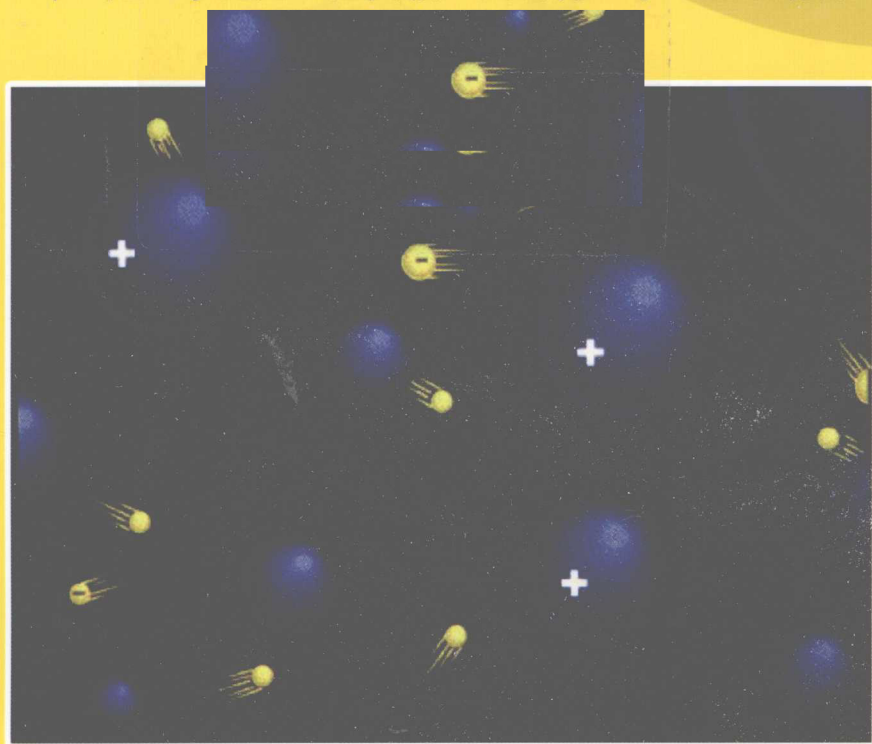


苏州大学研究生优秀教材建设资助项目

# 低气压低温等离子体 诊断原理与技术

叶超 宁兆元 江美福 吴雪梅 辛煜 编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书较全面地介绍了低气压低温等离子体诊断技术的基础知识,总结了近年来该领域的一些新进展,提供了低气压低温等离子体诊断技术应用的实例。全书共7章。第1~3章主要介绍了等离子体的基本概念与性质,低温等离子体的产生方法和等离子体中的基本化学过程。第4章着重讲述了低气压低温等离子体的探针诊断技术及其应用。第5章介绍了低气压低温等离子体的波干涉诊断技术。第6章和第7章分别讲述了低气压低温等离子体的光谱和质谱诊断技术及其应用。附录中,作者收集整理了部分原子、分子、离子发光的特征光谱谱线,以供读者在相关研究工作中参考。

本书可供进入低温等离子体技术领域学习与工作的研究生、本科生以及技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

低气压低温等离子体诊断原理与技术/叶超等编著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027529-5

I. ①低… II. ①叶… III. ①等离子体诊断 IV. ①O536

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 084239 号

责任编辑:胡 凯 刘凤娟/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—2 000 字数:352 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

等离子体是物质存在的一种基本形态，是除固体、液体和气体以外的第四种物质形态，它广泛存在于宇宙和人类的活动中。人们在等离子体发光、电磁流体、电弧放电、微电子和纳米器件加工、等离子体平板显示、等离子体化学合成、热核聚变的研究和应用中，对等离子体的认识不断深入；同时，等离子体的应用在不断扩展，涉及各种高新技术产业和人们的日常生活。低气压低温等离子体作为重要的材料加工手段，在物理、化学、材料科学、微电子、显示等领域得到广泛应用。低温等离子体技术的发展，推动了凝聚态物理、等离子体物理、等离子体化学、纳米材料等学科的发展。

作为等离子体性能的实验研究手段，等离子体诊断技术已成为重要的分析技术。低温等离子体中存在大量的工艺可变量，如等离子体温度、等离子体密度、电子能量分布函数、离子能量、各种离子与激发基团等，它们影响着等离子体与材料相互作用的物理、化学过程，决定了最终的材料结构与性能；这些可变量取决于产生等离子体的宏观参数和条件，如气压、功率、频率、流量等，因此，对材料加工过程的等离子体进行实验诊断，可以获得宏观参数与等离子体可变量之间的关联，了解等离子体中发生的物理、化学过程以及等离子体与材料的相互作用，从而建立材料结构、性能与等离子体特性之间的关联，获得材料性能改变的微观机制，实现等离子体加工过程的控制。

随着低温等离子体技术的广泛应用，需要较多的懂得低温等离子体物理、技术及诊断的技术人才。本书写作的目的就是为将要进入这些领域工作的研究生、本科生以及相关技术人员提供低温等离子体诊断技术及其应用的基本知识。

本书较全面地介绍了低气压低温等离子体诊断技术的基础知识，总结了近年来该领域的一些新进展，提供了低气压低温等离子体诊断技术应用的实例。全书共7章。第1章至第3章简要介绍了等离子体基本概念和性质、低温等离子体的产生方法和等离子体中的基本化学过程。第4章着重讲述低气压低温等离子体的探针诊断技术及其应用。第5章简要介绍了低气压低温等离子体的波干涉诊断技术。第6章着重讲述低气压低温等离子体的光谱诊断技术及其应用。第7章着重讲述低气压低温等离子体的质谱诊断技术及其应用。在最后的附录中，作者收集整理了部分原子、分子、离子发光的特征光谱谱线，以供读者在相关研究工作中参考。

本书以作者在苏州大学为等离子体物理专业研究生讲授低温等离子体诊断技

术课程的讲稿为基础，参考了低温等离子体物理、等离子体化学和低温等离子体诊断技术与应用方面的相关文献，融入了苏州大学从事低温等离子体物理及应用研究的教师、研究生们多年的相关研究成果编写而成。全书由叶超执笔和统稿、宁兆元教授修改，江美福教授、吴雪梅教授和辛煜副教授参加了部分章节的撰写与修改，第 6 章的部分内容取自黄晓江博士论文的主要章节。书中的部分内容和图片取自有关的书籍，在各章参考文献中已注明。

在本书出版过程中，得到苏州大学研究生优秀教材建设基金和苏州大学“低温等离子体创新团队建设”项目的资助，得到科学出版社的大力支持，在此一并表示感谢！

本书可以作为低温等离子体物理、薄膜物理、微电子材料与器件、材料科学与工程、等离子体化学等专业研究生或高年级本科生教材使用，也可供相关专业的科研和工程技术人员参考。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请各位读者和同行专家批评指正。

叶 超

2009 年 10 月于苏州

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 等离子体基本概念和性质</b> .....	1
1.1 等离子体概念 .....	1
1.1.1 等离子体的定义 .....	1
1.1.2 等离子体的分类 .....	3
1.2 等离子体的导电性与准电中性 .....	3
1.2.1 等离子体的导电性 .....	3
1.2.2 等离子体的准电中性 .....	4
1.3 等离子体的基本参量 .....	5
1.3.1 等离子体密度与电离度 .....	5
1.3.2 等离子体温度 .....	6
1.3.3 德拜长度 .....	8
1.3.4 等离子体鞘层 .....	10
1.3.5 等离子体频率 .....	13
1.3.6 等离子体的时空特征量 .....	14
1.4 等离子体中带电粒子的扩散 .....	15
1.5 低气压低温等离子体诊断方法概述 .....	18
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 气体放电等离子体基础</b> .....	20
2.1 直流辉光放电 .....	20
2.1.1 帕邢定律 .....	22
2.1.2 直流辉光放电特性 .....	22
2.2 射频辉光放电 .....	23
2.2.1 射频放电过程 .....	23
2.2.2 射频等离子体中的自偏压 .....	26
2.2.3 射频放电的优点 .....	29
2.2.4 射频放电的产生方法 .....	29
2.3 微波放电 .....	33
2.4 微波电子回旋共振放电 .....	35
参考文献 .....	38

<b>第3章 等离子体化学基础</b> .....	39
3.1 化学反应的表征 .....	39
3.2 等离子体中的化学反应 .....	40
3.2.1 同相反应 .....	40
3.2.2 异相反应 .....	52
3.3 化学反应链 .....	54
3.4 等离子体与表面相互作用 .....	55
3.4.1 等离子体与固体表面的物理作用 .....	55
3.4.2 离子和电子诱导的表面化学反应 .....	58
3.4.3 能量传递 .....	60
3.4.4 对薄膜沉积的影响 .....	60
3.4.5 等离子体诱导损伤 .....	61
参考文献 .....	61
<b>第4章 低气压低温等离子体的探针诊断</b> .....	62
4.1 朗缪尔探针诊断的基本方法 .....	62
4.1.1 朗缪尔探针结构与工作电路 .....	62
4.1.2 朗缪尔探针的电压-电流特性 .....	65
4.1.3 从探针 $I-V$ 特性曲线获取等离子体参数 .....	67
4.1.4 探针诊断的条件、优点与缺点 .....	68
4.1.5 探针测量误差的主要来源 .....	69
4.2 朗缪尔探针的基本理论 .....	70
4.2.1 无碰撞鞘层 .....	70
4.2.2 平面探针 .....	71
4.2.3 圆柱形探针 .....	72
4.3 非麦克斯韦分布的探针理论 .....	77
4.4 各向异性等离子体的探针诊断 .....	79
4.5 碰撞对探针诊断的影响 .....	81
4.6 磁化等离子体中的朗缪尔探针 .....	82
4.6.1 磁场的影响 .....	82
4.6.2 磁化等离子体中的探针测量 .....	83
4.7 射频等离子体中的朗缪尔探针 .....	84
4.7.1 射频等离子体中的探针特性 .....	84
4.7.2 射频补偿方法 .....	85
4.7.3 无补偿的测量条件 .....	89
4.8 朗缪尔探针方法的空间和时间分辨率 .....	91

4.8.1 朗缪尔探针方法的空间分辨率	91
4.8.2 朗缪尔探针方法的时间分辨率	92
4.9 化学活性等离子体的探针诊断	93
4.9.1 化学活性等离子体中的探针污染	93
4.9.2 发射探针技术	94
4.9.3 电容耦合探针技术	95
4.9.4 悬浮探针技术	97
4.9.5 三探针技术	99
4.9.6 射频阻抗探针和等离子体振荡探针技术	102
4.9.7 热探针技术	102
4.9.8 探针表面的清洗方法	106
4.10 探针 $I$ - $V$ 特性的二次微分方法	107
4.10.1 探针 $I$ - $V$ 特性二次微分的微分电路法	107
4.10.2 探针 $I$ - $V$ 特性二次微分的交流测量法	108
4.10.3 探针 $I$ - $V$ 特性二次微分的数值微分法	108
4.11 双探针技术	110
4.12 其他探针技术	111
4.12.1 磁探针	111
4.12.2 能量分析器	112
4.12.3 射频电流探针	113
4.13 低气压低温等离子体的探针诊断应用实例	114
4.13.1 薄膜沉积的探针诊断	114
4.13.2 脉冲激光等离子体的探针诊断	119
4.13.3 尘埃等离子体的探针诊断	122
4.13.4 甚高频放电等离子体的探针诊断	123
参考文献	126
第 5 章 低气压低温等离子体的波干涉诊断	128
5.1 微波干涉法	128
5.2 传输线微波干涉法	131
5.3 激光干涉法	137
5.4 激光双色干涉法	139
参考文献	141
第 6 章 低气压低温等离子体的光谱诊断	143
6.1 等离子体光谱的产生机理	143
6.2 发射光谱	146

6.2.1	等离子体发射光谱的谱特性	146
6.2.2	发射光谱诊断的实验装置	151
6.2.3	发射光谱方法的优点与缺点	156
6.3	发射光谱的光化线强度测定法	156
6.4	等离子体温度的光谱测量	159
6.4.1	惰性示踪气体发射光谱法测量电子温度	160
6.4.2	光强比值法测量电子温度	163
6.4.3	发射光谱法测量分子转动温度、振动温度	166
6.5	吸收光谱	172
6.5.1	吸收光谱原理	172
6.5.2	吸收光谱实验装置	173
6.6	激光诱导荧光光谱	176
6.6.1	激光诱导荧光原理	176
6.6.2	激光诱导荧光光谱的实验装置	177
6.6.3	激光诱导荧光光谱方法的优点与缺点	178
6.7	光腔衰荡光谱	179
6.7.1	光腔衰荡光谱原理	180
6.7.2	光腔衰荡光谱实验装置	182
6.7.3	光腔衰荡光谱实验数据的获得	183
6.8	低气压低温等离子体的光谱诊断应用实例	184
6.8.1	C 基气体分子放电等离子体的光谱诊断	186
6.8.2	Si 基气体分子放电等离子体的光谱诊断	192
6.8.3	F 基气体分子放电等离子体的光谱诊断	202
6.8.4	等离子体材料加工工艺的终点探测	208
	参考文献	210
<b>第 7 章 低气压低温等离子体的质谱诊断</b>		<b>213</b>
7.1	质谱诊断的基本原理	213
7.2	四极质谱仪	219
7.2.1	四极质谱仪的主要结构与工作原理	219
7.2.2	四极质谱仪的分辨率	223
7.2.3	四极质谱仪的标定	224
7.2.4	四极质谱仪的优点与缺点	224
7.2.5	AccuQuad 100D 四极质谱仪介绍	225
7.3	飞行时间质谱仪	227
7.4	磁偏转质谱仪	229



---

7.5 质谱仪与等离子体系统的连接 .....	231
7.5.1 机械连接 .....	231
7.5.2 电连接 .....	235
7.6 质谱数据的表示方法 .....	236
7.6.1 质谱数据的表示 .....	236
7.6.2 图形系数 .....	238
7.7 中性气体的质谱分析 .....	238
7.7.1 中性气体的四极质谱分析技术 .....	238
7.7.2 中性气体质谱的成分识别 .....	240
7.7.3 中性气体质谱的相对浓度测定 .....	241
7.8 离子的质谱分析 .....	242
7.8.1 离子的四极质谱分析技术 .....	242
7.8.2 离子密度与离子能量分布的确定 .....	243
7.8.3 等离子体的离子质谱分析 .....	244
7.9 用质谱确定等离子体物理基本数据 .....	247
7.10 低气压低温等离子体的质谱诊断应用实例 .....	248
7.10.1 Si 基分子放电等离子体的质谱分析 .....	248
7.10.2 C 基分子放电等离子体的质谱分析 .....	259
7.10.3 F 基分子放电等离子体的质谱分析 .....	262
7.10.4 脉冲激光烧蚀 Ni、Al、ZnO 靶的四极质谱和飞行时间质谱分析 .....	264
参考文献 .....	266
附录 部分受激原子、分子、离子发光特征谱线表 .....	268
参考文献 .....	277

# 第 1 章 等离子体基本概念和性质

等离子体是物质存在的一种基本形态，是除固体、液体和气体以外的第四种物质形态。它广泛存在于宇宙中，如星云和星际空间、太阳和其他恒星、地球上空的电离层、极光等；也广泛存在于人类的活动中，人们在对等离子体发光、电磁流体、电弧放电、微电子和纳米器件加工、等离子体平板显示、等离子体化学合成、热核聚变研究和应用中，对等离子体的认识不断深入；同时，等离子体的应用在不断扩展，深入到各种高新技术产业和人们的日常生活之中。

本章介绍等离子体的基本概念和性质。

## 1.1 等离子体概念

### 1.1.1 等离子体的定义

等离子体是由带电粒子(包括正离子、负离子、电子)和各种中性粒子(包括原子、分子、自由基和活性基团)组成的集合体，它在宏观上呈电中性<sup>[1]</sup>。我们将这种含有带电粒子的物质称为等离子体，如图 1-1 所示<sup>[2]</sup>。

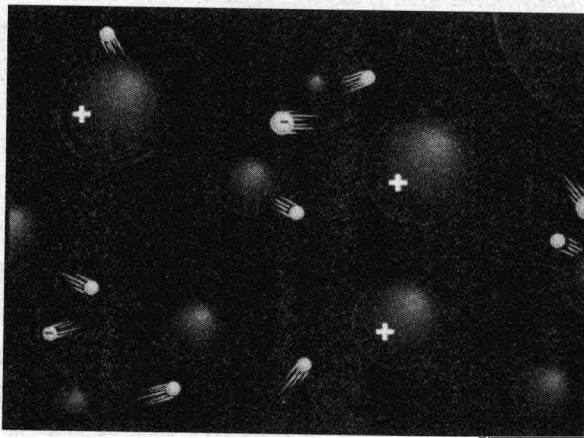


图 1-1 等离子体组成示意图

图 1-2 给出了某些自然界中存在的和人工产生的典型等离子体的电子密度-电子动力温度参数分布<sup>[3]</sup>。从该图可以看出，实验室和空间等离子体的密度和温度分布非常广。自然界的星际空间、电离层处的等离子体属于低密度、低温等离子

体。日冕为高温等离子体，电子动力温度高达几千电子伏。人工形成的辉光放电等离子体电子密度约为  $10^{15} \text{ m}^{-3}$ ，电子动力温度约为几个电子伏，属于低气压放电形成的低温等离子体。而磁约束聚变和惯性约束聚变等离子体的电子动力温度可达  $10^4 \text{ eV}$  以上，电子密度可超过  $10^{25} \text{ m}^{-3}$ ，它们属于高温高密度等离子体。

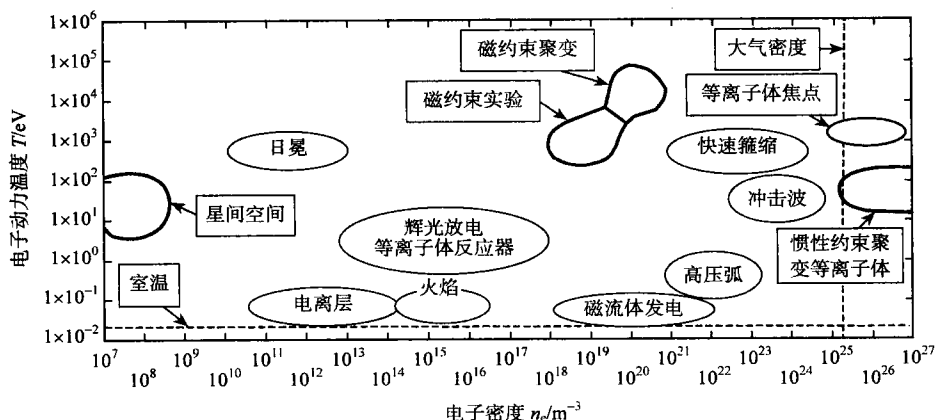


图 1-2 自然界和人工等离子体的电子密度-电子动力温度分布

从物质的形态变化，可以了解等离子体的生成机理。一切宏观物质都是由大量分子组成，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。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之间的竞争。在较低温度下，分子无规则热运动较弱，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振动，分子排列有序，表现为固态。温度升高时，无规则热运动加剧，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。温度进一步升高，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，这时分子互相分散远离，表现为气态。当温度继续增加到足够高时，构成分子的原子获得足够大的动能，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，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。这种电离气体就是等离子体，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 6 种基本粒子构成。

与物质的气态、液态、固态相比，等离子体态无论在组成上还是在性质上均有着本质的差别，主要在于它含有带电粒子，其行为主要表现为：①等离子体从整体上看是一种导电流体。②等离子体中带电粒子会受到电磁场的作用，

可发生能量等的输运过程。③带电粒子间存在长程库仑力的作用，由此导致各种集体行为。

### 1.1.2 等离子体的分类

等离子体有几种分类方法<sup>[1,3]</sup>，按照它的热力学平衡状态可以将等离子体分为以下几种。

(1) 完全热力学平衡等离子体，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( $T_i$ )及气体温度( $T_g$ )完全一致，如太阳内部、磁约束核聚变和激光聚变等离子体。

(2) 局部热力学平衡等离子体。等离子体中各类粒子没有达到严格的全面热力学平衡，仅在局部有些电子、离子和气体温度达到热力学平衡，即  $T_e \approx T_i \approx T_g = 3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$  K 时，称为局部热力学平衡等离子体或热等离子体，如空气中的电弧放电等离子体。

(3) 非热力学平衡等离子体，也称为低温等离子体。此类等离子体中的电子温度很高，可达几千开尔文，而离子及气体温度接近室温，即  $T_e \gg T_i \approx T_g$ ，从而形成热力学上的非平衡，如在低气压下的电晕放电、辉光放电、火花放电、介质阻挡放电、弧光放电、微波放电及射频放电等离子体。由于非热平衡等离子体具有较高的电子能量及较低的离子及气体温度，十分有利于化学反应的进行，因此，低温等离子体在化学合成、刻蚀和材料表面改性中有广泛的用途。

按照等离子体的存在方式、电离度和粒子密度，等离子体也可以分为其他类型。

(1) 按存在方式，等离子体可分为天然等离子体和人工等离子体。由自然界自发产生及宇宙中天然存在的等离子体为天然等离子体。由人工通过外加能量，如电场、磁场、辐射、热和光能激发电离物质形成的等离子体为人工等离子体。

(2) 按电离度 $\alpha$ 区分，等离子体可分为完全电离等离子体( $\alpha = 1$ )、部分电离等离子体( $0.01 < \alpha < 1$ )和弱电离等离子体( $10^{-6} < \alpha < 0.01$ )。电离度定义为带电粒子密度与所有粒子密度之比。

(3) 按粒子密度，等离子体可分为稠密等离子体(或高压等离子体)和稀薄等离子体(或低压等离子体)。稠密等离子体的粒子密度  $n > (10^{15} \sim 10^{18}) \text{cm}^{-3}$ ，这时粒子间的碰撞起主要作用。稀薄等离子体的粒子密度  $n < (10^{12} \sim 10^{14}) \text{cm}^{-3}$ ，这时粒子间的碰撞基本不起作用。

## 1.2 等离子体的导电性与准电中性

### 1.2.1 等离子体的导电性

从整体看，等离子体是一种导电流体。对等离子体施加电场，带电粒子(离子、

电子)的移动在等离子体中会流过电流,也就是说等离子体具有导电性<sup>[3]</sup>。

可以把等离子体看作众多微观粒子的集合,其电导率 $\sigma$ 可以写为

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

式中,  $n_e$ ,  $m_e$ ,  $v_{ce}$  分别为电子密度、电子质量、电子与其他粒子之间的碰撞频率。

对于电子只与带电粒子碰撞的情况,等离子体的电导率 $\sigma_s$ 为

$$\sigma_s = \frac{51.6 \varepsilon_0^2}{e^2 z} \left( \frac{\pi}{m_e} \right)^{1/2} \frac{(kT_e)^{3/2}}{\ln \Lambda} \quad (1-2)$$

式中,  $z$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $k$ ,  $T_e$ ,  $\ln \Lambda$  分别为带电粒子电荷数、真空介电常数、玻尔兹曼常量、电子温度、库仑对数。库仑对数为

$$\ln \Lambda = \ln \frac{12\pi(\varepsilon_0 k T_e)^{3/2}}{z^2 e^3 n_e^{1/2}} \quad (1-3)$$

式(1-2)由物理学家 Lyman Spitzer 提出,因此 $\sigma_s$ 称为 Spitzer 电导率。

对于完全电离等离子体,电导率可表示为

$$\sigma \approx T_e^{3/2} \quad (1-4)$$

在完全电离等离子体中,输运电荷的主要是电子,随着电子温度的上升,电离过程加剧,更多的电子被电离出来,同时离子密度也相应增加,而且碰撞时它们之间的相对速度几乎完全由质量轻的电子的速度来决定,因此,完全电离等离子体的电导率仅是电子温度的函数,与电子密度或离子密度无关,等离子体的电导率随着电子温度的升高而迅速增大。这里要指出的是,对于非完全电离的低温等离子体,电导率与电子密度有关。

### 1.2.2 等离子体的准电中性

在等离子体中,正、负带电粒子数目基本相等( $n_i \approx n_e$ ),系统在宏观上呈现电中性,但在小尺度上则显示出电磁性,这种情况称为准电中性<sup>[3]</sup>。

用泊松方程可以估计跨越等离子体(长度为 $L$ )的电位差

$$\nabla^2 \Phi \sim \frac{\Phi}{L^2} \sim \left| \frac{E}{\varepsilon_0} (An_i - n_e) \right| \quad (1-5)$$

通常可以认为

$$\Phi \leq T_e = \frac{e}{\epsilon_0} n_e \lambda_{De}^2 \quad (1-6)$$

式中,  $\lambda_{De}$  为等离子体德拜长度(定义见 1.3.3 节)。联立式(1-5)和式(1-6)有

$$\frac{|Zn_i - n_e|}{n_e} \leq \frac{\lambda_{De}^2}{L^2} \quad (1-7)$$

当  $\frac{\lambda_{De}^2}{L^2} \ll 1$  时, 则有  $Zn_i = n_e$ , 即等离子体中的正、负电荷密度相等, 宏观上呈现电中性。

要指出的是, 某种扰动会使等离子体中的电子和离子偏离电中性平衡态, 但是正负电荷分离而产生的电场会促使等离子体恢复电中性。通常等离子体偏离电中性的程度约为十万分之几。

## 1.3 等离子体的基本参量

等离子体的性质主要取决于组成它的粒子密度和粒子温度。因此粒子密度和温度是它的两个基本参量, 其他的参量大多与这两个量有关。

### 1.3.1 等离子体密度与电离度

组成等离子体的基本成分是电子、离子和中性粒子。通常, 以  $n_e$  表示电子密度,  $n_i$  表示离子密度,  $n_g$  表示中性粒子密度。当  $n_e = n_i$  时, 可用  $n$  表示带电粒子的密度, 称为等离子体密度<sup>[1]</sup>。

气体的电离度表示气相中被离化粒子的比例, 电离度  $\alpha$  定义为

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_g} \quad (1-8)$$

对于低气压放电维持的等离子体, 电离度的典型值为  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 。但是, 对于增加了磁场约束的电场放电(如电子回旋共振放电), 可在低气压下获得高的等离子体密度, 其电离度可以达到  $10^{-2}$  甚至更高。热力学平衡条件下, 电离度仅与气体种类、粒子密度和温度有关。表 1-1 给出了某些低气压放电等离子体的电离度范围。

表 1-1 某些低气压放电等离子体的电离度

等离子体类型	气压/Torr	离子密度/cm <sup>-3</sup>	电离度
直流等离子体沉积/刻蚀	< 10	< 10 <sup>10</sup>	10 <sup>-6</sup>
射频等离子体反应离子刻蚀	10 <sup>-2</sup> ~ 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>-6</sup> ~ 10 <sup>-4</sup>
磁控溅射	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-2</sup>
电子回旋共振	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>12</sup>	< 10 <sup>-1</sup>

注：1Torr = 1.33322 × 10<sup>2</sup>Pa。

为区分部分电离和完全电离等离子体，定义临界电离度为

$$\alpha_c \approx 1.73 \times 10^{12} \sigma_{ea} T_e^2 \quad (1-9)$$

式中， $\sigma_{ea}$  为在电子平均速度下的电子-原子碰撞截面(单位为 cm<sup>-3</sup>)。如果电离度远大于临界电离度值，带电粒子就成为完全电离的气体。

### 1.3.2 等离子体温度

#### 1. 等离子体温度<sup>[1]</sup>

等离子体中的气体分子(原子)、离子、电子等处于不停的相互碰撞及运动之中。在外电场的作用下，等离子体中的离子和电子可获得比气体分子热运动更高的能量，而这些带电粒子通过碰撞与其他粒子交换能量，最终离子、电子和各种中性粒子各自达到准平衡的热力学状态。根据各种粒子的平均动能，定义电子温度  $T_e$ 、离子温度  $T_i$  和气体温度  $T_g$  分别为

$$\frac{1}{2} m_e \overline{v_e^2} = \frac{3}{2} k T_e \quad (1-10)$$

$$\frac{1}{2} m_i \overline{v_i^2} = \frac{3}{2} k T_i \quad (1-11)$$

$$\frac{1}{2} m_g \overline{v_g^2} = \frac{3}{2} k T_g \quad (1-12)$$

式中， $m_e$ ， $m_i$ ， $m_g$  分别为电子、离子、气体分子(原子)的质量； $\overline{v_e^2}$ ， $\overline{v_i^2}$ ， $\overline{v_g^2}$  分别为电子、离子、气体分子(原子)的方均速度； $k$  为玻尔兹曼常量。

对于弹性碰撞，离子与其他粒子(原子、分子)碰撞时交换的动能多，质量轻的电子与其他重粒子(原子、分子、离子)碰撞时交换的动能少。在低气压下，由

于单位时间内粒子碰撞次数少, 因此, 电子的平均动能较高, 而其他重粒子的平均动能较低, 这时电子温度与离子温度、气体温度不相等, 三者之间处于非热平衡状态, 即  $T_e \gg T_i \approx T_g$ , 这种等离子体即为非热平衡等离子体, 或低温等离子体。随着气压的升高, 单位时间内粒子碰撞次数增加, 电子与其他重粒子之间发生比较充分的能量交换, 这时电子温度与气体温度、离子温度逐渐趋于相等, 即  $T_e = T_i = T_g$ , 等离子体由非平衡状态过渡到热平衡状态。热平衡状态的等离子体即为热等离子体。

## 2. 电子能量分布函数(EEDF)<sup>[1]</sup>

通过粒子系统的速度分布函数  $f(v)$ , 可以获得粒子密度

$$n = 4\pi \int_0^{\infty} f(v)v^2 dv \quad (1-13)$$

式中,  $v$  为速度;  $f(v)$  为速度分布函数;  $n$  为几何空间的粒子密度。

假定等离子体中的电子速度分布是各向同性的, 非弹性碰撞的影响只作为对各向同性分布的扰动, 并忽略电场的影响, 这时速度分布满足麦克斯韦分布。

这时电子的速度分布函数为

$$f(v) = n_e \left( \frac{m_e}{2\pi kT_e} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{m_e v^2}{2kT_e} \right) \quad (1-14)$$

速度分布函数  $f(v)$  与电子能量分布函数  $f(W)$  之间的关系为

$$f(W) = \frac{4\pi}{m_e} v f(v) \quad (1-15)$$

因此, 电子的麦克斯韦能量分布函数为

$$f(W) = 2.07 W_{av}^{-3/2} W^{1/2} \exp\left( \frac{-1.5W}{W_{av}} \right) \quad (1-16)$$

式中,  $W_{av}$  为平均电子能量。电子平均能量与电子温度之间的关系为

$$W_{av} = \frac{3}{2} kT_e \quad (1-17)$$

由于上述简化的假设, 麦克斯韦分布只给出了等离子体中电子能量分布的一级近似。对于低压非热力学平衡等离子体, 电子能量的 Druyvesteyn 分布是比麦



克斯韦分布更好的近似。电子能量的 Druyvesteyn 分布为

$$f(W) = 1.04 W_{av}^{-3/2} W^{1/2} \exp\left(\frac{-0.55 W^2}{W_{av}^2}\right) \quad (1-18)$$

图 1-3 为几种平均电子能量下的麦克斯韦分布和 Druyvesteyn 分布。与麦克斯韦分布相比, Druyvesteyn 分布向高能量方向发生了偏移。同时, 两种分布都存在一个高能带尾。高能带尾部分的电子, 虽然其密度很低, 但对等离子体中的各种反应过程有重要的影响。

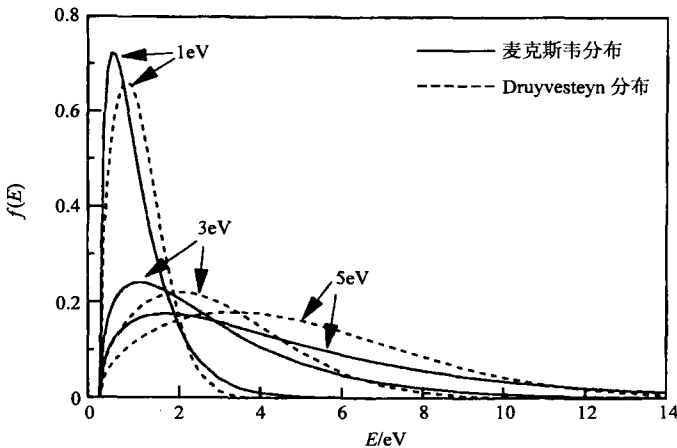


图 1-3 电子温度的麦克斯韦分布和 Druyvesteyn 分布

### 1.3.3 德拜长度

德拜(Debye)长度是等离子体的另一个重要参数<sup>[1]</sup>。等离子体中存在带电粒子, 如果在等离子体中施加电场, 带电粒子将起降低电场影响的作用。这种降低局域电场影响的响应, 即等离子体对内部电场产生的空间屏蔽效应, 称为德拜屏蔽。德拜屏蔽使等离子体保持准电中性的特性。假设在浸入等离子体的两个表面上施加电压, 表面将吸引等量的异性带电粒子。两个表面附近积累的带电粒子将屏蔽带电表面, 使等离子体保持电中性。这时外加电压将集中在电极表面附近的 $\lambda_D$ 距离中,  $\lambda_D$ 称为德拜长度, 定义如下:

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (1-19)$$

为了使德拜长度的物理意义更清楚, 假定将一个正电荷  $q$  放入准中性的等离