

文章编号: 1001—4322(2000) s1—0141—04

# 平面磁控阴极用于 PEPC 等离子体放电实验研究\*

郑奎兴, 鲁敬平, 张雄军, 郑建刚, 董云, 魏晓峰, 张小民

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 919-988 信箱 621900)

**摘要:** 平面磁控阴极用于大面积等离子体放电具有大幅降低放电电压和放电气压的优点, 是 PEPC 首选的放电途径。通过对不同尺寸、不同磁场强度和不同气压状态下放电实验研究表明: 在较宽的磁场强度范围内都可实现全口径的均匀等离子体放电, 电极几何尺寸的小量变化对放电均匀性的影响不大。给出了满足 300mm × 300mm 放电腔的放电参数。

**关键词:** 等离子体电极普克尔盒; 磁控阴极; 辉光放电

**中图分类号:** TN 520      **文献标识码:** A

等离子体电极普克尔盒(PEPC), 由于具有在薄晶体上实现大口径和任意形状的优点, 在即将建设的几大 ICF 驱动器中, 将被用作开关或隔离部件<sup>[1,2]</sup>, 是下一代巨型激光器的关键部件之一。

等离子体电极普克尔盒的关键技术之一是面积均匀等离子体的产生。利用分体钮扣阴极、条形电极、平面磁控管阴极和空心阴极技术都可以实现较大面积的等离子体放电。但比较而言, 平面磁控阴极技术具有大幅度降低放电电压和放电气压的优势, 较低的气压可以降低等离子体电阻率; 较低的电压可以减少阴极溅射、阴极加热以及降低等离子体两边的电势差, 对等离子体电极普克尔盒的工程实用具有明显的优势。平面磁控阴极通常在直流和射频放电中用作溅射源<sup>[3]</sup>。LLNL 首先将其成功用在 PEPC 中, 用在上 kA 的大电流放电在其它领域中尚未见报道。

本文介绍了跑道式平面磁控阴极的基本原理和结构, 给出了实验研究磁控阴极尺寸、磁场强度对放电均匀性的影响情况, 得到了满足 300mm × 300mm 口径均匀放电的磁控阴极参数。

## 1 磁控阴极基本结构及原理

磁控阴极为长条形, 由电极座、永久磁体和石墨覆盖层三部分组成。表面的石墨覆盖层主要是为了解决离子轰击产物对晶体的粘污问题, 溅射的碳分子或原子与工作气体中的氧发生反应, 生成二氧化碳或一氧化碳气体, 可以被系统状况机组及时的排出系统之外, LLNL 曾经系统的研究过使用石墨后的情况, 效果非常明显。磁场分布如图 1 所示, 采用平面跑道式结构, 磁体磁路未闭合的一端在阴极表面附近形成跑道式的磁场分布。在放电期间, 来自等离子体中的 He 离子由放电电势加速并轰击阴极, 通过辐射产生二次电子, 这些电子在阴极表面将受到封闭的磁场的约束, 根据  $f = e \times B$  可知, 只要改变磁场强度 B 及其空间分布就可以控制电子云分布, 从而在阴极面附近形成较高密度分布的电子云, 实现在较低气压和电压状态下的均匀辉光放电。

## 2 实验装置

我们建立了一套放电实验装置和诊断系统。放电装置包括口径为 390mm × 390mm × 70mm (高 × 宽 × 厚) 超高分子聚乙烯壳体放电腔, 一台等离子体脉冲发生器, 直流预电离电源, 真空抽气系统和工作气体配气系统几部分, 图 2 为其主体结构示意图。真空抽气系统的主抽泵为抽速 400L/s 的涡轮分子泵, 前级为抽速 4L/s 的机械泵, 在静态情况下 20min 系统可以达到极限真空, 放电腔内极限真空可达  $10^{-2}$  Pa 量级。放电时工作气体从放电腔顶部的一个接口进入, 在前端配有气压计和精密气体流量调节阀, 通过调节进入的气体流量来控制系统内的压强, 放电是在动平衡的情况下进行的。放电腔顶部另一接口用于

\* 收稿日期: 2000-09-06; 修订日期: 2000-11-15  
基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题  
作者简介: 郑奎兴(1966-), 男, 副研究员。

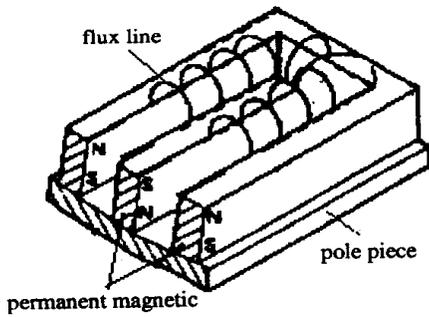


Fig. 1 The sketch of flux line

图 1 磁力线分布示意图

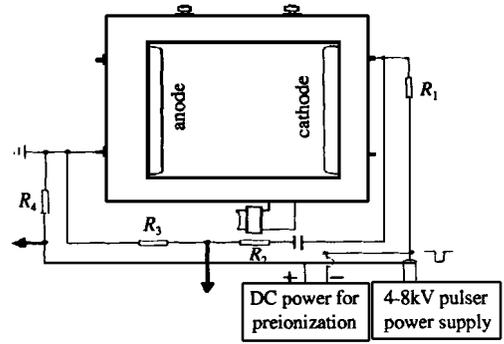


Fig. 2 Sketch map of discharge equipment

图 2 放电装置示意图

腔内压强测量, 真空测量采用了测量范围  $10^{-4} \sim 10^2 \text{ Pa}$  的 DJ-20 型宽量程电离规, 真空抽气接口位于放电腔的下方。等离子体脉冲发生器能够产生约  $20 \mu\text{s}$  脉宽的放电脉冲, 峰值电压  $4 \sim 8 \text{ kV}$  之间可以调节, 工作方式为单次和  $1 \text{ Hz}$  重复频率两种。在对精确度要求不是很高的情况下, 我们可以认为放电过程中局部区域的等离子体密度与该区域的发光强度有关, 光越强的地方等离子体密度就越高, 因此利用面阵 CCD 相机自动拍摄放电时光强的空间分布来研究等离子体分布的均匀性。实验时首先调节腔内气压和预电离电流到期望值, 然后同步触发测量系统, 由 Tek644 示波器和 CCD 成像系统分别记录电压- 电流波形和腔内放电状态, 电压和电流信号由接入回路的分流器和分压器提取。

实验用磁控管阴极按几何尺寸分为两组, 一组为  $300 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 磁场强度为  $0.2 \text{ T}$ ,  $0.3 \text{ T}$ ,  $0.4 \text{ T}$  各一件; 另一组为  $320 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 磁场强度为  $0.4 \text{ T}$ ,  $0.5 \text{ T}$ ,  $0.6 \text{ T}$  各一件。

### 3 结果与讨论

我们对不同尺寸大小和磁场强度的情况进行了放电参数优化研究。表 1 给出了对应各种电极的优化放电参数:

表 1 几种不同磁控阴极的放电参数

Table 1 The parameters of discharge with variant planar magnetron cathode (PMC)

No.	size/mm <sup>3</sup>	B/T	V/kV	P/Pa
1	$300 \times 40 \times 25$	0.2	7.5	25~35
2	$300 \times 40 \times 25$	0.3	6.5	15~20
3	$300 \times 40 \times 25$	0.4	7.5	10~16
4	$320 \times 48 \times 25$	0.4	7.5	8~12
5	$320 \times 48 \times 25$	0.5	6.5	5~8
6	$320 \times 48 \times 25$	0.6	6.5	5~10

从放电峰值电压来看差别不大, 但最佳工作气压值随磁场强度的变化比较明显, 总体趋势是随着磁场强度的提高, 工作气压降低, 磁场为  $0.5 \text{ T}$  和  $0.6 \text{ T}$  的磁控阴极放电气压最低。3、4 号电极的实验结果表明, 两种尺寸的电极放电效果差别不大, 从两种电极长度相差 10% 和宽度相差 20% 来看, 电极几何尺寸的小量变化对放电影响不是很大。

图 3 是对应各种电极在优化状态下的放电强度空间分布的等高线, 所谓优化在这里指的是对于某种电极, 通过对其它参数的改变从而得到稳定的较均匀的全口径放电, 优化状态指对于该种电极最佳的放电状态。从这些图可以看出, 对所研究的几种磁控阴极, 都能建立覆盖全口径的辉光放电, 从开关特性的测量结果来看, 其均匀性都可以满足等离子体电极电光口径的要求。一方面说明采用磁控阴极建立满足 PEPC 需要的大面积辉光放电是可行的, 另一方面, 磁场在  $0.2 \sim 0.6 \text{ T}$  范围都可行这一事实表明放电对磁场强度的要求不是很苛刻。这一结果对磁控阴极加工非常有利。

实验发现磁控阴极的加工质量对放电有明显的影 响。磁控阴极底座的封闭磁路部分对外漏磁, 特别

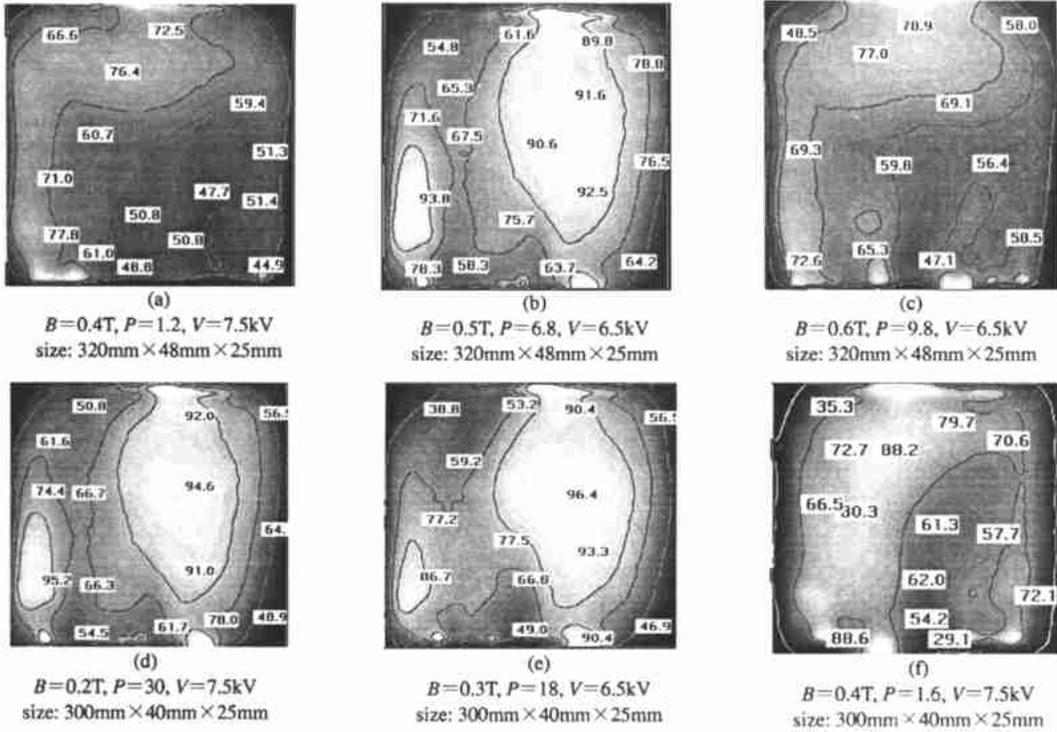


Fig 3 Contours line of CCD image and ideal parameters of discharge with variant PMC

图3 几种不同的磁控阴极放电优化参数和放电强度空间分布等高线

是阴极四周的漏磁导致阴极的周边放电,严重影响放电均匀性的影响。此外,阴极面上石墨层的杂质对阴极附近放电均匀性有很明显的影响,通过一段时间的放电后,表面的细小杂质基本得以去除。表2给出了用磁控阴极和分体钮扣阴极的放电参数:

表2 磁控阴极与分体钮扣阴极放电参数比较

Table 2 Compare the discharge parameters of PMC with button cathode's

style of cathode	peak voltage of discharge/kV	working pressure/Pa
planar magnetron cathode	4.0~6.0	5~30
4 button cathode	10~12	250~500

从中可以看出,利用磁控阴极放电时,放电电压幅值降低了一半,工作气压降低50倍以上,这将大大降低系统电源制作和运行成本。同时峰值电压的减小可以提高系统的可靠性和工程实用性。

### 4 结论

建立了一套放电实验装置,在0.2~0.6T磁场强度范围内都得到了覆盖全口径的辉光放电,通过对放电电压和工作气压的优化,磁场为0.5T时放电峰值电压和工作气压最低。磁控阴极的几何尺寸和磁场强度在较大范围内都可以得到满足PEPC要求的均匀放电,与其它电极的放电相比,可以较大幅度的降低放电电压和气压,提高PEPC的可靠性和稳定性,是PEPC放电的理想电极。

### 参考文献:

[1] Rhodes M A, DeYoreo J J, Woods B W, et al Large-aperture optical switches for high-energy, multipass laser amplifiers[R]. UCRL-JC-105821-92-1, 1992

[2] Rhodes M A, Woods B W, DeYoreo J J, et al Plasma electrode pockels cells for the Beam let and NIF lasers[R]. UCRL-JC-115579, 1994

[3] 吕传信, 鲁敬平, 张雄军 300mm×300mm口径电光开关等离子体电极实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(2): 271-276

[4] Waits R K. Planar magnetron sputtering[J]. J Vac Tech, 1978, 15(2): 179-187.

## Research on the discharge of planar magnetron cathode in PEPC

ZHENG Kuí-xing, LU Jìn-ping, ZHANG Xiǒng-jun, DONG Yun,

FENG Bin, ZHANG Xiǎo-mín, WEI Xiǎo-feng

(National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract** It has the advantages of largely decrease the discharging parameters of PEPC through magnetron cathode. The results of experiments which in different size of cathode, different strength of magnetic and different gas pressure indicate that the uniform discharge can be got in a large range of magnetic strength. The small change of the sizes of cathode hardly effects the parameters and uniformity of discharge. The best parameters of glow discharge for 300mm × 300mm discharging chamber is given out.

**Key words:** PEPC; planar magnetron cathode; glow discharge