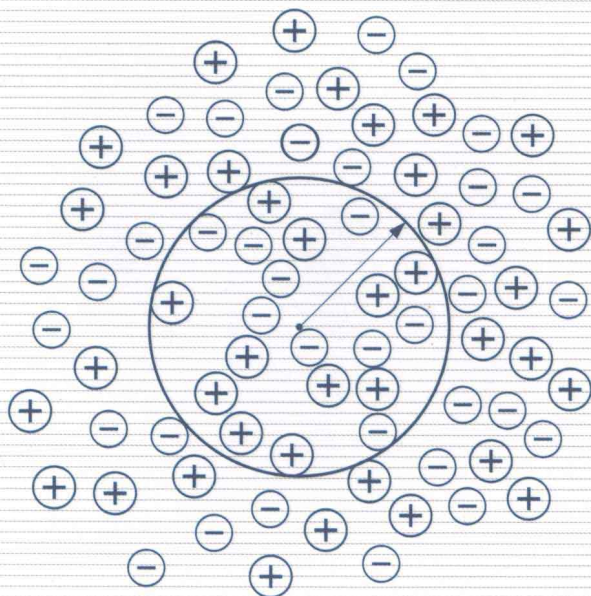


普通高等院校“十一五”电子信息与电气学科研究生规划教材

等离子体技术及应用

Plasma Technology and Its Applications

赵青 刘述章 童洪辉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电子科技大学研究生系列教材建设项目

等离子体技术及应用

赵 青 刘述章 童洪辉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书比较系统、全面地介绍了等离子体技术原理及其应用。全书共分 13 章,包括等离子体基本性质、各种等离子体技术的装置、原理及应用的最新发展、等离子体诊断的原理及方法。等离子体应用中主要介绍等离子体表面处理,等离子体在高功率微波方面的应用,等离子体隐身,微波等离子灯等最新研究成果和应用实例。等离子体诊断主要介绍等离子体应用中常用的诊断原理、方法及应用。

本书可作高等院校等离子体、物理电子、真空技术、凝聚态物理及核技术应用等专业研究生和高年级学生的教材,也可供从事等离子体技术、微细加工技术、气体放电、高功率微波等学科领域的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体技术及应用 / 赵青, 刘述章, 童洪辉编著.

北京: 国防工业出版社, 2009. 2

(研究生系列规划教材)

ISBN 978 - 7 - 118 - 06103 - 1

I. 等... II. ①赵...②刘...③童... III. 等离子体 - 研究生 - 教材 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 200836 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 22 1/4 字数 397 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

序 言

从 20 世纪 80 年代历时至今的二十多年来,信息电子科学技术的发展令人瞩目。以无线通信和互联网技术为代表的现代信息电子科技极大地促进了经济、社会的发展,并深刻地改变了人类生活。如今,信息电子技术不仅自身已蓬勃发展为强大的新兴产业,它对各传统产业在技术进步上的促进也是有目共睹的。而在国防建设和军事技术的发展中,信息电子技术的重要性更为突出,因为现代化战争最关键的环节就是信息的获取、控制与对抗等电子技术的较量。

正因为迅猛发展的信息电子技术对当今社会发展具有如此重要的意义,因此,国内各高校都极其重视信息电子类相关学科的发展、相关专业的成长和相关专业教学水平的提高。而在这一巨大的努力和付出中,研究生教育质量的提升和研究生教材建设则是至关重要的一环。

电子科技大学正是基于上述认识,近年来加大了电子信息类教材建设的力度。我校的学科专业涵盖了从电子材料、电子器件、电路、信号、控制直到各种电子系统的较为完整的电子信息领域,学校极为重视国内外研究生课程的设置和教材内容的比较研究,并建立了专项基金,用于资助具有一定学术水平的研究生教材的编写与出版。

当然,教材建设也是一项学术性很强的工作。研究生教材既要体现理论上的基础性和系统性,又要尽可能地反映本领域研究的最新成果和进展,要求较高。另一方面,高校的骨干师资力量大多既要承担繁重的科研工作,又要承担大量的教学任务,加之各位教授的专业背景不同,教材的最终质量和使用效果仍需通过实践去检验。因此,我们诚恳希望使用这些教材的各个院校的广大师生直言批评、不吝指正,使我校的教材建设能够越做越好。

电子科技大学
二〇〇七年九月十九日

前 言

等离子体技术是 21 世纪需大力开发的新技术之一。等离子体技术已被广泛地应用于国防、工业、农业、环境、通信等一系列国民经济领域。为适应我国飞速发展的经济建设,为培养具有创新精神的高素质人才,急需有一本能系统反映近代新知识、新技术特点的等离子体技术及应用方面的教材。

在编写中结合自身科研与教学的体会,并尽可能地汲取前人或相关优秀教材编写的经验,力图在内容和编排上有所突破,以强调基础理论与实际应用相结合,基础理论的阐述力求简明易懂。教材编写共有 13 章,内容可分为三大方面,第一部分为“等离子体特性及主要发生方法”,讨论了等离子体的基本性质;等离子体的主要发生方法(辉光放电,电晕放电,电弧放电,高频放电,微波放电,介质阻挡放电);第二部分为“等离子体应用”,着重介绍等离子体材料表面改性(CVD、PVD、离子注入、刻蚀、等离子体炬等设备及应用),等离子体隐身,填充等离子体微波管,微波等离子灯;第三部分为“等离子体诊断”,包括等离子体的光谱分析方法、朗缪尔探针、微波诊断等方法。具体内容围绕基于等离子体的产生方法、各种等离子体技术及等离子体在具体的工业过程或工业装置中的应用,其中以极具特色介绍等离子体诊断理论、方法及最新的应用成果而展开。

教材的着眼点是让本专业的学生系统全面掌握本领域基础知识和引导他们较快进入等离子体应用前沿领域,让相关专业学生具有较广泛的知识面并系统全面地了解等离子体的应用功能。

等离子体技术研究涉及的学科面很广,它是物理和化学及电子学等多种学科领域的边缘交叉的科学问题,是一门发展中有较强生命力的学科。本书的作者们一直在等离子体科学领域进行不同方向的应用技术研究工作,书中的内容也是长期科学研究工作的总结以及研究生教学讲义的整理、归纳和扩展,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。此外,实验室的各位博士和硕士研究生为

VI

本书的完成也都积极贡献了他们的才智,尤其要感谢金亚凡、巨汉基、孙旭、刘建卫、王威、何果等几位同学。在这里,对他们表示由衷的感谢,感谢他们的支持、参与。鉴于编著者水平有限,书中存在的错误和不足之处,请读者提出批评意见。

编著者
2008 年 6 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 等离子体概念	1
1.2 等离子体的各种性质	3
1.3 等离子体的分类	4
1.3.1 按存在分类	4
1.3.2 按电离度分类	4
1.3.3 按粒子密度分类	4
1.3.4 按热力学平衡分类	5
1.4 等离子体的应用	6
1.5 研究等离子体的方法	8
第 2 章 等离子体物理基础	9
2.1 等离子体中的粒子	9
2.2 等离子体间的碰撞	10
2.2.1 粒子间的相互作用	10
2.2.2 弹性碰撞和非弹性碰撞	11
2.2.3 碰撞截面	12
2.2.4 碰撞频率和平均自由程	13
2.2.5 库仑碰撞	15
2.2.6 气体原子(分子)的激发、离解和电离	15
2.3 等离子体特征量	16
2.3.1 粒子密度和电离度	16
2.3.2 等离子体温度	17
2.3.3 等离子体的时空特征量	17
2.3.4 沙哈(SAHA)方程	18
2.3.5 等离子体判据	19
2.3.6 等离子体的电导率	19
2.4 等离子体的微观描述	20

2.4.1	等离子体的准电中性	20
2.4.2	等离子体扩散	22
2.4.3	等离子体振荡	25
2.4.4	等离子体鞘层	26
2.4.5	等离子体辐射	29
第3章	等离子体中的波	31
3.1	波动的一般概念	32
3.1.1	相速度 群速度	32
3.1.2	色散关系	32
3.1.3	介电张量	34
3.2	冷等离子体中的电磁波	36
3.3	热等离子体中的波	36
3.4	电磁波在等离子体中的传播	37
3.4.1	电磁波在非磁化等离子体中的传播	38
3.4.2	电磁波在磁化等离子体中的传播	43
第4章	等离子体的形成理论	52
4.1	气体放电特性与原理	52
4.2	汤森放电	54
4.3	帕邢定律	57
4.4	罗果夫斯基理论	59
4.5	汤森理论的局限性	61
4.6	气体放电的相似定理	62
第5章	直流放电等离子体的生成方法	66
5.1	直流放电方法	66
5.2	电晕放电等离子体技术	70
5.2.1	电晕放电机理分析	70
5.2.2	电晕放电产生的阈值判据	71
5.2.3	电晕放电应用	74
5.3	直流辉光放电	75
5.3.1	放电区的结构和分布	76
5.3.2	辉光放电的阴极区	78
5.3.3	辉光放电的正柱区	79
5.3.4	各种气压条件下的辉光放电	81
5.4	电弧放电等离子体技术	82

5.4.1	电弧放电特性	82
5.4.2	电弧中的物理过程	84
5.4.3	电弧等离子体应用	89
第6章	交流放电等离子体的生成方法	90
6.1	电容耦合等离子体技术	91
6.1.1	电容耦合等离子体发生器	91
6.1.2	电容耦合等离子体的机理	93
6.1.3	电极上的自给偏压	94
6.1.4	等离子体吸收的功率	97
6.2	感应耦合等离子体(ICP)	98
6.2.1	感应耦合等离子体机理	98
6.3	微波等离子体	103
6.3.1	气体的微波击穿	103
6.3.2	微波等离子体的反器结构	115
6.3.3	ECR微波等离子体	116
6.4	介质阻挡放电(DBD)等离子体技术	117
6.4.1	介质阻挡放电的原理及特性	117
6.4.2	介质阻挡放电实验研究	120
6.4.3	介质阻挡放电应用	124
第7章	等离子体填充高功率微波器件	127
7.1	填充等离子体的高功率微波器件的几个基础问题	128
7.1.1	轴向耦合	128
7.1.2	横向耦合;混合模	129
7.1.3	具有周期性边界的等离子体	130
7.2	等离子体填充相对论返波管	131
7.2.1	等离子体加载波纹波导色散关系	132
7.2.2	数值结果	134
7.2.3	实验结果	136
7.3	等离子体辅助的慢波振荡器(PASOTRON)	139
7.3.1	Pasotron 注一波互作用	139
7.3.2	等离子体辅助的慢波振荡器(PASOTRON)实验	147
7.4	等离子体耦合腔行波管	148
7.4.1	等离子体耦合腔行波管理论	148
7.4.2	等离子体耦合腔行波管设计	154

7.4.3	等离子体耦合腔行波管的微波特性	156
第8章	等离子体隐身技术	159
8.1	隐身技术简介	159
8.2	等离子体隐身的实际应用	161
8.3	等离子体隐身技术基本原理	162
8.3.1	等离子体折射隐身	163
8.3.2	等离子体吸收隐身	175
8.4	产生隐身等离子体方法	177
8.5	隐身的发展趋势	178
第9章	等离子体对材料的表面改性	180
9.1	等离子体与固体表面相互作用的基本过程	180
9.2	离子注入	182
9.2.1	基本原理和特点	182
9.2.2	离子注入设备介绍	185
9.2.3	离子注入在工业生产中的应用	187
9.3	等离子体物理气相沉积	189
9.3.1	基本原理和特点	189
9.4	等离子体增强化学气相沉积	195
9.4.1	等离子增强化学沉积技术机理	195
9.4.2	等离子气相沉积设备及工艺	196
9.5	等离子体聚合	199
9.5.1	等离子体聚合原理及特征	199
9.5.2	等离子体聚合设备	199
9.5.3	等离子体聚合膜的应用	200
9.6	等离子体电化学氧化	201
9.6.1	等离子体电化学氧化技术机理	201
9.6.2	等离子体电化学氧化涂层特性分析	202
9.6.3	等离子体电化学氧化设备及应用	203
9.7	等离子体技术在材料应用中的发展趋势	204
第10章	微波等离子灯	206
10.1	照明电光源的分类	206
10.2	光源特性参量	207
10.3	常见气体放电灯介绍	209
10.4	微波等离子灯的特点	211

10.5	微波等离子灯的结构及理论基础	212
10.6	微波等离子灯的研究现状及工程应用	225
10.7	等离子灯的发展趋势	230
第 11 章	微波诊断技术	231
11.1	微波技术简介	231
11.1.1	微波及其特点	231
11.1.2	微波 TEM 波传输线	232
11.1.3	微波色散传输线	235
11.1.4	微波谐振腔	241
11.2	微波探针诊断原理与技术	245
11.3	微波干涉诊断技术	252
11.3.1	微波干涉技术的基本原理	252
11.3.2	干涉技术的相位检测	255
11.3.3	外差式干涉技术	257
11.3.4	扫频式干涉技术	259
11.3.5	调频微波干涉仪的另一种分析方法	262
11.3.6	三角波调频的微波干涉技术	264
11.3.7	数字过零鉴相法	265
11.4	等离子体的微波腔诊断技术	268
11.4.1	腔诊断技术的基本原理	268
11.4.2	闭腔诊断方法	271
11.4.3	开腔诊断技术	272
11.5	等离子体的辐射诊断	274
11.5.1	黑体辐射	275
11.5.2	微波辐射计	278
11.5.3	等离子体电子回旋辐射的测量	280
11.5.4	电子回旋辐射诊断系统介绍	283
第 12 章	光谱诊断技术	286
12.1	等离子体自然辐射	286
12.1.1	自然辐射产生	286
12.1.2	谱线的展宽机制	288
12.1.3	辐射能量	289
12.2	光谱仪的几个重要指标	291
12.3	发光光谱(OES)诊断技术与应用	293

12.3.1	发光光谱(OES)诊断技术原理	293
12.3.2	发光光谱(OES)诊断技术应用	295
12.4	吸收光谱测量技术	298
12.4.1	红外吸收光谱测量技术	299
12.4.2	紫外和可见吸收光谱	302
12.5	激光诊断技术	305
12.5.1	激光基本原理	305
12.5.2	激光器诱导荧光光谱技术(LIF)	308
12.5.3	喇曼光谱诊断技术	314
第 13 章	朗缪尔探针诊断技术	320
13.1	探针结构	321
13.2	单探针工作原理	322
13.3	静电双探针及伏安特性	327
13.4	发射探针测量工作原理	331
13.5	探针方法中的几个问题	337
参考文献		340

第 1 章 概 论

1.1 等离子体概念

为了更好地理解等离子体,可以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,而分子的无规则的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上是以固体、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和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能的竞争。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,这时就表现为具有一定体积而无固定形态的液态。温度再升高时,无规则热运动进一步加剧,分子间力已无法使分子间保持一定的距离,这时分子相互分散远离,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可以相互转化,各种物态之间的相互转化都是和温度(T)、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?

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,这一过程叫电离。由于物质分子热运动加剧,相互间的碰撞也会使气体分子产生电离,这样物质就变成由自由运动并相互作用的正离子和电子组成的混合物(蜡烛的火焰就处于这种状态)。把物质的这种存在状态称为物质的第四态,即等离子体(plasma)。因为电离过程中正离子和电子总是成对出现,所以等离子体中正离子和电子的总数大致相等,总体来看为准电中性。从更广泛的意义上讲,有些固体、液体也呈现等离子体特征。固体金属中晶格上正离子和运

动的自由电子构成固体等离子体,半导体中电子和空穴也构成固态等离子体。电解质溶液(如食盐水溶液)内部有数目相等的运动着的正钠离子和负离子,也能导电,该溶液也属于等离子体。为此,从广义上把等离子体定义为凡包含足够多的电荷数目近于相等的正、负带电粒子的物质聚集状态,称为等离子体。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 1-1 所示。

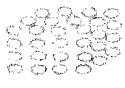
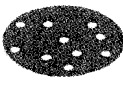
固态	液态	气态	等离子体
如冰	如水	如蒸汽	如电离气体
H_2O	H_2O	H_2O	$H_2 \longrightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
冷	温热	热	较热
$T < 0^\circ C$	$0 < T < 100^\circ C$	$T > 100^\circ C$	$T > 100,000^\circ C$
			
分子固定在晶格中	分子自由运动	分子自由运动, 有大的空间距	离子和电子独立地运动, 有大的空间距

图 1-1 物质间四态之间的转化

英文单词 Plasma 是来自希腊语 Πλάσμα 的译音,原意相当于英语的“to mold”,意指“成形”。当融化的塑料注入模具就是被成形。为了将辉光放电得到的具有特殊性质的电离气体赋予一个专用名词,1923 年,朗缪尔(Langmuir I, 1932 年诺贝尔化学奖获得者)为此起名为“Plasma”。当时的情景,朗缪尔同事 Tonks 在他的著作中做了如下生动的描述。

一天,朗缪尔走进我在通用电器实验室的房间说“我说, Tonks, 我正在寻找一个单词,在气体放电中,我们把壁和电极的边界层叫做‘鞘层’,这非常恰当,但如何称呼放电的主体部分,它是宏观电中性的。我不想去生造一个新词,但它必须区别于鞘层,你有什么好的建议?”

我随口答道:“让我想想,朗缪尔博士。”

第二天,朗缪尔冲进我的房间大声说“我知道怎么叫它了,就叫它 Plasma(等离子体)”。我马上联想到血浆(blood plasma),我印象中朗缪尔甚至提到了血液。

由上述可知,当时医学上已使用 Plasma 一词作为血浆的名词,但是此时应与血浆无关。通晓希腊语的朗缪尔,是按这一词的原意,由放电的发光部分依从放电管的形状变化,而命名为“Plasma”的,例如:霓虹灯广告,就是由组成各种复杂文字或图案的细放电管的内部气体放电,放出辉光形成的。

因此,等离子体与我们所熟悉的气、液、固“三态”存在明显区别,“三态”之

间的转化只涉及分子间力的变化,而对“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性质上均有着本质的差别。

1.2 等离子体的各种性质

物质的第四态等离子体有着许多独特的物理、化学性质。主要表现为:

- (1) 温度高、粒子动能大。
- (2) 作为带电粒子的集合体,具有类似金属的导电性能。等离子体从整体上看是一种导电流体。
- (3) 化学性质活泼,容易发生化学反应。例如将甲烷和氢气在闭合容器中混合并使之放电,若保持适宜的壁温度,就会在壁上析出一层金刚石薄膜。
- (4) 发光特性,可以用做光源。例如日常生活中不可缺少的日光灯、夜晚街头绚丽多彩的霓虹灯和利用钠、水银等放电发光的照明灯,都是经常见到的等离子体发光现象。

那么,究竟为什么等离子体会具有上述的许多特性呢? 答案可以归结为等离子体内部电子和气体分子间的碰撞。我们以电子碰撞双原子分子为例,来回答这个问题。若碰撞能量小,则会发生弹性碰撞,电子的动能几乎不会改变。如果碰撞能量很高,分子中绕核运动的低能电子,就会在碰撞中获得足够高的能量,被激发至离核较远的高能级轨道上运动。把这种处于高能级状态的分子称为激发分子,用 XY^* 表示。激发态分子中的电子从高能级状态回到低能级时,便以发光的形式来释放多余能量。若碰撞电子的能量足够高,电子吸收的能量就可以使其脱离核的束缚而成为自由电子,也就是分子发生了电离。电子对分子 AB 的碰撞也可以使之分解成 A 原子和 B 原子(离解)。等离子体中主要作用过程、性质和应用见表 1-1。

表 1-1 等离子体相互作用过程、性质和应用

等离子体中的主要作用过程		等离子体的性质和应用
激发	$AB + e \longrightarrow AB^* + e$	
退激	$AB^* \longrightarrow AB + h\nu(\text{光子})$	发光特性(光学应用)
离解	$AB + e \longrightarrow A + B + e$	化学性质(化学应用)
电离	$AB + e \longrightarrow AB^+ + 2e \longrightarrow A^+ + B + 2e$	导电性(电气应用)
电子、离子在电场中被加速		高速粒子(力学应用)
粒子间碰撞产生热效应,粒子和固体表面的碰撞		高温(热学应用)

1.3 等离子体的分类

通常,等离子体中存在电子、离子和中性粒子(包括不带电荷的粒子,如原子或分子以及后述的原子团)三种成分组成的物质,它可以按照不同的方式进行如下分类:

1.3.1 按存在分类

(1) 天然等离子体。由自然界自发产生及宇宙中存在的等离子体。据印度天体物理学家沙哈(M. Saha)的计算,宇宙中99.9%的物质处于等离子体状态,如太阳、恒星、星子、星云等,自发产生的如:闪电、极光等。

(2) 人工等离子体。由人工通过外加能量激发电离物质形成的等离子体。如:日光灯、霓虹灯中的放电等离子体,等离子体炬中的电弧放电等离子体。

1.3.2 按电离度分类

设等离子体中存在电子、离子、中性粒子的密度分别为 N_e, N_i, N_a , 由于 $N_e = N_i$ (准电中性), 所以电离前气体分子密度为 $(N_e + N_a)$ 。于是, 定义电离度 $\alpha_i = \frac{N_e}{N_e + N_a}$, 以此来衡量等离子体的电离程度。

通常将电离度小于1%的气体称为弱电离气体,也叫低温等离子体;按物理性分,低温等离子体主要分三类:①热等离子体(或近局域热力学平衡等离子体);②冷等离子体(非平衡等离子体);③燃烧等离子体。热等离子体与冷等离子体因为工业上广泛应用有时又合称为工业等离子体。电离度大于等于1%的称为完全电离等离子体,也叫高温等离子体。

1.3.3 按粒子密度分类

(1) 致密等离子体(或高压等离子体)。当粒子密度 $N > 10^{15-18} \text{ cm}^{-3}$ 时,就可称为致密等离子体或高压等离子体。这时粒子间的碰撞起主要作用。如 $p = 0.1$ 大气压以上的电弧均可看作致密等离子体。

(2) 稀薄等离子体(或低压等离子体)。当粒子密度 $N < 10^{12-14} \text{ cm}^{-3}$ 时,核子间碰撞基本不起作用,这时称稀薄等离子体或低压等离子体。如辉光放电就属此类型。

1.3.4 按热力学平衡分类

(1) 完全热平衡等离子体(complete thermal equilibrium plasma)。也称为高温等离子体,此类等离子体中电子温度(T_e)、离子温度(T_i)及中性粒子温度(T_n)完全一致,如太阳内部、核聚变和激光聚变均属于这种。

(2) 非热力学平衡等离子体(non-thermal equilibrium plasma)。也称冷等离子体(cold plasma),数百帕以下的低气压等离子体常常处于非热平衡状态,此时,电子与离子或中性粒子的碰撞过程中几乎不损失能量,所以有 $T_e \gg T_i$, $T_e \gg T_n$,也称这样的等离子体为低温等离子体。它在工业中是应用最广泛的一种等离子体,主要包括电晕放电(corona discharge)、辉光放电(glow discharge)、火花放电(spark discharge)、介质阻挡放电(dielectrical barrier discharge)、滑动弧光放电(gliding arc discharge)、微波等离子体(microwave plasma)及射频等离子体(radio-frequency plasma)等。

(3) 局部热力学平衡等离子体(local thermal equilibrium plasma)。由于等离子体中各物质通常很难达到严格的热力学一致性,当其电子、离子和中性粒子温度局部达到热力学一致性,即 $T_e = T_i = T_n = 3 \times 10^3 \text{ K} \sim 3 \times 10^4 \text{ K}$ 时,称之为局部热力学平衡等离子体,也称为热等离子体,如:电弧等离子体、高频等离子体等。

根据以上分类,也可以通过图表的方法表示不同类型的等离子体,图 1-2 给出了主要类型的等离子体的密度和温度的数据。从密度为 10^6 m^{-3} 的稀薄等离子体到密度为 10^{25} m^{-3} 的电弧放电等离子体(热等离子体,跨越近 20 个数量

等离子体 — 物质第四态

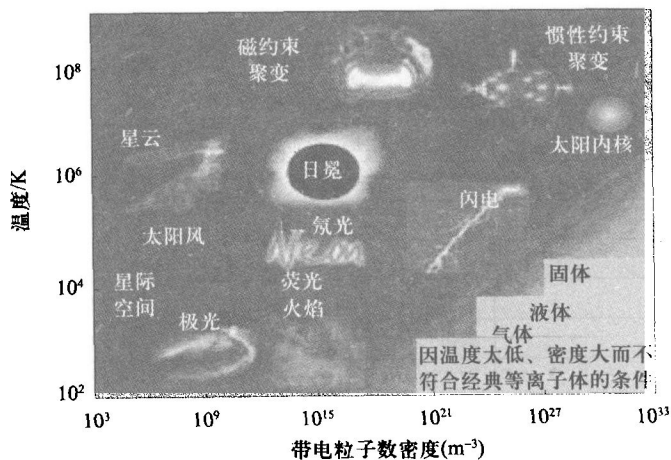


图 1-2 等离子体的密度和温度分布