文章编号: 0253-2239(2010)06-1772-04

20 mm 孔径重复频率等离子体电光开关研究

张雄军 吴登生 张 君 郑建刚 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 等离子体普克尔盒可以采用薄晶体,是大口径平均功率激光器理想的光开关器件。采用有限元方法,分析 了 20 mm 口径重复频率等离子体电光开关的热光效应,模拟计算了在平均功率负荷下,3 mm 厚的 DKDP 晶体由 于热致双折射引起的退偏损耗为 0.16%。采用电容分压技术,实现了基于 DKDP 晶体的等离子体电光开关的单 脉冲驱动,通过针对重复频率等离子体普克尔盒的优化设计,研制完成了 Φ20 mm 口径、10 Hz 重复频率等离子体 电光开关样机,静态透射率 97.2%,开关效率 99.8%,开关上升时间 11 ns。 关键词 光学器件;电光开关;等离子体普克尔盒(PPC);重复频率

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1772

Research on Repetition Rate Plasma Pockels Cell with 20 mm Aperture

Zhang Xiongjun Wu Dengsheng Zhang Jun Zheng Jiangang Tian Xiaolin (Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Plasma Pockels cell, which can use a thin crystal to perform the uniform electro-optical effect, is an ideal component as average-power optical switch with large aperture. With average power load, the thermal effect of the DKDP crystal is analyzed by use of finite element methods. With 5 J/10Hz laser irradiation, the depolarization loss on 3 mm thickness DKDP is 0.16%. A repetition rate plasma Pockels cell of 10 Hz with Φ 20mm aperture has been fabricated. It is optimized with the limited space of repetition rate diode pumped laser. The specificationes of the plasma Pockels cell are static transition of 97.2%; switching efficiency of 99.8%, and the switch rising time of 11 ns. **Key words** optical devices; electro-optical switch; plasma Pockels cell (PPC); reptition rate

1 引 言

平均功率激光器中,若采用常规纵向应用的环 电极普克尔盒进行调 Q 和隔离,为获得较好的光学 均匀性,要求其电光晶体纵横比大于 1,通光口径为 数厘米的普克尔盒,其开关晶体将由于严重的光吸 收导致晶体大的温升和温度梯度,使折射率发生变 化,引起透射光束的热退偏和波前畸变。Kurtev 等^[1]实验观测了环电极普克尔盒 Q 开关的热光退 偏及其对振荡器输出能量的影响,结果表明在开关 的两种状态都存在退偏,并对振荡器输出产生影响。 等离子体电光开关^[2,3]采用辉光放电形成的等离子 体实现大口径的均匀电场,从而可通过薄晶体的电 光效应研制大口径电光开关,减少了由于开关晶体 光吸收引起的热问题,因此,将成为中等口径至大口 径的平均功率光开关的理想选择。 等离子体电极电光开关现有的两种工作模式在 重复频率应用方面均有其局限性^[4,5]。单脉冲过程 驱动电光开关技术^[6~10]依靠的是高脉冲电压引起 工作气体场致击穿,从而形成等离子体电极并同时 对普克尔盒充电,因此使用的是具有较高半波电压 的 KDP 晶体,但由于 KDP 晶体具有较大的光吸收 系数(~6% cm⁻¹),不适宜平均功率应用。在传统 的等离子体电极电光开关模式下,可以使用 DKDP 作为开关晶体,但开关每次工作时,气体放电时间在 毫秒量级,长时间的气体离子对放电阴极的轰击将 引起阴极温度升高,进而加热开关晶体,引起在光学 上的热畸变。综上所述,要实现等离子体电极电光 开关重复频率应用,一方面需对开关晶体在平均功 率负荷下的热效应进行分析;另一方面,需实现在单 脉冲工作模式下采用 DKDP 作为开关晶体,即在较

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-12

作者简介:张雄军(1973一),男,副研究员,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: zhang. xiongjun@163. com

低电压(单脉冲过程 DKDP 开关半波电压的 1/2 左 右)条件下实现空间上均匀、时间上稳定的单脉冲气 体放电。

2 重复频率等离子体开关的热光效应

用于高平均功率的开关晶体,除了要求其线性 吸收系数小、热传导系数大以外,还要考虑其光伤阀 值和可用电光系数的大小。要选择合理的晶体取 向,以得到较大的可用电光系数,将开关激励电压控 制在适当的水平。近年来用于高平均功率调 Q 电 光开关的晶体包括:LiNbO3,LiTaO3,BBO,KTP和 RTP。LiNbO₃的吸收系数 ($\sim 0.1\%$ cm⁻¹)比 DKDP低,但电光系数小(约比 DKDP 小一个量 级),而且光伤阀值也太低($\sim 250 \text{ MW/cm}^2$, $\lambda =$ 1.064 μm,10 ns),加之在重复频率大于1 kHz 时有 压电效应产生的声冲击对双折射的影响,因此不适 用于平均功率高于 100 W。虽然 LiTaO3 的光伤阀 值高一倍,也没有压电效应,但仍不能满足高平均功 率运用。BBO的光伤阀值高得多($\sim 20 \text{ GW/cm}^2$), 但其电光系数太小,在重复频率大于10 kHz 也存 在压电效应,而且口径较小,仅能用于紧凑的二极管 抽运激光器。相比之下,KTP和 RTP 倒是有用的 高平均功率电光材料。它们是双轴晶体,线性吸收 系数比 DKDP 低得多。如 KTP 为 0.01% cm⁻¹, 光 伤阈值可以达到1GW/cm²,在重复频率高至30kHz 无压电冲击,且电光系数较大(常用的两种 $\gamma_{cl} \approx$ 28 pm/V, $\gamma_{c2} \approx 22$ pm/V)。RTP 的光伤阀值比 KTP 高一倍,因此有更大的温度稳定范围(25 ℃~ 125 ℃)。目前 KTP 和 RTP 在晶体尺寸上仍有一 定限制,其横向最大尺寸在1 cm 左右。

虽然 DKDP 的线性吸收系数比以上几种晶体 都大,为 0.5% cm⁻¹。但由于已经发展的大尺度 KDP 和 DKDP 晶体的生长、金刚石车削以及减反镀 膜技术,使得 DKDP 仍是目前最常用的电光晶体,成 为制造较大口径平均功率普克尔盒的首选电光晶体。

重复频率工作等离子体开关的热问题主要来源 于普克尔盒中开关晶体对激光的线性吸收产生的热 致退偏效应,退偏损耗导致了重复频率等离子体普 克尔盒性能下降。设电光晶体的线性吸收系数为 α,那么晶体中的热功率密度为

$$q_{v} = \alpha I(x, y) \exp(-\alpha z), \qquad (1)$$

式中 *I*(*x*,*y*)为激光束功率密度,*z*为激光束传输方向。对于较薄的 DKDP 晶体,由于电光晶体的线性光吸收系数很小,(1)式可近似为

$$q_{\mathbf{x}} = \alpha I(x, \mathbf{y}). \tag{2}$$

针对重复频率等离子体开关近期的应用,对 3 mm厚的 DKDP 晶体热效应进行有限元分析,晶 体尺寸为 Φ 30 mm×3 mm,热源项作为体积热生成 率载荷施加。加载激光功率为 50 W(5 J,10 Hz), 波长为1.064 μ m,光斑大小为 Φ 20 mm,晶体初始温 度为20 C,吸收系数为 α =0.5 m⁻¹,对流换热系数 取10 W/m²。单元类型选择 solid90,创建电光晶体 1/4 几何模型并赋予材料属性,利用 mesh 工具生成 有限元分析物理模型。施加对流换热和体积热生成 率载荷,设定载荷步求解,得到温度场分布。将所得 温度场分布作为初值条件,即可得到相应温度场下 的应变场分布。

图 1 给出稳态时晶体上典型三点(光斑中心,光 斑边缘,晶体边缘)处温度随时间的变化曲线。随激 光辐照时间增加温度升高,800 s 晶体内温度场达到 稳态,生热与散热处于平衡状态。晶体内最高温度 为 25.91 ℃,最低温度为 25.12 ℃,如图 2 所示。晶 体内温度梯度在激光辐照 85 s 时达到稳态,最大温 度梯度为-109.66 ℃/m。负号表示温度远离光斑 中心下降。图 3 为稳态下晶体内光斑中心温度沿厚 度方向温度分布,由于对流换热使得中心温度高,表 面温度低,温差为 0.02 ℃。稳态下晶体内最大温度 梯度出现在光斑边界处。稳态下晶体中应变分布,最 大应变为-1.58×10⁻⁵。负号表示晶体处于压缩 状态。



图 1 晶体上典型三点温度随时间变化



晶体中温度的不均匀分布将产生热应力,应力 将改变折射率椭球从而引起退偏损耗。考虑热应力 后,DKDP 晶体折射率椭球变为

$$\frac{1}{n_o^2}(x^2+y^2)+\frac{z^2}{n_e^2}+2\Delta B_6 xy=1, \qquad (3)$$

式中 z 为光轴, x, y 为 DKDP 二重 晶轴。对于 DKDP 晶体有

报





1.2

$$\Delta B_6 = p_{66} \Sigma_6 , \qquad (4)$$

1.8

Distance /mm

3.0

2.4

式中 p_{66} 为弹光系数, Σ_6 为剪应变。

0.6

n

对于纵向应用, 通光长度为 l 的 DKDP 晶体, 应 力双折射引起的相位延迟为

$$\Gamma = \frac{2\pi n_{\rm o}^3}{\lambda} \cdot \Delta B_6 \cdot l, \qquad (5)$$

式中λ为激光波长,当晶体置于平行的起偏器和检 偏器之间,退偏损耗为

$$L_{\rm D} = \frac{I_{\rm out}}{I_{\rm in}} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right),\tag{6}$$

式中 Iin为入射激光光强, Iout为光束经过起偏器、晶 体、检偏器后透射光强。当 $\lambda = 1.064 \ \mu m, n_0 =$ 1.494, $p_{66} = -0.0648$, Σ_6 取最大应变-1.58× 10^{-5} ,可得 $L_{\rm D}$ 的最大值为 0.6%。

Φ20 mm 口径重复频率等离子体开 3 关

文献[11]中描述了基于 DKDP 晶体的等离子 体开关的原理结构。图 4 为 Φ20 mm 口径重复频率 单脉冲过程驱动电光开关照片。开关采用 DKDP 晶体,晶体尺寸为 Φ 30 mm×3 mm,气体放电腔尺 寸为 Φ 40 mm×4 mm,由 5 mm 厚的光窗进行密封。 放电电极通过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,普克尔盒工作 在一个动平衡状态。为使普克尔盒的插入尽量不影 响主激光束的光束质量,在电光开关精密装校中,采 用硅胶粘接以减小 DKDP 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。





偏振方向沿晶体 x 或 y 轴方向的平面波正入 射普克尔盒晶体,若晶体无应变,目外加电场为零, 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°,施加在晶体两表面之间的 电压为半波电压

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n_0^3 r_{63}},\tag{7}$$

对 DKDP 晶体, $r_{63} = 23 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0 = 1.494$ $(\lambda = 1.064 \ \mu m)$, 理论上半波电压 $V_{\pi} = 6.7 \ kV_{\circ}$

等离子体开关驱动脉冲由 1 根 50 Ω 的电缆传 输到普克尔盒,终端通过1个50Ω电阻匹配,在放 电腔气体击穿后,普克尔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 DKDP 晶体。普克尔盒等效电容 $C = \epsilon_r \epsilon_0 S/d$, DKDP 晶体的相对介电常数为 50, 晶体厚度为 d= 3 mm,则普克尔盒电容约为 104 pF,理论上普克尔 盒充电时间 $t_{ch} = 4ZC(Z)$ 为光电阻抗, C 为普克尔盒 等效电容),约为10 ns。

采用电容分压技术,实现了 DKDP 电光开关的单 脉冲驱动^[11],通过优化配置,获得了稳定的重复频率放 电的电气工作参数,以及全口径均匀的放电等离子体, 图 5 为重复频率工作下,由 CCD 采集的等离子体放电 照片。进行了 10 Hz 重复频率等离子体开关特性测 试,图6为开关效率测试光路示意图,起偏器为高消光 比的格兰棱镜,检偏器为两块相对放置的偏振片,起偏 器和检偏器方向一致。一只光电二极管监测输入激光 强度,另一只光电二极管测量通过检偏器的激光强度, 为避免强电磁噪声,采用带尾纤的光电二极管,由大口 径准直器将激光输入光纤。图7为开关效率测试结 果,在开关驱动脉冲为8.2 kV时,开关效率最大,达到 99.8%。采用连续激光器测试了开关的重复频率工作 特性,在10 Hz 重复频率方波脉冲驱动下,开关性能稳 定,对应每次开关驱动脉冲,均有可靠的透射光脉冲输 出,典型的开关上升时间为11 ns(从5%到95%)。



图 5 等离子体放电 CCD 图像 Fig. 5 CCD image of neon plasma at 10 Hz repetition rate

图 6 开关效率测试光路示意图

图 7 Φ20 mm 口径等离子体开关效率与驱动电压的变化关系

Fig. 7 Variation of switching efficiency and switch voltage of plasma Pockels cell with 20 mm aperture

4 结 论

理论计算表明,采用薄晶体的等离子体开关可 大幅度减少由于光吸收引起的热致退偏效应。通过 优化设计和采用电容分压技术,研制完成了 Φ20 mm口径、10 Hz 重复频率等离子体开关,并进 行了实验研究,获得了理想的结果,单脉冲驱动的等 离子体 DKDP 开关可稳定地以 10 Hz 的重复频率 工作。在重复频率 DPL 激光系统平台上,进行了 LD 抽运重复频率 Yb: YAG 片状激光器电光调 Q 实验,测量了调 Q 激光时间波形和空间分布,脉冲 半高宽为 90 ns 左右,Q 脉冲总能量为 20 mJ。

参考文献

- S. Z. Kurtev, O. E. Denchev, S. D. Savov. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electrooptically Q-switched Nd: YAG lasers and their compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 278~285
- 2 J. Goldhar, M. A. Henesian. Electro-optical switches with plasma electrodes [J]. Opt. Lett., 1984, 9(3): 73~75
- 3 M. 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
- 4 Cao Dingxiang, Zhang Xiongjun, Zheng Wanguo et al.. Numerical investigation of thermal effect in plasma electrode Pockels cell for high average power [J]. Chin. Phys. Lett., 2006, 23(11): 2978~2981
- 5 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng *et al.*. Convective heat transfer intensity and its enhancing in plasma electrodes Pockels' cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 368~373 张 君,张雄军,吴登生等. 等离子体普克尔盒中对流换热强度 及其增强[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 368~373
- 6 J. Gardelle, E. Pasini. A simple operation of a plasma-electrode Pockel's cell for the laser megajoules [J]. J. Appl. Phys., 2002, 91(5): 2631~2636
- 7 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zheng Kuixing *et al.*. Electrooptical switch with 280 mm×280 mm aperture drived by onepulse process [J]. *Acta optica sinica*, 2006, 26(3): 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(3): 254~258
- 8 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Lin Donghui *et al.*. Compact plasma Pockels cell for TIL of SGIII laser facility [C]. SPIE, 2007, 6838: 68380Y
- 9 Zhou Xiaojun, Guo Wenqiong, Zhang Xiongjun et al.. Onedimensional model of a plasma electrode optical switch driven by one-pulse process [J]. Opt. Express, 2006, 14(7): 2880~2887
- 10 Guo Wenqiong, Zhang Xiongjun, Zhou Xiaojun *et al.*. Numerical analysis of helium-pressure influence on characteristics of electrooptic switch driven by one-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

非文际, 赤犀羊, 周號羊 等. 氦 (玉强对革际冲过程电九开关符 性影响的数值分析[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 695~700

11 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun et al.. One-pulse driven plasma Pockels cell with DKDP crystal for repetition-rate application [J]. Opt. Express, 2009, 17(19): 17164~17169