

低温等离子体

李学丹

一、等离子体

通常,我们接触到的物质大多是处在固态、液态和气(汽)态,即所谓物质的三态,而等离子态可以说是物质的第四态。所谓等离子体(Plasma)一词原意是血浆、原生质。1927年,Langmuir在研究汞的电离时,他将放电的气体称为等离子体。实际上,应该说,气体放电中那部分由于部分气体被电离而产生的电子和正离子密度相等的物质才称为等离子体。但是,这一概念往往被人们混淆,在很多情况下,往往把电离了的气体统称为等离子体。

在日常生活中,我们接触到的等离子体不如固体、液体和气(汽)体那么普遍,对它认识得不那么清楚。如荧光灯、霓虹灯、火焰中存在着等离子体,雷电,地球大气层上层的电离层也是等离子体。至于地球以外的宇宙中,等离子体是存在的主要形式,按质量计,90%以上的物质处于等离子态。对我们人类关系最密切的太阳就是一个大等离子体球。人们对于由甲烷、氨、氢和水蒸汽等组成的原始大气中进行火花放电所产生的氨基酸和核碱碱等的研究表明,生命的起源可能与物质的等离子态有密切的关系。等离子体包括了带电的粒子——电子、正离子(在负电性气体中还可能存在负离子)和中性粒子——原子(分子)、激发原子(分子)、分子被解离后的活性原子和原子团。此外,伴随着粒子的激发和电离,必然存在着光子。因此,等离子体实质上是正、负带电粒子密度相等的上述各种粒子的混合体。

通常认为等离子体中的各种粒子作自由的热运动,作为近似,它们的运动规律符合麦克斯韦分布。因此,表征其动能大小可以用温度来表示。如果说,各类粒子的平均动能相等,即它们的温度相等,则称此等离子体为平衡等离子体(或称等温等离子体)。反之,则称为非平衡等离子体(或非等温等离子体)。根据温度,它还可分为高温等离子体和低温等离子体。前者一般指 10^4-10^6 °C那种受控核聚变所要求的高温,而后者又可根据中性粒子的温度高低分为热等离子体和

冷等离子体。

二、低温等离子体的产生

众所周知,若外界给予物体能量,如加热、光照等,则物体的温度和组成物体的粒子的动能增加。随着能量的增加,物质的状态由固体→液体→气体而转变,如图1所示。如进一步给予能量,使部分原子(或分子)电离成电子和正离子,则气体转变成成为等离子体。

地球上的等离子体由人工产生。其方法较多,而较普遍的方法是利用气体放电,即给予气体电能或电、磁能,使气体电离而成。按放电的形式来分,有辉光放电、弧光放电、火花放电和电晕放电等;按电源频率来分,有直流感电、工频放电、高频放电、微波放电和脉冲放电。

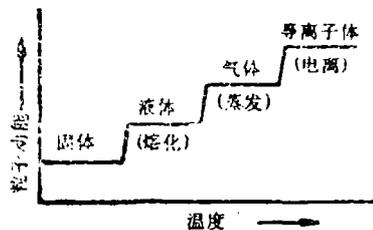


图1

如以最简单的直流二极放电为例,在充有气体的玻璃管中,其两端接入两个金属电极,两电极间加上电压。当电压较低时,由于外界宇宙线、土壤中的放射性元素的射线以及其它射线的作用,气体粒子被微弱地电离。所产生的正、负带电粒子分别向两电极运动,从而形成电流。同时由于带电粒子在电场中被加速而获得动能,因而当它们碰撞中性粒子时,可以将能量传递给中性粒子,从而中性粒子被电离。另外,尚有伴随着激发原子(分子)自发跃迁时产生的光子、电子和负电性气体粒子可形成的负离子、多重正离子等。当电压高达一定值时,气体的电离度(定义为正或负的带电粒子数和未电离时的中性粒子数之比)达一定程度时,中性气体即转变成等离子体。

由于等离子体中具有较多的、自由的带电粒子,因此它的导电性好。通常等离子体的电场强度不大。在低气压情况下,约为十分之几到几伏/厘米。另外,从粒子间碰撞规律可知,当轻粒子(电子)和重粒子(原子或分子)产生弹性碰撞时,它几乎不损失其动能,而产生非弹性碰撞时可损失几乎本身的全部动能。而正离子和质量差不多的原子(或分子)相碰时,其结果正好和上述相反。从而可知,通常等离子体中的电子是冷

(或说电子温度)比气体原子(分子)或正离子的动能(温度)要高得多。除非当气压较高时,由于粒子间的频繁碰撞,它们间充分交换能量,因此各类粒子间的温度趋于一致。图2系典型的(汞)电子温度、气体温度与气压的关系。根据温度,它属于低温等离子体,大约当气压增至 10^4 巴时,由非热平衡态进入热平衡态。

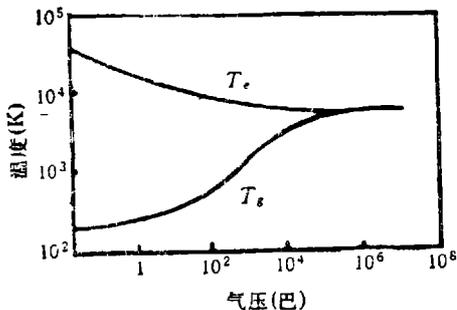


图 2

三、低温等离子体的应用

在等离子体中,当激发原子(分子)的电子跃迁至基态时,电子(或负离子)和正离子复合时,将多余的能量转变为光能。正、负带电粒子在电场中受到加速,同时又不断和其它粒子碰撞而传递能量,带电粒子的能量除了可转变为中性粒子的内能外,又可转变为动能,即转变为热能。若等离子体中的分子被解离,成为化学性活泼的原子团(活性基)、活性原子。这些活性粒子相互间或与固体作用,可产生各种化合物,因此说,等离子体具有化学能。等离子体中的带电粒子一方面具有杂乱的热运动,一方面又沿着电场方向或逆着电场方向运动,故它又具有电能。若根据等离子体具有的各种能量形式来考虑,低温等离子体的各种应用大致可归纳于图3。

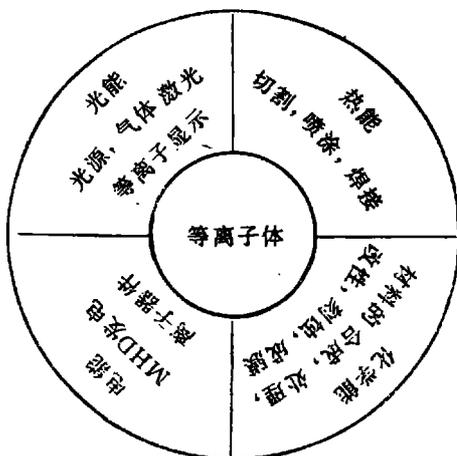


图 3

气体放电光源是照明光源中的一类。气体放电时产生的等离子体中的光辐射与气体成分、气压、电流大小等因素有关。汞是常用的气体,用它可制成荧光灯、高压汞灯,还可在汞中添加少量金属蒸汽,制成金属卤

化物灯,从而提高光效或改善显色性。与汞类似,钠具有高的蒸汽压,低的电离电位和激发电位,用它制成的钠灯,光效高,对雾的透过率高,故广泛用于道路、隧道等处的照明。

气体激光器是通过气体放电等离子体中粒子间的碰撞,造成上、下能级的粒子数反转,从而产生激光。它的种类很多,波长范围从真空紫外(100毫微米附近)至(1-2)毫米。

等离子体显示板(屏)是一种平板显示器件。其结构是在一块玻璃上制作一条条横向电极(又称X电极),另一块玻璃板上制作一条条纵向电极(又称Y电极),然后把两块玻璃板靠近使X电极和Y电极形成空间正交,充入惰性气体,并加以密封。当在某一个X电极和另一个Y电极之间加上工作电压时,将会在这一组电极的交叉点处发生辉光放电,并因此呈现一个小面积的亮点。在外电路控制下,等离子体显示板上可以在许多组电极的交叉点处同时发生辉光放电,从而显示出数字、符号和图形。

由弧光放电产生的等离子体,其电流密度大、温度高,可以用于难熔金属切割、焊接和喷涂。利用等离子体喷射还可加工、切割绝缘材料。

利用不同气态材料的等离子体,可以产生各种活性原子、活性基等。它们相互间或和固体表面可发生各种化学和物理的作用。从而可以合成新的气态材料,如果它们沉积在固体表面则形成薄膜。称为等离子体气相沉积。如果活性粒子和固体表面发生化学反应而剥离固体材料,则称为等离子体刻蚀。如果活性粒子和固体表面发生化学反应而生成新的材料则称为等离子体的材料改性或处理。

离子器件(管)是利用气体放电等离子体的导电现象所制成的电真空器件,亦称充气管。根据其结构和放电形式的不同,可制成用途不同的离子管。如利用弧光放电的热阴极充气二极管、闸流管、汞弧管。利用辉光放电的稳压管、冷阴极闸流管、十进位管。利用高频放电的天线开关管。利用脉冲放电的脉冲闸流管(充氢闸流管)等。上述各种器件可用来作整流、稳压、计数、开关等。

磁流体发电是等离子体的一项重要应用。让高温导电燃气流(等离子体)以一定速度通过位于强磁场中的通道,切割磁场而产生感应电动势。这种方法把热能直接变换为电能,无需经过机械能变换的中间阶段,因而不需用转动部件,构造简单,发电热效率可提高到50-60%。发电导管通道中排出的热流虽已不导电了,但可用来产生蒸汽,以推动透平发电机组发电。

等离子体与很多科学技术部门有密切关系,并有广泛应用,是广大物理工作者、工程技术人员大有前途的研究领域。