

高等学校教学用书



# 气体放电及离子管

QITI FANGDIAN JI LIZIGUANG

成都电讯工程学院选编

## 气体放电及离子管

---

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社出版 高等学校教学用书编辑部  
北京宣武门内大街25号

北京市书刊出版业营业登记证出字第2号

京华印书局印刷

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

---

统一书号 15010·1087 开本 850×1168  $1/32$  印张 13  $5/16$

字数 344,000 印数 0001—4,100 定价 (7) 羊 1.50

1961年9月第1版 1961年9月北京第1次印刷

# 目 录

## · 緒 論

§ 1. 气体放电及离子管的发展簡史	1
§ 2. 气体放电及离子管在国民經济中的作用	3
§ 3. 离子管的分类	5

## · 第一章 带电粒子的产生

§ 1-1. 概述	8
§ 1-2. 粒子碰撞的基本規律	10
§ 1-3. 电子与气体原子的碰撞	13
§ 1-4. 电离几率, 激发几率	17
§ 1-5. 电离的物理过程	19
§ 1-6. 受激原子与电子及气体原子的碰撞	20
§ 1-7. 正离子与气体原子的碰撞	22
§ 1-8. 光电离	24
§ 1-9. 热电离与热激发	27
§ 1-10. 放射性射綫的电离和剩余电离	30
§ 1-11. 負离子的形成和破坏	32
§ 1-12. 在正离子、激发原子和中性原子的作用下阴极的次級电子发射	35

## · 第二章 带电粒子在气体中的运动

§ 2-1. 带电粒子在气体中运动的特征	38
§ 2-2. 电場存在时气体中带电粒子运动的性质	40
§ 2-3. 测定电子和离子迁移率的实验方法	43
§ 2-4. 离子和电子迁移率的理論	48
§ 2-5. 气体粒子的有效截面和它与碰撞电子速度的关系	54
§ 2-6. 在浓度差和电場共同作用下带电粒子的运动	59
§ 2-7. 电子在磁場中的扩散	62
§ 2-8. 消电离(带电粒子的消失)	64

## · 第三章 繁流放电与着火过程

§ 3-1. 气体放电的全伏安特性	67
§ 3-2. 气体放电的分类	69
§ 3-3. 电子繁流理論	72
§ 3-4. 系数 $\alpha$ 与 $h$ 和 $P$ 的关系	76
§ 3-5. 斯托列托夫效应与斯托列托夫常数	81

§ 3-6. 非自持放电到自持放电的过渡	82
§ 3-7. 影响着火电压的其他因素	87
§ 3-8. 气体放电的相似定律(同比定律)	89
<b>第四章 辉光放电和辉光放电管</b>	
§ 4-1. 欠正常辉光放电	91
§ 4-2. 正常辉光放电	95
§ 4-3. 辉光放电阴极位降区的基本理论	99
§ 4-4. 反常辉光放电和阴极溅射	106
§ 4-5. 辉光放电稳压管	109
§ 4-6. 冷阴极闸流管	118
§ 4-7. 十进位管	134
§ 4-8. 数字管	147
<b>第五章 弧光放电及热阴极充气二极管</b>	
§ 5-1. 弧光放电概述	149
§ 5-2. 自持热阴极弧光放电	151
§ 5-3. 自持冷阴极弧光放电	153
§ 5-4. 人工热阴极弧光放电	155
§ 5-5. 充气二极管作用原理	157
§ 5-6. 充气二极管的电弧结构及阴极区	161
§ 5-7. 在低压强充气二极管中的放电光柱及阳极区	168
§ 5-8. 低电压充气二极管(吞茄)中的过程	174
§ 5-9. 充气二极管的伏安特性	176
§ 5-10. 放电的着火时间	179
§ 5-11. 放电的熄灭·消电离过程	184
§ 5-12. 充气二极管的型式及参量	193
§ 5-13. 充气二极管的结构	196
<b>第六章 闸流管</b>	
§ 6-1. 闸流管的结构和栅极工作原理	203
§ 6-2. 栅极的起始着火特性曲线	209
§ 6-3. 栅极在周期的导电期间的工作情况	217
§ 6-4. 电弧熄灭后栅极封闭作用的恢复	221
§ 6-5. 过渡到闸流管稳定工作情况后的着火特性的移动	232
§ 6-6. 双栅闸流管和特栅闸流管	238
§ 6-7. 闸流管的型式和参量	245
§ 6-8. 闸流管的结构	250
§ 6-9. 闸流管的应用	255
<b>第七章 脉冲闸流管</b>	

§ 7-1. 概述	261
§ 7-2. 对脉冲闸流管的技术要求及某些特殊参量	262
§ 7-3. 脉冲闸流管的基本构造与基本工作情况	263
§ 7-4. 脉冲闸流管的点火过程	265
§ 7-5. 点火稳定度	276
§ 7-6. 脉冲闸流管的脉冲电压降和伏安特性	282
§ 7-7. 脉冲闸流管放电后的物理现象	287
§ 7-8. 直流线性调制器电路	294
§ 7-9. 脉冲闸流管的结构及其要求	297
<b>第八章 汞弧管</b>	
§ 8-1. 概述	304
§ 8-2. 励弧管	307
§ 8-3. 引燃管	318
<b>第九章 其他放电形式及放电器件</b>	
§ 9-1. 火花放电	333
§ 9-2. 电晕放电	341
§ 9-3. 高频放电	352
§ 9-4. 计数管	364
§ 9-5. 气体放电光源	375
<b>第十章 等离子区</b>	
§ 10-1. 概述	388
§ 10-2. 等离子区参量的实验测定(探极法)	392
§ 10-3. 等离子区的理论	399
§ 10-4. 等离子区的电振荡	405
<b>附 录</b>	
附录一 某些原子和分子的电离能	410
附录二 气体放电的相似定律	413
附录三 细致平衡原理	415
附录四 根据气体放电中所发生的基本过程对它们的各种类型 与区域进行分类	417

**主要参考书目**

## 緒 論

本課程有两个組成部分：第一部分是气体放电的基本理論，它是离子管的物理基础，第二部分是各种类型的离子管。

气体放电理論是一門研究电流通过气体或金属蒸汽时所表現出来的宏观現象与其內部的微观过程之間联系的科学。

宏观現象是由宏观参量来表征的，我們一般可以直接或間接地觉察到它們，如电流，电压，光和热。內部的微观过程即是气体放电的本质。例如电子与气体分子的碰撞而引起气体分子的电离就是气体放电中最基本的微观过程之一。

离子管是利用气体放电的原理而制成的电子器件，它是电子器件的一大类别。例如众所常見の日光灯，稳压管，閘流管等等都是。

离子管和电子管在結構上和制造工艺上有很多相似之处，因此，它們往往同在一个工厂中生产。但是，它們在本质上却有重大的区别：离子管中由于充入少量气体，因此参加导电过程的不但有电子，而且还有离子。电子，离子和气体分子等各种粒子之間經常不断地相互作用，因此內部过程是多种多样的，也是很复杂的。此外在用途上、在制造工艺上也与电子管有很大的差异。由于这門科学的飞速发展，它已成为一个独立完整的科学技术領域。因此，便有必要作为一門独立的課程来加以研究。

### § 1. 气体放电及离子管的发展簡史

在大自然中，人們經常会遇到气体放电的現象，例如雷电和北极光等。直到十七世紀末，人們在继物体摩擦起电之后，才发现了气体放电的實驗事实。但是只是到了十八世紀中叶才逐步認識到气体放电的本

质。1752年著名的科学家罗蒙諾索夫和富兰克林同时用实验证明了雷电是一种气体放电的现象。1785年庫倫发现了电荷通过空气而漏失的现象(即所謂无声放电)。

十九世紀，人們发现了气体放电的各种不同形式：1802年彼得洛夫发现了电弧，記錄了从大气压到6毫米汞柱內不同的气体放电现象。1831年法拉第发现了电磁感应现象，不久又改进了感应圈，于是气体放电的研究就广泛地开展起来了。法拉第本人还确定了气体放电的几种形式(无声放电，輝光放电，火花放电)以及它們发生的条件。1856年蓋斯勒創制了改良的放电管，它被广泛地用来表演和研究气体放电现象；一些重要的研究(尤其是稀薄气体和真空中的现象)都是在此以后进行的。

十九世紀七十年代，解决了把碳弧放电用于实际照明的問題，因而它被广泛地应用在大城市中，用作工厂和街道的照明。从1893年起在許多国家中把輝光放电灯作特种照明之用。

1908年发明了水銀整流管，后来又得到很大的改进，直至現在仍然得到广泛的应用。不久以后又相继地出現了充以汞汽或惰性气体的热阴极离子管，它比整流用的电子管具备更多的优点。随后在1928年出現了带有三个电极的閘流管，它在控制电路中获得了成功的应用。1930年輝光放电稳压管得到了应用，不久就出現了电暈放电稳压管。1933年后出現了便于控制的大功率整流元件——引燃管。

由于无綫电定位技术的迅速发展，1942年开始出現了充氬閘流管，到現在它的脉冲功率已能达到100兆瓦以上。由于无綫电定位向超高频方向发展，因此还出現了一系列超高频气体放电器件，如天綫开关等。

此外，由于电子計算技术及自动化技术的发展，近年来出現了大量的新型輝光放电管，如冷阴极閘流管，十进位管，数字管等等。这些管子具有可見訊号，不需灯絲电源等一系列优点，因此迅速地获得了广泛

的应用,如冷阴极閘流管它已可以与半导体管相媲美。

等离子区的特性已經引起了人們极大的重視。等离子区中存在大量的带电粒子;而且带正电的粒子和带負电的粒子的数目在单位体积中是相等的。等离子区的特点是它具有高度的导电能力,能够产生超高频电振蕩,在强功率脉冲放电的等离子区中,气体可以被加热到一百万度以上的高温,因此被用来作为可控热核反应。等离子区也存在于高温星球中,如太阳和許多恒星几乎都是由等离子区組成的。近来已认定它是物质的第四态。

由于气体放电应用的发展和要求,对气体放电的研究工作也大大发展了。以气体电离的概念为基础的气体放电理論是以湯姆逊及其学生湯生的有关論文作为起点的。而湯生是以著名的俄国物理学家斯托列托夫的大量实验工作作基础来建立自己的理論的。

1931—1932年罗果夫斯基考虑了空間电荷在放电过程中使电場发生了畸变,对湯生的理論作了重要的补充,并使这个理論可以适用于自持的輝光放电。至于在近代电子学中起着重要作用的电子和离子基本过程的研究,只是应用現代的量子力学理論才能作出更全面和更正确的結論。近年来,为了建立等离子区理論,各国科学家进行了大量的研究工作。由于脉冲放电,高频放电获得新的应用,因此这些方面的研究和理論工作也特別迅速。

## § 2. 气体放电及离子管在国民經济中的作用

气体放电及离子管,現在已經获得了广泛的应用,在国民經济的各部門中,無論在工业上,各种技术部門,科学研究部門都以气体放电及离子管的最新成就充实自己。以下举出几个主要方面來說明气体放电及离子管的重要作用。

首先,根据气体放电的多种多样的形式,人們制成了各种具有不同用途的离子管。它們被广泛地应用在无綫电和有綫电技术,照明技



术,自动控制和遙控,放射性物质輻射的量測等等。这与国防工业有非常密切的联系。如脉冲閘流管的出現,适应了超高频管向大功率发展的要求,从而使雷达机的探索距离迅速增大。新型輝光放电管的出現为自动化技术开辟了更为广闊的道路。輻射計数管則是原子能工业中不可缺少的工具。

离子管在无綫电設備整流电路中的应用已是众所周知了。由于大功率离子管的出現,对于工业和交通事业的进一步发展有直接的影响。如应用了汞弧管的巨大整流設備,解决了企业与电气鉄道的供电問題,也解决了某些电气冶金(冶炼鋁和鋅)、电气化学范圍內(电鍍,电解等)的供电問題。

气体放电光源的应用获得了极高的发光效率,它是照明技术中的一大革命,使强大的光源有可能实现。可以預期,气体放电光源将逐渐代替絕大部分白熾灯的应用。

对于等离子区的研究是现代最重大的科研方向之一。目前,世界各国为使等离子区应用于国民經济而进行了大量的工作。苏联在利用高温等离子区实现可控热核反应的研究工作中获得了很大的成功,这是社会主义陣营和平利用原子能的范例之一。如果能够达到亿度数量級的高温,就有可能实现可以利用的热核反应,于是人类可以从海水中获得取之不尽的能源(热核反应以氘和氚作为“燃料”,这两种元素在海水中大量存在)。对等离子区的深入研究还可能出現新的重大的技术应用,如产生亚毫米波或更短波长的超高频振蕩器,等离子区热电变換器等等,有的已制成实验設備。

离子源是实验物理中重要工具之一,它在气体放电空間取出正离子以供质谱仪、离子加速器等之用,最近还发明了类似离子源的等离子区噴枪,当噴出的正离子落到金属上时,集中地放出电离能,可使任何难熔金属立即汽化。最高温度已达  $8000^{\circ}\text{C}$ ,它将为冶金和化学等工业开辟嶄新的技术領域。至于离子火箭,苏联已經进行了很多有效的研

究工作，其实等离子区喷枪的制成可以说已经预示了离子火箭的现实性。

除此以外，气体放电及离子管还有非常广泛的应用。如利用气体放电来产生化学反应以制造一般化学反应中难以制成的化合物，这是化学工业中未来有希望的技术领域。在金属加工方面已应用了电火花加工和电弧焊等技术。甚至在医学上也获得了应用，如氧负离子可以增进人类的健康。苏联已制成了氧负离子发生器。

所有这些，都说明了气体放电的原理已日益为人类所掌握。它已成为工业、科学研究及交通事业等各经济部门的发展所不可分离的技术部门。随着我国社会主义建设事业的突飞猛进，日益迫切地要求供应给各部门以更大数量和更新品种的离子管，因此深入掌握本课程的内容并在今后工作中运用、充实和发展它，是我们的重要任务。

### § 3. 离子管的分类

离子管分类方法很多，现在介绍一些常见的分类方法：

(一)按放电的形式分类，可分为：

1. 辉光放电管——在这些管子中，放电是基于辉光放电的原理，它以高电压小电流为特征。例如稳压管，冷阴极闸流管，十进位管等。

2. 弧光放电管——在这些管子中，放电是基于弧光放电的原理，它以低电压大电流为特征。如热阴极充气二极管、闸流管、汞弧管等。

脉冲放电管——这种管子在放电时可以通过很大的脉冲电流，用以保护设备。例如避雷用的钨放电管，天线开关等。

4. 高频放电管——这类管子多用于微波设备中。

5. 非自持放电管——管内产生非自持放电。例如充气光电管等。

此外，还有电晕放电管等。其实，热阴极充气二极管也是非自持放电管；天线开关也是高频放电管；脉冲闸流管也是脉冲放电管……。

原書缺頁

分为整流管、稳压管、照明管、指示管、避雷管、辐射计数管、计算管、触发管、脉冲调制管及离子放大管等等；按控制方式分类，可分为可控、不可控、正控制、负控制及磁控等放电管。按电极的作用分类，可分闸流管、引燃管、栅辉管及屏蔽闸流管等。

熟悉了上述分类方法，就对离子管有了初步的概念。

# 第一章 帶电粒子的产生

## § 1-1. 概述

离子管中的物理現象是带电粒子、光量子 and 气体原子等基本粒子之間以及它們和电极之間相互作用的总和。因此在全面地研究管内物理过程之前首先應該了解这些相互作用的性质和規律性。

在气体放电中，粒子間最常見的也是最基本的一种相互作用就是电子与气体(或蒸汽)的中性原子(或分子)的碰撞。

气体原子的状态可以用它的能級图来表示。这个能級图由原子內所有的粒子来决定，但我們感兴趣的只是价电子，即組成原子外壳的电子的能量，因为下面所研究的过程主要是由这些电子参加的。



图 1-1. 气体原子能級图。

图 1-1 表示一个原子中某一个价电子的能級图。每一条綫代表电子的一个能級。提高电子的能量就相当于原子有較高的位能儲藏。最低的能級  $W_0$  对应于原子最稳定的状态，在那里电子可以停留无限久。这种状态称为常态或基态。当外界給予原子額外能量，而价电子接受了这能量时，它的能級就能提高到  $W_1, W_2$  等等。这些能級称为激发能級。根据量子力学的定律，气体原子的电子不可能有与能級图所示能級不相一致的其他能級。在受激状态下，原子停留极短的时间(約  $10^{-8}$  秒)就重新过渡到基态或另一个的激发能級。在过渡时原子以光量子的形式輻射出以前所得到的額外能量。但是也存在这样的能級，若无外因促进(如与别的粒子或管壁相碰撞)不能从該能級过渡。这些能級称为亚稳能級。亚稳原子如果与气体中别个粒子或管壁相碰撞，則原子就不再停留在亚稳状态。由于

亚稳原子存在的期間远比一般的受激原子长，因此它在放电中起着特别重要的作用。

当能量超过最大的激发能級时，电子就与原子完全脱离关系。原子缺少了电子就变为正离子。这一过程称为原子的电离。气体原子如何获得額外能量、規律性如何？这是我們所关心的問題。在詳細闡述这个問題以前，先对气体放电中产生带电粒子的各种方式进行分类。

在气体放电中(具体說来如离子管中)产生带电粒子的方式是很多的，但是，可以适当地分类为气体过程和电极过程两种。

一、气体过程 包括电子、离子、光量子 and 气体分子之間的各种相互作用，可分为：

1. 单个电子碰撞：一个具有足够能量的电子与气体原子相碰撞，使原子发生电离。

2. 双电子碰撞：一个电子在碰撞时把能量交给气体原子，使后者成为受激状态，另一个电子在碰撞时使这个受激原子电离。如果是亚稳态的受激原子則这一过程就特别显著。

3. 离子与原子的碰撞：只有离子能量很大时，才能使原子发生电离。离子管中这个过程并不显著。

4. 受激原子和气体原子的碰撞：在一定条件下，这种碰撞具有非常重要的意义。

5. 光电离：光量子与气体原子碰撞时，只要光子能量足够大也可以使原子电离。这些光量子也可以是气体放电空間本身所产生的。

6. 热电离：也即原子与原子之間的碰撞，使其中一个原子发生电离，这要求气体原子有非常大的速度。也即要求气体有非常高的温度。

7. 其他过程：如在金属蒸汽中可能会发生“自动电离”，即一个原子中有两个电子，首先都被激发，如果这个受激原子的位能之和超过了电离电位，則一个电子就从原子中逸出，另一个电子回到基态。

在这些过程中 1, 2, 4 是最重要的。

二、电极过程 指发生在电极表面或电极附近的基本过程。可分为：

1. 光电发射；
2. 热电子发射；
3. 场致发射；

以上三种发射形式，在电子管课程中已阐述过了。

4. 正离子作用下阴极的次级电子发射；
5. 激发原子作用下阴极的次级电子发射；
6. 中性原子作用下阴极的次级电子发射。

在不同类型的离子管中，阴极的电子发射是各不相同的：辉光放电管中主要是正离子引起的；一般的热阴极离子管中主要是热电子发射；在汞弧管中则是场致发射。但是在高频放电管中电极过程是不重要的。

本章将依此对上述过程作进一步的讨论。

### § 1-2. 粒子碰撞的基本规律

如上所述在气体中产生带电粒子(电子、离子)的一种方法是利用电子对气体分子的碰撞，使较低能级的电子跃升到较高能级，电子的动能转变为激发或电离所需要的能量。

碰撞可分为二种：

一、弹性碰撞：碰撞的粒子交换动量和动能，但是无论那一个粒子都不发生内部过程(激发或电离)。粒子在碰撞前后动能的总和保持不变。

二、非弹性碰撞：碰撞粒子的一部分能量消耗在其中某一粒子的内部过程中(激发或电离过程)，或者参加碰撞的某一粒子所储存的内部能量(激发或电离能)，使另一粒子动能增加。因此，非弹性碰撞可分为二类：

1. 第一类非彈性碰撞：二个参加碰撞的粒子，碰撞以后总的动能减少，而使一个粒子的内部能量增加。

2. 第二类非彈性碰撞，二个参加碰撞的粒子之一，儲存有内部能量，在碰撞时，此粒子将能量放出，使二个粒子的总动能增加。

我們先討論彈性碰撞：

若二粒子质量为  $m_1$  与  $m_2$ ，根据力学的定律，在彈性碰撞的情况下，碰撞以前与碰撞以后总的动能和动量保持不变。即

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}; \quad (1-1)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2, \quad (1-2)$$

式中  $v_1, v_2$  分别为碰撞前二粒子的速度，而  $U_1, U_2$  分别为碰撞后粒子的速度。

設在碰撞前第二粒子为靜止，即  $v_2 = 0$ ；則方程式(1-1)和(1-2)可改写成

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}; \quad (1-3)$$

$$m_1 v_1 = m_1 U_1 + m_2 U_2. \quad (1-4)$$

从(1-3)和(1-4)二方程中解出  $U_1$  与  $U_2$ ，我們得到

$$U_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}; \quad (1-5)$$

$$U_2 = 2v_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2}. \quad (1-6)$$

在碰撞前第二粒子是靜止的。在碰撞后，第二粒子具有  $U_2$  的速度，因此由于碰撞，第一粒子傳給第二粒子的动能为

$$\mathcal{E}_2 = \frac{m_2 U_2^2}{2} = 2 \frac{m_1^2 m_2}{(m_1 + m_2)^2} v_1^2, \quad (1-7)$$

而我們已知  $\frac{1}{2} m_1 v_1^2$  为第一粒子的动能，用  $\mathcal{E}_1$  表示，則(1-7)式可写成

$$\mathcal{E}_2 = 4 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \mathcal{E}_1. \quad (1-8)$$



从上式可以看出,第二粒子所获得的能量,或借碰撞传给第二粒子的能量,为第一粒子能量的一部分。当  $m_1 \approx m_2$  时,  $\mathcal{E}_2 \approx \mathcal{E}_1$ , 即第一粒子几乎将全部的能量传给第二粒子, 当  $m_1 \ll m_2$  时,  $\mathcal{E}_2 \approx 4 \frac{m_1}{m_2} \mathcal{E}_1 \ll \mathcal{E}_1$ 。即第一粒子只有极少一部分能量传给第二粒子。

由以上分析可知, 气体分子或正离子相互碰撞时, 或者电子与电子相互碰撞时, 大量交换能量。如果电子与分子或正离子发生碰撞时, 能量交换很少。

我们再来分析一下非弹性碰撞的情况。我们已知, 在非弹性碰撞时, 碰撞后一部分的能量用于激发与电离。我们来求在什么情况下碰撞时, 用于激发和电离的能量最大。这能量用  $U$  代表, 并假定第二粒子的速度  $v_2 = 0$ , 则与弹性碰撞时的分析一样,

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2} + U; \quad (1-9)$$

$$m_1 v_1 = m_1 U_1 + m_2 U_2. \quad (1-10)$$

将(1-10)式代入(1-9)式, 得

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2}{2} \left( \frac{m_1 v_1 - m_1 U_1}{m_2} \right)^2 + U$$

$$\text{或} \quad U = \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{m_1 U_1^2}{2} - \frac{m_2}{2} \left( \frac{m_1 v_1 - m_1 U_1}{m_2} \right)^2. \quad (1-11)$$

为了得到  $U$  最大值时的条件, 令  $\frac{dU}{dU_1} = 0$ , 即

$$\frac{dU}{dU_1} = \frac{m_1^2}{m_2} v_1 - \frac{m_1 U_1 (m_1 + m_2)}{m_2} = 0. \quad (1-12)$$

简化(1-12)式, 得在

$$U_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (1-13)$$

时, 消耗于激发或电离的能量最大。由此, 将(1-13)式代入(1-11)式, 可得消耗能量最大值  $U_m$ 。