

真空物理与技术

及其在电子器件中的应用

上册

胡汉泉 王迁 主编

图 1-120P

内 容 简 介

本书分上、下两册。上册包括第一至第五章，主要内容为真空技术的物理基础、清洁真空的获得、真空测量与检漏、分压强测量与质谱分析等。下册包括第六至第十二章，主要内容为真空科学与技术的一些新领域，如表面分析、真空电击穿、蒙特卡洛法的应用、真空中的气体来源与物质迁移；还有真空技术在电子器件中的应用，如消气剂、电真空器件的排气以及密封器件内真空度的测量等。

本书反映了近20年来真空技术的进展和新成就，既吸取了国外的研究成果，也总结了国内的理论与实践成果。

本书可供从事真空技术研究、生产、应用的工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

真空物理与技术 及其在电子器件中的应用

上 册

胡汉泉 王 迁 主编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张20³/₄ 527千字

1982年6月第一版 1982年6月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·2301 定价：2.55元

前 言

真空物理与技术既是物理学的一个分支，又具有基础技术的特点，应用相当广泛。

真空技术早期的发展与电子学，特别是电真空器件的发展紧密相关。从1643年托里拆利 (Torricelli) 发现大气压力开始，到1879年爱迪生 (Edison) 发明电灯泡为止的二百多年间，真空技术经历了一个漫长的发展阶段。由于真空技术初始的进步所导致的电子学的诞生及其蓬勃发展，也加快了真空物理与技术的迅速进步，奠定了真空技术的基础。例如稀薄气体分子运动论，许多优良的真空泵和测量规大多产生于这一时期，促使真空技术从低真空发展到高真空阶段。从五十年代起，真空技术跨进了超高真空范围，大大促进了电子器件的研制速度，如大功率、宽频带、高可靠、长寿命电真空器件，各种固态器件，大规模集成电路等所取得的惊人进展，都是与真空技术的长足进步息息相关的。

真空物理和技术业已发展成为一门独立的学科，并广泛渗透到几乎一切科学和工业部门，包括能源、资源、环境等新兴科学领域。当今，真空技术已推进到极高清洁真空[●]、超大抽速和负载的阶段，在现代科学研究中发挥着巨大的作用。例如：作为近代科学技术前沿的带电粒子加速器，要使粒子加速到几百亿电子伏的能量，必须用每秒几百万升的抽速，在长达约10公里的容器内，获得 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ 托(其中以粒子对撞机部分真空度要求最高)的清洁真空，以保证在贮能环内高速运动的带电粒子飞行时与残气分子发生碰撞的几率很小；世界各国为了根本解决能源问题而

● 极高真空 (Extreme high Vacuum) 一词系习惯用法，并非表示人们获得真空的程度已到顶峰。

投入巨大人力、物力建造的受控热核反应装置，要求获得相当于宇宙的真空，才能使反应物加热到几千万度甚至几亿度的高温，这是产生受控热核反应的必要条件；研究高速飞行器用的超音速风洞，需要建立其大小可与高层建筑相比的巨型低真空室，要求泵具有极高的抽速；在宇航科学中，必须在地面上模拟宇宙空间环境，以试验各种航天器的性能和研究宇宙对生物及各种仪器、材料特性的影响，这种模拟室实质上就是一台大容积、大气体负荷的清洁超高真空设备。

真空物理与技术的飞速发展，是由于真空技术与物理学、电子学及其它学科相互渗透与溶合的结果。例如：由于潘宁放电的数理模型日趋完善，使得溅射离子泵的工程设计准确可靠；对低温吸气机理深入探索的结果，研制出了各种性能优异的低温泵和低温吸附泵，成为大型容器快速获得清洁超高真空的重要手段；对金属和合金薄膜与体内吸气机理的卓有成效的研究，导致各种高效能消气剂的问世，对长期维持电真空器件等密封真空装置的真空度发挥着巨大的作用；大型容器与密封电真空器件检漏理论的日趋完善，使检漏技术提高到新的水平；近年来，对真空中气体传输几率的理论研究工作有了很大发展，特别是蒙特卡洛法应用于气体流导计算，指导真空测试装置、宇航模拟室和涡轮分子泵等超高真空泵的设计方面取得了良好效果；对真空电击穿机理的深入研究，使高电压真空装置的设计与制造更为安全可靠。

现在，真空技术的基本任务仍然是“提供一个比大气稀薄的环境”，但现代科学技术对“稀薄”程度及其组成的要求越来越高，与五十年代相比，有了质的飞跃。近年来，真空物理与技术的突出进展是：从研究空间中气体分子的运动规律，转向对真空中气-固界面及中性粒子、带电粒子、电磁辐射与固体表面相互作用机理的研究，并发展成为一门新兴的边缘学科——表面科学，使真空科学技术具有了更强大的生命力，它必将对未来科学技术的发展产生巨大影响。

以上就是本书编写时所面临的真空科学技术发展概况。因此，给本书的编写提出了如下要求：既要阐明真空技术的物理基础，充分反映现代真空技术的成果和发展动向，又要概括真空工艺的丰富实践经验，以便对各个领域内的真空技术工作者有所帮助。为此，我们邀集了一部分有关工作者，包括高等院校的教师、科研和工程技术人员参加编写。在编写过程中，我们力求做到：

(1) 为了充分反映近二十年来真空技术的成就，本书不仅吸取国外学者的研究成果，也十分注意吸取国内的理论与实践成果；

(2) 本书力求将有关的物理模型和概念阐述清楚，以期读者得到较坚实的物理基础，有助于分析能力的提高。例如，回顾真空技术发展的历史可知，虽然同一种真空泵、真空计、质谱计等，其结构和性能在不断地更新，但总是基于碰撞、电离、吸附、脱附、扩散、溶解、渗透等基本过程。就以溅射离子泵而言，必须充分了解潘宁放电的各种模式、带电粒子轰击下的物质溅射过程、薄膜吸气作用与机理等，才能很好地掌握和应用；

(3) 真空技术的应用范围十分广泛，作为一本篇幅有限的参考书，不可能一一罗列。因此，本书以真空技术在电子器件方面的应用为例予以说明。之所以如此，不仅在于真空技术与电子器件的关系十分密切，还在于它所涉及的基本真空问题对其它应用领域也有相当的适用性和参考价值。

本书分上、下两册出版。上册主要内容为真空技术的物理基础、清洁真空的获得、真空测量与检漏、分压强测量与质谱分析等。下册主要内容为真空科学与技术的某些新领域，如表面分析、真空电击穿、蒙特卡洛法的应用、真空中的气体来源与物质迁移，还有真空技术在电子器件中的应用，如消气剂、电真空器件的排气及密封器件内真空度的测量等。

本书虽经两年时间的组织编写，数易其稿，但由于我们实践与理论水平有限，不足甚至错误之处在所难免，恳请广大读者批

评指正。

本书由胡汉泉、王迁主编，李昌全、马骊平为主编助理，各章节编写人（按章节顺序）是王欲知、郭元恒、高本辉、何炜、张振祥、陈丕瑾、毛福明、于炳琪、胡耀志、韩瑀瑛、贺贤能、于广陵、陈建中、何维德、李昌全、马骊平、胡汉泉、庞世瑾、张永康、王亦曼、徐廷伟。

第一至第五章为上册，第六至第十二章为下册。全书的审核、纂编由主编、主编助理及陈丕瑾同志共同完成。

最后，谨向校阅了本书部分章节的唐政清、查良镇、范垂祯、朱允伦等同志表示深切的谢意。

目 录

绪论	1
第一章 真空技术的物理基础	3
§ 1.1 气体分子运动论的基本原理	3
1.1.1 概述	3
1.1.2 气体的压强	5
1.1.3 分压强与总压强——混合气体分压定律 (道尔顿分压定律)	7
1.1.4 气体分子的速率分布——麦克斯韦分布律	8
1.1.5 平均自由程及自由程长度分布律	11
1.1.6 碰撞截面	19
1.1.7 碰撞于表面的分子数	22
1.1.8 分子从表面的反射——余弦定律 (克努曾定律)	23
1.1.9 真空区域的划分	25
§ 1.2 电子在稀薄气体中的碰撞	25
1.2.1 漂移场与加速场	26
1.2.2 电子在加速场中的碰撞规律(一)——碰撞序分布律	27
1.2.3 电子在加速场中的碰撞规律(二)——碰撞次数分布律	30
1.2.4 应用举例	32
1.2.5 电子碰撞气体分子引起的电离	35
1.2.6 电子代分布律及电子繁流微观理论——“真空”中的电子 繁流现象	36
§ 1.3 气体中的输运现象	43
1.3.1 压强较高时的输运现象	44
1.3.2 压强较低时的输运现象	49
1.3.3 热流逸现象	55
1.3.4 热交换对压强的影响	58
§ 1.4 气体的流动	59
1.4.1 气体沿管道的粘滞性流动——泊稷叶 (Poiseuille) 公式	60

1.4.2	气体沿管道的分子性流动——克努曾 (Knudsen) 公式	61
1.4.3	气体通过小孔的流动	63
1.4.4	流导与流阻	64
1.4.5	复杂截面管道的流导	66
1.4.6	短管的流导	67
§ 1.5	表面吸附	69
1.5.1	气-固界面	69
1.5.2	物理吸附与化学吸附	70
1.5.3	吸附速率	81
1.5.4	吸附的动力平衡与吸附量	93
1.5.5	共吸附和冷致捕集	103
§ 1.6	表面脱附	106
1.6.1	热脱附	106
1.6.2	电子诱导脱附	118
1.6.3	离子溅射脱附 捕集离子的再释放	127
1.6.4	光致脱附	132
§ 1.7	气体在固体中的溶解和扩散	134
1.7.1	溶解	134
1.7.2	扩散和渗透	137
1.7.3	解溶	143
§ 1.8	真空中的相变过程和化学过程	151
1.8.1	相变和化学变化	152
1.8.2	蒸发	155
1.8.3	化学反应的基本规律	161
第二章	清洁真空的获得	174
§ 2.1	旋转机械真空泵的油蒸气返流	174
2.1.1	旋转机械真空泵的油蒸气返流	174
2.1.2	旋片式机械真空泵的小型化与仪器化	181
§ 2.2	扩散泵的油蒸气返流	182
2.2.1	扩散泵的性能和指标	183
2.2.2	油扩散泵的油蒸气返流	189
2.2.3	低压强下油蒸气沿导管的传输	193
2.2.4	减少返油的措施	195

§ 2.3	低温吸附泵	198
2.3.1	分子筛的吸气性质	198
2.3.2	吸附泵的结构	202
2.3.3	分子筛吸附的负载线	204
2.3.4	吸附泵的性能与指标	210
§ 2.4	钛升华泵	214
2.4.1	钛薄膜的吸附性能	215
2.4.2	钛升华泵的结构与使用	224
§ 2.5	钛升华离子泵与径向静电场式钛泵	231
2.5.1	钛升华离子泵	231
2.5.2	径向静电场式钛泵	237
§ 2.6	溅射离子泵	243
2.6.1	潘宁放电	243
2.6.2	溅射离子泵内的物理过程及对各种气体的排除机理	255
2.6.3	溅射离子泵的性能与计算	263
§ 2.7	涡轮分子泵	269
2.7.1	分子泵的类型	270
2.7.2	涡轮分子泵的理论	276
2.7.3	涡轮分子泵的性能	284
2.7.4	涡轮分子泵的使用	290
§ 2.8	低温冷凝泵	292
2.8.1	低温冷凝泵内的物理过程	293
2.8.2	冷凝泵的结构	310
§ 2.9	超高真空的获得	314
2.9.1	决定极限压强的因素	315
2.9.2	材料的选用及其处理	317
2.9.3	真空泵的选用	325
第三章	真空测量	336
§ 3.1	热传导真空计的工作原理	336
3.1.1	热传导真空计的测量范围	336
3.1.2	电阻真空计(皮喇尼真空计)	339
3.1.3	环境温度的影响及其补偿	344

X

3.1.4	压强测量上限的扩展	346
3.1.5	热传导真空计压强测量下限的扩展	349
3.1.6	定温电阻计在离子器件中的应用	349
3.1.7	热偶真空计	351
§ 3.2	薄膜真空规	355
§ 3.3	振膜真空规	360
3.3.1	振膜规的工作原理	361
3.3.2	振膜规的测试方法	362
§ 3.4	电离真空计	365
3.4.1	电离真空规的工作原理	365
3.4.2	传统型电离规	367
3.4.3	超高真空电离规	369
3.4.4	高压强电离规	378
3.4.5	冷阴极电离真空计	382
3.4.6	电离真空规工作中的几个问题	386
§ 3.5	真空计的校准	394
3.5.1	静态膨胀法	395
3.5.2	动态流导法	400
3.5.3	磁悬浮转子标准真空规	405
第四章	分压强测量和质谱分析	416
§ 4.1	质谱计的主要性能参数	417
§ 4.2	磁偏转质谱计	423
4.2.1	磁偏转质谱计的工作原理	423
4.2.2	磁偏转质谱计的分辨能力	426
4.2.3	小型磁偏转质谱计	429
§ 4.3	回旋质谱计	434
4.3.1	回旋质谱计的工作原理	434
4.3.2	回旋质谱计的离子运动方程及轨迹	437
4.3.3	回旋质谱计的主要性能参数	444
4.3.4	回旋质谱计的工作特性	451
4.3.5	回旋质谱计的其它结构形式	454
§ 4.4	四极质谱计	457

4.4.1	四极质谱计的工作原理	457
4.4.2	四极质谱计的质量歧视	475
4.4.3	四极质谱计的设计和结构	477
4.4.4	其它四极电场质谱计	485
§ 4.5	其它质谱计	487
4.5.1	射频质谱计	487
4.5.2	谐振感应质谱计	489
4.5.3	飞行时间质谱计	491
§ 4.6	质谱计性能讨论	496
§ 4.7	质谱分析技术	504
4.7.1	识谱方法	504
4.7.2	气体引入装置	517
4.7.3	分析系统	521
§ 4.8	质谱计在电真空技术中的应用	529
第五章	真空检漏	540
§ 5.1	检漏基础	540
5.1.1	漏气的判断和漏孔的表示方法	540
5.1.2	漏孔的气流特性	543
5.1.3	标准漏孔及其漏率的测量	546
5.1.4	检漏方法的基本原理	557
5.1.5	检漏方法的选择	573
5.1.6	虚漏、漏孔堵塞和补漏剂	577
§ 5.2	质谱检漏仪	580
5.2.1	质谱检漏仪的工作原理	580
5.2.2	质谱检漏仪的结构	585
5.2.3	示漏气体的选择	589
5.2.4	最小可检漏率及最小可检浓度	590
5.2.5	反应时间和清除时间	592
5.2.6	提高质谱检漏仪检漏效果的方法	594
5.2.7	反流氮质谱检漏仪	596
5.2.8	氮质谱检漏仪的使用和维护	597
§ 5.3	电真空器件零部件的检漏	599

Ⅱ

5.3.1	利用气体放电进行检漏	600
5.3.2	利用显色检漏法确定漏孔的位置	602
5.3.3	零部件的质谱检漏法	604
§ 5.4	电真空器件在排气台上的检漏	610
5.4.1	利用电离规检漏	610
5.4.2	双真空检漏	615
5.4.3	溅射离子泵检漏	617
5.4.4	残余气体分析器检漏	622
5.4.5	利用电真空器件的阴极检漏	622
§ 5.5	密封电真空器件的无损检漏	623
5.5.1	荧光检漏法	623
5.5.2	氦85同位素检漏法	624
5.5.3	慢性漏气的加速检测	625
附表		637

绪 论

真空一词系表示低于大气压强的特定空间状态。

今天，真空技术的发展已可获得从大气压强直到约 10^{-16} 托的宽达19个数量级的压强范围。

地球上的真空是通过排气手段在特定容器中得到的。真空度表征气体稀薄的程度，它用压强值来计量。所谓压强就是气体分子作用于单位面积器壁的力。真空度越高，相应的压强就越低。

曾经流行过各种各样的压强单位，但真空技术中历来采用毫米汞柱单位制。后来，美国真空协会首先废除了“毫米汞柱”(mmHg)，而采用德国在二次大战前使用的“托”(Torr)。本书也采用托作为真空量度单位，在数值上它和毫米汞柱基本相同，但托的称呼和书写要方便得多。为了单位制之间换算的方便，最近，国际上主张采用MKS制来取代汞柱单位制，即用“帕”(Pascal)作为压强单位。由于历史和习惯的原因，目前国内外期刊文献上常是两者混用。本书将不同压强单位间的换算关系列于书末附表1，以利读者查用。

实际上，衡量真空度的高低及其区域划分，可以引用比压强这个物理量更为本质的概念，诸如气体分子密度 n 、平均自由程 λ 和形成一个单分子层的时间常数 τ 等。

分子密度 n 表示单位体积内的平均分子数。

平均自由程 λ 表示气相中一个分子与其它分子连续两次碰撞间所经历的统计平均距离。

形成一个单分子层的时间 τ ，系指在新鲜表面上覆盖一个分子厚度的气体层所需要的时间。

下表简明地示出了不同真空区域的划分及其对应的物理状态

不同真空区域的物理状态及其应用范围

真空区域	物理状态	获得真空的目的	应用举例
低真空 (大气压 ~ 10 托)	低压强	形成压强差	支撑, 提升, 输运(气动, 吸尘, 过滤), 造型
		减压	风洞
中真空 ($10\sim 10^{-3}$ 托)	低的分子密度(平均自由程 λ 约等于容器特征尺寸)	排除活性气体成分	灯泡, 熔炼, 烧结, 包装, 封装, 检漏
		排除吸留和溶解的气体	干燥, 脱水, 浓缩, 冷冻干燥, 去气, 深冷干燥, 浸渍
		减少能量转移	隔热
高真空 ($10^{-3}\sim 10^{-8}$ 托)	分子性流动(平均自由程等于或大于容器特征尺寸)	减少能量转移	电绝缘, 真空微量天平, 空间模拟
		减少碰撞	各类电子管, 质谱计, 同位素分离装置, 电子显微镜, 电子束焊接与加工装置, 真空蒸镀, 材料精炼, 分子蒸馏, 空间模拟
超高真空 ($10^{-8}\sim 10^{-12}$ 托)	形成单分子层的时间长	获得清洁表面	表面分析与研究, 材料提纯, 光电器件
		减少碰撞	粒子加速器, 贮存环
极高真空 ($< 10^{-12}$ 托)	出现分子统计涨落现象	减少碰撞	可控热核反应装置, 模拟月球表面真空环境

和应用。

低真空、中真空覆盖范围为大气压到 10^{-3} 托, 气相分子数远多于表面覆盖的分子数, 此时排出的气体主要是来自气相的气体。

高真空覆盖范围为 $10^{-3}\sim 10^{-8}$ 托, 系统内气体分子主要停留在器壁表面上; 气相分子平均自由程等于或大于容器的特征尺寸。

目前, 超高真空到极高真空的覆盖范围为 $10^{-8}\sim 10^{-16}$ 托, 形成单分子层的时间等于或长于对物体表面进行分析研究所需要的时间。

第一章 真空技术的物理基础

§ 1.1 气体分子运动论的基本原理

1.1.1 概 述

气态是物质的最简单的一种存在状态。气态的最主要特征是，它本身既无一定形状，亦无一定体积；任何数量的气体，都能无限制地膨胀而充满于任何形状与大小的容器中。

气体又能均匀地混合。任何不同种类的气体，不论其比例如何，都能混合成均匀状态。

气体状态方程 早期对气体实验研究的主要结果，可以归纳为一个方程式：

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1.1)$$

式中 P ——气体压强；

V ——体积；

T ——绝对温度；

M ——气体质量；

μ ——分子量；

R ——气体普适常数。

这个方程称为理想气体状态方程，概括了玻义耳定律、盖·吕萨克定律及阿佛伽德罗定律的结果。对真实气体而言，这些定律只在压强较低、温度较高时才精确成立，而压强高、温度低时则有较大偏离，故常称完全符合这几个定律的气体为理想气体，而上述方程亦就相应称为理想气体状态方程。

如令 $M = \mu$ ，即取一个克分子的气体，则式 (1.1) 变为

$$PV = RT \quad (1.2)$$

上式常称克拉泊龙方程；而式 (1.1) 便称克拉泊龙综合方程。

上述两个方程对任何种类气体都成立，即 R 对各种气体都是一样的。 R 称气体普通常数，其单位及数值要视 P 、 V 所用单位而定。

如用 CGS 单位，则

$$R = 8.31 \times 10^7 \text{ 尔格/克分子} \cdot \text{度}$$

如能量用卡表示，则

$$R = 1.987 \text{ 卡/克分子} \cdot \text{度} \approx 2 \text{ 卡/克分子} \cdot \text{度}$$

在真空技术中，如压强用托，体积用升，则

$$R = 62.36 \text{ 托} \cdot \text{升/克分子} \cdot \text{度}$$

气体分子运动论的基本假设 对于气体的大量现象及实验总结出来的规律（上面提及的只是最重要的定律），需要进一步作出解释，于是发展起来了气体分子运动论。这个理论主要完成于十九世纪下半期。它的基本观点如下：

(1) 任何气体均由大量微小的质点所组成；在单一气体中，这些质点是完全相同的。这些微小质点称为分子。

(2) 分子尽管很微小，但仍然有一定的体积。因此，它们在运动时相互不断碰撞，而且也与容器器壁碰撞；这些碰撞完全是弹性的。

这就是气体构造的分子假说。为了将这个分子假说构筑成一理论体系，气体分子运动论还假设：

(1) 分子的运动及碰撞遵从牛顿定律，可以应用经典力学来处理。

(2) 分子的数目是巨大的；气体的宏观性质是大量分子微观性质的统计平均值，可以用统计学的方法求出。

正是经典力学与统计学的结合，成功地实现了气体分子运动论理论体系的建立。

理想气体 在分子运动论中，有时为了反映最基本的现象而

使用一些较简单的理论模型。理想气体就是其中最重 要 的 一个模型。

理想气体的分子运动论的定义是：

(1) 气体分子的体积与其活动空间相比是微不足道的；在考虑分子的运动时，可以将分子看成几何点。

(2) 分子之间没有相互作用力；除了碰撞之外，每个分子的运动是完全独立的，不受其它分子的影响。

这个定义与前面实验定律所给出的定义是一致的。

低压气体与理想气体很接近，因此在真空技术中完全可以应用理想气体的理论而不必加任何修正。

为了对气体分子有一些概念，现列举数据如下。

一克分子气体中的分子数（阿佛伽 德 罗 常 数）—— 6.023×10^{23} 个/克分子；

标准状态下（760 托， 0°C ）一立方厘米中的分子数（洛 喜 密 脱 数）—— 2.69×10^{19} 个/厘米³；

分子直径（埃） He 2.18；H₂ 2.75；O₂ 3.64；CO₂ 4.65；

分子质量（ $\times 10^{-24}$ 克） He 6.692；H₂ 3.347；O₂ 53.12；
CO₂ 73.612。

1.1.2 气体的压强

处在一定容器中的气体，对器壁施有压力。达到平衡后，这个压力是恒定的。单位面积器壁上所受到的气体压力称为压强——这就是压强的宏观定义。压强的单位由力的单位及面积的单位所决定，如用 CGS 制，则为达因/厘米²；如用 IS(MKS) 制，则为牛顿/米²，即帕（Pa）等。关于真空技术中所采用的压强单位，在绪论中已有讨论，此处不再重复。

气体分子运动论认为，气体的压力是大量分子不断碰撞器壁的结果。所谓压强，即为大量分子碰撞于单位面积器壁而产生的动量变化率的总和——这就是压强的微观定义。从这个定义可知，