

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0384-03

等离子体电极普克尔盒退偏损耗分析

张雄军, 郑奎兴, 吴登生, 董云, 郑建刚, 鲁敬平

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 通过对普克尔盒由于定向失误以及应力变形在静态及施加半波电压情况下引起的退偏损耗分析和计算, 提出了等离子体电极普克尔盒中开关晶体的加工、装校要求以及半波电压平顶起伏指标; 在静态条件下, 利用研制的等离子体电极普克尔盒对普克尔盒晶体光轴与光束传播方向在不同夹角下的退偏损耗进行了测量。实验结果与计算结果基本相符。

关键词 激光技术; 电光开关; 等离子体电极普克尔盒; 退偏损耗

中图分类号 TN520

文献标识码 A

Analyses on Depolarization Losses of Plasma-Electrode Pockels Cell

ZHANG Xiong-jun, ZHENG Kui-xing, WU Deng-sheng, DONG Yun,

ZHENG Jian-gang, LU Jing-ping

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract By analyses and calculation of the depolarization loss of plasma-electrode Pockels cell (PEPC) caused by the disorientation and strain with or without half wave voltage, the demands of machining and fixing Pockels and the half wave voltage variation are given. The depolarization losses of PEPC under different angle of the switching crystal optical axis and the beam propagating direction are measured. The results are accord with the calculating results.

Key words laser technology; electro-optical switch; PEPC; depolarization loss

1 引言

等离子体电极普克尔盒的损耗可分为偏振相关的损耗和偏振无关的损耗。偏振无关的损耗主要包括普克尔盒光窗和晶体吸收及反射产生的损耗。偏振相关的损耗可称为退偏损耗。而普克尔盒晶体在产生应变、定向失误情况下以及开关脉冲电压波动都将引起退偏损耗, 致使由其构成的电光开关效率降低。

2 KDP 晶体的电光及弹光效应

在应力场中, 并沿晶体光轴方向施加电场情况下, 考虑 KDP 晶体电光效应及弹光效应, 平面波沿晶体 z 轴传播, 其折射率可表示为

$$n' = n_0 - (\Delta n \pm \delta n / 2) \quad (1a)$$

方程(1a)显示了折射率 n 与其原值 n_0 的变化由两部分组成, Δn 为平均折射率变量, δn 是感生双折射, 若只考虑感生双折射, 方程(1a)可改写为

$$n' = n_0 \pm \delta n / 2 \quad (1b)$$

将感生双折射 δn 通过相移来表示,

$$\gamma = (2\pi/\lambda)\delta n l \quad (1c)$$

其中,

$$\delta n = \frac{1}{2} n_0^3 \sqrt{(p_{11} - p_{12})^2 (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + 4(p_{66}\epsilon_{xy} + r_{63}E_z)^2} \quad (1d)$$

在这里, λ 为光波长, l 为晶体厚度, ϵ_x, ϵ_y 和 ϵ_z 是沿 x, y, z 方向的正应变, ϵ_{xy} 是切应变, p_{66} 是对应的弹光张量元, x 与 x' 之间的夹角由下式给出

$$\theta = \pi/4 + \Delta\theta \quad (2a)$$

其中

$$\Delta\theta = \frac{(p_{11} - p_{12})(\epsilon_x - \epsilon_y)}{4(p_{66}\epsilon_{xy} + r_{63}E_z)} \quad (2b)$$

由于用应力量 σ_i 来写方程(1d)及方程(2b)更方便, 即用弹性系数 $c_{ij}^{(1)}$ 及应力量 σ_i 来表示应变, 则方程(1d)及方程(2b)可表示为

$$\delta n = \frac{1}{2} n_0^3 \times \sqrt{1.88(p_{11} - p_{12})^2 (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4(1.68p_{66}\tau_{xy} + 10^{13}r_{63}E_z)^2} \times 10^{-13} \quad (3)$$

基金项目: 国家高技术惯性约束聚变领域(842120)资助课题。

作者简介: 张雄军(1973-), 男, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员, 主要从事固体激光技术研究。

E-mail: stone_zxj@163.com

$$\Delta\theta = \frac{1.37(p_{11}-p_{12})(\sigma_x-\sigma_y)}{4(1.68 \times 10^{-13} p_{66} \epsilon_{xy} + r_{63} E_z)} \quad (4)$$

其中, σ_x 和 σ_y 为正应力, τ_{xy} 为切应力。

3 退偏损耗分析

设强度为 I_0 , 偏振方向为 x 轴, 沿 z 传播的平面波正入射普克尔盒晶体, 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称为半波电压 V_π [2]。

$$V_\pi = \lambda / (2n_0^3 r_{63}) \quad (5)$$

对于 KD*P, $r_{63}=24.3 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0=1.493$ ($\lambda=1.06$ μm), $V_\pi=6.5$ kV, 而对于 KDP, $r_{63}=9.7 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0=1.494$ ($\lambda=1.06$ μm), $V_\pi=16.4$ kV。

普克尔盒晶体具有应力变形和(或)外加电场, 忽略吸收损耗, 其输出强度可由下式表示

$$I_y/I_0 = 4\cos^2\theta \sin^2(\gamma/2) \quad (6a)$$

$$I_x/I_0 = 1 - \cos^2\theta \sin^2(\gamma/2) \quad (6b)$$

当晶体无外加电场时, I_y/I_0 视为退偏损耗, 当普克尔盒晶体加电压后, I_x/I_0 为退偏损耗。若晶体具有应变或定向失误, 入射光束通过晶体时将引起退偏, 当光束到达偏振器时能量将衰减, 用退偏损耗 L 来表示, 无论有没有施加电压, γ 和 θ 的偏差都会导致退偏损耗。当 $\Delta\theta \ll \pi/4$ 和 $\Delta\gamma \ll \pi$ 时, 退偏损耗可由下式近似给出

$$L = \begin{cases} \sin^2(2\Delta\theta) + \sin^2\left(\frac{1}{2}\Delta\gamma\right), & E_z = V_\pi \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + 2\Delta\theta\right) \sin^2\left(\frac{1}{2}\Delta\gamma\right), & E_z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

3.1 开关脉冲电压起伏引起的退偏损耗

开关脉冲电压起伏通过对双折射 δn 作用导致退偏损耗。如果调制是时间上的, 将引起整个效率的降低; 若是空间调制, 损耗可能较少, 但输出光束将受到调制。

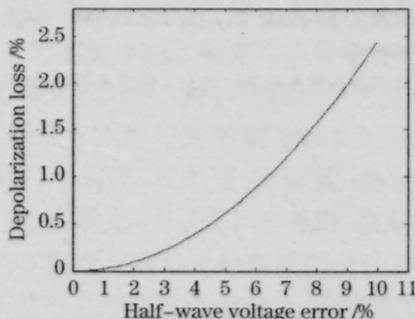


图1 开关脉冲电压起伏引起的退偏损耗

Fig.1 Depolarization loss due to half-wave voltage error

由方程(1c)、(1d)及(5)~(6b)可得到电压起伏 ΔV 引起的退偏损耗为

$$L = \sin^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{\Delta V}{V_\pi}\right)\right] \quad (8)$$

由开关脉冲电压起伏引起的退偏损耗如图1所示, 如果要求由开关脉冲电压起伏引起的退偏损耗小于 0.1%, 则开关脉冲电压起伏必须小于 2%。

3.2 定向误差引起的退偏损耗

当一块普克尔盒晶体从主胚上切割下来和安装到普克尔盒上, 可能产生方向上的失误, 导致退偏损耗。有三种可能, 即晶体绕 z 轴旋转、沿 x 轴或 y 轴倾斜。

对于普克尔盒晶体绕 z 轴旋转所引起的退偏损耗可由方程(7)得到, 计算结果如图2所示。当普克尔盒晶体沿 x 轴及 y 轴倾斜, 在 $E_z=0$ 时引起的相位延迟为 [2]。

$$\gamma = \frac{2\pi\lambda}{\lambda \cos\theta_i} (n_1 - n_2) = \frac{2\pi h}{\lambda \cos\theta_i} \left[\left(\frac{1}{n_o^2} \cos^2\theta + \frac{1}{n_e^2} \sin^2\theta \right)^{-1/2} - n_o \right] \quad (9)$$

其中 θ_i 是两正交分量在晶体中的折射角的几何平均值。由(9)式可知, 退偏损耗不仅与倾斜角度有关, 还同晶体厚度有关。

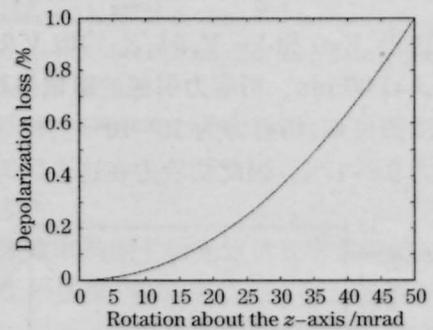


图2 开关晶体绕 z 轴旋转引起的退偏损耗

Fig.2 Depolarization loss caused by the rotation about z -axis

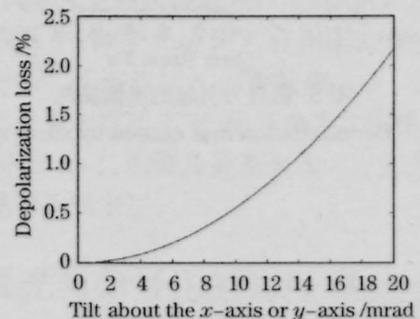


图3 计算的开关晶体沿 x 或 y 轴倾斜引起的退偏损耗

Fig.3 Calculated depolarization loss for the tilt about z -axis or y -axis

图3计算了普克尔盒晶体沿 x 轴及 y 轴倾斜引起的退偏损耗,取 $l=10\text{mm}$, $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 。由图可见,当倾斜角度只有几个 mrad 时,退偏损耗是很小的。在静态条件下,普克尔盒晶体 y 轴与光束传播方向在不同倾斜角下产生的退偏损耗的测量结果如图4所示,该测量结果去除了由普克尔盒光窗和晶体应力产生的退偏损耗。

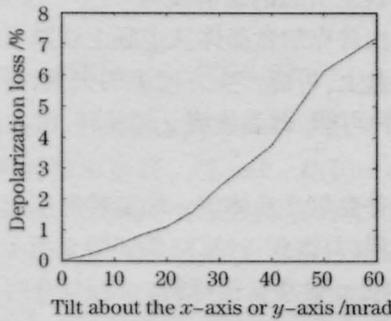


图4 实验测得的开关晶体沿 x 或 y 轴倾斜引起的退偏损耗
Fig.4 Depolarization loss measured for the tilt about x -axis or y -axis

3.3 晶体应力引起的退偏损耗

当 $E_z=V_\pi/l$, 由方程(3), (7)和(8)得到由剪切应力引起的退偏损耗为

$$L = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{16.8 \times 10^{-13} p_{66} \tau_{xy}}{r_{63} E_z} \right) \right] \quad (10)$$

在这里, $V=0$ 和 $V=V_\pi$ 时, E_z 均取 V_π/λ 。取 $l=10\text{mm}$, $\lambda=1.06\mu\text{m}$, 切应力引起的退偏损耗如图5所示。由图可知,切应力为 $10^5 \sim 10^6$ 时,将导致的退偏损耗为 $0.2 \sim 17\%$, 因此切应力在这个区间是一个

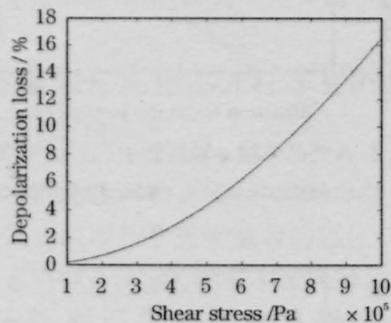


图5 切应力引起的退偏损耗
Fig.5 Depolarization loss caused by shear stress

关键因素。

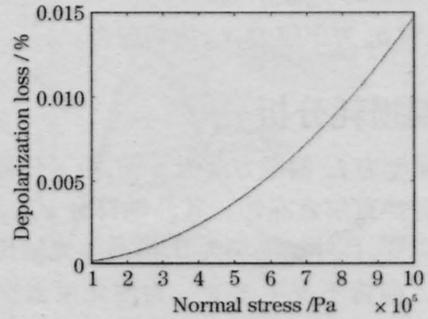


图6 正应力引起的退偏损耗

Fig.6 Depolarization loss caused normal stress

对于由正应力引起的退偏损耗,当 $E_z=V_\pi/l$ 时,退偏损耗由 $4(\Delta\theta)^2$ 决定,利用和方程(10)相同的参量,对于 $(\sigma_x - \sigma_y) \leq 10^6 \text{ Pa}$, $L \leq 0.015\%$, 由正应力引起的退偏损耗比由切应力引起的退偏损耗小三个数量级。因此正应力对普克尔盒晶体的退偏损耗的贡献是很小的。

4 结 论

通过对普克尔盒由于定向失误以及应力变形在静态及施加半波电压情况下引起的退偏损耗分析和计算。可以得出:对于开关脉冲电压,若要求由电压平顶起伏引起的退偏损耗小于 0.1% , 则开关脉冲电压平顶起伏必须小于 2% ; 若要求电光开关的隔离比大于 200 , 则尾后电压应小于 4.5% 。对于普克尔盒晶体应进行去应力处理, 特别应注意消除晶体的切应力。在普克尔盒装校过程中, 也应注意不要引入应力导致晶体产生应变。对于普克尔盒在光路中的准直, 应确保普克尔盒晶体光轴与入射光夹角小于 10 mrad 。

参 考 文 献

- 1 Chen Gang, Liao Li-ji. Crystal Physics Basics [M]. Beijing: Science Press, 1992
陈 纲, 廖理儿. 晶体物理学基础[M]. 科学出版社, 1992
- 2 Zhang Kecong. Neoteric Crystal Basics [M]. Beijing: Science Press, 1998
张克从. 近代晶体学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998