

文章编号: 0258-7025(2010)05-1227-04

400 mm×400 mm 口径单脉冲普克尔盒 时间特性研究

吴登生 张雄军 郑建刚 张 君 田晓琳

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 建立了 400 mm×400 mm 口径单脉冲普克尔盒实验装置, 采用小尺寸 KDP 晶体替代方案, 完成了对 400 mm×400 mm 口径内不同区域时间特性的研究, 并以此为依据获得使用全尺寸 KDP 晶体时普克尔盒的时间特性。通过对普克尔盒参数的优化设计, 实现了全口径大面积高电导率等离子体的形成, 气体击穿稳定, 实验测得的普克尔盒不同区域的开关效率均大于 99.5%。计算结果显示, 在 1200 Pa 以及 2000 Pa 放电气压下, 全尺寸 KDP 晶体普克尔盒的开关上升时间分别为 78.4 ns 和 80.7 ns。

关键词 光学器件; 等离子体电极普克尔盒; 单脉冲驱动; 开关特性

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1227

Study on Temporal Behaviour of One-Pulse-Process Plasma Electrodes Pockels Cell with 400 mm×400 mm Aperture

Wu Dengsheng Zhang Xiongjun Zheng Jiangang Zhang Jun Tian Xiaolin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The one-pulse-process plasma electrodes Pockels cell has been established. Five pieces of KDP crystals with 50 mm×50 mm are inserted into the specific areas in the aperture instead of the one-piece crystal with 400 mm×400 mm to investigate the temporal behaviour of the Pockels cell. Owing to the optimum designs, the full aperture high conductive plasma has been created, and the breakdown of the operating gas is stable. The measured switching efficiencies of full aperture are higher than 99.5%. At the neon pressure of 1200 Pa and 2000 Pa, the rise-times of the Pockels cell with full-scale KDP crystal are 78.4 ns and 80.7 ns, respectively.

Key words optical devices; plasma electrodes Pockels cell; one-pulse-process; switching characteristic

1 引 言

大口径等离子体电极普克尔盒是大型固体激光装置中控制激光输出或隔离反激光的关键部件。与传统的等离子体电极普克尔盒相比, 单脉冲普克尔盒无需单独的主放电脉冲, 仅依靠高压开关脉冲击穿晶体两侧的工作气体, 形成等离子体电极, 并完成对晶体的充电, 实现普克尔效应^[1~3]。单脉冲普克尔盒具有可靠性高、使用寿命长、成本低等优点。目前国内使用的等离子体电极普克尔盒均已采用单脉冲方式驱动^[4~9]。对于大口径单脉冲普克尔盒而言, 其口径的增大使电子的渡越时间以及普克尔盒等效电容随之增大, 从而造成普克尔盒开关上升时

间的增加, 使普克尔盒性能降低, 因此, 必须尽量减少开关上升时间。此外, 普克尔盒口径的增加使得全口径大面积等离子体的获得变得困难, 为了获得全口径均匀的开关效率, 必须保证晶体两侧的等离子体全口径覆盖并具有高的电导率。

由于 400 mm×400 mm 口径 KDP 晶体在材料的获得以及加工方面成本较高, 实验采用数块 50 mm×50 mm 大小的 KDP 晶体代替全尺寸 KDP 晶体, 以研究 400 mm×400 mm 口径内不同区域的时间特性, 并以此为依据获得使用全尺寸 KDP 晶体时普克尔盒的时间特性。

收稿日期: 2009-06-09; 收到修改稿日期: 2009-08-10

作者简介: 吴登生(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事光开关技术方面的研究。E-mail: and929@sina.com

2 普克尔盒设计

2.1 大面积等离子体形成

基于透射光束近场均匀性、开关与激光脉冲精密同步的要求,大口径等离子体电极普克尔盒对等离子体的要求为空间上全口径覆盖、时间上稳定以及高的电导率。单脉冲普克尔盒的放电电极位于晶体两侧,从机理上讲,该工作模式包含高电压场致气体击穿和介质阻挡放电。

由气体放电理论得知,介质阻挡放电由大量呈现细丝状的细微快脉冲放电构成,在较低的激励电压条件下,微放电在一维空间内是相互独立存在的,随着激励电压的增加,原来独立的微放电之间开始出现其他的微放电,并且沉积在电介质表面的电荷在电介质表面的扩散作用也随之增强。激励电压越高,这些现象表现得越明显,直至最后在电介质表面形成一层很强很均匀的电荷层^[10]。

单脉冲普克尔盒放电腔内工作气体的击穿通过高电压场致发射电离工作气体来实现,因此,放电电极对于获得稳定的气体放电尤为重要。实验采用逸出功较低的合金材料制成若干尖锐电极针,镶嵌在环状放电电极内侧,增强场致击穿强度,减少击穿延时,增加气体击穿的稳定性。单脉冲普克尔盒放电腔厚度小,电极间的气隙均匀,KDP晶体的理论半波电压高达16.4 kV,远高于工作气体的击穿电压,可以实现高电导率等离子体全口径均匀覆盖的要求。

2.2 普克尔盒参数优化

开关上升时间和开关效率是表征普克尔盒开关特性的两个重要指标。良好的时间特性应具有全口径较快的开关上升时间和均匀的开关效率。根据单脉冲普克尔盒工作原理,其开关上升时间包含普克尔盒充电时间和工作气体击穿时电子的渡越时间。KDP晶体的充电时间与负载电阻 R 和普克尔盒的等效电容 C 乘积成正比,一般取KDP晶体的充电时间为 $\tau=4RC$ 。普克尔盒设计定型后,其等效电容无法改变,为了减少普克尔盒的充电时间,可行的方法是减小负载电阻 R 的大小。在脉冲宽度较短的情况下,受电路寄生参数制约,开关脉冲发生器脉冲形成线的阻抗不易做低,因此,与脉冲形成线阻抗相匹配负载电阻 R 不能任意地减小,本次实验中负载电阻为25 Ω 。

气压是气体放电的重要条件,放电气压的选择,对普克尔盒开关特性存在极大的影响。气压过低,使普克尔盒的击穿抖动增大,导致系统可靠性降低。

气压过高,电离过程中电子碰撞的次数由于较高的气体分子浓度而增加,电子不易积累动能,因而使电子的渡越时间增加。气压过高,还会导致等离子体阻抗过大,普克尔盒横向电压降增大,影响全口径开关效率的均匀性。实验中,普克尔盒放电气压控制在1000~2000 Pa之间。

3 实验研究

3.1 实验装置

图1为400 mm \times 400 mm口径单脉冲普克尔盒实验装置照片。晶体两侧的放电腔内各有一个环状四边形放电电极,位于通光口径边缘,两放电电极分别接正、负开关脉冲发生器负载电阻的高压端,负载电阻为25 Ω 。普克尔盒工作时,两放电电极间的脉冲电压差为20 kV,开关脉冲顶宽为600 ns,前沿约70 ns。实验时的工作气体为氖气。

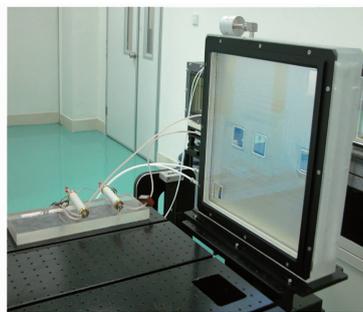


图1 400 mm \times 400 mm口径单脉冲普克尔盒实验装置
Fig. 1 Photograph of the Pockels cell with
400 mm \times 400 mm aperture

图2为400 mm \times 400 mm口径内KDP晶体的分布情况,图中5个小方块表示5块50 mm \times 50 mm的KDP晶体,其余区域为有机玻璃隔板。

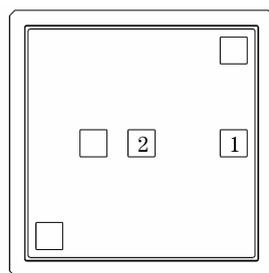


图2 400 mm \times 400 mm口径内KDP晶体的分布情况
Fig. 2 Schematic layout of the five sub-aperture crystals
in 400 mm \times 400 mm aperture

图3为普克尔盒的开关特性测量光路。实验用波长为1053 nm的连续光来测量普克尔盒的时间特性,用1053 nm脉冲激光测普克尔盒的开关效率。起偏棱镜 P_1 平行于检偏棱镜 P_2 ,通过检偏棱镜 P_2

的光线被透镜聚焦进入光纤, 光纤将信号传至光电二极管。初始状态下, 光路处于导通状态, 当普克尔盒内工作气体被高压开关脉冲击穿后, KDP 晶体的电致双折射效应开始形成, 光路由导通状态迅速向关断状态转换, 光路被截断, 直至开关脉冲结束, 光电二极管将探测到的这一过程显示在示波器上, 并与高压探针 (TEK P3016A) 监测到的普克尔盒负载高压端的电压脉冲波形进行对比, 完成对普克尔盒时间特性的测量。与开关脉冲同步的触发信号控制 CCD 相机拍下普克尔盒放电瞬间的照片, 完成对普克尔盒空间特性的监测。

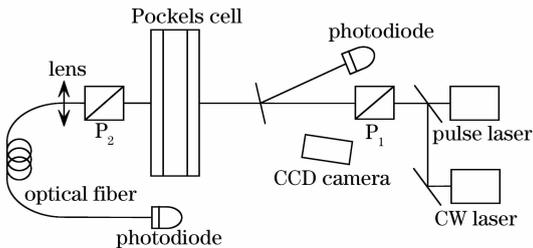


图3 普克尔盒开关特性测量光路

Fig. 3 Measurement setup of the switching characteristics of Pockels cell

3.2 实验结果与分析

图4为普克尔盒击穿时开关脉冲放电波形。Ch1为开关脉冲波形, Ch2为激光脉冲波形, t_1 为击穿延时, t_2 为击穿起始时刻与激光脉冲前沿起点之间的延时, t_3 为激光脉冲前沿。

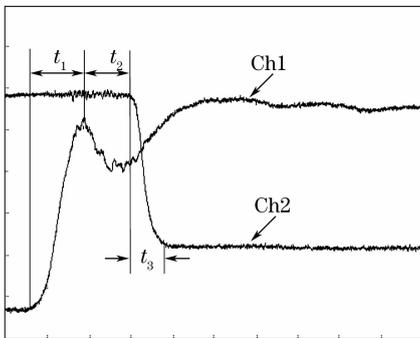


图4 普克尔盒击穿时开关脉冲的放电波形

Fig. 4 Discharge waveform of switching pulse at breakdown of Pockels cell

普克尔盒时间特性的实验结果如表1所示, 表中数据为10次平均后的结果。其中测量点1位于普克尔盒边缘, 距离晶体边约1 cm, 测量点2位于普克尔盒中心, 具体位置如图2所示。

从实验结果看, 击穿延时 t_1 较小并且稳定在52 ns, 说明低逸出功材料的使用对普克尔盒击穿特性的提升作用明显。 t_2 表示击穿起始时刻与激光脉

表1 普克尔盒时间特性测量结果

Table 1 Experimental results of the temporal characteristic of Pockels cell

| Operating pressure /Pa | Measuring point | t_1 / ns | t_2 / ns | t_3 / ns | $(t_2 + t_3)$ / ns |
|------------------------|-----------------|------------|------------|------------|--------------------|
| 1200 | Point 1 | 52 | 10.3 | 43.9 | 54.2 |
| 1200 | Point 2 | | 44.8 | 22.3 | 67.1 |
| 2000 | Point 1 | | 10.3 | 43.9 | 54.2 |
| 2000 | Point 2 | | 49.8 | 19.1 | 68.8 |

冲下降沿起点之间的延时, 将普克尔盒中心与边缘的 t_2 值相减, 可以得到相应气压下电子的渡越时间。由表中数据可得, 放电气压为1200 Pa与2000 Pa时, 电子的渡越时间分别为34.5 ns, 39.5 ns。 t_3 测量的是光脉冲前沿, 该指标所代表的实际上是被测量点的充电时间。由于电压脉冲沿晶体表面传播需要经历一定的时间, 因此, 距离电极较近的普克尔盒边缘的通光区域, 其普克尔效应开始得较早, 反映在测量结果上就是该区域激光脉冲起点较早, 但由于普克尔盒全口径充电结束时时刻基本一致, 因此, 普克尔盒边缘测得的 t_3 较大, 普克尔盒边缘测得的 t_3 接近普克尔盒的充电时间, 由表中数据可知, 普克尔盒的充电时间约为43.9 ns。这里, 定义开关上升时间为普克尔盒边缘测得的激光脉冲前沿的起点至普克尔盒中心测得的激光脉冲前沿的终点之间的时间间隔, 根据以上数据, 可以得到普克尔盒开关上升时间为

$$\tau_r = \sqrt{\tau_i^2 + \tau_c^2}, \quad (1)$$

式中 τ_i 为渡越时间, τ_c 为普克尔盒充电时间。因此, 放电气压为1200 Pa与2000 Pa时, 普克尔盒开关上升时间分别为55.8 ns和59.1 ns。而实际测得的开关上升时间应为相同气压下测量点2的 $(t_2 + t_3)$ 值减去测量点1的 t_2 值, 分别为56.8 ns和58.5 ns, 理论值与实测值吻合得较好。

采用全尺寸 KDP 晶体的普克尔盒, 其等效电容为2816 pF, 若负载电阻为25 Ω , 则其理论充电时间达281.6 ns, 晶体的充电过程将过多地占用开关脉冲时间。由于普克尔盒等效电容较大, 要得到较短的充电时间, 就必须减小负载电阻。可将负载电阻减小为12.5 Ω , 并对普克尔盒的驱动方式进行改进, 只使用一台负开关脉冲发生器来驱动普克尔盒, 该开关脉冲发生器能够在负载端输出一20 kV脉冲电压。这样, KDP 晶体的理论充电时间将减少为70.4 ns。根据表1测得的电子的渡越时间, 由(1)式可以得到1200 Pa与2000 Pa时, 全尺寸 KDP 晶体普

克尔盒的开关上升时间分别为78.4 ns和80.7 ns。

图5是CCD相机记录到的普克尔盒放电照片。放电腔内的工作气体完全电离,形成全口径覆盖的等离子体,图中镶有KDP晶体的区域较亮,是由于KDP晶体介电常数较大,使得这些区域的放电气隙中电场强度较高,电子平均能量大,电子碰撞、电离发光的能力较强,形成亮区。实验中,对普克尔盒不同区域的开关效率进行了测量,测量结果表明普克尔盒不同区域开关效率均在99.5%以上,单脉冲普克尔盒全口径开关效率均匀性良好。

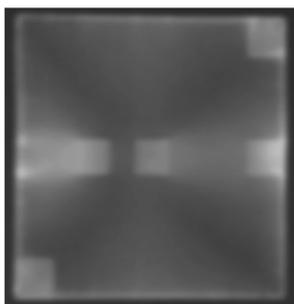


图5 普克尔盒放电照片

Fig. 5 Discharge photograph of Pockels cell recorded by CCD camera

4 结 论

设计并建立了400 mm×400 mm口径单脉冲普克尔盒实验装置,采用5块50 mm×50 mm小尺寸KDP晶体代替全尺寸KDP晶体完成了对普克尔盒时间特性的研究,测得了电子的渡越时间。根据测得的实验结果计算得出,在放电气压为1200 Pa以及2000 Pa条件下,全尺寸KDP晶体普克尔盒的开关上升时间分别为78.4 ns和80.7 ns,普克尔盒具有良好的时间特性。实验还对普克尔盒不同区域的开关效率进行了测量,测量结果显示普克尔盒不同区域开关效率均在99.5%以上。

参 考 文 献

- 1 J. Goldhar, M. A. Hennesian. Electro-optical switches with plasma electrodes [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(3):73~75
- 2 M. A. Rhodes, B. Woods, J. J. DeYoreo *et al.*. Performance of large-aperture optical switches for high-energy inertial-confinement fusion lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24):5312~5325
- 3 C. D. Boley, M. A. Rhodes. Modeling of plasma behavior in a plasma electrode Pockels cell [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(3):713~726
- 4 J. Gardelle, E. Pasini. A simple operation of a plasma-electrode Pockels cell for the laser megajoules [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(5):2631~2636
- 5 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zheng Kuixing *et al.*. Electro-optical switch with 280 mm×280 mm aperture driven by one-pulse process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):254~258
张雄军,吴登生,郑奎兴等. 280 mm×280 mm口径单脉冲过程电光开关[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):254~258
- 6 Zhang Xiongjun, Feng Guoying, Zheng Kuixing *et al.*. Parallel driving to plasma electrode Pockels cells [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1173~1176
张雄军,冯国英,郑奎兴等. 等离子体电极普克尔盒的并联驱动[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1173~1176
- 7 Zhang Xiongjun, Zheng Kuixing, Wu Dengsheng *et al.*. Analyses on depolarization losses of plasma-electrode Pockels cell [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl):384~386
张雄军,郑奎兴,吴登生等. 等离子体电极普克尔盒退偏损耗分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊):384~386
- 8 Guo Wenqiong, Zhou Xiaojun, Zhang Xiongjun *et al.*. Simulation electro-optic switch of plasma-electrode Pockels cells driven by one-pulse process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7):3519~3523
郭文琼,周晓军,张雄军等. 等离子体电极普克尔盒电光开关单脉冲过程数值模拟[J]. *物理学报*, 2006, **55**(7):3519~3523
- 9 Guo Wenqiong, Zhang Xiongjun, Zhou Xiaojun *et al.*. Numerical analysis of helium-pressure influence on characteristics of electro-optic switch driven by single-pulse process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):695~700
郭文琼,张雄军,周晓军等. 氦气压强对单脉冲过程电光开关特性影响的数值分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):695~700
- 10 Zhao Yanhui, Zhou Jianguang, Wu Xiaodong *et al.*. Study on discharge characteristic of different configurable DBD [J]. *J. Dalian Maritime University*, 2004, **30**(3):59~61,87
赵艳辉,周建刚,吴晓东等. 不同结构介质阻挡放电的放电特性[J]. *大连海事大学学报*, 2004, **30**(3):59~61,87