

文章编号: 0253-2239(2006)02-0254-5

280 mm × 280 mm 口径单脉冲过程电光开关*

张雄军 吴登生 郑奎兴 鲁敬平 林东晖 田晓琳

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 用于高功率惯性约束聚变(ICF)激光驱动器的大口径电光开关均采用等离子体电极泡克耳斯盒。与传统的等离子体电极电光开关原理不同,单脉冲过程驱动电光开关没有独立的大电流等离子体发生单元,而只是通过具有较高幅值的正负开关脉冲完成对大口径电光开关的驱动。介绍单脉冲过程驱动等离子体电极泡克耳斯盒电光开关的设计,并建立 280 mm × 280 mm 口径电光开关实验平台,利用连续激光器测试了电光开关特性,实验测得该电光开关中心处开关效率为 99.3%,开关上升时间为 90 ns。

关键词: 激光光学; 电光开关; 单脉冲过程驱动; 等离子体电极泡克耳斯盒

中图分类号: TN242 文献标识码: A

Electro-Optical Switch with 280 mm × 280 mm Aperture Driven by One-Pulse Process

Zhang Xiongjun Wu Dengsheng Zheng Kuixing Lu Jingping

Lin Donghui Tian Xiaolin

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

Abstract: The large aperture optical switch used in the high-power laser driver for inertial confinement fusion adopts the plasma electrode Pockel cell. Being different with the regular plasma electrode electrooptical switch, the one-pulse-process (OPP) driving electrooptical switch is driven only through the positive and negative switching pulses with relatively high voltage, without isolated large current plasma generator. The design of the OPP electrooptical switch is described, and the experimental setup of the electrooptical switch with 280 mm × 280 mm aperture is established. The testing results of the electrooptical switch with CW laser show the switch efficiency of this electrooptical switch is 99.3%, and the switch rising time is 90 ns.

Key words: laser optics; electrooptical switch; one-pulse-process driving; plasma electrode Pockels cell

1 引 言

用于惯性约束聚变(ICF)研究的大型激光驱动器,需要大口径开关器件以避免大口径放大器产生自激振荡并保护大口径光学元件。常规环电极纵向电场泡克耳斯盒已在激光技术中得到广泛应用,但是它的通光口径受到一定的限制,因为环电极结构的电场不均匀,在圆柱晶体边缘的场强总大于中心轴上的场强,如果要求晶体上电场不均匀性小于 2%,则晶体厚度与直径之比必须大于 1。因此,口径大于 100 mm 的环电极泡克耳斯盒将引起严重的光吸收和非线性效应。而等离子体电极泡克耳斯

盒^[1~3]是用晶体两侧稀薄气体放电形成的高电导率、透明等离子体作电极,可以用薄晶体做到大口径,并具有低损耗、高空间均匀性、高损伤阈值,目前正在建造的几台大型激光系统都将采用其作为级间隔离和反向激光隔离的光开关^[4,5]。

美国利弗莫尔国家实验室的研究小组于 20 世纪 80 年代初提出的等离子体电极泡克耳斯盒(PEPC)的概念,由两个放电室和中间的电光晶体构成,真空系统将放电室抽空后,注入工作气体,等离子体放电脉冲发生器输出的高电压脉冲加于阴极和阳极之间,产生辉光放电,形成大面积等离子体,覆

* 国家高技术惯性约束聚变领域(842130)资助课题。

作者简介:张雄军(1973~),男,副研究员,主要从事光开关技术的研究。E-mail: stone_zxj@163.com

收稿日期:2005-03-28;收到修改稿日期:2005-09-15

盖于晶体两侧。在等离子体电阻达到期望值时,开关脉冲发生器将脉冲高压通过两腔的等离子体加到电光晶体上,在电场作用下,晶体产生双折射,使通过晶体的线偏振光改变偏振方向。该方案的泡克耳斯盒工作时有两个过程,首先由等离子体脉冲发生器驱动放电腔中的气体放电,形成高电导率等离子体,然后,开关脉冲发生器产生的准矩形电压脉冲通过等离子体电极加于晶体两侧,对电光晶体充电。而单脉冲过程驱动^[6]方式是:在两个气体放电腔只需要开关脉冲即完成在开关晶体两侧加上期望的电场。下面介绍单脉冲过程驱动电光开关的设计和实验结果。

2 单脉冲过程驱动电光开关设计

图 1 为单脉冲驱动泡克耳斯盒原理剖面示意图,与传统的等离子体电极泡克耳斯盒相比,没有等离子体发生器单元,具有更高的可靠性,减少了放电电极溅射对晶体和光窗的污染。泡克耳斯盒中间是 KDP 电光开关晶体,其两边是放电腔。KDP 晶体的工作原理和特性与传统纵向泡克耳斯盒中一样,即利用其电致双折射效应。晶体垂直于 Z 轴切割,在光路中光束沿 Z 轴方向通过晶体,当晶体上不加电压脉冲时保持单轴晶体的特性,光脉冲通过时光的偏振方向不发生任何改变;当给晶体两边加上一定电压后,晶体在电场的作用下将产生电致双折射效应,这时光束通过晶体后其偏振方向将发生一定角度的改变,其变化幅值受所加电压大小的影响,因此,通过控制加到晶体上的电压大小的调节可以实现对传输光束偏振态的控制。与传统等离子体电极

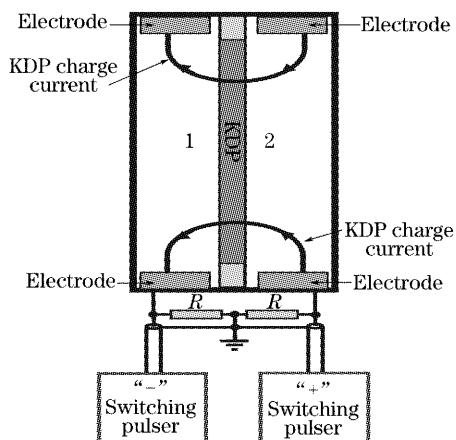


图 1 单脉冲过程驱动电光开关原理剖面示意图
Fig. 1 Section schematic of the one-pulse-process driving electrooptical switch

泡克耳斯盒不同的是,每个气体放电腔只有一个放电电极。当泡克耳斯盒工作时,首先将两放电腔中的气压调节到理想的工作点,然后同时分别将正负开关脉冲加在两气体放电腔的电极上,该开关脉冲高压导致气体击穿,并通过雪崩过程使放电腔气体电离形成全口径均匀的等离子体,并通过它将开关脉冲加到 KDP 晶体两侧,从而实现了对传输光束偏振方向的控制。

图 2 为 280 mm×280 mm 单脉冲过程驱动电光开关照片。开关采用 KDP 晶体,晶体尺寸为 280 mm×280 mm×10 mm,气体放电腔尺寸为 300 mm×300 mm×14 mm,由 30 mm 厚的光窗进行密封。放电电极采用不锈钢材料,并进行特殊设计以增加场致击穿强度。为减小放电离子轰击产生的阴极溅射对晶体和光窗的污染,工作气体采用分子量较小的氦气,泡克耳斯盒工作在一个动态平衡状态。为使泡克耳斯盒的插入尽量不影响主激光束的光束质量,在电光开关精密装校中,要最大限度的减小 KDP 开关晶体和窗口玻璃片的残存应力和夹持不当引入的应力。

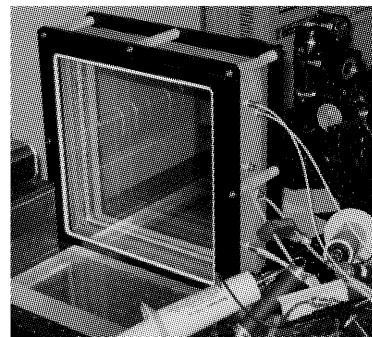


图 2 280 mm×280 mm 口径单脉冲过程驱动电光开关照片
Fig. 2 Photograph of one-pulse-process driving electrooptical switch with 280 mm×280 mm aperture

设强度为 I_0 、偏振方向为 x 轴,沿 z 传播的平面波正入射泡克耳斯盒晶体,其晶轴符合 x, y, z 轴,若晶体无应变,且外加电场为 0,沿晶体光轴传播的光束偏振方向将不发生改变,为使光束偏振面旋转 90° ,即 $I_y/I_0=1$,由于所产生的相移 $\gamma=\pi$,施加在晶体两表面之间的电压为半波电压

$$V_\pi = \lambda / (2n_0^3 r_{63}), \quad (1)$$

其中 λ 为激光波长,对于 KDP 晶体, $r_{63} = 9.7 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $n_0 = 1.494$ ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$), 半波电压 $V_\pi = 16.4 \text{ kV}$ 。

正负开关脉冲发生器均采用仿真线成形,仿真线阻抗 $Z=10 \Omega$,脉冲平顶宽度约为 500 ns,负开关

脉冲发生器原理线路如图 3 所示,正开关脉冲发生器与其类似。仿真线由集中参量的电感和电容组成,若每节电感为 L_n ,电容为 C_n ,节数为 n ,则输出脉宽 T 和特性阻抗 Z 分别为

$$T = 2n \sqrt{L_n C_n} = \sqrt{LC}, \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{L_n / C_n} = \sqrt{L/C}, \quad (3)$$

L 和 C 分别为总电感和总电容。由于电感、电容和放电开关部件的损耗,在负载与仿真线阻抗匹配情况下,电压输出效率约 45%。采用仿真线成形是由于其阻抗和波形可调,易于同负载匹配,可以调整出好的脉冲平顶和低的尾后剩余电压,在低阻抗长脉冲情况下也能做到结构紧凑。其缺点是前沿上升时间和后沿下降时间相对较长,由于电路元件寄生参量的影响,在低阻抗情况下难以得到前沿陡、脉宽短的准矩形脉冲。采用倒相输出方式可以部分弥补这种缺点。

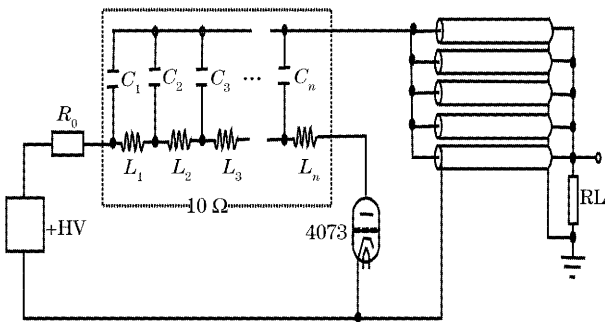


图 3 负极性开关脉冲发生器原理示意图

Fig. 3 Principle sketch of negative switching pulse generator

正负开关脉冲分别由 5 根 50 Ω 的电缆同时传输到泡克耳斯盒,终端分别通过 1 个 10 Ω 电阻匹配,在放电腔气体击穿后,泡克耳斯盒在电学上可看作是一个平板电容器,两侧是等离子体电极,中间介质为 KDP 晶体。泡克耳斯盒等效电容 $C = \epsilon_r \epsilon_0 S/d$, S 为晶体的表面积这里 KDP 晶体的相对介电常量为 20,晶体厚度 $d = 10$ mm,则泡克耳斯盒电容约为 1500 pF,理论上泡克耳斯盒充电时间 $t_{ch} = 4ZC$,约为 60 ns。

3 实验结果

在 280 mm \times 280 mm 口径单脉冲过程驱动电光开关实验研究中,用敏通 CCD 相机拍摄气体放电照片,高压探针测量开关脉冲电压,罗氏线圈监测 KDP 晶体的充电电流。泡克耳斯盒的充电电流波形如图 4 中 Ch4 所示,Ch3 为高压探针在匹配电阻

两端测得的正开关脉冲波形,开关脉冲上升到最大值,气体击穿,同时向电光开关晶体充电,由于阻抗失配,电阻上的电压下降;Ch4 为罗氏线圈测得的充电电流波形,是一个典型的电容充放电波形。图 5 为 CCD 相机拍摄的气体放电照片,从图 5 中可看出,四周较强,中心偏弱,但全口径气体电离。

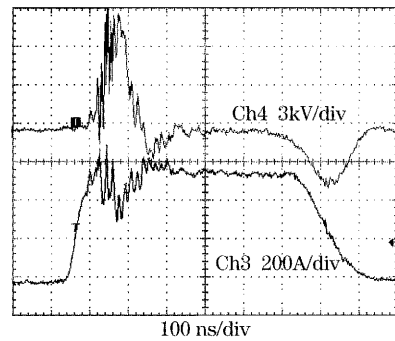


图 4 KDP 充电电流与正开关脉冲波形

Fig. 4 Charging current to KDP crystal and the positive switching pulse waveform

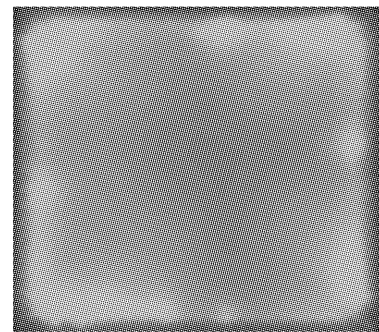


图 5 CCD 相机拍摄的氦等离子体发光强度照片

Fig. 5 Photograph of luminous intensity of helium plasma imaged by CCD camera

由于没有独立的等离子体发生装置,等离子体完全由边缘的电极产生,泡克耳斯盒中心位置的开关特性是关注的焦点。泡克耳斯盒开关效率测量如图 6 所示,采用连续激光器,起偏器和检偏器平行放置,连续激光沿晶体光轴通过泡克耳斯盒中心,没有采用扩束器件,光束直径约为 1 mm,用光电二极管测量透过检偏器的激光波形。当泡克耳斯盒不加电时,光电二极管输出一定幅值的直流电压,当正负开

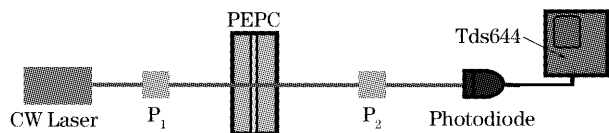


图 6 单脉冲过程驱动泡克耳斯盒开关效率测量示意图

Fig. 6 Measurement setup for switch efficiency of one-pulse-process driving electrooptical switch

关脉冲电压(之和为半波电压)同时加到泡克耳斯盒上,通过起偏器的线偏振光将旋转 90° ,不能通过检偏器,光电二极管输出一下凹的电压波形,图 7 为实验测得的开关脉冲电压波形和检偏器的透射光脉冲波形。开关上升时间定义为透过检偏器光脉冲幅值 $5\% \sim 95\%$ 的时间间隔,对于单脉冲过程电光开关,开关上升时间包含了气体电离时间和晶体充电时间,气体电离时间和电、气工作参量密切相关,晶体

充电时间则决定于等效充电阻抗和电光晶体等效电容。对于 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 口径单脉冲过程,在优化的工作气压下,实验测得开关上升时间为 90 ns ,由于包含了气体电离时间,因此比理论计算的开关晶体充电时间大些。开关脉冲形成线阻抗为 10Ω ,若追求更短的开关上升时间,可采用更低阻抗的开关脉冲发生器。

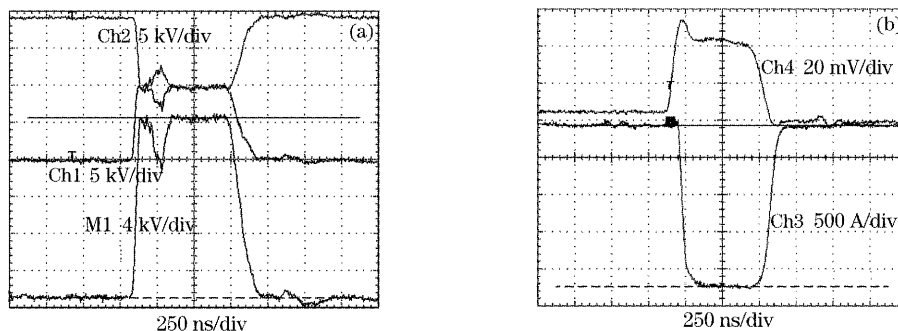


图 7 开关脉冲电压波形和透过检偏器的光脉冲波形。(a) Ch2 为正开关脉冲波形,Ch4 为负开关脉冲波形,M1 为加在泡克耳斯盒上的开关脉冲电压,(b) Ch4 为罗氏线圈测得通过正开关脉冲发生器匹配电阻和 KDP 的电流,Ch3 为透过检偏器的透射光脉冲波形

Fig. 7 Oscillogram of the switching pulse voltage and the optical pulse transmitting through the analyzer. (a) Ch2 is the positive switching pulse, Ch4 is the negative switching pulse, and M1 is the voltage put on KDP crystal, (b) Ch4 is the current measured by Rogovsky coil passing the matching resistance of positive switching pulse generator and KDP crystal, and Ch3 is the optical pulse passing through the analyzer

在优化的工作气压下,对施加不同开关脉冲电压下的开关效率进行了测试。图 8 中倒三角形为实测的开关中心位置不同开关脉冲电压下的开关效率,虚线为理论计算的纵向应用 KDP 晶体的施加电压与开关效率关联曲线。从图 8 中可看出,实际施加的电压较理论计算值高,这是由于气体放电中德拜屏蔽效应的影响。将理论计算曲线向右平移(图中实线),即半波电压点由 16.4 kV 变为 19.3 kV ,该曲

线与实测值符合得较好。在正负开关脉冲电压之和为 19.3 kV 处,开关效率为 99.3% 。为评估该开关的空间性能,对开关不同位置的开关参量进行了测试,在优化的工作气压范围内,开关上升时间短,开关恢复快,透过检偏器的光脉冲波形和开关脉冲电压波形基本一致,并且不同位置的开关效率和开关上升时间一致;在盒内气体压力超过该范围后,各点的开关上升时间变得不同,远离放电电极处比靠近放电电极处的开关上升时间大,开关恢复时间也变长。这主要是由于带电粒子的平均能量由电场与气压之比 E/P 决定,气压太高后带电粒子的平均自由程将变短,使得远离放电电极处等离子体密度低,等离子体电阻较大,开关上升时间变大,同时该处的带电粒子浓度较低,碰撞复合概率低,因此恢复时间变长。

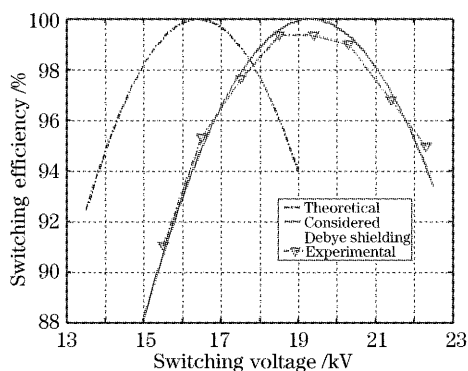


图 8 KDP 晶体两侧电压与开关效率关系曲线
Fig. 8 Curves of switch efficiencies and voltages put on the sides of the KDP crystal

4 讨 论

实验研究表明,通过特殊设计的放电电极和薄的气体放电腔设计,采用氦气作为工作气体,对 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 口径的电光开关采用单脉冲过程

驱动方式是可行的。考虑开关晶体边缘应力和装配的影响,280 mm×280 mm 口径开关的较佳使用面积为 260 mm×260 mm。采用单脉冲过程驱动方式,使电光开关驱动源相对简单,同时由于气体电离时间较短,可减少放电电极材料溅射对电光开关中较为昂贵的开关晶体和光窗的污染,同时这种污染也会降低开关性能,例如透射率和损伤阈值等。因此,对于拟采用大口径电光开关的几十(甚至数百)束的大型惯性约束聚变激光驱动器,单脉冲过程驱动方式对于降低电光开关工程造价,提高其可靠性和稳定性具有较大的吸引力。随着以神光装置为代表的高功率激光系统进一步发展,光束口径将越来越大,对应的大口径电光开关也需定标到相应口径,若要对其采用单脉冲过程驱动技术,并达到全口径均匀的开关特性,将对开关的设计和工作参量选取提出更高的要求。

参 考 文 献

- 1 Mark A. Rhodes, B. Wood, J. J. DeYoreo *et al.*. Performance of large-aperture optical switches for high energy inertial-confinement fusion laser[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24): 5312~5325
- 2 Zhang Xiongjun, Zheng Kuixing, Wu Dengsheng *et al.*. Analyses on depolarization losses of plasma-electrode Pockels cell[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(Suppl.): 384~386 (in Chinese)
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
- 3 Zhang Xiongjun, Feng Guoying, Zheng Kuixing *et al.*. Parallel driving to plasma electrode Pockels cells[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(10): 1173~1176 (in Chinese)
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
- 4 H. S. Peng, X. M. Zhang, X. F. Wei *et al.*. Status of the SG-III solid state laser project[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3092**: 25~33
- 5 Bruno M. Van Wonterghem, John R. Murray, D. Ralph Speck *et al.*. Performance of the NIF prototype Beamlet [J]. *Fusion Technology*, 1994, **26**(3): 702~707
- 6 J. Gardelle, E. Pasini, B. Birel. A new regime of plasma-electrode Pockels cell operation for the laser megajoules project [C]. *Proc. IFSA*, 2001. 510~513