

基于透明导电膜的重复频率电光开关的研究

庄令平^{1,2} 张雄军¹ 张君¹ 吴登生¹ 田晓琳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中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 透明导电膜电光开关通过合理的结构设计可以实现高效的热管理,是一种理想的高平均功率开关器件。建立了透明导电薄膜电光开关的模型,采用优化的开关设计参数分析开关的时间特性和热效应。仿真结果表明,开关上升时间达到标称时间要求;在高平均功率负荷下,晶体温升所导致的退偏损耗对开关性能的影响很小。该构型的薄膜电极电光开关可以应用于重复频率运转下的高功率激光系统。

关键词 光学器件; 电光开关; 热管理; 透明导电薄膜; 高平均功率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.012303

Study of Repetition-Rate Electro-Optic Switch Based on Transparent Conductive Films

Zhuang Lingping^{1,2} Zhang Xiongjun¹ Zhang Jun¹ Wu Dengsheng¹ Tian Xiaolin¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Transparent conductive films (TCFs) electrode electro-optic switch is an ideal switch device for high average power, which can achieve high thermal management efficiency by reasonable design. A model based on the schematic diagram of TCFs electro-optic switch is proposed. The switch's time characteristics and thermal effects with average power loaded on the electro-optic are simulated by numerical modeling. The results show that the switch's rise time can meet the requirements of the nominal time. The depolarization loss caused by temperature rise has small effect on the performance of the switch. The design of TCFs electro-optic switch for high average power can be applied to high average power laser system at high repetition-rate.

Key words optical device; electro-optic switch; thermal management; transparent conductive films; high average power

OCIS codes 230.0230; 230.2090

1 引言

为了获得高功率重复频率激光脉冲,激光系统中通常采用重复频率电光开关进行调Q和隔离。在此过程中,电光晶体对光脉冲的线性吸收会在晶体中产生热沉积,严重时将在晶体横截面上产生很大的温度梯度,引起透射光束的热退偏和波前畸变,所以高效的热管理是电光开关重复频率应用的前提^[1-2]。在低光通量的情况下,可以通过提高重复频率来增大激光系统的平均功率,例如美国惯性约束聚变(IFE)激光系统^[3-4]中的光通量小于 0.5 J/cm^2 ,然而其平均功率高达 4000 W (重复频率为 16 Hz)。低光通量降低了对开关电极材料光损伤阈值的要求, Bayramian等^[5]提出了用透明导电薄膜(TCFs)作为开关电极的设想,采用两片薄膜电极夹着一块DKDP晶体的三明治结构,将薄膜电极高温沉淀在基底上,两片薄膜电极和晶体之间都留有缝隙。这种结构十分有利于开关的热管理,使其在重复频率应用下具有极大的潜力。

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-06-18; 网络出版日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61308039)

作者简介: 庄令平(1991—),男,硕士研究生,主要从事重复频率激光技术方面的研究。E-mail: zhuang_lingping@163.com

导师简介: 张雄军(1973—),男,硕士,研究员,硕士生导师,主要从事激光技术方面的研究。

E-mail: zhang.xiongjun@163.com(通信联系人)

重复频率电光开关有两个关键问题需要考虑:一是开关时间,电光开关需要在标称的时间内改变光束的偏振态,并对后向反射光束进行隔离;二是热管理,开关在重复频率应用下出现的热沉积会影响其性能,所以必须对开关进行热管理。就目前的材料现状,基于设想的结构,建立仿真模型,理论验证基于透明导电薄膜电极重复频率电光开关的可行性:用模拟开关晶体上的电压变化来分析开关时间,根据开关晶体上温度、应力和退偏的分布来分析其热管理效率。

2 透明导电膜电极重复频率开关的关键因素

薄膜电导率是决定开关时间的关键性因素。目前的导电薄膜有:掺锡氧化铟(ITO)、掺铝氧化锌(AZO)、单层碳纳米管(SWNTs)、银纳米线和石墨烯薄膜等。在薄膜的性能中,低面电阻和高透射率是一对相互制约的参数,大的面电阻和晶体自身等效电容形成的回路会导致开关的上升时间延迟,从而使得开关时间达不到100 ns(开关标称时间)^[6],而低光射过率会造成普克尔盒的性能下降,所以需要在二者之间取得平衡。新型材料石墨烯薄膜在具有低面电阻的同时可以达到高的光透射率,且石墨烯薄膜的热导率较大^[7]。理论上石墨烯薄膜光透过率可达97.7%,薄膜面电阻只有1 Ω ,可以满足作为开关电极的要求,且较大的热导率有利于传导换热。就目前的工艺而言,获得最优石墨烯薄膜电极的方法是采用化学气相法(CVD),在基底上高温沉积石墨烯薄膜,将其厚度控制在几个纳米左右,这时的薄膜面电阻只有约20 Ω 、光透射率为90%~95%^[8-9]。

热管理问题是电光开关在重复频率应用中的难点。但是,薄膜电极开关的构型中电极和晶体之间形成了一条缝隙,缝隙中可以通流体来增强对流换热,对控制晶体和电极的温升带来了极大的便利。目前,有机冷却剂全氟碳流体广泛应用于电子工业,其冷却效率很高^[10]。在全氟碳流体中,全氟全氢茈萸($C_{16}F_{26}$)的比热容高,导热性能好,流动性强,折射率和DKDP晶体相匹配。全氟全氢茈萸和DKDP晶体的材料属性如表1所示。分析表明,目前的材料现状可以满足薄膜电极开关的要求。

表1 全氟全氢茈萸和DKDP的材料属性

Table 1 Physical parameters of $C_{16}F_{26}$ and DKDP

Parameter	$C_{16}F_{26}$	DKDP
Density $/(kg/m^3)$	2052	2355
Viscosity $/(mm^2/s)$	15.3	-
Specific heat $/[J/(kg \cdot K)]$	9300	700
Heat conductive coefficient $/[mW/(m \cdot K)]$	64.6	2100
Refractive index n_0	1.38	1.49
Permittivity ϵ_r	15.3	50

3 建立模型

图1为基于导电膜电极的电光开关原理图^[5],初步设计了开关的结构,结构参数如表2所示。建立了电路仿真模型和流固耦合结构模型,对薄膜电极电光开关的关键问题进行分析。

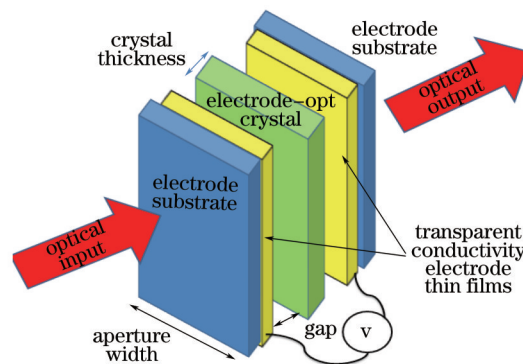


图1 基于透明导电薄膜的普克尔盒电光开关原理图

Fig.1 Schematic diagram of TCFs electrode Pockels cell

表2 普克尔盒结构参数

Table 2 Mechanical parameters of Pockels cell

Parameter	Value
Gap thickness /cm	0.04
DKDP crystal size /cm ³	26×26×0.6
Beam area /cm ²	24×24
Fluid inlet size /cm ³	8×3×0.03
Fluid outlet size /cm ³	12×3×0.03

根据图1建立的电路仿真模型如图2(a)所示,C1、C3为开关缝隙的等效电容,C2为DKDP晶体的等效电容,C4和C5为外加串联的高压电容,R2和R4为薄膜电极的电阻,V1为脉冲驱动电源。

为了减少计算量,根据对称特性选取实际模型的一半作为研究对象,根据表2的结构参数利用Gambit建立流固耦合模型,如图2(b)所示。 x 、 y 分别表示开关的长宽, xy 面即为通光面,流体沿着负 x 轴方向进入开关缝隙;激光沿着 z 轴传播。

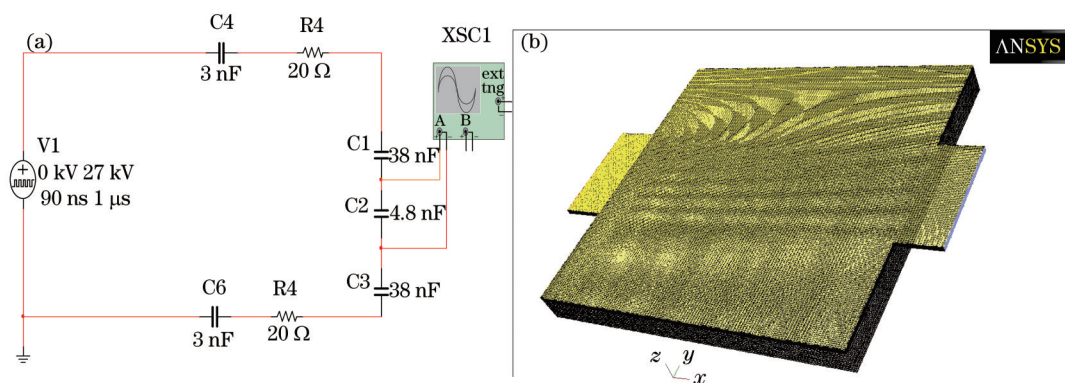


图2 (a) 电路仿真模型; (b) 流固耦合模型

Fig.2 (a) Circuit diagram of electro-optic switch; (b) model of fluid-structure interaction

4 模拟分析

根据所建立的模型,通过仿真开关晶体上的电压变化来分析开关时间;通过模拟缝隙中的流速场来计算流固耦合面的平均对流换热系数,将对流换热系数加载在晶体端面上,通过分析晶体的热效应来衡量薄膜电极电光开关的热管理效率^[11]。

4.1 开关时间的电学仿真

从开关晶体上电压随时间的变化曲线可以计算开关的时间,DKDP晶体的半波电压为6.5 kV^[12]。根据表1中物质的介电参数和表2的结构参数计算等效电容C1、C2、C3,外加串联的高压电容C4、C5的值均取3 nF,石墨烯薄膜电极的电阻约20 Ω;信号电源V1产生的脉冲参数取为:电压上升沿30 ns,电压平顶时间90 ns,电压下降沿30 ns。

晶体上的电压随时间的变化关系如图3(a)所示,晶体上的电压和开关效率的关系式为:

$$E(t) = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \frac{V(t)}{V_{\pi}} \right], \quad (1)$$

式中 $V(t)$ 为晶体上的电压, $V_{\pi}=6.5$ kV。

开关时间等于开关效率达到约100%所需要的时间,开关效率的演化曲线如图3(b)所示,图中矩形脉冲达到平顶需要的时间约为76 ns,满足重复频率开关的标称时间要求。

4.2 对流换热系数的计算

根据建立的流固耦合模型,模拟开关缝隙中的流速场,计算流固耦合面上的平均对流换热系数。在计算的过程中将缝隙中的流体当层流处理,忽略进出口对流速的影响,流体入口速度^[9]取0.24 m/s,加载表1中流体的材料参数,流体初始温度为288 K。利用Fluent模拟流体的变化,得到流固耦合面上流速场的分布和对流换热系数的分布,分别如图4(a)和(b)所示。从图4(b)得整个流固耦合面的平均对流换热系数约为140 W/(m²·K);

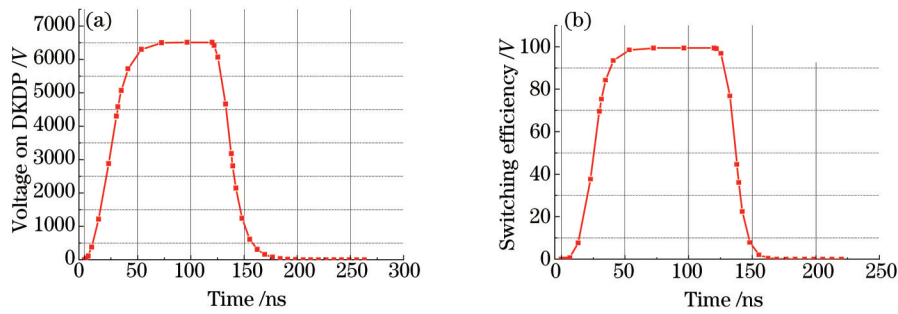


图3 (a) DKDP 晶体上电压随时间的变化曲线; (b) 开关的效率演化曲线

Fig.3 (a) Dependence of voltage on DKDP on time; (b) dependence of switching efficiency on time

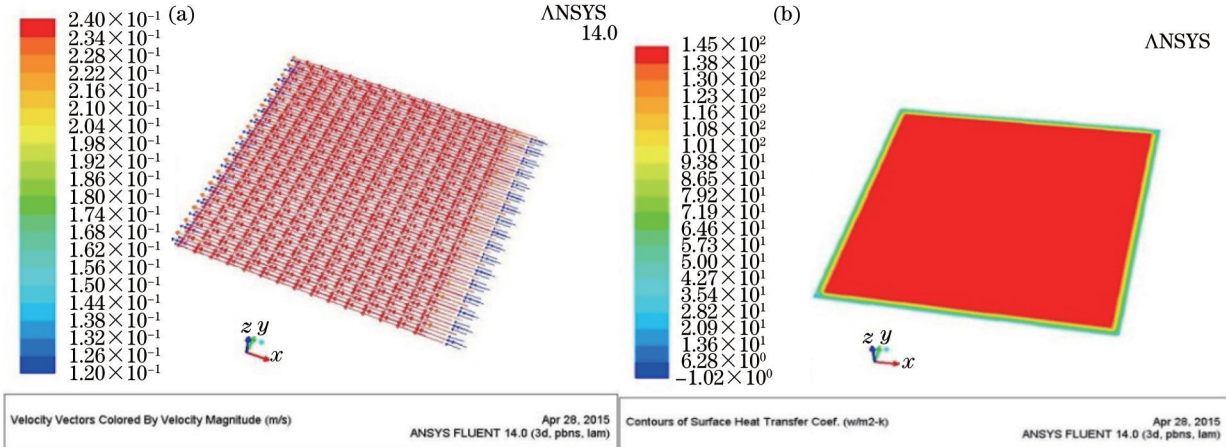


图4 (a) 缝隙中流速场的分布; (b) 流固耦合面上对流换热系数的分布云图

Fig.4 (a) Velocity distribution of liquid in gap; (b) contour of surface heat transfer coefficient

4.3 晶体热效应分析

4.3.1 晶体中温度场分布

将计算的对流换热系数加载在晶体端面,分析晶体在重复频率应用下产生的热效应,以此来衡量薄膜电极重复频率电光开关的热管理效率。

电光晶体中的热负载主要来源于晶体对激光的线性吸收,晶体中的热功率密度简化式为^[13]:

$$q_v = \alpha I(x, y), \quad (2)$$

式中 $I(x, y)$ 为光功率密度, α 为晶体的线性吸收系数。

晶体对波长为 1064 nm 激光的吸收系数 $\alpha = 0.5 \text{ m}^{-1}$, 光通量^[3,5]为 0.5 J/cm^2 , 重复频率为 16 Hz, 光功率密度 $I = 8 \text{ W/cm}^2$; 由(2)式得热功率密度 $q_v = 80000 \text{ W/m}^3$ 。取 DKDP 晶体四分之一尺寸作为研究对象, 利用 Ansys 建立热传输有限元模型, 将对换热系数加载在晶体的入射面和出射面(其他面做绝热处理), q_v 以体积热的形式加载在开关晶体的光斑区域, DKDP 晶体的材料属性^[14]如表 3 所示, 初始温度为 293 K。图 5 给出了晶体中

表3 DKDP 晶体的材料属性

Table 3 Physical parameters of DKDP

Parameter		DKDP
$\rho / (\text{kg/m}^3)$		2355
$c / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$		700
$k_{11} / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$		1.9
$k_{33} / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$		2.1
Elastic constants $/ (10^{-12} \text{ Pa}^{-1})$	11	15.75
	12	2.1
	13	-4.0
	33	20.14
	44	79
	66	168.3
$n_o (\lambda = 1064 \text{ nm})$		1.49
$\alpha / \text{m}^{-1} (\lambda = 1064 \text{ nm})$		0.5

最高温度(光斑中心)随时间的变化,稳态时四分之一晶体上温度分布和沿着 x 方向的温度梯度分布分别如图 6(a)和(b)所示。

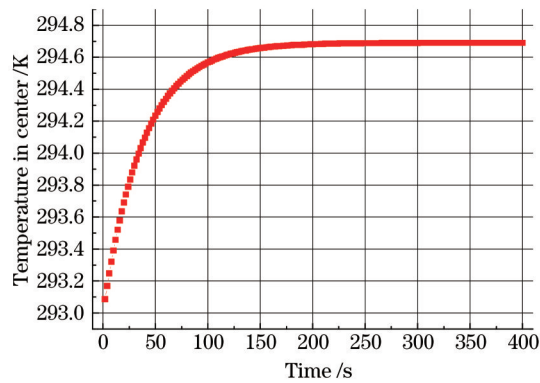


图 5 光斑中心处温度随时间的变化关系

Fig.5 Dependence of temperature on time at the center of the spot

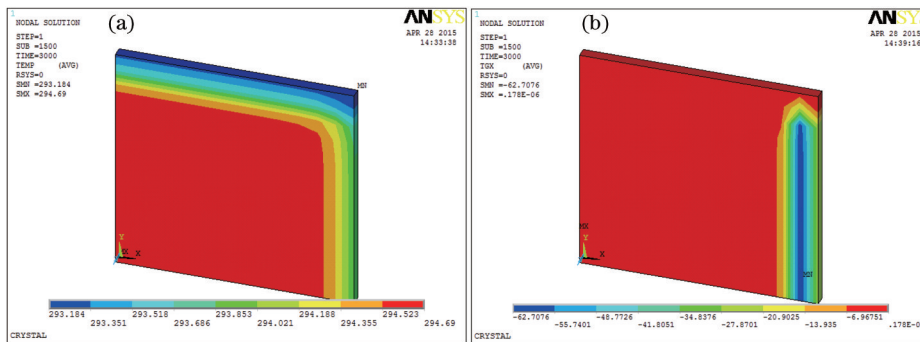


图 6 (a) DKDP 晶体稳态时的温度场分布; (b) 晶体稳态时 x 方向的温度梯度分布

Fig.6 (a) Temperature distribution on DKDP crystal at steady state; (b) temperature gradient distribution in the x orientation at steady state

图 5 表明开关在 3 min 内已进入稳态;图 6 表明晶体中的最高温度为 294.69 K,最大温升小于 1.7 K,光斑边界和晶体边界的温度差小于 1 K,晶体上沿着 x 方向的最大温度梯度为 $-82.70 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ (出现在光斑的边界处,负号表示温度沿着 x 轴正方向减小)。

4.3.2 晶体中应变场分布

将图 6 的温度场作为初始条件加载,并在 $x=0$ 和 $y=0$ 面上施加对称约束条件,建立热弹性有限元模型如图 7 所示。在热弹性力学方程的控制下^[15]求解模型,得到稳态时 xy 面上的应变场分布,如图 8 所示,晶体中最大应变出现在光斑边界处,为 -3.09×10^{-5} ,负号表示收缩。

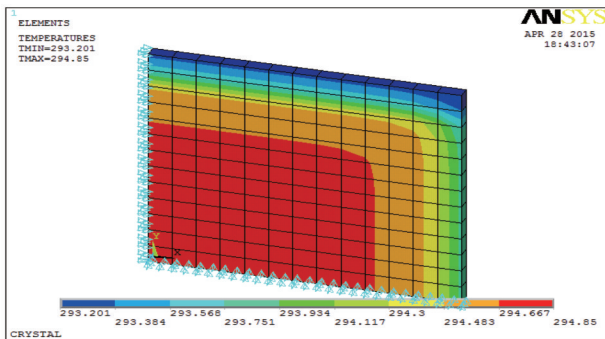


图 7 热弹性有限元模型

Fig.7 Thermal-elasticity finite element mode

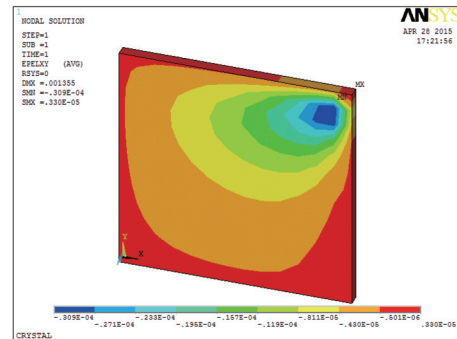


图 8 DKDP 晶体中应变分量分布

Fig.8 Thermal strain distribution on DKDP crystal

4.3.3 温度、应变引起的退偏损耗

由于晶体中存在绝对温升,折射率和电光系数随温度变化必然引入附加相移,因此温度的不均匀分布会使得在晶体横截面上产生热致退偏^[13]。

考虑晶体的温升,开关晶体的相位延迟为:

$$\Gamma_1 = \pi \left[1 + 3 \frac{\partial n_0}{\partial T} \frac{\Delta T}{n_0} + \frac{\partial \gamma_{63}}{\partial T} \frac{\Delta T}{\gamma_{63}} \right], \quad (3)$$

式中 ΔT 为温升, $\frac{\partial n_0}{\partial T} \frac{3}{n_0} = -6.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\frac{\partial \gamma_{63}}{\partial T} \frac{1}{\gamma_{63}} = -5.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, 因此(3)式中的第二项可以不用考虑。

将起偏器和检偏器平行放置,并考虑晶体对光脉冲的吸收时,透过率为:

$$T = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \exp(-\alpha l) \sin^2 \left(\frac{\Gamma_1}{2} \right), \quad (4)$$

式中 l 为晶体厚度, I_{in} 和 I_{out} 分别为入射光强和透过偏振片后的光强。则温度导致晶体中电光系数变化而引起的退偏损耗为

$$f = 1 - \exp(-\alpha l) \sin^2 \left(\frac{\Gamma_1}{2} \right). \quad (5)$$

将图 6(a) 中的温升分布代入(3)式得到相位延迟,然后将 Γ_1 代入(5)式得到退偏损耗在晶体横截面上的分布,如图 9 所示。可以看出,光斑区域的退偏最明显,最大的退偏出现在光斑中心处,为 0.328%。

由于晶体中存在应变力,应力将改变折射率椭球,从而使开关产生退偏。当考虑热应力后,电光晶体的折射率椭球为^[16]:

$$\frac{1}{n_0^2}(x^2 + y^2) + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\Delta B_6 xy = 1, \quad (6)$$

式中 x, y 为二重晶轴, z 为光轴。

$$\Delta B_6 = P_{66} \Sigma_6, \quad (7)$$

式中 P_{66} 为弹光系数, Σ_6 为剪应变。

当纵向应用时,厚度为 l 的 DKDP 晶体由应力双折射^[17-18]引起的相位延迟为:

$$\Gamma_2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta B_6 l (1 + a \Delta T). \quad (8)$$

将图 6(a) 中的温度分布和图 8 中的应变分布带入(8)式,然后由(5)式得到应力双折射引入的退偏损耗分布规律,如图 10 所示。从图中可以看出,应力致退偏损耗为 0.038%,出现在光斑的边界处; x 和 y 轴上的退偏损耗为零,说明光斑中心没有应力双折射引入的退偏损耗。

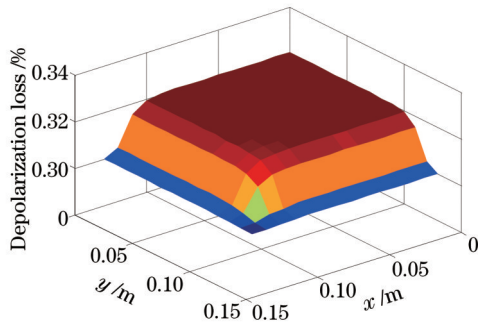


图9 温度致晶体横向退偏损耗分布

Fig.9 Depolarization loss distribution at cross-section induced by temperature

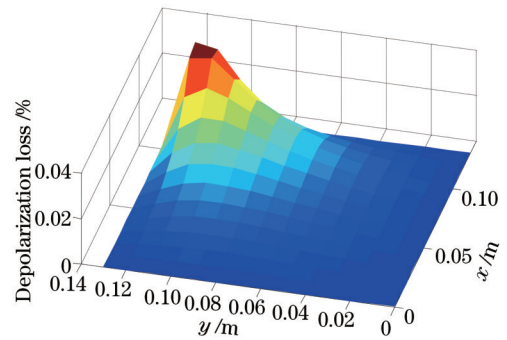


图10 应力双折射致光束横截面上的退偏损耗分布

Fig.10 Depolarization loss distribution at cross-section induced by stress birefringence

5 结 论

采用优化的开关设计参数建立薄膜电极重复频率电光开关的仿真模型,分析了开关的时间特性和热管理效率。仿真结果表明,开关的时间约为 100 ns,满足标称时间要求;开关晶体的温升在 180 s 时已经进入稳态,稳态时晶体的最大温升为 1.68 K,最大温度梯度为 $-82.7 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$,最大应变为 -3.09×10^{-5} ,最大应变出现在光斑边界处,开关的热致退偏损耗小于 0.328%,应力退偏小于 0.038%,热沉积对开关性能的影响很小,因此开关的热管理效率很高。研究结果验证了薄膜电极开关在高功率重复频率激光系统中的可行性,为 10^{-1} J/cm^2 在

16 Hz条件下薄膜电极重复频率电光开关的实现提供了理论依据。

参考文献

- 1 S Z Kurtev, O E Denchev, S D Savov, *et al.*. Effect of thermal induced birefringence in high average power[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(3): 278.
- 2 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, *et al.*. Numerical study of the thermo-effects and its management in plasma Pockels cell for high-energy laser systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0102007.
张 君, 张雄军, 吴登生, 等. 高能重复频率运转条件下等离子体普克尔盒热效应及其控制理论分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0102007.
- 3 A Bayramian. Progress towards a compact laser driver for laser inertial fusion energy[R]. 7th International Workshop HEC-DPSSL, CA, 2012.
- 4 Xiao Yi, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. Fiber-optic humidity sensing based on graphene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406005.
肖 毅, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的光纤湿度传感研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406005.
- 5 A Bayramian, S Aceves, T Anklam, *et al.*. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy[J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 60(1): 28-48.
- 6 Wu Dengsheng, Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang, *et al.*. Study on temporal behaviour of one-pulse-process plasma electrodes Pockels cell with 400 mm×400 mm aperture[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1227-1230.
吴登生, 张雄军, 郑建刚, 等. 400 mm×400 mm 口径单脉冲普克尔盒时间特性研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1227-1230.
- 7 Alexander A Balandin, Suchismita Ohosh, Wenzhong Bao, *et al.*. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. *Nano Letter*, 2008, 8(3): 902-907.
- 8 F Bonaccorso, Z Sun, T Hasan, *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 611-621.
- 9 Shi Zhaohui, Liu Xuesong, Huang Yutao, *et al.*. 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1002006.
石朝晖, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1002006.
- 10 S W Green, D S Slinn, R N F Simpson, *et al.*. Fluid of perfluorocarbon[J]. *Organofluorine Chemistry*, 1998, 23(2): 4458.
- 11 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, *et al.*. Convection heat of transfer intensity and its enhancing in plasma electrodes pockels cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 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(1): 368-373.
- 12 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun, *et al.*. Research on a repetition rate plasma pockels cell with 20 mm aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1772-1775.
张雄军, 吴登生, 张 君, 等. 20 mm 孔径重复频率等离子体电光开关研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1772-1775.
- 13 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, *et al.*. Depolarization loss electro-optic crystal KDP heated by repetition frequency laser[J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2008, 20(2): 229-233.
张 君, 张雄军, 吴登生, 等. 重复频率应用下等离子体电光开关热退偏损耗分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 229-233.
- 14 Zhang Kecong, Wang Ximin. *Nolinear Optic Crystal Material Science*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 142-150.
张克从, 王希敏. *非线性光学晶体材料科学*[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 142-150.
- 15 Cao Dingxiang, Zhang Xiongjun, Zheng Wanguo, *et al.*. Simulation of thermodynamics of electrode switches for high average power[J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2006, 18(9): 1417-1422.
曹丁象, 张雄军, 郑万国, 等. 开关晶体在高平均功率下的热力学特性模拟分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(9): 1417-1422.
- 16 P Kaminow. Strain effects in electrode optic light modulators due to RF heating[J]. *Appl Opt*, 1964, 3: 511.
- 17 Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.*. Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040001.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040001.
- 18 Xu Pengxiang, Li Xuechun, Wang Jiangfeng, *et al.*. Gas-cooled laser diode-pumped solid-state laser amplification module design and thermal management[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1002001.
徐鹏翔, 李学春, 王江峰, 等. 气体冷却激光二极管抽运的固体激光放大模块设计及热管理研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1002001.

栏目编辑: 张 雁