


等离子体 科学技术及其在工业中的应用

Plasma Science and Technology and its Applications in Industry 葛袁静 张广秋 陈强 编著



等离子体科学技术及其在 工业中的应用

葛袁静 张广秋 陈 强 编著
欧阳吉廷 主审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子体科学技术及其在工业中的应用/葛袁静, 张广秋, 陈强编著. —北京: 中国轻工业出版社, 2011.1

ISBN 978-7-5019-7800-7

I. ①等… II. ①葛…②张…③陈… III. ①等离子体 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 158379 号

责任编辑: 杜宇芳

策划编辑: 杜宇芳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 王超男 责任校对: 李靖 责任监印: 张可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经销: 各地新华书店

版次: 2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 20

字数: 537 千字

书号: ISBN 978-7-5019-7800-7 定价: 49.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

090504K4X101ZBW

序

在物理学中，等离子体物理学是一门新兴的分支，只有不到百年的历史，却和人类社会一些重大成就直接联系。从技术角度，它大致分为三个领域。一为核聚变，对应的是高温等离子体；二为空间等离子体和天体等离子体；三为低温等离子体，在工业技术上的应用。其中最后一项在最近几十年里获得突飞猛进的发展，以至于进入我们日常生活的每一角落，更不要说涉及国计民生以及国防建设的重大项目了，尽管不是每一个人都清楚意识到这一点。

虽然等离子体的基础研究和重大应用间有着不可分割的联系，但这里有很长的路要走。大致的关系是，基于等离子体物理的知识研制不同参数的等离子体源，然后在此基础上发展针对各种应用背景的工艺，当然其中还交织着诊断和数值模拟技术，这一系列广泛的研究工作支撑着涉及等离子体的工业体系的发展，其中特别重要的是大规模集成电路，即我们所说的芯片制造行业，以及功能薄膜的制备和材料表面改性、图像显示等领域。而这一内涵丰富的知识链条间的密切联系很难被从业者所掌握，特别是在形形色色新的原理、知识、材料、工艺不断涌现的现实情况下，迫切需要一本既能阐明原理又具备专门知识的教材。葛袁静、张广秋研究员和陈强教授的这本书弥补了这一缺陷。

葛袁静、张广秋伉俪是我的老朋友，原在中国科学院等离子体物理研究所从事高温等离子体的实验研究，事业有成。后来投身印刷包装行业，在低温等离子体应用领域努力开拓，终于开辟出新的天地，取得一系列重大研究成果，为低温等离子体学界进军实际工业应用起了带头的作用。

陈强教授也是来自中国科学院等离子体物理研究所，于2004年调入北京印刷学院，继承了葛袁静和张广秋两位研究员的工作，从事着低温等离子体物理和应用的工作。

积几十年的经验，他们深刻认识到低温等离子体在各个技术领域的应用，不仅是技术问题，而且更重要的是学术问题，必须对等离子体中发生的物理过程有一个深刻的了解，才能找到正确的技术路线。而且具体问题往往涉及广阔的知识领域，如等离子体化学、材料物理、诊断方法等，必须对此有全面的理解和掌握。

本书是作者几十年从事研究和教学心血的结晶，内容广泛，逻辑性强，有针对性，包含各类低温等离子体的特点及产生方法、等离子体基本动力学过程、常用的等离子体诊断和各方面的应用，适合于与等离子体有关的本科生、研究生的教学和有关部门从业者的参考。

王 龙
2010.5.16

前 言

葛袁静研究员，1967年毕业于北京大学技术物理系核物理专业。

张广秋研究员，1966年毕业于北京大学技术物理系核物理专业，1993年在荷兰等离子体物理研究所作访问学者。

陈强研究员，1987年毕业于西安交通大学电介质材料专业，1999年在中国科学院等离子体物理研究所核能科学与技术专业获博士学位，2002年于德国马普所功能材料专业完成博士后工作，2007年瑞典皇家工学院访问学者。

葛袁静、张广秋、陈强三位作者均曾在中国科学院等离子体物理研究所工作过较长时间，从事过热核聚变装置的设计与高温等离子体物理的研究工作。葛袁静、张广秋研究员于1986年8月调来北京印刷学院，从无到有开展了低温等离子体物理及其在工业，特别是印刷包装工业中应用的研究。组建了等离子体物理及材料研究室，构建了一个稳定的研究队伍，经历了从等离子体技术不为大家所理解到被印刷包装行业公认的历程。1998年该研究室获准成为全国印刷行业中第一个等离子体物理与材料学科的硕士点，2003年该研究室与学院相关实验室一起获准成为北京市教委重点实验室。三十余年来，他们一直工作在等离子体物理及工业应用的第一线，先后荣获国家科技进步三等奖一项，国家部委各种级别科技进步奖八项，获国家发明专利九项。作者葛袁静研究员亦从上世纪末开始先后担任中国等离子体研究会秘书长，现在（2010年9月）是中国物理学会等离子体分会副主席。张广秋研究员曾是中国力学学会等离子体分会专业委员会委员。陈强教授目前是中国力学学会等离子体分会专业委员会委员，中国电工技术学会电子束离子束专业委员会委员。

自1998年等离子体物理及材料研究室被批准成立硕士点以后，葛袁静、张广秋研究员除了承担繁重的科研任务，还承担等离子体物理与材料专业的教学工作达八年有余，具有丰富的教学经验。陈强教授自2004年初调来北京印刷学院，一直给研究生讲授等离子体化学和等离子体聚合等方面的课程。本著作就是在给研究生授课的讲稿基础上，结合他们的工作实践和经验，及近年来等离子体发展状况，编写而成。

由于目前国内相关方面的教材和参考书比较少，学生们没有一本合适的教科书。考虑到北京印刷学院的研究生生源主要是工科院校毕业生，相关的物理基础理论知识比较薄弱，而且这类学科的研究生今后的工作方向主要是应用等离子体科学技术。因此在本书中，给出相关的等离子体物理理论推导较少，而是在尽可能的讲清物理概念的基础上，主要介绍相关的等离子体技术应用。

低温等离子体物理中的“低温”，是相对核聚变的高温等离子体而言。近二三十年来，低温等离子体在工业中的应用得到了长足的发展。由于从事这方面工作的多为非等离子体专业人士，而且工业等离子体应用中许多定标基本上是以工作气压、电压、电流、电源频率的变化为基准，缺少以等离子体中电子温度、电子密度、离子温度、离子密度等微观物理量为基准的定标律。实际上，在低温等离子体技术和应用中，对后者的认识理解更为关键。

为了改变这种状况，作者希望人们能从学术观念而非仅仅从技术层次，来对待低温等离子体物理、等离子体化学、等离子体技术，这是作者写本书的基本出发点之一，也是贯穿本书的基本观点之一。

近年来，等离子体技术由简单的电晕改性处理发展到等离子体有机材料改性、各种功能薄膜制备、金属材料表面工程、及电子行业中的等离子体刻蚀、微纳米结构设计等领域。由于在等离子体作用的条件下可以制备许多常规手段不能制备的、具有特殊光电性能的材料。因此，等离子体技术已成为材料制备工业的一个新领域。而本书既包含等离子体基本物理过程，又包含等离子体化学、等离子体金属材料工程学、等离子体薄膜科学等各领域的内容，将这诸多学科统一成一本等离子体技术与材料的著作，这给从事这方面研究的青年学者和研究生一个入门的理论指导，一定会有有益的帮助。

结合上述考虑，在编写本书时，作者对以下几点给予了特别关注：

1. 理论上本书力求内容广泛，逻辑性强，内容涉及低温等离子体的种类，各种等离子体发生的机理及特点，等离子体基本动力学过程，及常用等离子体诊断和等离子体工业应用，尤其是在印刷包装行业中的技术应用。

2. 作者关注到等离子体科学和技术的发展，努力将低温等离子体物理及材料制备、相关放电装置及诊断等内容详尽陈述。同时作者亦将本人和所在实验室二十多年来的一些通过国家鉴定或已公开的科研成果编入了本著作，以此丰富教材内容。

3. 结合近年来功能薄膜技术的快速发展，本著作将溅射离子镀膜、电子枪蒸发镀膜，各种离子源与等离子体源的粒子产生、它们之间的作用和发展关系等纳入本著作中进行论述，目的是增强与完善人们对等离子体溅射离子镀膜工作的完整认识。

4. 结合目前人们往往只注重处理效果或成膜质量与放电宏观参数之间的关系，如放电电压、电流、气体压强、放电频率等，而忽略等离子体的微观参数，如电子温度、密度、离子温度、密度等，本著作在力所能及的范围内论述并强调了微观参数的重要性，并且把“等离子体诊断”单独作为一章节，对通用的诊断方法进行了详尽的论述。

作者张广秋研究员在中国科学院等离子体物理研究所工作期间（1973—1986），一直从事等离子体光谱诊断研究。先后开发出高速转镜等离子体光谱时空分析测量系统及多路光导纤维等离子体光谱时空分布测量系统，应用于核聚变托卡马克实验研究。现在他将光谱测量这一古老的诊断方法应用于低温等离子体，力图推进低温等离子体技术的发展。

本书相关基础理论、物理概念清楚，对实际应用都附有详细的描述，适用于材料物理与化学专业的研究生、本科生及对低温等离子体技术感兴趣的工程技术人员。

本书第1~10章由葛袁静研究员编写，陈强教授对第8章进行了大量的修改和补充，第11章由张广秋研究员编写。

本书在编写过程中与北京工业大学张跃飞博士对第10章内容进行了有益的讨论和补充，对此表示衷心的感谢。

葛袁静

2010. 4. 23

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 等离子体的定义	1
1.2 等离子体科学和技术发展的历史	2
1.3 等离子体科学和技术的三个方面及发展状况	5
1.3.1 等离子体科学和技术的主要方面	5
1.3.2 等离子体科学和技术发展的状况	6
1.4 等离子体的性质	10
1.4.1 等离子体的准电中性	10
1.4.2 德拜屏蔽和德拜长度	10
1.4.3 等离子体的振荡和振荡频率	12
1.4.4 等离子体参量 Δ	14
1.4.5 等离子体判据	15
1.4.6 电子温度和离子温度	15
1.4.7 沙哈方程	17
1.5 电磁场对带电粒子运动行为的影响	18
1.5.1 带电粒子在电场中的运动	18
1.5.2 带电粒子在磁场中的运动	19
1.5.3 带电粒子在恒定电、磁场中的运动	21
1.5.4 工业等离子体的磁约束	22
1.6 等离子体辐射	26
第 2 章 等离子体的发生	29
2.1 等离子体的主要发生方法	29
2.1.1 气体放电法	29
2.1.2 射线辐照法	33
2.1.3 光电离法	33
2.1.4 激光等离子体	33
2.1.5 热电离法	34
2.1.6 激波等离子体	35
2.2 汤生放电理论	36
2.2.1 汤生电离系数	36
2.2.2 电子雪崩	36
2.2.3 气体击穿	37
2.2.4 汤生第一电离系数 α	39
2.3 气体击穿——罗可夫斯基理论	41
2.3.1 空间电离对放电的影响	41
2.3.2 自持放电的稳定过程	42
2.4 巴邢定律	43
2.5 击穿电压的影响因素	46

2.6	气体放电的相似定律	47
2.6.1	相似放电中各种参量之间的关系	47
2.6.2	相似放电中基本过程之间的关系	48
第3章	辉光放电及其特点	50
3.1	辉光放电的基本特征	50
3.2	辉光放电的组成区域	51
3.2.1	阴极区	51
3.2.2	过渡区	51
3.2.3	正柱区	52
3.2.4	阳极区	53
3.2.5	阴极位降实验规律	54
3.3	应用性短间隙异常辉光放电过程解析	54
3.3.1	放电区结构变化及电位分布特点	54
3.3.2	阴极区过程分析	56
3.3.3	阳极鞘层	61
3.3.4	等离子体鞘	63
3.4	高频辉光放电应用解析	66
3.4.1	高频等离子体的发生方法	66
3.4.2	高频等离子体反应装置的等效电路	67
3.4.3	电场频率对气体放电机制的影响	67
3.4.4	高频放电的效率	70
3.4.5	利用高频放电的原因	71
3.4.6	阻抗匹配网络	72
3.4.7	高频电极的自偏压	73
3.4.8	电位分布和高频鞘	74
3.4.9	等离子体电位	77
3.5	微波放电等离子体简介	78
3.5.1	微波等离子体的发生方法	79
3.5.2	电子回旋共振等离子体源	80
3.5.3	微波等离子体的特征	81
第4章	大气压条件下的等离子体放电	82
4.1	介质阻挡放电的特性和作用	82
4.1.1	介质阻挡放电的特性	82
4.1.2	介质阻挡放电的电压和电流特性	85
4.2	介质阻挡放电的主要参量	86
4.3	介质阻挡放电的机制	86
4.3.1	介质阻挡放电的击穿机理	86
4.3.2	介质阻挡放电的电场强度	88
4.3.3	微放电的主要特性和一些参量的关系	88
4.4	位移电流	91
4.5	介质阻挡放电的电子能量控制	91
4.6	介质阻挡放电的理论模拟计算	92
4.7	介质阻挡放电中自由基和准分子的形成	93

4.8	臭氧的产生	94
4.9	介质阻挡放电的等效电路	95
4.10	介质阻挡放电的功率	96
4.10.1	低频	96
4.10.2	低频下介质阻挡放电的李萨如图形	97
4.11	高频下介质阻挡放电的李萨如图形	98
4.12	功率因子 F	99
第5章	低温等离子体中的基础过程	101
5.1	碰撞现象	101
5.1.1	速度分布	101
5.1.2	弹性碰撞和非弹性碰撞	102
5.1.3	碰撞截面	103
5.1.4	碰撞频率和平均自由程	104
5.1.5	等离子体中的能量流	104
5.1.6	能态和激励	105
5.2	主要元反应过程与等离子体的状态	107
5.2.1	电离	107
5.2.2	电离截面	109
5.2.3	正离子碰撞气体粒子引起的激发和电离	111
5.2.4	激发原子碰撞气体粒子引起的激发和电离	111
5.2.5	光电离	113
5.2.6	复合过程附着和离脱	113
5.2.7	等离子体的状态	116
5.3	等离子体与固体的表面相互作用	119
5.3.1	表面过程的类型和能量范围	119
5.3.2	离子与表面的相互作用	121
5.3.3	电子与表面的相互作用	128
5.3.4	中性物体与表面的相互作用	130
5.4	带电粒子在气体中的运动	131
5.4.1	带电粒子在气体中的热运动	131
5.4.2	带电粒子的漂移运动	135
5.4.3	带电粒子的双极性扩散运动	140
第6章	溅射制膜	143
6.1	不同的溅射方法	144
6.1.1	直流溅射	144
6.1.2	射频溅射	144
6.1.3	反应性溅射	145
6.1.4	磁控溅射	145
6.1.5	离子源	159
6.1.6	其他溅射方法	169
6.2	溅射的特性和机制	170
6.2.1	溅射率及其影响因素	170
6.2.2	溅射粒子	172
6.2.3	溅射机制	173

6.3 溅射制膜技术的应用	174
6.3.1 溅射制膜法的广泛适用性	174
6.3.2 高温材料的低温合成	174
6.3.3 单晶薄膜的低温合成	175
6.3.4 多层结构的连续形成	176
第7章 等离子体化学气相淀积 (PCVD)	179
7.1 CVD 技术的进展	179
7.2 PCVD 技术的基本特征	180
7.3 PCVD 装置	181
7.3.1 基本类型	181
7.3.2 总体结构	182
7.3.3 典型实用装置的特征	183
7.4 PCVD 工艺参数与薄膜形成机制	184
7.4.1 PCVD 膜的基本评价	184
7.4.2 氮化硅膜的特征与工艺参数	185
7.4.3 工艺参数对硼薄膜生长的影响	187
7.4.4 硅烷等离子体的反应与非晶硅形成机制	187
7.5 PCVD 技术的应用	189
7.5.1 PCVD 技术的广泛适用性	189
7.5.2 非晶硅及太阳能电池	190
7.5.3 PCVD 法低压合成金刚石	191
7.5.4 超晶格材料的人工合成	193
7.5.5 PCVD 法合成类金刚石薄膜	194
第8章 等离子体聚合和等离子体引发聚合	199
8.1 等离子体聚合	199
8.2 等离子体聚合发展史	199
8.2.1 等离子体聚合法及其特点	199
8.2.2 工艺条件的选择和控制	201
8.2.3 等离子体聚合反应的机理	205
8.2.4 等离子体聚合膜的结构与物理性能	208
8.2.5 等离子体聚合膜的特性和应用	209
8.2.6 等离子体聚合在印刷、包装、卫生等行业中的应用	214
8.3 等离子体引发聚合	220
8.3.1 等离子体引发聚合装置及其特点	220
8.3.2 烯类单体的等离子体引发聚合	221
8.3.3 环醚的固相开环聚合	224
第9章 高分子材料的等离子体表面改性	227
9.1 高分子材料的表面改性	227
9.1.1 界面物性控制技术概述	227
9.1.2 等离子体表面处理法的特点	227
9.2 等离子体在 高分子材料表面的作用	228
9.2.1 等离子体对材料表面反应机理	228
9.2.2 等离子体与聚合物发生化学反应的原理	229
9.3 等离子体表面改性在包装复合材料生产工艺中的应用	237

9.4	制备新型高阻隔性材料	243
9.4.1	GT (SiO ₂) 膜产生的原因	243
9.4.2	制作 SiO ₂ 薄膜的方法	244
9.4.3	目前世界上 SiO ₂ 膜的生产和研究情况	244
9.4.4	新的阻隔包装材料碳氢化合物涂层	248
9.4.5	特种材料包装	250
第 10 章	金属材料等离子体表面改性	253
10.1	离子氮化和离子渗碳	253
10.1.1	离子氮化	253
10.1.2	等离子体渗碳	254
10.2	等离子体氮化	254
10.3	等离子体氧化和等离子体阳极氧化	255
10.4	等离子体微弧氧化技术	256
10.4.1	概述	256
10.4.2	微弧氧化的基本原理和过程	257
10.4.3	微弧氧化陶瓷膜的制备方法	258
10.4.4	微弧氧化的特点	258
10.5	双层辉光离子渗金属技术	260
10.5.1	单元素渗	263
10.5.2	双元素共渗, Ni-Cr 共渗研究	264
10.5.3	W-Mo 共渗研究	265
10.5.4	双层辉光离子渗碳技术的应用研究	265
10.5.5	钛及钛合金表面合金化研究	266
10.5.6	双层辉光离子渗金属技术的基础理论研究	267
10.5.7	双层辉光离子渗金属技术的延伸	267
10.6	等离子体碳化、硼化等	268
第 11 章	等离子体诊断	270
11.1	概述	270
11.1.1	目的及其在科学发展中的地位	270
11.1.2	需要诊断的内容(等离子体参数)	270
11.1.3	常用的等离子体诊断手段和种类	270
11.1.4	实验的可靠性和误差	271
11.1.5	干扰与噪声及其消除方法	274
11.1.6	分辨率	275
11.2	静电探针测量	275
11.2.1	朗缪探针的测量原理及应用	275
11.3	等离子体光谱诊断	281
11.3.1	光谱诊断中的有关物理过程	281
11.3.2	光谱诊断设备	288
11.3.3	等离子体光谱空间分布测量	291
11.3.4	等离子体参数测量	293
11.3.5	等离子体谱线展宽	295
11.3.6	离子定向运动多普勒效应及应用	298
11.3.7	等离子体光谱时空分布测量的几种方法	299
11.3.8	光谱定量测量中几个问题	301
11.3.9	荧光光谱诊断	305

第 1 章 绪 论

1.1 等离子体的定义

等离子体是物质存在的又一种基本形态。人们知道世界上的物质有固态、液态、气态这三种状态，并且在一定的温度和压力下，固、液、气三态之间是可以互相转化的，而且物质的不同聚集态对应着物质粒子（原子、分子和离子）排列的不同有序程度，因此实现物质各态间的转换，实际上是改变物质有序度的过程。例如组成固体的粒子只能在晶格位置附近做热运动，使固体的有序度最高；当外界向固体供给能量，使得每个粒子的动能超过其结合能时，固体将转化为有序度较低的液体或直接转化为气体。同样，只要向液体供给能量，液体就会转化为气体。如果继续向气体供给能量时，只要能使每个原子中电子的动能超过原子的电离能时，电子将会脱离原子的约束而成为自由电子，而原子则因失去电子而成为带正电的离子，这就是所谓的电离过程。当气体中足够多的原子被电离后，这种电离的气体就已不是原来的气体了，而转化成一种新的物态，即等离子态。显然等离子体的有序度最差，在等离子体内，电子可以脱离原子而完全杂乱运动，就像普通气体中的分子运动一样。

由此可见，任何由中性粒子组成的气体，只要外界供给能量，使气体温度升到足够高时，总可以成为等离子体。对同一种物质来说，处于等离子体态时的温度要比处于固态、液态和气态时高。

一般说来，组成等离子体粒子的基本成分是电子、离子和中性原子。在一次电离的情况下，带负电的粒子（电子）和带正电的粒子（离子）数目相等；在多重电离时，电子数可多于离子数。但是，不论在哪一种情况下，等离子体在宏观上仍保持电中性。

等离子体与普通气体有极大的差别。普通气体中的粒子主要进行杂乱无章的热运动，而在等离子体内，除了热运动外，还会有等离子体振荡现象产生。特别是在有外界电磁场存在的情况下，等离子体的运动将受到电磁场的影响和支配，这是等离子体与普通气体的重要区别。

在普通气体中，即使只有 0.1% 的气体被电离，这种电离气体已具有很好的等离子体性质。如果有 1% 的气体被电离，这时等离子体就成了电导率很大的理想导体。用于热核反应的高温等离子体，其原子几乎全是电离的。

在地球表面的大气里，由于宇宙射线的作用，平均每秒每立方厘米内，大约有 10^5 个原子被电离。而在标准状态下，每立方厘米内约有 10^{19} 个气体分子，因此，在地球表面空气中的电离度是极为微小的，磁场对这种气体的运动不产生任何影响，从这方面来看磁场对电离气体是否有作用，也可作为判断是否为等离子体的一种方法。但是另一方面，由于等离子体在宏观上呈电中性，同时又是气体，因此一般气体定律适用于等离子体。

在地球上，我们熟悉的是物质的固态、液态和气态，而对物质的第四态——等离子体态比较陌生，这是因为地球表面温度太低，一般不具备等离子体产生的条件。但是，在特定条件下地球上亦能产生等离子体。如夏天的雷电就是空气被电离而产生的瞬时等离子体在发光。在靠近南北两极的天空可以看到的美丽的极光，也是一种等离子体发光现象，太阳内部由于极高的温度和极大的压力，不断进行聚变核反应，也就是说太阳是一个灼热的等离子体火球，它向空

间释放出大量的辐射能，同时还不断地发射出大量的带电粒子，浮向宇宙空间。这些带电粒子以 $400\sim 700\text{km/s}$ 的速度进入地球大气层时，和气体分子与原子碰撞，使气体激发和电离，形成稀薄的等离子体，并发出美丽的极光。

在宇宙中有 99.9% 以上的物质处于等离子体状态，在恒星内部电离由高温产生；在稀薄的星云和星际气体内，电离由恒星的紫外辐射引起。

人们在长期的生产实践和科学活动中，也可以人为地产生等离子体。如日光灯，霓虹灯鲜艳的色彩就是一种辉光放电的等离子体发光现象。红色是氮气放电，绿色是水银蒸气放电，紫色是氙气放电，黄色是氦气放电，暗红色是氢气放电等。实验室辉光放电照片见图 1-1，聚变装置放电见图 1-2，等离子体炬照片见图 1-3。

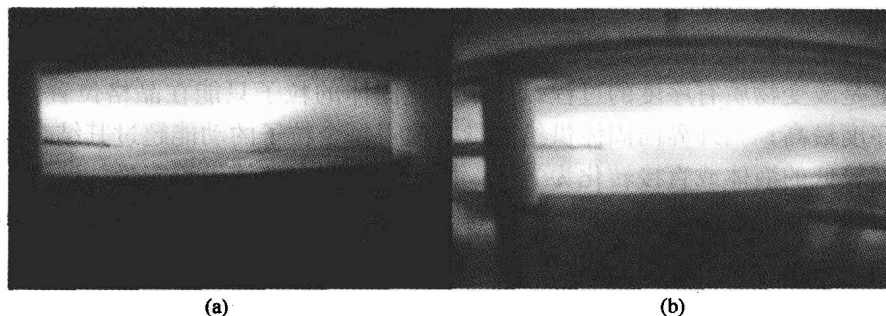


图 1-1 实验室辉光放电照片
(a) 无磁场 (b) 有磁场



图 1-2 聚变装置放电图



图 1-3 等离子体炬照片

最后，需要说明的是以上我们把电离气体称为等离子体，其实并没有包括等离子体的全部。如电解质溶液，其中包括能自由运动的正负离子，能导电，也是一种等离子体。又如金属具有固定在晶格中的正离子和能自由运动的电子，应该是典型的固体等离子体。

我们本课程只讨论由电离气体组成的等离子体。

1.2 等离子体科学和技术发展的历史^[1]

等离子体的历史可以追溯到 200 多年前。1672 年威廉 (Gottfried wilhelm) 首次在旋转硫磺球上发现了人工条件下的电火花，他经过研究，揭示了气体放电的奥秘。之后许多学者逐渐对气体放电现象产生兴趣，纷纷投入研究。

1753 年俄国科学家罗蒙索夫研究了极光现象，当时信仰宗教的人认为极光这种“天象”

是某种灾难的预兆，罗蒙索夫指出，极光是由于电的作用而产生的。他在装有稀薄气体的玻璃管中加上一定的电压，发现玻璃中的气体发出一种跟极光类似的光辉。在 1758 年科学家探测到空气的火花放电能生成臭氧，氧化氮；用氮氢混合气体通过碳电极之间电弧放电成功地获得了氰化氢；利用碳电极之间作氢气放电直接合成乙炔。

1808 年，随着稳态直流弧光放电的发展，Sir Humphry Davy 开始了对等离子体的科学研究。

在 19 世纪 30 年代，Michael Faraday 和其他一些科学家，研制出了高压直流放电管，发现在低压气体中放电可以分别观测到相当大的发光区域和不发光的暗区^[2,3]。Langmuir 又进一步对低压气体放电形成的发光区，即阳极柱深入研究，发现其中电子和正离子的电荷密度差不多相等，是电中性的，电子、离子基团做与其能量状态对应的振动。他在 1928 年发表的论文中，首次称这种阳极柱的状态为“等离子体”^[1,4]，含义是离子和电子群的近似电中性的集合体，它可以，也不一定必须包含本底中性气体，它能对电场和磁场做出响应。

1879 年 W. Crookes 详细研究了这种放电的性质，称之为第四种物质状态。

按这个观点，当对某一物质从低温开始加热时，从固态逐渐融化变成液态，进而蒸发成气态。最后，如果进一步继续加热，温度升高，单个原子将分裂成许多电子和带正电的离子，形成了物质第四态。

19 世纪，电弧和直流放电等离子体在科学实验室里得到了广泛的研究。在此期间，唯一获得广泛应用的等离子体技术是用电弧照明，它曾成为气灯的有力竞争对手，但到 1900 年它又被白炽灯击败，主要是它需要传输大电流直流电。但是，在相当长的一个历史时期内，等离子体主要还是作为发光现象，发光效应，发热效应和声学效应及它们在技术上的应用等开展的。从第一次世界大战到 20 世纪 30 年代，等离子体物理学取得了一些基本成就。

1923 年德拜提出了著名的德拜屏蔽概念。

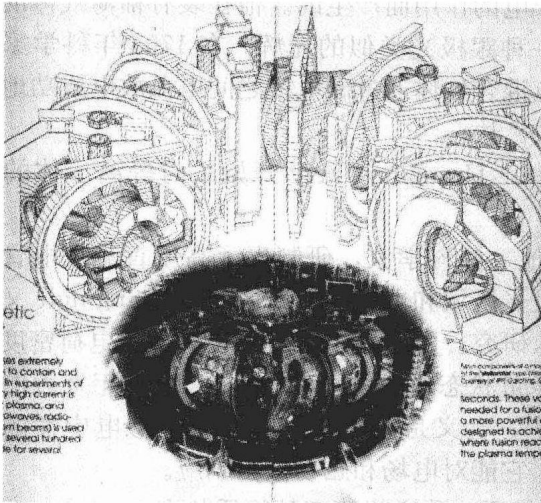
20 世纪 20 年代，磁电离理论作为现代等离子体物理中的一项主要理论，促进了等离子体研究。

20 世纪 30 年代初，开始了磁流体动力（MHD）发电的商用研究，在美国能源部的资助下，这项研究持续到今天。第二次世界大战期间，用于雷达的微波技术蓬勃发展之后，在 40 年代末期，用微波放电产生了等离子体。

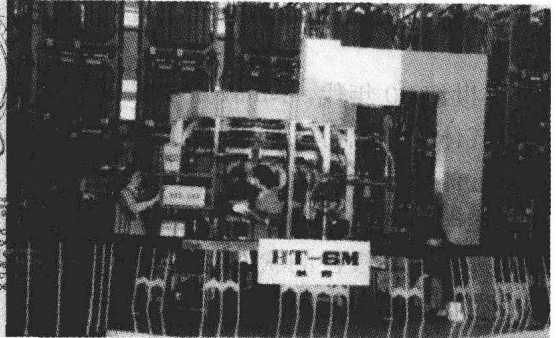
另外，从 20 世纪 30 年代到第二次世界大战结束之前，等离子体物理有了很大发展，在那一段时间开展了对电离层的研究。20 世纪 40 年代，建立了磁流体力学并成功地应用于空间物理和天体物理学的研究。1945 年在日本的广岛和长崎上空爆炸了两颗原子弹，在爆炸的上空，首次在地球上形成了大量的温度高达几百万度的人造等离子体。以后又成功的研制成了氢弹。紧接着美、英等国在 20 世纪 50 年代初各自秘密地开展了受控核聚变的研究。

受控核聚变的研究是等离子体物理发展的主要动力。1950 年左右开始于一些主要的工业化国家，一直发展到今天，等离子体物理的研究又出现了新的热潮。苏联萨哈罗夫 50 年代初首先提出用磁场来约束等离子体的概念。1957 年劳逊推导了实现受控核聚变的能量收支平衡条件即劳逊判据。该判据指出，能产生受控热核聚变的条件是：等离子体的温度要达到 10,000eV 以上，相当于 100,000,000℃，电子密度要达到 $10^{19}/\text{cm}^3$ ，这么高温度的物质，在通常条件下无法应用。

近三十年来受控核聚变研究推动了等离子体物理学的迅速发展。由于受控核聚变的研究离实现有很大的距离，因此，从 20 世纪 70 年代起，各国开始解禁，进行合作。见图 1-4，图 1-5，图 1-6，图 1-7 聚变装置原理图及中国托卡马克装置图，其中图 1-4 (b) 为等离子体物理



(a)



(b)

图 1-4 聚变装置原理图

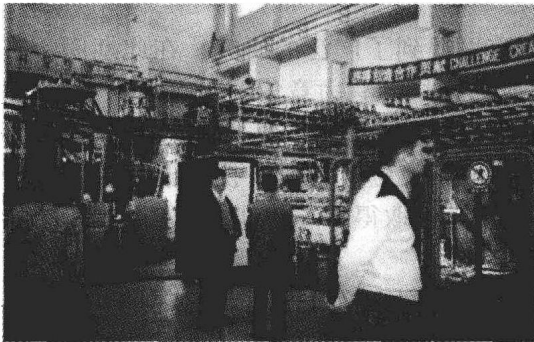


图 1-5 原核工业部 585 所托克马克装置图

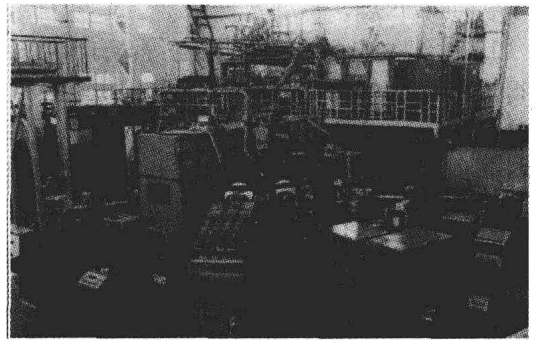


图 1-6 等离子体物理研究所 T7-U 装置图

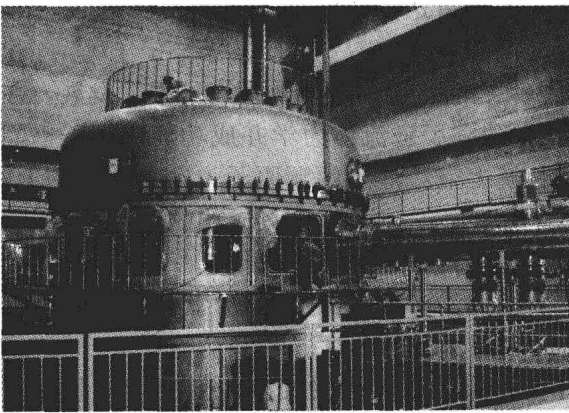


图 1-7 正在安装调试中的等离子体物理研究所 EAST 超导 TOKAMAK 装置

研究所早期托克马克装置。

目前，中国研究核聚变的单位有：原中国核工业总公司核工业部西南物理研究院（585 所），中国科学院等离子体物理研究所，清华大学（与物理所合作），华中科技大学，中国科技大学。他们积极参加热核聚变等离子体研究的国际合作计划（ITER）。

在工业和科学研究中用的低温等离子体通常其电子温度在几至几十电子伏特之间。根据电子与离子（中性粒子）的热平衡状态，低温等离子体还可以再分为非平衡态等离子体（也称冷等离子体，其表观温度接近或略高于环境温度）与平衡态等离子体（也称热

等离子体炬，其表观温度通常达几千度以上）。

自 1970 年以来，特别是最近，等离子体已被广泛地用于微电子工业，进行制造微电子电路所必需的沉积、刻蚀等加工。其他工业等离子体加工的应用近来也发展甚快。

1.3 等离子体科学和技术的三个方面及发展状况

1.3.1 等离子体科学和技术的主要方面

1.3.1.1 等离子体物理

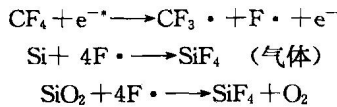
它是物理学的一个分支，包括支配等离子体行为的基本定律和物理过程。其两个重要的子领域是：磁流体动力学（MHD），涉及在磁场中电流体（包括等离子体）的性能；电流体动力学（EHD），涉及电场中带电流体或质点的行为。具体包括核聚变，天体物理，空间等离子体。如核聚变研究中等离子体的各种不稳定性，等离子体与各种加热方式，如各类波加热，中性粒子注入加热等有关理论问题；空间太阳风与地磁场相互作用的磁场重链；低温等离子体中电子束与等离子体相互作用；等离子体工艺和天体研究中的尘埃等离子体现象及理论模拟；介质阻挡放电的斑图现象及理论模拟；热等离子体等。

1.3.1.2 等离子体化学

它是化学学科的一个分支，研究当存在等离子体时所发生的多相化学反应，包括等离子体和气体均是参与者的化学反应，或者，在化学反应中，等离子体的组分或等离子体化学的生成物，与固体或液体再相互作用等。

(1) 等离子体化学的应用领域

① 等离子体化学的工业化利用在半导体集成电路的制造中已取得了划时代的成功。例如，已开发的用氟代烃等离子体中生成的原子态氟对硅基板蚀刻的工艺，确立了集成电路的完全干式工艺。



如图 1-8 集成电路刻蚀照片，图 1-9 (a) 微电机系统的制备和图 1-9 (b) 微电机的齿轮。

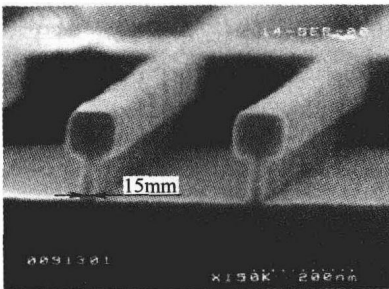


图 1-8 集成电路刻蚀照片

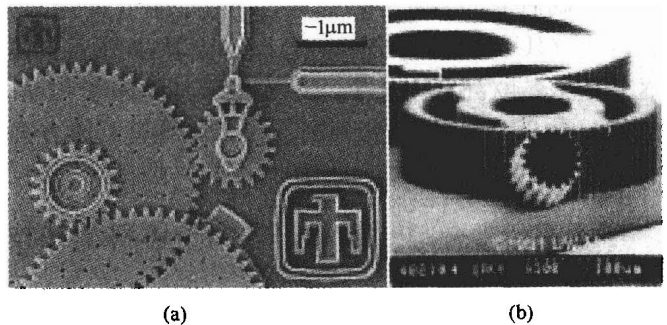


图 1-9 微电机

(a) 微电机系统的制备 (b) 微电机的齿轮

这种新的干式工艺没有使用湿式方法中的氢氟酸或热酸处理液，或其他特殊有机溶剂等工业废弃物，避免了环境卫生方面难以解决的问题，而且对产品产量、耐久性、生产效率有很大的贡献。

② 高分子材料的表面改性，改善其印刷性能，粘接性能，染色性能等。

③ 等离子体聚合法制作各类功能性薄膜。可用于反渗透膜，气体分离膜，液体分离膜，

分离碱金属的聚合膜，光学活性等离子体聚合膜，药性缓释膜，印刷包装材料用的包装阻隔膜等。

④ 表面保护膜。金属的耐腐蚀性保护膜；金属蒸镀膜的保护膜；各类塑料的表面硬化膜；磁带、磁盘等磁性材料的耐磨损性膜。

⑤ 各类光学功能的膜。如具有吸收、透射、反射、折射、偏光等作用。利用这些特性，可制成防反射膜，防湿膜，导电膜，及各类防伪材料等（有一些功能薄膜是用物理蒸镀的方法作的，在这里也一起列入）。

⑥ 等离子体化工。如能否利用氢等离子体裂解煤粉制乙炔，超细粉体的制备，等离子体焊接，等离子体切割等。

(2) 等离子体化学的应用前景 等离子体化学是使物质吸收电能进行反应的技术，必须控制好将电输入量转换为化学输入量，操作参数很复杂，有容易测定和控制的参数，如气体流量、压力、功率等，也有很难预测的因素，如反应器形状、电场分布、气体流态、固体材料的状态、空间电荷等，这些都与反应结果有关。另外，即使在等离子体化学的基础研究中发现了有用的结果，但要使之进入生产阶段还有许多工程技术上的困难，除半导体制造之外，可以说等离子体化学的工程技术是待开垦的领域。

1.3.1.3 等离子体科学和等离子体工程

等离子体科学还涉及高能物理和辐射，包括粒子束源，高频和微波功率源，激光，等离子体光源，以及等离子体源和等离子体炬。

等离子体工程是研究等离子体在重要工业装置或加工过程中的应用，包括等离子体材料加工，等离子体装置的设计和应用等。

目前等离子体工程的一个重要分支是等离子体表面工程。表面工程是指经表面预处理后，通过表面涂覆，表面改性或多种表面工程技术复合处理，改变固体金属表面或非金属表面的形态，化学成分，组织结构和应力状态等，以获得所需表面性能的系统工程^[2]。而等离子体技术的应用，有力地推动着表面工程的发展，并形成了等离子体表面工程这样一个活跃的分支。

等离子体的工业应用，因为对许多高技术工业的重要性，在所有主要的工业化国家都被列为国家基础研究的一部分，而且，正在工业化的国家亦有学术和商业兴趣。国际理论和应用化学联合会（IUPAC）列出了一套国际上从事等离子体加工研究的等离子体化学实验室名单。在这名单中，欧洲有 114 个，远远多于其他国家和地区；日本名列第二，有 45 个；美国列在第三位，有 39 个。日本和韩国、在工业等离子体方面的兴趣集中于与微电子和生物医学，生物芯片相关的技术，而欧洲和加拿大的兴趣是热等离子体方面。

1.3.2 等离子体科学和技术发展的状况

1.3.2.1 国际研究状况

在美国，工业应用主要由一些公司，特别是大公司进行研究与开发。

如热等离子体方面，Westing-house 公司研制了大功率等离子体发生器，并用于冶金、废料处理、材料加工等方面。

通用电力公司研制了低压等离子体喷涂设备，并用于飞机发动机涡轮叶片耐热涂层喷涂。Bethlehem 钢铁公司进行等离子体冶金技术的研究。Plasma Energy, Metco, Hgpertherm 等公司出售各种等离子体发生装置（大功率发生器，喷涂和切割设备等）。

在冷等离子体方面，对刻蚀、聚合、淀积、溅射、表面处理等方面都进行了研究和实际应用。IBM 公司和 Bell 实验室是最主要的研究单位。一些探索性或基础性研究则在一些大学、