

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0301-05

# 开关晶体在高平均功率下的热力学特性的模拟

曹丁象<sup>1,2</sup>, 张雄军<sup>2</sup>, 郑万国<sup>2</sup>, 贺少勃<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>国防科技大学光电技术与工程学院, 湖南长沙 410073  
<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘要** 基于有限元数值方法模拟分析了 LiNbO<sub>3</sub>, DKDP, KDP 等电光晶体材料在高平均功率激光负载下的热力学特性。结果表明, 当入射激光功率为 2 kW, 光斑尺寸为 20 mm×20 mm, 激光照射时间为 10 s 时, 三种材料的最大温升分别为 0.45 K, 7.04 K 和 76.02 K, 最大热应力分别为 0.528 MPa, 4.78 MPa 和 47 MPa。

**关键词** 材料; 电光晶体; 高平均功率; 热力学; 有限元

**中图分类号** O736 **文献标识码** A

## Simulation of Thermodynamics of Electro-Optic Switches for High Average Power

CAO Ding-xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiong-jun<sup>2</sup>, ZHENG Wan-guo<sup>2</sup>, HE Shao-bo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>2</sup> Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The thermodynamics of electro-optic switch materials such as LiNbO<sub>3</sub>, DKDP and KDP used in high average power laser systems is analyzed by use of finite element methods. The results show that when the power of input laser with the facular of 20 mm×20 mm gets up to 2 kW under the radiation time of 10 s, the maximum temperature rises of the three materials are 0.45 K, 7.04 K and 76.02 K, respectively, and the maximum thermal stresses are 0.528 MPa, 4.78 MPa, 47 MPa, respectively.

**Key words** materials; electro-optic crystal; high average power; thermodynamics; finite element methods

## 1 引言

固体激光器的平均功率受到光路中光学材料热负载的限制。在激光介质材料中, 热负载主要是抽运过程中的各种热沉积, 而在被动光学材料如电光开关晶体中的热负载主要是由晶体对激光的线性吸收产生的。虽然电光晶体的激光吸收系数较小, 但由于其双折射光学特性, 所以它对热退偏更敏感, 即便只有 1% cm<sup>-1</sup> 的吸收, 也可能导致电光晶体成为高平均功率激光器的限制部件<sup>[1,2]</sup>。影响电光开关晶体热效应的因素很多, 其中开关构型、晶体材料本身的物性参量等起决定性作用。有关电光晶体的热特性分析不少学者<sup>[1~5]</sup> 曾进行过研究。本文就电光开关晶体的热力学特性进行有限元数值模拟与分析讨论, 以探索在高平均功率条件下, 不同电光晶体

材料的热畸变行为及其变化规律。

## 2 物理模型

### 2.1 热传输模型

激光系统中的电光开关晶体的热负载主要是由晶体对激光的线性吸收产生的。设电光晶体的线性吸收系数为  $\alpha$ , 那么晶体中的热功率密度为

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

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

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

在进行有限元分析时, 热源项作为体积热生成率载荷施加。假定晶体尺寸为 2 cm×4 cm×1 cm, 边界与周

**基金项目:** 中国工程物理研究院科学基金(20050436)资助课题。

**作者简介:** 曹丁象(1973—), 男, 甘肃静宁人, 国防科技大学光电技术与工程学院博士研究生, 主要从事高功率固体激光器的研究。E-mail: caodingxiang02@163.com

围环境之间为自然对流换热,其对流换热系数近似为 1.8 W/(m<sup>2</sup> · K)。激光功率为 2 kW,波长为 1.064 μm,光斑大小 20 mm×20 mm,加载在入射面

中央部位。电光晶体分别是 KDP,DKDP 和 LiNbO<sub>3</sub> 晶体,它们的基本物理性质参量如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 电光晶体材料的物性参量

Table 1 Physical parameters of electrooptic materials

	KDP	DKDP	LiNbO <sub>3</sub>
Density / (kg · m <sup>-3</sup> )	2338	2355	4640
Specific heat / (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	730	700	700
Heat conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	K <sub>11</sub> 1.76	K <sub>11</sub> 1.9	K <sub>11</sub> 5.6
	K <sub>33</sub> 1.30	K <sub>33</sub> 2.1	K <sub>33</sub> 5.6
Thermal expansion coefficient / (10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup> )	α <sub>11</sub> 25	25	15
	α <sub>33</sub> 44	44	7.5
Elastic constants / GPa <sup>-1</sup>	C <sub>11</sub> 15.3	C <sub>11</sub> 15.75	C <sub>11</sub> 5.78
	C <sub>12</sub> 2.1	C <sub>12</sub> 2.1	C <sub>12</sub> -1.01
	C <sub>13</sub> -3.8	C <sub>13</sub> -4.0	C <sub>13</sub> -1.41
	C <sub>33</sub> 19.6	C <sub>33</sub> 20.14	C <sub>14</sub> -1.02
	C <sub>44</sub> 77.5	C <sub>44</sub> 79.0	C <sub>33</sub> 5.02
	C <sub>66</sub> 168	C <sub>66</sub> 168.3	C <sub>44</sub> 17.0
Linear optical absorption coefficient / (m <sup>-1</sup> ) (λ=1.064 μm)	5	0.5	0.1

电光晶体内的热传输模型由下述标准的有内热源三维瞬态热传输方程来描述,假设初始温度分布均匀,为 300 K,

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \\ T(x,y,z;0) = 300, \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial h} \Big|_s = h_c (T - T_{\text{gas}}), \end{cases} \quad (3)$$

式中 Σ 为晶体的通光面,κ,ρ,C 分别为晶体的热传导系数、密度和定压热容,h<sub>c</sub> 为晶体同周围空气的自然对流换热系数。

### 2.2 热弹性力学模型

由于电光晶体内存在一定的温度(梯度)分布,而晶体不可能发生完全自由的三维热膨胀,因此必须根据热力学边界条件来确定晶体的变形以及热应力分布。标准的热弹性力学的边值问题由下述方程控制

$$\begin{cases} L^T \cdot \sigma + g = 0, \\ \epsilon = L \cdot u, \\ \sigma = D \cdot (\epsilon - \epsilon_0), \\ \Sigma \cdot n|_s = -C(u|_s - u_\infty), \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xx} & \sigma_{yz} & \sigma_{zx} \end{bmatrix},$$

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx} \quad \tau_{xy}]^T,$$

$$\epsilon = [\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{xy}]^T,$$

$$\epsilon_0 = [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \Delta T,$$

$$u = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T, \quad n = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T,$$

g 为电光晶体的体力密度,D 和 C 分别为材料常数矩阵和弹性刚度系数矩阵。

### 3 数值模拟结果

有限元网格划分时,热分析选择网格单元 Solid90 类型,结构分析时,由于电光晶体的物性参量是各项异性的,因此选择 Solid186 类型。利用 Mesh Tools 生成有限元模型,如图 1 所示。

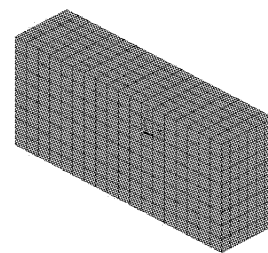


图 1 有限元分析物理模型

Fig. 1 Physical model for finite element analysis

### 3.1 温度分布

三种晶体中,KDP 晶体对  $1.064 \mu\text{m}$  激光的线性吸收系数最大,是  $5 \text{ m}^{-1}$ ,因此相同光负载下的热沉积最大。图 2 给出了 KDP 晶体在激光照射 10 s 时的温度轮廓,最高温度是 376.019 K,出现在晶体的中心点,而在晶体的两端温度是 300 K,在光传输的横截面上出现明显的温度梯度。DKDP 晶体的线性吸收系数是  $0.5 \text{ m}^{-1}$ ,激光辐照 10s 后的最高温

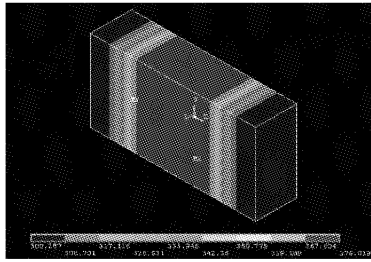


图 2 KDP 晶体上的温度分布

Fig. 2 Temperature distributions of KDP

度是 307 K,而  $\text{LiNbO}_3$  晶体的光线性吸收系数很小,约为  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ,所以相同条件下引起的温升最小,晶体中心点的温度最高,但平均值还不到 300.5 K。

图 3 给出了三种晶体在激光辐照 10 s 后在光斑入射面上的温度分布,发现三种晶体在高度 ( $y$  轴) 方向温度分布很均匀,而在宽度 ( $x$  轴) 方向存在一定的温度梯度,KDP 晶体光斑区的温度梯度最大,达到 24 K,DKDP 光斑区温度梯度为 3 K,而  $\text{LiNbO}_3$  晶体的整体温度变化不大,因此宽度 ( $x$  轴) 方向的温度梯度只有 0.4 K。这是因为在高度方向,热边界和晶体边界完全一致,因此在均匀的光斑辐照下,高度方向温度分布很均匀,而宽度方向,热边界小于晶体边界,所以出现较大的温度梯度。横向的温度梯度会引起波前畸变,需要在设计中采取措施尽量减小横向热梯度,如尽量使光强的空间分布均匀,并使光束边界尽可能靠近晶体的实际边界,使边界温降发展区移到晶体口径之外。

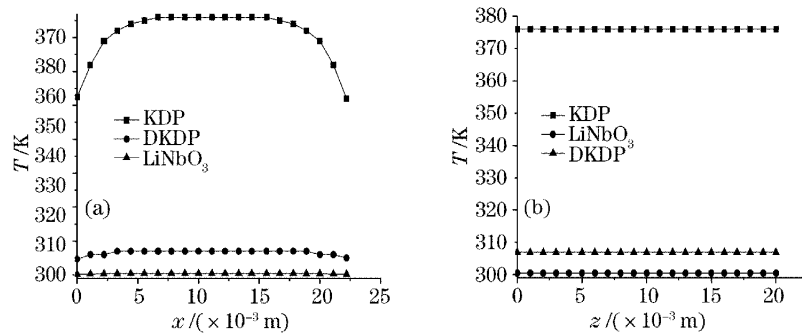


图 3 激光辐射 10 s 后光斑区域晶体上  $x$  方向(a)和  $z$  方向(b)的温度梯度分布

Fig. 3  $x$  axial (a) and  $z$  axial (b) temperature distributions of facular area after 10 s heating

图 4 是整个晶体横向温度梯度和纵向温度梯度,由于热传导的影响,在晶体的激光辐照区外,也有一定的升温。但因电光晶体的热传导系数太小,未辐照区的温升较小,这样,就在晶体的整个横截面上出现

了大的温度梯度,KDP 晶体上横向温度梯度达 76 K,DKDP 晶体上有 7 K, $\text{LiNbO}_3$  晶体只有 0.6 K。在模拟计算中,假设电光晶体和周围环境的热交换很少,取自然对流换热系数为  $1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,因而纵向

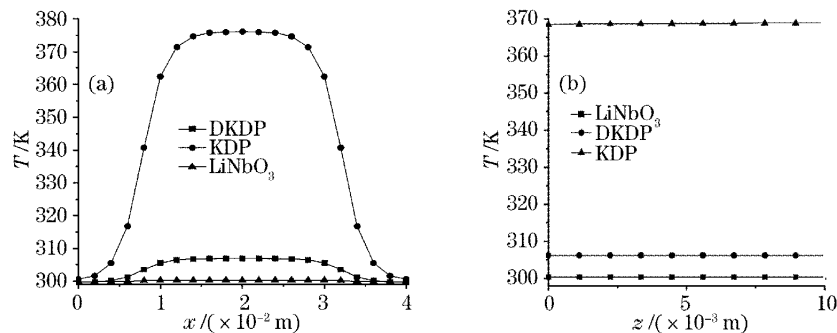


图 4 激光辐照 10 s 后晶体上  $x$  方向(a)和  $z$  方向(b)的温度梯度分布

Fig. 4  $x$  axial (a) and  $z$  axial (b) spatial distributions of crystal temperature after 10 s heating

的温度梯度很小。

### 3.2 热应力分布

由于在晶体内存在着如前所述的温度梯度,因此在晶体内出现了如图 5 所示的热应力分布。图 5 的应力是指主应力最大值,正值表示拉应力,负值表示压应力。由于固体材料的抗压性能大大强于抗拉性能,在晶体的热分析中,主要关心晶体的最大拉应力是否超过其破碎应力。图 6 给出了电光晶体宽度方向和厚度方向棱边上的热应力分布,由图看到,大的热应力出现在光斑加载的边界上,光斑的顶点处应力最大,在 KDP 晶体上大应力达到

47 MPa, DKDP 晶体上的最大应力为 4.78 MPa, LiNbO<sub>3</sub> 晶体上最大应力有 0.528 MPa。

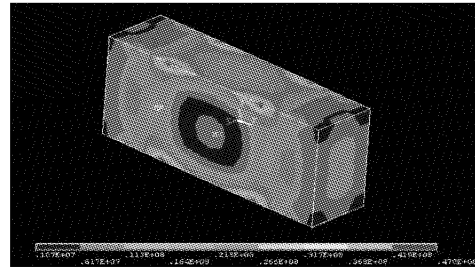


图 5 KDP 晶体上的热应力分布  
Fig. 5 Thermal stress distributions of KDP

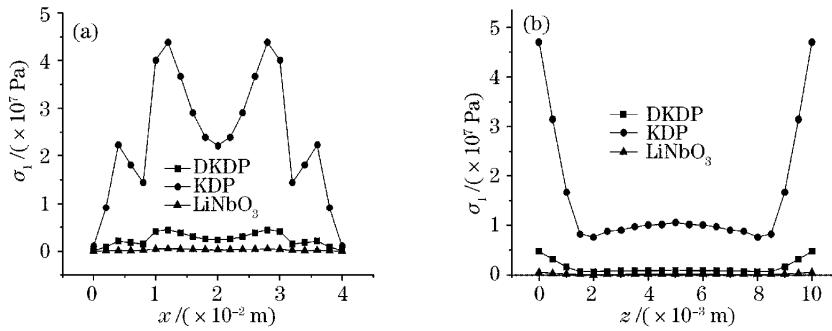


图 6 晶体棱边上  $x$  方向(a)和  $z$  方向(b)的热应力分布  
Fig. 6  $x$  axial (a) and  $z$  axial (b) stress distributions along edge of crystal

图 7 是电光晶体横截面上光斑边界处的热应力分布。KDP 晶体上,纵向热应力最大梯度达到 40 MPa,横向最大梯度是 28.8 MPa。大的热应力

梯度不仅会引起波前畸变,甚至有可能造成晶体断裂,因此需要在设计中采取措施尽量避免过大的热应力出现。

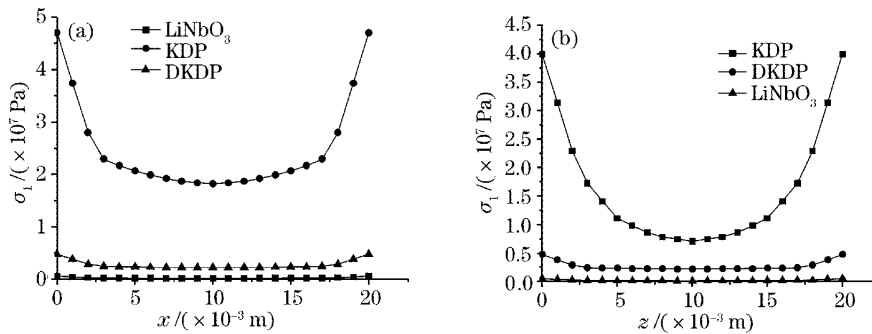


图 7 光斑边沿  $x$  方向(a)和  $z$  方向(b)的热应力分布  
Fig. 7  $x$  axial (a) and  $z$  axial (b) stress distributions along edge of focal area

## 4 结 论

基于有限元数值方法,模拟分析了不同电光晶体材料在相同激光负载条件下的热力学特性,可以看到,对于不同的电光晶体材料,晶体的温升与热应力情况各不相同。绝对温升由吸收系数决定,分布由晶体的物性参量决定。相同的激光负载下 KDP

的热负载最大,引起的温升为 76 K,热应力为 47 MPa, LiNbO<sub>3</sub> 的温升和热应力最小,分别为 0.45 K 和 0.528 MPa。当然,决定某种电光晶体能否应用于高平均功率激光系统,除了考察其热力学特性外,还要考虑其他特性如电光系数、光损伤阈值以及在高重复频率时 有无压电效应等。

## 参 考 文 献

- 1 I. P. Khristov, I. V. Tomov, S. M. Saltiel. Self-heating effects in electro-optic light modulators [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1983, **15**(4): 289~295
- 2 S. Z. Kurtev, O. E. Denchev, S. D. Savov. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electro-optically Q-switched Nd:YAG lasers and their compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 278~285
- 3 L. F. Weaver, C. S. Petty, D. Eimerl. Multikilowatt Pockels cell for high average power laser systems [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(6): 2589~2598
- 4 X. D. Wang, P. Basseras, R. J. Dwayne Miller *et al.*. Investigation of KTiOPO<sub>4</sub> as an electro-optic amplitude modulator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(5): 519~521
- 5 Christopher A. Ebberts, Stephan P. Velsko. High average power KTiOPO<sub>4</sub> electro-optic Q-switch [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(5): 593~595
- 6 Zhang Kecong, Wang Ximin. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [M]. Beijing: Science Press, 2005. 117~305  
张克从, 王希敏. 非线性光学晶体材料手册 [M]. : 北京: 科学出版社, 2005. 117~305