

## 实验 D2 材料真空兼容性测试和等离子特性研究

### 【实验目的】

1. 学习基本的真空知识和技术，掌握真空的获得和测量方法。
2. 通过真空气体放电实验，验证帕邢定律，了解气体放电基本物理过程。
3. 利用光纤光谱仪研究真空气体放电等离子体光谱特性，获得等离子体基本参数，了解等离子体物理的基本知识。
4. 了解四极质谱仪工作原理，使用四极质谱仪进行真空系统检漏和气体成分分析。

### 【实验内容】

1. 使用机械泵和分子泵获得高真空。（参考附件 1-宜准 VQP01 真空平台使用说明及附件 2-宜准 VQP01 真空平台主要参数。）

1.1 启动机械泵观察记录真空度（真空计压强）随时间（5 分钟）的变化。机械泵先抽真空压强低于 10 Pa 后，启动分子泵观察记录真空度（真空计压强）随时间的变化，待分子泵达到额定转速（约需 8 分钟）后再观察记录（5 分钟）。

1.2 停止分子泵观察记录真空度（真空计压强）随时间的变化（分子泵转速降为零约需 8 分钟）。待分子泵完全停止后，关闭机械泵，记录真空度（真空计压强）随时间的变化（5 分钟）。

**思考：**真空度（真空计压强）随时间变化反映了真空系统的什么特性？

2. 通过真空气体放电实验，测量击穿电压与电极间隙和气压之间的关系，验证帕邢定律，了解气体放电基本物理过程。（参考附件 3-真空帕邢实验方案。）
3. 观察气体放电（发光）现象，利用光纤光谱仪研究气体放电产生的等离子体光谱特性，获得等离子体基本参数，了解等离子体物理的基本知识。

**思考：**等离子体光谱反映了等离子体的什么特性？能得到等离子体的什么参数？

4. 了解四极质谱仪工作原理，使用四极质谱仪进行真空系统检漏和气体成分分析。（参考附件 4-四极质谱实验方案、附件 5-四极质谱仪使用说明、附件 6-四极杆质谱仪原理和技术。）

**探讨：**研究四极电场特性及其中离子运动方程，深入探讨四极质谱仪工作原理。

### 【仪器用具】

上海宜准公司 VQP01 真空平台。（针对帕邢实验、四极质谱实验等实验项目而设计的一台综合实验装置，该装置由真空放电腔体、机械泵、分子泵、高压电源、四极质谱仪、真空计以及击穿电压测量系统等装置构成。）

### 【实验安全注意事项】

1. 操作前请检查真空腔体是否密封，检查高压电源开关、分子泵电源开关是否断开，以及应急按钮是否断开。
2. 注意高电压电源使用安全。（高压电源受真空计控制，实验前请确认真空计是否通电；通电情况下请勿插拔高压电源后面板高压输出接口，切勿接触后侧电力控制部分；实验前请检查高压电源调节旋钮，务必置零；实验过程中请勿接触高压电源后面板以及高压电源内侧结构。）
3. 若实验中用到分子泵，需机械泵先抽真空压强低于 10 Pa 以下才能开启分子泵电源。
4. 若实验中用到四极质谱仪，开启四极质谱仪时保证真空压强低于 5.0E-2 Pa。

### 【实验原理概述】

#### 一、真空基本概念

1. **真空物理学**是真空科学与技术的理论基础，是研究稀薄气体物理运动规律的理论，主要采用统计物理和热力学方法研究稀薄气体分子运动以及气体分子之间、分子与器壁之间的相互作用。

2. **真空的定义**：在给定空间内，气体压强低于一个标准大气压的气体状态（气体分子的密度低于标准大气压的气体分子密度的状态），称之为**真空**。

3. **温度的微观意义**：气体分子无规运动称为热运动，热现象的本质就是分子的热运动。气体分子的平均平动动能： $E = (1/2)mv^2 = (3/2)kT$ ，在宏观上具有温度的特性。

4. **理想气体压强**：气体分子运动理论认为气体作用在容器壁上的压力（强）来源于大量气体分子与容器壁的碰撞。理想气体压强公式： $p = nkT$ ， $n$ 为气体分子数密度， $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为热力学温度。混合气体的压强等于各组分的分压强之和（道尔顿分压定律）。

5. **气体分子碰撞之间的平均自由程**： $\bar{\lambda} = 1/(\sqrt{2}n\sigma) = 1/(\sqrt{2}n\pi d^2)$ ， $\sigma = \pi d^2$ 为碰撞截面， $d$ 为气体分子直径， $n$ 为气体分子数密度。

6. **气体的驰豫（输运）过程**：当热力学系统偏离平衡态（非平衡态），分子热运动与分子间的相互作用（碰撞）使之趋近平衡态，该过程称为驰豫。气体的驰豫（输运）过程主要包括：黏滞现象（内摩擦）是由速度梯度（速度分布不均）引起的动量传递（流动）；热导现象是由温度梯度（温度分布不均）引起的热量传递（流动）；扩散现象是由密度梯度（密度分布不均匀）引起的质量（分子数）传递（流动）。物理量的迁移靠分子热运动来输运，物理量的交接则靠碰撞。

7. **分子流（态）**：当气体压强减小（高真空），分子平均自由程大于容器的线度，分子之间无相互作用，分子只与器壁相互作用。

**8. 固体表面对气体的吸附及气体的脱附：**气体吸附就是固体表面捕获气体分子的现象，吸附分为物理吸附和化学吸附。其中物理吸附没有选择性，任何气体在固体表面均可发生，主要靠分子间的相互吸引力引起的。物理吸附的气体容易发生脱附，而且这种吸附只在低温下有效；化学吸附则发生在较高的温度下，与化学反应相似，气体不易脱附，但只有当气体和固体表面原子接触生成化合物时才能产生吸附作用。气体的脱附是气体吸附的逆过程。通常把吸附在固体表面的气体分子从固体表面被释放出来的过程叫做气体的脱附。

**9. 液体表面分子的蒸发和固体表面分子的升华：**蒸发（升华）速率与物质及其表面状态、温度、气体压强有关。当气体压强等于饱和蒸气压时，蒸发（升华）速率等于凝结速率，达到平衡。

## 二、真空的获得

**1. 真空的获得**就是人们常说的“抽真空”，即利用各种真空泵将被抽容器中的气体抽出，使该容器空间的压强低于一个大气压。

**2. 真空系统构成：**主要包括真空容器、获得真空的设备（真空泵）以及连接管道，加上阀门、测量真空的量具（真空计）及其它附属设备。

**3. 气体流量（时间  $t$ ）：** $q_{pV} = pV/t = (m/M)RT/t = (dV/dt)p = Sp$ 。

**4. 真空泵的抽速（体积流率）：** $S = (dV/dt)$ ，气体流量除以入口压力（压强）。

**5. 管道的气（流）导：**表征管道的导气能力（管壁与气体分子摩擦阻力称为气（流）阻，气导为气（流）阻的倒数），管道两端压强分别为  $p_1$  和  $p_2$ ，气（流）导  $F = q_{pV}/(p_1 - p_2)$ 。

**6. 旋片式机械泵：**为油密封的旋转式容积泵，偏心安装的转子和叶片将泵内月牙形空间工作室分为具有可变容积的三个空间 A、B、C。当转子转动时，与吸气口相通的空间 A 的容积是逐渐增大（压强减小），处于吸气过程；与排气口相通的空间 C 的容积是逐渐缩小（压强增大），处于排气过程；当空间 A 与吸气口隔绝时，即转至空间 B 的位置，气体开始被压缩，容积逐渐缩小，最后与油密封的排气口相通（即转至空间 C 的位置）；当被压缩气体超过排气压强时，压缩气体推开排气阀排出。

**7. 涡轮分子泵：**涡轮分子泵属于动量真空泵，利用高速旋转的动叶轮将动量传给气体分子，使气体产生定向流动而抽气的真空泵。涡轮分子泵由多个动叶轮和静叶轮（毫米左右的间隙）交替排列组成，动叶轮可在静叶轮间自由高速旋转，动叶轮缘的线速度高达气体分子热运动的速度。涡轮分子泵必须工作在分子流状态（低气压高真空，气体分子的平均自由程大于容器尺寸），要求配有一工作压力为  $1 \sim 10^{-2} \text{Pa}$  的前级真空泵。

8. **影响真空系统的因素**：真空系统中及内表面的污染及残留、吸附及脱附的气体及蒸汽（水分子）、蒸发、升华、渗透、扩散的物质（气体）分子，**泄漏**等。

9. **真空检漏**：为了保证真空系统能达到和保持工作需要的真空，除需要配备合适的、抽气性能良好的真空泵以外，真空系统或其零部件还必须经过严格的**真空检漏**，以便消除破坏真空的漏孔。低（粗）真空、中真空和高真空系统一般用气压检漏；对于超高真空系统，在采用一般检漏法粗检以后，还要采用灵敏度较高的检漏仪，如卤素检漏仪和质谱检漏仪来检漏。

10. **真空测量**是指用特定的仪器和装置，对某一特定空间内真空高低的测定，这种仪器或装置称为真空计。气体稀薄程度是对真空的一种客观量度，最直接的物理量度是单位体积中的气体分子数。气体分子密度越小，气体压力越低，真空就越高。但由于历史原因，量度真空通常都用压力表示。真空常用帕斯卡（Pa）或托（Torr）作为压强的单位。

**直接测量压力（高压强，低真空）**：压阻膜片真空计，膜片受压变形引起电阻变化。电容式膜片真空计，膜片受压变形引起电容变化。

**间接测量压力（低压强，高真空）**：皮拉尼（热传递）真空计，在分子流范围内，气体热传导与分子数密度成正比，从而与压力（强）成正比。电离真空计，测量离子电流（与分子数密度成正比）。

**组合真空计**：扩大压强的测量范围。

### 三、气体放电、帕邢定律、辉光放电、等离子体

**气体放电**的基本过程是利用外电场加速电子使之碰撞中性原子（分子）来电离气体。**帕邢定律**是表征均匀电场气体间隙击穿电压、间隙距离和气压间关系的定律。**辉光放电**是低压气体中显示辉光的气体放电现象，即是稀薄气体中的自持放电现象，两个平行电极板间的电压（电场）加速电子将中性原子或分子激发，而被激发的粒子由激发态降回基态时会以光的形式释放出能量。**气体放电是产生等离子体的一种常见形式**。**等离子体**由离子、电子以及未电离的中性原子（分子）的集合组成，整体宏观呈中性的物质状态。

#### 1. 气体放电

干燥气体通常是良好的绝缘体，但当气体中存在自由带电粒子时，它就变为电的导体。如在气体中安置两个电极并加上电压，就有电流通过气体，这个现象称为气体放电。

依气体压力、施加电压、电极形状的不同，气体放电有多种多样的形式。主要的形式有暗放电、辉光放电、电弧放电、电晕放电、火花放电等。

真空气体放电的基本物理过程是利用外电场加速电子使之碰撞中性原子（分子）来电离气体，主要包括粒子的激发、电离、复合、漂移、扩散等基本过程。

**气体放电是产生等离子体的一种常见形式。**

#### 2. 帕邢定律

两个电极电压增加，放电电流随之增加，当电压达到某值，放电电流骤然增大，气体放电就从暗放电（汤生放电）突然过渡到某种自持放电，称为气体击穿。气体击穿后的放电形式与电极、间距、气压等特性有关。

在（平面电极）均匀电场中，气体击穿电压是气体压力  $p$  与电极距离  $d$  乘积的函数，通称为**帕邢定律**，其特点为：在一定  $pd$  数值，击穿电压有极小值。

### 3. 辉光放电

辉光放电 (glow discharge) 是指低压气体中显示辉光的气体放电现象, 即是稀薄气体中的自持放电现象。两个平行电极板间的电压 (电场) 加速电子将中性原子或分子激发, 而被激发的粒子由激发态降回基态时会以光的形式释放出能量。放电的整个通道由不同亮度的区间组成, 即由阴极表面开始, 依次为: ①阿斯通暗区; ②阴极光层; ③阴极暗区 (克鲁克斯暗区); ④负辉光区; ⑤法拉第暗区; ⑥正柱区; ⑦阳极暗区; ⑧阳极光层。这些光区是空间电离过程及电荷分布所造成的结果, 与气体类别、气体压力、电极材料等因素有关。

1831~1835 年, 法拉第在研究低气压放电时发现辉光放电现象和法拉第暗区。1858 年, 普吕克尔在 1/100 托下研究辉光放电时发现了阴极射线, 成为 19 世纪末粒子辐射和原子物理研究的先驱。

辉光放电的主要应用是利用其发光效应 (如霓虹灯、日光灯) 以及正常辉光放电的稳压效应 (如氖稳压管)。利用辉光放电的正柱区产生激光的特性, 制做氦氖激光器。辉光放电在污水处理、灭菌消毒、聚合物材料表面改性、分析仪器离子源等方面也多有应用。辉光发电应用于发射光谱分析, 用作气体分析和元素分析的激发光源。

### 4. 等离子体

等离子体 (Plasma) 由离子、电子以及中性原子 (分子) 的集合组成, 整体宏观呈中性的物质状态。

19 世纪 30 年代英国法拉第以及其后的汤姆孙、汤森德等人相继研究气体放电现象并发现电子 (阴极射线), 这实际上是等离子体实验研究的起步时期。1879 年英国的克鲁克斯 (制成阴极射线管) 采用“物质第四态”这个名词来描述气体放电管中的电离气体。1928 年美国的朗缪尔 (Langmuir) 首先引入等离子体一词用来表征所观察到的放电物质。我国台湾学者将“plasma”翻译为“电浆”。

#### 热电离方程

随着温度的升高, 物质一般会经历从固态、液态到气态的相变过程。如果温度继续升高到  $10^4\text{K}$  甚至更高, 将会有越来越多的物质分子/原子被电离; 这时, 物质就变成了一团由电子、离子和中性粒子组成的混合物, 称为等离子体; 等离子体常被称作物质的第四态。

天体物理学家沙哈 (Saha) 给出了一个公式, 说明在热力学平衡状态下, 电离度, 即电离部分粒子数占总粒子数的比 (常温下可近似为电离部分粒子数与未电离部分粒子数的比) 跟温度的依赖关系为:

$$\frac{n_i}{n_0} \approx \frac{n_i}{n_0 + n_i} \approx 2.4 \cdot 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/kT}$$

式中的  $n_i$  代表电离的分子数密度, 单位是个/ $\text{cm}^3$ 。  $n_0$  代表未电离的中性分子数密度。  $T$  为气体温度, 单位是 K。  $k$  是玻尔兹曼常数  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ 。  $U_i$  为气体电离能, 单位是 eV。我们以室温下普通气体为例, 这时  $n_0 = 3 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$ ,  $T = 300 \text{K}$ , 对于氮气,  $U_i = 14.5 \text{eV}$ , 将这些数字代入沙哈方程, 得到  $n_i/n_0 \approx 10^{-122}$ 。可见, 室温下气体中电离的成份微乎其微。若要使电离成份占千分之一, 必须使温度  $T$  高于  $10^4 \text{K}$ 。

#### 等离子体中各种粒子间的相互作用 (碰撞)

由于静电作用力的存在, 等离子体中各种粒子间的相互作用比理想气体中粒子间的相互作用要复杂得多。等离子体中正负电荷的总数基本相等, 系统在宏观上呈现电中性, 但在小

尺度上则呈现出电磁性。等离子体中带电粒子之间的相互作用是长程库仑力，任何带电粒子的运动均受到其他带电粒子的影响。带电粒子的运动可以形成局域的电荷集中（分离），从而产生电场，带点粒子的运动又会产生电流，进而产生磁场，这些电磁场又会影响其他带电粒子的运动。

等离子体中的电子、离子以及中性粒子之间发生着各种类型的相互作用（碰撞）。粒子之间通过碰撞交换动量与动能（粒子运动状态发生变化，导致扩散或漂移）、内能（内部电子能量变化，导致激发或电离）、和电荷，使粒子发生激发、电离、复合、光子发射和吸收等物理过程。

等离子体中粒子间的相互作用可分为两大类：1.弹性碰撞：碰撞过程中粒子的总动能保持不变，碰撞粒子的内能不发生变化，也没有新的粒子或光子产生，碰撞只改变粒子的速度和方向。2.非弹性碰撞：在碰撞过程中引起粒子内能的改变，或者伴随着新的粒子、光子的产生。非弹性碰撞可以导致激发、电离、复合、电荷交换。

等离子体的性质和状态常取决于以下因素：①等离子体的组分，如原子、分子、离子、电子、化学基团等。②粒子所处的状态，如中性态、激发态、电离态、活化的分子及自由基。③各种粒子数密度，即单位体积中的粒子数。④各种粒子的温度。如果电子和离子的温度相等，称为平衡态等离子体；反之，是非平衡态等离子体。⑤等离子体所处的环境，如电场强度、磁场强度、电极结构、气流、放电容器等。⑥各种因素的作用时间。

### 等离子体的基本参数

1. **电离度**：电离程度，离子密度或电子密度与总粒子数之比。

2. **等离子体密度**：单位体积内粒子的数目。 $n_i$ 表示离子密度， $n_e$ 表示电子密度。

3. **等离子体温度**：对于平衡态等离子体（高温等离子体），温度是各种粒子热运动的平均量度。对于非平衡态等离子体（低温等离子体），由于电子、离子可以达到各自的平衡态，一般用 $T_i$ 表示离子温度， $T_e$ 表示电子温度，经常用eV作单位。

4. **德拜长度**：等离子体中任一电荷的电场所能作用的距离。等离子体中含有大量正负电荷，任一个带电粒子总是被一些异性粒子包围，所以它的电场只能作用在一定的距离内，超过这个距离，基本上就被周围异性粒子的电场所屏蔽。等离子体内电荷被屏蔽的半径，又称德拜屏蔽距离。当所讨论的尺度大于德拜长度时，可以将等离子体看作是整体电中性的，德拜长度表示等离子体能保持的最小尺度，其中包含大量带电粒子。

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2}}$$

5. **等离子体振荡频率**：等离子体中因电荷分离形成电场，由于电子和离子间的静电吸引力，使得等离子体有强烈的回复宏观电中性的趋势。离子的质量远大于电子的质量，近似认为离子不动。当电子相对于离子往复运动时，在电场作用下不断加速。由于惯性的原因它会越过平衡位置，又造成相反方向的电荷分离，从而又产生相反方向的电场，使电子再次向平衡位置运动。这个过程不断重复就形成了等离子体内部电子的集体振荡，也叫做朗缪尔振荡，频率是

$$\omega = \sqrt{\frac{n e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

### 等离子体光谱

等离子体中存在大量的以各种形式运动的带电粒子,因而由此引起的辐射过程也是多种多样的。等离子体除了会产生闪电、霓虹灯等可见光辐射,还会发出肉眼看不见的紫外线,甚至X射线。

等离子体光谱是指从等离子体内部发出的从红外到真空紫外波段的电磁辐射谱。携带了有关等离子体物理过程的信息,利用光谱学的原理和实验技术,并借助于等离子体的理论模型,测量分析等离子体光谱,对于等离子体的研究是有重要意义的。

等离子体光谱主要是线状谱和连续谱。线状谱是等离子体中的中性原子、离子等由其高能级的激发态跃迁到较低能级时所产生的,单个粒子发射的谱线强度主要决定于:①原子或离子的外层电子处于上能级的几率,②这种电子从上能级跃迁到下能级的跃迁几率,③光子在逸出等离子体之前被再吸收的几率。谱线的强度与电子和离子的密度和温度有关,每条谱线有它自己的强度分布规律,因此从谱线强度的测量,结合理论模型和上述光谱中的原子数据,可以得到电子、离子的密度、温度等信息。连续谱是电子在其他粒子的势场中被加速或减速而产生的。从连续光谱强度的测量,也可得到电子密度、温度等数据。

等离子体光谱的另一个重要方面,是谱线的形状或轮廓。光谱线并不是“线”,而是有一定宽度的轮廓。在等离子体光谱中,谱线增宽的机制较复杂,其中有两个因素比较重要,就是多普勒效应和斯塔克效应。等离子体中的各种粒子处于无规热运动状态,它们相对于观察者具有各种方向和大小的速度,就会产生多普勒频移,因此,所发射的光谱线不再是“线”,谱线“变宽”了,这就是多普勒增宽。多普勒增宽同离子速度分布有关,如离子的速度呈麦克斯韦分布,则与离子温度有关。用多普勒增宽测量高温等离子体中的离子温度是一种常用的方法。另一个重要效应是斯塔克效应。等离子体中的每个发光粒子都处于其他粒子所带电荷产生的电场中,由于电场的作用,粒子所发射的光谱线变宽,形成斯塔克增宽,理论指出这类斯塔克增宽谱线轮廓的半高全宽度与等离子体的电子密度成正比。在温度较低、密度较高的等离子体中,常用斯塔克增宽来测量电子密度。

## 四、四极质谱仪

质谱仪又称质谱计,即根据带电粒子在电磁场中能够偏转的原理,按物质原子、分子或分子碎片的质量差异进行分离和检测物质组成的一类仪器。

**四极质谱仪**的质量分析器由四根杆状电极组成,两对电极之间施加交变射频场,在一定频率的射频电压与直流电压作用下,只允许一定质荷比的离子通过四极分析器而到达接收器(马修方程被用于描述带电粒子在射频四极场中的运动方程及稳定区域)。这种分析器又称四极杆滤质器。1950年代中期,德国波恩大学的沃尔夫冈·保罗(Professor Wolfgang Paul)教授首先报道四极杆质谱仪,1989年因为在离子阱(Ion trapping)方面的研究工作获得诺贝尔物理学奖。

四极质谱仪基本原理与过程包括:离子源中的电子枪发射出的电子将气体分子电离成离子或离子团,离子或离子团在电场作用下进入四极杆过滤系统,四极杆上加有在一定频率的射频电压与直流电压,使得一定质量电荷比的离子可稳定的通过四极杆质量过滤器,而不会撞上或逸出四极杆或逸出(马修方程被用于描述带电粒子在射频四极场中的运动方程及稳定区域),从而对进入四极杆区域的离子根据质量电荷比进行过滤,电控单元测量每种质荷比的离子数量,归纳成质谱。

## 五、真空科学与技术的发展

1643 年, 意大利物理学家托里拆利发现真空和自然空间有大气和大气压力存在。他将一根一端封闭的长玻璃管灌满汞, 并倒立于汞槽中时, 发现管中汞面下降, 直至与管外的汞面相差 76 厘米时为止。托里拆利认为, 玻璃管汞面上的空间是真空, 76 厘米高的汞柱是因为存在大气压力的缘故。

1650 年, 德国的格里克制成活塞真空泵。1654 年, 他在马德堡进行了著名的马德堡半球实验: 用真空泵将两个合在一起的、直径为 14 英寸的铜半球抽成真空, 用两组各八匹马以相反方向拉拽铜球才能将两半球分开。这个著名的实验又一次证明, 空间有大气存在, 且大气有巨大的压力。

19 世纪中后期, 工业革命的成功, 促进了生产力和科学实验发展, 同时也推动了真空技术的发展。1850 年和 1865 年, 先后发明了汞柱真空泵和汞滴真空泵, 从而研制成了白炽灯泡 (1879)、阴极射线管 (1879)、杜瓦瓶 (1893) 和压缩式真空计 (1874)。

20 世纪初, 真空电子管出现, 促使真空技术向高真空发展。1935~1937 年发明了气镇真空泵、油扩散泵和冷阴极电离计。这些成果和 1906 年制成的皮拉尼真空计至今仍为大多数真空系统所常用。

1940 年以后, 真空应用扩大到核研究 (回旋加速器和同位素分离等)、真空冶金、真空镀膜和冷冻干燥等方面。第二次世界大战期间, 原子物理试验的需要和通信对高质量电真空器件的需要, 又进一步促进了真空技术的发展。

## 六、真空科学与技术的应用

随着真空技术的发展, 真空应用日渐扩大到工业和科学研究的各个方面。真空应用是指利用稀薄气体的物理环境完成某些特定任务。有些是利用这种环境制造产品或设备, 如灯泡、电子管和加速器等。这些产品在使用期间始终保持真空; 而另一些则仅把真空当作生产中的一个步骤, 最后产品在大气环境下使用, 如真空镀膜、真空干燥和真空浸渍等。

真空的应用范围极广, 主要分为低真空、中真空、高真空和超高真空应用。低真空是利用低 (粗) 真空获得的压力差来夹持、提升和运输物料, 以及吸尘和过滤, 如吸尘器、真空吸盘。

中真空一般用于排除物料中吸留或溶解的气体或水分、制造灯泡、真空冶金和用作热绝缘。如真空浓缩生产炼乳, 不需加热就能蒸发乳品中的水分。

真空冶金可以保护活性金属, 使其在熔化、浇铸和烧结等过程中不致氧化, 如活性难熔金属钨、钼、钽、铌、钛和锆等的真空熔炼; 真空炼钢可以避免加入的一些微量元素在高温中烧掉和有害气体杂质等的渗入, 可以提高钢的质量。

高真空可用于热绝缘、电绝缘和避免分子电子、离子碰撞的场合。高真空中分子自由程大于容器的线性尺寸, 因此高真空可用于电子管、光电管、阴极射线管、X 射线管、加速器、质谱仪和电子显微镜等。这个特性还可应用于真空镀膜, 以供光学、电学或镀制装饰品等方面使用。

外层空间的能量传输与超高真空中的能量传输相似, 故超高真空可用作空间模拟。在超高真空条件下, 单分子层形成的时间长 (以小时计), 这就可以在一个表面尚未被气体污染前, 利用这段充分长的时间来研究其表面特性, 如摩擦、粘附和发射等。

真空物理学是物理学的一个重要分支, 自然科学三大基础课题, 即物质结构、天体演化、生命起源, 都与真空物理学有密切关系。



真空技术已被广泛应用在工农业生产、科学研究各个领域，特别是在尖端科学技术的应用和开发中起着关键作用，已成为极端条件科学研究、新材料制造和精细加工等领域中不可缺少的重要技术条件。

### 【实验前思考题】

1. 真空物理学的研究内容及方法？
2. 真空的定义？理想气体压强公式？气体分子的平均自由程？
3. 真空气体放电的基本过程？帕邢定律？
4. 辉光放电的特点？
5. 等离子体是什么？等离子体的基本参数？
6. 四极质谱仪中四极电场特性如何？其中离子如何运动？四极质谱仪基本原理与过程？
7. 为什么机械泵先抽真空压强低于 10 Pa 以下才能开启分子泵电源？
8. 为什么开启四极质谱仪时保证真空压强低于  $5.0 \times 10^{-2}$  Pa？
9. 列举 3 个真空科学与技术应用的实例。
10. 列举 3 个等离子体科学与技术应用的实例。

### 【参考文献】

1. 巴德纯 等翻译，真空技术手册（The Vacuum Technology Book），普发真空（Pfeiffer Vacuum），2013 年。
2. 华中一 主编，真空实验技术，上海科学技术出版社，1986 年。
3. 胡汉泉，王迁 等主编，真空物理与技术及其在电子器件中的应用，国防工业出版社，1982 年。
4. 徐学基，诸定昌 编著，气体放电物理，复旦大学出版社，1996 年。
5. 金佑民，樊友三 编著，低温等离子体物理基础，清华大学出版社，1983 年。
6. 徐金瑞，田笠卿 编著，ICP 发射光谱分析，南京大学出版社，1990 年。
7. 李潮锐 等编，《物理学实验教程（近代物理实验）》，中山大学出版社，2004 年。
8. 乐永康，复旦大学等离子体物理实验讲义。
9. 上海宜准电子科技有限公司，宜准VQP01真空机组和平台使用说明书、宜准四极质谱仪使用说明书，2018年。
10. 百度百科。