

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

张 君 张雄军 吴登生 田晓琳 郑建刚 段文涛 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高能重复频率运转的激光系统中, 用作激光隔离、多程放大控制的关键单元普克尔盒遇到了通光口径限制与热效应的双重挑战。采用等离子体电极技术将普克尔盒定标到大口径, 通过选择吸收系数小且通光方向薄的 KD*P 作为电光晶体以减少对激光的吸收, 并在此基础上数值分析了等离子体普克尔盒的热效应。提出了端面传导冷却电光晶体的热管理方法, 并进行优化设计。数值模拟结果显示, 采用单块白宝石传导冷却 2 块 KD*P, 普克尔盒的驱动电压可降低至 27 kV。在平均功率密度 35 W/cm^2 的激光持续辐照下, 端面传导冷却的 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 口径等离子体普克尔盒全口径内最大退偏损耗为 0.22%, 波前峰谷(PV)值为 0.60λ 。

关键词 光学器件; 电光开关; 重复频率; 热效应; 热管理

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0102007

Numerical Studying of the Thermo-Effects and Its Management in Plasma Pockels Cell for High-Energy RF Laser Systems

Zhang Jun Zhang Xiongjun Wu Dengsheng Tian Xiaolin

Zheng Jianguang Duan Wentao Li Mingzhong

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

Abstract In high average power laser system, electro-optic switches encounter both limitation of aperture and thermo-effects. Plasma-electrodes technology is adopted to scale the switch to large aperture, and thin KD*P is used as electro-optic crystal to reduce absorption of the laser. Based on analyzing thermo-effects, a mean of end-face conduction-cooling the KD*P is arised, and optimum design is done. Numerical simulation results show that, by adopting one piece of sapphire to cool two pieces of KD*P, the required switch-voltage could be reduced to 27 kV. For 35 W/cm^2 average power density laser, the maximum depolarization in the end-face conduction-cooled switch, which has a $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ aperture, is 0.22%, and the peak to valley(PV) value is 0.60λ . These perturbations are acceptable to meet the design requirements.

Key words optical devices; electro-optic switch; repetition frequency; thermo-effects; thermo-management

OCIS codes 230.0230; 230.2090; 230.3240; 140.6810

1 引 言

新一代固体激光驱动器的核心内涵主要包括以下技术指标: 高效、重复频率、高通量、高可靠性。用作激光隔离、多程放大控制的关键单元普克尔盒遇到了通光口径限制与热效应的双重挑战, 使得电光开关成为高平均功率激光器的限制部件之一^[1,2]。环电极普克尔盒由于电场均匀性的要求, 晶体纵向

长度与横向通光口径的比通常要大于 2:1, 这样通光口径为数厘米的普克尔盒将由于严重的光吸收使得其在重复频率应用中变得不现实^[3]。横向激励的普克尔盒电场均匀性与晶体厚度无关, 但其存在自然双折射, 在平均功率应用下, 必须采用两块完全相同的晶体进行热补偿。美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室(LLNL)研制的口径 $3.25 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的

收稿日期: 2010-04-17; 收到修改稿日期: 2010-05-19

作者简介: 张 君(1982—), 男, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光器方面的研究。E-mail: Jackie.2010@yahoo.com

KD*P横向应用热补偿开关,可承受 300 W 的平均功率^[4]。热学上最佳开关所要求的薄晶体导致横向普克尔盒有很高的半波电压和很强的表面电场,这将带来普克尔盒驱动源的研制难度。等离子体普克尔盒可以定标到大口径,采用薄晶体,因此是中等口径至大口径电光开关的理想选择^[5]。但由于电光晶体所处环境气压低,换热系数小,电光晶体对激光线性吸收产生的热量不能被有效地带走,这样热沉积将引起应力双折射、退偏、波前畸变等不良热效应,从而使得激光器的平均输出功率受到限制,光束质量变差,因此需要从根本上消除热效应^[6~9]。

本文正是针对大口径高能重复频率普克尔盒的需求背景与所面临的技术难题开展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的分析研究。旨在通过探索控制电光晶体的平均温升及横向上温度梯度的技术途径,以实现低退偏、高隔离比、小波前扰动的重复频率等离子体普克尔盒。

2 理论模型

等离子体普克尔盒具有三明治结构,由两个放电腔夹着一块装有电光晶体的绝缘板构成。放电室的外侧用光窗真空密封。此外,在放电室的壳体上还装有抽气、进气、真空测量以及电极馈电接口。放电室内气压由真空泵维持动态平衡,动态下,开关脉冲通过放电室内气体放电形成的高电导率等离子体施加^[10]。

高能重复频率激光辐照下,由于对激光的线性吸收,电光晶体内将产生热沉积,其中部分热量被放电腔中的惰性气体带走,另一部分沉积在电光晶体中,使得电光晶体温度升高。即使光负荷是空间分布均匀的,但由于边界条件的影响,晶体温度分布必然存在一定的梯度^[11,12]。而晶体不可能发生完全自由的三维热膨胀,因此将产生变形和热应力,进一步导致双折射、退偏、波前畸变等不良热效应,从而使得普克尔盒性能下降。

为了确定平均功率光负荷下热对普克尔盒性能的影响,必须确定电光晶体内的温度分布、热应力分布以及变形情况。本模型主要包括 3 个子模型:1) 热传输有限元模块,用以确定在重复频率激光辐照下电光晶体温度场分布;2) 热弹性力学有限元模块,用以确定电光晶体变形以及热应力分布;3) 光学模块,根据前 2 个模块计算得到的温度分布、应力分布、变形情况确定入射激光的波前畸变和热退偏损耗。整个热效应分析模型数据流程如图 1 所

示,其中热传输和热弹性力学模块基于 Ansys 软件开发,光学模块基于 Matlab 开发,模型已在文献[8]中做了详细的论述,这里不再赘述。

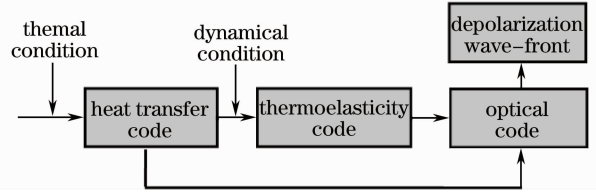


图 1 热效应分析模型数据流

Fig. 1 Data flow diagram of thermo-effects simulation

3 热效应理论分析

3.1 晶体内热沉积

激光的平均功率一定时,电光晶体内热沉积大小取决于晶体的吸收系数以及放电腔中惰性气体对电光晶体的换热系数。晶体对激光的线性吸收以体积热生成率加载。设电光晶体的线性吸收系数为 α ,那么晶体中体积热生成率为

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

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

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

放电腔内惰性气体对晶体的冷却效果用换热系数来描述,换热系数大小由惰性气体的流动状态决定。对有限尺寸竖立的封闭夹层来说,夹层内流体的流动状态,主要取决于以夹层厚度 σ 为特征长度的格拉晓夫数^[13]

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T\sigma^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度, β 为特征温度的倒数, ΔT 为晶体与放电腔中惰性气体之间的平均温差, ν 为惰性气体的运动粘度。格拉晓夫数描述了气体的运动状态,当 Gr 极低时换热依靠纯导热。随着 Gr 的提高,会依次出现向层流特征过渡的流动(环流)、层流特征的流动、湍流特征的流动。与之相对应,有几种不同的经验关联式。对于 $\phi 72 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的放电腔,假设放电腔内惰性气体为 He 气,气压为 4000 Pa,稳态下晶体表面平均温度为 50 °C,窗口温度为 20 °C,则定性温度

$$T_m = \frac{50 + 20}{2} = 35 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (4)$$

压力 4000 Pa,定性温度为 35 °C 下,He 气的物性参数为: $\nu = 21.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta = 1/T_m = 3.25 \times$

10^{-3} K^{-1} , 可得 $Gr=137.92$ 。由于 Gr 太小, 认为 He 气换热依靠纯导热, 则对流换热系数

$$h_c = \frac{\rho c_p v_{\text{gas}}}{S_{\text{KD}^* \text{P}}}, \quad (5)$$

式中 $S_{\text{KD}^* \text{P}}$ 为电光晶体的横向尺寸, $\rho = 6.62 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, $c_p = 5200 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 分别为 He 气的密度与定压比热容, $v_{\text{gas}} = 1 \text{ L/min}$ 为放电腔内 He 气的平均流速。根据(5)式可得 $h_c = 0.81 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

3.2 计算参数

针对设计要求: 激光为超高斯准平顶光束, 其通量为 3.5 J/cm^2 , 重复频率为 10 Hz , 光束口径为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。为了减小晶体对激光的吸收, 选用吸收系数较小的 $\text{KD}^* \text{P}$ 作为电光晶体, 厚度取 5 mm 。晶体宽度、高度、厚度分别对应于 x, y, z 轴, 光沿 z 轴传输。 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体的物性参数为: 密度 $\rho = 2.335 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 定压比热容 $c_p = 700 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 热传导系数 $k_{11} = k_{22} = 1.9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $k_{33} = 2.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 对于波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 寻常光折射率 $n_o = 1.493$, 吸收系数 $\alpha = 0.5 \text{ m}^{-1}$; 弹光系数 $p_{11} = 0.287$, $p_{12} = 0.282$, $p_{13} = 0.174$, $p_{31} = 0.241$, $p_{33} = 0.122$, $p_{44} = -0.019$, $p_{66} = -0.064$; 热膨胀系数 $a_x = a_y = 2.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $a_z = 4.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。根据(2)式可得晶体内体积热生成率 $q_v = 1.75 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, 假设晶体初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。晶体两个通光面与放电腔中惰性气体对流换热, 对流换热系数由(5)式给出。

3.3 重复频率应用下电光晶体内的温度分布

当入射激光功率密度均匀分布, 且换热系数均匀分布时, 由于光束口径与晶体口径不一致, 晶体内的热传导将产生横向温度梯度。图 2 给出不同填充因子下, 激光辐照晶体 5 min 后, 晶体内的最大温升和横向温差曲线。从图中可以看出, 随着填充因子的增大, 晶体内绝对温升增大, 横向上温差减小, 这是因为填充因子增大晶体口径减小引起的。

取晶体口径为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 即填充因子为 0.8。图 3 给出晶体内最高温度随时间的变化曲线。随着运行时间的推移, 晶体内温度持续上升。5 min 时, 晶体内最高温度为 $43.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 4 为普克尔盒运转 5 min 后, 晶体内的横向温度分布。最高温度出现在光斑中心, 最低温度出现在晶体边缘, 横向温差为 $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在无主动热管理情况下, 温度梯度将导致应力双折射、退偏、波前畸变等不良热效应, 使得普克尔盒性能下降。长时间运转, 晶体内温度持续升高, 甚至造成晶体相变, 导致普克尔盒开关功能失效, 因此需要进行高效热管理。

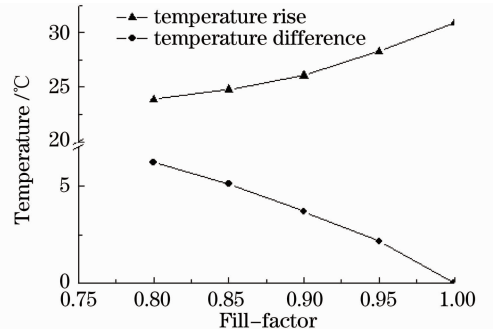


图 2 填充因子对温升及温差的影响

Fig. 2 Dependence of temperature distribution on the filled-factor

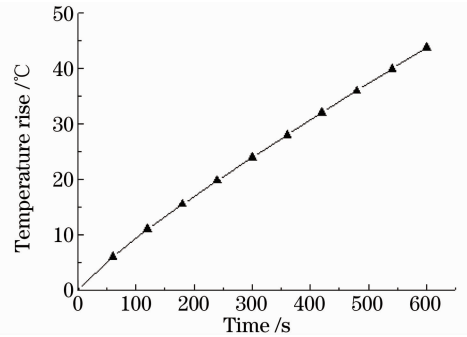


图 3 晶体内最高温度随激光辐照时间的变化

Fig. 3 Dependence of the maximum temperature on the laser irradiance time

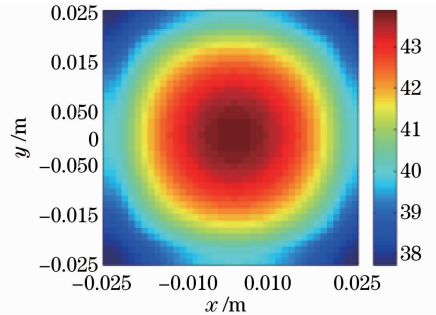


图 4 激光辐照 5 min 后晶体内的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in $\text{KD}^* \text{P}$ after 5 min irradiance

4 热效应控制

热交换有 3 种方式: 传导换热、对流换热、热辐射。由于等离子体普克尔盒的电光晶体为薄板构型, 大口径的端面为通光面, 因此适合采用端面传导冷却技术进行热控制。目前常见的冷却介质有金刚石, 白宝石, SiC 及氮化硼。但是金刚石、氮化硼的相对介电常数太小, 分别为 5.6 和 3.5, 为使电光晶体分压达到半波电压, 将带来高电压驱动源的研制难度。 SiC 具有较高的相对介电常数(10), 但目前

生长大尺寸且红外透射率高的单晶尚处于实验室研制阶段。考虑到光学上、热学上、电学上、加工尺寸以及性价比的要求,白宝石是理想的热沉选择。

传导冷却方式中,侧面强制水冷的白宝石与KD*P电光晶体通光面直接接触,白宝石对KD*P的冷却效率取决于两者之间的界面接触热阻。为不失一般性,取3种不同接触状态比较,即较好接触 $[h_c=1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,中等接触 $[h_c=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,较差接触 $[h_c=100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ^[14]。为了降低驱动电压,采用单片白宝石同时冷却两片KD*P。图5给出不同接触状态下,达到热平衡时,KD*P和白宝石通光面中心纵向温度分布。从图中可以看出,较差接触下KD*P和白宝石界面的处存在明显的温度跳变,晶体升温较高。中等接触下,KD*P晶体升温即可得到有效的控制,升温小于 $4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

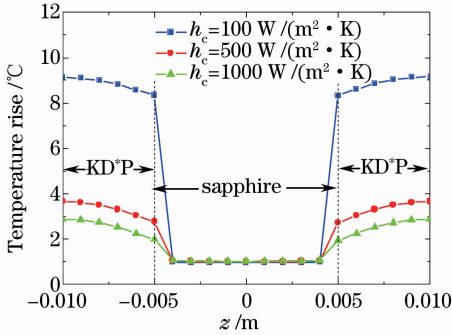


图5 热平衡状态下通光面中心的纵向温度分布
Fig. 5 Dependence of the temperature rise on the contact status

端面传导冷却的等离子体电光开关采用纵向电光效应,为使入射的线偏振光偏振态转过 90° ,两片等厚的KD*P晶体应分别施加 $V_{\pi/2}$ 电压, $V_{\pi} = \lambda / (2n_o^3 \gamma_{63})$, λ 为激光波长, n_o 为寻常光折射率, γ_{63} 为纵向电光系数。由于白宝石的分压作用,驱动源需提供的开关电压为

$$V_{\text{switch}} = V_{\pi} \left(1 + \frac{\epsilon_{\text{KD}^* \text{P}}}{\epsilon_{\text{sapphire}}} \cdot \frac{d_{\text{sapphire}}}{d_{\text{KD}^* \text{P}}} \right), \quad (6)$$

式中 $\epsilon_{\text{KD}^* \text{P}}$ 和 $\epsilon_{\text{sapphire}}$ 分别为KD*P和白宝石的介电常数, d_{sapphire} 为白宝石的厚度, $d_{\text{KD}^* \text{P}}$ 为两片KD*P的总厚度。图6给出了热沉与晶体厚度比对温升及开关电压的影响,从图中可以看出, $d_{\text{sapphire}}/d_{\text{KD}^* \text{P}}$ 越大,晶体升温越小,冷却效果越好,但相应的开关电压越高,导致驱动源研制难度越大。选取 $d_{\text{sapphire}}/d_{\text{KD}^* \text{P}} = 0.7$ 作为优化点,热平衡状态下晶体内最高温升为 $4.0 \text{ }^\circ\text{C}$,所需的开关电压为 27 kV 。图7给出了热平衡状态下KD*P晶体与热沉白宝石内的温升分布。

温度梯度将导致晶体产生热应力以及端面形

变,光束透射晶体时,由于热光效应,光束被调制,从而产生退偏损耗和波前畸变。图8给出持续工作下光束通过普克尔盒后全口径内的退偏损耗分布,最大退偏为 0.22% ,出现在方形光束口径的4个角上,全口径内平均退偏损耗为 0.02% ,满足设计要求。图9给出了普克尔盒持续工作下光束通过后的

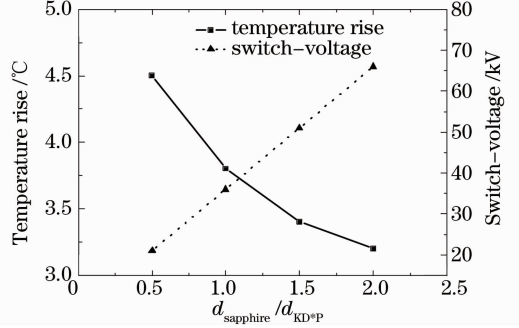


图6 热沉与晶体厚度比对温升及开关电压的影响
Fig. 6 Dependence of the maximal temperature rise and V_{switch} on the $d_{\text{sapphire}}/d_{\text{KD}^* \text{P}}$ value

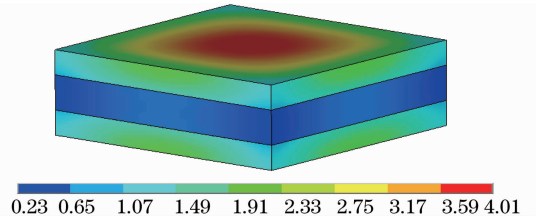


图7 热平衡状态下KD*P晶体与白宝石内的温升分布
Fig. 7 In the heat equilibrium state, the temperature rise distribution in the KD*P and the sapphire

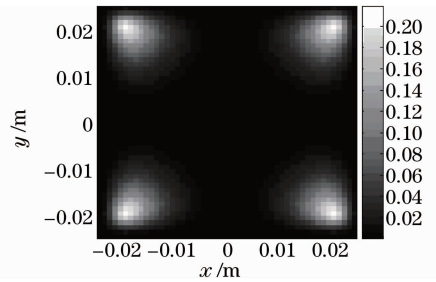


图8 退偏损耗分布

Fig. 8 Depolarization distribution

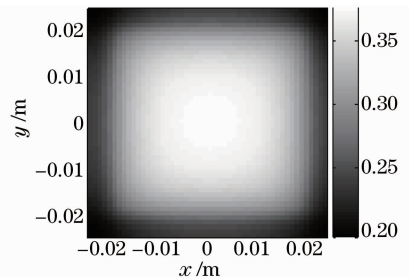


图9 波前畸变分布

Fig. 9 Wave-front distribution

波前分布,全口径内峰谷(PV)值为 0.60λ ($\lambda = 1064\text{ nm}$),热形变引起的波前扰动为低频成分,完全可以由自适应光学系统进行补偿。

5 结 论

在高平均功率激光系统中,用作激光隔离、脉冲注入锁定的关键单元电光开关遇到了通光口径限制与热效应的双重挑战。即使是纵向应用,采用薄晶体,可定标到大口径等离子体普克尔盒,由于放电腔中惰性气体的换热系数太低,只有 $0.81\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,不能将晶体内热沉积有效地带走,也只能工作在单发次工作模式下。对于激光通量为 $3.5\text{ J}/\text{cm}^2$,重复频率为 10 Hz 的激光系统,运转 5 min 后,晶体温度升就达到了 $23.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。为了控制等离子体普克尔盒热效应,提出了端面传导冷却方法,并进行了优化设计。所设计的 40 mm 口径端面传导冷却的等离子体普克尔盒,驱动电压为 27 kV ,可长时间持续运转。数值模拟表明,在激光平均功率密度为 $35\text{ W}/\text{cm}^2$ 的系统中,端面传导冷却的等离子体普克尔盒致激光束全口径内平均退偏损耗为 0.02% ,引起激光束波前畸变 PV 值为 0.60λ ,热效应得到显著的控制。

参 考 文 献

- 1 P. Khristov, I. V. Tomov, S. M. Saltiel. Self-heating effects in electro-optic light modulators [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1983, **1**(4): 289~295
- 2 Charles E. Greninger, Sergio E. Rodriguez. Thermal stress, optical distortion, and birefringence in a heated cylindrical trigonal crystal rod [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87** (12): 8545~8548
- 3 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
- 4 L. F. Weaver, C. S. Petty, D. Eimerl. Multikilowatt Pockels cell for high average power laser systems [J]. *Appl. Phys.*, 1990, **68**(6): 2589~2598

- 5 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun *et al.*. One-pulse driven plasma electrodes Pockels cell with DKDP crystal for repetition-rate application [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (19): 17164~17169
- 6 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
- 7 Cong Zhenhua, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Actively Q-switched intracavity Nd:YAG/GdVO₄ Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 19~22
丛振华, 张行愚, 王青圃 等. 主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/GdVO₄ 拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 19~22
- 8 Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wei Xiaofeng *et al.*. Depolarized-loss analysis of the electro-optic crystal KDP in repetition frequency laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 229~233
张 君, 张雄军, 魏晓峰 等. 重频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
- 9 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
- 10 Wu Dengsheng, Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang *et al.*. Study on temporal behaviour of one-pulse-process plasma electrodes Pockels cell with $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1227~1230
吴登生, 张雄军, 郑建刚 等. $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 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
- 11 Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin *et al.*. Thermal relaxation time of crystal in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1132~1138
宋小鹿, 过 振, 李兵斌 等. 脉冲激光二极管端面抽运固体激光器中晶体的热弛豫时间 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1132~1138
- 12 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史 彭, 李金平, 李 隆 等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
- 13 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. 186~187
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 186~187
- 14 B. S. Yibas. A closed form solution for temperature rise inside solid substrate due to time exponentially varying pulse [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2002, **45**(9): 1993~2000