

于 U' , 设备有效地得到了保护。等负载线 II 和 III, 在氧化锌压敏电阻器上被抑制的过电压均小于 U' , 设备有效地得到了保护, 而在碳化硅压敏电阻上被抑制的过电压却大于 U' , 设备无法得到保护。

2. 应用范围

(1) 目前已做成 500 千伏以下的各类避雷器, 可对电力系统大气过电压和操作过电压有效地进行保护;

(2) 电视和各类电子设备;

(3) 铁路、城市交通和航海的信号装置的过电压保护;

(4) 各类强发送装置中的高压硅堆和阻流圈的过压保护;

(5) 继电器触点火花的消除, 真空开关动作过程中火花的消除等, 并可延长继电器、真空开关的寿命;

(6) 可做超导设备在失去超导电性时的移能装置;

(7) 可消除由于摩擦而引起的静电高压问题。

参 考 文 献

[1] 刘鸿运, 无线电技术, 1974 年, 第 4 期, 第 20 页。

- [2] 电子工业技术词典编辑委员会, 电子工业技术词典(电阻、电容与电感部分), 国防工业出版社(1977), 6-35.
- [3] H. R. Philipp et al., *J. Appl. Phys.*, **48-4**(1977), 1921.
- [4] J. J. Wong, *Appl. Phys.*, **46-4**(1975), 1953.
- [5] K. G. Mchay, *Phys. Rev.*, **94**(1954), 877.
- [6] M. Matsuoka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **10** (1971), 736.
- [7] J. D. Levine, *Crit. Rev. Solid State Sci.*, **5**(1975), 391.
- [8] H. R. Philipp et al., *J. Appl. Phys.*, **46-7**(1976), 3207.
- [9] W. G. Morris, *J. Vac. Sci. Technology*, **13** (1976), 926.
- [10] B. B. 帕塞科夫等著, 非线性半导体电阻及其应用(1962年版的中文译本), 国防工业出版社, (1964).
- [11] 管他秀三 他, *東芝レビュー*, **6-6**(1951), 75.
- [12] 増山勇, *エレクトロニク、ヤマックス*, **4(通巻29)**-11 (1973), 64.
- [13] J. D. Harnden et al., *Electronics*, **45-21** (1972), 91.
- [14] 永田春一 他, *明電時報*, **6(通巻119)**(1974), 57.
- [15] 松岡雄道, *電子材料*, **16-2**(1977), 57.
- [16] 松岡雄道, *エレクトロニク、ヤマックス*, 夏号, **6(通巻40)**-7(1975), 16.

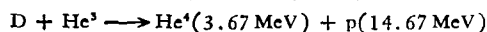
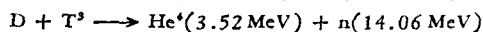
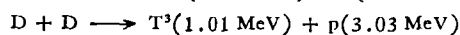
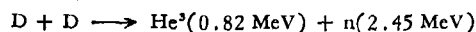
受控聚变研究中的表面物理问题

王 龙

(中国科学院物理研究所)

一、受控聚变研究的目标

在目前阶段, 受控聚变研究的目标是在反应堆中实现原子核的聚变反应并得到能量输出。这种反应的主要反应式是



在以上各式中, 括号中的量表示反应产生粒子携带的能量, 单位为 MeV。

由于在常温下, 这一反应的截面太小, 一般认为, 这一反应应在五百万到一千万度以上的高温下进行。这时的反应物质处于等离子体态, 反应称为热核反应。

因此, 为实现受控热核反应, 须把反应物约束在一

定的实验装置内, 并且使它达到一定的密度, 加热到一定的温度。这个条件可用反应离子密度 n , 离子温度 T_i 和离子的能量约束时间 τ 来表示。若只考虑韧致辐射的能量损失, 并假设一定的能量转换效率, 就得到正能量输出的条件, 又称点火条件。

对于 D-D 反应, 这一临界条件为

$$T_i \sim 100 \text{ keV}, \quad n\tau \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{sec}.$$

对于 D-T 反应

$$T_i \sim 6 \text{ keV}, \quad n\tau \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{sec}.$$

以上条件一般称为劳逊(Lawson)条件。

二、杂质的影响和来源

以上是非常理想的点火条件, 实际上由于杂质的存在, 使这条件大大提高了。

等离子体中的非反应物均称为杂质。杂质对实现热核反应有以下影响:

1. 增加辐射能量损失。在等离子体中, 韧致辐射的能量损失正比于离子电荷平方。如果存在几种不同的离子, 这一损失正比于 $T_e^{-\frac{1}{2}} n_e \sum_i n_i Z_i^2$ 。其中 T_e 、 n_e 、

n_i 分别为电子温度、电子密度和离子密度; Z_i 在较高温度下可理解为核电荷数。因此, 当系统内的杂质离子, 尤其是重杂质离子增加时, 韧致辐射急剧增加。

但在受控装置中的等离子体条件下, 很多金属杂质的离子是不完全剥离的, 轨道电子的存在产生强烈的复合辐射和线辐射。复合辐射的能量损失正比于 $T_e^{-\frac{1}{2}} n_e \sum_i n_i Z_i^2$ 。因此, 杂质存在时, 这些辐射损失增加得更多。

另外, 杂质离子在达到稳态前, 就已经辐射了一大部分能量。例如, 一个碳原子进入 $T_e = 100\text{eV}$ 的等离子体后, 以线辐射形式辐射了约 2.6keV 的能量后才进入稳态。若再考虑离化损失, 总共约使四十个电子冷却^[1]。

2. 降低反应粒子密度。杂质的存在使反应粒子(氘、氚离子)密度降低, 因而使反应率降低。由于杂质原子贡献了多个电子, 所以当电子密度一定时, 这个影响是很可观的。

3. 在托卡马克型装置中, 存在着最大的电子密度 n_{ec} , 称为临界密度。当 $n_e > n_{ec}$ 时, 发生破裂不稳定性, 妨碍密度进一步提高。在系统真空条件变坏时, n_{ec} 值降低。因此认为这一不稳定性与杂质有关。

此外, 杂质的存在还增加粒子输运, 因而增加能量损失。总的来说, 杂质的存在对于实现受控聚变研究的目标来说, 是非常不利的。

图 1^[2] 表示对于不同核电荷数的杂质能达到点火的临界浓度。其中假设了辐射损失等于反应生成的 α 粒子能量之半。 $Z_{\text{eff}} = \sum_i n_i Z_i^2 / n_e$, 称为有效电荷数。

图中的 Z_{eff} 值相当于杂质浓度达到临界浓度一半时的值。

从图 1 可看出, 为了达到点火, 轻杂质如碳和氧应在百分之几以下, 重杂质如铁、镍、钨应在百分之一以下, 而象钨这样的杂质只能有千分之一。有效电荷数 Z_{eff} 必须低于 10。

以托卡马克型装置为例, 目前杂质所达到的水平大致相当于上述大小。在温度进一步提高, 脉冲时间进一步延长时, 杂质问题会更为严重。

这些杂质来自真空本底、充进的工作气体中的杂质、抽气系统返流和真空室表面。很容易控制前几个因素使杂质远远小于现有的水平, 杂质的主要来源是真空室表面。

在 DITE 装置上曾进行同位素实验^[3]。即在多次用氩作工作气体运行后, 充进氖作工作气体, 在放电时

测量 H_α 和 D_α 谱线强度的变化。实验结果表明, 在达到平衡后, 氖离子仅占离子密度的 22%。也就是说, 绝大部分工作气体来自真空室表面。

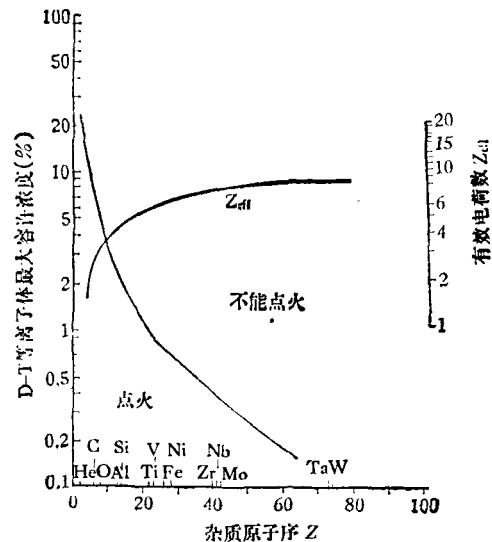


图 1 D-T 等离子体中杂质最大容许浓度及有效电荷数

这是因为, 等离子体内的粒子约束时间比等离子体存在时间短得多, 这些粒子通过横越磁场的扩散或通过电荷交换成为中性粒子脱离约束而到达真空室壁。另一方面, 在来自等离子体的辐射和粒子流作用下, 从真空室壁不断释放出粒子进入等离子体。这种频繁的粒子交换(气体循环)过程把大量杂质带进了等离子体。

因此, 受控聚变研究中的表面问题主要就是等离子体和壁的相互作用问题。

三、基本表面过程

在聚变堆中, 受等离子体直接照射的反应室表面称为第一壁。第一壁受到来自等离子体的粒子和辐射的强烈作用。以 D-T 反应为例, 这些粒子和辐射可分为四类:

1. 带电粒子, 即 D^+ , T^+ , He^{++} , e 和杂质离子。其中的氦离子即 α 粒子, 能量为 3.5MeV ; 其余几种粒子能量相当于等离子体的温度, 从几 keV 到几十 keV。这样一些粒子通过横越磁场的扩散或通过损失锥到达壁上。

2. 中性粒子, 即 D^0 , T^0 , He^0 和杂质原子。由于电荷交换产生的高能中性粒子不受磁场约束而到达壁上, 其能谱基本上相当于等离子体内带电粒子的能量分布。

3. 中子。D-T 反应中子能量为 14MeV , 由于反应前有一定动能, 中子能量有一定分布。

4. 光子。有以下产生光子的机构:

韧致辐射,主要是电子与离子碰撞时发出的辐射。温度高时它是辐射能量损失的主要机构。

复合辐射和线辐射。在高温等离子体中是由杂质发出的。

以上三种辐射都处于紫外—X 射线波段。韧致辐射和复合辐射都是连续谱。

回旋辐射,是带电粒子在磁场中的辐射,是线状谱,频率与装置的磁场强弱有关,一般在微波波段。

在以上四种粒子和射线照射下,在热核装置的第一壁上发生以下基本过程:

1. 吸附和解吸

热核装置中器壁对工作气体的吸附非常强烈。这是由于: 1) 放电时的吸附作用是活化的器壁对于离子和激发态原子的化学吸附,这种活化可维持到放电后几十秒钟; 2) 由于氢气向器壁内扩散而被吸收; 3) 放电破坏了保护性氧化膜并镀上了一层新鲜的金属膜。

除了由于器壁接收能量而温度上升产生热解吸外,放电时还发生电子解吸和光解吸。

2. 蒸发

器壁材料受热而蒸发,一方面污染了等离子体,另一方面可能使器壁腐蚀而不能使用。

在目前的装置中,只有当等离子体发出的能量在时间或空间不均匀分布时,才有严重的蒸发,亦即发生于存在不稳定性时或隔板内侧。在聚变堆中,这样的固体隔板是不容许的。

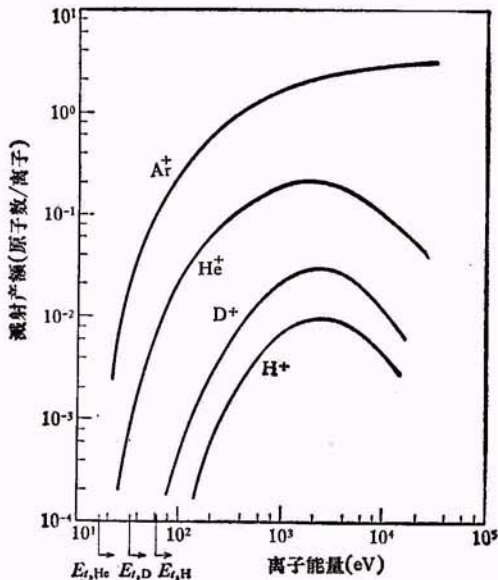


图2 室温下不锈钢的溅射产额和阈值能量

3. 溅射

溅射是与蒸发完全不同的过程。在离子或中性粒子入射到表面时,它的一部分能量传给少数靶原子,其中有些在晶格达到热平衡之前发射出去。这就是溅射。溅射是阈值性的,即当入射粒子的能量大于某一阈值(通常为5—50 eV)时,才出现溅射。

溅射产额基本上随着入射粒子质量的增加而增加,至于与入射粒子能量的关系,在 10^3 — 10^4 eV处,即聚变堆运行区域,有一个极大值(图2^[4])。

聚变堆中的溅射还有一个特殊问题,就是快中子的溅射。在D-T反应产生的14 MeV中子轰击下,溅射产额为 10^{-2} — 10^{-3} ^[5]。此外,还得到所谓“大块”溅射,即溅射出线度为微米的颗粒,其等效溅射产额可达0.25^[6]。

预计在受控聚变装置进一步发展,运行温度进一步提高时,溅射会成为十分严重的问题。

4. 化学溅射

发生在聚变堆第一壁上的化学过程主要是由于表面催化作用,在表面进行化学反应生成挥发性产物而释放。这个过程称为化学溅射。

例如,在 H^+ 离子轰击表面时,原子态的氢和表面的游离碳或有机污染物中的碳反应而生成甲烷及其它碳氢化物。甲烷挥发而成为主要残余气体之一。

5. 背散射和再发射

当气体离子入射到固体内以后,它与固体内原子进行碰撞,逐渐失去原来的能量。最后可能产生两种结果:或者还残留一部分能量,从固体表面发射出去,这就是背散射;或者与固体原子达到热平衡,逐渐扩散到表面,再发射出去,这就是再发射。

6. 起泡

当具有一定能量(> 1 keV)的较轻的离子轰击固体表面时,有一些离子就在离表面一定深度的地方停

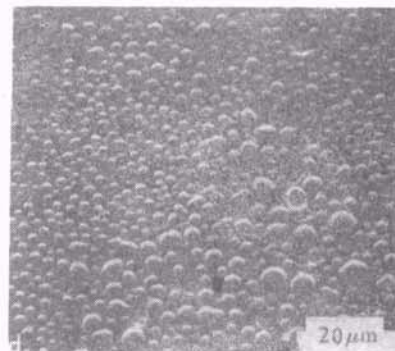


图3^[4] 40keV 氩离子在钨表面产生起泡

留下来,并逐渐积累。如果入射粒子达某一临界剂量,就在表面形成气泡,并逐渐增大,直到气泡内气压充分高,使气泡破裂(图3)。

起泡主要与气体在固体中的扩散率和溶解率有关。氢和氦离子仅在某些情况下起泡,而且这些泡小而稀。氦由于扩散率很低($10^{-19}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$,而氦为 $10^{-4}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$),几乎在所有材料中引起起泡。热核反应产生的高能氦离子在第一壁引起的起泡是个严重的问题。

泡的直径可从 $0.1\mu\text{m}$ 到 $10^3\mu\text{m}$,随入射离子能量增加而增加。泡的密度随入射剂量增加而增加。

起泡与靶的温度有很大关系。起泡腐蚀率在某一温度有一峰值。例如用 He^+ 离子轰击不锈钢时,在 450°C 处达到峰值^[7]。

当温度进一步提高时,会使表面结构进一步改变。如在 $800\text{--}1400^\circ\text{C}$ 靶温下用 He^+ 轰击铌,结果并未起泡而产生海绵状结构(图4^[8])。

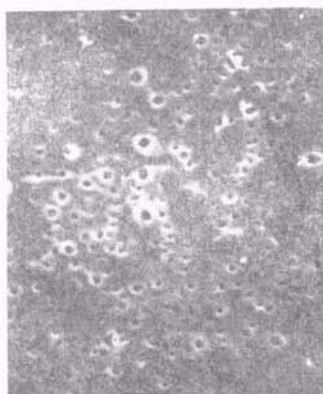


图4^[8] 1200°C 2×10^{18} He^+ 离子轰击高温铌表面产生海绵状结构

7. 起弧

受控聚变装置的起弧分为两类,即功率弧和单极弧。

功率弧发生在表面和表面之间。凡是中间绝缘的两部分表面之间有电位差时,都可发生功率弧。它的能量直接来自外加电场。

为了使电压能加到环形真空室内,金属的真空室经常加上绝缘段。如果绝缘段两侧电压超过击穿电压,便会造成功率弧,使绝缘段击穿,并造成等离子体污染。

单极弧发生在等离子体和表面之间,它的能量来自等离子体的热能。单极弧的成因如下:

在等离子体边缘,存在着对壁呈正电位的“等离子体鞘”。在这一电位作用下,如果壁上有一点发射电子,就会击穿而形成弧。弧的形成降低了等离子体与壁之间的电位降,因此电子又从其它部位等离子体流回壁上。壁又作为正极,又作为负极,故称“单极弧”

物理

(图5)。

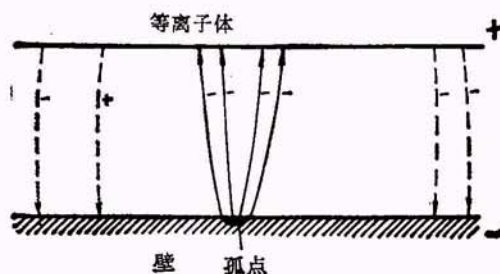


图5 单极弧的形成

在单极弧的弧点上,大量金属受热蒸发,严重地污染了等离子体。这种弧的电流密度为 $10^5\text{--}10^7\text{A}/\text{cm}^2$,每个库仑可蒸发 10^8 个原子,相当于每个电子蒸发0.2个原子^[9]。

弧点的形成可能与真空室壁的污染有关,壁上的油膜形成了一个小绝缘区,电荷在其上积累,与等离子体击穿,形成电弧。

在目前的受控聚变装置上,单极弧可能是重杂质的主要来源之一^[10]。

以上基本表面过程及相应的粒子循环在图6表示出来,其中 e^- 、 γ 、 n 分别表示电子、光子、中子,脚标 c 、 b 分别表示慢和快中性粒子,H表示氢同位素。

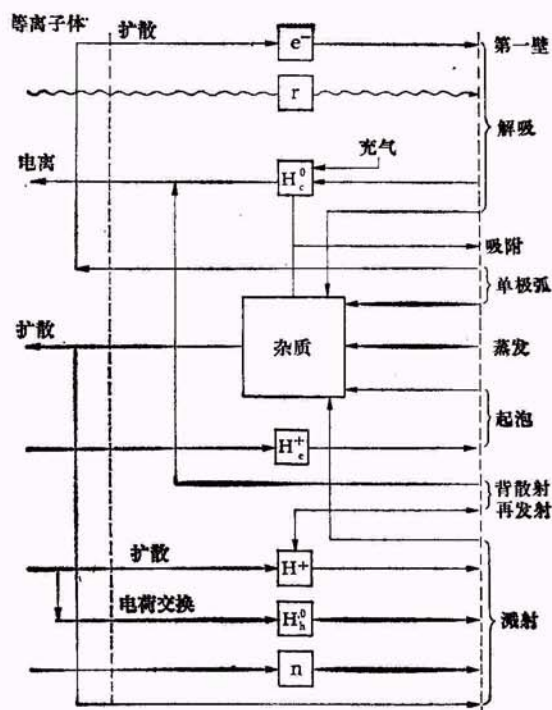


图6 基本表面过程和粒子循环

四、等离子体和壁相互作用的研究

近年来,越来越多的工作集中在这个领域,主要可分为以下几个方面:

1. 基本表面过程的研究

上述基本过程中的一些现象,例如溅射,已经知道了一个世纪。但对于这些过程的理解和积累的数据远远不够。这是因为在初期的研究中缺乏清洁的表面,以致因污染而使数据不准。另一方面,受控聚变研究所需的数据集中在几个 eV 到几千 eV 的低能区域,这样的粒子束难于产生和精确测量。近年来,由于超高真空技术的发展,特别是由于各种表面分析仪器以及扫描电子显微镜、微量真空天平实验手段的发展,这方面的实验工作正在大量进行。另外,对于溅射、起泡等过程的理论模型正陆续提出并臻于完善。

2. 边界层的研究

目前在托卡马克的研究中,都是采用隔板来限制等离子体的位置并使之不与器壁接触。由于磁场的约束,高温等离子体只能存在于隔板内孔之内,隔板所挡住的区域称为隔板阴影区(图7)。

在 TFR 装置上的研究^[11]表明,存在着这样的一个边界层或刮削层(scrape-off layer),由低密度、低温等离子体构成。若其宽度小于阴影区的宽度,隔板将在放电中起主要作用。

边界层在等离子体与壁相互作用中起着重要的作用,因为它的状态决定了高温等离子体的边界条件。另一方面,它又与壁接近,一些重要的表面过程如单极弧,和边界层的性质有很大关系,而从表面释放的粒子,又在边界层中电离、扩散,并因温度较低,经历了各种原子-分子过程。

因此,边界层的研究普遍受到重视,除建立适当的

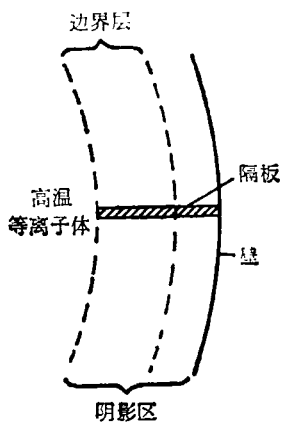


图7 阴影区和边界层

模型外,还集中于发展适用的诊断方法。

3. 装置上的表面研究

在许多受控聚变研究装置上,都广泛采用光谱、质谱、辐射量热计、解吸探针,并采用不同形式的隔板,注入各种杂质等方法,对表面过程、杂质输运以及清洗方法进行研究。

近年来,由于表面分析仪器的的发展,出现了把这些仪器直接装于装置上进行对表面的直接监测。

图8是装于 PLT 装置上的“表面分析站”^[12]。要分析的样品是一条薄不锈钢圈,安装在一个绝缘导轨上,一端伸进真空室。它可在放电时移动,时间分辨率为 30ms。它的另一端伸进分析室,可以进行俄歇电子谱、二次离子谱以及电子解吸的测量。这种直接监测可以观察不同放电阶段粒子的沉积以及表面成分随放电次数增加的变化。

最近,开始建造一些专门用来作表面研究的装置。这些装置的真空室易于拆卸、更换,配备必要的诊断设备对边界层和表面进行研究。

4. 杂质在等离子体内的输运

输运理论证明,有较大电荷的杂质离子趋于向等离子体中心扩散。这一点已为实验所证实。杂质在扩散过程中逐步电离。由于轻杂质在中心几乎全部剥离,所以轻杂质主要冷却等离子体的边缘。而集中在中心的未完全剥离的重杂质离子则主要冷却等离子体中心。

杂质在等离子体内的输运和能量平衡不仅影响等离子体的性质,而且反过来影响等离子体和壁的相互作用。这使得各类杂质的产生不是独立的。

五、等离子体和壁相互作用的控制

上述等离子体和壁相互作用的研究的目的是寻找

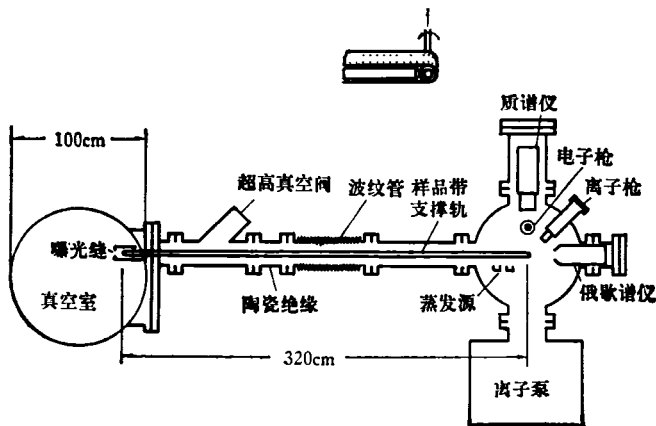


图8 PLT 装置上的表面分析站

一种在堆条件下行之有效的控制等离子体和壁相互作用的方法。可能采用的方法主要有以下几种:

1. 真空系统的改进

在受控聚变研究的早期,所采用的是一般的高真空系统。在这样的装置中,杂质辐射引起的能量损失是主要的。后来改用可烘烤的全金属真空室和无油超高真空抽气系统,使杂质辐射引起的能量损失降低很多。在 TFR 装置上的研究^[13]表明,进一步提高真空仍可改进等离子体的约束。

2. 放电清洗

放电本身是清除壁污染的有效方法。为得到重复性的稳定放电,一般需要几千次放电清洗。图 9^[14]为 JFT-2 装置电子温度随放电清洗次数增加而提高的关系。

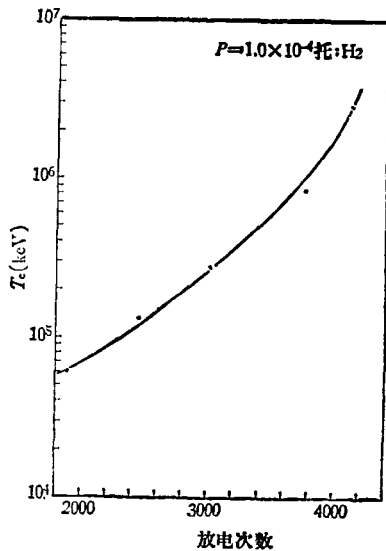


图 9 电子温度随放电清洗次数的变化

这种放电清洗可采用正常的放电条件,但一般采用低的约束磁场以增加等离子体和壁的相互作用。也可采用不同频率的高频或低频放电或辉光放电。

质谱测量说明放电时释放出的杂质主要有碳氢化物、 H_2O 、 CO 、 CO_2 等^[12, 14, 15]。放电时这些化合物进入等离子体通道,被分解、电离。放电结束后,仅有一部分被泵抽走,其余仍吸附于壁上。最近证明^[16],低温 ($T_e \approx 3$ eV) 放电可使氧杂质的吸附水平低于 1% 单原子复层,而高温放电时由于 H_2O 键的破裂和放电后清洁表面对水的吸附,表面的氧难于清除。

3. 蒸发活性金属

在 ATC 装置上,在放电间隔期间在部分真空室表面镀上一层新鲜的钛膜来吸附气体^[17]。这样的处理

可使等离子体与壁之间的气体循环减少很多,从而使 Z_{eff} 从 5 降到接近 1。

在 DITE 装置上,用蒸发钛的方法来减少轻杂质的污染,因而达到了高密度放电,使临界密度和能量约束时间都增加到两倍以上^[18]。

4. 偏滤器

偏滤器是这样一种装置,它用磁场来限制等离子体的位置。在附加线圈的电流磁场作用下,在某一磁分界面外的磁力线不是闭合的,而是把等离子体引到一个偏滤室,带电粒子在此被中性和抽走。

由于磁场位形的不同,偏滤器可分为环向偏滤器、极向偏滤器和束偏滤器(图 10)。

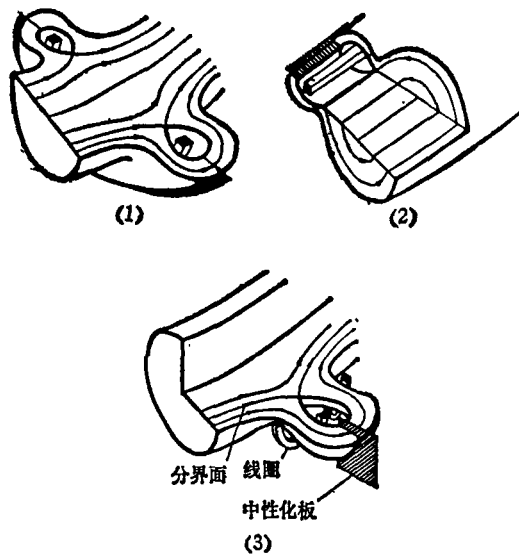


图 10 偏滤器的三种类型

(1) 环向偏滤器 (2) 极向偏滤器 (3) 束偏滤器

偏滤器可以起到以下几种作用: 1) 磁隔板。即用分界面限制等离子体,避免其直接与固体隔板接触。2) 从等离子体中扩散到刮削区(指分界面和第一壁之间区域)的带电粒子进入偏滤室,以避免对壁的轰击。3) 从壁上释放的杂质粒子在刮削区内被电离并被扫进偏滤室,以减少进入等离子体的杂质。

偏滤器已用于仿星器、悬浮器和托卡马克,并看到上述各种减少杂质的作用。

5. 冷气体包层

这层等离子体要充分的冷,使从中扩散出的粒子能量低于壁的溅射阈值;这层等离子体要充分的密,使其厚度大于从热等离子体核心中扩散出来的高能中性粒子的电荷交换自由程。这样的结构可减少中性粒子溅射,并使壁上释放的中性粒子在此区域电离,减少中心区域中性粒子密度。

等离子体和壁相互作用问题的研究,从受控聚变研究的初期就已开始,但作为一个独立的研究方向,只有几年的历史。近来,对这一课题投入了越来越多的工作。这是因为,从目前装置上的研究来看,杂质问题肯定是实现受控聚变的一个主要困难。

然而,从目前研究的进展来说,对这一过程的很多方面仍很不清楚。这是因为发生在表面及边界层的过程非常复杂,涉及等离子体物理、表面物理及等离子体化学等很多学科的问题。

目前的工作主要是:研究在堆的条件下的各种表面过程以取得必要的的数据,弄清各类杂质的主要来源,试用偏滤器并研究其对各种表面过程的影响,边界层的研究,发展必要的诊断手段,第一壁材料的选择等。

目前的工作尚停留于定性和半定量的阶段。如何发展定量的研究是一个重要的问题。

参 考 文 献

- [1] V. A. Vershkov & S. V. Mirnov, *Nucl. Fusion*, **14**(1974), 383.
- [2] R. Behrisch & B. B. Kadomtsev, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (Proc. 5th Int. Conf. Tokyo 1974), **2**(1974), 229.
- [3] A. Pospieszczyk, et al., in *Plasma Wall Interaction* (Proc. Int. Symp. Jülich, 1976), Pergamon Press 471.
- [4] H. Vorsefeld, et al., *J. Nucl. Mat.*, **63**(1976), 215.
- [5] L. H. Jenkins, et al., *J. Nucl. Mat.*, **63**(1976), 438.
- [6] M. Kaminsky, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 599.
- [7] S. K. Das & M. Kaminsky, *J. Nucl. Mat.*, **53**(1975), 115.
- [8] G. J. Thoma's & W. Bauer, *J. Nucl. Mat.*, **53**(1975), 134.
- [9] H. Miley, *J. Nucl. Mat.*, **63**(1976), 331.
- [10] G. M. McCracken & D. H. J. Goodall, *Nucl. Fusion*, **18**(1978), 537.
- [11] T. F. R. Group, in *Plasma Wall Interaction* Proc. Int. Symp. Jülich, 1976), Pergamon Press, 1.
- [12] H. F. Dylla & S. A. Cohen, *J. Nucl. Mat.*, **63**(1976), 487.
- [13] Z. Sledziewski, et al., Proc. 6th Int. Vac. Congress, (Tokyo 1974), 217.
- [14] N. Fujisawa, et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **13**(1974), 851.
- [15] T. F. R. Group, in *Plasma Wall Interaction* (Proc. Int. Symp. Jülich, 1976), Pergamon Press, 465.
- [16] L. Oeren & R. J. Taylor, *Nucl. Fusion*, **17**(1977), 1143.
- [17] P. E. Stott, et al., *Nucl. Fusion*, **15**(1975), 431.
- [18] P. E. Stott, et al., Culham Report CLM-P492 (1977), 21.

光 学 传 递 函 数

赵 达 尊

(北京工业学院光学教研室)

当我们看到一幅形象逼真、细节清晰、层次丰富的照片时,不禁要赞赏作者的摄影技巧。其实,这里除了技巧之外,照相机的质量也起着重要的作用。时常听说,“这架相机的质量挺高”。可是,对于照相机的设计和检验人员来说,单单用“高”、“低”这样笼统的评语是很不充分的。他们必须找到一种既能反映实际使用效果的好坏,又有严格科学依据的定量指标来评价一架照相机的质量。实际上,除了照相机之外,还有许多光学系统也是用来成象的,例如放映机和望远镜等等,它们也都存在成象质量的评价问题,即“象质评价”问题。

尽管在伽利略时代(十七世纪初)便有了望远镜,到十九世纪初叶又出现了带有透镜的照相机,并且对象质评价的研究也有了几乎同样悠久的历史;但是,历

来所提出的各种象质指标却并不令人满意。因为它们在不同程度上存在片面、主观或难以定量描述等缺陷。直到约三十年前,出现了光学传递函数,情况才有所变化。

1946年,法国 P. M. Duffieux 发表了一本著作,名为《傅里叶积分及其在光学中的应用》。该书以傅里叶变换为数学手段,从一个新的角度来理解光学系统的成象过程。同时自然地引进了光学传递函数作为象质指标。概括地说,该书把光学系统看作一个“信号传递系统”,被成象的景物(即物面上的光强分布)是这个系统的“输入”,而象面上的光强分布则是这个系统的“输出”。为了研究输出与输入的关系,他又提出了如下的成象观点:首先把物面光强分布分解成许多疏密不一,方向各异的余弦形光强分布(各个成分的大小