



等离子体技术 与应用实验教程

马志斌 付秋明 郑志荣 编著



化学工业出版社

等离子体技术与 应用实验教程

马志斌 付秋明 郑志荣 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容涵盖等离子体技术典型应用和等离子体技术领域最新进展,把等离子体技术的理论知识与实践教学有机结合起来,设计实验教学体系并配套搭建等离子体技术实验教学平台,培养学生从事科研工作的兴趣,提高学生的创新意识和能力。全书分为四大部分,第一部分为等离子体基本原理实验,第二部分为等离子体在材料工程中的应用,第三部分为等离子体在微电子中的应用,第四部分为等离子体在环境工程中的应用。

本书可作为理工科院校材料、物理、化学、环境等相关专业本科生、研究生的实验教材,也可供从事等离子体技术应用的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体技术与应用实验教程/马志斌,付秋明,
郑志荣编著. —北京:化学工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-122-21604-5

I. ①等… II. ①马…②付…③郑… III. ①等离子
体-实验-高等学校-教材 IV. ①O53-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第185216号

责任编辑:杨菁
责任校对:宋玮

文字编辑:徐雪华
装帧设计:孙远博

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张11 字数267千字 2014年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:30.00元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

等离子体是一种以自由电子、带电离子和活性基团为主要成分的物质形态，广泛存在于宇宙中，被称为物质的第四态。等离子体技术在微电子、光电子、新材料、航空航天、新能源、环境等领域有广泛且重要的应用，是一个关系国家能源、环境、国防安全的重要技术。在国内高校理工科专业对等离子体原理与技术的重视程度较低，具体体现在很多领域如微电子、光学镀膜等工业生产中引进的具有国际先进水平的生产线上大量使用了等离子体技术，但高等理工学校在人才培养环节中却缺乏关于等离子体理论和实践方面的训练。

等离子体技术方面的理论教学和实践训练，对于高等学校相关理工科专业的人才培养是一个至关重要的环节。目前，等离子体技术方面教科书主要将基础物理理论应用在等离子体物理学，着重于等离子体物理的理论分析，一般适用于等离子体物理专业及相关物理专业的学生；而对于其他非等离子体物理专业的理工科院校学生来说，虽然对等离子体技术的应用有着较强的需求，但苦于相关教科书理论知识较深、难度较大、不太适用一般理工科院校对等离子体技术相关知识的教学要求。因此，将等离子体理论知识融入相关实验课程，通过实验教学的方式与实际应用相结合，编写适用于一般理工科院校学生学习的等离子体技术实验教材，具有重要的实际意义。

本书在广泛调研等离子体技术在现代工业中的典型应用的基础上编写而成。本书力图通过具有代表性的实验项目的设计向学生全面展示等离子体的基本原理和广泛的工业应用，提出了实验先行、以点带面的知识传授理念，将有重要工业应用的等离子体技术知识通过实验教学环节传授给学生，从而让学生掌握等离子体技术的基本原理和方法，培养满足现代工业需要的具有等离子体技术专长的应用型人才。本书既提供了等离子体基本原理实验项目，同时结合等离子体应用实际，提供了包括等离子体在微电子、材料工程、环境领域等方面的启发性实验，着力提高学生的动手能力和思维创新能力，大部分实验项目来源于编者的研究项目。另外，本书还在每个实验项目前，对相关的背景知识和应用现状进行了一定篇幅的文献综述，大大拓展了学生对等离子体在相关研究领域的视野，利用相关教学设备设计了适合本科生操作的实验内容，提高学生的兴趣，启发学生在等离子体技术领域的自我思考与创新的能力，这也是本书的特色之一。

全书包括四大部分，第一部分为等离子体基本原理实验，第二部分为等离子体在材料工程中的应用，第三部分为等离子体在微电子中的应用，第四部分为等离子体在环境工程中的应用。本书可作为理工科院校材料、物理、化学、环境等相关专业本科生的实验教材，也可供从事等离子体技术应用的工程技术人员参考。

本书的形成过程中，湖北省等离子体化学与新材料重点实验室的历届研究生在实验方案设计、实验数据验证和实验内容的改进与更新等方面做了大量的工作，本书的出版也得到武汉工程大学教务处、杭州大华仪器制造有限公司的支持，在此一并向他们表示感谢！本书也参考了同行的研究成果，并尽量标注，若有疏漏之处敬请谅解！

由于编者水平有限，加之时间紧迫，书中的疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2014年5月

于武汉工程大学

目 录 CONTENTS

第一部分：等离子体基本原理实验	1
实验一 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量	1
实验二 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证	10
实验三 汤森第一电离系数 α 及比值 α/p 的测定	15
实验四 直流辉光放电等离子体参数的测量	19
实验五 射频等离子体的激发特性研究	25
实验六 非磁化微波等离子体电子参数的测量	29
实验七 ECR 微波等离子体离子参数的测量	33
第二部分：等离子体在材料工程中的应用	39
实验八 微波等离子体化学气相沉积实验——形核研究	39
实验九 微波等离子体化学气相沉积金刚石薄膜实验	44
实验十 直流等离子体溅射制备碳膜实验	49
实验十一 微波等离子体烧结氧化铝陶瓷实验	56
实验十二 微波等离子体冶金实验	62
实验十三 常压微波等离子体引发聚合实验	67
实验十四 微波等离子体射流制备纳米硅及其荧光特性研究	72
实验十五 直流辉光等离子体表面改性实验	78
实验十六 等离子体渗氮硬化金属表面实验	85
实验十七 微波等离子体化学气相沉积法低温合成碳纳米管	92
实验十八 纳米 TiO ₂ 薄膜的微波等离子体改性	99
实验十九 空心微珠表面磁控溅射镀金属铜膜	104
第三部分：等离子体在微电子中的应用	113
实验二十 ECR 微波等离子体刻蚀加工实验	113
实验二十一 微波等离子体 CVD 制备多晶硅薄膜太阳能电池实验	117
实验二十二 等离子体发射光谱分析实验	126
实验二十三 电子束蒸发镀膜与薄膜光学特性分析	134
第四部分：等离子体在环境工程中的应用	143
实验二十四 电晕等离子体处理有机废水的退色实验	143
实验二十五 电晕等离子体处理对有机废水化学需氧量 (COD) 的影响	150
实验二十六 常压微波等离子体射流处理有机工业废气实验	154
实验二十七 常压微波等离子体射流处理含硫废气实验	158
实验二十八 低温射频等离子体杀菌消毒实验	165

第一部分：等离子体基本原理实验

实验一 直流低气压放电现象观察及伏安曲线的测量

背景知识

气体从非自持放电到自持放电过程中的所有现象是在 1903 年前后由汤森首先发现并进行了详细的研究。他根据研究结果提出了汤森放电理论，这类放电过程称为汤森放电。汤森认为气体放电是气体分子或原子被电离产生电子和离子的结果，在外加电场作用下，电离产生的电子可以被加速，获得能量的电子接着又可以增强气体的电离，而离子在获得能量后可以轰击阴极产生二次电子发射，气体的击穿就是二次电子发射和电子雪崩电离的共同结果。汤森引入了系数 α 和系数 γ 来描述电子雪崩电离和二次电子发射。

根据汤森的理论，气体从放电至击穿的过程可以分为以下的步骤：由于宇宙射线的存在，使得气体中总是存在一定程度的电离，这称为本底电离，空间中的电荷称为本底电荷。当外加电场较小时，只有本底电离产生的电子被电场驱动定向运动，形成电流。此时电流密度很低并且在空间的分布是均匀的，电流随电压首先线性增加，逐渐趋于电流饱和。这是一种暗放电，放电区域不发光。随着电场的继续增加，电子逐渐获得了更高的能量，从而发生电子碰撞电离，电离产生的电子又可以去电离第二个中性原子或分子，如此产生电子或离子雪崩，使放电区的电子数量进一步提高，导致电流快速增加。同时，电子碰撞电离过程伴随大量光辐射过程，光辐射照射阴极表面而发生光电效应，产生阴极电子发射，也使得电子密度进一步增加。在电离发生的过程中，在产生电子的同时也产生离子，离子是向阴极运动的。随着电场的继续增强，离子的能量也在增加。当电场达到一定强度时，离子轰击阴极的能量足够大，从而在阴极产生二次电子发射，二次电子发射又极大地提高了阴极发射电子的能力，当阴极发射足够强以至于满足自持条件时，气体放电自持而发生气体击穿。

直流低气压放电可分为三个阶段：暗放电、辉光放电和电弧放电。其中各个阶段的放电在不同的领域有广泛的应用。这三个阶段的划分从现象上来看，是放电强度的不同；从内在因素来看，是其放电电压和放电电流之间存在着显著差异。

除了较高能量的电晕放电外，暗放电不能发出足够可见的光为观察者所见。暗放电区有五个唯象学区域，暗放电电流密度的增加顺序，可分为本底电离、饱和区、汤森放电区、电晕放电区和电气击穿放电区，电流强度的变化幅度可达 5 个数量级。暗放电中的电晕放电在工业上有广泛的应用，如利用电晕放电产生的臭氧对水果、蔬菜保鲜，利用电晕放电处理工业废气、废水，利用电晕放电对纺织品表面改性等。

辉光放电区中，电子能量和电子密度已经足够高，可激发碰撞产生可见光。直流辉光放电在照明器件上有着广泛的工业应用。直流低气压辉光放电依据其放电电压和电流的关系，可以分为两个区域：正常辉光放电和异常辉光放电。在正常辉光放电区，放电电压与放电管的总电流无关，到达电极上的电流密度也与总电流无关。其原因在于低电流情况下等离子体

只与阴极表面的一小部分接触，随着电流的增加，接触面积逐渐增大，直至等离子体覆盖整个阴极表面。随着放电电流的进一步增大，辉光放电进入异常辉光区，此时放电电流随放电电压的增加而增加，等离子体中的电流密度也随放电电压的增加而增加。

经典的直流低气压放电的正常辉光放电区如图 1-1 所示，从左至右，其唯象结果如下。

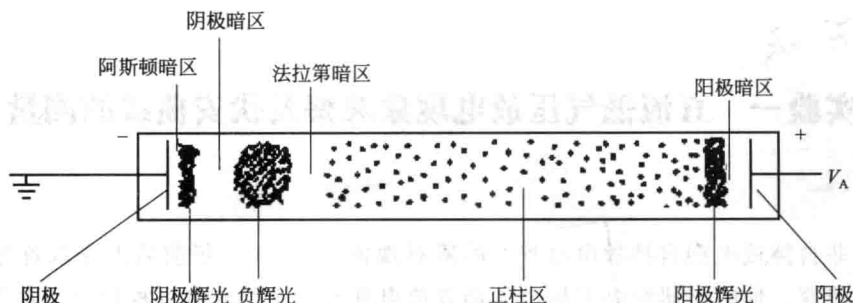


图 1-1 直流低气压正常辉光放电可见区示意图

阴极：阴极由导电材料制成，二次电子发射系数 γ 对辉光放电有很大影响。

阿斯顿 (Aston) 暗区：该区域紧靠在阴极右边，是一个有强电场和负空间电荷的较薄的区域。该区域的电子正处于从阴极出来向前的加速过程中，因此能量较低。由于这个区域里电子密度和能量太低，不能激发气体发光，因而表现为暗区。

阴极辉光区：在阿斯顿暗区右边是阴极辉光区。这种辉光对于不同的工作气体有不同的颜色，在空气放电时依放电强度的不同呈现微红色或者橘黄色，是由于从阴极表面溅射原子的激发，或等离子体中正离子向阴极移动形成的，阴极辉光区的离子密度相当高。阴极辉光区的轴向长度与放电所用的气体类型和工作气压有关。阴极辉光也可能紧贴阴极板上，并且掩盖了阿斯顿暗区。

阴极暗区：在阴极辉光的右边有一个比较暗的区域，在整个放电管中，这个区域内的电场强度处于中等，净空间电荷为正且离子密度相当高。

阴极区：阴极和阴极暗区与负辉光之间的边界之间的区域叫做阴极区。在直流辉光放电中，放电功率大部分消耗在该阴极区。在这个区域内，被加速电子的能量高到足以产生新的电离，使负辉光区和负辉光右面的区域产生雪崩电离。

负辉光区：在阴极暗区的右边是负辉光区，在整个放电区中它的光强度最强。负辉光区中的电场强度比较低，它通常比阴极辉光区长。在负辉光区内，几乎全部电流由电子运载，电子在阴极区被加速产生电离，在负辉光区产生强激发。

法拉第暗区：在负辉光区的右边是法拉第暗区，在该区里，电子由于在负辉光区里发生电离和激发作用而消耗了能量，电子能量很低而不具备激发能量。另外，法拉第暗区中的电子数密度因为发生复合和径向扩散损失而降低，净空间电荷密度很低，等离子体中的轴向电场也很小。

正电柱：正电柱呈准中性的，其内部电场很小，一般只有 $1\text{V}/\text{cm}$ 。这种电场刚好足以在它的阴极端保持所需的电离度。空气放电产生的等离子体其正电柱是粉红色至蓝色。在工作气压保持不变时，随着放电管长度的增加，阴极结构区的长度保持不变，但正电柱的长度会增大。正电柱通常是一个柱状的均匀辉光，除非触发了自发不动的或运动的辉纹，或产生扰动引发的电离波。

阳极辉光区：阳极辉光区出现在正电柱的阳极端，发光强度比正电柱强一些，在低气压辉光放电中并不是总存在，它是阳极鞘层的边界。

阳极暗区：阳极暗区存在于阳极辉光和阳极之间，它是阳极鞘层，其净空间电荷密度为负，是由于电子从正电柱向阳极运动时引起的，其内部电场大于正电柱中的电场。在异常辉光区的大电流区，电极变得足够热，阴极产生热电子发射，如果直流电源的内阻足够低，就会从辉光放电过渡到电弧放电。电弧放电在工业上主要用于照明和高温金属的冶炼。

直流放电产生等离子体相对于射频放电和微波放电来说，具有结构简单、成本低的特点，因此在工业上也有着广泛的应用。

1. 直流等离子体化学气相沉积 (DC-PCVD)

直流放电等离子体在工业上有很多的应用，其中比较重要的一项技术就是外热式直流等离子体增强低温化学气相沉积技术。直流等离子体化学气相沉积 (DC-PCVD) 是利用高的直流负偏压 ($-1\sim-5\text{kV}$)，使低压反应气体发生辉光放电，从而产生等离子体，等离子体在电场作用下轰击工件，并在工件表面沉积成膜。

直流等离子体比较简单，工件处于阴极电位，受其形状、大小的影响，电场分布不均匀，在阴极附近压降最大，电场强度最高。正因为有这一特点，所以化学反应也集中在阴极工件表面，加强了沉积效率，避免了反应物在器壁上的消耗。其缺点是不导电的基体或薄膜不能应用，因为阴极上电荷的积累会排斥进一步的沉积，并会造成积累放电，破坏正常的反应。

DC-PCVD 具有设备简单、沉积温度低 ($<600^\circ\text{C}$)、绕镀性好、涂层厚度均匀、结合强度高、涂层材料种类多、变化方便、工件不变形等优点。尤其是该技术在涂层前，可以对工件表面先进行离子氮化，再进行表面涂层，所以更加增强了涂层和基体的结合强度，提高了涂层制品的使用寿命。一般可提高使用寿命 $2\sim 6$ 倍，有的达 10 倍以上。PCVD 沉积温度低于高速钢、热作工具钢和某些模具钢的回火温度，因此涂层工艺可用于刀具、模具生产的最后工序，而不会使制品产生变形和硬度降低，特别适合精密复杂刀具、模具的表面处理。

2. 直流电弧等离子体喷射在金刚石膜制备和产业化中的应用

直流电弧等离子体是一种接近热力学平衡的等离子体，气体温度很高，离化充分，因此能够获得非常高的活性基团浓度，特别适合于化学气相沉积。因此，在利用直流电弧等离子体化学气相沉积制备金刚石时具有独特的优势，可实现大面积、高速率沉积。直流电弧等离子体已经成为材料合成最重要的手段之一。直流电弧等离子体的温度可达 10000K 以上，相对于射频等离子体或微波等离子体而言具有温度高、能量密度大、工作气体离化率高等特点，在物理气相沉积 (PVD) 和化学气相沉积 (CVD) 技术中都已得到重要应用。对于金刚石膜的沉积来说，直流电弧等离子体喷射技术的优越性在工业化应用得到体现。但大功率直流电弧等离子体喷射沉积金刚石装置和沉积技术比较复杂，其技术的稳定性还需要进一步加强，金刚石产品的品质也还需要进一步提高，目前利用该技术制备的金刚石主要用于工具和散热等领域。

3. 直流辉光放电冷等离子体在高分子材料表面改性上的应用

低气压下的直流辉光放电、高频放电、微波放电及大气压下的电晕放电均可产生冷等离子体，冷等离子体中含有大量的活性粒子，如电子、离子、亚稳态原子和分子、自由基、光子等，其中电子起主导作用。电子在电场中被加速获得能量，又与周围气体中大量的分子、原子发生碰撞，通过能量传递使它们电离产生新的离子、电子或使它们变为激发态并很快又

跳回基态，从而发出光子，或变为亚稳态，或生成自由基（对空气等离子体则产生氧自由基、氮自由基）。如果高分子材料置于这种等离子体中，这些活性粒子就会轰击高分子材料的表面，若活性粒子的能量大于高分子材料的分子键能，就有可能将高分子材料表面的分子键打断并在表面引发等离子体化学反应，从而改善高分子材料的表面性能，如提高吸湿性、染色性、印刷性、抗静电性、粘接性等，即所谓等离子体表面改性。近十几年来，国内外研

究人员在高分子材料等离子体表面改性方面做了大量研究工作，目前国内外对高分子材料表面改性所用的等离子体一般为电晕放电、高频或微波放电产生等离子体。经过深入研究和大量实验发现，利用直流辉光放电中较长的正柱区产生的冷等离子体对高分子材料进行表面改性效果非常好，而且设备简单，造价低，可以在工业上推广应用。

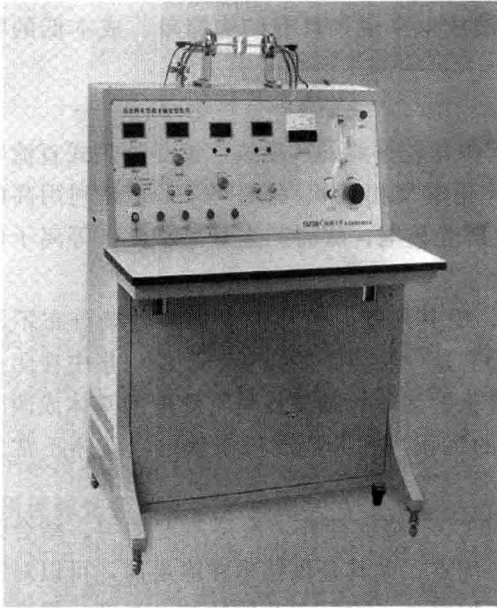


图 1-2 直流辉光放电等离子体实验装置

一、实验目的

观察直流低气压辉光放电等离子体的唯象结构，通过对辉光等离子体的伏安曲线的测量，理解辉光等离子体的电学特性。

二、实验仪器与原材料

直流辉光放电等离子体装置、高纯氩气。

直流辉光放电等离子体实验装置（如图 1-2 所示）采用的是一体化设计，顶部是放电管及水冷部分，电压可调的直流高压加在放电管两端，外面采用聚四氟乙烯绝缘材料绝缘防止漏电，冷却水可以对放电管两端的法兰进行冷却，放电管侧壁上安装有两组由钨丝制作的 Langmuir 探针，可利用等离子体诊断技术测定等离子体的电子浓度和温度等一些基本参量。测量及控制部分均布置在中部的操作面板上，本底真空由隔膜阀控制，工作气压的调节由微调阀控制，真空泵安装在机箱的内部。

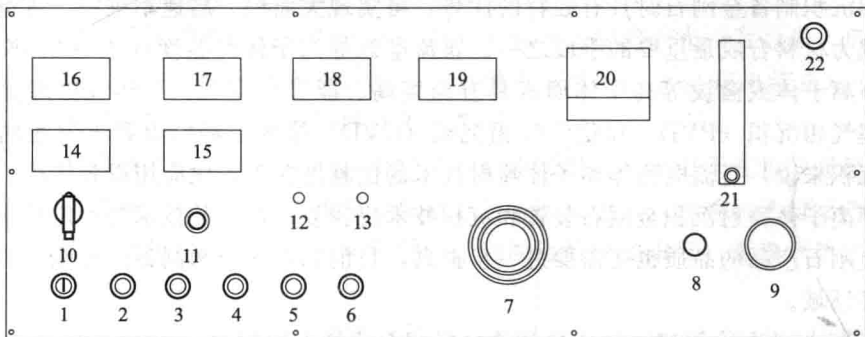


图 1-3 直流辉光等离子体实验装置操作面板图

图 1-3 是直流辉光等离子体实验装置操作面板图，各操作部件名称：

1—总电源开关

2—冷却水电源开关

3—真空泵电源开关

4—电阻真空计开关

- | | |
|------------------|------------------|
| 5—高压电源开关 | 6—探针电源 |
| 7—高压调节旋钮 | 8—高真空微调阀 |
| 9—隔膜阀调节旋钮 | 10—工作选择开关 |
| 11—电流量程选择开关 | 12—探针电压调节电位器（粗调） |
| 13—探针电压调节电位器（细调） | 14—放电管电压测量表 |
| 15—辉光电流测量表 | 16—击穿电压测量表 |
| 17—暗电流测量表 | 18—探针电压表 |
| 19—探针电流表 | 20—电阻真空计 |
| 21—转子流量计 | 22—总电源指示灯 |

各操作部件功能说明：

工作选择开关：此功能开关共分“断”、“辉光电流测量”、“暗电流测量”、“击穿电压测量”共四挡。

断：开关在此位置时，放电管电压表能显示电压输出值，在放电管电极两端没有电压。

辉光电流测量：即产生辉光放电后的电流测量。

击穿电压测量：击穿电压测量利用了气体在击穿前后在导电性能上的显著区别，其原理是当放电管中的电流增大导致气体击穿时，等离子体的电阻显著减小，与放电管串联的内部取样电阻上的电压增大，导致与电阻并联的二极管正向导通，与二极管并联的电压表的示数从零跳变为二极管的导通电位值。

暗电流测量：通常暗放电电流在 $10^{-12} \sim 10^{-7} \text{ A}$ ，采用的是通过电压求电流。取样电阻是 $1 \text{ M}\Omega$ 。

量程选择开关：分为 0.2 mA 、 2 mA 、 20 mA 、 200 mA 、 2 A 共 5 挡。

仪器主要配置及组成

直流辉光等离子体实验装置包括可拆卸的气体放电管、测量系统、真空系统、进气系统和水冷系统等部分，具有结构合理、调节方便、测量参数多等特点。

气体放电管：采用 G17 号料玻璃烧结而成，内附两组钨丝制作的 Langmuir 探针。放电管两端采用不锈钢材料制成的水冷法兰密封及放电管固定托架。

测量系统：包括辉光电压表、辉光电流表、探针电压表、探针电流表、击穿电压测量、暗电流测量。

辉光电压表：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 2000 \text{ V}$ ，测量精度 2% 。

辉光电流测量：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 2 \text{ A}$ ，共分 5 挡，测量精度 0.5% 。

探针电压表：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 200 \text{ V}$ ，测量精度 0.5% 。

探针电流表：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 200 \text{ mA}$ ，测量精度 0.5% 。

击穿电压测量：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 2 \text{ V}$ ，测量精度 0.5% 。

暗电流测量：三位半数显，测量范围是 $0 \sim 2 \text{ V}$ ，测量精度 0.5% 。

测量系统包括两组直流稳压电源，一组提供放电管工作电压，调节范围是 $0 \sim 1000 \text{ V}$ ，采用变压器隔离整流滤波。另一组为探针测量电源，调节范围是 $0 \sim 200 \text{ V}$ ，稳定度 0.1% 。

真空系统：采用 2XZ-2 型旋片真空泵，对密封容器抽除气体而获得真空，真空的测量采用电阻真空计，用于测量本底真空和工作时的工作气压。真空的密封采用金属和橡胶密

封；真空调节采用隔膜阀粗调和微调阀精细调节，调节快速方便、稳定性好。

2XZ-2 型旋片真空泵主要技术指标：

工作电压：AC220V/50Hz

抽气速率：2L/s

极限压力： 6×10^{-1} Pa

电机功率：0.37kW

进气口内径：25mm

用油量：0.65L

噪声：72LwdB(A)

进气系统：进气通过金属管路联接，可通入不同的工作气体，通过转子流量计控制气体的流量，同时通过高真空微调阀调节，控制放电管中的工作压力。

水冷系统：装置自带循环冷却水，通过自带水箱、水泵对整个系统的冷却水进行循环，可保证系统正常运行，对实验室的水源无特别的要求。

技术参数及特性

工作电压：AC220V \pm 5%，50Hz

工作气压：10~200Pa

整机功率：最大功率 1.5kW

工作电压：0~1000V 连续可调，电压

整机重量：约 100kg

稳定度 1%

外形尺寸：1000mm \times 660mm \times 1230mm

放电电流： 10^{-6} ~0.5A 可测

放电管内径：45mm

探针工作电压：0~200V，稳定度 0.1%

放电管长度：100~180mm

探针电流测量范围：0~200mA

电极距离：70~120mm 可调

三、实验原理

1. 实验装置的设计

直流辉光放电等离子体装置由放电管、真空系统、放电参数测量系统和 Langmuir 电子探针测量系统组成。放电管的结构示意图如图 1-4，真空室由水冷法兰和玻璃管构成，电极板的大小和电极距离可以调节。放电管内可以通入不同的工作气体以研究不同气体的放电特性。放电管的工作气压可以通过阀门控制调节，并通过真空计监控，工作气压范围为 10Pa~1kPa。

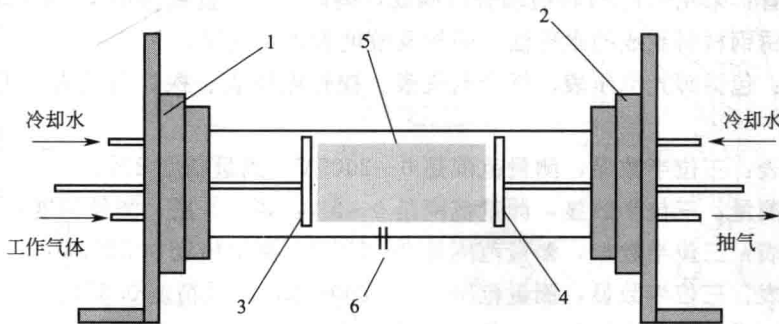


图 1-4 直流辉光放电管的结构

1, 2—水冷法兰；3, 4—电极板；5—辉光等离子体；6—探针

2. 测定放电特征曲线的几个相关电路

直流低气压放电要经历暗电流、电击穿、辉光放电、弧光放电，电流强度从 10^{-10} ~10A，其测量电路示意图如图 1-5 所示。

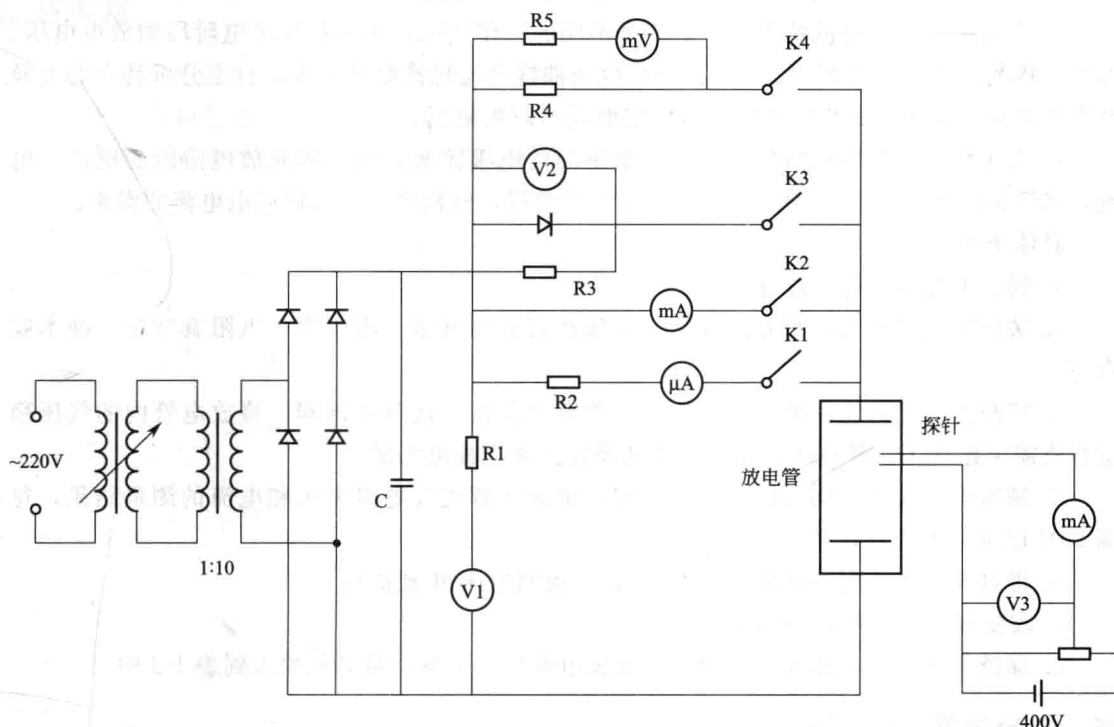


图 1-5 测量电路示意图

(1) 暗电流的测量

当电压较小时，放电管中的气体未被击穿，放电管处于开路状态，其内阻很大。放电管中流过的电流是由本底电离产生的离子和电子的定向运动形成的，其电流很小。我们采用测量大电阻上的电压来间接测量电流。如图 1-5 所示，K1、K2、K3 断开，闭合 K4，用毫伏表 mV 测量大电阻 R4 上的电压大小，即通过计算得到暗电流大小。

(2) 辉光放电电流测量

当电流较小时，如图只闭合 K1，用微安表 μA 和电压表 V1 来测量。当电流较大时，如图只闭合 K2，用毫安表 mA 和电压表 V1 来测量。

(3) 击穿电压的测定

由暗放电到辉光放电将经历一个电气击穿的过程。电气击穿瞬间放电管两端的电压即为击穿电压。如图只闭合 K3，即可测量击穿电压。其原理为：当放电管内气体未击穿时，回路上的电流很小，尽管 R3 较大，但 R3 上的电压降仍低于二极管上的正向导通电压，二极管处于截止状态，V2 示数为零。当气体击穿瞬间，回路中的电流显著增大，R3 上的电压突然增大，二极管处于正向导通状态，V2 示数显示为二极管的正向导通电压降。其中硅二极管的正向导通电压降约为 0.6~0.7V，锗二极管的正向导通电压降约为 0.2~0.3V，V2 示数突然跳变时对应的放电管两端的电压即为击穿电压，其值可由 V1 来测量。

四、实验内容与步骤

1. 了解直流辉光放电等离子体装置的工作原理，观察直流辉光放电现象，画出示意图，并进行分析。

六、思考题

1. 暗放电区电流的测量应注意什么问题？
2. 阴极与阳极显著的热效应差别的原因？
3. 工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响？其影响机制是什么？

暗放电区电流的测量应注意什么问题？

阴极与阳极显著的热效应差别的原因？

工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响？其影响机制是什么？

暗放电区电流的测量应注意什么问题？

阴极与阳极显著的热效应差别的原因？

工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响？其影响机制是什么？



暗放电区电流的测量应注意什么问题？

阴极与阳极显著的热效应差别的原因？

工作气压对辉光放电中的电压-电流曲线有何影响？其影响机制是什么？

实验二 气体击穿电压的测定及帕邢定律验证

背景知识

1. 气体放电

气体放电可以采用多种能量激励形式,依据电源频率的不同,可以分为直流、射频、微波等形式。其中直流放电因为结构简单、成本低而得到广泛应用。由直流放电的经典结构可知,在电气击穿前要经历暗放电阶段,包括本底电离区、饱和区、汤森放电区和电晕放电区。在汤森放电区,当电压继续增加时,可能发生两种放电情况。如果电源的内阻很高,只能提供很小的电流,放电管就拉不出足够的电流击穿气体,放电管仍处于只有很小电晕点的电晕区,或在电极上有明显的刷形电晕放电;但是,如果电源内阻很低,气体就会在击穿电压处击穿,放电将从暗放电区转移到正常辉光放电区。

2. 气体电击穿理论

汤森放电区包括电晕放电和气体的电击穿,在工业上有重要应用。因此研究汤森区的放电理论对于电晕等离子体和辉光等离子体的应用有重要意义。以低气压直流放电管为例,原理图见图 2-1,其暗放电区的电流-电压关系见图 2-2,当放电管上的电压超过 C 点后,电流将呈指数律上升。在 C 和 E 之间的指数增长电流区域称为汤森放电区,其电流增长规律可以基于汤森第一电离系数来进行分析。

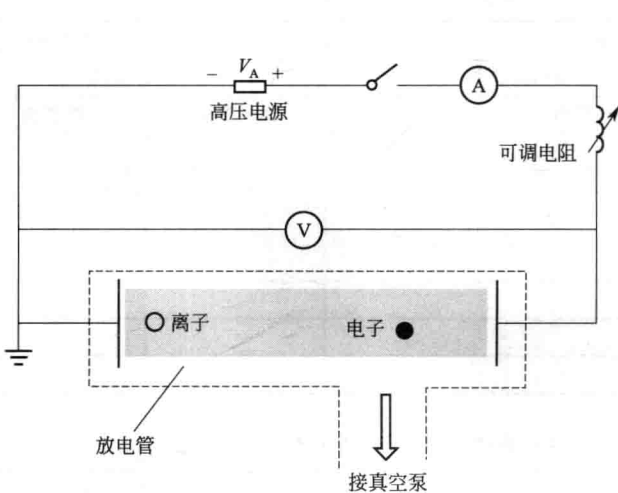


图 2-1 低气压放电管工作原理示意图

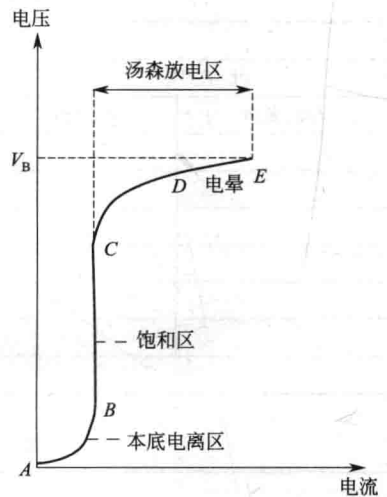


图 2-2 暗放电区电流-电压关系图

(1) 电击穿

汤森放电中的电流:

定义二次电子发射系数 γ :

$$\gamma \equiv \text{发射电子数} / \text{入射的离子或光子数}$$

是每个人射的离子或光子从阴极上发射出的电子数目。在经典放电管中,汤森区中离子能量一般较低, γ 值在 10^{-2} 或 10^{-3} 量级。

我们定义 Γ_{ea} 为在阳极上所有源产生的电子通量, Γ_{ec} 是由阴极出来的总电子通量, d 为阳极和阴极两极板间的距离, α 为汤森第一电离系数。则

$$\Gamma_{ea} = \Gamma_{ec} e^{\alpha d} \quad (2-1)$$

Γ_{ec} 包括两部分, 可写为

$$\Gamma_{ec} = \Gamma_{es} + \Gamma_{e0} \quad (2-2)$$

其中 Γ_{es} 是阴极的二次电子发射产生的电子通量, Γ_{e0} 是由于光致发射、本底辐射或其他过程在阴极上产生的电子通量, 当放电达到稳态时, 到达阳极板上的电子通量 Γ_{ea} 等于到达阴极板上的离子通量 $\Gamma_{ic} = \Gamma_{es}/\gamma$ 和从阴极板上发射出来的电子通量 Γ_{ec} 之和, 即:

$$\Gamma_{ea} = \frac{\Gamma_{es}}{\gamma} + \Gamma_{ec} \quad (2-3)$$

得到二次发射电子的阴极通量:

$$\Gamma_{es} = \gamma \Gamma_{ec} (e^{\alpha d} - 1) \quad (2-4)$$

阴极的总的电子通量:

$$\Gamma_{ec} = \Gamma_{es} + \Gamma_{e0} = \gamma \Gamma_{ec} (e^{\alpha d} - 1) + \Gamma_{e0} \quad (2-5)$$

解得:

$$\Gamma_{ec} = \frac{\Gamma_{e0}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2-6)$$

到达阳极的电子通量为:

$$\Gamma_{ea} = \frac{\Gamma_{e0} e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2-7)$$

两边乘以电子电荷得到电流密度:

$$j = j_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2-8)$$

(2) 汤森判据

在两平板电极之间的气体发生电气击穿时, 由上式给出的两平板之间的电流应无限增长 (在击穿电压下, 电流可增长 10^4 到 10^8 倍), 该条件可写为

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \quad (2-9)$$

或

$$\gamma e^{\alpha d} = \gamma + 1 \quad (2-10)$$

此为汤森判据。

根据汤森判据和汤森第一电离系数可以求出击穿电压。

取汤森判据的自然对数:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \alpha d \quad (2-11)$$

定义击穿电压为 V_b , 击穿电场为:

$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (2-12)$$

结合汤森第一电离系数, 有:

$$A p d \exp\left[-\frac{C p d}{V_b}\right] = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2-13)$$

两边取对数, 解得:

$$V_b = \frac{C p d}{\ln[A p d / \ln(1 + \frac{1}{\gamma})]} = f(p d) \quad (2-14)$$