

等离子体工业的崛起与发展

Rise and Development of Plasma Industry

马振国

(清华大学电机系, 北京 100084)

一、等离子体技术的研究进展

等离子体是由大量相互作用但仍处在非束缚状态下的带电粒子组成的宏观体系,是和固态、液态、气态同一层次物质第四态,自然界的物质主要以这种状态出现。

早在19世纪初从发现、探寻气体放电现象开始,人类逐步认识、掌握了等离子体技术。特别是本世纪50年代后,等离子体技术在气体放电理论与实验不断进步的基础上,逐步形成了具有各自特色的四大发展方向。它们是:高温等离子体技术、热等离子体技术、冷等离子体技术和等离子体离子源技术。

以解决能源危机为目的的受控核聚变技术是高温等离子体技术的代表。它起源于天体物理学分支天体结构中关于太阳和恒星的起源、演变和灭亡的研究。在朗缪尔(Langmuir)对等离子体研究的基础上,阿尔芬(Alfven)于1937年指出,等离子体与磁场的相互作用在空间和天体物理中都有重要意义,并建立了磁流体动力学(MHD)理论。此外,朗道(Landau)和伏拉索夫(Власов)也做出了杰出的贡献。第二次世界大战后在氢弹实验成功的启发下,人们就试图参照宇宙星体自身提供深重力势阱来长时间约束等离子体,以使星体的可聚变燃料充分燃烧而释放聚变能的方法,在地球上采用电磁约束或惯性约束来达到获取廉价能源的目的,以解决人类面临的能源危机。

除热核聚变外,高温等离子体技术中还包括产生脉冲中子、高能电子束和离子束、X射线的技术,以应用于不同的领域。

热等离子体技术的代表是等离子体炬技术。19世纪,人们对电弧和直流放电进行了广泛深入的探讨,但当时对这种等离子体的应用仅限于电弧照明。然而19世纪末,白炽灯取代煤气灯后,这种照

明技术因其所需的大电流和高直流电能而失去了竞争地位。直到本世纪20年代,由于现代等离子体物理中的一个主要理论——磁离子理论(Magnetohydrodynamic Theory)的发展和1921年贝克(Beck)首创了大电流碳弧后,热等离子体的研究才得以继续发展。从本世纪30年代特别是第二次世界大战后,热等离子体基本上沿着商用磁流体发电和工程应用两个分支发展。此外还包括宇航研究中的等离子体发动机、离子发动机及现代战争中电磁轨道炮、电火箭等空间应用和军事应用。

低气压辉光放电技术是冷等离子体技术的代表。自从1672年威廉(G. Wilhelm)首次在旋转硫磺球上发现人工条件下的电火花,从而揭示了气体放电的奥秘后,直到本世纪初,在前人研究基础上,汤森德(J. S. B. Townsend)提出了经典的放电理论。到1939年,雷特(H. Raether)提出了流注理论,使气体放电理论又向前发展了一步。随着对辉光放电等离子体研究的不断深入,在肖特基(Schottky)、朗缪尔、柏索罗米(Bartholomeyczky)、玻姆(Bohm)等人建立正柱等离子体区、鞘层区理论的同时,在工程应用上,从最初利用惰性气体异常辉光放电的溅射镀膜,发展到本世纪60年代对包括非惰性气体,如 O_2 、 N_2 、 CF_4 、 SiH_4 等各种气体的辉光放电等离子体的研究,形成等离子体物理气相沉积(PPVD)、等离子体化学气相沉积(PCVD)、等离子体物理溅射刻蚀(PPSE)、等离子体化学增强刻蚀(PCAIE)、等离子体聚合(PP)、阳极氧化等应用领域,从而使冷等离子体技术在取代传统湿法加工技术方面具有广阔前景。

在高温等离子体技术和低温等离子体技术(包括热等离子体和冷等离子体技术)发展的同时,等离子体离子源技术也得到了重视。上世纪末极隧射线发现时,就出现了气体放电离子源并应用于核物理领域的研究,如建立了一批人工分裂原子核的装置。但这类离子源中发生的放电主要是 β 过程,根本不同于直流辉光放电的 γ 过程。直到本世纪30

年代,高压倍压器和回旋加速器的发展使得目前仍在广泛使用的潘宁型源出现后,气体放电型离子源才得到密切关注。1950年葛波维奇提出利用大功率脉冲冷阴极电弧放电来做离子源,并首次在世界上实现了从渗透到真空中空间的等离子体扩展边界面引出离子。桑曼(Thonemann)的工作之后,高频离子源从1958年开始得到了广泛的应用。60年代对已提出的各类源,特别是双等离子体源进行了大量细致的工作,同时开始用潘宁型等常规离子源获得多电荷态的离子,以满足重离子物理研究的需要。宽束离子源——考夫曼源是在70年代中叶由于许多应用领域提出了新的要求以及许多基础学科特别是等离子体物理、表面物理等的研究成果引入了离子源技术,致使离子源研究掀起新的热潮后出现的。等离子体离子源不仅能满足宇航离子推进的需要,还能满足受控核聚变研究中中性束注入、加热技术的要求,并且在引出系统的数值模拟(强流离子光学)方面取得了卓越的成就。此外还有大功率负氢离子源、表面吸附铯层的各类溅射型负离子源、高电荷态的电子束源和电子回旋共振源、超大功率短脉冲离子源、极化离子源、毫米束离子注入机用离子源、高亮度微米束机用离子源(如场电离源)、大面积厘米束机用强流源和全元素金属离子源等。

以上等离子体技术四大发展方向皆以等离子体物理为理论基础,不仅具有各自的特色,又相互耦合、影响和促进,逐步形成了体现人类科技发展水平的高新技术产业。本世纪60年代后,等离子体技术在能源、信息、材料、化工、物理医学、军工、航天等领域越来越显示其强大的竞争力。经过近20年来的发展终于形成了渗透于国民经济各部门,应用于科研和生产,领先于其它产业发展技术水平的一个新兴工业——等离子体工业。

二、等离子体工业的振兴

70年代后,等离子体工业已成为主要发达国家经济框架的一部分,在发展中国家也由于其所显示的工业化工艺的重要性而受到科研和商业的重视。

等离子体技术四个方向的拓展形成的等离子体工业的四大分支,是等离子体工业崛起的主要标志。

其一,对近代能源工业有着革命性影响的聚变堆工程,代表着高温等离子体工业进步的程度。约从1950年开始,美国及其它工业化国家投资了几十亿美元开展高温等离子体工程工业化的研究。美国的普林斯顿大学于1993年12月9~10日在托卡马克(TFTR)装置(见封三图)上连续创世界纪录,能量达到10兆瓦,足以供应约3000户家庭的用电。

1994年11月2日该实验室又产生了功率达10.7兆瓦的纯聚变。到下世纪30年代,第一个用于发电的商用聚变反应堆可开始运转。由日、美、俄、欧共体联合进行的国际热核反应堆,预计在1996年完成工程设计任务,2005年竣工。

核聚变能是理想的新能源,聚变堆工程的研究还开拓了一大批高科技领域,如包层工程、屏蔽与密封技术、超导磁体技术、反应堆动力学与控制、裂变—聚变混合堆技术等。这不仅推动了高温等离子体物理学的发展,也显示出高温等离子体工程在等离子体工业中的重要地位。

其二,以电弧热等离子体技术为鲜明特征的工业化工程应用。从50年代的等离子体炬在机械工程中的热加工,如切割、焊接、喷涂到60年代的大功率、长寿命的等离子体发生器,用于直接制备各种难熔金属、金属陶瓷的粉末和超细粉末,以及70年代热等离子体在工程加热、冶金、煤的气化、同位素分离等技术上的应用,都给予了热等离子体技术新的发展推动力。而近年来发展更快,出现了多种等离子体炉、反应器以及新的冶炼及加工方法。主要包括萃取、化学合成、新材料制备、核废料处理等等。总之,随着热等离子体工艺应用领域的不断扩大,以及热等离子体物理过程和热等离子体发生器结构研究的不断发展,热等离子体的工业应用成为等离子体工业不可缺少的组成部分。

磁流体发电也属热等离子体工程方面的一个发展方向,但由于其在解决能源危机方面的前景远无受控核聚变乐观,故许多国家已先后主要着力于聚变堆工程的研究,而将磁流体发动机(也称等离子体发动机)原理应用于宇航、军工方面。

其三是,以微细加工、化学合成、表面处理、新材料制备等为主要应用领域的冷等离子体工程体系是等离子体工业的支柱产业。仅就微电子业来说,大规模集成电路和光电子集成器件要求器件及电路微细化和高密度化的指标是:1989年,其数目与芯片之比大于1.05兆,线刻距0.8微米(VLSI);1998年,数目与芯片之比大于16.8兆,线刻距0.5微米(GSI)。而在刻蚀过程中,一般的传统湿法工艺根本不能保证小于1微米的精细图形转移,而且也不利于推行大规模的自动化工业生产。而等离子体工艺使图形线宽已提高到了亚微米数量级和深亚微米数量级,成为主要的加工手段。目前,以等离子体技术为核心的微电子行业在世界各国市场占有率如表1所示。

除微电子业外,冷等离子体工业化工程还涉及以下各方面:

1. 等离子体合成。等离子体可使无机及有机化合物进行各种反应,形成相应的大分子化合物的混合物;由氢或挥发性、氟碳、氟氮化合物等生成相应

的离子分子化合物等等。

表 1

年份	总产值(亿美元)	美国	日本	欧洲	其它
1985	3 000	68%	26%	3%	3%
1989	6 360	60%	37%	2%	1%
1990	7 500	—	—	—	—
1993	10 000	52%	45%	2%	1%

2. 表面改性。用等离子体对金属或非金属材料进行处理以后,可以改变材料或部件的耐磨性、湿润性、粘附性等。

3. 等离子体聚合与功能材料。利用放电等离子体把有机类气态单体等离子体化,产生各类活性种,再由这些活性种之间或活性种与单体间进行反应而形成新特征的聚合膜,因而成为研制功能高分子材料的一种有效的途径。用这种方法制备的导电高分子膜在电子器件、传感器上应用很广。集成光路是现代研究的一个新的发展方向,用等离子体沉积膜可作为光学元件之间的连接,也可用于制备光刻胶膜、渗透膜、分离膜、波导薄膜及生物医学材料等。多年来,沉积金刚石膜及高临界温度超导体膜也是重要的内容之一。

4. 灰化、去毒等其它应用。可用等离子体将生物体变成灰,剩下矿物质。从血液中回收示踪物质也用这种方法。有机磷除虫剂等有毒物,经等离子体分解变为无毒。美国麻省理工学院已研制出“等离子体解剖刀”,它可将四氯化碳变成 CO₂ 和盐,该方法比焚化法节能 10~100 倍。

其四,等离子体离子源的工业化应用。近年来,随着对离子源物理机制的深入探讨,离子源已得到了迅速的发展。微波多极等离子体源、层状离子束等离子体源、ECR 等离子体负离子源、等离子体化工中的等离子体粒子源、谱仪研究中的等离子体中子源、软 X 射线源、航天中用的高马赫数风洞等离子体源等各类等离子体源的开发、加工、生产与应用都已走向实用化。

三、等离子体工业的发展与我们的战略

等离子体工业是新兴的高新技术产业,它涉及新能源、新工艺、新材料、环保、国防、生物医学以及其它领域。

等离子体工业是等离子体技术与其他技术相结合、衍变、发展的产物,其基础也是等离子体基本理论与其他学科基本理论相结合、作用的产物。例如,高温等离子体工程的基础是等离子体物理和核物理、反应堆技术;热等离子体加工的基础是弧等离子体物理和热物理;冷等离子体应用的基础是等离子体化学和材料物理;等离子体源的基础是气

体放电和带电粒子束光学等。

等离子体工业的发展是在空间技术与受控核聚变研究的推动下进行的,形成了以高温等离子体技术为龙头,低温等离子体技术包括热等离子体技术和冷等离子体技术为基础,等离子体粒子源技术为重要内容的新型科研与应用一体化的新领域。在该领域中,以等离子体化学为理论基础的,主要涉及低温等离子体技术的等离子体化工不仅克服了高温等离子体工程投资大、周期长的缺陷,而且具有功能化、干式化、微细化、省资源、省能源和适于大规模自动化生产等诸多优势,能为材料合成、制膜技术、表面处理和精细加工提供崭新的技术手段,从而超越了其它等离子体技术应用的范围,广泛地在化学化工、高分子材料及微电子工艺等领域开辟了许多新的研究方向,取得了诸多瞩目的应用成果。不仅如此,该领域正处于蓬勃发展时期,仍在开拓着各种新的应用市场。可以说,作为等离子体工业中重要的技术领域,等离子体化工的发展充满着机遇和挑战。

高温等离子体工程中聚变过程粒子和能量反常输运的机理、托卡马克高温稳态的运行、聚变增殖和裂变燃烧共生发电系统的完善等等,一直是十分艰巨的任务。近年来,在等离子体稳定性、边界区物理和杂质控制、辅助加热、非感应电流驱动等实验和理论研究中均取得了重要进展。惯性约束聚变异军突起,目前各国都在积极进行靶物理研究,美日均争取在 2000 年以前进行实验室点火和低增益演示。靶物理研究中突出要解决的问题是激光等离子体物理和内爆动力学。前者由于强激光与等离子体相互作用的复杂过程,表现出很强的非线性特征;后者则体现的是 DT 靶在内爆压缩下来不及飞散的极短时间内充分燃烧的热动力学机制。

低温等离子体技术,包括热等离子体和冷等离子体的技术除在传统的焊接、切割、照明、冶金、材料、化工、磁流体发电等领域扩展其应用外,又在镀膜、微细加工、功能材料、表面改性等新技术领域显示其独特的优越性,创造了极大的经济效益,并同时在臭氧制造、核废料和有毒物质处理等环境保护方面也取得重大进展。但无论是燃烧等离子体,局域热力学平衡的热等离子体还是热力学非平衡的冷等离子体,突出要解决的是工业应用中机理不清、产品质量不稳、工作效率偏低等缺陷。目前,美国麻省理工学院的研制人员已开发出安全、廉价、有效的等离子体处理有毒的废料系统,并可望于 1995 年通过最后鉴定。为进一步开展科研开发工作,美国正拟建等离子体材料工程中心。世界最大的化工公司——杜邦公司也涉足了等离子体处理技术范围,用冷等离子体加工材料表层。

在等离子体离子源技术领域,各工业的应用对

离子源不断提出的新的要求一直是激励这种技术不断发展的根本动力。而许多相关的基础学科和工程技术的新成果又经常成为等离子体离子源研究中许多新思想、新方案的来源。根据其它产业发展的要求,等离子体源领域正在与其他三大等离子体技术发展领域,尤其是冷等离子体技术应用领域溶合,从等离子体物理参数对加工产品的影响入手,进行高效率、高密度等离子体源的研制。这方面美日西欧间的竞争尤为激烈。在性能价格比的竞争中,美国厂商 LAM 和 AM 在 80 年代末开始进行了等离子体源的研究工作,并已于 90 年代初推出了高密度的感应耦合等离子体刻蚀机。目前国际上正在将离子推进宇航技术中的宽束考夫曼等离子体源技术与高效、高密度等离子体源技术结合为一体,积极开发新一代多功能、集成化等离子体源。

在我国,科学院力学所正在研制高密度 TCP 感应耦合等离子体源,可望一二年内制造出样机。电子部也拟投资百万开发等离子体加工技术,现已列入“九五”规划。我国电工学科高电压技术专业的奠基人——清华大学电机系杨津基教授在跟踪国际等离子体工业发展水平过程中,1987 年最早提出了可控等离子体工艺的思想,并根据我国等离子体工业发展速度和应用背景建立了具有国际先进水平的等离子体化工实验设备(见封底图 4)。以杨津基教授为核心的课题组不仅在等离子体化学理论方面取得了进展,而且在可控等离子体技术上获得了突破。以杨津基教授为首的另外两个课题组正全力研制等离子体中子/X 射线源,并已取得了微细加工的初步成果。

在热核聚变方面,我国超导托卡马克装置于 1993 年 10 月上旬通过国际评估。液态金属实验回路于 1993 年 11 月 12 日研制成功,使我国成为世界上少数几个拥有这一装置的国家之一。在高温等离子体其它方面的研究有:36 千焦、200 千焦等离子体焦点装置(见封底图 1、图 2),等离子体的运动及参数测量(见封底图 5),X 射线发射理论和 MC-PIC 新模型;喷气 Z 箍缩装置(见封底图 3),等离子体层的运动、气体密度分布对 X 射线产生的影响等等。在 X 射线及等离子体运动研究方面和国外水平相当,在中子及离子束、电子束方面尚研究不够。

●热等离子体方面,磁流体发电研究列入了国家“863 计划”;电弧等离子体技术方面,我国正在进行钛白和氧化锡的生产,其中钛白年产量达 3 000 吨;SiC、BN 等材料加工及高温喷涂等技术也在研究之中。但总体水平不高、规模较小、应用范围不广,设备功率也尚待提高。

尽管也有许多单位在进行冷等离子体的研究,如金刚石膜的沉积、介质膜的聚合、aC/H 膜沉积、表面处理、高分子材料的粘接等,但大多尚处于初

步阶段。

在等离子体离子源技术方面,原子能研究所、北京师大、清华大学无线电系等单位进行了脉冲高频离子源、高频型溅射离子源、ECR 微波离子源的研究。特别是清华大学无线电系,从 1982 年着手这方面的研究以来,已研制出用于薄膜淀积和刻蚀工艺研究的 ECR 设备,但投入实际应用尚有相当的距离。

可喜的是,亚洲第一家等离子体工业公司——北京钛金公司于 1985 年成立,科工贸一体化的高新技术公司——北京宇太等离子体科贸公司也于 1993 年成立。这标志着我国等离子体工业已步入正规。

近十年来,我国等离子体技术侧重于聚变技术和低温等离子体技术的研究,而忽视基础等离子体技术的研究。为了迎接新的技术革命,并在 21 世纪在高新产业发展方面具有竞争实力,就必须清醒地看到我国等离子体技术发展水平与国际间的差距,以及基础研究中存在的一些严重的问题,如布局不合理,发展不协调;科研队伍的知识、年龄结构不合理;等离子体技术开发队伍的人才缺乏;一哄而起,重复设立初级装置,造成财力、物力浪费等等。

因此,笔者建议:

1. 在高温等离子体工程方面,本着磁约束与惯性约束并重的原则,密切跟踪国际发展趋势,在某些前沿课题保证深入开展物理实验,在基本物理过程的研究方面下功夫,不与国外在投资、商用发电方面争上下,以充分发挥自己的长处。

2. 在各高校、部委加强等离子体工业化工程应用基础研究的同时,重点注意解决低温等离子体工程技术应用中的问题,加强这方面诊断工作是当务之急。

3. 等离子体源技术应用要着重于与低温等离子体技术结合,重点开发与我国微电子行业密切相关的高效率、高密度等离子体源和有广泛应用背景的其它等离子体粒子源。

4. 应优先发展低温等离子体技术,以应用研究已进入了国际水平的清华大学和中国科学院为核心,建立国内等离子体工程开发机构。

5. 重点发展、扶持具有市场应用前景的专项课题,并取得有关产业部门的支持,共同开发低温等离子体技术应用领域,而在高温等离子体技术方面则保持现有规模与发展速度。

可以预计,只要我们实事求是地认真评估我国等离子体技术的现状并制订相应的发展战略,调整好等离子体工业各分支的发展方向并时刻掌握国际等离子体工业的发展动态,我国的等离子工业就必然会迅速发展。

(责任编辑 肖庆山)