



·大科学装置运维·

## 等离子体电极普克尔盒性能提升研究\*

吴振海, 龙蛟, 李珂, 田晓琳, 熊迁, 张君, 胡东霞

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 等离子体电极普克尔盒被广泛应用于大型激光驱动器中, 用于抑制自激振荡、实现多程放大控制和反激光隔离, 普克尔盒内的放电电极在长期使用过程中与腔内残余  $O_2$  发生反应出现退化现象, 导致稳定性下降, 寿命降低。为此, 提出了封离型等离子体电极普克尔盒, 其放电腔内的 Ne 气浓度可达 99.9%, 漏率小于  $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 理论使用年限大于 40 年。实验表明, 封离型等离子体电极普克尔盒在工作 20 万发次后, 其放电电极依然光亮如新, 时间抖动仍稳定在 6.4 ns 附近, 稳定性有了大幅提升。

**关键词:** 电光开关; 等离子体电极; 普克尔盒; 气体放电; 封离型开关

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220255

## Research on performance promotion of plasma electrode Pockels cell

Wu Zhenhai, Long Jiao, Li Ke, Tian Xiaolin, Xiong Qian, Zhang Jun, Hu Dongxia

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A sealed plasma electrode pockels cell (PEPC) has been developed for use on the petawatt and exawatt class laser system that can be used in high-contrast optical switch, as required for suppression of self-oscillation, isolation from retroreflected pulses, and control of output beams. The initial concentration of Ne in the discharge cell is more than 99.9%, which prevents the discharge electrodes from reacting with  $O_2$  comparing with unsealed PEPC. The theoretical lifetime of the sealed PEPC is more than 40 years as the leak rate of the sealed PEPC is smaller than  $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . The experimental results show that, the discharge electrodes in the sealed PEPC are still as fresh as new after firing 200,000 times and the time jitter is still below 6.4 ns.

**Key words:** electro-optical switch, plasma electrode, Pockels cell, gas discharge, sealed switch

用于惯性约束聚变 (ICF) 研究的大型激光驱动器中, 为了获得高输出通量, 一般采用多程放大方式<sup>[1-2]</sup>, 其中控制激光输入输出的关键器件便是电光开关, 其可以控制激光的偏振态从而控制激光的传输, 实现多程放大。此外, 电光开关还起到反激光隔离和抑制自激振荡的作用, 保护光路中的光学元件<sup>[3-5]</sup>。目前, 应用于大型激光驱动器中的电光开关多是等离子体电极普克尔盒 (PEPC), 它采用气体放电产生的等离子体作为电极, 可以做到大口径, 并具有低损耗、高空间均匀性、高损伤阈值等优点<sup>[6-8]</sup>。

PEPC 内的放电气体常用 He、Ne 等稀有气体<sup>[9-10]</sup>, 主要是为了避免放电气体与放电电极发生反应使电极退化, 从而影响放电性能, 降低 PEPC 的稳定性和使用寿命。在使用过程中, PEPC 工作前需先抽真空, 然后再充入放电气体, 因实际情况限制, 无法反复多次进行上述操作, 致使放电腔内残存大量的  $O_2$ ,  $O_2$  与放电电极反应生成氧化物附着在电极表面使其退化, 影响了后续的放电<sup>[11]</sup>。

为解决 PEPC 内放电电极退化的问题, 提出了封离型 PEPC 结构, 从理论上分析了封离型 PEPC 的使用寿命, 通过实验验证了其可有效防止放电电极退化, 稳定性大大提升, 此外, 封离型 PEPC 还降低了运维成本和故障风险, 提升了整个驱动器的可靠性。

### 1 封离型 PEPC 结构

封离型 PEPC 结构示意图如图 1 所示, 主要由壳体、DKDP 晶体、两块窗口和两个环形电极组成, 晶体和窗口

\* 收稿日期: 2022-08-20; 修订日期: 2023-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62005258, 62105310)

联系方式: 吴振海, zhenhai@tju.edu.cn。

使用真空密封胶固定在壳体上,两块窗口和晶体之间形成两个独立的放电腔,放电腔通过气管与外界连通,两个环形电极分别位于两个放电腔内,环形电极上镶嵌若干锥形电极,每个环形电极分别与阳极和阴极连接<sup>[12-13]</sup>。真空机组与气管连接,抽真空至 500 Pa,然后充入 Ne,反复多次直至放电腔内的 Ne 浓度达到 99.99%,最后采用金属压接方式将气管密封,放电腔内的气压约为 1500 Pa。

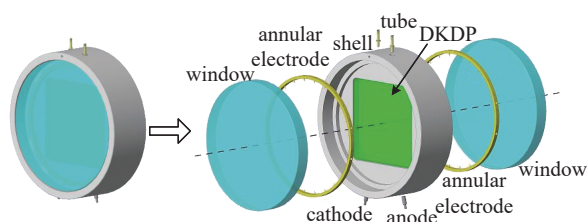


Fig. 1 Structure of sealed PEPC

图 1 封离型 PEPC 结构示意图

PEPC 工作时,阳极和阴极分别接入正负高压驱动脉冲,由于场畸变效应,锥形电极附近会产生很强的电场强度,当场强足够大时,两个放电腔内的锥形电极之间发生非均匀电场下的介质阻挡放电产生等离子体,等离子体从放电腔边缘向中间扩散,直至充满整个放电腔形成等离子体电极,此时,两个放电腔构成一个平行平板电容,然后由外电路对电容进行充电,直至 DKDP 两端电压达到其半波电压<sup>[14-15]</sup>。

## 2 封离型 PEPC 气密性

使用质谱仪测量封离型 PEPC 漏率,测得 10 个 PEPC 的漏率如表 1 所示,其中最大漏率为  $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均漏率约为  $1.9 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 1 封离型 PEPC 测量漏率

Table 1 Leak rate of sealed PEPC

No.	leak rate/(Pa·m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	No.	leak rate/(Pa·m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
ZJ01	$1.0 \times 10^{-10}$	ZJ06	$1.2 \times 10^{-13}$
ZJ02	$1.3 \times 10^{-13}$	ZJ07	$5.0 \times 10^{-11}$
ZJ03	$1.5 \times 10^{-13}$	ZJ08	$1.2 \times 10^{-13}$
ZJ04	$8.0 \times 10^{-13}$	ZJ09	$3.0 \times 10^{-11}$
ZJ05	$8.0 \times 10^{-12}$	ZJ10	$1.8 \times 10^{-13}$

放电腔内的气压随时间的变化满足<sup>[16]</sup>

$$p_t = p_0 + \frac{Qt}{V} \quad (1)$$

式中:  $p_0$  和  $p_t$  分别为放电腔内的初始压强和经历时间  $t$  之后的压强,  $V$  为放电腔的体积,  $Q$  为漏率。我们假设当放电腔内的气压上升到 3000 Pa 时,即腔内的 Ne 浓度从 99.9% 下降到 50% 时,环形电极之间的放电性能变差,已不能满足使用要求。代入最大漏率  $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、初始气压 1500 Pa 和放电腔体积  $8.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ,求得时间  $t = 1.3 \times 10^9 \text{ s}$ ,即仅考虑 PEPC 气密性情况下,封离型 PEPC 使用年限大于 40 年。

## 3 性能分析

PEPC 工作状态监测如图 2 所示,其中红色曲线为 PEPC 两端电压,蓝色曲线为 PEPC 充电电流:从 0 时刻起,高压驱动脉冲开始工作,PEPC 充电电流和两端电压随高压驱动脉冲逐渐升高;直至 19 ns 时,PEPC 放电腔内的气体击穿形成等离子体,等离子体从边缘向中间扩散,PEPC 两端电压下降;直至 39 ns 时,等离子体充满整个放电腔形成稳定的等离子体电极,如图 3 所示,此时充电电流达到最大值,随后开始为等离子体电极构成的平行平板电容进行充电,PEPC 两端电压逐渐升高,充电电流逐渐减小;直至约 100 ns 时,充电电流减小为 0,PEPC 两端电压稳定,此后即为 PEPC 有效窗口时间;直至约 180 ns 时,高压驱动脉冲开始下电,等离子体电极逐渐消失,PEPC 两端电压亦随之下降,同时出现反向的放电电流。

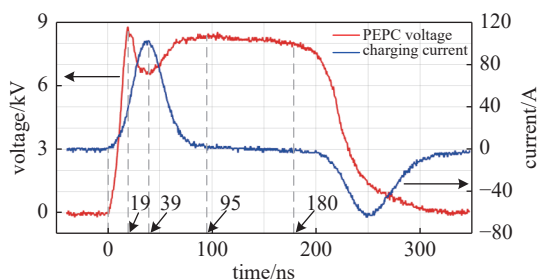


Fig. 2 Voltage across PEPC and charging current

图 2 PEPC 两端电压及充电电流波形



Fig. 3 Photograph of plasma electrode

图 3 等离子体电极照片

图 4(a)是非封离型 PEPC 触发 1 万次后电极形貌图,锥形电极表面已氧化发黑且腐蚀严重,造成该现象的原因是非封离型 PEPC 工作前需先抽真空,然后再充入 Ne 气,因实际情况限制,无法反复多次进行上述操作,致使放

电腔内残存大量的  $O_2$ ,  $O_2$  与金属电极反应生成氧化物附着在电极表面, 影响后续的气体放电; 图 4(b) 是封离型 PEPC 触发 20 万次后电极形貌图, 图中锥形电极表面依然光亮如新, 因为封离型 PEPC 可保证放电腔内的 Ne 气纯度, 避免了  $O_2$  与金属电极发生反应, 可大大提高普克尔盒的使用寿命。

分别测试上述 PEPC 时间抖动, 以输入正高压脉冲为基准, PEPC 以 1 Hz 频率工作 1 h, 从主激光波形半高处测量时间抖动, 测量结果如图 5 所示, 其中蓝色和红色曲线为驱动 PEPC 的正高压驱动脉冲波形, 绿色曲线为通过 PEPC 的主激光波形, 其由 3600 条曲线叠加而成。图 5(a) 是非封离型 PEPC 测量波形, 其时间抖动为 30.6 ns; 图 5(b) 是封离型 PEPC 测量波形, 其时间抖动为 6.4 ns, 远远低于非封离型 PEPC, 说明封离型 PEPC 稳定性有了明显提升。

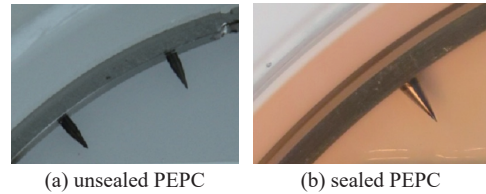


Fig. 4 Photographs of cone electrode  
图 4 锥形电极形貌图

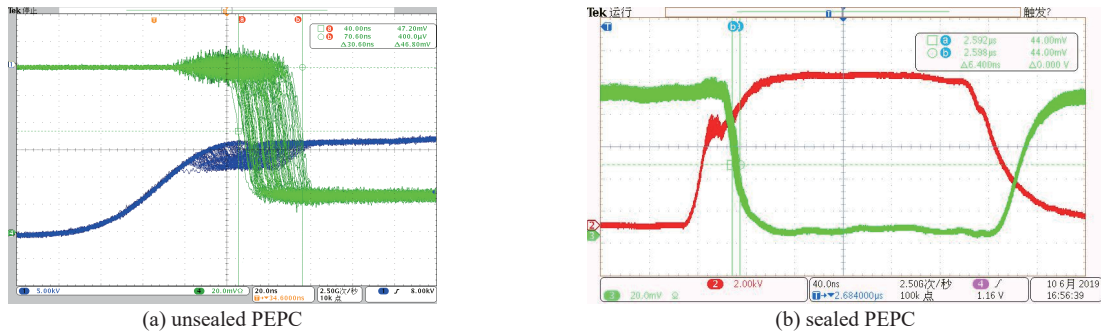


Fig. 5 Time jitter of PEPC  
图 5 PEPC 时间抖动测量结果

## 4 结 论

针对等离子体电极普克尔盒内放电电极退化的问题, 本文研究了封离型等离子体电极普克尔盒, 放电腔内的初始 Ne 气浓度大于 99.9%, 放电腔漏率小于  $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 可长时间保持放电腔内的 Ne 气纯度, 减缓了残余  $O_2$  与放电电极发生反应使电极退化, 理论使用年限大于 40 年。实验结果显示: 非封离型 PEPC 工作 1 万次后, 放电电极表面已经氧化发黑, 时间抖动为 30.6 ns; 而封离型普克尔盒在工作 20 万次后, 其放电电极依然光亮如新, 时间抖动仍稳定在 6.4 ns 附近, 稳定性有了大幅提升。此外, 封离型普克尔盒工作时不需要真空机组, 降低了运维成本和故障风险, 提升了整个驱动器的可靠性。

## 参考文献:

- [1] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2009, 7: E54.
- [2] Maywar D N, Kelly J H, Waxer L J, et al. OMEGA EP high-energy petawatt laser: progress and prospects[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112: 032007.
- [3] Goldhar J, Henesian M A. Electro-optical switches with plasma electrodes[J]. Optics Letters, 1984, 9(3): 73-75.
- [4] Bochkov E I, Babich L P, Bel'kov S A, et al. Computation of optimal operation voltage of the neon-filled plasma Pockels cell[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(9): 3122-3127.
- [5] 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. (Lv Chuanxin, Lu Jingping, Zhang Xiongjun. Study of plasma electrode used for electro-optical switch with a clear aperture of 300mm×300mm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(2): 271-276)
- [6] Kruschwitz B E, Kelly J H, Shoup M J, et al. High-contrast plasma-electrode Pockels cell[J]. Applied Optics, 2007, 46(8): 1326-1332.
- [7] Gardelle J, Pasini E. A simple operation of a plasma-electrode Pockel's cell for the laser megajoules[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(5): 2631-2636.
- [8] Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Lin Donghui, et al. Compact plasma Pockels cell for TIL of SGIII laser facility[C]//Proceedings of SPIE 6838, Optoelectronic Devices and Integration II. 2008: 68380Y.
- [9] 张雄军, 郑建刚, 郑奎兴, 等. 用于多程放大系统光束反转器的等离子体电极电光开关[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2): 150-154. (Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang, Zheng Kuixing, et al. PEPC electro-optical switch used in beam reverser of multipass amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(2): 150-154)
- [10] Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang, et al. Aperture scalable, high-average power capable, hybrid-electrode Pockels cell[J]. Optics Letters, 2017, 42(9): 1676-1679.

- [11] Rhodes M A, Woods B, DeYoreo J J, et al. Performance of large-aperture optical switches for high-energy inertial-confinement fusion lasers[J]. [Applied Optics](#), 1995, 34(24): 5312-5325.
- [12] Zhang Jun, Wu Dengsheng, Zheng Jiangang, et al. Single-pulse driven, large-aperture, 2×1 array plasma-electrodes optical switch for SG-II upgrading facility[C]//Proceedings of SPIE 9294, International Symposium on Optoelectronic Technology and Application. 2014: 92940N.
- [13] 郑奎兴, 鲁敬平, 张雄军, 等. 平面磁控阴极用于PEPC等离子体放电实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s1): 141-144. (Zheng Kuixing, Lu Jingping, Zhang Xiongjun, et al. Research on the discharge of planar magnetron cathode in PEPC[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s1): 141-144)
- [14] Babich L P, Bochkov E I, Garanin S G, et al. Analysis of the transmission “window” formation in the electrooptical switch of laser pulses with plasma electrodes[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2017, 45(1): 85-90.
- [15] Andreev N F, Babin A A, Davydov V S, et al. Wide-aperture plasma-electrode Pockels cell[J]. [Plasma Physics Reports](#), 2011, 37(13): 1219-1224.
- [16] Gu Boqin, Huang Xinglu. Investigation of leak detection method by means of measuring the pressure increment in vacuum[J]. [Vacuum](#), 2006, 80(9): 996-1002.