

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0229-04

# 等离子体电极电光开关及其应用方法研究

郑奎兴 郑建刚 冯斌 董云 鲁敬平 魏晓峰 张小民

(中国工程物理研究院等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

**摘要** 等离子体电极电光开关是大口径高功率固体激光器的关键技术之一。利用厚度为 15 mm 的 KDP 晶体研制了口径为 240 mm×240 mm 的金属壳体开关, 测试结果表明其主要指标达到了驱动器总体的要求。对目前的几种应用方法进行了对比研究。

**关键词** 等离子体电极, 电光开关, 普克尔盒, 驱动器

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A

## Research on Plasma-electrode Electro-optic switch and Application

ZHENG Kui-xing ZHENG Jian-gang FENG Bin DONG Yun LU Jing-ping

WEI Xiao-feng ZHANG Xiao-min

(National Key Laboratory for Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract** Plasma-electrode electro-optic switch is one of key technologies for largely aperture high power solid laser. A metallic chamber plasma-electrode electro-optic switch with clearly aperture of 240 mm by 240 mm with a KDP crystal slab which is 15mm thickness. Its switch efficiency is larger than 98%. Comparing to the other switch, the compounding model has better performance.

**Key words** plasma-electrode, electro-optic switch, Pockls cell, driver

## 1 引言

自 80 年代初 L. Goldhar 和 M. A. Henesian 等人发明等离子体电极电光开关以来<sup>[1]</sup>, 经过近 10 年的技术研究, 1994 年利弗莫尔实验室的科学家在 Beamlet 上成功完成了其工程实用性演示<sup>[2]</sup>。等离子体电极电光开关由于能够制作成大口径, 特别适用于大口径高功率固体激光器, 被公认为是新一代 ICF 驱动器理想的开关部件, 世界上几台计划建造的驱动器都将采用该项技术。

为了适应国内 ICF 驱动器研制的需要, 我们从 1994 年开始从事该项技术的研究, 先后开展了原理实验<sup>[3]</sup>、关键单元技术的研究工作<sup>[4,5]</sup>, 目前已经完成了 240 mm×240 mm 口径实验装置的研制工作并成功用于多程放大系统的实验考核。本文介绍了等离子体电极电光开关的基本原理及结构, 大口径金属壳体普克尔盒的性能指标; 结合等离子体电极电光开关的特点, 对目前流行的几种使用方法进行了比较。

## 2 基本原理

等离子体电极电光开关包括等离子体电极普克尔盒和检偏器件, 其中等离子体电极普克尔盒属于纵向应用型普克尔盒。晶体为垂直于 Z 向切割, 传输通过的光波法线方向与 Z 轴平行, 工作时在 Z 轴方向加电场, 光在晶体中的两个偏振分量的振动方向分别平行于两个感应主轴 X' 和 Y', 它们的折射率分别为(1)式中的  $n'_1$  和  $n'_2$ 。这两个偏振分量在晶体中以不同的折射率, 即不同的速度沿 Z 方向传播, 当它们通过长度为  $l$  的晶体后, 它们之间的位相差  $\delta$  可以由折射率之差来计算。

$$\Delta n' = n'_2 - n'_1 = \left( n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{63} E_z \right) - \left( n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{63} E_z \right) = n_0^3 \gamma_{63} E_z \quad (1)$$

则相应的位相差为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n'_0 l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{63} E_z l \quad (2)$$

因为  $E_z l$  为光线径迹两端的电势差, 即电压  $U$ , 因此上式可以表示为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{63} U \quad (3)$$

从(3)式可以看出,位相延迟与晶体两端所加的电压成线性关系,即可以通过调节电压来控制输出光线的偏振方向,当电压达到一定的幅值时,输出光束的偏振方向相对输入光束将偏转 $90^\circ$ ,结合偏振器件即可实现对光束的开关控制;此外,位相延迟与光线在晶体中传输路径上电场的 $Z$ 分量积分有关,中间过程的差异性对最后的结果没有影响,即位相延迟与晶体的厚度无关。

实际系统中的光束总有一定的口径,要使所有的光线都得到同样的位相延迟和偏转,根据(3)式我们不难看出,加到整个通光口径上的电压必须一样。在传统的普克尔盒研究中,为了解决这一问题先将端面电极优化为环状电极,并采用较厚的晶体结构(纵横比大于1:1),这种结构尽管在许多系统中得到了应用,但从根本上讲解决不了全口径电压均匀的问题,口径越大越困难;此外,对于大口径情况,晶体的吸收损耗和对光束质量的影响将会变得非常严重,对于口径达到200 mm~300 mm口径的系统,根本就不可能应用。

等离子体电极普克尔盒利用稀薄气体辉光放电形成的等离子体作为电极,克服了传统金属电极不透明的问题,同时在晶体的两端面之间构成了理想的平板电极场,即均匀的电场,从而确保在整个通光区域晶体两端面之间的电势差一样,晶体的厚度可以非常薄。

### 3 等离子体电极普克尔盒结构及关键技术

等离子体电极普克尔盒包括三大部分,普克尔

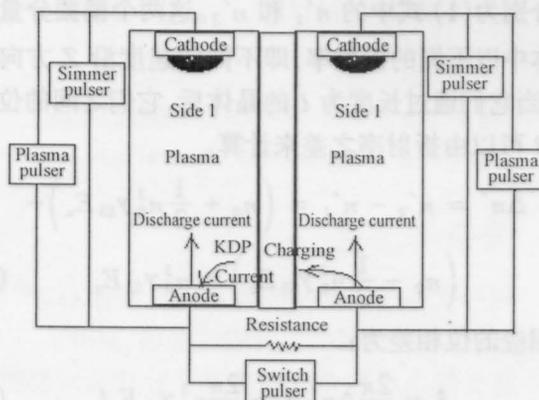


图1 等离子体电极结构示意图

Fig. 1 The sketch map of plasma electrode Pockels cell

盒主体、驱动源组件和抽排气系统,其主体结构及驱动源连接示意图如图1所示。

主体为三层夹心面包结构,中间为开关晶体,两边为独立的封闭等离子体放电腔,每一放电腔有一对能够独立驱动气体放电的电极。工作时首先由开关脉冲发生器驱动放电腔中的气体放电,放电腔中充满了准中性的等离子体,适当调节气体压强和放电电流,等离子体气体可以达到非常高的电导率(电阻率最小),其电学特征相当于一块平板金属电极。

驱动源组件包括2台预电离等离子体脉冲发生器、2台主放电等离子体脉冲发生器和1台开关脉冲发生器。预电离电源提供较长的脉冲,使气体产生初步的电离并建立初步的初始电子分布,从而有利于主放电等离子体的时空稳定和均匀;主放电是在预电离脉冲的基础上提供一个更强的放电电流,使气体的离化度达到最高;而开关脉冲发生器则是将电导率很高的两个放电腔中的等离子体平板作为电极,向这两个电极充电并使两电极之间(开关晶体两端面)达到一定的电压幅值。

抽排气系统用机械泵作前级泵,涡轮分子泵作主抽泵。普克尔盒工作时抽气系统处于运转状态,调节系统进气量使放电腔中的气压达到理想的工作状态。

等离子体电极电光开关涉及光机电的综合应用,其关键技术包括:大面积均匀等离子体的形成、高压脉冲成形、抗干扰精密同步系统和放电腔绝缘技术等。

### 4 240 mm×240 mm 口径金属壳体普克尔盒

口径的选择是根据当时驱动器光束的设计口径,采用金属壳体的目的是为了减小普克尔盒的体积和增加壳体刚度,以便为今后直接过渡到驱动器需要的阵列开关作准备。图2为金属壳体等离子体电极普克尔盒外观照片,包括普克尔盒主体和三维旋转调节支架,外观尺寸为430 mm×430 mm×240 mm,采用了硬铝作壳体,采用硬质阳极化技术在壳体的表面形成一层80 μm的阳极化膜用作等离子体的绝缘。开关晶体KDP尺寸为240 mm×240 mm×15 mm,镀增透膜和防潮膜,晶体用硅胶粘接于可加工陶瓷框架上;KDP晶体两侧为放电腔,放电腔尺寸为290 mm×290 mm×50 mm;电极长宽为290 mm×40 mm,在放电腔中呈几何对称放置,

电极加有绝缘的电极套;阴极采用跑道式平面磁控电极,磁场强度为 0.5 T,表面是一层石墨;腔的外侧为 300 mm×300 mm×30 mm 的 K9 光窗,镀增透膜。放电电极安装于放电腔的两侧,在顶部有进气孔和真空测量孔,抽气孔位于普克尔盒的右下角(阳极侧)。真空机组配置选用北京科仪中心生产的 400I 涡轮分子泵为主抽泵,成都南光机械厂生产的 8I 机械泵为前级泵。普克尔盒内基础真空达到  $10^{-2}$  Pa 以下。在真空管路和普克尔盒之间接一段隔直管道(DC breaker),用于直流电压隔离,隔直管道内装有流导隔离器,用于防止普克尔盒的对地泄漏。

利用光束口径为 220 mm×220 mm 的测试系统对普克尔盒的主要特性进行了测量,光路如图 3 所示。测量时普克尔盒加四分之一波电压,使光束两次通过普克尔盒后偏振方向偏转  $90^\circ$ ,测量结果如下:

全口径的单程静态透过率:  $T_0 = 90\%$ ;

全口径的单程静态消光比:  $ER = 118$ ;

全口径平均开关效率:  $SE = 98.2\%$ ;

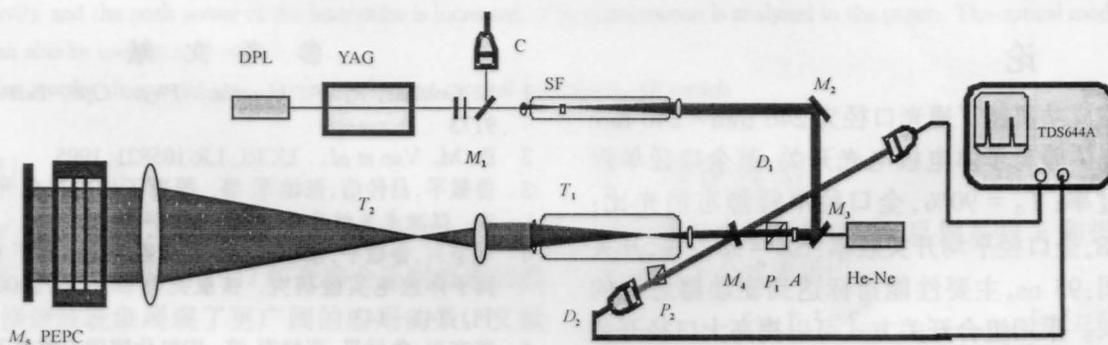


图 3 电光开关特性测量示意图

Fig. 3 The schematic layout of electro-optical switch speciality test

## 5 应用方法

从目前的方案来看,主要分为三种类型,一种是美国的 NIF 装置和英国的 100 TW 装置,在四程放大腔中插入普克尔盒和大口径偏振片,位于空间滤波器与腔镜之间,远离片放;偏振片放置方向是反射平行偏振光,光束四次通过普克尔盒,普克尔盒加半波电压,光束每通过一次偏振方向偏转  $90^\circ$ ,主要用于控制光束进出四程放大腔。第二种是法国 LMJ 装置的用法,同样是在四程放大腔中插入普克尔盒和大口径偏振片,偏振片放置方向是反射平行偏振光,光束四次通过普克尔盒,普克尔盒加半波电压,光束每通过一次偏振方向偏转  $90^\circ$ ,但它主要用于

开关上升时间: 95 ns

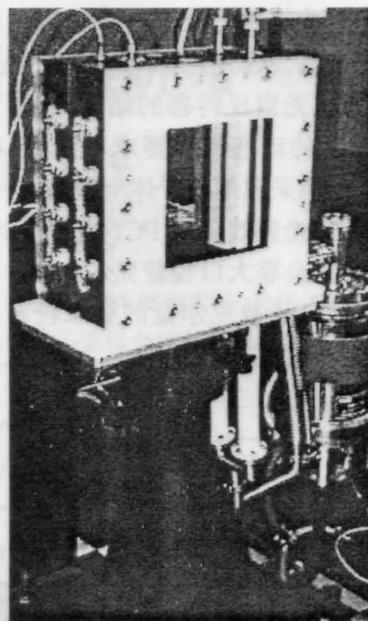


图 2 240 mm×240 mm 口径金属壳体普克尔盒照片

Fig. 2 The photograph of 240 mm×240 mm Pockels cell with metallic chamber

四程放大腔光路的通断控制。第三种方法是我国提出的组合开关结构,在光束反转器处用口径较小的普克尔盒和偏振片,在片放和腔镜之间插入大口径的普克尔盒,主要用于反向激光的隔离。大口径普克尔盒加四分之一波的电压,光束两次通过普克尔盒偏振方向偏转  $90^\circ$ ,利用以布氏角放置的片放对 S 光有较大反射率的特点实现对光束的隔离。该种方案的突出优点是不需要大口径偏振片,普克尔盒工作电压可以下降一半,对提高电源系统的稳定性和可靠性有利,对开关的动态特性要求不高,可以降低研制难度。

组合开关及其应用方式如图 4 所示,小口径开关 PC1 有两种工作模式,即退压式工作和升压式工

作。PC1 退压式工作时光束反转器中的两块偏振片平行放置,主脉冲放大前数十微秒前 PC1 加直流高压,隔断系统光路,从而抑制寄生振荡。退压式工作的优点是可简化光束反转器的结构,有利于系统准直调整,对 PC1 的动态特性要求不高;但存在明显的不足,PC1 不能采用等离子体电极结构,同时还要注意抑制退压式光弹效应对 PC1 透过率的影响,反射激光的隔离完全靠大口徑普克尔盒和片放组成的隔离系统,对大口徑普克尔盒的要求较高,此外,由

于片放有较强的增益,因此对反射激光的隔离比不高,对前端的器件存在损伤风险。PC1 升压式工作时光束反转器中的两块偏振片处于正交放置,使主脉冲放大前后系统都处于关断状态,仅当主脉冲传输通过光束反转器 BR 时,PC1 工作且加一个二分之一波电压,使主脉冲通过。该种方式的特点是光路的隔离比主要决定于两块正交偏振片的性能,大口徑电光开关主要抑制反激光到达反转器处的强度,以免 PC1 损伤。

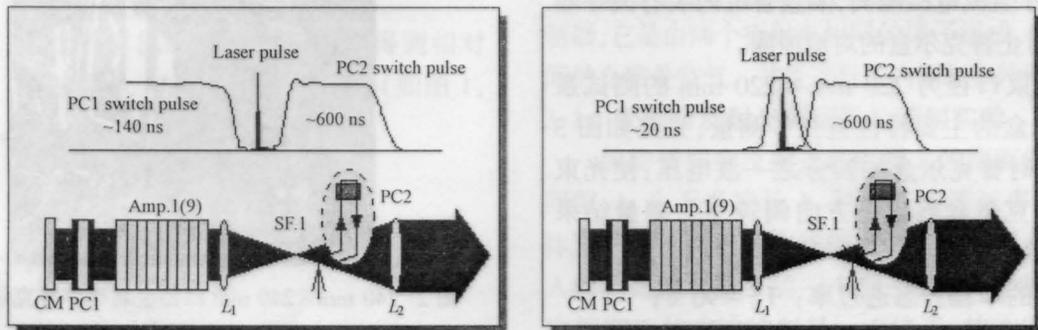


图 4 组合开关及其工作模式

Fig. 4 The working modes of the compounding switch

## 6 结 论

我们成功研制了通光口径为 240 mm×240 mm 的金属壳体等离子体电极电光开关,其全口径单程静态透过率:  $T_0 = 90\%$ , 全口径单程静态消光比:  $ER = 118$ , 全口径平均开关效率:  $SE = 98.2\%$ , 开关上升时间: 95 ns, 主要性能指标达到驱动器总体的技术要求。采用组合开关方式可以提高大口徑开关系统的稳定性、降低系统造价和技术难度;其中小口径开关采用升压方式工作可以达到较高的系统隔离比并进一步降低对大口徑开关的要求。

## 参 考 文 献

- 1 L. Goldhar, M. A. Henesian. *Phys. Opt. Lett.*, 1984, 9:73
- 2 B. M. Van *et al.*. UCRL-LR-105821, 1995
- 3 鲁敬平, 吕传信, 张雄军 等. 等离子体电极电光开关研究. *强激光与粒子束*, 1997, 9:72~78
- 4 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. *强激光与粒子束*, 2000, 12(增刊):141~143
- 5 郑奎兴, 鲁敬平, 张雄军 等. 阳极化膜用于等离子体电光开关放电腔绝缘模拟研究. *强激光与粒子束*, 2000, 12(增刊):185~188