

文章编号: 0258-7025(2006)08-1025-05

Nd:GGG 激光晶体热容工作下的热致效应与 冷却特性数值模拟

侯立群^{1,2}, 祖继锋¹, 董 玥^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 顾亚龙^{1,2}, 尹宪华¹, 刘志刚¹, 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 基于对称双侧激光二极管(LD)抽运 Nd:GGG(掺钕钆石榴石)激光晶体板条,从热传导基本方程出发,以废热等效于内热源模型为前提,利用有限元分析软件 ANSYS 对 Nd:GGG 板条在热容工作下的瞬态温度场及应力场进行了数值模拟,分析了在不同边界条件下温度和应力随时间和空间的变化特性及其热致变形。计算结果表明:在激光发射阶段,边界非绝热使得板条在垂直光轴方向产生温度梯度,由此产生的折射率梯度和应力梯度导致距离光轴最远的板条边缘和光轴处产生约 0.2 μm 的变形量。同时模拟了冷却阶段空气对流冷却、水循环冷却及喷雾冷却条件下的温度变化过程,研究了适用于热容板条固体激光器工作的冷却手段。

关键词 激光技术;热效应;有限元分析;掺钕钆石榴石晶体

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Numerical Simulation of Thermal Induced Effects and Cooling Characteristics of Nd:GGG Laser Crystal Slabs in the Heat Capacity Operation Mode

HOU Li-qun^{1,2}, ZU Ji-feng¹, DONG Yue^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2},
GU Ya-long^{1,2}, YIN Xian-hua¹, LIU Zhi-gang¹, ZHU Jian-qiang¹

¹Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Based on the fundamental theory of heat transfer, the mathematical formulas that describing the transient temperature distributions of two-sided laser diode (LD) pumped Nd:GGG (gadolinium gallium garnet) heat capacity slab laser were derived in this paper. By means of finite element analysis by ANSYS, transient temperature fields and stress distribution in the slab medium were simulated with various boundary conditions, while the beam distortions induced by thermal gradients were analyzed briefly. The obtained results could benefit to the primary designing of solid state heat capacity laser (SSHCL). Numerical analysis proved that under incomplete adiabatic boundary conditions, it would result in temperature gradients perpendicular to the optical axis. About 0.2 μm optical path differences would occur between the edge and optical axis of the slab. In addition, the thermal distributions in the slab during the subsequent cooling stage were mainly studied. The influences of different cooling methods such as air cooling, water cooling and mist cooling were discussed and cooling methods suitable for a SSHCL were briefly studied.

Key words laser technique; thermal effects; finite element analysis; Nd:GGG crystal

1 引 言

固体激光器的热效应问题是限制高功率和高光

束质量输出的一个主要因素。为解决这个问题,近年来发展了一种新的固体激光器运转方式:即固体

收稿日期:2005-11-25;收到修改稿日期:2006-02-20

作者简介:侯立群(1976—),女,河南义马人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事高功率固体激光器件的研究。E-mail:hlqq@263.net

导师简介:朱健强(1964—),男,江苏苏州人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事高功率激光驱动器的总体光学设计、结构设计以及相关检测技术和测控技术的研究。E-mail:jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

热容激光器(SSHCL),该激光器采用激光发射与冷却在时间上分开的运转模式,有效解决了实时冷却时热致效应对激光高亮度输出的限制。该项技术由美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)于20世纪90年代首先提出^[1,2]。特别是2004年该实验室采用重复率200 Hz和激光二极管阵列(LDA)抽运 Nd:GGG(掺钕钷石榴石)板条,获得了30 kW的平均功率输出,但工作时间短,为1 s,成为当时世界上平均输出功率最高的固体激光器。近年来国际上关于固体热容激光器的研究取得了重要进展^[3~6]。相比之下,国内也开展了固体热容激光器的研究工作^[7~11],已获得平均功率指标在数千瓦量级。

目前关于固体热容激光器的研究报道主要是阶段性实验结果及技术方案与技术进展分析等,而对热容体制下激光介质的温度场、热应力场的时空分布以及其他更深一步的技术分析工作相对较少。本文以5 kW固体热容激光器原理设计方案为例,采用有限元法,对 Nd:GGG 激光介质内的瞬态温度场和热应力场进行了数值计算,并简要分析了激光发射阶段热致效应对波面的影响,然后通过对冷却阶段不同冷却方式下冷却特性的数值模拟,分析了适于固体热容激光器的冷却手段。

2 理论模型

本固体热容激光器由三片相同尺寸的晶体板条组成,激光以振荡方式输出,设计的平均输出功率为5 kW。激光二极管阵列输出的抽运光经耦合系统后,将其强度近似看作是均匀的,从板条两侧对称均匀入射。抽运光和输出激光的方向均为沿 z 轴方向。以其中一个板条为例,计算其瞬态温度场和应力场,坐标系原点选取为晶体板条的中心位置。图1为单片板条的抽运结构示意图^[5]。

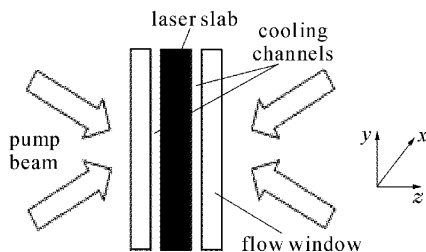


图1 板条固体热容激光器抽运示意图

Fig.1 Schematic diagram of pumping in a slab SSHCL

激光介质所吸收的抽运光能仅有一部分转化为

激光输出能量,其余大部分能量被介质吸收后转化为热,其作用可等效为一个存在于介质内部的虚拟内热源 q_v 。因此激光介质在 q_v 的作用下,其内部温度场是一个随时间和位置变化的函数。根据傅里叶定律,可以建立的瞬态热传导方程为^[12]

$$\frac{\partial^2 T(t, x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(t, x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(t, x, y, z)}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\kappa} = \gamma \frac{\partial T(t, x, y, z)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 κ 为热导率, γ 为热扩散率, $\gamma = \kappa / \rho C_p$, ρ 为密度, C_p 为比热。边界条件分绝热、自然对流和强制冷却三种情况。

由文献^[13],板条的热弛豫时间为

$$\tau = C_p \rho B^2 / 4\kappa, \quad (2)$$

其中 B 为板条的厚度(m)。激光脉冲间隔期4.5 ms(对应重复率200 Hz,占空比10%)与式(2)计算得出的热弛豫时间(板厚为1.5 cm时, $\tau = 24$ s)相比很短,因此抽运光在板条内产生的热效应只取决于平均输入功率^[14]。进一步忽略 z 方向的二次吸收,并设抽运光被介质吸收后转化为热的份额为 χ 。抽运能量沿入射方向随介质厚度呈指数衰减: $I(z) = I_0 e^{-\zeta z}$,其中抽运光强度 $I_0 = P/A$, P 为平均输入功率, A 为吸收面积, ζ 为吸收系数(m^{-1}),则内热源表达式为

$$q_v = \chi \zeta \frac{P}{A} \cdot [e^{-\zeta(B-z)} + e^{-\zeta z}], \quad (3)$$

q_v 在板条厚度方向上是一个随坐标 z 变化的变量。

3 计算结果及讨论

根据式(3),考虑不同的边界条件,借助有限元分析软件 ANSYS 的热-结构耦合单元进行温度场和应力场的模拟。计算时选取参数为:晶体截面尺寸 (xyz) 为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$, $\kappa = 6.43 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $C_p = 380 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$, $\rho = 7090 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\zeta = 300 \text{ m}^{-1}$, $\chi = 0.4$, $E = 300 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $A = 36 \text{ cm}^2$ (有效抽运面积)。

3.1 激光发射阶段介质内的温度及应力分布

在激光发射阶段,设初始温度 T_0 为293 K,晶体表面与空气自然对流,对流换热系数取 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,空气温度 $T_a = 293 \text{ K}$ 。为了对比计算结果,同时也模拟了晶体表面与外界绝热条件下的温度分布。在算例中激光晶体的长宽(xy)相等,故仅列出了 yz 截面的计算结果。

图2给出了 yz 截面沿光轴方向(即板条厚度方

向)的温度分布等值线图。考虑晶体表面绝热情况的计算结果如图 2(a)所示,图 2(b)为实际情况下(存在空气自然对流)的温度等值线图。

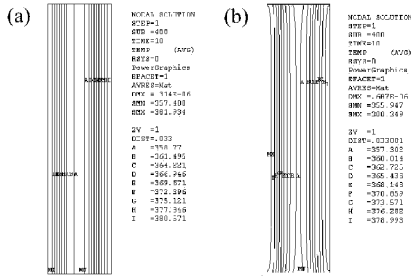


图 2 绝热条件(a)和实际条件下(b)板条的温度分布

Fig. 2 Thermal distributions in adiabatic condition (a) and in real condition (b)

模拟结果表明,在绝热条件下,温度分布在 y 方向是均匀的,沿厚度 z 方向呈轴对称抛物线分布。温度的最大值在板条的两个侧面上,而中心部位的温度较低。比较图 2(b)与图 2(a)可知,实际条件下的温度分布除 z 方向不均匀外,在 y 方向也为非均匀分布。在接近板条中间部位, y 方向的温度变化较小,而接近两端面处的温度分布呈现较大的梯度。所以应尽量减小激光介质和外界的热交换,以使介质内部的温度场梯度较小,必要时在介质的非通光表面涂绝热层,以减小热交换。

介质中的不均匀温度场的存在将导致不均匀的热应力场。随着工作时间的延长,板条表层和中心处的温度差逐渐增加,由此而产生的应力也随时间而增大。图 3 给出了激光发射结束时板条的应力分布情况。最大值处在非抽运面的中心,抽运面中心的应力值次之,并且在分布上呈现很大的不均匀性,由此影响到介质折射率变化导致波面的变化。在激光发射结束时(10 s后),应力最大值约为 24 MPa,为 Nd:GGG 晶体断裂极限的 11%。

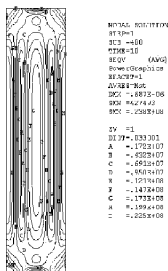


图 3 激光发射结束时的应力分布

Fig. 3 Stress distributions after a lasing period

3.2 激光发射阶段的热致变形

若固体热容激光器在激光发射周期内介质与外界绝热,则在 y 方向温度分布是均匀的,仅在 z 方向上存在着温度梯度。由于 z 方向上的温度梯度对称分布不会引起沿 z 方向入射光束的光程变化,因此在绝热条件下,输出激光束不存在畸变。但在实际实验条件下,边界不完全绝热导致了 y 方向存在温度梯度,由此引起了光束在 y 方向不同位置之间存在光程差。光程差可分为两部分:一部分与介质折射率随温度变化有关;另一部分为板条应力所致,应力带来的热应变通过光弹效应改变介质折射率,会引起光束波面的变化。

本文只计算了介质在 y 方向的折射率 $n(y)$,可分解为与温度和应力有关的分量,表示为^[14]

$$n(y) = n_c + \Delta n(y)_T + \Delta n(y)_\sigma, \quad (4)$$

式中 n_c 为 y 方向板条中心处的折射率, $\Delta n(y)_T$ 和 $\Delta n(y)_\sigma$ 分别表示与温度、应力有关的折射率变化量, $\Delta n(y)_T$ 可表示为

$$\Delta n(y)_T = [T(y) - T(0)] \left(\frac{dn}{dT} \right), \quad (5)$$

式中 $T(0)$ 为起始工作温度, $T(y)$ 为 y 方向上的温度值, $\frac{dn}{dT}$ 为折射率随温度的变化系数。把板条沿厚度 z 方向分为 30 等份,每份厚度 $\Delta z = 0.5 \text{ mm}$,板条在 Δz 厚度内的折射率认为是均匀的,近似由左侧折射率和右侧折射率的平均值表示。因此由温度引起折射率变化而导致的光程差(OPD)可表示为

$$\text{OPD} = \sum_{i=0}^{30} \Delta z \cdot \left(\frac{n_i + n_{i+1}}{2} \right) - n_0 B, \quad (6)$$

式中 n_0 为对应于起始工作温度的折射率。

利用式(6)和 ANSYS 的模拟结果,可得出 z 方向总光程差随 y 的变化如图 4 所示。结果表明,对于非理想情况下的有限尺寸板条, y 方向上的温度梯度分布导致了边缘效应。相对于起始工作温度时的光程 $n_0 B$ 来说,任一沿 z 方向入射的光束在经过板条后具有约 $8 \mu\text{m}$ 的光程差(见图 4(a)),但是共同增加的那部分光程差对光束波面是没有影响的,事实上只有它们之间的相对差值(ΔOPD)才会引起光束波面的变化。计算得到最大的相对光程差为 $0.2 \mu\text{m}$ (见图 4(b))。板条在 y 方向的中间位置的相对光程差大小数值接近,仅在边缘处数值增大,因此对于本算例 5 kW 输出功率的固体热容激光器来说,非绝热的边界条件可以近似认为光束有效通光孔径的减小,或者板条边缘对波面将产生影响。在实际实验中,应尽量采取一些措施使介质接近准绝热状态从

而保证非通光方向温度的均匀性;或者采用复合晶体(基体为掺杂晶体,边缘处为未掺杂晶体)减小边缘效应,等效增加工作介质的口径。

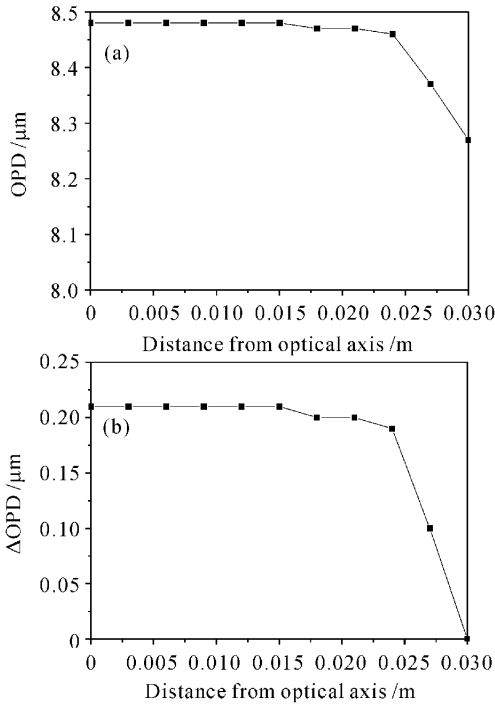


图4 y方向上的光程差分布(a)和相对光程差分布(b)
Fig. 4 OPD distribution (a) and Δ OPD distribution (b) in y-direction

3.3 介质冷却特性

在激光发射阶段结束后,可以对介质进行冷却。为提高冷却效率,可将介质的两通光面(xy)作为换热面。由于冷却阶段并没有激光传输,故不需要考虑冷却过程对光束质量的影响。为了节省计算时间,假设板条表面温度 T_s 和板条中心温度 T_c 之差 $\Delta T < 3$ K,且均不高于初始工作温度3 K范围内时,认为介质已恢复到初始状态,可以进入下一个工作周期。分别计算了空气强迫对流(换热系数 h 取 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,空气温度取 293 K),循环水冷却(取表面换热系数 $h = 1 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$);为了进行对比,冷却水温度分别选取 283 K 和 293 K 两种情况)及喷雾冷却(取表面换热系数 $h = 1 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,冷却液温度取 293 K)方式下介质的冷却特性。

图5为空气对流冷却时,板条 T_s 和 T_c 在15 min内随时间的变化曲线。可以看出,在冷却过程的初始阶段, T_s 急剧降低,而 T_c 在约10 s内先经历一个上升的阶段,然后才开始下降。当 $t = 10 \text{ s}$

时, T_c 达到冷却阶段的温度峰值,约 368 K ,然后 T_s 和 T_c 保持温度下降趋势,约经40 min左右基本恢复到定义的初始工作状态。

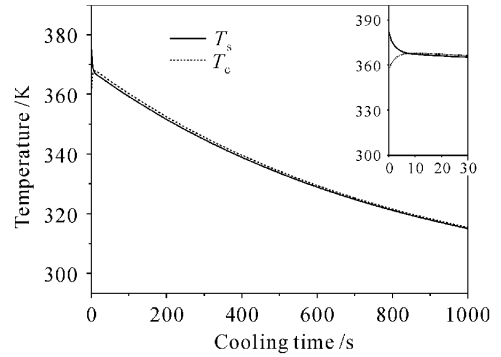


图5 空气自然冷却时板条的温度变化
Fig. 5 Temperature distributions with air cooling

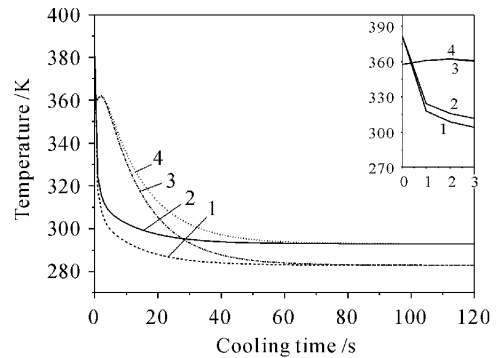


图6 不同冷却水温下板条温度随冷却时间的变化
Fig. 6 Relationship between temperature and cooling time with various water temperatures

图6为循环水冷却方式在不同冷却水温度时, T_s 和 T_c 随时间变化的曲线。其中曲线1,3对应水温 $T_i = 283 \text{ K}$ 时(曲线2,4对应 $T_i = 293 \text{ K}$ 时) T_s 和 T_c 随时间的变化。与空气对流冷却开始情况相似, T_c 在短时间(约1~2 s)内有小幅度升高,而后缓慢降低。而与冷却水直接接触的介质表面 T_s 此时急剧下降,随后的下降趋势较为平缓。介质表面的冷却速度在开始冷却的瞬间达 $50 \sim 60 \text{ K/s}$,之后在 10 K/s 以下。在本算例水冷方式下,冷却阶段的最大应力值发生在约3 s时刻,应力极值点在板条的两抽运面,且为拉应力状态。在 $T_i = 293 \text{ K}$ 时,应力最大值为 60 MPa (应力分布见图7); $T_i = 283 \text{ K}$ 时,应力最大值为 69 MPa ,应力分布图与图7相似。

同时表明,在 $T_i = 293 \text{ K}$ 情形下,当冷却时间至30 s时,板条中心和表面仍存在一定的温差($\Delta T = 7 \text{ K}$),继续延长冷却时间至40 s, $\Delta T < 3 \text{ K}$,但介质的平均温度还未恢复到初始值 293 K 。通过改变

冷却水的温度,即降低至 $T_f = 283 \text{ K}$,当冷却时间到 30 s 时, $\Delta T = 8 \text{ K}$; $t = 43 \text{ s}$ 时, $\Delta T = 3 \text{ K}$,此时介质温度为 287 K。

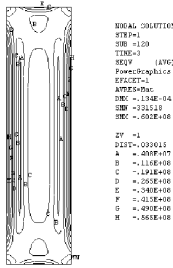


图 7 冷却阶段的应力分布

Fig. 7 Stress distributions during the cooling state

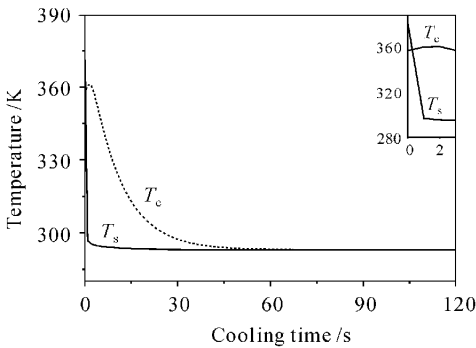


图 8 喷雾冷却时板条温度随冷却时间的变化

Fig. 8 Relationship between temperature and cooling time with mist cooling

针对某些特殊应用,要求热容激光工作介质能在 30 s 左右或更短时间内恢复到初始工作状态,以便能进入下一个工作循环。数值模拟表明在所采用的其他参数(如抽运强度等)不变的条件下,空气对流冷却和室温水对流冷却法已基本达不到满足冷却时间的要求。从传热学角度考虑,可采用具有较高换热系数的方法,如喷雾冷却法。图 8 为模拟得出的采用喷雾冷却时 T_s 和 T_c 随时间变化的曲线。30 s 内板条温度已降至初始状态,且内外温差也仅为 4 K。应力分布规律亦与图 7 类似,最大值为 82 MPa,约为 Nd:GKG 晶体断裂极限的 30%。由此可知,喷雾冷却法可用来冷却某些特殊应用中的固体热容激光器。

4 结 论

针对 Nd:GKG 板条在热容工作周期内不同边界条件下的瞬态温度场及应力场进行了数值模拟,并对板条内存在的不均匀温度分布对波面的影响进

行了计算。结果表明,在 5 kW 平均功率输出的技术方案中,在激光发射阶段,沿 z 方向介质内的温度分布为外高内低的抛物线,激光发射 10 s 后,介质内最高温度达 380 K。不均匀温度场引起的最大应力值为 24 MPa,约为介质断裂极限的 10% 左右。非绝热的边界导致了板条在 y 方向产生温度梯度,由此带来的边缘效应使得沿介质厚度方向产生了最大值为 0.2 μm 的变形量。在冷却阶段,空气对流冷却需要 40 min 才能使介质恢复到初始状态,循环水冷至少需要 40 s 以上(为 283 K 冷却水温);喷雾冷却可将冷却时间降至 30 s 左右,较适合冷却某些特殊场合的固体热容激光器。

参 考 文 献

- C. T. Walters, J. L. Dulaney, B. E. Campbell *et al.*. Nd-glass burst laser with kW average power output [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2):293~300
- Georg Albrecht, E. Victor George, William F. Krupke *et al.*. High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. U S Patent, 5526372, 1996
- M. D. Rotter, C. B. Dane. A 10-kW solid-state heat-capacity laser system installed at HELSTF, white sands missile range [J]. *Laser Science & Technology*, 2001, **12**:1
- M. D. Rotter, C. B. Dane. Solid-state heat-capacity-laser review [C]. 15th Solid State and Diode Laser Technology Review Technical Digest, Albuquerque, NM, USA, 2002. 21~24
- M. D. Rotter, C. B. Dane, S. A. Gonzales *et al.*. The solid-state heat-capacity laser [C]. *Advanced Solid-State Photonics, OSA Trends in Optics and Photonics Series, Proceedings Volume*, 2004, **94**:278~281
- Jeff Hecht. Laser weapons go solid-state [J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(9):61~68
- Sun Zhipei, Li Ruining, Bi Yong *et al.*. Investigation on performance of high repetition diode-pumped heat-capacity Nd:YAG laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(2):339~342
- Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. 300 W diode-pumped solid state heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0):49~52
蔡震,胡浩,蒋建峰等. 二极管泵浦 300 W 热容固体激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(S0):49~52
- Liu Lie, Xu Xiaojun, Yang Jiankun *et al.*. Experiments of solid state heat capacity laser using spark switch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6):845~848
刘列,许晓军,杨建坤等. 基于火花隙开关实现的固体热容激光器实验[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6):845~848
- Peng Qinjun, Bo Yong, Yang Xiaodong *et al.*. A 2277 W solid state heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1477
彭钦军,薄勇,杨晓冬等. 2277 W 全固态热容激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1477
- Hu Hao, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. Numerical simulation of laser characteristics for heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1485~1488
胡浩,蒋建峰,涂波等. 热容激光器激光输出特性的数值模拟[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1485~1488
- Zhao Zhennan. Heat Transfer [M]. Beijing: High Education Press, 2002. 32~44
赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 32~44
- John Vetrovec. Materials for high-average power solid-state lasers [C]. *SPIE*, 2003, **4968**:87~96
- Walter Koehnner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 377~380
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 377~380