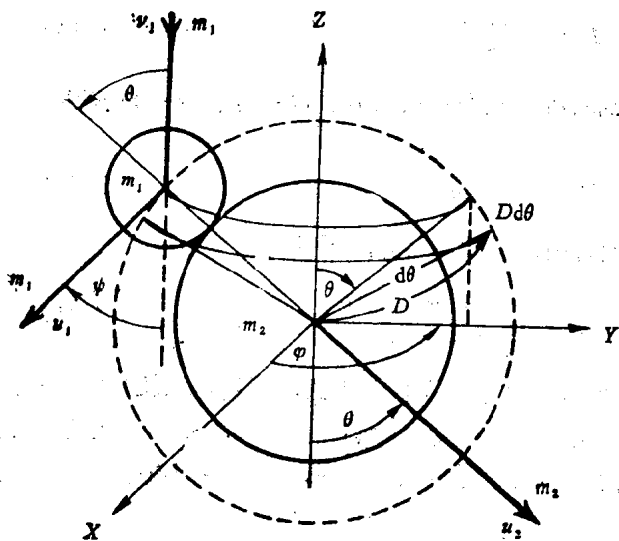


图1.1 弹性球之间的非对心碰撞

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (1-10)$$

$$m_1 v_1 \cos \theta = m_1 u_1 \cos \psi + m_2 u_2 \cos \theta \quad (1-11)$$

$$0 = m_1 u_1 \sin \psi - m_2 u_2 \sin \theta \quad (1-12)$$

碰撞后，球体 m_1 的动能将减少，而且能量损失率 f 还和入射角 θ 有关：

$$f(\theta) = \frac{v_1^2 - u_1^2}{v_1^2} \quad (1-13)$$

根据动能守恒定律，上式可写成

$$f(\theta) = \frac{m_2 u_2^2}{m_1 v_1^2} \quad (1-14)$$

上式中的 u_2 值可从方程(1-10)、(1-11)、(1-12)解得

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1 \cos\theta}{m_1 + m_2} \quad (1-15)$$

将所得的 u_2 值代入式(1-14), 可得

$$f(\theta) = \frac{4m_1 m_2 \cos^2\theta}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1-16)$$

若将 $\theta = 0$ (即对心碰撞) 代入上式, 所得结果就是式(1-5)。实际上, 两球体相碰发生对心碰撞的几率很小, 从统计的角度来了解球体相碰的能量损失率, 就需要知道平均能量损失率。

设 $P(\theta)d\theta$ 表示入射角在 θ 到 $\theta + d\theta$ 范围内球体碰撞的几率。根据我们对入射角的定义, θ 值的范围只能在 0 到 $\frac{\pi}{2}$ 。在半径为 D 的球面上入射角 θ 到 $\theta + d\theta$ 范围所占的面积为 $(2\pi D \sin\theta)(Dd\theta)$, 这个面积在 XY 平面上的投影则是 $(2\pi D \sin\theta)(Dd\theta)\cos\theta = 2\pi D^2 \sin\theta \cos\theta d\theta$ 。对于一切可能入射角的碰撞, 其所占面积在 XY 平面上的投影是 πD^2 , 因此

$$P(\theta)d\theta = \begin{cases} \frac{2\pi D^2 \sin\theta \cos\theta d\theta}{\pi D^2} = \sin 2\theta d\theta & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \\ 0 & (\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (1-17)$$

根据平均值计算公式, 对于一切可能的入射角可得

$$\bar{f} = \overline{f(\theta)} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) f(\theta) d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) d\theta} \quad (1-18)$$

将式(1-16)、(1-17)代入上式得

$$\bar{f} = \frac{2m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (1-19)$$

若 $m_1 = m_2$, 则 $\bar{f} = \frac{1}{2}$;

若 $m_1 \ll m_2$, 则 $\bar{f} = \frac{2m_1}{m_2}$ 。

由式(1-19)和式(1-5)所算出的平均能量损失率相比较,前者仅为后者的一半,其原因是前者包括了各种不同的入射角碰撞,后者只考虑对心碰撞。但这两种计算方法用于计算电子、原子、正离子之间的碰撞,都是十分近似的。因为他们都没有考虑粒子的波动性以及粒子相互靠近时所出现的作用力(例如分子间的范德瓦耳力,带电粒子使中性分子极化,从而产生带电粒子与偶极子之间的吸引力,带电粒子相互间作用的库仑力等)。但是我们可以利用式(1-19)或式(1-5)初浅地分析粒子碰撞前后能量交换的关系。如电子与氢原子发生碰撞,利用式(1-19)可以算出 $\bar{f} = 2.73 \times 10^{-4}$ 。可见电子与原子发生弹性碰撞时,电子损失能量只有自身能量的万分之几。而离子与原子发生弹性碰撞时,离子可能损失自身能量的一半以上,这一能量损失率是很大的。

在非对心碰撞情况下,由于分析非弹性碰撞的数学表达式比较复杂,我们常将 $\theta = 0$ (即对心碰撞)的条件加入,最

后得出的结果与式(1-9)相同。这里就不再讨论。

研究粒子碰撞的另外一个问题就是粒子受到碰撞以后在空间的角分布。下面分两种情况介绍数学分析所得的结果。

(1)当 $m_1 = m_2$ 时, 即质量相同的两个粒子弹性碰撞后, 各自运动方向之间的夹角为直角($\theta + \psi = \frac{\pi}{2}$), 散射角全部处于 0 到 $\frac{\pi}{2}$ 范围内, 也就是说没有一个粒子向后散射, 并且当散射角 $\psi = \frac{\pi}{4}$ 时, 散射几率为最大。

(2)当 $m_1 \ll m_2$ 时, 即质量小的粒子与质量大的粒子弹性碰撞后, 各自运动方向之间的关系为 $\theta + \frac{\psi}{2} \approx \frac{\pi}{2}$, 散射角全部处于 0 到 π 范围内, 也就是说粒子会向后散射, 并且当散射角 $\psi = \frac{\pi}{2}$ 时, 散射几率为最大。

§1.2 碰撞截面

在§1.1中, 我们用理想弹性球的经典碰撞来讨论两个球体发生碰撞后能量交换的关系并介绍粒子受到碰撞后在空间的角分布。为了进一步分析碰撞问题, 在这一节里我们从宏观的角度引入碰撞截面(也称散射截面)这一概念。它不但包含有粒子半径这一旧概念, 而且还包含有粒子相互发生作用的几率这一新概念。

假设一个粒子(如电子)在一群静止而又不规则分布的小球体(如原子)中间运动, 粒子可能和这些小球发生碰撞。运动的粒子和任一小球的碰撞完全是偶然的, 但是粒子经过距