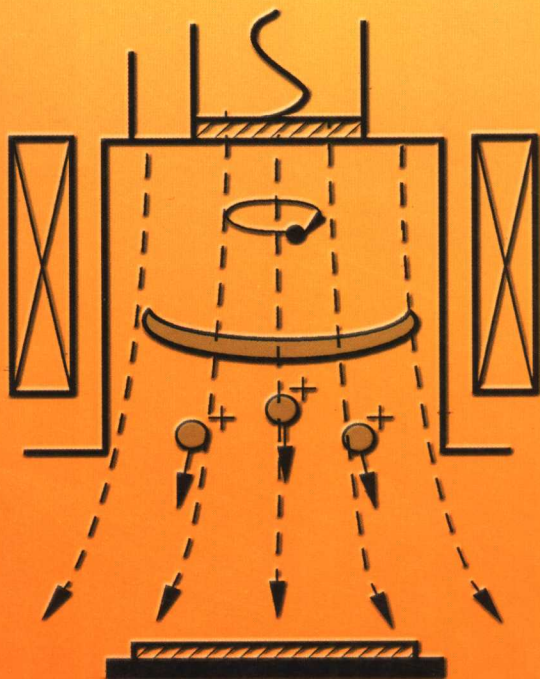


Thin Film Technologies and Materials

薄膜技术 与薄膜材料

田民波 编著



清华大学出版社

新材料及在高技术中的应用丛书

薄膜技术与 薄膜材料

田民波 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

薄膜及微细加工技术的应用范围极为广泛,从大规模集成电路、电子元器件、平板显示器、信息记录与存储、MEMS、传感器、太阳能电池,到材料的表面改性等,涉及高新技术产业的各个领域。本书内容包括真空技术基础、薄膜制备、微细加工、薄膜材料及应用、薄膜成分与结构分析等5大部分,涉及薄膜技术与薄膜材料的各个方面,知识全面,脉络清晰。全书共17章,文字通俗易懂,并配有大量图解,有利于对基本知识的理解、掌握与运用。对于从事相关行业的科技工作者与工程技术人员,本书具有极为难得的参考价值,同时也是其他感兴趣读者了解薄膜材料与技术在高新技术中应用的一本很好的入门书籍。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案再现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜技术与薄膜材料/田民波等著. —北京:清华大学出版社,2006.8

(新材料及在高技术中的应用丛书)

ISBN 7-302-13238-0

I. 薄… II. 田… III. 薄膜技术—研究 IV. TB43

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第066083号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 宋成斌

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市新茂装订有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 170×230 印 张: 62 字 数: 1213 千字

版 次: 2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-13238-0/TB·104

印 数: 1~3000

定 价: 150.00 元



《新材料及在高技术中的应用丛书》序言

材料、信息技术与能源称为现代人类文明的三大支柱。国民经济的各部门和高技术领域的发展都不可避免地受到材料发展的制约或推动。材料科学技术为建设现代工业和现代农业提供基础物质,为传统产业的更新改造和高技术产业的兴起提供共性关键技术,也为国防建设提供重要的物资保证。实际上,新材料的发展水平已经成为衡量一个国家高技术水平高低和综合国力强弱的重要标志。

与此同时,人类已进入蓬勃发展的高技术时代。计算机、多媒体、移动电话、互联网、核能、航天和太空探索、激光、基因工程、克隆技术、电动汽车和高速火车等,其中不少已经或即将涉及我们的日常生活。

当前一些发达国家正集中人力、物力,寻求在新材料方面的突破。美国、欧盟、日本和韩国等在其最新国家计划中,都把新材料及其制备技术列为国家关键技术之一加以重点支持。例如,美国国家研究理事会(National Research Council, NRC)确定的“未来30年十大研究方向”中与材料直接和间接相关的就有8项;美国国家关键技术委员会把新材料列为影响经济繁荣和国家安全的6大类关键技术的首位。20世纪90年代初确定的22项关键技术中,材料占了5项。

我国“十五”期间确定的8个对增强综合国力最具战略影响的高技术领域,分别是信息技术、生物技术、新材料技术、先进制造与自动化技术、资源环境技术、航天航空技术、能源技术、先进防御技术等领域。其中重点是信息、生物和新材料3个领域。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的颁布,站在历史的新起点,以增强自主创新能力为主线,以提高综合国力为目标,为我国新材料及高新技术的发展

指明了方向。

《新材料及在高技术中的应用丛书》正是在这种背景下出版的。

何谓“新材料”？简单地说，就是那些新出现或已在发展中的，在成分、组织、结构、形态等方面不同于普通材料，具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料。目前比较活跃的领域包括：电子信息、光电、超导材料；生物功能材料；能源材料和生态环境材料；高性能陶瓷材料及新型工程塑料；粉体、纳米、微孔材料和高纯金属及高纯材料；表面技术与涂层和薄膜材料；复合材料；智能材料；新结构功能助剂材料、优异性能的新型结构材料等。

何谓“高技术”？简单地说，就是采用新材料、新工艺，产生更高效益，能促进人类物质文明和精神文明更快进步的技术。有人认为，高技术就是“尖端技术”、“先导技术”、“未踏技术”等。以这类技术形成的产业具有高成长率、高利润、高风险、高变化率、高知识水平等特点，也有人把知识密集型产业称为高技术产业。

新材料、高技术的发展具有下述特征：

(1) 新材料与高技术相互促进，二者相结合可转化为巨大的生产力

从科技发展史看，重大的技术革新往往起始于材料的革新。例如，20世纪50年代镍基超级合金的出现，将材料使用温度由原来的700℃提高到900℃，从而导致超音速飞机问世；高温陶瓷的出现促进了表面温度高达1000℃的航天飞机的发展。半导体材料及大规模集成电路技术的不断突破，使电子计算机的体积越来越小、能力却成千上万倍地提高；晶体管(1947年)、集成电路(1959年)和微处理器(1970年)的发明提高了数据运行速度；硬盘(1956年)、调制解调器(1980年)和鼠标(1983年)的发明又大大提高了获取数据的能力；因特网(1989年)的广泛应用打破了传统的信息堡垒，使人们廉价地获取各种知识成为可能；未来还会出现一些“智能”型装置，例如手表型对话器、“智能”冰箱、“智能”居室等。

(2) 新材料与高技术领域是科学与技术创新的主战场

在信息社会飞速发展的今天，作为人机对话窗口的显示器已成为世界电子信息工业的又一大支柱产业。2005年韩国三星电子分别展示出102型的PDP和82型的TFT-LCD，这标志着该领域的技术壁垒已被打破，平板显示器件(FPD)已进入快速增长时期。1998—2005年FPD的年均增长率高达21.5%，预计2006年全球FPD市场将占整个显示器市场(1018亿美元)的近60%，从1998年的110亿美元增加到2006年的610亿美元。FPD中，2004年全球TFT-LCD产值约476亿美元，占80%以上的市场份额，专家预计2010年将增长为1350亿美元；近三年全球PDP市场年均增长率近80%，预计2010年PDP销量将达3120万台。

除了TFT-LCD和PDP之外，有机电致发光显示器(OLED和PLED)、发光二极管(LED)、无机电致发光(无机EL)、场致发光(FED)、真空荧光管(VFD)、电子纸、数字式光处理器(DLP)等平板显示领域也有长足进展。许多跨国公司无一

不在这一新材料、高技术领域展现其创新实力。值得注意的是,日本、韩国及我国的台湾地区在控制 FPD 关键技术的同时正将劳动力密集型的模块组装工序转移到我国大陆,利用劳动力便宜的优势,赚取超额利润。大陆企业应当机立断,打入 FPD 的产业链,尽快掌握关键技术,特别是实现关键材料的国产化。发展 FPD 产业符合我国国情,不仅可以增强我国的创新实力,缩小与先进工业国家在信息产业上的技术差距,而且可以带动我国的基础产业,为真正的“中国制造”夯实基础。

(3) 高新技术的迅猛发展对新材料提出更高的要求

小型、轻量、薄型、高性能是数字网络时代电子设备的发展趋势。便携式信息机器正以迅猛之势发展,这种新机器将个人电脑的信息处理能力、互联网的通信网络、电视栩栩如生的图像和电话的便利性融为一体。人们预想这种便携式信息机器将成为电话、电子邮件、互联网、录像机甚至电视机的替代品。不远的将来,便携秘书、移动办公室、随身影院将不再是天方夜谭。

随着电子元器件向轻、薄、短、小、高性能方向发展,芯片向高集成度、高频率、超多 I/O 端子数方向发展,迫切需要提高封装密度,其中包括:封装的端子(引脚)数越来越多;端子节距越来越小;封装厚度越来越薄;封装体在基板上所占的面积越来越大。为满足这些要求,一是不断采用新的封装形式,二是采用三维立体布线多层基板及三维立体封装。电子封装工程的这种发展趋势对其四大基础技术,即薄厚膜技术、微互联技术、基板技术、封接与封装技术等提出许多新的要求。因此,许多新结构、新工艺、新材料将应运而生。特别是封装材料,对它的介电常数、热膨胀系数、热导率、耐热特性、阻燃特性、防潮及抗裂纹特性、放射性元素含量及环保特性等都提出越来越高的要求。

(4) 发展新材料和高技术需要雄厚基础和长期积累

2003年2月13日欧盟正式颁布的 WEEE 和 RoHS 两法令将于 2006 年 7 月 1 日执行。WEEE 是指废弃电器电子设备回收法令,RoHS 是指在电器电子设备中限制使用某些有害物质(Pb、Hg、六价 Cr、Cd、PBB 和 PBDE 等 6 种)的法令。WEEE 和 RoHS 的正式实施将对我国以机电产品为代表的外向型产业产生重大影响。对上述两法令,国内经历了一个认识过程,开始认为这是“人为设定的非技术贸易壁垒”,是“断我汲水之路,使我不战自乱”,后来才认识到,两法令是从源头上杜绝污染源,进而建立环境型友好社会的战略措施。国内相应的法令也将于 2007 年 3 月执行。面对两个法令,我们真正遇到的挑战是,由于基础薄弱、缺乏积累,在技术准备、代用材料、相关工艺及专利等方面都有些措手不及,相当被动。看来,在新材料高技术领域,只有靠雄厚的基础和长期的积累才能“处变不惊”,以不变应万变。

(5) 发展新材料和高技术产业应以企业为核心,市场为导向

在新材料和高技术的产业化竞争中,先进工业化国家和地区以跨国公司为龙头,以大量中小型企业为后盾,采取集团作战方式,参与全球竞争。这些跨国公司

具有长期经营的基础,实力雄厚,由于享有良好的信誉和知名度,再加上名牌效应,在资金、人才、设备、市场等方面都有得天独厚的优势。在产业化发展过程中,这些跨国公司左右方向、制定战略、控制市场、掌握标准,再加上彼此之间的合纵连横、分工合作,具有极强的市场竞争力。

在总体战略目标下,由跨国公司将任务分解,其中不少由中小型企业来承担,再进行“组装”,依靠先进产品的高价格,大家共同赚取超额利润。这些中小型企业都掌握独特的技术并具有很强的生产能力,且科研力量、开发能力都很强。许多重大科研及攻关项目都在公司间进行,厂家、用户之间联系密切,技术交流频繁,所涉及的都是新的、活的、尖端的内容。这些中小型企业是技术创新的主力军,作为产业化基础是必不可少的。

在如火如荼,发展迅猛的新材料与高技术产业化过程中,采取孤立分散、小打小闹、各自为政的方针,再多的“专家评审”、再高的“鉴定会”评价水平,不经市场检验也于事无补,所谓的“国内、国际领先水平”只不过是自吹自擂而已。

发展新材料和高技术产业必须以企业为核心,市场为导向。当年美国和欧洲在LCD方面也做了大量的工作,但由于投资力度不够,终于未形成气候,许多研究成果倒被日本人所利用。他们所做的一切工作都迅速地为日本(而后是韩国、台湾地区)人营造的规模效应所吸收,变成了投资者的财富。这其中的经验和教训我们应引以为戒。

在新材料及高技术产业化发展过程中,只有以企业为创新主体,才能增强核心竞争力;只有企业做大做强,增强自主创新能力,我们才能进入创新型国家的行列。

(6) 核心竞争力源于体制创新

在新材料和高技术产业的发展过程中,我们经常遇到体制方面的障碍:信息闭塞,决策慢;害怕风险,不敢为天下先;资源难以集中,不能形成合力;投资规模小,不能形成竞争力;科研与产业化脱节,成果很难转化为生产力;企业间恶性竞争,丧失创新能力等。这些问题不解决,很难在强手如林的世界新材料和高技术产业中,脱颖而出,占据一席之地。

新材料应用于高技术领域,有先后、难易、周期长短、所需基础及投入资金多少的不同。国民经济发展对其要求应有轻重缓急之分,因此科学决策极为重要。在新材料、高技术等新经济中不是大鱼吃小鱼,而是快的吃慢的,反应最快的总是占据最佳位置,速度是新经济的自然淘汰方式。

发展新材料和高技术产业不能急功近利,更不能搞什么政绩工程,需要的是科学决策而不是长官意志。在这方面我们有不少教训。多晶硅材料是硅产品产业链中的一个重要的中间产品。是制造硅抛光片、太阳能电池的主要原材料,也是发展信息产业和新能源产业的重要基石。20世纪中后期,我国曾有几十家多晶硅生产厂家,在人才、物力、技术等方面都具有一定基础。但由于众所周知的原因,这些企业一哄而散,能坚持下来的只剩一两家,近年来总年产量徘徊在百吨级水平,致使

我国多晶硅供需关系严重失衡。我国 2005 年集成电路和硅太阳能电池对多晶硅的实际需求量达到 3000 吨左右,95% 以上的多晶硅材料需要进口,由于价格飞涨,已成为制约行业发展的瓶颈因素。据说,眼下打算筹建千吨级多晶硅的厂家有 10 家以上,但愿这次不要再犯一哄而上的毛病。

台湾地区在发展新材料及高技术产业方面的成功经验很值得我们借鉴。台湾地区在微机生产和芯片制造(代工厂)取得成功之后,选中 TFT-LCD 的产业方向,从日本引进生产技术,高强度集中投资,科研与产业化紧密结合,集中力量开发前沿产品,在短短四五年后,根据 2004 年的统计数据,TFT-LCD 的全球市场占有率达 33.5%,居世界第一。此外,台湾地区 IC 封装业占全球市场的 36%,记录光盘占全球市场的 72%,均排名世界第一等。

目前大陆从事新材料及高技术研究、开发和生产的单位是很多的。根据 20 世纪 90 年代初的统计,从事新材料研究开发的部门所属的研究机构就有 125 个,全国有 170 个高校设有与材料相关的院系和专业,还有数以千家的企业从事新材料的生产。从事高技术的单位和部门更是数不胜数。但是,目前不少新材料及高技术部门往往从事同样的研究开发工作,特别是一些热门课题,大家一哄而上,由于经费不足和研究条件落后,很多项目仍是低水平重复,成果不能很快地转化为生产力,浪费了国家有限的人力和资金。

究其原因,有决策问题、选题及目标问题、还有政策导向问题等,但核心是体制问题。核心竞争力源于体制创新;体制是否有效,最终由综合竞争力来检验。

应特别指出的是,在信息、能源、材料三大基础产业中,材料更为基础。以目前迅速发展的电子材料为例,我们应该重点发展半导体集成电路材料、平板显示器材料、新型元器件材料、光电子材料、记录光盘材料、IC 封装材料、印制线路板(PCB)材料、小型二次电池材料等。实际上,近年来国内不少企业已在上述领域取得可喜成果。

本丛书力求全方位地反映新材料及高技术应用的各个方面,包括涉及的范围、水平、目前状况及发展趋势等。重点是讨论新材料与高技术应用之间的关系,更注重产业化发展和市场动向。以此奉献给该领域的决策者、参与者、相关者、关心者以及在校的大学生、研究生等。其内容齐全、涉及面广,力求做到通俗易懂、深入浅出。丛书中的每一部又自成体系,可作为相关专业的教材及教学参考书。

已经献给读者的是本丛书的前四部:《磁性材料》、《电子显示》、《电子封装工程》、《高密度封装基板》。除了即将出版的《薄膜技术与薄膜材料》之外,正在撰写和组织的还有《晶圆和芯片》、《平板显示器入门》、《平板显示器的产业化》、《液晶显示器》、《电池—材料、工艺及应用》、《结构材料科学》、《功能材料科学》、《固体电子材料》等,将陆续出版。

当代材料科学技术正面临新的突破,诸如高温超导体、纳米材料、先进复合材料、生物医用材料、先进电子材料、智能材料、生态环境材料、光电信息材料、C60,

以及分子、原子尺度设计材料等领域正处于日新月异的发展之中,充满了挑战和机遇。新材料的出现总是连带着高技术的突破,由此必将带来巨大的技术经济效益和社会效益。《新材料及在高技术中的应用丛书》若能对读者在“眼观六路、耳听八方”方面有所裨益,在建设创新型社会中有所贡献,我们将不胜荣幸。

作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

田民波

2006年6月30日

前言



20世纪90年代初,作者与刘德令先生等共同编译了《薄膜科学与技术手册》(上、下册)。该书内容包括薄膜基础、薄膜制备工艺、薄膜性能检测、薄膜技术的应用等,涉及薄膜科学与技术的各个方面。该书内容广泛,取材新颖,论述全面,在国内(包括在国外的中文读者)广为流传,产生了较大影响。

近20年来,薄膜技术与薄膜材料获得迅猛发展,其主要表现在下述几个方面。

首先,各类新型薄膜材料大量涌现。其中包括纳米薄膜、量子线、量子点等低维材料,高 K 值和低 K 值介质薄膜材料,大规模集成电路用Cu布线材料,巨磁电阻、庞磁电阻等磁致电阻薄膜材料,大禁带宽度的“硬电子学”半导体薄膜材料,发蓝光的光电半导体材料,高透明性低电阻率的透明导电材料,以金刚石薄膜为代表的各类超硬薄膜材料等。这些新型薄膜材料的出现,为探索材料在纳米尺度内的新现象、新规律,开发材料的新特性、新功能,提高超大规模集成电路的集成度,提高信息存储记录密度,扩大半导体材料的应用范围,提高电子元器件的可靠性,提高材料的耐磨抗蚀性等,提供了物质基础。

再者,薄膜制作和微细加工工艺不断创新。其中包括用于产业化的MBE和MOCVD技术,脉冲激光熔射,零气压溅射,高密度离子束加工,气体离子束(GCIB)加工,反应离子束刻蚀,大规模集成电路用Cu布线的电镀,以CMP为代表的平坦化,原子、分子量级的人工组装等。这些为制备高质量外延膜,获得良好的成膜台阶覆盖度,制作特征线宽亚0.1微米的超大规模集成电路,实现MEMS和NEMS等,提供了可靠保证。

特别是,各种薄膜在高新技术中的应用更加普及。互联网中采集、处理信息及通信网络设备中,都需要数量巨大的元器件、电子回路、集成电路等,制造这些都要采用薄膜技术;在平板显示器产业中,为制作 TFT-LCD 的薄膜三极管及各种电极,为制作 PDP 中的汇流电极、选址电极及 MgO 保护膜,为制作有机 EL 中的电子注入层(EIL)、电子输运层(ETL)、空穴注入层(HIL)、发光层(EML)等,也需要采用薄膜技术;在机器人各种传感器、生物芯片、CIGS 太阳能电池中都离不开薄膜技术。可以说,薄膜技术和薄膜材料已成为构筑高新技术产业的基本要素。

薄膜技术与薄膜材料之所以受到人们的关注,主要基于下面几个理由。

(1) 薄膜很薄(膜厚从微米到纳米量级,后者甚至薄到几个原子层),可以看成是物质的二维形态。薄膜技术是实现器件轻薄短小化和系统集成化的有效手段。

(2) 器件的微小型化,不仅可以保持器件的原有功能并使之强化,而且,随着器件的尺寸减小乃至接近电子或其他粒子量子化运动的尺度,薄膜材料或其器件将显示出许多全新的物理现象。薄膜(以及目前正大力开发的量子线、量子点等)技术是制备这类新型功能器件的有效手段。

(3) 薄膜气相沉积涉及从气相到固相的超急冷过程,易于形成非稳态物质及非化学计量的化合物膜层。因此,薄膜技术是探索物质秘密,制备及分析特异成分、组织及晶体结构的物质的有力手段。

(4) 由于镀膜的气化方式很多(如电子束蒸发、溅射、气体源等),通过控制气氛还可以进行反应沉积,因此,可以得到各种材料的膜层;可以较方便地采用光、等离子体等激发手段,在一般条件下,即可获得在高温、高压、高能量密度下才能获得的物质。

(5) 通过基板、镀膜、反应气氛、沉积条件的选择,可以对界面结构、结晶状态、膜厚等进行控制,还可制取多层膜、复合膜及特殊界面结构的膜层等;由于膜层表面精细光洁,故便于通过光刻制取电路图形;由于在 LSI 工艺中薄膜沉积及光刻图形等已有成熟的经验,故易于在其他应用领域中推广。

(6) 易于在成膜过程中在线检测,监测动态过程并可按要求控制生长过程,便于实现自动化。

本书正是基于上述背景和理由编写的。全书共分 5 部分。第 1 部分(第 2~8 章)为薄膜沉积基础,包括真空技术基础、真空泵与真空规、真空装置的实际问题、气体放电和等离子体、薄膜生长与薄膜结构、表面结构与薄膜的外延生长、薄膜沉积的共性问题等 7 章;第 2 部分(第 9~12 章)为薄膜制备工艺,包括真空蒸镀、离子镀和离子束沉积、溅射镀膜、化学气相沉积等 4 章;第 3 部分(第 13~14 章)为薄膜的微细加工,包括干法刻蚀、平坦化技术等 2 章;第 4 部分(第 15~16 章)为薄膜材料及薄膜材料的应用;第 5 部分(第 17 章)为薄膜的评价表征及物性测定。作为

全书的引言与入门,第1章以近乎动(画)漫(画)的形式,介绍了薄膜在高新技术中的应用。

本书内容广泛,取材新颖,叙述通俗易懂,紧密联系实际,特别是针对薄膜技术与薄膜材料的最新进展和前沿应用,结合大量实例进行论述。在内容组织上,尽量做到浅、宽、新,避免针对过窄的领域,进行过深、过细的探讨。本书重点讨论有关薄膜技术与薄膜材料的基本原理、基本方法、基本工艺过程和基本应用。通过本书的学习,有助于读者掌握薄膜制备及微细加工方法,认识与微观结构相关的各种特性,了解薄膜材料及微细加工技术的最新应用。

在本书编写过程中参阅了大量国内外文献,特别是书中第5、6、7、9章的部分内容较多地引用了文献[56]、[59]、[96]、[97]等。在此向王福贞、唐伟忠、朱履冰、杨邦朝教授及有关作者表示感谢。

作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2006年6月

目录



第1章 薄膜与高新技术

第2章 真空技术基础

2.1 真空的基本知识	22
2.1.1 真空定义	22
2.1.2 真空度量单位	24
2.1.3 真空区域划分	26
2.1.4 气体与蒸气	28
2.2 真空的表征	30
2.2.1 气体分子运动论	30
2.2.2 分子运动的平均自由程	32
2.2.3 气流与流导	35
2.3 气体分子与表面的相互作用	37
2.3.1 碰撞于表面的分子数	37
2.3.2 分子从表面的反射	38
2.3.3 蒸发速率	40
2.3.4 真空在薄膜制备中的作用	41

第3章 真空泵与真空规

3.1 真空泵	43
3.1.1 油封机械泵	45
3.1.2 扩散泵	50
3.1.3 吸附泵	56

3.1.4	溅射离子泵	57
3.1.5	升华泵	60
3.1.6	低温冷凝泵	61
3.1.7	涡轮分子泵和复合涡轮泵	63
3.1.8	干式机械泵	64
3.2	真空测量仪器——总压强计	66
3.2.1	麦克劳真空规	68
3.2.2	热传导真空规	69
3.2.3	电离真空计——电离规	71
3.2.4	盖斯勒管	78
3.2.5	隔膜真空规	79
3.2.6	真空规的安装方法	79
3.3	真空测量仪器——分压强计	80
3.3.1	磁偏转型质谱计	80
3.3.2	四极滤质器(四极质谱计)	81

第4章 真空装置的实际问题

4.1	排气的基础知识	84
4.2	材料的放气	86
4.3	排气时间的估算	89
4.4	实用的排气系统	90
4.4.1	离子泵系统	91
4.4.2	扩散泵系统	92
4.4.3	低温冷凝泵-分子泵系统	92
4.4.4	残留气体	94
4.5	检漏	95
4.5.1	检漏方法	96
4.5.2	检漏的实际操作	98
4.6	大气温度与湿度对装置的影响	99
4.7	烘烤用的内部加热器	100
4.8	化学活性气体的排气	101
4.8.1	主要装置及存在的问题	102
4.8.2	排气系统及其部件	103

第5章 气体放电和低温等离子体

5.1 带电粒子在电磁场中的运动	106
5.1.1 带电粒子在电场中的运动	106
5.1.2 带电粒子在磁场中的运动	108
5.1.3 带电粒子在电磁场中的运动	109
5.1.4 磁控管和电子回旋共振	111
5.2 气体原子的电离和激发	112
5.2.1 碰撞 能量传递过程	113
5.2.2 电离——正离子的形成	117
5.2.3 激发——亚稳原子的形成	121
5.2.4 回复——退激发光	123
5.2.5 解离——分解为单个原子或离子	126
5.2.6 附着——负离子的产生	126
5.2.7 复合——中性原子或原子团的形成	127
5.2.8 离子化学——活性粒子间的化学反应	129
5.3 气体放电发展过程	132
5.3.1 由非自持放电过渡到自持放电的条件	132
5.3.2 电离系数 α 和二次电子发射系数 γ	134
5.3.3 帕邢定律及点燃电压的确定	136
5.3.4 气体放电伏安特性曲线	138
5.4 低温等离子体概述	140
5.4.1 等离子体的定义	140
5.4.2 等离子体的温度	141
5.4.3 带电粒子的迁移运动和扩散运动	143
5.4.4 等离子体的导电性	145
5.4.5 等离子体的集体特性	146
5.4.6 等离子体电位	148
5.4.7 离子鞘层	149
5.5 辉光放电	150
5.5.1 辉光放电外貌及两极间各种特性的分布	150
5.5.2 阴极位降区	153
5.5.3 正常辉光放电和异常辉光放电	154

5.5.4	其他类型的辉光放电	155
5.6	弧光放电	157
5.6.1	弧光放电类型	157
5.6.2	弧光放电的基本特性	158
5.6.3	自持热阴极弧光放电	160
5.6.4	自持冷阴极弧光放电	164
5.7	高频放电	166
5.7.1	高频功率的输入方法	166
5.7.2	离子捕集和电子捕集	167
5.7.3	自偏压	168
5.8	磁控放电	170
5.9	低压力、高密度等离子体放电	170
5.9.1	微波的传输及微波放电	171
5.9.2	微波 ECR 放电	172
5.9.3	螺旋波等离子体放电	173
5.9.4	感应耦合等离子体放电	176

第 6 章 薄膜生长与薄膜结构

6.1	薄膜生长概述	177
6.2	吸附、表面扩散与凝结	178
6.2.1	吸附	178
6.2.2	表面扩散	185
6.2.3	凝结	187
6.3	薄膜的形核与生长	189
6.3.1	形核与生长简介	189
6.3.2	毛吸理论(热力学界面能理论)	192
6.3.3	统计或原子聚集理论	199
6.4	连续薄膜的形成	202
6.4.1	奥斯瓦尔多(Ostwald)吞并过程	203
6.4.2	熔结过程	204
6.4.3	原子团的迁移	204
6.4.4	决定表面取向的 Wulff 理论	205
6.5	薄膜的生长过程与薄膜结构	207

6.5.1	薄膜生长的晶带模型	207
6.5.2	纤维状生长模型	209
6.5.3	薄膜的缺陷	211
6.5.4	薄膜形成过程的计算机模拟	212
6.6	非晶态薄膜	216
6.7	薄膜的基本性质	218
6.7.1	导电性	218
6.7.2	电阻温度系数(TCR)	220
6.7.3	薄膜的密度	221
6.7.4	经时变化	221
6.7.5	电介质膜	222
6.8	薄膜的粘附力和内应力	223
6.8.1	薄膜的粘附力	223
6.8.2	薄膜的内应力	224
6.8.3	提高粘附力的途径	226
6.9	电迁移	227

第7章 表面结构与薄膜的外延生长

7.1	理想表面结构	231
7.1.1	二维结晶学基本概念	231
7.1.2	二维倒易点阵	235
7.2	清洁表面结构	241
7.2.1	表面结构的表述方法	241
7.2.2	再构表面及其倒易点阵的矩阵元素	244
7.2.3	表面原子弛豫	246
7.2.4	表面再构模型	248
7.3	实际表面结构	253
7.3.1	表面吸附类型	254
7.3.2	吸附覆盖层	255
7.3.3	吸附表面层结构	255
7.3.4	半导体材料的表面吸附	258
7.4	薄膜的外延生长	260
7.4.1	液相外延	261