

现代化知识 文库

气体放电——

等离子体物理的应用

G. T. FRANKS

邓巴出版社 出版

3

- 人类对气体放电的认识
- 气体放电的基本原理
- 气体放电光源
- 等离子体喷射
- 等离子体化学
- 等离子体在工业中的应用



现代化知识文库

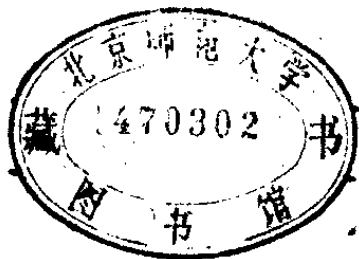
倪海曙 主编

气体放电——等离子体

物理的应用

彭国贤 编著

J111.54



知识出版社

上海

现代化知识文库

气体放电

——等离子体物理的应用

QITI FANGDIAN

——Deng-Liziti Wuli de Yingyong

彭国贤 编著

知识出版社出版发行

(上海古北路 650 号)

(沪 版)

新华书店上海发行所经销 常熟周行印刷厂印刷

开本 850×1035 毫米 1/32 印张 7.625 插页 2 字数 190,000

1988 年 3 月第 1 版 1988 年 3 月第 1 次印刷

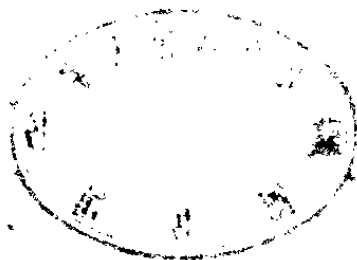
印数: 1—3,000

ISBN 7-5015-5326-2/O·35

定价: 1.95 元

内 容 提 要

气体放电是现代科学技术中应用极广的一门学科，在电子学和工业各部门都有极重要的用途。很多天体物理现象也与气体放电有关，所以气体放电是解释许多天体现象的有力工具。本书系统地介绍气体放电的基本原理以及它在各个领域的应用。书中首先介绍人类对气体放电的认识过程和基本理论，然后分章介绍气体放电在电子学、激光技术、照明工业、薄膜技术、化学、工业技术、能源及天文方面的具体应用实例。本书取材较新，内容也较广泛，读者可以从中看到有关气体放电的基本知识和应用实例，开拓视野，提高知识水平。本书可供有关专业的大专院校师生及工程技术人员参考，也可供高中文化程度的学生和工人学习。



总 序

社会主义现代化建设需要知识，需要在不断更新中的现代化知识。

人类的知识是不断发展、不断更新的。现代的社会，文化科学突飞猛进，人类知识的更新速度空前加快；假定19世纪的知识更新周期是80~90年，现在已缩短为15年，而某些领先学科更缩短为5~10年。知识体系不断更新，人的知识结构也必须不断更新，进学校求得适用一辈子的知识的“一次教育”已经成为陈旧的观点。这样，不断地进行更新知识的再学习，也就成为现代人生活和工作的需要。“活到老，学到老”这句格言有了新的含义。现在，好些国家已经在研究和推行“终身教育”，又称为“知识更新教育”，它的主要方法是提供对最新知识的深入浅出的介绍，以便自学。现代化的人才要由实行全面的终身教育来造就。

人类认识日新月异，各门科学的新分支层出不穷，边缘性、交叉性学科随着发展，形成了人类知识结构的综合化和整体化的新趋向。因此，现代化社会不仅需要“专才”，而更需要“通才”，也就是具有新的知识结构的科学人才。现在许多成就卓著的科学家，极少是只限于一门专业的，他们往往在边缘性、交叉性学科领域中以博识多才取胜。当然，一个人不可能通晓一切知识的细节；但是，如果知识深广，视野开

7

同，就可以具有融会贯通、触类旁通的创造能力。我国的现代化事业正需要成千上万这样的通才。

《现代化知识文库》就是为了提供知识更新的学习材料而出版的。它将系统地、全面地、通俗地介绍从自然科学到社会科学各个部门的最新成就，特别是边缘性、交叉性学科的新进展以及它的难题和解决的方向。《文库》的有些内容在国内还是第一次作系统介绍，希望它的出版对正在探索科学文化新境界的读者有所帮助。

这套文库将不断补充新的选题，分辑出版，每辑10本。编著者大多是中年科研人员，由老一辈的著名科学家担任编审。从内容到文体都将按照客观情况的发展不断更新。

知识就是力量，我们的工作希望得到大家的支持和帮助。

《现代化知识文库》编辑部

1982年5月

目 录

第一章 人类对等离子体的认识..... 1

1. 从雷电谈起(1)
2. Faraday(法拉第)和 Crookes(克鲁克斯)等人的贡献(2)
3. 物质的第四态——等离子体(5)
4. 等离子体的基本概念(7)
5. 气体放电的分类(10)
6. 气体放电的特点和应用(12)

第二章 气体放电的基本理论.....14

1. 电离(14)
2. 复合(17)
3. 气体放电的全伏安特性(18)
4. Townsend 放电理论(19)
5. 巴邢定律(22)
6. 辉光放电(24)
7. 弧光放电(29)
8. 火花放电(32)
9. 电晕放电(33)
10. 高频放电(35)
11. 无极放电(37)
12. 空心阴极放电(39)
13. 等离子体约束(40)
14. 等离子体参数测量(44)

第三章 气体电子学.....49

1. 等离子体显示(49)
2. 大功率毫微秒脉冲放电器件(59)
3. 脉冲闸流管(62)
4. 大功率充气整流器件(64)
5. 计数管(68)
6. 微波技术中的等离子体(72)
7. 稳压器件(77)
8. 其他充气电子器件(79)

第四章 气体激光器.....84

1. 原子气体激光器(84)
2. 离子气体激光器(94)
3. 分子气体激光器(100)

第五章 气体放电光源..... 108

1. 汞灯(108)
2. 氙灯(113)
3. 钠灯(116)
4. 金属卤化物灯(119)
5. 原子光谱灯(123)
6. 脉冲放电灯(125)

第六章 等离子体镀膜	129
1. 溅射镀膜(129) 2. 离子镀膜(139) 3. 空心阴极放电法镀膜(143) 4. 金属的等离子体氧化(144) 5. 离子束沉积(145) 6. 电弧蒸发法(146)	
第七章 等离子体化学	148
1. 等离子体中的化学反应原理(148) 2. 有机化学反应(150) 3. 等离子体聚合有机薄膜(155) 4. 合成无机薄膜(160) 5. 等离子体汽相沉积(PCVD)(161) 6. 气体放电腐蚀(162) 7. 等离子体去胶(167)	
第八章 等离子体在工业中的应用	170
1. 等离子体焊接(170) 2. 等离子体喷涂(180) 3. 等离子体熔炼(182) 4. 电火花加工(184) 5. 离子氮化(188) 6. 静电除尘(190) 7. 负离子发生器(191) 8. 静电喷涂(192) 9. 静电分样(193) 10. 真空的获得和测量(194) 11. 等离子体表面处理(200) 12. 等离子体超细粉碎(202)	
第九章 能源中的等离子体	204
1. 受控核聚变(204) 2. 磁流体发电(213) 3. 热电子发电(216) 4. 等离子体发动机(219)	
第十章 宇宙中的等离子体	221
外国人名索引	226
专用名词索引	228
主要参考文献	239

第一章 人类对等离子体的认识

1. 从雷电谈起

夏夜的电闪雷鸣是一种常见的自然现象——雷电。远古,人们并不知道雷电的起因,以为是雷公电母施的魔术。人类为了弄清雷电的本质经历了漫长的历史。

公元前6世纪,希腊学者就发现了摩擦起电现象。我国古籍中也有“琥珀拾芥”的记载。到了18世纪,人们发现有两种电荷:正电荷和负电荷,并对这两种电荷的性质作了研究。人们已经观察到,用力摩擦空心玻璃球的外壁,可使球内的稀薄气体发光。1746年,科学家建成世界上第一批莱顿瓶,采用这种仪器研究火花放电和充放电现象。

通过对空气火花放电的研究,许多学者注意到这种现象同雷电有共同之处。B. Franklin(富兰克林)和 Ломносов(罗蒙诺索夫)两人几乎同时用实验证明雷电是大气中正负电荷强烈放电的现象。他们把风筝送上高空,那里的空间电荷沿着潮湿的棉线进入室内,棉线同莱顿瓶相联。当雷电来临之前,就发现莱顿瓶产生火花放电,从而证明雷电是一种空间放电现象。这个实验是十分危险的。1753年,Ломносов的朋友在作这个实验时手碰到了莱顿瓶的一个电极,遭到雷击,为科学献出了自己的生命。现代科学已查明,闪电时可以形成几十公里长几公里宽的火花放电通道,其中通过几万安培的电流,可以产生上万度的高温。因此,地面的建筑物一旦遭受雷击就引起火灾,同时造成人畜死亡。闪电时放出的能量可达几十万千瓦,科学家们想把它贮存起来供人们使用。然而,要达到这个目的,需要解决许多复

杂的技术问题，因此至今没有实现。有人在实验室内进行人工闪电实验，发现人工闪电处理过的豌豆提前分枝，提早开花结果；同样，人工闪电处理过的白菜可以增产15~20%。证明闪电对农作物的生长有一定好处。原来，在闪电火花放电通道内形成上万度的高温，可以使氧和氮形成二氧化氮，溶在雨水中成为硝酸，淋到土壤上形成硝酸盐。另外，在闪电火花通道中氮气同雨水中的氢在高温下合成氨。这些都是农作物的肥料。因此，雷电也给人类带来一些好处。

极光也是一种空间放电现象。Ломоносов从少年时代就开始研究极光，1753年他在一篇论文中曾指出，极光是由电的作用而产生的。现代科学理论认为，极光同太阳活动、地球磁场及高空空气密度有关。我们知道，太阳不断地进行核反应，有大量的带电粒子进入宇宙空间，这些粒子以400~700公里/秒的速度向地球飞来。在地球磁力的作用下这些粒子集中在南北极附近，使稀薄的大气层电离，辐射出明亮的辉光。这就是极光。

中世纪时，航海业已经比较发达。当船进入地中海时，有时可以看到在桅杆顶上有火光，水手们称为爱尔摩圣火。船长命令水手去把火拿下来。水手爬上桅杆，手刚一接触火光，火就消失了。后来，人们在雷电研究中受到启发，初步查明这是尖端处的空间放电产生的。

2. Faraday(法拉第)和Crookes(克鲁克斯)等人的贡献

雷电的研究使人类对气体放电的认识产生一个飞跃，而气体放电的奥妙吸引了许多学者。在这方面作出重大贡献的科学家有Faraday(法拉第)和Crookes(克鲁克斯)等。

19世纪初，真空技术取得重大进展，可以把容器内的压

强抽到0.1托^①左右。1851年,Ruhmkoff(鲁赫可夫)发明了电感线圈,可以产生很高的电压,高压能量足以杀死一只小动物。在这些基础上,科学家得以在实验室内进行气体放电实验。

Crookes出身于富商家庭,他被气体放电无穷的奥妙所吸引,放弃经商从事科学研究。他设计了一种称为“电蛋”(The electric egg)的仪器。如图1-1所示,这种仪器是由两个共轴的椭球组成的,两个椭球之间抽成真空,加上电压后可以观察放电的形状和颜色。他发现随着气压的降低,气体发出不同颜色的光,着火电压也下降。后来Crookes设计了一种圆柱形放电管(后来人们称Crookes管),对辉光放电的区域进行研究,发现了阴极暗区,后来人们称为克鲁克斯暗区。著名物理学家Faraday也曾研究过辉光放电的区域,发现在明亮的负辉区之后有一个暗区,这就是Faraday暗区。另外,Faraday还研究了火花放电和无声放电。德国物理学家Hittorf(希托夫)用实验证明可以把正柱区无限延长。霓虹灯就是利用这个道理,可以把很长的放电管弯曲成各种形状。1878年Müller(米勒)等人制作了当时世界上输出功率最大的电池,来研究着火电压同气压的关系。图1-2示出当时采用的一种仪器,在某一压强下放电沿长长的螺管进行,而不在两个电极最短的距离 AB 之间放电。Paschen(巴那)在以上事实的基础上,经过仔细研究发现:如果两个平板电极之间的距离为 d ,压强为 p ,则在气体成分

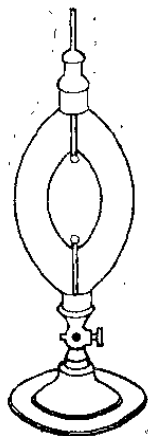


图1-1 “电蛋”

^① 压强单位, 1托为1毫米汞柱(为133.322Pa)。

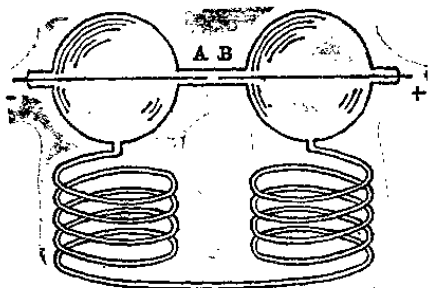


图 1-2 研究着火电压的仪器

和电极材料固定、气体纯度不变的条件下着火电压 V_f 是 (pd) 的函数,并存在一个最小值。这就是Paschen定律。

1876年,科学家从 Crookes 放电管发现一种看不见的射线,因为它是从放电管的阴极发出的,因此叫做阴极射线。这种奇妙的射线引起了许多科学家的重视,其中英国科学家 Thomson (汤姆森) 在这方面作出了杰出的贡献。1897年, Thomson 采用如图1-3所示的装置,玻璃壳中的气体压强约0.7托,在阴极K和第一阳极 A_1 之间加几千伏的直流高压,会在K和 A_1 之间产生放电。在 A_2 上加正高压,阴极射线可以穿过 A_1 和 A_2 上的小孔,形成细束,轰击末端的荧光屏,产生一个光点。实验证明,阴极射线是一种带负电的粒子流,会受到电极D和E之间的静电场力的偏转,外加磁场也会偏转阴极射线。Thomson根据偏转量的数值测量出阴极射线的荷质比^①,比目前公认的数值(1.76×10^{11} 库伦/千克)约大30%。并且发现这种带负电的粒子的质量比任何原子都小,说明这是一种新的粒子,被命名为电子。1906年,美国物理学家 Millikan (密立根) 在芝加哥大学进行了著名的油滴实验,证明,电子带负电荷,其电量为 1.6×10^{-19} 库

① 电子电量与其质量之比。

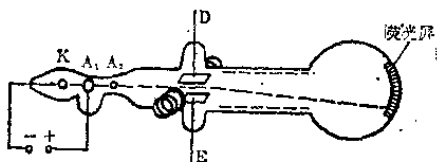


图 1-3 研究阴极射线的装置

伦,是电量的最小单元,质量为 9.1×10^{-31} 公斤。

电子的发现阐明了气体放电的本质,即在阴极K和阳极 A_1 之间电离的气体分离出了电子,说明气体放电的基本过程是中性分子或原子分离成分别带正负电荷的两部分——带负电的电子和带正电的离子。电子的发现是现代科学技术的起点,而电子是在气体放电中发现的,因此,气体放电在现代科学技术发展史上起了极重要的作用。

电子的发现使人类对气体放电的认识进一步深化,有可能使大量的实验室的感性认识上升到理性阶段。1900年,Townsend (汤生)提出了气体放电的第一个理论——繁流放电理论。根据这个理论,可以导出辉光放电的电流密度和放电着火条件,从而可以从理论上导出 Paschen 定律的表达式。

本世纪初,在进行理论研究的同时,还不断开展了气体放电的应用研究。例如,1908年,研制出水银整流管。至今还作为大功率整流器件。以后又研制成功热阴极离子管、闸流管和辉光放电稳压管,在电子技术中得到广泛的应用。

3. 物质的第四态——等离子体

1928年,Langmuir(朗缪尔)提出等离子体的概念。1967年,Langmuir的合作者 Tonks(汤克斯)曾经回忆过当时的情景:1928年的一天,Langmuir来到通用电气公司实验室,问他用什么词来描述气体放电时与壁贴近的区域。Tonks无言

对答。Langmuir建议用等离子体来描述。事实上，等离子体就是物质的第四态。1879年，Crookes曾经指出：物质可能以第四态形式存在。Langmuir提出等离子体振荡理论，这种理论强调集体现象，而Towsend繁流放电理论强调粒子间的碰撞现象。

Langmuir的研究开创了物理学的一个新的分支——等离子体物理。1937年，Alfven(阿耳文)指出，等离子体与磁场的相互作用，在空间和天体物理学中都有重要的意义。后来，Alfven建立了磁流体力学(英文缩写为MHD)用来说明太阳作为等离子体表现出的许多现象(如黑子、日珥和耀斑等)。另外，Landau(朗道)和Власов(伏拉索夫)对等离子体物理也作出了杰出的贡献。第二次世界大战以后，在氢弹实验成功的启发下，许多国家开展了受控热核聚变实验，以解决人类面临的能源危机。研究表明，采用同位素氘和氚作燃料，当温度达到1亿度左右、粒子密度和约束时间的乘积达到 10^{14} [厘米⁻³·秒]时，才可能实现得失相当的聚变反应^①。在这样高的温度下，所有物体都已成为完全电离的等离子体。因此，等离子体物理学家们为了实现受控热核反应，30多年来一直研究等离子体的约束和加热等问题，从而促使等离子体物理这门年轻的学科蓬勃地向前发展。

业已查明，宇宙中的物质有99%以上是以等离子状态存在，太阳也处于等离子体态，并在其中不断进行热核反应。因此，研究天体的演化和太阳的活动规律也是等离子体物理研究的内容之一。

另一方面，等离子体的应用还在不断扩大，特别是低温等离子体^②的应用更为广阔。本世纪40年代开始，磁流体

① 得失相当指输入的能量等于聚变反应产生的能量。

② 可以认为，温度在 5×10^4 K以下的是低温等离子体(或部分电离等离子体)，温度为 5×10^4 K以上者为高温等离子体(或完全电离等离子体)。

发电装置和等离子体焊接技术的研究,50年代开展的新型气体放电光源制造,60年代发明的气体激光器,以及70年代开展的等离子体镀膜技术,都是低温等离子体的应用实例。

从有人类生存的那一天起,人类就同自然界中的气体放电现象(如雷电和极光等)打交道。据说,人类最早的火源就是遭受雷击而燃烧的树木的火焰,而火又在生物进化中起关键的作用。19世纪以前,人们只是解释自然界中的气体放电现象。这是对气体放电认识的史前时期。19世纪初到20世纪初,人们对气体放电进行了大量的实验研究,并提出了理论,对气体放电逐渐有了更深刻的认识。本世纪30年代以后,人们认识到过去在放电管中的电离气体同1亿度下物质所处的状态都属等离子体,只是电离度和温度的差别。人们过去在放电管中研究的电离气体,因其温度低,称为低温等离子体。在热核反应中形成的电离气体,温度很高,称为高温等离子体。目前,等离子体的理论研究和应用两方面同时并进。

4. 等离子体的基本概念

任何一种物质,随着温度的升高,由固态变成液态,然后变成气态。这就是人们常见的物质的三种状态。如果气体的温度继续升高,将变成什么状态?其实,在温度升高的时候,物质受热能的激发而电离,电离度与温度 $T(K)$ 的 $3/2$ 次方成正比。如果温度足够高,就可以使物质全部电离。电离后形成的电子之总电荷量同所有的正离子的总电荷量在数值上相等,而在宏观上保持电中性。这就是等离子体的基本含意。由上可知,等离子体是物质温度升到足够高时的必然产物,是物质存在的一种形态。

等离子体作为物质的一种形态,需要一些参数来描述它。常用的等离子体参数有以下几种。

(1) 电子温度 T_e 和离子温度 T_i 在气体分子运动论中, 分子的平均能量 E 同温度 $T(K)$ 的关系如下:

$$E = \frac{3}{2} kT \quad (1-1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, 等于 1.38×10^{-23} 焦耳开⁻¹。显然, 气体分子的能量同热力学温度 $T(K)$ ①成正比。为了方便起见, 常用式(1-1)来计算等离子体中的电子和离子的能量。就是说, 这里把电子和离子看成一种理想气体。电子和离子的能量单位为电子伏特(eV),

$$1\text{eV} = \frac{3}{2} kT = 1.6 \times 10^{-12} \text{尔格} \quad (1-2)$$

将玻尔兹曼常数 k 代入上式, 可知 1eV 相当于 11600K。

在等离子体中同时存在电子和离子, 它们的温度分别用 T_e 和 T_i 来表示。应该注意, 电子温度 T_e 是一种表示能量的方式, 它的单位可以是热力学温度 $T(K)$, 也可以是电子伏特(eV), 在核聚变研究中常用后者。

值得一提的是, 人们常以为温度高一定意味着很大的热量。在普通荧光灯中电子温度大约 20000K (约 2eV)。也许你会大吃一惊, “啊! 并不觉得那么热呀!” 其实, 这里忽略了热容量。在荧光灯内的电子密度远低于大气压下的气体密度, 电子的能量虽然大, 但其数量少, 质量也小, 传给管壁的总热量非常小。因此, 你摸到管壁并不觉得很热。我们都有这样的经验, 红红的香烟头可能有几百度的高温, 落到手上并不一定会烫个大泡。但是, 一杯开水不到一百度。如果倒在手上就会烫起大泡。根本的原因是: 香烟头的热量比一杯开水的热量小得多。以上事实告诉我们, 不必为荧光灯等放电器件中具有上万度的电子温度而感到惊奇。

在实验室中产生的等离子体常常是电子温度 T_e 高于

① 也称绝对温度。

离子温度 T_i 。这是因为在一般气体放电中，外部电源将能量传递给电子，然后电子同离子碰撞，将一部分能量传递给离子。由于离子的质量比电子的大得多，因此电子只把一部分能量传递给离子，使离子的能量增加不多，因而电子温度高于离子温度。这种等离子体称为非等温等离子体。例如，在辉光放电时，常有 $T_e \gg T_i$ ，是典型的非等温等离子体。在某些特殊情况下（例如，某些核聚变装置中以及弧光放电中），电子温度与离子温度相等（ $T_e = T_i$ ），称为等温等离子体。

(2) 德拜长度 λ_D 德拜长度 λ_D 可表示如下：

$$\lambda_D = 6.9 \sqrt{T_e/n_e} \quad (\text{厘米}) \quad (1-3)$$

式中 n_e 为电子密度(厘米⁻³)， T_e 为电子温度。

Langmuir指出，要使电离气体成为一个宏观电中性的等离子体，那么电离气体所在系统的线度 L 必须远远大于 λ_D ，即 $L \gg \lambda_D$ 。德拜长度的物理意义是表示电场渗透到等离子体中的深度。如果等离子体中局部电荷的集中，或由外部引入电荷，它们所形成的静电场作用范围不超过以 λ_D 为半径的球体，球体以外的等离子体不受上述电场的影响，从而可以保障整个等离子体的稳定性。

λ_D 是等离子体的特征参数之一， $L \gg \lambda_D$ 是等离子体存在的必要条件之一。下面举两个例子加以说明。例如，受控核反应的高温等离子体中， $T_e = 10^8 \text{K}$ ， $n_e = 10^{14}/\text{厘米}^3$ ，由式(1-3)算出 $\lambda_D = 6.9 \times 10^{-3}$ 厘米，反应装置的线度 L 总在一米以上，故有 $L \gg \lambda_D$ 。又如霓虹灯中， $T_e = 10^4 \text{K}$ ， $n_e = 10^{10}/\text{厘米}^3$ ，由式(1-3)算出 λ_D 为 6.9×10^{-3} 厘米，霓虹灯的线度为几厘米以上，因此也满足条件 $L \gg \lambda_D$ 。

(3) 等离子体振荡频率 在等离子体中，如果电子稍微偏离平衡位置就受到离子强大的吸引力被拉回来，但由于惯性作用又会越过平衡位置，又被正离子的吸引力拉回来。如此往返运动就形成电子绕平衡位置的振荡。由于等