

低温等离子体物理进展*

马 腾 才

大连理工大学 (邮政编码116024)

提要 概述了低温等离子体物理研究现状、发展及其应用。

关键词 低温等离子体; 热电弧; 非平衡; 高频放电; 微波放电; 辉光放电; 等离子体电子学;

科学家们在为实现从聚变等离子体获得无限能量的理想而奋斗的同时, 又将低温等离子体物理技术和应用的研究推向一个新的高潮。他们已将低温等离子体的研究扩展到力学、化学、天文学、电子学、光学、冶金学等许多传统学科, 形成一些崭新的交叉性的边缘学科, 如等离子体化学、等离子体光学、等离子体电子学、等离子体冶金学、等离子体电动力学和天体等离子体物理学等。与此相应的等离子体技术和应用也已渗透到许多传统工业部门, 形成一批新的工业领域, 如等离子体化学工业、等离子体冶金工业、等离子体机械加工、等离子体表面工程和等离子体能源工业等。

21世纪将是等离子体技术的新纪元, 它的意义完全可以和电给人类社会所带来的文明相媲美。

1 热电弧等离子体

近年来工业所取得的显著进步, 是和电弧等离子体在化学、冶金、材料和机械等工业部门的广泛应用分不开的。电弧等离子体的某些特性, 如巨大的能量密度和几万度的高温, 能够使处于等离子体内的物体受到高速度的热作用, 能够使等离子体内各种成分之间的化学反应速度大大地提高。利用这些特性, 人们将会不断地开拓出更先进、更有效的工艺过程和设备。它们可以大大地节约能源和材料, 并且对环境不产生污染。目前, 等离子体技术和工艺正在形成一些新的特种工业部门, 如等离子体化学工业, 等离子体冶金工业等等。在这些部门里生产和应用开发的重要性是和基础科学研究紧密地联系在一起。这是因为在低温等离子体中, 无论是由外界作用的各种因素, 还是由等离子体内部各种成分之间相互作用引起的物理过程, 是多种多样的, 而且彼此相关, 十分复杂。没有对这些过程的深刻理解和准确的描述, 就根本不可能建造能有效工作的等离子体发生器和对它们合理使用。因此, 科学家

* 第5届全国等离子体科学技术会议 (1989年10月21—25日, 大连) 大会综述报告。

们正集中精力解决有关电弧等离子体性质和行为的一些复杂、重要的实际应用问题。这里首先涉及的是电弧等离子体的热力学性质和输运性质。大家知道，热效应在电弧等离子体中起主导作用，这是它与磁流体动力流的根本区别。电弧等离子体的热效应是由焦耳热引起的，并且它远大于由压力做功所产生的动能。这样一来，电弧等离子体的热力学和输运性质都成为局域状态的函数，这就使问题的研究复杂化了。至今，电弧等离子体的加热理论仍停留在70年代所建立的层流模型基础上，在湍流状态工作的等离子体发生器理论还没有。电弧流动的磁流体湍性，电弧在行波磁场和旋转磁场中的稳定性，粒子和能量的非线性输运等问题的研究，都刚刚开始。

高温气体电击穿的研究最受重视。这是一个在研制大功率等离子体发生器、磁流体发电机、等离子体推进器、等离子体加速器、等离子体激光器和等离子体化学反应器时首先遇到的问题。击穿的情况决定着这些等离子体设备的主要性能，如伏安特性、电源的有效利用率、等离子体的温度等都在很大程度上依赖于击穿时弧的分流程度。在磁流体发电机和大功率的气体激光器里，近电极区域的击穿会严重地影响设备的工作寿命。等离子体化学反应器的设计方案、几何尺寸、功率和效率的大小，也都在很大程度上决定于高温情况下的气体击穿。目前，虽然已积累了大量的有关常温下气体击穿的实验数据和建立了经验与半经验计算击穿电压的公式，但对高温情况下的气体击穿研究只是刚开始，至于在等离子射流和冷电极之间的击穿问题，实际上还没有研究。这个问题相当重要，因为引起电击穿的电荷输运现象在时空里的进一步演化，往往导致电弧放电，结果使弧斑区的电极材料迅速烧蚀。

电弧等离子体在非稳态磁场里的动力学特性，也是电弧等离子体研究方面的一个前沿课题。它不仅对发展电弧等离子体的非线性理论具有科学意义，而且具有非常重要的实用价值。随着对等离子体工艺过程自动化和精确化要求的日益提高，人们开始研究利用旋转磁场实现对电弧等离子体的空间稳定化作用，调节弧的空间尺寸和形状，控制放电的能量参数和等离子体的温度剖面以及等离子体射流的火舌长度。这些问题都归结为研究在有限空间内电弧等离子体与非均匀、非稳态磁场的相互作用问题。

目前在工业上应用的等离子体发生器都是直流的。交流等离子体发生器在能源利用等方面比直流的更优越，更有利于工业上的应用。因此，研制交流等离子体发生器是当今电弧等离子体技术开发中的一个重要领域。由于在小电流、低压强的情况下电弧等离子体失去了局域热力学平衡的性质，所以这种等离子体的动力学研究变得十分复杂和困难，实际上还没有这方面的理论。因此，各种因素对电弧放电的正柱区域性质的影响，辉光放电与电弧放电之间的相互过渡的规律等都尚不清楚。这种研究上的落后状态严重地阻碍了交流等离子体发生器的研制。

近年来受控热核聚变的实验研究证明，高温气体放电等离子体的稳定性问题具有非常重要的意义。同样，电弧等离子体的实验研究也表明，聚变等离子体产生的某些不稳定性也是低温电弧等离子体迫切需要解决的。不仅如此，等离子体发生器里的电弧是在一种不同于聚变等离子体的特定条件下存在的，如伴随有高温气体流动、边界的湍性效应、相对冷的边界层、强的径向电场以及温度场和速度场的空间高度非均匀性等，这使电弧等离子体产生某些新的不稳定性，如电离过热不稳定性、附着不稳定性、分流不稳定性等等。这些不稳定性严重地损害了电弧等离子体的性质，甚至造成放电中断，目前，对实验上观察到的这些不稳定

性的理论分析刚刚开始, 定量分析还没有。特别应当强调指出的是, 目前对湍性弧的有效诊断方法还没有建立起来。

2 低温非热平衡等离子体

等离子体化学是一门新兴的边缘学科。同已经实现工业化的一些高温化学反应、光化学反应、放射或放射化学反应相比, 等离子体化学反应具有较高的效率和良好的选择性, 可以迅速、廉价地制造许多现代工业不可缺少的材料。化学工业可以利用的等离子体中, 根据它们的热力学状态可以分成平衡等离子体和非平衡等离子体两种类型。前面讲到的电弧等离子体就是平衡等离子体, 它的轻粒子(电子)和重粒子(离子、原子、分子)近似地达到热平衡。它们具有相同的温度或能量, 并产生在一个大气压或更高的大气压下。非平衡等离子体是一种低气压放电时产生的等离子体, 其中的电子成分和离子成分虽然都分别地达到能量的麦氏分布, 但整个系统没有达到热平衡, 电子的温度比较高, 离子的温度很低, 相当于工作气体的温度。将这种等离子体化学应用于材料表面改性, 优点很多。等离子体的高能电子与中性原子碰撞, 能斩断化学键, 激发和激活工作气体。按传统, 表面改性所需的化学反应离不开高温, 但非平衡等离子体的化学反应在接近室温的条件下就可以进行。这对于节约能源和简化装置, 尤其是保护基体性质不变起着重要作用。同时, 等离子体的离子可被鞘层电场加速到几百以至几千电子伏的能量。这种高能粒子轰击基体表面, 一方面使表面的原子或基团通过分解、溅射、刻蚀等脱离材料表面, 另一方面又可产生注入、基团置换、聚合等反应, 向材料表面引入新的原子和分子, 改变表面的微成分和结构, 从而极大地改变了表面的性能。

等离子体与材料表面的相互作用很复杂。它强烈地依赖于许多参数, 特别是等离子体中的电子和离子的能量、密度以及电离度的大小与空间分布。但是至今只有少量工作从事于低气压放电等离子体性质的研究, 研究等离子体微参数与表面的微结构和性能之间的关系也刚刚开始。这些都是根本问题。只有弄清这些问题, 才能了解表面改性的动力学和膜的生长机理, 才能够确定各种方法的可能性和限制, 才能不断开拓出更先进的工艺过程; 而且, 完全弄清和精确控制在改性过程中的等离子体微参数, 是产生性质可完全再现的表面合金与薄膜的唯一方法。

2.1 高频放电等离子体 微电子工业广泛地应用兆赫频段的高频放电等离子体, 在半导体表面上建立微结构、涂薄膜和清洗。这是因为在高频率放电的条件下, 等离子体具有一些不同于直流辉光或电弧放电的有利特性, 例如, 能以高效率在放电室产生具有高能量密度的空间均匀的非平衡态等离子体; 相对分流不稳定性具有超高稳定度; 可以将电极置于放电室之外, 等等。目前, 应用这种等离子体进行有选择性和各向异性刻蚀工艺的进展, 在微米和亚微米半导体微结构的制备上已取得最好的结果。但是对于发生在这种等离子体中的各种物理过程的研究却远远落后于它们的广泛应用。这种状况的产生, 主要是由于在分子混合气体的高频放电中产生的电磁动力学现象和多成分的化学反应过程非常复杂。虽然在很多的实验研究工作里测量了等离子体的一些主要参数, 如带电粒子和中性粒子的密度、电子温度、气体温度等, 但是仍有许多重要问题至今尚不清楚, 例如, 为什么在给定放电电流和固定的其它放电条件下(压强、气体种类、电极间的距离、电极上的电压)却会产生这样或那样的等离子体特性? 为什么在给定放电电压、放电频率、气体压强和电极间距离的情况下, 试验

上会观察到等离子体某些重要参量的非单值性?在什么样的情况下,放电的等离子体不受电极被侵蚀的产物和器壁材料的污染?等等。显然,这些问题的物理图象弄不清楚,就不可能定向地设计高频等离子体化学反应器和大功率的气体激光器。

2.2 微波放电等离子体 用于等离子体表面工程的气体放电等离子体有许多种,其中微波等离子体是最有前途的。它与直流辉光和高频放电等离子体相比,具有许多有利于表面改性的优越性。它的等离子体密度高达 10^{12} — 10^{13} /厘米³,电子温度10电子伏,电离度达10%以上。这些主要参数,比直流辉光和高频放电等离子体高1—2个量级;通过改变微波的功率容易调节电子温度、密度和电波能量分布,增大高能电子的含量;通过对天线激发场和磁约束场的优化,可在大体积真空室建立均匀的等离子体;借助于非均匀磁场加速等离子体,可对材料表面同步进行薄膜沉积和离子注入;微波等离子体是真空紫外波段的强发射光源,等离子体化学过程始终伴随着光子化学过程。

研究超高频放电的历史已有几十年了,但只在最近的10年到15年里,由于高效、大功率微波源的出现,研究超高频放电的兴趣才突然高涨起来。第一批实验结果表明,这种等离子体有广泛的工业应用前景。因为,利用微波等离子体发生器能够将无电极的清洁放电优越性同沿着波导和同轴电缆传输能量的柔性方案结合在一起。此外,对超高频放电物理过程的研究,人们发现一系列新的效应,其中应首先提到的是电离峰的传播和在磁场中电磁超高频波与等离子体的非线性相互作用。这些现象的研究是在实际工艺过程中应用微波等离子体的保障。研究的重点是微波与等离子体的非线性相互作用;在非共振条件下,微波在等离子体中被吸收的物理机理;在快波中的等离子体动力学不稳定性及非线性的输运理论。

2.3 激光放电等离子体 利用激光处理材料表面具有独特的优点,如高度局域性、速度高和膜的质量好。但是由于激光约束斑小、能量高度集中,常常烧伤表面和造成高度的非均匀性,对大面积处理十分困难。为了消除这些缺点,近几年国外发展一种新的激光等离子体。在一个充满工作气体的高压室内置入被处理的金属材料,将激光从特制的窗口引入室内,照射在金属表面上,只要光束的能流通量密度大于 10^4 瓦/厘米²,就会使金属表面邻域的气体发生低阈值的光学击穿,沿着表面形成一层等离子体云。光子仍可穿透等离子体层辐照在表面上,结果形成等离子体和激光束对材料表面的同步作用,比它们的单独作用都要优越。

目前,激光在金属表面的高压气体中产生低阈值光学击穿的机理尚不清楚。因此,必须对不同的工作气体,不同的压强条件,研究能量的时空辐射特性和时空分布与击穿条件的相互关系,找出激光放电的等离子体的机理,建立相应的数学、物理模型。

2.4 气流中的辉光放电等离子体 近10年来,由于快导通的CO₂和CO放电激光器的发展,人们研究气压为10—760 毫时存在于气流中的稳态辉光放电兴趣空前增加了。在这种放电里,带电粒子主要产生在近电极区域,然后靠在电场里的漂移运动才进入放电的主要空间。因此在放电的主空间里存在的是低电场时的非稳态性质的放电。根据这一原因,放电不稳定性的发展也是在近电极区域开始的,而后扩展到放电的主要空间。这种放电具有一系列在本质上不同于玻璃管内常规辉光放电的性质,如放电电流形成的机理和不稳定性发展的特点。某些不稳定性,如附着不稳定性的发展严重阻碍着大功率激光器的建造。不仅影响出光质量,而且常常导致电弧放电、烧损激光器件,因此,研究这种放电的物理过程,特别是研

靠近电极区域的物理现象和不稳定性,是发展大功率气体放电激光器的一项迫切任务。

3 等离子体电子学

等离子体电子学是物理学中一个迅速发展的新方向。研究它的主要目的是开拓和建立高效率的大功率电磁辐射发生器和放大器,以及借助于带电粒子与等离子体波相干作用产生强流带电粒子加速器。这些等离子体设备与相应的传统真空设备相比较,具有极重要的优越性,如很宽的调频谱;能产生和放大毫米和亚毫米长的波;借助束流通过等离子体可将功率极大地增加。这些等离子体设备的工作原理——束流等离子体不稳定性,虽然已发现40多年了,但至今电磁波的等离子体发生器和放大器以及等离子体的带电粒子加速器尚未建成。目前在实验室里的各种等离子体束流装置远没有完善,它们的一系列重要特性还远不如传统的真空超高频电子学仪器。因此,面临的一项迫切任务是,对现有等离子体-束流装置上产生的各种现象必须进一步深入了解。这是一个相当困难的问题,因为在这类等离子体装置里,等离子体在空间上是非均匀的,在时间上是易变的、非线性的,会迅速解体。即使是在非平衡态等离子体的最简单模型(在无界的等离子体内有一束无界的带电粒子束)里,也包含着许多没弄清的问题,何况等离子体电子学设备里这类等离子体空间上有界,并受外磁场和整个无线电元件系统的作用,要弄清其性质就更困难了。

研究等离子体电子学的关键性问题,除上述的等离子体束流不稳定性外,还有以下几个方面:①等离子体中带电粒子不稳定性各种状态的建立和抑制;②解释受激振荡的饱和机理和确定其大小;③振荡频谱的控制;④确立能提高束与等离子体相互作用的有效系数的方法;⑤从等离子体波导中有效地引出振荡能量。不解决这些问题,电磁波的等离子体发生器和放大器以及等离子体加速器是不可能建成的。

4 低温等离子体物理的基础研究与数值模拟

低温等离子体技术和应用,是与基础理论研究密切相关、相辅相成的。没有基础理论研究,等离子体技术的进一步完善和发展是根本不可能的。

低温等离子体是一种十分复杂的物质体系,它是由大量多种成分的粒子构成的体系,并受到外界各种电磁场的作用。这样,不仅在各种粒子间有大量的相互作用的元过程,而且在粒子与波场之间也发生着多种多样的集体相互作用。因此,在低温等离子体的研究中解析理论遇到极大的困难。同时,由于在高温、高压气体放电中的等离子体有显著的湍性,而在低气压放电的等离子体中又不存在局域的热平衡性,所以现有的等离子体诊断手段难以给出准确、可信的实验数据。在这种情况下,数值模拟就成为研究低温等离子体的一种有效手段,尤其是将数值模拟与有效的诊断数据相结合而构成的组合方法,是研究低温等离子体的一个最有前途的方向。在这方面研究的前沿课题是:等离子体鞘层的非线性动力学;快波放电中的等离子体不稳定性;快波和高温气体放电的击穿理论;电子的能量分布、电离率、激发率和各种输运参量的计算;计算电子和原子、分子的弹性和非弹性截面;低温等离子体与材料表面相互作用的基本过程等。

这些问题的研究不仅具有重大的实际应用价值,而且对发展非平衡态物理的动力论和非线性波动力学等有着重要的科学意义。

PROGRESS IN LOW-TEMPERATURE PLASMA PHYSICS

Ma Teng-cai

Dalian University of Technology

Abstract A survey of the present status, development and applications of low-temperature plasma physics is given.

Keywords *low-temperature plasmas; thermal electric arc; non-equilibrium; high-frequency discharge; microwave discharge; glow discharge; plasma electronics*

第5届全国计算流体力学会议

(1990年4月26—28日, 安徽太平)

会议由中国空气动力学研究会和中国力学学会联合召开。来自44个科研和工业部门以及高等院校的124名代表出席, 宣读论文83篇, 书面交流39篇。这些论文表明, 自第4届会议以来, 我国计算流体力学工作者在应用研究方面作出了重要成绩。如明渠流, 异重流, 海洋建筑物非线性绕射, 大气污染和扩散, 风暴预测, 非线性渗流, 飞机跨声速翼型设计, 飞机导弹进排气流动研究, 飞行器复杂流场计算等方面, 均作出了许多很好的工作。有的工作已在生产和型号设计中发挥了良好作用, 有的工作已发展成实用的计算软件, 这是非常可喜的进展。在计算方法、流动机理研究方面也取得了新进展, 如发展了快速有效算法和高分辨率计算格式, 发展了网格技术、自适应网格技术和分区计算技术, 在分离流动、涡旋运动和模拟方面取得了良好结果。会议内容丰富, 信息交流充分, 对今后工作很有促进作用。

会议热烈讨论了计算流体力学研究中存在的问题和对今后工作的建议。认为加强应用研究仍是计算流体力学工作的重点。为此会议建议应有计划有重点地提倡开展以下几个方面的工作: ①搞好计算方法的研究, 这里包括快速有效的差分计算, 有限元法和谱方法以及矢量并行运算等方面的研究; ②开展网格技术和自适应网格技术的研究, 形成通用软件; ③重视边界格式的研究; ④重视加速收敛技术的研究; ⑤重视流场显示技术的研究。会议还认为, 计算流体力学工作者应象利用实验设备一样, 利用计算模拟手段开展流动机理的研究。在当前, 很多分离流动和涡旋运动的机理需要探索。希望通过计算模拟, 揭示流动现象与规律, 深化对流动本质的认识, 发展力学理论。会议强调了湍流计算的重要性, 一致认为建立适合分离流计算的湍流模式是当务之急。这项工作要同实验研究相结合。呼吁实验、计算流体力学工作者联合起来, 努力解决这一问题。会议讨论了计算机的合理使用问题。除了建议国家研制巨型计算机外, 希望尽快解决好现有计算机的合理使用问题。现有计算机收费太高, 妨碍了计算流体力学工作的开展。会议呼吁中国气动研究会和中国力学学会向中国科协反映, 统一研究计算机的合理使用问题, 降低收费标准, 提高现有计算机的使用效率。会议组织委员会讨论决定, 第6届会议将于1992年4月在福建省召开, 具体地点及征文内容另行通知。

余泽楚供稿