

IU

21世纪大学新型参考教材系列

# 等离子体电子工程学

(日) 菅井秀郎 编著

Inter  
University



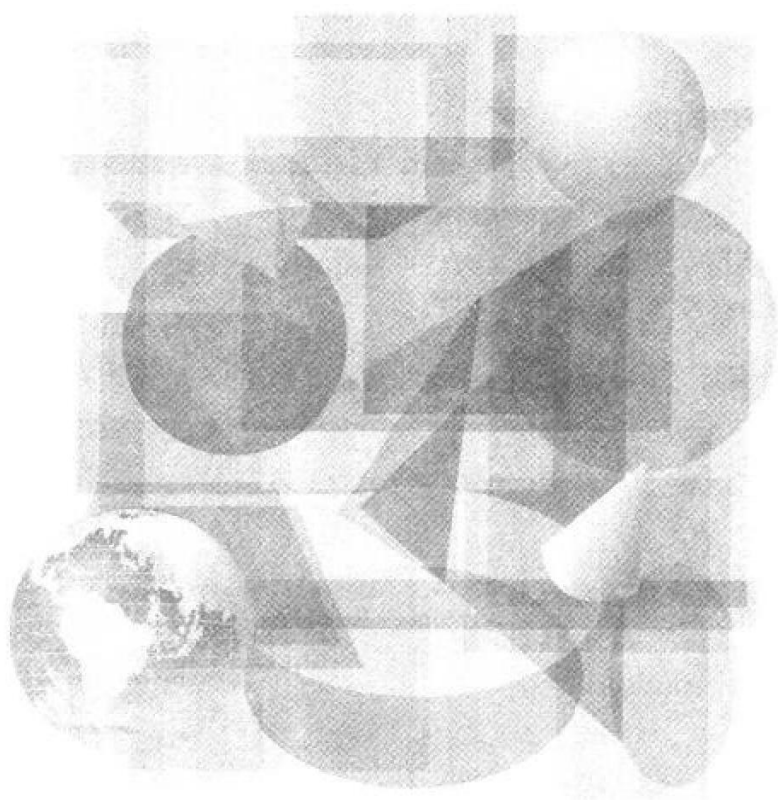
科学出版社

OHM社

世纪大学新型参考教材系列

# 等离子体电子工程学

〔日〕菅井秀郎 编著  
张海波 张丹 译



科学出版社 OHM 社

2002. 北京

## 为了适应21世纪的要求

面向21世纪，日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整，现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求，经过不断深入考察和讨论，按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

### 21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员：家田正之  
编 委：稻垣康善（名古屋大学）  
白井支朗（丰桥技术科学大学）  
梅野正义（名古屋工业大学）  
大熊 繁（名古屋大学）  
绳田正人（名城大学）

## 电子器件

电子物性  
半导体工程学  
电子器件  
集成电路A  
集成电路B  
光电子学

**21 世纪大学新型参考教材系列**

**等离子体电子工程学**

**编著者:菅井秀郎(名古屋大学)**

**执笔者:大江一行(名古屋工业大学)**

# 前 言

由气体放电生成的等离子体,在各个领域得到广泛的应用,有望形成支撑 21 世纪产业和科学技术的重要基础。例如,等离子体加工已经成为制造 LSI(大规模集成电路)、LCD(液晶显示)等尖端电子器件所必不可少的技术。在环保领域,有害物质的等离子体处理技术也正受到关注。另一方面,在能源开发领域,为了确保人类的永久能源,有关科技人员在国际合作的基础上正在推进通过约束超高温、超高密度等离子体来实现核聚变反应的研究工作。

因此,产业界对等离子体应用技术期待很高,但是从研究开发第一线也经常传来掌握等离子体的机理并对其进行控制并不容易的说法。所以,这要求大学尽可能多地培养熟悉等离子体的年轻技术人员和研究人员。回想起来,我们在准备讲授便于大学生理解的等离子体课程的时候,就感到缺乏合适的教科书。关于气体绝缘击穿、放电现象等,过去虽然有不少好的书籍,但是,在大多数场合其内容只局限于直流放电,几乎没有讲述最近等离子体工艺中常用的高频放电和利用等离子体中的波的新型等离子体。另外,对于理解等离子体的化学活性具有重要意义的碰撞反应过程的论述也比较少,我们认为这里有必要对等离子体的集体行为进行浅显易懂的说明。

在编写本书的时候,我们以等离子体工艺技术的迅速发展为背景,用适应时代的新视点来重新看待等离子体教科书,并且注意使年轻人把握基本的思考方法。作为本书的特色,我们尝试了分别从微观和宏观的观点来进行易于理解的说明,对最近等离子体工艺中所采用的新等离子体生成方法进行了阐述。由于篇幅的限制,本书无法涉及热等离子体和核聚变等离子体等方面的内容,但是通过本书的学习,足以使学生们掌握等离子体的基本性质和实用基础。

最后,对给予本书出版机会的已故家田正之编辑委员会主任,以及绳田正人编委和编写第5章的大江一行教授深表谢意。

菅井秀郎

电气能源基础  
等离子体电子工程学  
电力系统工程学  
电气电子材料  
高电压/绝缘工程学  
电动机  
电力电子学

## 电气能源

逻辑电路与自动机械  
计算机工程学  
程序语言设计  
信息传送和符号的理论  
信息通信工程学  
信息网络

## 信息通信

## 公共基础

电磁学A  
电磁学B  
电气电路A  
电气电路B  
电子电路A  
电子电路B  
电气数学  
信息数学  
程序设计

## 测量·控制

系统与控制  
信号分析  
传感测量  
柔性信息处理  
机器人控制

# 目 录

## 1 等离子体电子学的学习方法

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1.1 等离子体概述 .....    | 2  |
| 1.2 等离子体的各种性质 ..... | 4  |
| 1.3 等离子体的应用 .....   | 6  |
| 1.4 本书的构成 .....     | 9  |
| 练习 题 .....          | 10 |

## 2 等离子体中的微观运动

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 2.1 单个粒子的运动 .....     | 12 |
| 2.2 粒子间的碰撞 .....      | 19 |
| 2.3 弹性碰撞中的能量损失 .....  | 24 |
| 2.4 原子的激发与电离 .....    | 25 |
| 2.5 分子的激发与离解、电离 ..... | 31 |
| 练习 题 .....            | 37 |

## 3 等离子体的宏观性质

|                      |    |
|----------------------|----|
| 3.1 分布函数与平均量 .....   | 40 |
| 3.2 等离子体基本方程 .....   | 43 |
| 3.3 等离子体的电中性 .....   | 45 |
| 3.4 粒子流动与密度分布 .....  | 49 |
| 3.5 等离子体鞘层 .....     | 56 |
| 3.6 能量平衡与粒子数平衡 ..... | 61 |



|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 练习 题                              | 65  |
| <b>4 气体放电与等离子体的形成</b>             |     |
| 4.1 气体的绝缘击穿——汤生的实验和理论             | 68  |
| 4.2 放电起始电压——帕邢定律                  | 73  |
| 4.3 气体放电中的等离子体状态                  | 75  |
| 4.4 汤生理论的局限性                      | 76  |
| 练习 题                              | 82  |
| <b>5 等离子体的生成方法 I ——直流放电</b>       |     |
| 5.1 各种放电方法与放电模式                   | 84  |
| 5.2 辉光放电与低温等离子体                   | 88  |
| 5.3 电弧放电与热等离子体                    | 94  |
| 5.4 电晕放电与高气压低温等离子体                | 100 |
| 5.5 磁控管放电                         | 102 |
| 练习 题                              | 103 |
| <b>6 等离子体的生成方法 II</b>             |     |
| ——高频放电、微波放电                       |     |
| 6.1 等离子体生成与天线耦合                   | 106 |
| 6.2 平行板加 RF 电压——电容耦合等离子体          | 108 |
| 6.3 线圈通 RF 电流——感应耦合等离子体           | 119 |
| 6.4 等离子体中的波                       | 122 |
| 6.5 强电波照射——表面波等离子体                | 126 |
| 6.6 使用磁场中的波——ECR 等离子体和螺旋波<br>等离子体 | 128 |
| 练习 题                              | 131 |

## 7 等离子体在电子、环境工程中的应用

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.1 LSI 制造工艺中的等离子体刻蚀法 .....  | 134 |
| 7.2 非晶硅薄膜的等离子体 CVD 制备法 ..... | 140 |
| 7.3 等离子体显示器件的工作原理 .....      | 143 |
| 7.4 利用等离子体的环境改善技术 .....      | 145 |
| 练习 题 .....                   | 149 |
| <br>                         |     |
| 练习题解答 .....                  | 151 |
| 参考文献 .....                   | 155 |
| 附录 .....                     | 157 |

### 篇外话

|                      |     |
|----------------------|-----|
| “等离子体”名称的由来 .....    | 4   |
| 原子的内部状态和光谱标记 .....   | 27  |
| 朗缪尔探针 .....          | 59  |
| 流注的形成 .....          | 79  |
| 表面磁场对等离子体的约束作用 ..... | 87  |
| 朗道衰减与回旋衰减 .....      | 131 |
| 用强光生成等离子体 .....      | 149 |

# 等离子体电子学的 学习方法

我们生活的周围环境中出人意外地存在很多等离子体现象。我们将要学习等离子体所具有的导电、发光和引发化学反应等多种性质,并掌握利用这些特性的各项技术在诸多专业领域中的应用状况。

## 1.1 等离子体概述

冰升温至  $0^{\circ}\text{C}$  会变成水,如果继续使温度上升至  $100^{\circ}\text{C}$ ,那么水就会沸腾成为水蒸气。我们知道,随着温度的上升,物质的存在状态一般会呈现出固态 $\rightarrow$ 液态 $\rightarrow$ 气态三种物态的转化过程,我们把这三种基本形态称为物质的三态。那么对于气态物质,温度升至几千度时,将会有有什么新变化呢?由于物质分子热运动加剧,相互间的碰撞就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)。我们把物质的这种存在状态称为**物质的第四态,即等离子体(plasma)**(参见本章篇外话)。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。反过来,我们可以把等离子体定义为:正离子和电子的密度大致相等的电离气体。更严密的定义请参见第3章的式(3.21)。

从刚才提到的微弱的蜡烛火焰,我们可以看到等离子体的存在,而夜空中的满天星斗又都是高温的完全电离等离子体(详见后述)。据印度天体物理学家沙哈(M. Saha, 1893 ~ 1956)的计算,宇宙中的99.9%的物质处于等离子体状态。而我们居住的地球倒是例外的温度较低的星球。此外,对于自然界中的等离子体,我们还可以列举太阳、电离层、极光、雷电等。在人工生成等离子体的方法中,气体放电法比加热的办法更加简便高效,诸如荧光灯、霓虹灯、电弧焊等等。图1.1给出了主要类型的等离子体的密度和温度的数值。从密度为  $10^6$  (单位:个/ $\text{m}^3$ ) 的稀薄星际等离子体到密度为  $10^{25}$  的电弧放电等离子体,跨越近20个数量级。其温度分布范围则从100 K 的低温到超高温核聚变等离子体的  $10^8 \sim 10^9$  K (1 ~ 10 亿度)。图1.1中右侧温度轴的单位 eV (electron volt) 是等离子体领域中常用的温度单位,  $1 \text{ eV} = 11\,600 \text{ K}$ 。

通常,等离子体中存在电子、正离子<sup>1)</sup>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)等三种粒子。设它们的密度分别为

1) 等离子体中也含有负离子,单说“离子”通常是指“正离子”。

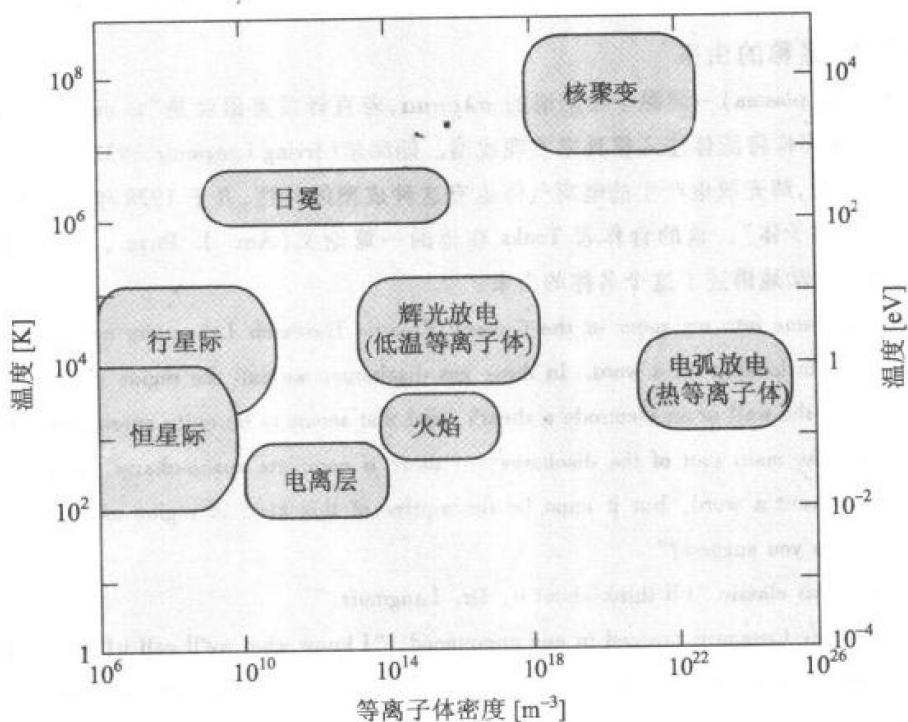


图 1.1 各种等离子体的密度和温度

$n_e, n_i, n_n$ , 由于  $n_e \approx n_i$  (准电中性), 所以电离前气体分子密度为  $(n_e + n_n)$ , 于是, 我们定义电离度  $\beta = n_e / (n_e + n_n)$ , 以此来衡量等离子体的电离程度。日冕、核聚变中的高温等离子体的电离度都是 100%, 像这样  $\beta = 1$  的等离子体称为完全电离等离子体。电离度大于 1% ( $\beta \geq 10^{-2}$ ) 的称为强电离等离子体, 像火焰中的等离子体大部分是中性粒子 ( $\beta < 10^{-3}$ ), 称之为弱电离等离子体。

若放电是在接近于大气压的高气压条件下进行, 那么电子、离子、中性粒子会通过激烈碰撞而充分交换动能, 从而使等离子体达到热平衡状态。若电子、离子、中性粒子的温度分别为  $T_e, T_i, T_n$ , 我们把这三种粒子的温度近似相等 ( $T_e \approx T_i \approx T_n$ ) 的热平衡等离子体称为热等离子体 (thermal plasma), 在实际的热等离子体发生装置中, 阴极和阳极间的电弧放电作用使得流入的工作气体发生电离, 输出的等离子体呈喷射状, 可用作等离子体射流 (plasma jet)、等离子体喷焰 (plasma torch) 等。

另一方面, 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, 电子在与离子或中性粒子的碰撞过程中几乎不损失能量, 所以有  $T_e \gg T_i, T_e \gg T_n$ 。我们把这样的等离子体称为低温等离子体 (cold plasma)。当

### “等离子体”名称的由来

等离子体(plasma)一词源于希腊语的  $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ , 若直译成英语就是“to mold”, 意味着像加工塑料制品那样将流体注入模具来实现成型。朗缪尔(Irving Langmuir, 1932年诺贝尔化学奖得主)注意到, 辉光放电产生的电离气体也有这种成型的特性, 并于1928年把这种电离气体命名为“等离子体”。他的合作者 Tonks 在他的一篇论文(Am. J. Phys., 35(1967), p. 857)中, 这样生动地讲述了这个名称的由来:

Langmuir came into my room in the General Electric Research Laboratory one day and said “Say, Tonks, I’m looking for a word. In these gas discharges we call the region in the immediate neighborhood of the wall or an electrode a sheath, and that seems to be quite appropriate; but what should we call the main part of the discharge? ... there is complete space-charge neutralization. I don’t want to invent a word, but it must be descriptive of this kind of region as distinct from a sheath. What do you suggest?”

My reply was classic “I’ll think about it, Dr. Langmuir.”

The next day Langmuir breezed in and announced, “I know what we’ll call it! We’ll call it the plasma.” The image of blood plasma immediately came to mind; I think Langmuir even mentioned blood.

像该文中提及的那样, 当时在医学界 Plasma 已经被用于指代血浆(blood plasma), 而朗缪尔的这一命名与此毫无关系。通晓希腊语的朗缪尔应该是看到放电气体发光部分会随着放电管形状而变化, 于是根据上述希腊词源将其命名为等离子体的。大家想想, 霓虹灯广告牌, 不论其文字、图形多么复杂, 不都可以通过细长的放电管而绚丽发光吗?

然, 即使是在高压下, 低温等离子体还可以通过不产生热效应的短脉冲放电模式来生成(参见 5.4 节)。低温等离子体在工业中是应用得最广泛的一种等离子体, 其生成方法将在本书第 5 章和第 6 章中详细介绍。另外, 图 1.1 中的“温度”, 严格地讲是指电子温度  $T_e$ , 但在除低温等离子体外的一般情况下,  $T_e$  与  $T_i$  近似相等。

## 1.2 等离子体的各种性质

物质第四态的等离子体有着许多独特的物理、化学性质。第一, 温度高, 粒子动能大。第二, 作为带电粒子的集合体, 具有类似金属的导电性能。第三, 化学性质活泼, 容易发生化学反应。例如, 将甲烷和氢气在密闭容器

中混合并使之放电,若保持适宜的容器壁温度,就会在壁面上析出一层金刚石薄膜。第四,发光特性,可以用作光源。例如,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,都是我们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。我们以图 1.2 所示的电子碰撞双原子分子 XY 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。我们把这种处于高能级状态的分子称为激发态分子,用  $XY^*$  表示。激发态分子中的电子从高能级跳回到低能级时,便以发光的形式来释放多余的能量。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 XY 的碰撞也可以使之分解成 X 原子和 Y 原子(离解)。若用“:”表示分子中的成键电子对,则离解过程可以表示为  $X:Y \longrightarrow X \cdot + \cdot Y$ 。这样一来,带有未成对电子(用 X 和 Y 旁边的符号  $\cdot$  表示)的 X, Y 就容易发生化学反应,故被称为化学活性种或者基团(radical)。

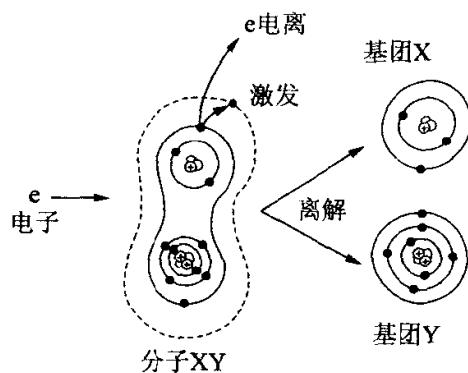


图 1.2 电子碰撞分子 XY 引起激发、电离和离解

例如 H, O, Cl 等游离态的原子和 CH<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, SiH<sub>3</sub> 等分子都是基团<sup>1)</sup>。为了明确它们不带电荷的性质,也称之为中性基团,以与电离产生的离子性基团相区别。表 1.1 总结了上述的碰撞过程的反应式以及相应的性质和应用。

表 1.1

| 等离子体中的主要相互作用过程   | 等离子体的性质和应用 |
|--|------------|
| 激发: $XY + e \longrightarrow XY^* + e$                    | 发光特性〈光学应用〉 |
| 退激: $XY^* \longrightarrow XY + h\nu$ (光子)                |            |
| 离解: $XY + e \longrightarrow X + Y + e$                   | 化学活性〈化学应用〉 |
| 电离: $XY + e \longrightarrow XY^+ + 2e$<br>$X^+ + Y + 2e$ | 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 等离子体的应用

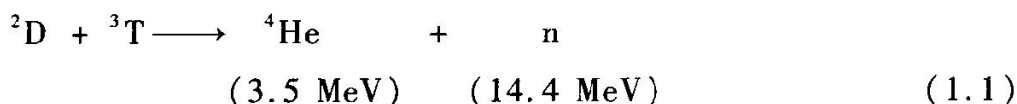
等离子体技术现在广泛应用于诸多专业领域,而且变得越来越重要。图 1.3 分类列举了等离子体在能源、物质与材料、环境与宇宙这三大领域中的应用,并且还从等离子体的电气、光学、热学、化学以及力学等方面的特性对应用实例进行了分类。

首先,在能源领域,利用超高密度、超高温等离子体的核聚变发电受到瞩目。在不久的将来,不仅燃化资源将枯竭,而且其燃烧产物 CO<sub>2</sub> 带来的全球温暖化问题也不容忽视。另一方面,基于核裂变反应的原子能发电的主要燃料铀的储量有限,反应堆的安全问题和放射性废物的处理问题还没能从根本上解决。而核聚变反应是以氢同位素为燃料,它们大量存在于海

1) 基团的定义是:具有未成对电子的分子。严格地说,游离态原子不是基团,CF<sub>2</sub>, SiH<sub>2</sub> 等处于作为基态的 1 重简并状态(参见第 4 章篇外话),化学性质比较稳定,不容易发生化学反应。

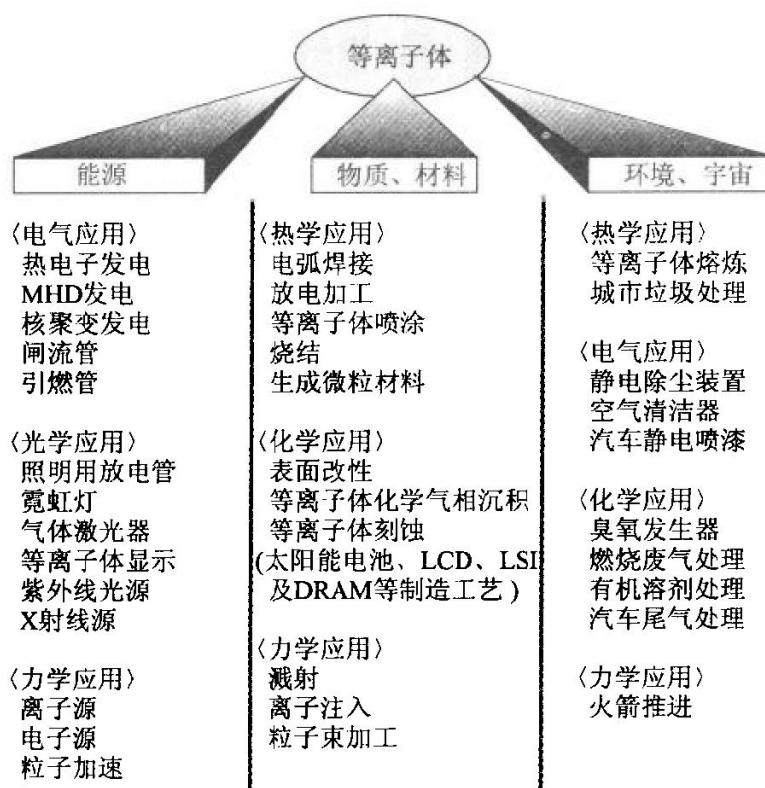


水之中。实现核聚变发电,可使我们人类掌握半永久性的绿色能源。核聚变的基本反应原理如下所述。一个高能氘核(D)和一个高能氚核(T)碰撞发生核聚变反应,生成一个氦核(He),并放出一个中子(n)。反应如下:



该反应出现的质量亏损( $0.019 \text{ amu}^{1)}$ )会转化为 He 和 n 的巨大动能释放出来,而中子撞击到反应堆四周的吸收介质,从而转化成热能发电。要实现式(1.1)所示的核聚变的自持反应,必须要生成约 1 亿度(10 keV)的高密度( $>10^{20} \text{ m}^{-3}$ )的 D,T 等离子体并将其保持 1 秒以上。为此,现在普遍采用的方法是:将氘( $\text{D}_2$ )和氚( $\text{T}_2$ )的混合气体电离,加热到超高温,同时采用磁场进行约束。目前,国内外均在致力于这种核聚变的大规模研究与开发。

表 1.2 等离子体的应用



1) atomic mass unit(原子质量单位)的缩写,1amu 相当于 $^{12}\text{C}$ 质量的 1/12。