

## 薄膜电极重频电光开关的热管理

庄令平<sup>1,2</sup>, 张雄军<sup>1</sup>, 张君<sup>1</sup>, 郑建刚<sup>1</sup>, 龙蛟<sup>1</sup>, 田晓琳<sup>1</sup>, 郑奎兴<sup>1</sup>, 朱启华<sup>1</sup>

(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部, 北京 100088)

**摘要:** 透明导电薄膜作电极的普克尔盒电光开关是新一代重频激光驱动系统的理想单元。高重频会在电光晶体内产生热沉积, 引起弹光效应, 热光效应和晶体形变, 使透射光束的波前产生畸变。针对能量千焦耳级, 重复频率 16 Hz 率的激光系统, 对薄膜电极普克尔盒采用液冷技术进行热管理; 建立普克尔盒的热分析模型, 利用有限元算法, 分别研究晶体厚度和换热系数对波前畸变的影响, 得到晶体厚度的最优值。并模拟了开关晶体上的温度分布、应力分布和机械形变, 分析热光效应、机械形变和弹光效应对光束波前和退偏损耗的影响, 结合波前畸变和退偏损耗的要求得到优化的参数。

**关键词:** 电光开关; 热管理; 透明导电薄膜; 高平均功率; 波前畸变; 退偏损耗

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0921001

## Thermal management of rep-rate electro-optical switch with thin film electrode

Zhuang Lingping<sup>1,2</sup>, Zhang Xiongjun<sup>1</sup>, Zhang Jun<sup>1</sup>, Zheng Jiangan<sup>1</sup>, Long Jiao<sup>1</sup>,  
Tian Xiaolin<sup>1</sup>, Zheng Kuixing<sup>1</sup>, Zhu Qihua<sup>1</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

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

**Abstract:** Transparent Conductive Films (TCFs) electrode electro-optic pockels cell is an ideal switch device for high repetition rate laser system. High repetition leads to heat accumulation on the electro-optic crystal, which cause thermal-optical effect, elasto-optical effect and bulk displacement, then results in the generation of wavefront distortion. Aimed at 1 kJ output energy and 16 Hz repetition frequency laser system, the TCFs electrode pockels cell was designed using liquid cooling technology. Thermal analysis models of pockels cell were established using the finite element analysis. The influence of crystal thickness and convective heat transfer coefficient on wavefront distortion were researched, and the optimal value of crystal thickness was got. Considering the distribution of liquid flow, the thermal designed data were analyzed. Besides, the temperature, bulk displacement and stress distribution were simulated to get the related wavefront distortion and optimal structure value. The researched results can be used to guide the design of the repetitive frequency electro-optic switch.

**Key words:** electro-optical switch; thermal management; transparent conductive films;  
high average power; wavefront distortion; depolarization loss

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61308039)

作者简介: 庄令平(1991-), 男, 硕士生, 主要从事重频激光技术方面的研究。Email: zhuang\_lingping@163.com

导师简介: 张雄军(1973-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光技术方面的研究。Email: zhang.xiongjun@163.com

## 0 引言

新一代激光驱动系统要求在高能重频条件下运转,普克尔盒电光开关作为系统中光隔离和多程放大的重要单元,由于热效应的影响普克尔盒很难应用于重频激光系统中<sup>[1-2]</sup>。普克尔盒中的热积累主要来自于电光晶体对光脉冲的线性吸收,热积累会在晶体表面产生温度梯度、机械形变和热应力分布,从而引起热致双折射和波前畸变<sup>[3-4]</sup>。为了减少普克尔盒中的热积累,优化普克尔盒电光开关的热管理特性,Bayramian 等人提出基于透明导电薄膜电极的普克尔盒电光开关的设计,采用了液冷技术增强晶体表面对流换热的能力,从而有效地改善了开关的热效应<sup>[5]</sup>。然而,国内目前还没有针对薄膜电极普克尔盒重频电光开关的热管理技术的相关报道。

文中针对千焦耳能级,16 Hz 重复频率的激光系统,建立了薄膜电极普克尔盒电光开关的有限元热分析模型和流固耦合模型,对开关液体冷却的热管理技术展开了相关的研究。首先建立热分析有限元模型,分析晶体厚度和换热系数对光束波前的影响,并得到优化参数;然后分析了在该参数下,DKDP 晶体中的温度梯度分布、热应力分布和机械形变分布;最后分析热光效应、弹光效应和表面机械形变对光束波前的影响。

## 1 原理

### 1.1 薄膜电极普克尔盒工作原理

薄膜电极普克尔盒的结构是两片薄膜电极夹着一块 DKDP 晶体的三明治结构,薄膜电极高温沉积在基底上,两片薄膜电极和晶体之间都留有缝隙,缝隙中采用液冷技术对晶体端面进行冷却散热,如图 1(a)所示。结合图 1(a)和对称结构特性建立的普克尔盒的机械结构仿真模型如图 1(b)所示, $x$ 、 $y$  分别

表示开关的长宽, $xy$  面为通光面,液体沿着负  $x$  轴方向进入开关缝隙,激光沿着  $z$  轴传播。

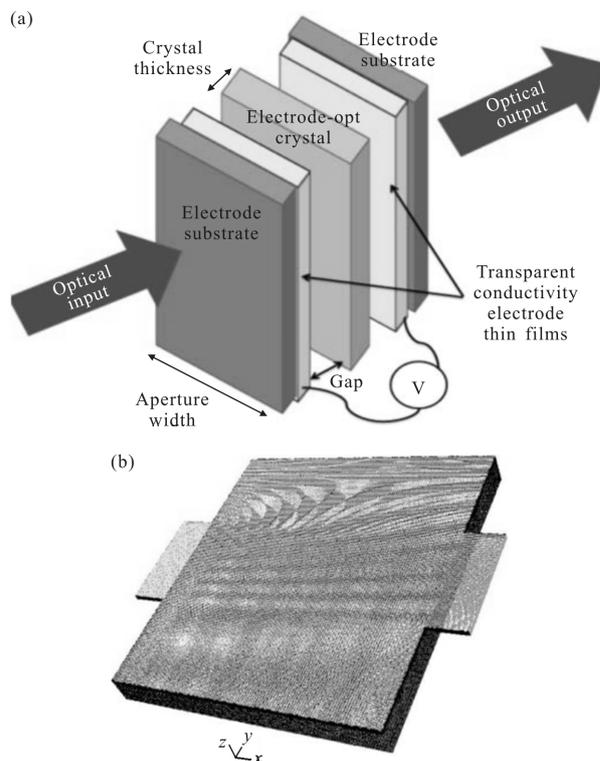


图 1 基于透明导电薄膜的普克尔盒电光开关工作原理图和流固耦合模型

Fig.1 Schematic diagram of TCFs electrode pockels cell electro-optic switch and model of fluid-structure interaction

### 1.2 热效应理论

开关晶体中的热沉积主要来自晶体对激光的线性吸收,设电光晶体的线性吸收系数为  $\alpha$ ,则晶体中的热功率密度  $q_v$  可表示为<sup>[6]</sup>:

$$q_v = \alpha I(x, y) \exp(-\alpha \cdot l) \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$  为激光功率密度; $l$  为激光传输方向的厚度。开关晶体中的热分布可用瞬态热传输方程来表述<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = k_{11} \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} \right) + k_{33} \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + q_v \\ T(x, y, z; 0) = 293 \\ -k_{33} \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = h_c [T(x, y, z) - T_{gas}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Sigma$  为晶体的通光面; $c$  为电光晶体的定压比热容; $k_{11}$ 、 $k_{33}$  均为热传导系数; $\rho$  为晶体密度; $h_c$  为流固耦合面上的对流换热系数; $T_{gas}$  表示冷却液的温度。

温度梯度导致的热应力分布遵循胡克定律,故应力与应变之间的关系表述为<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_{ij} + \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

式中: $E$  为弹性模量; $\varepsilon_{ij}$  为热应变; $\sigma_{ij}$  为热应力; $\alpha$  为热膨胀系数; $\delta_{ij}$  为可鲁倪策-迪尔符号,若  $i$  与  $j$  不同则  $\delta$  等于 0,相同则为 1。

热光效应和弹光效应引起的晶体折射率变化和温度分布不均匀,导致晶体产生形变,引起入射光产生了光程差<sup>[8]</sup>:

$$S_{\text{OPD}} = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y) dz + n_0 \Delta u(x, y) + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^l \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{ij}} \varepsilon_{ij}(x, y) dz \quad (4)$$

开关晶体的半波电压表达式为:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n_0\gamma_{63}} \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为入射光波长; $\gamma_{63}$  为 DKDP 晶体的电光系数; $n_0$  为  $o$  光折射率。考虑了热效应后开关晶体的相位延迟为:

$$\Gamma_1 = \pi \left[ 1 + 3 \frac{\partial n_0}{\partial T} \frac{\Delta T}{n_0} + \frac{\partial \gamma_{63}}{\partial T} \frac{\Delta T}{\gamma_{63}} \right] \quad (6)$$

式中: $\Delta T$  为温升; $\frac{\partial n_0}{\partial T} \frac{\Delta T}{n_0} = -6.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\frac{\partial \gamma_{63}}{\partial T} \frac{\Delta T}{\gamma_{63}} = -5.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , 因此公式(6)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:

$$T = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \exp(-\alpha l) \sin^2 \left( \frac{\Gamma_1}{2} \right) \quad (7)$$

式中: $l$  为晶体厚度; $I_{\text{in}}$  和  $I_{\text{out}}$  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:

$$f = 1 - \exp(-\alpha l) \sin^2 \left( \frac{\Gamma_1}{2} \right) \quad (8)$$

温度梯度产生的热应力也将改变晶体的折射率椭球,从而使开关产生应力双折射。当考虑热应力后,电光晶体的折射率椭球为:

$$\frac{1}{n_0^2} (x^2 + y^2) + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\Delta B_6 xy = 1 \quad (9)$$

式中: $x, y$  为二重晶轴; $z$  为光轴。

$$\Delta B_6 = P_{66} \Sigma_6 \quad (10)$$

式中: $P_{66}$  为弹光系数; $\Sigma_6$  为剪应变。

当纵向应用时,厚度为  $l$  的 DKDP 晶体由应力双折射引起的相位延迟为:

$$\Gamma_2 = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta B_6 l (1 + \alpha \Delta T) \quad (11)$$

将上式代入公式(8)可以得到应力双折射引起的退偏损耗。

### 1.3 对流换热理论

流体在流动的过程中发生的热传递现象就称为对流换热,对流换热的原理是依靠流体质点的移动进行能量的传递,对流换热系数是对流体传热问题

的主要表征<sup>[9]</sup>。流体流动要受到物理守恒定律的支配,多维流体运动与对流换热的方程组可以表示为:

$$\frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mu}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (14)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \eta \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (15)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \mu \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

公式(12)为质量守恒方程,公式(13)、(14)、(15)为动量守恒方程,公式(16)为能量守恒方程; $F_x, F_y, F_z$  为  $x, y, z$  三个方向上的体积力分量; $\lambda$  为导热系数; $\eta$  为流体的粘度; $\rho$  为流体密度; $c_p$  为流体定压比热容。

## 2 模拟分析

基于上节的基础理论和液体冷却的普克尔盒开关模型,普克尔盒的设计目标如表 1 所示。结合表 1 中的光斑大小并考虑边界效应,可以将电光晶体的横截面尺寸设定为  $26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ 。激光系统的光通量  $0.5 \text{ J/cm}^2$ ,重复频率  $16 \text{ Hz}$ ,DKDP 晶体的光吸收系数为  $0.5/\text{m}$ ,根据热功率密度公式(1)可算得来回两程激光穿过晶体时光斑区域的产热量为  $16 \text{ W/cm}^2$ 。

表 1 薄膜电极普克尔盒的设计目标<sup>[4]</sup>

Tab.1 Design goals of thin film electrode Pockls cell

| Characteristic                           | Requirement    |
|--|----------------|
| Repetition rate/Hz                       | 16             |
| Fluence/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$  | 0.5            |
| Beam size/cm                             | $24 \times 24$ |
| Wavefront distortion/ $\lambda$          | 0.5            |
| Wavelength/nm                            | 1064           |
| Switch time/ns                           | <100           |
| Temperature gradient/ $^{\circ}\text{C}$ | <1             |

### 2.1 晶体厚度、对流换热系数对光束波前的影响

弹光效应、热光效应和应力形变均会对透射光束的波前产生影响,最直接的方法是减少电光晶体

的厚度,进而可以直接减少晶体对激光的线性吸收,从而降低晶体内的热沉积,但还需要结合目前 DKDP 晶体的加工水平来取得最优的厚度参数。另一种方法是,通过增强电光晶体表面的对流换热来带走晶体内多余的体积热。为保证透射光束的质量,将波前畸变控制在设计范围之内,需要分析研究晶体的厚度和晶体表面的对流换热系数对透射光束波前的影响,进而得出优化的参数值。

根据表 1 中的设计参数,利用 ANSYS 进行热分析,得到图 2(a)所示不同厚度的晶体达到稳态时的温度分布,由图可知晶体的厚度越小,对激光的非线性吸收越小,电光晶体内的热沉积也越小。图 2(b)为波前畸变随对流换热的变化曲线,在厚度相同时,随着增大换热系数  $h_c$ , 流体对介质的冷却效果明显增强,波前畸变也随之减小。图中还可以看出  $h_c$  在 40~80  $W/m^2 \cdot K$  之间时波前畸变减小快速,但是当换热系数达到 80  $W/m^2 \cdot K$  值以后的变化趋于稳定,单纯地增大  $h_c$  对波前畸变的改善效果已不再明显。

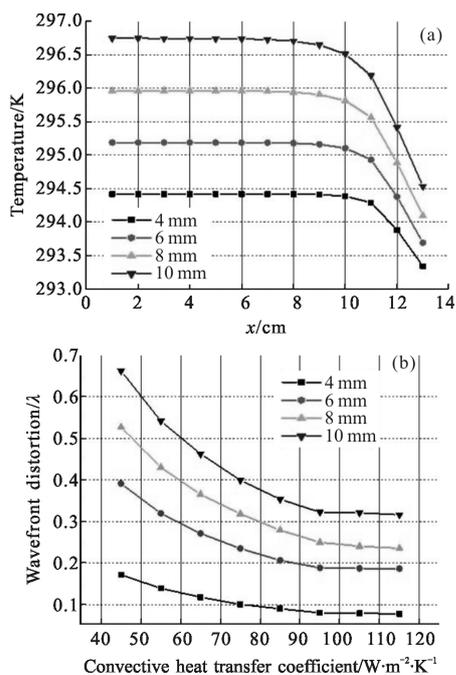


图 2 不同厚度晶体的热效应  
Fig.2 Thermal effects of the crystal with different thickness

## 2.2 开关间隙内的流体分布

图 3 为开关缝隙中冷却液体分布的示意图,冷却液体从入口区流入开关缝隙,在缝隙中的冷却区对晶体进行对流换热,换热后的液体由扩散区离开开关缝隙。图 3 中四个边角的流体分布较为稀疏,换

热能力较差,但是中间的通光区域流体分布均匀稳定,换热能力较强。为了使得液体在缝隙冷却区域内保持匀速稳定,流体入口和扩散区的设计需要达到合理的宽度,结合图 1(b)中普克尔盒开关的流固耦合模型和 1.3 节的流体对流换热理论,模拟流体入口处流速和开关缝隙大小对换热系数的影响,分别如图 4(a)、(b)所示。图 4(a)表明流速和换热系数呈对数关系,图 4(b)可以看出当缝隙宽度较大时,对换热系数的影响趋于平缓。

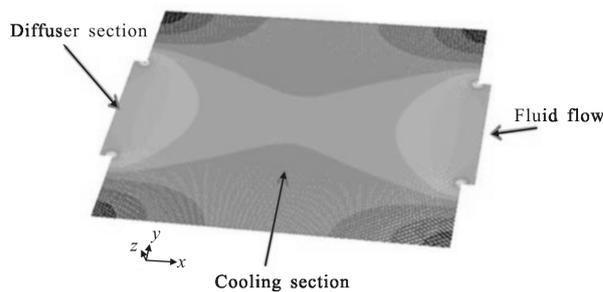


图 3 冷却缝隙中流体分布图

Fig.3 Distribution of the fluid in the cooling gap

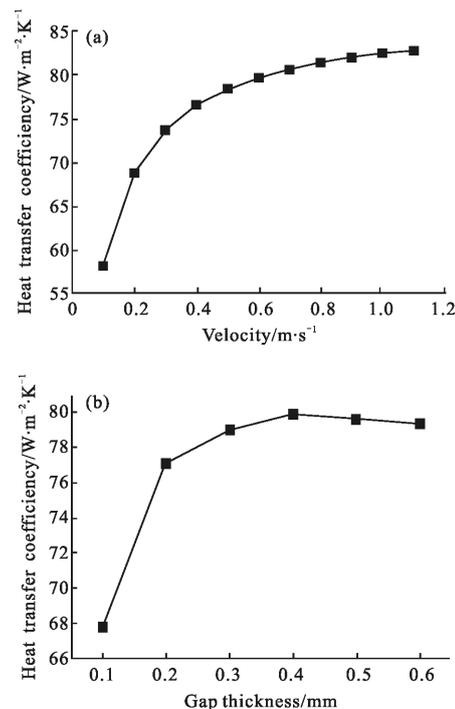


图 4 对流换热系数随速度的变化曲线和对流换热系数随开关缝隙的变化曲线

Fig.4 Curve of convection heat transfer coefficient versus fluid velocity and curve of convection heat transfer coefficient versus gap width

图 5 给出了开关冷却缝隙内沿着  $x$  方向上冷却液的速度(见图 5(a))和温度(见图 5(b))分布。将图 5(a)和图 3 相结合可以看到: 流体在前后的入口区和扩散区的流速较大, 在中间冷却区域内(通光区域)保持匀速状态, 流速约为  $0.24 \text{ m/s}$ 。另外, 如图 5(b)所示, 经过冷却缝隙后, 由于晶体的散热作用, 冷却流体的温度由初始的  $293 \text{ K}$  上升到了  $293.6 \text{ K}$ , 对液冷效果会有一定的影响, 可能使得开关晶体表面沿着液体冷却方向产生温度梯度。

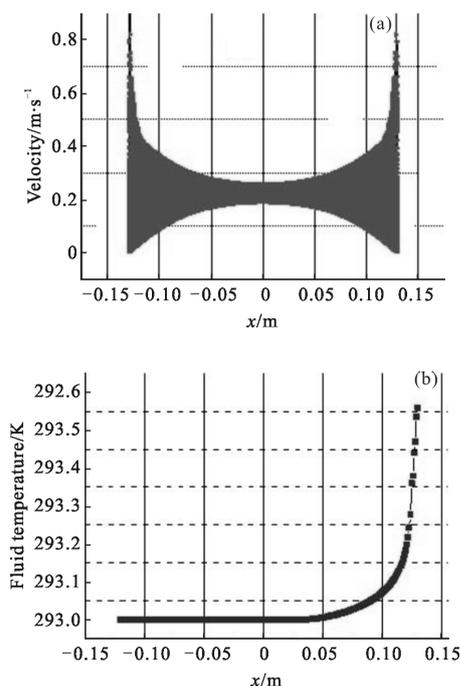


图 5 冷却缝隙内横截面上流体速度与温度

Fig.5 Velocity of the fluid and temperature in cross section of the cooling gap

### 2.3 热效应分析

依据 2.2 节的分析, 将晶体厚度设计为  $4 \text{ mm}$ , 喷嘴处流体速度为  $0.6 \text{ m/s}$ , 开关缝隙的大小为  $0.5 \text{ mm}$  时, 晶体端面上的对流换热系数  $h_c=81 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 开关的波前畸变小于  $0.5\lambda$ , 满足开关对光束波前的要求。设开关晶体的初始温度为  $293 \text{ K}$ , 前后端面用液体冷却, 端面的换热系数表示为  $h_c$ , 其余侧面作绝热处理且无膨胀形变。

基于上述的设定, 利用有限元数值分析法, 通光方向沿着晶体厚度  $z$  轴的方向,  $x$  和  $y$  方向为晶体的长宽方向, 取四分之一片晶体作为热分析对象。在开关达到热稳态后, 开关晶体上的温度、应力和形变分

布分别如图 6 所示。

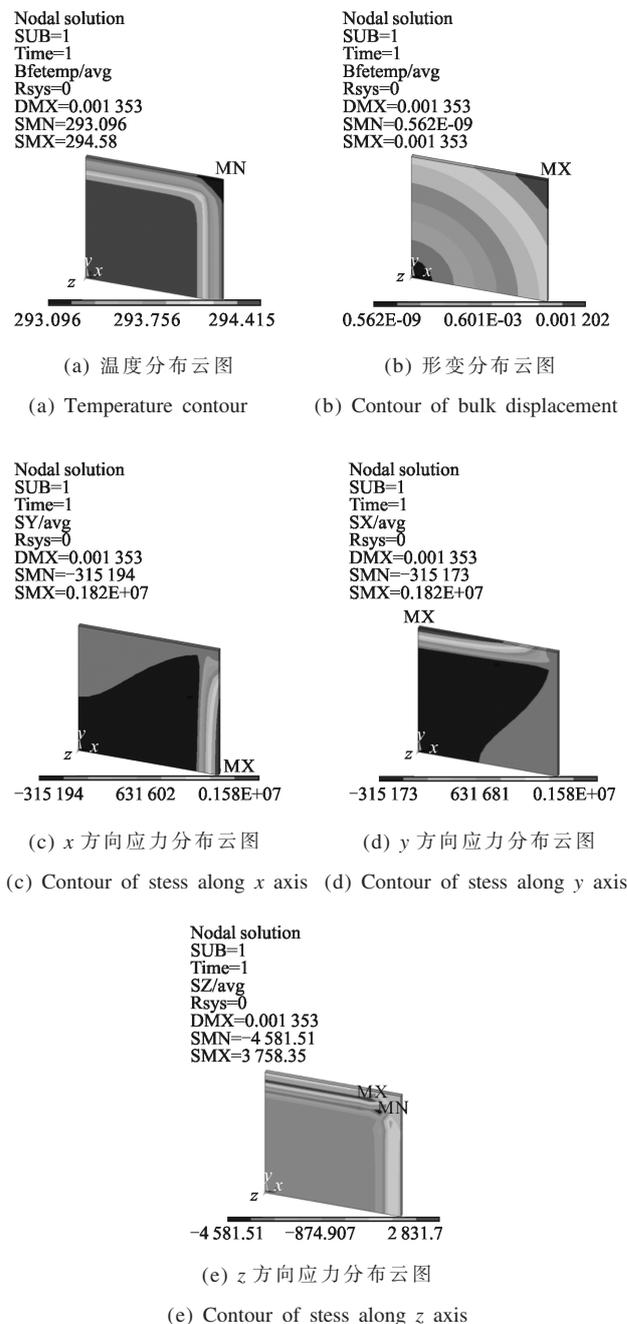


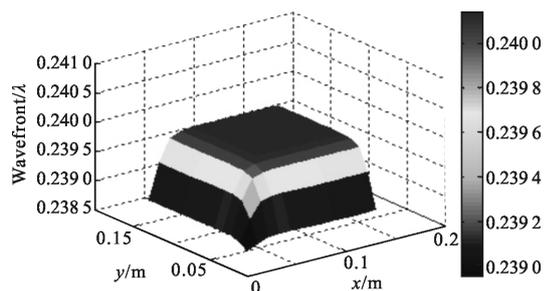
图 6 开关晶体的有限元分析图

Fig.6 Finite element analysis results of switch crystal

由图 6(a)得到晶体上光斑区域温度最高为  $294.58 \text{ K}$ , 晶体边界温度最低, 约为  $293.01 \text{ K}$ , 这与光斑大小有关。温度分布沿冷却方向存在一定的温升, 这与冷却流体的温度有所升高相关, 最大的温度梯度处于光斑边界处。图 6(b)为晶体的形变图, 中心的形变最小, 边界形变最大且形成一定的温度梯度。图 6(c)、(d)、(e)分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的应力分布图, 从图中可以明显看出应

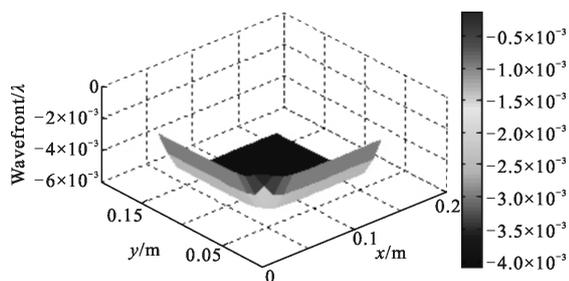
力主要分布在晶体边界,最大的应力值约为 1.87 MPa,满足 DKDP 晶体断裂应力要求<sup>[10]</sup>。

将开关晶体上的应力分布、温度分布和表面的机械形变以矩阵的形式代入公式(3),分别得到晶体由热光效应和形变导致的光束波前畸变,分别如图 7(a)、(b)所示,图 7(c)为总的波前畸变,总波前畸变的大小约为  $0.2397\lambda$ 。热光效应导致的波形畸变为  $-0.003\lambda$ ,机械形变导致的波形畸变为  $0.024\lambda$ 。机械形变导致的波前畸变最大,热光效应导致的波前畸变最小,图 7(a)、(b)图中的波前畸变均是边界变化剧烈而中间区域平坦,且边缘部分形成了一定的梯度<sup>[11-12]</sup>。从图 6 和图 7 中可以发现,图中(a)和图 6 中的晶体温度分布图相似。



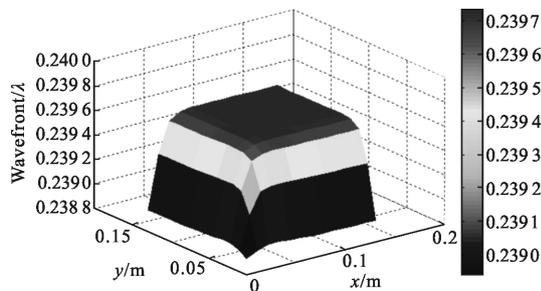
(a) 端面形变引起的波前畸变

(a) Bulk displacement wavefront distortion



(b) 热光效应引起的波前畸变

(b) Thermo-optical effect induced wavefront distortion



(c) 总波前畸变

(c) Total wavefront distortion

图 7 投射光束的波前畸变

Fig.7 Wave-front distortion of the transmission beam

晶体横截面上存在温度梯度,折射率和电光系数随着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<sup>[12-13]</sup>。将图 6 温升分布代入公式(6)得到相位延迟,再将  $T_1$  代入公式(8)得到温致退偏损耗在晶体横截面上的分布,如图 8 所示。图中退偏在光斑区域最明显,退偏最大值为 0.328%,出现在光斑中心处。

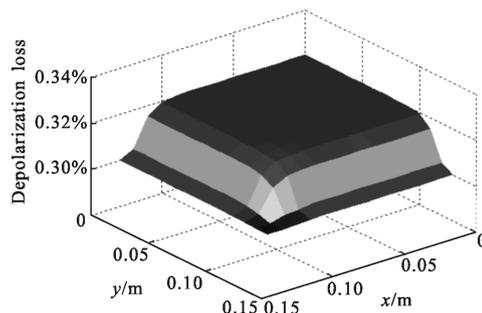


图 8 温度致晶体横向退偏损耗分布

Fig.8 Depolarization loss distribution at crystal cross-section induced by temperature

同理,将图 6 中的温度分布和应变分布代入公式(11),再由公式(8)得到应力双折射引入的退偏损耗分布规律,如图 9 所示。从图中可以看出,应力导致的退偏损耗最大值出现在光斑的边界处,为 0.038%; $x$ 、 $y$  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。

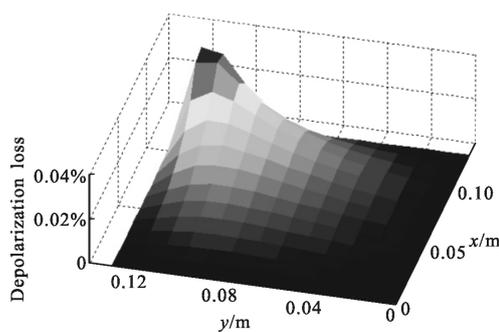


图 9 应力双折射致光束横截面上的退偏损耗分布

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

### 3 结论

基于新一代激光驱动装置,为了管理开关的热效应并将波前畸变控制在一定范围内,设计了薄膜电极普克尔盒电光开关的结构,分析了开关流体换

热能力与结构之间的关系,得到开关缝隙的大小 0.5 mm 时,缝隙中的流体保持匀速,流固耦合面上的换热系数取得最大值  $81 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。结合流体的分布情况,对开关单元建立热分析模型,得出了波前畸变与晶体厚度、对流换热系数的关系,在晶体厚度不变的情况下,通过增大流体的流速和缝隙的宽度均可使得波前畸变减小。最后通过热分析得到 4 mm 厚度的开关晶体温度、形变和应力分布,进一步求得透射光束波前畸变,热光效应引起的波前畸变量为  $-0.003\lambda$ ,端面形变引起的波前畸变量为  $0.024\lambda$ ,热光效应对波前畸变的影响小于端面形变引起的波前畸变,透过光束的波形畸变量较小;开关的温致退偏最大值 0.328%,出现在光斑中心处,应力退偏最大值只有 0.038%,集中在光斑边界处,对开关性能的影响几乎可以忽略不计,薄膜电极电光开关的热管理效率很高。

#### 参考文献:

- [1] Bayramian A. Progress towards a compact laser driver for laser inertial fusion energy [C]//7th International Workshop HEC-DPSSL, 2012.
- [2] Zhang Xin, Liu Yuan, He Yan, et al. Characteristics of eye-safe high repetition frequency narrow pulse width single mode all fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1105-1109. (in Chinese)  
张鑫,刘源,贺岩,等.人眼安全高重复频率窄脉宽单模全光纤激光器特性研究[J].红外与激光工程,2015,44(4): 1105-1109.
- [3] 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. (in Chinese)  
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.
- [4] Kurtev S Z, Denchev O E, Savov S D, et al. Effect of thermal induced birefringence in high average power[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(3): 278.
- [5] Bayramian A, Aceves S, Anklam T, et al. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy [J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 60(1): 28-48.
- [6] Cao Dingxiang, Zhang Xiongjun, Zheng Wanguo, et al. Simulation of thermodynamics of electrode switches for high average power [J]. *High Power and Partical Beams*, 2006, 18(9): 1417-1422. (in Chinese)  
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.
- [7] Sutton S B, Fuxin G F. Optical distortion in end-pumped solid-state rod lasers[J]. *Appl Optics*, 1993, 32(27): 5256-5269.
- [8] Huang M. Stress effects on the performance of optical waveguides [J]. *International Journal of Solid and Structures*, 2003, 40(7): 1615-1632.
- [9] Song Xueguan, Cai Lin. Fluid Structure Coupling Analysis [M]. Beijing: Waterpub Press, 2012: 3-8. (in Chinese)  
宋学官,蔡林.流固耦合分析与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2012: 3-8.
- [10] Zhang Kecong, Wang Ximin. Nonlinear Optic Crystal Material Science [M]. Beijing: Science Press, 2005: 142-150. (in Chinese)  
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.
- [11] Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, et al. Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE [J]. *Laser-optoelectronic Progress*, 2015, 18(4): 1-9. (in Chinese)  
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,2015,18(4): 1-9.
- [12] 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. (in Chinese)  
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.
- [13] Zhang Deping, Wu Chao, Zhang Rongzhu, et al. Study on thermal effect of LD end-pumped separated amplifier structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2250-2255. (in Chinese)  
张德平,吴超,张蓉竹,等.LD 端面泵浦分离式放大器结构的热效应研究[J].红外与激光工程,2015,44(8): 2250-2255.