

文章编号: 100124322(2004)0921171204

等离子体电极电光开关驱动电源系统^X

冯宗明¹, 高平¹, 谢敏¹, 郑奎兴², 张雄军², 曹宁翔¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了通光口径为 300mm × 300mm 的等离子体电极电光开关驱动电源系统原理。该系统能产生时序上严格关联的两路幅值 3kV、脉宽为 500ms 预电离高压脉冲; 两路电压幅值为 7kV、电流峰值为 2kA 的阻尼大电流、低抖动主放电脉冲; 一路幅值为 12kV、脉宽 500ns 低抖动矩形高压开关脉冲。这五路高压脉冲通过 3 根同轴电缆加载到充有惰性气体的纵向普克尔盒两边的阴阳电极上, 对激光形成等离子体电极电光开关。

关键词: 等离子体电极; 开关脉冲; 主放电脉冲

中图分类号: TN136 **文献标识码:** A

等离子体电极电光开关主要应用于功率在几 TW 至几百 TW 的超高功率等级的激光系统中, 这种功率等级激光系统一般采用多通阵列、多程放大技术, 等离子体电极电光开关是实现这种多通阵列、多程放大技术的关键设备。等离子体电极电光开关具有高效率、开关速度快、精度高、通光口径大、通光面上均匀性好、激光破坏阈值高等独特优点, 它已成为研制新一代超高功率、高能激光系统理想的开关系统。

目前许多国家在积极进行 ICF 高功率激光装置方面的研究工作^[1,2], 相应对等离子体电极电光开关的研究一直非常活跃。美国 LLNL 从 20 世纪 80 年代初期开始进行等离子体电极电光开关的原理性研究, 至 90 年代中期先后研制成功口径为 260mm × 260mm 和 370mm × 370mm 的等离子体电极电光开关, 并成功应用于 Beam let, Nova 和 NIF 等系统中^[3]。

1 系统基本构成

通光口径为 300mm × 300mm 等离子体电极电光开关驱动电源系统原理如图 1 所示。该系统由几乎完全对称的左、右等离子体发生电路及一套开关脉冲形成电路以及一套多路高精度数字延时同步系统构成。其工作过程为: 在充有惰性气体的普克尔盒两边放电腔体的阴阳电极上施加电压幅度为 3kV、维持电流 20 ~ 30mA、脉宽 500ms 的预电离脉冲, 在阴阳电极周围分别形成连续的等离子体鞘, 该等离子体鞘对主放电脉冲在腔内形成大面积均匀离子体辉光放电非常必要, 它有利于减小主放电脉冲的延时时间抖动。预电离脉冲启

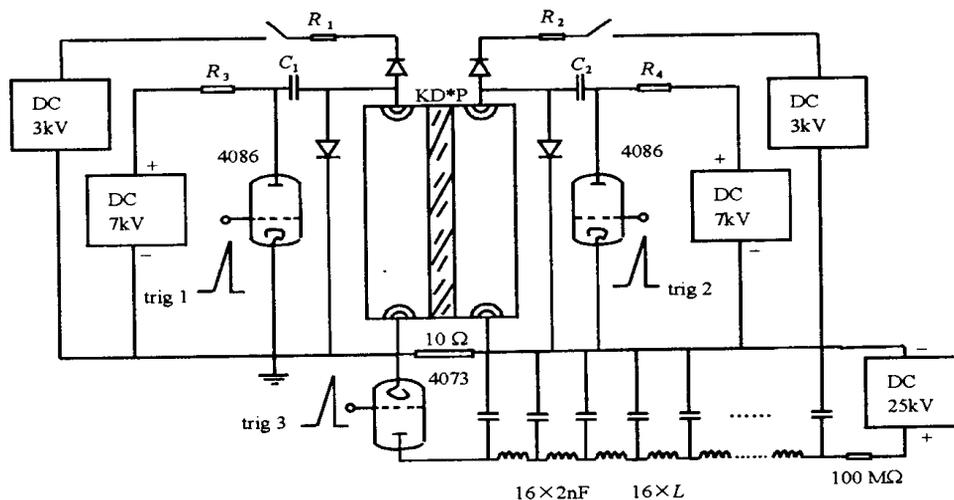


Fig. 1 Circuit schematic of plasma electrodes Pockels cells driving system

图 1 等离子体电极电光开关驱动系统原理图

X 收稿日期: 2003201208; 修订日期: 2004205218

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 中物院流体物理研究所发展基金资助课题 (FZ02013)

作者简介: 冯宗明 (1964 →), 男, 高级工程师, 从事脉冲功率技术研究; 绵阳 919 信箱 107 分箱。

动后 400ms,在普克尔盒两边放电腔体的阴阳电极上分别施加电流峰值为 0.5 ~ 2kA 的临界阻尼大电流放电脉冲,即主放电脉冲,在 KD³P 晶体的两面形成均匀、透明的等离子体,以该等离子体作为施加开关脉冲的电极,在主放电脉冲峰值处(此时普克尔盒两边等离子体浓度最高)于普克尔盒两边等离子体电极上施加一幅度为激光 90° 偏转电压 V 、波形为矩形的高压开关脉冲,它使入射激光偏转 90° 后通过后面的垂直偏转器,相当于激光开关开启,当无开关脉冲时相当于激光开关关闭^[4~6]。

1.1 多路高精度数字延时同步系统

多路高精度数字延时同步系统是等离子体电极电光开关驱动电源系统的控制中枢,它协调着 5 路高压脉冲按严格的预定时序输出(见图 2),同步机按预定的时序输出两路预电离触发脉冲、两路主放电触发脉冲和一路开关触发脉冲,同步系统延时步长 10ns,延时抖动小于 1ns。

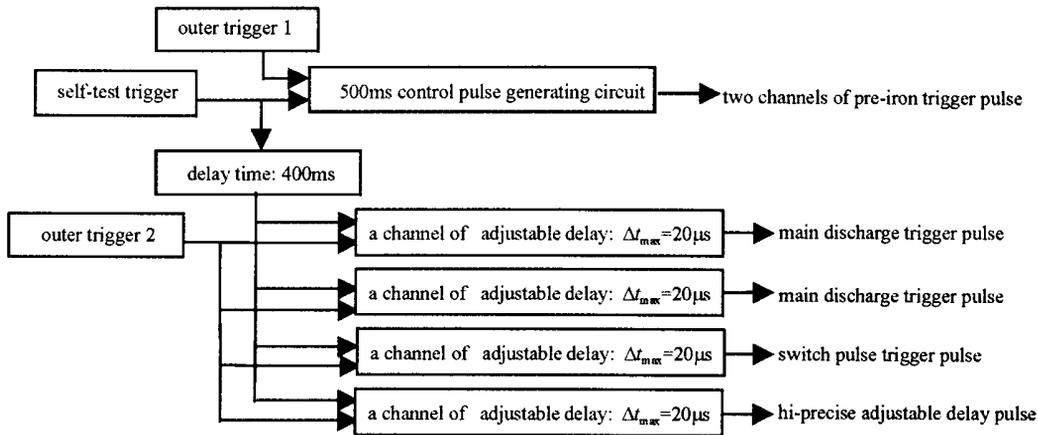


Fig. 2 Digital time delay system
图 2 数字延时同步系统输出脉冲时序图

1.2 等离子体发生电路

等离子体发生电路由预电离脉冲电路和主放电脉冲电路构成:预电离脉冲宽度为 500ms,系统采用高压继电器作开关器件,放电腔体在高压击穿下电阻仅为 1 ~ 2 Ω,加一适当阻值的电阻限流,将预电离电流限定在 50mA;主放电脉冲电流峰值为 2kA,系统采用氢闸流管作开关器件。主放电电路是典型的串联阻尼 R, L, C 放电电路,电路中的电感 L 包括线路分布电感,它的取值范围为 0.5 ~ 5μH,电阻 R 为外加电阻、接触电阻和放电腔体等效电阻三者总和(约为 0.5 ~ 5 Ω),放电脉冲电容 $C = 5μF$ 。理论分析可知,临界阻尼时

$$R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1}$$

放电回路的电流峰值 I_{max} 、电流达到峰值的时间 t_{max} 与电容 C 所充初始电压 $V(0)$ 、回路电感 L 和回路电阻 R 之间满足如下关系

$$t_{max} = \frac{2L}{R} \tag{2}$$

$$I_{max} = - \frac{2V(0)}{R} e^{-1} \tag{3}$$

对于实际电路脉冲电容 C 为定值 5μF,回路电感未知但固定,因此通过实验调节阻尼电阻 R 的取值,使得回路脉冲电流的峰值和达到峰值的时间在系统希望的范围内取值。实验测得等离子体放电电流波形如图 3 所示。

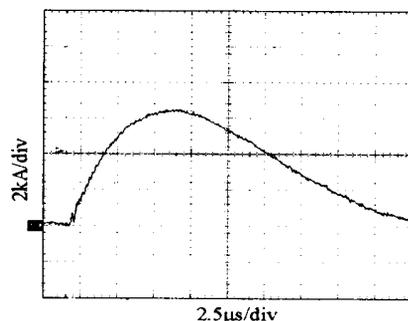


Fig. 3 Current waveform of plasma discharge in Pockels cell
图 3 等离子体放电电流波形

1.3 开关脉冲形成电路

开关脉冲形成电路原理如图 4 所示。

等离子体电极电光开关系统对驱动开关脉冲的要求是:输出脉冲为矩形波,前后沿陡,底部平,尾后波动小;时间抖动小;具有足够的脉宽和可调的电压幅度。300mm × 300mm 等离子体电极电光开关驱动电源开关

脉冲的负载是并在 KD^3P 晶体两端的 10Ω 纯电阻,输出开关脉冲幅度 $12kV$,脉冲前沿小于 $40ns$ 、后沿小于 $120ns$ 、平底宽 $500ns$ 、平底波动小于 2% 、尾后电压小于 5% 、相对于外触发的延时抖动小于 $10ns$ 。

大口径等离子体电极电光开关普克尔盒电光晶体两边放电腔中的惰性气体,在主放电脉冲的驱动下形成大面积均匀、透明的导电等离子体电极,这两个等离子体电极间不可避免地具有几百至上千 pF 的电容。系统采用人工形成线整形开关脉冲,这种方法的最大特点是它可以在一定范围内细调开关脉冲的波形,减小等离子体电极固有电容对开关脉冲波形前沿和平底的影响,使输出开关脉冲在前沿和平底上达到技术指标的要求。

人工形成线整形开关脉冲,人工形成线单级电容 C 、单级电感 L 和负载 R 在阻抗匹配时

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{4}$$

开关脉冲的前沿为

$$t = \sqrt{L/C} \tag{5}$$

根据要求的开关脉冲技术指标可估算出单级放电电容 $C = 2nF$,电感 $L = 0.2\mu H$ 。开关脉冲的脉宽要求人工形成线的级数为 16 级,人工形成线的总电容为 $32nF$ 。

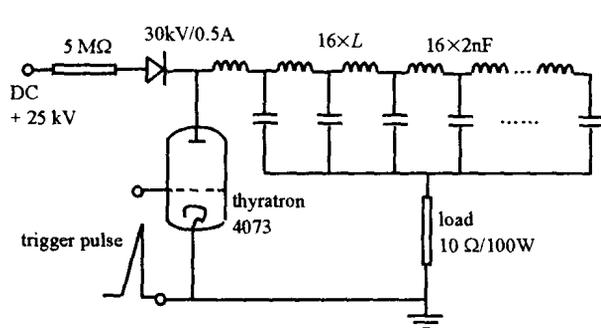


Fig. 4 Switching pulse forming circuit

图 4 开关脉冲形成电路

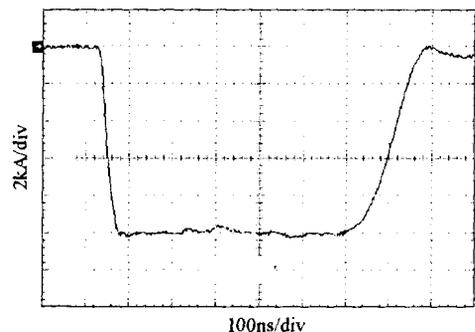


Fig. 5 Switching pulse waveform on 10Ω load

图 5 在 10Ω 负载上的开关脉冲波形

人工形成线单级电容是固定的 $2nF$,可改变的是各级电感量,调节人工形成线单级电感值将改变脉冲形成线的特性阻抗,在脉冲形成线的特性阻抗、传输电缆的特性阻抗以及终端负载阻抗三者完全相等的情况下,可得到前沿陡、底部平、尾后波动小的理想矩形高压脉冲,如图 5 所示。

2 系统输出脉冲延时抖动分析及测试结果

等离子体电极电光开关驱动电源系统输出五路高压脉冲:两路预电离脉冲、两路主放电脉冲和一路开关脉冲:预电离脉冲的脉宽达 $500ms$,因此对预电离电路,几个 ms 的延时时间抖动在系统中所产生的影响都可忽略不计;主放电脉冲的平顶宽度约为 $2\mu s$,开关脉冲到达时间是在主放电脉冲的峰值处,此时 KD^3P 电光晶体两边的等离子体浓度最大,系统以脉冲氘闸流管主放电开关,实验测得两路主放电脉冲相对于外触发的延时抖动均小于 $15ns$ 。

开关脉冲的延时抖动决定着等离子体电光开关系统的工作成败。如果开关脉冲的延时抖动大于开关脉冲输出矩形脉冲的平底,这意味着激光未到来时开关开启、激光到来时开关关闭,这使等离子体电极电光开关系统失去意义。开关脉冲的允许延时抖动受开关脉冲平底的严格限制。 $300mm \times 300mm$ 等离子体电极电光开关驱动电源系统输出开关脉冲的最大延时抖动小于 $5ns$ 。

3 研制结果

目前等离子体电极电光开关驱动电源系统已组装调试完成,达到要求的主要技术指标,已完成考机运行和可靠性实验,实现了连续触发 500 次无故障运行。 $300mm \times 300mm$ 等离子体电极电光开关驱动电源系统已成功通过等离子体电光开关考核实验。该系统驱动的等离子体电极电光开关的开关效率高达 98.9% 。

参考文献:

[1] Rhodes M A, Taylor J. Pulse power requirements for large aperture optical switches based on plasma electrode Pockels cells[R]. UCRL212

- 109579, 1993.
- [2] Pronko S, Deniz A V. Subnanosecond switching, plasma electrode Pockels cell for high2contrast imaging with partially coherent light[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(9):1659—166.
- [3] Henesian M A, Renard P A, Auerbach J M, et al. Use of beam propagation modeling of Beamlet and Nova to ensure a "safe" National Ignition Facility Laser system design[A]. Proc of SPIE[C]. 1997, **3047**:84—95.
- [4] 鲁敬平,吕传信,张雄军,等. 等离子体电极电光开关实验研究[J]. 强激光与粒子束,1997, **9**(1):72—78. (Lu J P, L ü C X, Zhang X J, et al. Experimental investigation on electro2optical switch using plasma electrodes. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(1):72—78)
- [5] 范敏,鲁敬平,吴关女,等. 驱动等离子体电极电光开关脉冲发生器研究[J]. 强激光与粒子束,1996, **8**(1):112—116. (Fan M, Lu J P, Wu G N, et al. Investigation of pulse generator driving electro2optical switch with plasma electrodes. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(1):112—116)
- [6] 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. (L ü C X, Lu J P, Zhang X J. Study of plasma electrodes used for electro2optical switch with a clear aperture size 300mm ×300mm. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(2):271—276)

Driving system of electro2optical switch with plasma electrodes

FENG Zong2ming¹, GAO Ping¹, XIE min¹, ZHENG Kui2xing², ZHANG Xiong2jun², CAO Ning2xiang¹

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 9192107, Mianyang 621900, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 9192988, Mianyang 621900, China)*

Abstract: This paper describes the principle of plasma electro2optical switch driving system. The system use plasma electro2optical switch system in high power ICF drivers based on large aperture size (for example, 300mm ×300mm) multipass amplifier array scheme. The systems can product strict sequential correlated five high2voltage strong2current pulses. These pulses are loaded on longitudinal Pock2els cell full of inert gas through three coaxial cables. As the electro2optical switch with plasma electrodes has unique advantage of high ef2ficient, fast for on/off, high precision, large aperture size and high laser damage threshold, it has become an ideal switch system in new generation of ultra2high power laser system.

Key words: Plasma electrode; Switching pulse; Main glow discharging pulse