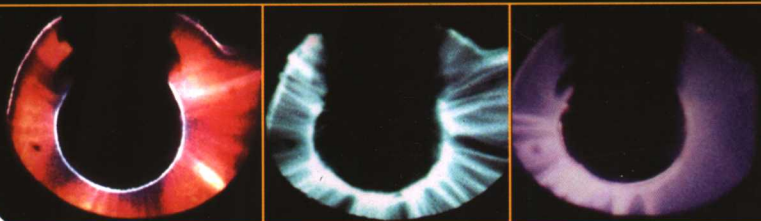


d e n g l i z i t i j i s h u y u y i n g y o n g

等离子体 技术与应用

许根慧 姜恩永 盛京 等编著



化学工业出版社

等离子体 技术与应用

许根慧 姜恩永 盛京 徐廷献 李振花 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子体技术与应用/许根慧等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3
ISBN 7-5025-8474-9

I. 等… II. 许… III. 等离子体-基本知识 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 026756 号

等离子体技术与应用

许根慧 姜恩永 盛京 徐廷献 李振花 等编著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 钱 诚

责任校对: 于志岩

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 398 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8474-9

定 价: 39.80 元

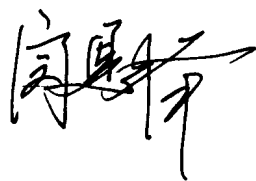
版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序 言

等离子体技术是当今科技研究的前沿，等离子体早在 19 世纪已被科学家发现，它是物质存在的第四态，自然界中 99% 以上的物质均以等离子体形式存在，太阳就是一个炙热的等离子体火球，还有地球大气上方电离层等。鉴于地球是一个冷星球，它所处的环境不能使等离子体稳定存在，因此要靠人工科学试验来发生。20 世纪等离子体技术研究已有多方面进展，在很大程度上集中于热等离子体技术的研究，如受控热核反应等离子体技术，为人类开辟了能源新途径；此外金属焊接、切割和喷涂等材料加工采用的等离子炬，为机械制造提供了一条简洁有效的新工艺。随着科技事业的发展，等离子体技术已扩展到各种学科领域，如化工、能源、生物、材料、冶金、环境、电子、通信等。21 世纪科技的发展，迫切要求应对人口增长，全球资源和能源短缺，生态环境破坏的挑战。等离子体技术就是迎接这种挑战的技术之一。等离子体有它自身的特点，是由电离状态正负离子、电子等组成的高能量集合体。宏观上它是呈电中性，利用这种特性来进行在常规条件下难于进行的化学反应或加工过程是有效的，同时不会带来环境污染。

本书是以非平衡（低温）等离子体技术为主，介绍了非平衡等离子体的基本原理、概念和应用，低温等离子体技术在化学合成反应、聚合反应、等离子体镀膜、表面处理和功能膜制备等中的应用。作者多年来进行非平衡等离子体技术的科学研究和教学工作，相继承担了多项国家自然科学基金委课题，国家重大科技攻关和国际合作研究项目。在国内外发表了不少有一定影响的研究论文，总结和归纳了在长期科研中发现和取得的研究结果。本书从低温等离子体的应用技术基础出发，深入浅出，是一本有应用价值的参考书。



2006 年 1 月 25 日

前言

等离子体是物理学科研究中的一个分支，目前等离子体技术已被广泛地用于国防、工业、农业、环境、通信等一系列国民经济发展领域，例如：微电子电路等离子体镀膜、刻蚀、沉积等加工过程，极大地推动了信息产业的发展，促进了工业科技进步，它应用的范围广，种类繁多，大到宇宙航天、国防军事工程、核聚变反应堆，小到纳米材料、信息工业的超大规模集成电路中 $0.1\mu\text{m}$ 集成块的生产，均离不开等离子体技术。特别是进入 21 世纪，随着科技进步和社会生产力发展，人类的生活质量不断提高，随之而来的人口与寿命增长，全球资源日趋枯竭，生态破坏和环境污染，已成为全球面临的严峻问题，全世界对此已高度重视，人类不得不反思以往行为，重新审视当今社会的经济发展模式，再不能以破坏地球生存环境为代价来换取经济的高速发展，而要最大限度地减少资源浪费，利用浩瀚的宇宙存在的自然条件，向海洋、太空索取能源和资源，其中等离子体——自然界中物质存在的第四态就是 21 世纪需大力开发的新技术之一。

本书将对被称为低温或冷等离子体的非平衡等离子体作主要介绍。这类等离子体特点是电子温度 T_e 很高，等离子体的粒子温度 T_i 较低，也就是等离子体的主体温度大大低于电离时的电子温度，即 $T_e \gg T_i$ ，这是非平衡等离子体的特点。

利用非平衡等离子体技术有利于为化学反应和加工制造提供一种低温、高能量的节能、无污染的工艺，例如：电晕放电等离子体技术的表面处理，溅射镀膜，辉光放电催化反应等，这方面研究的成功事例不少，特别值得提出的是对某些化学反应，由于受到热力学平衡的限制，在一般情况下反应不可能进行或难以进行，利用非平衡等离子体可使反应在低温下获得高能量，使其反应分子激活，进而引发生成活性原子、离子、自由基等活性物种，它们均呈激发状态，进而能够在较缓和的条件下完成化学反应。在 20 世纪中期等离子体化学已有较大的发展，但是将等离子体技术直接用于有难度的化学合成反应，到目前为止成功的事例不多。这说明了等离子体化学，特别是 C_1 化学、能源合成化学的等离子体技术在化工应用中的难度是比较大的。

本书正是基于上述背景提出来的, 编者是天津大学化工学院、材料科学与工程学院和天津大学理学院长期从事等离子体技术研究和教学工作的教授, 由他们以及他们的博士生和在课题组从事该项研究的青年教师共同编写完成的。

本书的各章作者: 第 1 章由李振花, 吕静, 许根慧编写; 第 2 章由许根慧, 王保伟编写; 第 3 章由许根慧, 李振花, 吕静编写; 第 4 章由王保伟, 李阳, 许根慧编写; 第 5 章由许根慧, 李明伟, 崔锦华, 孙洪伟编写; 第 6 章由徐廷献, 季惠明, 黄平编写; 第 7 章、第 8 章由姜恩永, 白海力编写; 第 9 章由盛京, 马桂秋编写; 第 10 章由杨利营, 盛京编写。

本书以非平衡等离子体为主要内容进行介绍, 共分为 10 章, 第 1~3 章介绍等离子体基本原理、基础概念。第 4~9 章分别介绍在无声放电、电晕和辉光放电、微波放电等不同的等离子体条件下的研究基础工作与技术应用, 结合实验研究举例, 分析判断过程的性质与特点, 以便读者理解。第 10 章简要介绍近几年来国际上对等离子体技术的研究进展。本书以应用基础研究为主体, 涉及到等离子体的一些专业性的经典理论和公式在此不作深长记述和推导, 读者可查阅本书各章后面附有的参考文献, 自行选读。

本书作者们一直在等离子体学科领域进行不同方向的应用技术研究工作, 在长期的研究工作中, 体会到等离子体技术研究涉及的学科面很广, 要深入探索的工作很多, 它是物理和化学等多种学科领域的边缘交叉的科学问题, 有待继续发现与研究, 是一门发展中的科学, 有较强的生命力。近几十年来国际上在此领域的研究十分活跃, 等离子体技术的书籍和专著不少, 笔者参加了近年来有关等离子体研究的数次国际性学术会议, 感受到世界各国对等离子体的研究十分重视和活跃, 等离子体技术的开拓与应用发展迅速, 相对的是非平衡(冷)等离子体技术在化工中的研究与应用比较弱, 并有一定难度, 这也是世界同行们共同的感受和十分关注的议题。本书作者有感于应对自身的研究结果加以整理、归纳, 提供给读者进行交流, 抛砖引玉, 希望有更多的等离子体研究者在此领域有更大发展和突破。鉴于编者水平有限, 不足之处请批评指正。

本书承蒙著名的科学家, 中国科学院、中国工程院两院院士闵恩泽教授指导审阅, 为本书作序, 特此表示衷心的感谢。

许根慧

2006 年 1 月于天津大学

目 录

1 等离子体基本原理	1
1.1 等离子体概念	1
1.1.1 物质的三态变化	2
1.1.2 物质第四态——等离子体	2
1.2 等离子体特征和等离子体判据	3
1.2.1 等离子体的整体特性	3
1.2.2 等离子体的准电中性	3
1.2.3 等离子体鞘层	4
1.2.4 等离子体扩散过程	5
1.2.5 等离子体辐射	5
1.3 等离子体的特征量及等离子体判据	7
1.3.1 粒子密度和电离度	7
1.3.2 电子温度和离子温度	7
1.3.3 沙哈方程	8
1.3.4 等离子体的时空特征限量	8
1.3.5 等离子体判据	8
1.4 等离子体的分类	9
1.4.1 按存在分类	9
1.4.2 按电离度分类	9
1.4.3 按粒子密度分类	9
1.4.4 按热力学平衡分类	10
1.5 等离子体的应用	10
1.5.1 等离子体物理	10
1.5.2 等离子体化学	10
1.5.3 等离子体工程	13
1.5.4 等离子体工业应用实例	13
参考文献	13
2 等离子体化学行为	14
2.1 等离子体的超常化学现象	14
2.2 非平衡等离子体的激活作用	17
2.2.1 碰撞参数	18
2.2.2 等离子体中的基本粒子	18
2.2.3 等离子体产生的电离机制	21

2.3	电离过程分析——电子雪崩现象	23
2.4	等离子体化学反应历程	25
2.4.1	电子反应	26
2.4.2	重粒子之间的反应	26
2.4.3	举例分析	26
参考文献		29

3 等离子体发生技术

3.1	气体放电特性与原理	30
3.1.1	汤森放电	31
3.1.2	帕邢定律 (Paschen law)	32
3.1.3	气体原子的激发转移和消电离	32
3.2	放电等离子体发生形式与放电类型	33
3.2.1	电晕放电过程	33
3.2.2	火花放电过程	34
3.2.3	介质阻挡放电 (DBD) 过程	34
3.2.4	辉光放电	35
3.2.5	弧光放电过程	35
3.2.6	微波放电	36
3.3	放电参量与等离子体作用	36
3.3.1	放电参量	36
3.3.2	等离子体作用举例分析——辉光放电等离子体作用	37
3.4	等离子体工业发生技术	41
3.4.1	高频等离子体发生技术	41
3.4.2	介质阻挡放电 (DBD) 等离子体技术制臭氧	42
参考文献		43

4 介质阻挡放电等离子体技术与应用

4.1	介质阻挡放电特性	44
4.1.1	介质阻挡放电反应器	44
4.1.2	介质阻挡放电的物理过程	44
4.1.3	介质阻挡放电特性	46
4.2	介质阻挡放电物理参数的测量	46
4.2.1	介质阻挡放电的参数和过程	46
4.2.2	介质阻挡放电的电场强度	47
4.2.3	介质阻挡放电的等效电路	48
4.2.4	介质阻挡的放电电压	48
4.2.5	介质阻挡的放电电流	49
4.2.6	介质阻挡的放电电荷	49
4.2.7	介质阻挡放电的功率	50
4.3	甲烷的微放电	51
4.3.1	微放电的形貌	51

4.3.2	微放电的特征	52
4.3.3	测量方法	53
4.4	无声放电等离子技术在化工中的应用——天然气转化和 CO ₂ 利用	53
4.4.1	介质阻挡放电等离子体催化天然气偶联制 C ₂ 烃	54
4.4.2	甲烷和二氧化碳反应	59
4.5	偶联历程的量子化学研究	65
4.5.1	反应途径的推定	66
4.5.2	计算方法	66
4.5.3	过渡态的几何构型	67
4.5.4	生成热和活化能	68
4.5.5	键级分析	69
4.5.6	内禀反应坐标 (IRC) 反应路径分析	70
4.5.7	结语	72
	参考文献	72
5	电晕和辉光放电等离子体技术与应用	74
5.1	电晕和辉光放电等离子体性质分类	74
5.1.1	电晕放电	74
5.1.2	辉光放电	75
5.2	等离子体鞘层效应和放电的机理分析	75
5.2.1	等离子体鞘层效应	75
5.2.2	电晕放电的机理分析	78
5.3	电晕和辉光放电等离子体技术在化工中的应用——甲烷和二氧化碳制合成气、甲烷偶联制碳二烃	80
5.3.1	利用电晕放电冷等离子体技术, 甲烷和二氧化碳制合成气	80
5.3.2	非对称电极电晕放电场的能量分布	90
5.3.3	常压辉光放电甲烷偶联制碳二烃	93
5.3.4	等离子体甲烷常压偶联反应的光谱分析	98
	参考文献	104
6	微波放电等离子体技术与应用	106
6.1	微波等离子体原理	106
6.1.1	微波在等离子体中的传播特性	107
6.1.2	微波等离子体的电子能量吸收的计算	109
6.2	微波等离子体化学气相沉积系统	112
6.2.1	微波等离子体化学气相沉积系统	112
6.2.2	溶胶雾化微波等离子体化学气相制备薄膜材料	115
6.3	微波等离子化学气相沉积的应用	119
6.3.1	微波等离子体化学气相沉积制备薄膜	119
6.3.2	微波等离子体化学气相沉积法制备纳米管	121
6.3.3	微波等离子体制备粉体材料	122
6.3.4	微波等离子体表面改性	124

参考文献	127
------------	-----

7 放电等离子体技术与在薄膜制备中的应用 (一)	128
---------------------------------------	-----

7.1 等离子体的形成与检测	128
7.1.1 低温等离子体的形成方法	128
7.1.2 等离子体的测量	130
7.2 等离子体溅射现象与性质	133
7.2.1 溅射现象	133
7.2.2 溅射率	134
7.2.3 溅射率的测量法	134
7.2.4 各种物质的溅射率	136
7.2.5 各种物质起始溅射的能量阈值	138
7.2.6 离子的加速电压同溅射率的关系	138
7.2.7 溅射率和晶体结构的关系	140
7.2.8 离子束相对靶面的入射角同溅射率的关系	140
7.2.9 从靶面上被溅射出来的粒子状态	140
7.2.10 被溅射出来的原子的角度分布	141
7.3 溅射装置和工作原理	141
7.3.1 直流二极溅射装置及工作原理	142
7.3.2 磁控溅射装置和原理	143
7.3.3 对向靶溅射装置和原理	143
7.3.4 射频溅射装置和工作原理	144
7.3.5 离子束溅射装置与原理	147
7.3.6 反应溅射法的成膜原理	147
7.3.7 激光束成膜装置	148
参考文献	148

8 放电等离子体技术与在薄膜制备中的应用 (二)	150
---------------------------------------	-----

8.1 高密度磁记录用的垂直磁化薄膜	150
8.1.1 Co-Cr 系垂直磁化薄膜	150
8.1.2 钽铁氧体 (BaM) 垂直磁化薄膜	154
8.2 对向靶反应溅射 FeN 薄膜	156
8.2.1 对向靶反应溅射 α'' -Fe ₁₆ N ₂ 单晶薄膜	156
8.2.2 Fe-N 梯度薄膜	159
8.2.3 Ti 掺杂 α'' -Fe ₁₆ N ₂ 薄膜的结构热稳定性增强	162
8.3 碳氮薄膜	163
8.3.1 碳氮薄膜的化学成分——氮含量	164
8.3.2 碳氮薄膜的化学键结构	166
8.3.3 碳氮薄膜的力学性质	169
8.3.4 碳氮薄膜的电学性质	170
8.3.5 光学性质	170
8.3.6 热稳定性	171

8.3.7	类芳香烃结构的碳氮薄膜	172
8.4	软 X 射线光学多层膜	172
8.4.1	软 X 射线金属多层膜的结构设计	173
8.4.2	软 X 射线光学多层膜的制备、结构稳定性与反射率	175
8.4.3	软 X 射线光学多层膜的结构评价	178
8.5	磁隧道结 (MTJ)	179
8.5.1	MTJ 中铁磁薄膜层之间的隧穿电导	180
8.5.2	隧道结的制备及性质测量	183
8.5.3	实验结果	183
8.6	颗粒薄膜	185
8.6.1	铁磁性金属-非磁性金属颗粒膜	186
8.6.2	金属-绝缘体颗粒薄膜	188
8.6.3	与颗粒结构相关的其他磁性质	195
8.6.4	应用	195
	参考文献	196
9	等离子体在 高分子化学中的应用	198
9.1	低温等离子体在 高分子化学中的应用	198
9.2	等离子体聚合	199
9.2.1	等离子体聚合反应装置	199
9.2.2	等离子体反应的基本参数	201
9.2.3	等离子体聚合的反应机理与特征	202
9.2.4	等离子体聚合反应	207
9.3	等离子体引发聚合	208
9.3.1	等离子体引发聚合的装置	209
9.3.2	单体和反应条件	209
9.3.3	等离子体引发聚合的反应机理和特征	210
9.3.4	等离子体引发聚合反应	211
9.3.5	等离子体引发聚合原位合金化	216
9.4	高分子材料的等离子体表面修饰与改性	217
9.4.1	等离子体表面处理的特点	218
9.4.2	等离子体与高分子材料表面的作用	218
9.4.3	高分子材料表面的等离子体修饰与改性的应用	220
9.5	等离子体高分子化学的发展前景	224
	参考文献	225
10	等离子体化学的进展	228
10.1	等离子体在微电子、 光电子技术方面的应用及进展	228
10.2	等离子体在薄膜制备领域的应用及进展	228
10.3	超纯、超细粉末材料的合成	229
10.4	等离子体表面处理	229
10.4.1	聚合物材料的等离子体表面改性	230

10.4.2	等离子体在纳米复合材料的制备中的应用	231
10.4.3	金属材料的表面处理	231
10.4.4	等离子体喷涂	232
10.5	等离子体化学合成	232
10.5.1	常压非平衡等离子体合成氨	233
10.5.2	等离子体有机合成	233
10.5.3	纳米碳管的合成	233
10.6	低温等离子体在环境保护方面的应用进展	233
10.6.1	低温等离子体处理气体污染物的研究进展	234
10.6.2	在温室气体转化方面的应用	234
10.6.3	臭氧的合成	235
10.6.4	在汽车废气处理方面的应用	235
10.6.5	在液、固体废物处理方面的应用	235
10.7	在生物学和医学方面的应用	236
10.7.1	提高医用高分子材料的生物相容性	236
10.7.2	生物医用聚合物材料的微图形化	237
10.7.3	利用等离子体杀菌消毒	238
10.8	等离子体化学中的诊断技术	239
展望		240
参考文献		240

等离子体基本原理

等离子体作为物质存在的一种基本形态，自从 18 世纪中期被发现以来，对它的认识和利用在不断深化。早期等离子体主要是作为发光现象、导电流体或高能量密度的热源来加以研究和应用的。利用其光能的如霓虹灯、荧光灯、水银灯等，利用其热能的如等离子体焊接和等离子体切割等，利用其机械能的磁流体发电等。到 20 世纪 60 年代，等离子体化学能的研究和利用逐渐受到人们的重视，随着对等离子体中各种粒子化学活性和化学行为认识的不深入，形成了一门新兴的交叉学科——等离子体化学。由于等离子体化学是使物质吸收电能进行反应的技术，必须将电能有效地转化为化学能，因此等离子体化学的发展与真空技术、等离子体诊断技术和放电技术的发展是息息相关的。近十年来等离子体得到了突飞猛进的发展，其研究重心也从热等离子体及等离子体物理应用扩展到低温等离子体及其化学方面的应用。

本章旨在介绍等离子体的基本概念和性质，为人们了解和利用等离子体技术提供基础。

1.1 等离子体概念

等离子体是由带电的正粒子、负粒子（其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团等）组成的集合体，其中正电荷和负电荷电量相等故称等离子体。它们在宏观上是呈电中性的电离态气体^①（也有液态、固态）。这种电离态气体要符合等离子体存在的空间与时间矢量条件，也就是说等离子体中的粒子密度和能量分布要满足在质量和能量特定范围才能达到等离子体自持稳态的时空矢量场。图 1-1 列出了某些由自然界产生的和研究应用的等离子体存在的密度—温度的二维分布图。

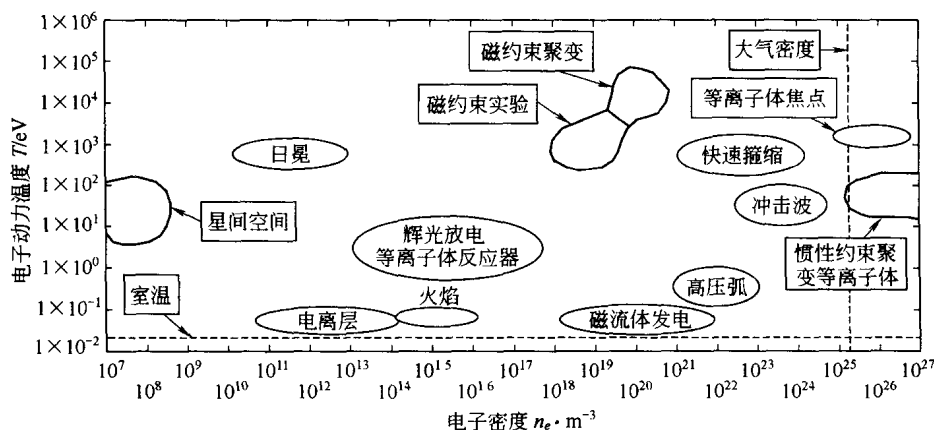


图 1-1 等离子体密度—温度的二维分布^[1]

① 本书只限于气态等离子体，液态、固态等离子体不作讨论。

由图 1-1 可知宇宙星际空间在地球上空的电离层、日冕以及雷雨时的闪电等都属自然界的等离子体形式。太阳本身就是一个炽热发光的等离子体火球,已存在上亿年了,在浩瀚的太空宇宙中绝大多数物质都呈等离子体状态存在,因此等离子体是物质存在的基本形态,它与众所周知的物质三态也就是气态、液态、固态并列称为物质的第四态,即等离子体态。鉴于地球是冷星球,现已不具有等离子体自然形成的稳态条件了,只有在特殊情况下才出现等离子体现象的发生,如北极光和闪电等。

1.1.1 物质的三态变化^[2]

为了理解等离子体,可从物质的三态变化了解其生成机理。一切宏观物质都是由大量分子组成的。分子间力的吸引作用使分子聚集在一起,在空间形成某种有规则的分布,而分子的无规则热运动具有破坏这种规则分布的趋势。

通常见到的物质基本是以固体、液体或气体三态中的任一态存在。在一定的温度和压力下,某一物质的存在状态取决于构成物质的分子间力与无规则热运动这两种对立因素的相互作用,或者说取决于分子间的结合能与其热运动动能的竞争。而温度是分子热运动剧烈程度在宏观上的表现。在较低温度下,分子无规则热运动不太剧烈,分子在分子间力的作用下被束缚在各自的平衡位置附近做微小的振动,分子排列有序,表现为固态。温度升高时,无规则热运动剧烈到某一程度,分子的作用力已不足以将分子束缚在固定的平衡位置附近做微小振动,但还不至于使分子分散远离,这就表现为具有一定体积而无固定形态的液态。温度再升高,无规则热运动进一步加剧,分子间力已无法使分子保持一定的距离,这时分子互相分散远离,分子的移动几乎是自由移动,这就表现为气态。可见,在一定条件下,物质的三态之间是可以相互转化的。各种物态之间的相互转化都是和温度 T 和压强 P 有关。那么,对气态物质进一步加热会产生什么变化呢?

1.1.2 物质第四态——等离子体

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,

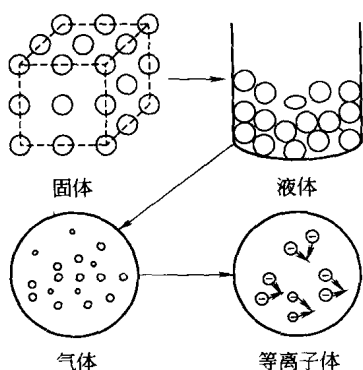


图 1-2 物质四态示意

如果对气态物质进一步继续加热,温度升高,将会有什么变化呢?当温度足够高时,构成分子的原子也获得足够大的动能,开始彼此分离,这一过程称为离解。在此基础上进一步提高温度,就会出现一种全新的现象,原子的外层电子将摆脱原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子变成带正电的离子,这个过程叫电离。等离子体指的就是这种电离气体,它通常是由光子、电子、基态原子(或分子)、激发态原子(或分子)以及正离子和负离子六种基本粒子构成的集合体。它们之间的转化如图 1-2 所示。

因此,等离子体也被称为物质的第四态。对于人们所熟悉的气、液、固“三态”,它们之间的转化只涉及分子间力的变化,而对于人们还不熟悉的第四态“等离子体”,它由气态转化时则需要克服原子核对外层电子的束缚。因此和已有的三态相比,等离子体无论在组成上还是在性质上均有着本质的差别。主要表现如下。

① 等离子体从整体上看是一种导电流体。

② 气体分子间并不存在净电磁力,而等离子体中电离气体带电粒子间存在库仑力,由此导致带电粒子群的种种集体行为,如等离子体振荡和等离子体辐射等,这些将在 1.2 节做

详细介绍。

在茫茫宇宙中, 99%以上的物质是以等离子体形式存在的。人类也无时无刻不在受到等离子体的保护。太阳就是一个巨大的等离子体, 其中心温度高达一千万度以上, 那里的物质均以电离状态存在。类似太阳的许许多多恒星、星云以及广阔无垠的星际空间物质都是等离子体。地球上空约 70~1000km 范围的电离层也是等离子体, 它主要是受太阳辐射的影响形成的。夏日的雷电也是一种等离子体现象。自然界中等离子体还有很多, 形成的原因各不相同, 但殊途同归, 都达到了气体的电离。

1.2 等离子体特征和等离子体判据^[1~5]

1.2.1 等离子体的整体特性

从整体看, 等离子体是一种导电流体。由等离子体的生成过程可知, 当给物质施加显著的高温或高能量时, 中性的物质就会被离解成电子、离子和自由基。不断地从外部施加能量, 物质就会被离解成阴、阳荷电粒子状态。在外加电压下, 阴、阳电粒子的流动就会产生电流。

对于洛伦兹等离子体, 把等离子体看作微观粒子的集合, 可以把等离子体的整体电导率 σ 写为

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_{ce}} = \frac{1}{\rho} \quad (1-1)$$

式中 n_e ——电子密度;

m_e ——电子质量;

ν_{ce} ——电子碰撞频率。

而对于电子只与每个电荷数均为 z 的带电粒子碰撞的情况, 等离子体整体电导率 σ_s 为

$$\sigma_s = \frac{51.6 \epsilon_0^2}{e^2 z} \left(\frac{\pi}{m_e} \right)^{1/2} \frac{(kT_e)^{3/2}}{\ln \Lambda} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数;

k ——玻耳兹曼常数;

T_e ——电子温度;

$\ln \Lambda$ ——库伦对数, $\ln \Lambda = \ln \frac{12\pi(\epsilon_0 kT_e)^{3/2}}{z^2 e^3 n_e^{1/2}}$ 。

此式由物理学家 Lyman Spitzer 提出, 也称为 Spitzer 电导率。

在等离子体中, 电流由离子和电子共同组成, 在外加电场中它们以相反方向运动。离子和电子与中性本底气体碰撞, 从而产生一个稳态漂移速度。由于离子的质量比电子大得多, 它们的漂移速度较小, 而电子的漂移速度较大。因此, 等离子体中的电流密度与载流粒子的平均漂移速度 v_d 和粒子密度成正比。而平均漂移速度与电场强度和迁移率 μ 成正比。在给定压力的中性本底气体下, 迁移率是碰撞频率 ν_c 的函数, 且近似保持为常数。因此, 利用迁移率, 可将漂移速度写成简单正比于电场的形式。

$$v_d = \frac{e}{m \nu_c} E = \frac{\sigma}{en_e} E = \mu E \quad (1-3)$$

1.2.2 等离子体的准电中性

就等离子体本身而言, 它具有变成为电中性的强烈倾向, 故离子和电子的电荷密度几乎

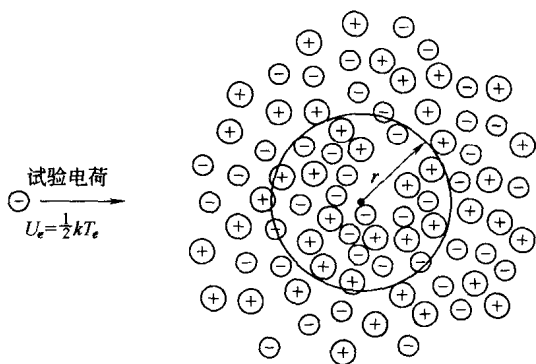


图 1-3 电子动力学温度为 T_e 的等离子体
中半径为 r 的准中性球区域, 具有能量为 $kT_e/2$
的单电子从左面向球中心靠近^[1]

相等, 此种情况称为准中性, 是带相反电荷粒子间的强电作用的结果。等离子体中的电荷分离仅可能由外加电场或等离子体本身的内能 (热能) 来维持; 可由等离子体动力学温度维持的对电中性的最大偏离估算出来。

如图 1-3 所示, 一个密度几乎相等、每立方米 n_0 个粒子的电子和单电荷正离子构成的含等等离子体, 在半径为 r 的球形区域内, 此体积内的静电能由其所包含的 (假设为负的) 剩余电荷量决定, 此球表面的静电位给出为

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1-4)$$

式中 Q ——球内的净电荷, 此电荷由球体积乘剩余电荷密度给出, 即 $e\delta_n$, 其中 e 为电子电荷, 而 δ_n 为球内电子与 (可能是多电荷的) 离子密度之差。

$$\delta_n = n_e - Zn_i \ll n_0 \quad (1-5)$$

球表面的静电位为

$$V = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 e\delta_n}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{r^2 e\delta_n}{3\epsilon_0} \quad (\text{V}) \quad (1-6)$$

被推进净负电荷小球区域的一个电子所得到的能量可由式 (1-6) 的静电位乘以电荷得到, 即

$$U_e = eV = \frac{r^2 e^2 \delta_n}{3\epsilon_0} \quad (1-7)$$

此能量可能仅来自与有限的动力学温度 T 有关的动能。电子运动的径向自由度与特征热能有关, 给出为

$$U_e = \frac{1}{2} kT = \frac{1}{2} eT' \quad (1-8)$$

其中 k 为玻耳兹曼常量, 将式 (1-8) 代入式 (1-7), 可解出与电中性的相对偏离:

$$\frac{\delta n}{n_0} = \frac{3T'\epsilon_0}{2er^2 n_0} = 8.3 \times 10^7 \frac{T'}{n_0 r^2} \quad (1-9)$$

式中 T' 为用电子伏特表示的动力学温度。

通常等离子体的偏离电中性为十万分之几。因此, 任何实际等离子体的体积将包含几乎恰恰相同的正负电荷量。此假设称为准中性, 可允许假设 $Zn_i \approx n_e$, 故在许多计算中不需要分别考虑离子或电子数。

1.2.3 等离子体鞘层

在直流或低频辉光放电中往往会发生局部性的等离子体不满足电中性的情况, 特别是在与等离子体接触的固体表面附近, 由于电子附着, 基板形成负电位, 在其表面附近的等离子体中正离子的空间电荷密度增大。这种空间电荷分布称作离子鞘。由此形成的空间称作等离子体鞘层。所有的等离子体与固体接触时都会在固体表面的交界处, 形成一个电中性被破坏了的电荷层, 即等离子体鞘层。正是这种鞘层作用赋予了等离子体对材料表面处理时的活性。下面看一下简单的静电等离子体鞘层。

一个与等离子体接触的电极或壁,往往仅影响其最邻近的等离子体。除非在等离子体中有大的电流流动,或者除非高度扰动,等离子体总趋向形成一表面鞘层,以使自己与外供电场屏蔽开。此特征屏蔽距离几乎等于等离子体与周围壁之间形成的鞘层厚度。

由泊松 (Poisson) 方程可得鞘层区域内的静电场为

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\epsilon_0}(n_i - n_0) \quad (1-10)$$

式中 n_i 和 n_0 分别是离子与电子的热密度,在热平衡下,它们满足玻耳兹曼分布

$$n_i = n_0 \exp\left(-\frac{e\varphi}{T_i}\right), n_e = n_0 \exp\left(-\frac{e\varphi}{T_e}\right) \quad (1-11)$$

将上式代入式 (1-10), 可得

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{en_0}{\epsilon_0} \left[\exp\left(-\frac{e\varphi}{T_i}\right) - \exp\left(-\frac{e\varphi}{T_e}\right) \right] \quad (1-12)$$

显然, 此式为非线性方程, 对于 $|\frac{e\varphi}{T}| \ll 1$ 的空间内, 可以对上式进行泰勒展开, 取线性项, 可得

$$\nabla^2 \varphi = \left(\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 T_i} + \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 T_e} \right) \varphi \approx \frac{1}{\lambda_D^2} \varphi \quad (1-13)$$

于是有等离子体的德拜 (Debye) 长度 λ_D 为

$$\lambda_D = \left(\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (1-14)$$

λ_D 也称为德拜屏蔽距离, 表示的是等离子体和电极间, 或等离子体与壁之间形成的鞘层的特征厚度。在相对静止的等离子体中, 其大部分积聚的自由能量被耗尽, 鞘层可能很薄; 然而, 在回旋半径大于德拜屏蔽距离的磁化等离子体中, 或在载流的非磁化等离子体中, 或是高度湍性的等离子体中, 特征鞘层厚度可能会更大些。

1.2.4 等离子体扩散过程

由于等离子体会产生热效应以及等离子体内部微观粒子的自由扩散, 这些自由粒子会在不同方向上产生扩散。并且对于不同的等离子体类型, 其扩散的形式是不同的, 下面介绍两种简单的等离子体扩散系数。

综合考虑到等离子体的径向扩散和非径向的迁移, 对于麦克斯韦 (Maxwell) 气体和非磁化等离子体, Einstein 给出了此类等离子体的扩散系数。

$$D = \frac{mv^{-2}}{3q} \mu = \frac{8kT}{3\pi q} \mu \quad (1-15)$$

另外 David Bohm 提出了一个从经验推论的扩散系数, 用于描述某些电弧中等离子体的径向扩散, 表示为

$$D_B = \frac{1}{16} \frac{kT_e}{eB} \quad (1-16)$$

1.2.5 等离子体辐射

自然界和实验室中的等离子体都是发光的。除了可见光以外, 等离子体也能发出看不见的紫外线甚至 X 射线。所有这些辐射, 本质上都是电磁波, 等离子体发出电磁波的过程称为等离子体辐射。

伴随等离子体辐射会产生活性物种及能量的转移。一方面, 辐射释放能量, 这些辐射能量能有效地用来激活某些反应体系, 这已被用于等离子体引发聚合和等离子体对材料表面改