

文章编号: 0258-7025(2004)10-1173-04

等离子体电极普克尔盒的并联驱动

张雄军^{1,2}, 冯国英², 郑奎兴¹, 吴登生¹, 鲁敬平¹, 董云¹, 郑建刚¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ² 四川大学光电系, 四川 成都 610064)

摘要 高功率大型惯性约束聚变(ICF)激光驱动器大多采用等离子体电极普克尔盒(PEPC)抑制多程放大器的自激振荡和隔离反激光。采用并联驱动技术有利于实现等离子体电极普克尔盒电光开关小型化和降低成本,并可提高激光系统可靠性和稳定性。等离子体电极普克尔盒的并联驱动包括等离子体电极的并联驱动和普克尔盒充电的并联驱动。分析了等离子体电极电光开关并联驱动的途径和问题,通过采用电阻隔离和二极管退耦措施实现了预电离并联驱动,进而实现了等离子体电极的同步驱动;通过调节开关脉冲发生器输出波形及传输电缆长度,可实现普克尔盒充电的并联驱动,并给出了实验结果。

关键词 激光技术;电光开关;并联驱动;等离子体电极普克尔盒;同步;退耦

中图分类号 TN 242 **文献标识码** A

Parallel Driving to Plasma Electrode Pockels Cells

ZHANG Xiong-jun^{1,2}, FENG Guo-ying², ZHENG Kui-xing¹,

WU Deng-sheng¹, LU Jing-ping¹, DONG Yun¹, ZHENG Jian-gang¹

(¹Research Center of Laser Fusion, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

²Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Plasma-electrode Pockels cells (PEPC) are used in large high-power laser driver for inertial confinement fusion (ICF) to restrain the self-oscillation produced by the multipass amplifier and isolate the back beams. With parallel driving technology, the miniaturization and low cost of Pockels cells driver can be realized. In this paper, the approaches and issues of parallel drive for PEPC electro-optical switches are described. The parallel drive electro-optical switches include the parallel driving of plasma discharge and switching crystal charge. With the isolate resistance and decouple diode, the pre-ionization of two Pockels cells are parallel driven successfully. Moreover the plasma electrodes of two Pockels cells are accuracy synchronously taken place. By adjusting the forming line of switch pulses and transmission cable length, the parallel charge of Pockels cells can also be achieved. And the experimental results are given in the end.

Key words laser technique; electro-optical switch; parallel drive; plasma-electrode Pockels cell; synchronization; decouple

1 引言

为了获得高输出通量,用于惯性约束聚变(ICF)研究的大型激光驱动器采用了大量的大口径光学元件,造价昂贵。因此,避免大口径光学元件受到损坏尤其重要。而等离子体电极电光开关^[1,2]采用气体放电产生的等离子体作电极,可以做到大口

径,并具有低损耗、高空间均匀性、高损伤阈值,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^[3,4]。对于中等口径,等离子体电极电光开关相对于传统的环电极普克尔盒同样具有明显的优势,因此,中等口径的等离子体电极电光开关已经用于光束反转器,避免多程放大器产生自激振荡^[5]。从现有的技术看,驱动一

收稿日期:2003-06-09;收到修改稿日期:2003-10-20

基金项目:国家高技术惯性约束聚变领域(842120)资助项目。

作者简介:张雄军(1973—),男,助理研究员,主要从事光开关技术研究。E-mail:stone_zxj@163.com

台等离子体电极普克尔盒需要 2 台等离子体脉冲发生器和 1 台开关脉冲发生器。对于几十甚至几百路的巨型激光器系统,驱动源就显得比较庞大,如能实现等离子体电极普克尔盒的并联驱动,将成倍减少驱动源的数量,从而减少电源系统的放置空间达到小型化的目的并降低造价,还将降低电光开关的故障率,提高系统的可靠性和稳定性。

2 并联驱动原理分析

等离子体电极普克尔盒主体结构为三层夹心结构,中间为电光晶体,两边为独立、充有低压工作气体的放电腔,每一放电腔有一对能够独立驱动气体放电的电极。工作时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,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,对电光晶体充电,若所加高压为半波电压,将使入射线偏振光的偏振方向旋转 90° 。由此可知,等离子体电极普克尔盒的驱动分为两步,首先是驱动气体放电形成等离子体电极,其次是高压脉冲发生器通过放电等离子体对普克尔盒晶体充电。因此,实现等离子体电极普克尔盒的并联驱动需要解决两方面的问题,即等离子体电极的并联驱动和普克尔盒充电的并联驱动。

2.1 等离子体电极的并联驱动

实现等离子体电极的并联驱动,就是由一台等离子体脉冲发生器驱动多台气体放电腔,使其击穿并形成具有高电导率、均匀的等离子体。众所周知,当高压脉冲加于普克尔盒放电腔的阴极或阳极时,气体的击穿是有相当的延迟时间的,延迟时间与工作电压、气压密切相关,即使在完全相同的工作条件下,击穿延时也不是稳定的,因此,当采用并联驱动时,必须考虑击穿延时不稳定带来的问题,即当其中一个普克尔盒放电腔首先击穿时,阴极上的电压突然降低,如果引起并联的其余普克尔盒放电腔阴极上的电压也突然降低,那么将导致这些普克尔盒放电腔不能产生放电等离子体。因此,实现放电并联驱动的必要条件就是阻止某个普克尔盒放电腔气体击穿时阴极上的电压降在击穿延时抖动范围内,传到其余并联的普克尔盒放电腔。

图 1 为等离子体电极并联驱动电路原理图,采用传输电缆隔离。主要由电容器 C , 氢闸管 VE4018, 阻尼电阻 R_d , 传输线和等离子体放电腔组

成。当氢闸管导通后,电压脉冲同时到达等离子体放电腔 cavity 1 和 cavity 2,如果 cavity 1 首先击穿,则 A 点电压将降低,相当于一相反极性的电压波沿传输线 Z_1 反向传播,进而经传输线 Z_2 传播到 B 点,如果沿两根电缆传播的时间之和大于气体击穿延时抖动,则电压降落尚未传到 cavity 2 之前,它就已经击穿了,因而不会影响等离子体放电的产生,否则将引起 cavity 2 阴极电压降低,导致 cavity 2 不能击穿。因此采用传输电缆隔离实际上就是时间隔离。根据这个原理,可以确定隔离电缆的长度,即电缆 2 倍电长度大于气体击穿延时抖动。

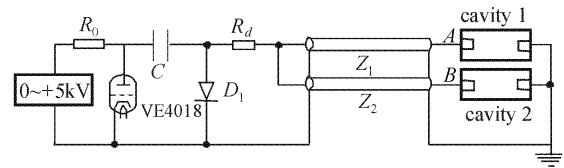


图 1 等离子体电极并联驱动电路原理图

Fig. 1 Principle of parallel driving plasma electrode

为了避免一腔单独放电,还可以考虑采用电感隔离,即在每个普克尔盒放电腔阴极上串联一个隔离电感,取隔离电感远大于主回路电感,当其中一个放电腔首先击穿时,在电流的上升沿陡峭部分电压主要降在它的隔离电感上,而不影响其余普克尔盒放电腔阴极上的电压,因此在电流波形前沿远大于气体击穿延时抖动条件下,仍可保证其余普克尔盒产生等离子体放电。为了补偿隔离电感引起放电周期增大和电流幅值减小等不利影响,可考虑取比电缆隔离方案小的储能电容,并相应提高工作电压,使放电周期和通过每个放电腔的电流幅值保持在合适的范围。

同电缆隔离方案相比,此法相对复杂些,除了增加储能电容,减小阻尼电阻,提高预电离电源电流输出能力外,对于起到有效隔离作用电感数值还需通过实验确定。此外,在普克尔盒上串接电感又要占据一定的空间,有碍实现紧缩结构。

2.2 普克尔盒充电的并联驱动

用一台开关脉冲发生器为 2 个普克尔盒并联充电,电路如图 2 所示, C_{DKDP} 为开关晶体的等效电容,与其并联的是终端匹配电阻。该实验装置可由单个普克尔盒充电用的开关脉冲发生器改装而成。若将仿真线特性阻抗保持不变,则开关脉冲脉宽 100 ns 不变,连接每个普克尔盒的传输电缆阻抗由原来 25Ω 改为 50Ω ,终端匹配电阻也改为 50Ω ,使

普克尔盒的充电时间增加 1 倍,由原来 8 ns 增加至 16 ns,由于开关脉冲上升时间为 25 ns,因此开关上升时间只是略有增加。

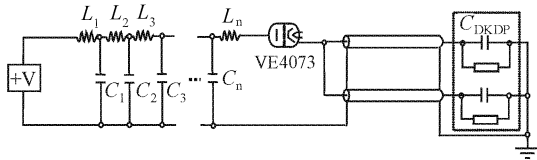


图 2 普克尔盒充电并联驱动电路示意图

Fig. 2 Principle of parallel charging the electro-optical crystals

传输电缆长度应满足两方面要求:1) 为了实现各普克尔盒之间的有效隔离(例如对击穿导致短路的隔离),应取传输电缆 2 倍电长度大于开关脉冲宽度。2) 为了把阻抗失配产生的反射与主脉冲有效分离,例如使反射脉冲在主脉冲后一个脉冲宽度出现,则应取传输电缆电长度大于开关脉冲宽度。

3 实验结果和讨论

采用图 1 所示电路,利用一个等离子体脉冲发生器使两个充有合适工作压力的放电腔里的气体电离,产生均匀、高电导率的等离子体。传输电缆长度为 25m。我们发现总是一个腔放电,而另一个腔不

放电。说明两腔放电延时抖动较大,大于电缆 2 倍电长度。使用电源对一个放电腔进行放电实验,观察气体的击穿延时抖动,发现气体击穿极不稳定,两腔放电不平衡,一腔放电电流大于另一个腔的放电电流。延时 t_d 大多都超过 $1 \mu s$,其抖动 t_j 也都大于 $1 \mu s$,如图 3 所示。Ch3 和 Ch4 为两腔放电电流波形,Ch1 为其中一腔的放电电压波形,由于在气体击穿延时抖动大于电流波形前沿,因此,只采用电感隔离方案不能保证由一个等离子体脉冲发生器驱动的两个普克尔盒气体放电腔产生均匀、高电导率的等离子体。

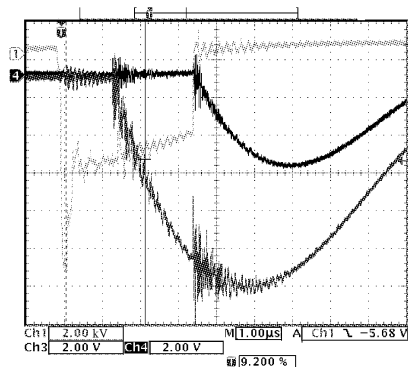


图 3 无预电离时的放电电流波形

Fig. 3 Discharge current waveforms without pre-ionization

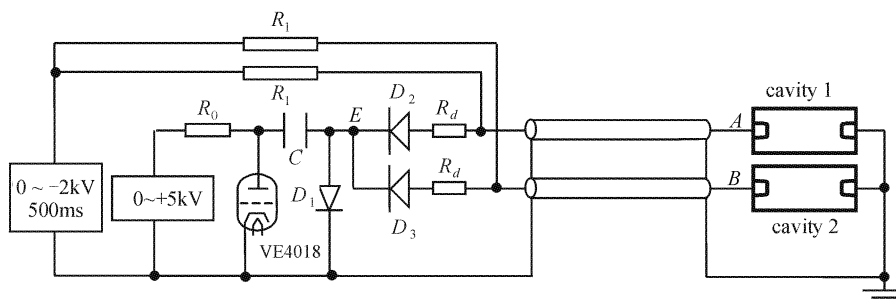


图 4 有预电离条件下等离子体电极放电并联驱动电路示意图

Fig. 4 Circuit of parallel drive for plasma electrode discharge with pre-ionization

为了减少气体击穿统计延迟时间,增大雪崩电子流,可考虑增加预电离措施。预电离采用脉宽为 500 ms 的脉冲电源,但在增加预电离后,发现同样存在隔离问题,并且由于预电离的击穿延时更长,若一腔首先放电,则另一腔大多不能放电。因此,对等离子体电极并联驱动电路进行了改进,如图 4 所示。在预电离回路接入主放电回路之前,首先分为两路,每一路分别接入 1 个电阻,在主放电回路中接入高压二极管 D_2 和 D_3 , 隔断两路预电离之间的通路,如

果 cavity 1 首先击穿,则 A 点电压将降低,由于 D_2 的存在,并不能引起 E 点电压降低,因此 B 点仍处于高压状态,有效避免了一腔放电导致另一腔不能正常放电。另外,由于主放电需经 D_2, D_3 对气体腔放电,因此 D_2, D_3 需选择高压大电流二极管。当应用新的电路后,获得了稳定的两腔同步放电,如图 5 所示。Ch1 为一腔放电电压波形,Ch3 和 Ch4 分别为由一台等离子体脉冲发生器驱动的两个气体放电腔的放电电流波形。

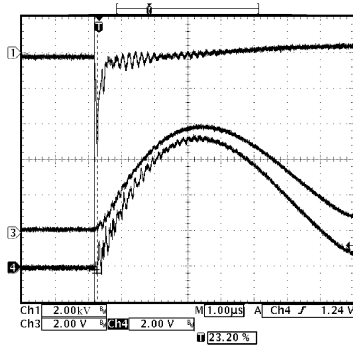


图 5 有预电离时的放电电压及电流波形

Fig. 5 Discharge current and voltage waveforms with pre-ionization

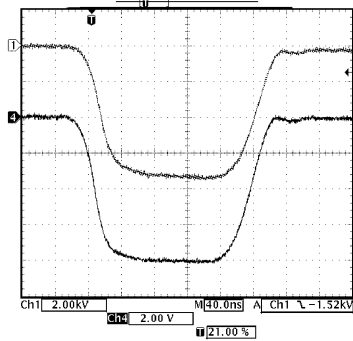


图 6 并联驱动的开关脉冲波形

Fig. 6 Switching pulses of parallel charge switching crystal

对于普克尔盒充电的并联驱动,按图 2 所示电路,由于传输电缆终端并联了两个普克尔盒,其等效电容增大,终端阻抗发生变化,根据阻抗匹配原则,对开关脉冲形成线进行了适当的调整,在气体腔放电形成等离子体条件下,用示波器和高压探针分别在 2 个终端匹配电阻 R 两端测量了普克尔盒晶体充电电压(即开关脉冲)波形,如图 6 所示,其波形与用一台开关脉冲发生器驱动一个普克尔盒所测得的开关脉冲波形相比,前沿和平顶基本一致。

4 结 论

等离子体电极普克尔盒的并联驱动包括等离子体电极的并联驱动和普克尔盒充电的并联驱动。采用 1 台等离子体脉冲发生器驱动 2 个普克尔盒放电腔进行气体放电而形成等离子体电极,由于气体放电的不稳定性,其关键在于当一腔先击穿的情况下,使其余普克尔盒放电腔在容许的时间内实现气体击穿。通过采用电阻隔离和二极管退耦措施实现了预电离并联驱动,进而获得了稳定同步的放电等离子体。通过对开关脉冲形成线进行适当调整,实现了普克尔盒充电的并联驱动。主要对 1 套驱动源驱动 2 个普克尔盒进行了分析和实验研究,在此基础上,利用 1 套驱动源驱动多个普克尔盒也将成为可能。

等离子体电极普克尔盒的并联驱动有利于降低电光开关驱动源成本,并提高其可靠性。

参 考 文 献

- 1 M. A. Rhodes, B. Woods, 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 Xiong-jun, Zheng Kui-xing, Wu Deng-sheng *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
- 3 H. S. Peng, X. M. Zhang, X. F. Wei *et al.*. Status of the SG-III solid state laser project [C]. *SPIE*, 1998, **3492**:25~33
- 4 B. M. Van Wonterghem, J. R. Murray, D. R. Speck *et al.*. Performance of the NIF prototype beamlet [J]. *Fusion Technology*, 1994, **26**:702~707
- 5 Zhang Xiong-jun, Zheng Jian-gang, Zheng Kui-xing *et al.*. PEPC electro-optical switch used in beam reverser of multi pass amplifier [J]. *High power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(2):150~154
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