

高等学校试用教材

气体导电 下册

GASEOUS CONDUCTION

陈宗柱 高树香 编

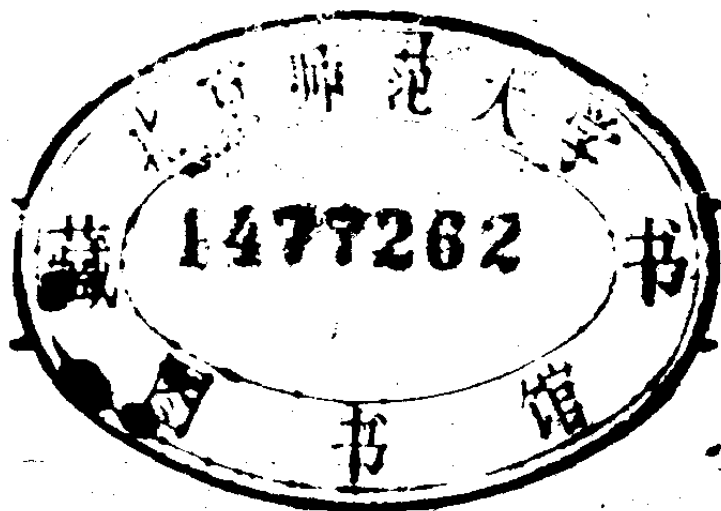
南京工学院出版社

气体导电

下册

陈宗柱 高树香 编

11/24/1105



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。上册含七章，主要讨论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。

下册含五章，主要讨论辉光放电、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。

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

下 册

陈宗柱 高树香 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7.625 字数171千字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7—81023—077—8

TN·4

定价：1.30元

责任编辑 张世杰

责任校对 陈东方

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，充实而成的。

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 (下册)

第八章 辉光放电

- § 8.1 辉光放电的基本特征 (1)
- § 8.2 辉光放电的组成区域 (2)
 - 8.2.1 阴极区 (2)
 - 8.2.2 过渡区 (4)
 - 8.2.3 正柱区 (5)
 - 8.2.4 阳极区 (11)
- § 8.3 阴极位降区的理论分析 (14)
- § 8.4 几种非正常辉光放电 (25)
 - 8.4.1 准辉光放电 (25)
 - 8.4.2 反常辉光放电 (25)
 - 8.4.3 困难放电 (26)
 - 8.4.4 高气压辉光放电 (26)
- § 8.5 空心阴极辉光放电 (27)
 - 8.5.1 空心阴极的放电现象 (27)
 - 8.5.2 空心阴极放电机理 (29)
 - 8.5.3 空心阴极放电管 (31)
 - 8.5.4 空心阴极放电产生的条件与放电的主要特性 (32)
- § 8.6 阴极的溅射现象 (34)
- § 8.7 正柱区理论 (38)
 - 8.7.1 带电粒子浓度的径向分布 (39)
 - 8.7.2 电子温度 (44)

- 8.7.3 轴向电场强度 (61)
- 8.7.4 放电电流对电子温度和电场强度的影响 (64)
- 8.7.5 径向电场分布 (67)

第九章 弧光放电

- § 9.1 弧光放电特征及类型 (71)
- § 9.2 弧光放电阴极电子发射机理 (75)
 - 9.2.1 热电子电弧 (75)
 - 9.2.2 冷阴极电弧 (79)
- § 9.3 弧光放电电极间电位分布及伏安特性 (81)
 - 9.3.1 弧光放电的电位分布 (82)
 - 9.3.2 弧光放电的伏安特性 (83)
- § 9.4 电弧的启动及其电稳定性 (90)
 - 9.4.1 电弧的启动 (90)
 - 9.4.2 电弧的电稳定性 (91)
- § 9.5 高气压、超高气压弧光放电 (94)

第十章 气体导电的其它类型

- § 10.1 电晕放电 (106)
 - 10.1.1 电晕放电特征 (106)
 - 10.1.2 电晕放电产生的阈值判据 (109)
 - 10.1.3 稳态电晕放电 (113)
 - 10.1.4 瞬态电晕放电和交变电压电晕放电 (116)
- § 10.2 高频放电 (117)
 - 10.2.1 交变电压下气体放电的几个范围 (117)
 - 10.2.2 高频放电特征及类型 (122)
 - 10.2.3 高频放电理论概述 (125)
 - 10.2.4 交变电压下外电极放电 (138)
- § 10.3 脉冲放电 (141)

第十一章 等离子体的基本物理特性与诊断

§ 11.1	电离气体与等离子体	(146)
§ 11.2	等离子体的基本特性	(149)
11.2.1	电中性	(149)
11.2.2	德拜长度	(150)
11.2.3	等离子体频率	(155)
11.2.4	等离子体的判据式	(157)
11.2.5	电磁波在等离子体中的行为	(158)
§ 11.3	等离子体辐射	(161)
11.3.1	韧致辐射	(162)
11.3.2	复合辐射	(162)
11.3.3	回旋辐射	(162)
11.3.4	激发辐射	(163)
§ 11.4	等离子体诊断	(166)
11.4.1	探针诊断	(166)
11.4.2	微波诊断	(181)
11.4.3	激光诊断	(184)
11.4.4	光谱诊断	(188)

第十二章 气体导电应用综述

§ 12.1	气体放电灯	(194)
§ 12.2	气体激光器	(199)
§ 12.3	气体放电显示器件	(203)
§ 12.4	离子管	(207)
§ 12.5	真空开关	(210)
§ 12.6	等离子体切割、喷涂与焊接	(212)
12.6.1	等离子体切割(等离子炬切割)	(213)
12.6.2	等离子体喷涂(等离子炬喷涂)	(213)

12.6.3	等离子体焊接	(214)
§ 12.7	电火花加工、离子溅射去除加工 和离子溅射镀膜	(215)
12.7.1	电火花加工	(215)
12.7.2	离子溅射去除加工	(216)
12.7.3	离子溅射镀膜	(217)
§ 12.8	离子注入技术以及 等离子体去胶、刻蚀	(217)
12.8.1	离子注入技术	(217)
12.8.2	等离子体去胶	(219)
12.8.3	等离子体刻蚀	(220)
§ 12.9	等离子体化工	(221)
§ 12.10	磁流体发电	(223)
	下册习题和思考题	(226)
	参考文献	(232)

第八章 辉光放电

辉光放电是气体导电中的一种重要放电形式，由于放电时管内两电极空间出现特有的光辉，因而得名。通常低气压冷阴极放电管击穿后可形成稳定的辉光放电，它的特点是电流密度较小，放电维持电压较高。它是在较小功率的气体放电器件中最常用的一种放电类型，由于极易产生非等温等离子体，故在激光、光源、超大规模集成电路微细加工技术等方面有广阔的应用领域。辉光放电可分为正常辉光放电、准辉光放电和反常辉光放电几种类型。本章首先介绍正常辉光放电的基本特征，包括阴极区与正柱区的基本理论，其次介绍几种不同类型的辉光放电。

§ 8.1 辉光放电的基本特征

在两平板电极放电管内，充有较低气压的气体，一般在 $10\sim 7000\text{Pa}$ 的范围内。将放电管接入如图5-12的电路中，当电源接通后，电压增加到击穿电压 V_b 时，放电管击穿。击穿后放电管电流迅速增长，在一定的线路限流电阻下，放电稳定在图5-13曲线 EF 段的某一点上，这时管内的放电状态称为正常辉光放电，一般简称辉光放电。

从外表看，辉光放电时放电管由阴极到阳极的空间出现了明暗相间的光层分布，整个放电空间分为几个不同的区

域,如图8-1所示。该图形是在长为50cm、Ne气压力为133Pa的实验管中获得的。(a)图中阴影部分表示发光区域;(b)为相应的光强分布曲线;(c)为电位分布曲线;(d)为电场分布曲线;(e)为空间电荷浓度分布曲线;(f)为电流密度分布曲线。

正常辉光放电管电流一般在 $10^{-4}\sim 10^{-2}$ A, 维持电压在几百伏的范围内。放电电流在一定的范围内变化时, 维持电压不变, 所以正常辉光放电有独特的稳压特性。放电管的形状与尺寸、电极的结构与材料、管内所充气体的成份与气压、以及外电路中的电源功率和限流电阻等因素都直接影响到放电特性和参量。除正常辉光放电外, 当放电电流较小时, 放电管内可出现准辉光放电; 当放电电流较大时, 放电管内可出现反常辉光放电。放电管的典型伏安特性如图5-13, 曲线上的DE段为准辉光放电, FG段为反常辉光放电, EF为正常辉光放电。

§ 8.2 辉光放电的组成区域

正常辉光放电一般可分为四个区域: 阴极区、过渡区、正柱区和阳极区, 如图8-1所示。下面分别进行讨论。

8.2.1 阴极区

从阴极表面开始到 d_c 之间的区域为阴极区, 它是管压降主要降落的区域, 因此又称阴极位降区。这一区域是维持放电必不可缺的区域。由图8-1(d)电场分布曲线看出, 阴极区的电场分布是很不均匀的。阴极表面附近电场最强, 而后随离阴极距离的增大而下降, 到达 d_c 处电场降到最低。

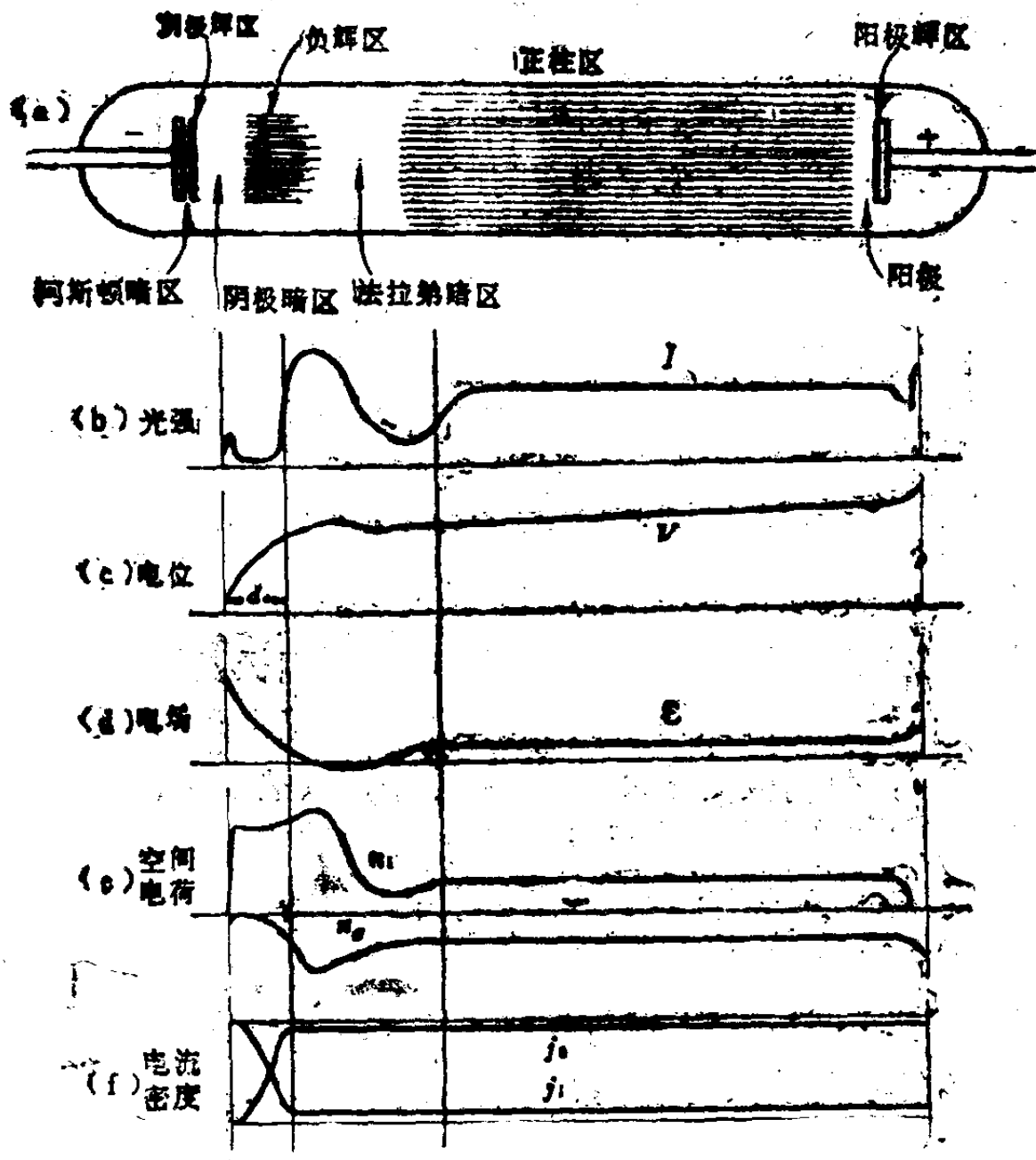


图8-1 正常辉光放电的组成区域与参量分布曲线图

其数值可接近于零甚至达负值。由阴极区的光层分布又可分为几个小区域。

1. 阿斯顿暗区。它是紧靠阴极表面一层很薄的暗区，因为从阴极发射出的电子一般初速都很低($<1\text{eV}$)。这些

初始电子在很小区域内从电场获得能量也较小，当电子的能量低于原子激发能时，就很难产生激发过程，因此也不可能产生有辐射过程，所以这个区域是暗区。

2. 阴极辉区。它紧接在阿斯顿暗区之后，随着初始电子在电场方向漂移运动距离的增大，电子从电场获得能量的积累也将增加，这时电子所具有的能量大于激发能，因此可产生激发过程，同时伴随着辐射，所以发光。

3. 阴极暗区，又称克罗斯暗区。从辉区来的电子有部分没有经历过非弹性碰撞，这部分电子能量不断积累而达到大于气体原子的电离能，这些高能电子与原子碰撞可使原子电离，形成电子雪崩，从而在这区域产生大量的电子与离子。离子在电场作用下向阴极运动，由于阴极表面电场很强，离子从电场获得很大的能量而轰击阴极表面，产生显著的 γ 过程，使阴极发射大量的二次电子，以继续维持放电。所以阴极区是维持放电的重要区域，也是必不可少的区域。

阴极辉区因产生大量的激发原子，伴随着有较强的光辐射，因此称为辉区。而紧接着就是产生大量带电粒子的电离区，显然该区域激发过程相对减弱，光辐射也变小，特别是与阴极辉区相比光强变弱，所以称为阴极暗区。

8.2.2 过渡区

紧接阴极区之后到正柱区之间的区域称为过渡区。它又分为两个区域。

1. 负辉区。紧接着阴极区后为负辉区。由图8-1明显看出，它是放电空间光强最强的区域，也是正负电荷浓度最大而且接近相等的区域，所以也称等离子区。但它与正柱区在

机理上有差别，负辉区是电子束维持的等离子区。实验表明，负辉区的径向范围决定于阴极发射电子的面积，而与放电管的管径尺寸关系不大，不象正柱区充满整个空间。由阴极区进入负辉区的电子可分成二组：一组是快速电子，这些电子由阴极发出后，经过阴极区获得足够高的能量，而又未经受非弹性碰撞损失能量；另一组是低能电子，它们是在阴极区因发生非弹性碰撞而损失能量或电离所产生的新电子。尽管该区电场很弱，由于有这些高能电子的进入，可继续产生电离与激发，使带电粒子浓度增加，辐射强度增强，从阴极区进入的慢速电子与正离子在此产生很强的复合，并伴随着辐射。因此负辉区发光最强，带电粒子浓度最大，与正柱区相比可大20倍左右。它是靠电子束维持的复合控制的等离子区，这是一个很有用的区域，如有些金属蒸气激光器，空心阴极放电管及光谱灯等器件，就是利用负辉区的特征制成的。

2. 法拉第暗区。经过负辉区的电子遭到大量的碰撞，有向运动速度大大减慢。从阴极暗区过来的部分快速电子能量也已消耗，到了负辉区结束之处，电子能量很小，激发和电离作用也小，另外这区域正离子浓度亦小，复合作用亦弱，因此这一区域是一个暗区，称为法拉第暗区。

8.2.3 正柱区

过渡区之后接着就是正柱区。正柱区的长度是由放电管的极间距离决定的，即放电管极间距较长时，正柱区的长度也较长；反之，极间距较短时，正柱区也随着变短。在一定

的条件下，甚至可不出现正柱区。因此就辉光放电本质而言，正柱区是可有可无的，它不是维持放电的主要区域，但它是放电中的一个重要区域。很多类型的辉光放电器件，都是利用正柱区的某种特性而制成的。例如，气体激光管利用正柱区中的粒子数反转形成激光辐射、日光灯利用正柱区的紫外线辐射，而霓虹灯则直接利用正柱区发光，因此对正柱区的研究一向受到人们的重视。

由图8-1的实验曲线表明，正柱区电位分布是线性的，电场是均匀分布的且较弱；正柱区内正离子与电子浓度相等，是一个非等温的等离子体。详细分析见§8.6。

正柱区在放电中起着传导电流的作用，放电电流密度为电子流密度与离子流密度之和，于是有

$$j = j_e + j_i = \rho_e u_e + \rho_i u_i = \rho \mathcal{E} (K_e + K_i) \quad (8-1)$$

式中 ρ_e 与 ρ_i 分别为电子与离子的电荷密度， K_e 与 K_i 分别是电子与离子的漂移率， \mathcal{E} 为电场强度。

由于 $K_e \gg K_i$ ，所以正柱区中传导电流主要是电子流，而离子流通常只占电子流的千分之几，因而常被忽略不计。这样正柱区中电子跑掉的数目大大多于离子，据此，正柱区的离子数势必要高于电子数，而不能维持稳定的状态。但实际情况并非如此，放电时从阴极区提供大量的电子，经过过渡区而进入正柱区，最后电子漂移到阳极而形成放电电流。因此正柱区实质上起到了传导电流的作用。正柱区空间由于带电粒子的空间复合与双极性扩散到管壁的复合作用而使空间电荷密度不断下降，为了维持稳定的放电，必须不断地产生带电粒子来补充它的损失，以达到带电粒子密度恒定。这就要求在正柱区空间建立外加电场，使电子从电场获得能

量，以产生所需要的电离数。由此可知，正柱区内电场强度的大小是由所需的电子能量决定的，电子能量的大小又是由所需产生的电离数决定的，而必须产生的电离数则是由带电粒子的损失所决定的。因此，正柱区内电场强度的大小是由带电粒子的损失大小决定的，即损失大，空间电场强；反之，损失小，电场较弱。

从外表看，正柱区一般发光均匀。其发光的强度与气体的状态、柱体的管径有关。在气压一定时，发光强度随管径的变化是很明显的。如放电管柱体直径很大，则管壁复合作用较小，从而总的复合作用也较小，此时电子、离子损失的数目较少，为维持稳定放电所需电场强度较弱，电子能量较小，正柱区中激发碰撞相对减少，辐射也较弱，因而整个正柱区就比较暗。

若放电管柱体直径很小，此时管壁复合作用加剧，带电粒子由于双极性扩散易跑上管壁发生复合，并且放电管直径越小，带电粒子复合的相对数目就越多。为了维持稳定放电，就必须增加电场强度以产生足够多的电离碰撞。与此同时，放电管内激发碰撞也增强了，从而辐射增强，致使正柱区内光强增强。

在放电起始时，由于正柱区中电子和离子向管壁作扩散运动，而离子的扩散速度远小于电子的扩散速度，因此在单位时间内因扩散运动打上管壁的电子数总多于离子数，这就使管壁带有净负电荷，从而形成管壁相对于管轴为负的电位，于是产生了径向电位梯度。空间径向电位分布如图 8-2 所示。

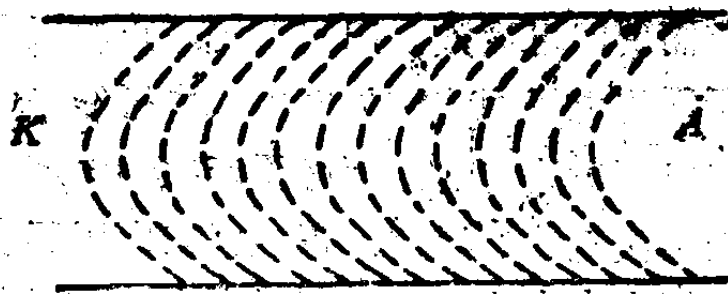


图8-2 正柱区中等位面曲线

正柱均匀发光时，放电参量如电荷浓度、轴向电位梯度等沿轴向均匀分布。这通常是低气压状态下发生的现象，当气压增高时，正柱会出现收缩现象。

一般在气压很高($>10^4\text{Pa}$)、电流较大时，发光正柱收缩在以管轴线为中心的小区域内。正柱收缩的原因是因为管内各处的气体压力是相等的，而沿管轴处气体的温度通常总是高于管壁附近气体的温度，结果管轴处气体浓度比较低，电子自由程较大，电子碰撞电离效果较好，从而放电也就易于从管轴附近通过，因此发光集中在管轴线的附近。随着气压的增高，发光正柱越向管轴线附近集中，收缩正柱越小，伴随发光的强度越强。

正柱区并不经常呈现为均匀的发光正柱，在一定的气压与电流密度下，常出现光层状，也称为辉纹，尤其是有杂质气体存在时，更易出现辉纹。此时正柱区不再是均匀发光，而是分成明暗相间的光层，两层相对应的两点间的距离是一定的，如图8-3所示。实验中发现，随着电流的增加，两相邻光层间的间距增大；随气压的增高，光层间的间距也略增大。测量表明，在辉光正柱中，正柱区内的参量如电荷浓度、轴向电场强度等也都相应的随着光层的周期分布而周