

文章编号: 0253-2239(2005)06-829-6

侧面抽运板状激光介质的热汇冷却*

王军荣 闵敬春 宋耀祖

(清华大学航天航空学院传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 高热负荷固体激光介质的热效应已经成为制约激光器功率进一步提高的严重障碍, 只有对激光介质进行有效的冷却才能保证其安全运行。以不均匀换热系数模型为基础, 研究了具有非均匀内热源的侧面双向抽运板状激光介质在狭窄通道强制对流冷却情况下的耦合换热问题, 对热汇冷却方案下介质的温度分布和热应力分布进行了数值模拟和分析, 并对复合介质、蓝宝石和金刚石三种热汇材料进行对比。结果表明, 忽视换热系数的非均匀性将导致应力计算结果偏低。对于侧面抽运、侧面冷却的激光介质, 金刚石热汇冷却方案最佳, 蓝宝石热汇方案次之, 而复合介质方案不宜采用。

关键词: 激光技术; 热效应; 数值模拟; 冷却方案

中图分类号: TN248.1⁺3 文献标识码: A

Cooling of a Side-Pumped Laser Slab by Heat Sink

Wang Junrong Min Jingchun Song Yaozu

(Education Ministry Key Lab of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation, School of Aeronautics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The thermal stress of the high-power solid-state laser slab is becoming a more and more serious problem hindering the further increase of the power of the laser, the laser slab can operate safely only if it is efficiently cooled. Based on the non-uniform heat transfer coefficient model, researches are performed on the cooling characteristics of the both side-pumped laser slab with non-uniform heat source by forced convection cooling in a narrow passage. Numerical simulations are conducted to investigate the temperature and thermal stress distributions of the laser slab cooled by forced convection cooling through heat sink. Three kinds of materials are selected to serve as the heat sink, they are the composite slab, sapphire, and diamond, respectively. The calculation results show that neglecting the non-uniformity of the convective heat transfer coefficient causes an underprediction of the temperature and thermal stress of the slab. For the present side-pumped/side-cooled laser slab case, the cooling scheme using the diamond heat sink is the best, that using the sapphire heat sink follows, whereas that using the composite slab heat sink does not apply.

Key words: laser technique; thermal effect; numerical simulation; cooling scheme

1 引 言

随着现代科学技术的发展, 激光在工业、科研、医疗等领域, 特别是航天及军事领域的应用越来越广泛。高功率固体激光器的研究引起了越来越多的研究者的兴趣^[1~4]。高热负荷固体激光介质作为高功率固体激光器中的关键部件, 在受到高功率抽运光作用时, 内部将产生不均匀内热源, 导致严重的热

效应, 其直接后果是激光功率下降、光束质量降低, 甚至使激光晶体炸裂。热效应已经成为制约激光器功率进一步提高的严重障碍, 只有对激光介质进行有效的冷却才能保证其安全运行。近年来, 高热负荷固体激光介质的冷却问题越来越受到人们的关注^[5~9]。数值研究表明, 抽运面冷却对介质内的温度和热应力分布有明显的影响^[5], 复合介质起着有

* 国家 863 计划(2002AA744042)和高等学校博士学科点专项科研基金(20020003022)资助课题。

作者简介: 王军荣(1976~), 女, 山西省曲沃人, 清华大学博士生, 主要从事固体激光器传热强化的研究。

E-mail: wjr01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-10-13; 收到修改稿日期: 2004-11-12

效的散热作用,可降低介质内的最高温度及最大应力,并改善介质热透镜效应^[5,6]。Mudge 等^[7]利用有限元方法研究发现由于冷却腔的结构而导致的激光介质侧面换热系数的阶跃变化使介质最大应力有所升高,其数值模拟中激光介质的工作部分即发光部分的换热系数均匀。以往研究均基于均匀换热系数的假定。

对于本文研究的板状介质而言,常用的冷却方式为水冷。本研究采用狭窄矩形通道内水的强迫对流换热方式冷却侧面双向抽运板状激光介质的冷却方案。从传热学角度看,这是一个单面加热通道内流动工质(水)与加热面即激光介质间的耦合换热问题,且处于热入口段。在激光介质冷却方案设计中,换热系数是一个极其重要的参量,其不均匀性对激光介质的温度场和热应力场有重要影响。本文以耦

合换热模型为基础,同时考虑换热系数的非均匀分布,通过数值模拟研究了直接冷却及热汇冷却方案下激光介质内的温度场和热应力场,并对不同热汇材料包括复合介质、蓝宝石和金刚石进行了分析和比较。

2 数学模型

2.1 耦合换热模型

图 1 给出了激光介质强制对流冷却方案的示意图。图 1(a)中冷却水直接冷却激光介质,图 1(b)中增加了冷却热汇。其中,冷却水沿 x 方向流过板状激光介质抽运面,对介质进行冷却;抽运光由 y 方向入射,考虑到实际的固体激光器中光抽运腔的结构,本文假设抽运光在 $x-z$ 平面均匀分布。

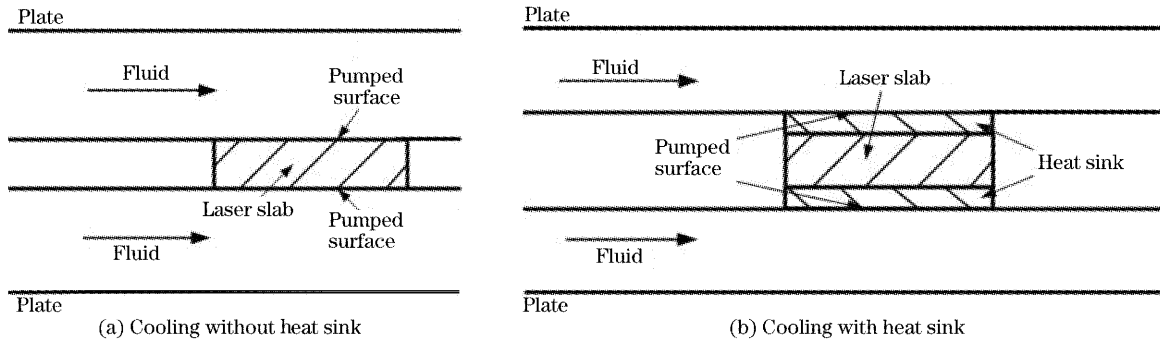


图 1 激光介质强制对流冷却。(a) 直接冷却,(b)热汇冷却

Fig. 1 Forced convection cooling of laser slab. (a) Cooling without heat sink, (b) cooling with heat sink

图 2 给出了数值模拟计算区域示意图。由于介质完全对称,数值模拟中取介质的 1/2 进行计算。本文所研究的激光介质为板状 Nd:YAG 晶体,其几何尺寸为 $d \times b \times L = 1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。通道高度为 $c = 3 \text{ mm}$ 。由于介质 z 方向远大于 x, y 方向,可看作二维问题。图 1(b)中的冷却热汇厚度 d' 为 0.1 mm 。

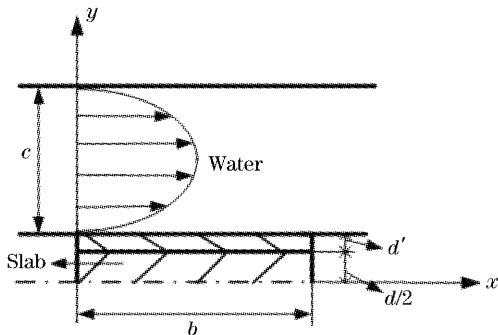


图 2 数值模拟计算区域

Fig. 2 Computational domain

连续抽运固体激光器中,激光介质所吸收的抽运能量中只有部分作为激光输出,其余能量转化为热并以非均匀内热源的形式加热激光晶体。激光介质内的传热为二维稳态导热问题,其控制方程及边界条件如下:

$$\nabla^2 T_s(x, y) = -\frac{Q}{\lambda_s}, \quad (1)$$

连续边界条件:

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}, \text{ 在 } y = d/2 + d' \text{ 处}$$

绝热边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \text{ 在 } x = 0 \text{ 和 } x = b \text{ 处,} \\ \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0, \text{ 在 } y = 0 \text{ 处,} \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ_f 为冷却工质水的导热系数; λ_s 为被冷却固体的导热系数。 Q 表示介质内热源。

通道中的流动换热计算采用层流模型,其中雷

雷诺数(Re)的取值范围为 500~2000, 对应 0.092~0.37 m/s 的水流速度。计算流体速度分布时, 流体通道的进出口采用周期性边界条件, 即认为通道中流动已达到充分发展。入口温度取 $T_e = 300$ K。

2.2 内热源模型

忽略热汇材料对抽运光的吸收作用, 其内热源为零。考虑到激光介质对抽运光的指数吸收作用, 介质中内热源为分非均匀分布^[10], 可表示为

$$Q = \begin{cases} \frac{\dot{Q} \cdot (\alpha/A) \cdot \{\exp[-\alpha(d-y)] + \exp(-\alpha y)\}}{1 - \exp(-\alpha d)}, & 0 \leq y \leq d/2 \\ 0, & d/2 \leq y \leq d/2 + d' \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\dot{Q} = P \cdot \eta_{\text{heat}}$ 为抽运光对激光介质的加热功率, P 为抽运功率, η_{heat} 为转化为热能的份额; 本文中取 $\dot{Q} = 50$ W; A 为激光介质的吸收面积, $A = 2b \cdot L$; α 为激光介质的光吸收系数。

2.3 热应力模型

由于激光介质温度呈不均匀分布, 必然存在热应力。根据应力应变关系的虎克定律, 可以得到反映板状介质内部的热应力关系式为^[11]

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha_p T \delta_{ij} \right], \quad (4)$$

式中 E 为杨氏模量, ν 为材料的泊松比, δ_{ij} 表示克罗尼克符号; α_p 为材料的热膨胀系数。

3 冷却方案

复合介质冷却, 也就是在端面抽运的抽运面上加一个没有掺杂、对抽运光无吸收作用的 YAG 介质。分析和实验结果表明, 未掺杂的介质起着有效的散热作用, 激光介质内的最高温度和热应力都大幅下降, 并且热透镜现象也有明显改善。复合介质是一个十分有效的抽运面冷却手段^[5,6]。蓝宝石由于其良好的导热及光学性能, 在激光放大介质冷却中也有所应用^[5]。采用低温低压化学汽相沉积 (CVD) 技术生长的金刚石薄膜在室温下具有最高

的导热系数和良好的电绝缘性, 在电子器件冷却方面是大规模和超大规模集成电路最理想的热汇材料, 可大大提高电子元件的功率和集成度。同时, 金刚石薄膜具有波段透明能力, 可与激光介质紧密接触, 且不影响激光介质吸收抽运能量。

利用数值模拟, 在分析直接冷却、复合介质和蓝宝石 (Sapphire) 热汇三种冷却方案下激光介质的热效应的基础上, 本文优化热汇材料, 利用金刚石 (Diamond) 热汇消除换热系数不均匀分布的影响, 改善介质的温度和热应力分布。四种模拟算例如表 1 所示。表 2 给出了 YAG 介质、蓝宝石和金刚石的导热系数和其他物理特性。

表 1 各模拟算例冷却方案

Table 1 Various cooling schemes

	Cooling scheme	Material of heat sink
1	Cooling without heat sink	
2	Cooling with heat sink	YAG
3	Cooling with heat sink	Sapphire
4	Cooling with heat sink	Diamond

表 2 各种材料的物理特性

Table 2 Thermophysical and mechanical properties of various materials

Material	$\lambda_s / [W/(m \cdot K)]$	α / m^{-1}	E / GPa	ν	$\alpha_p / (10^{-6} K^{-1})$
YAG	13	600	300	0.3	8.2
Sapphire	35		550	0.25	5.0
Diamond	1600		1140	0.07	1.7

4 计算结果与分析

本研究与先前研究^[12]所用数学模型类似, 而先

前研究已对所用数学模型进行了验证, 这里不再赘述。

4.1 对流换热特性

图 3 示出 $Re=500$ 和 2000 时局部努塞尔数 Nu_x 随 x/b 的变化情况。由图可见, Nu_x 沿 x 方向递减, 且随雷诺数的增加而增加。

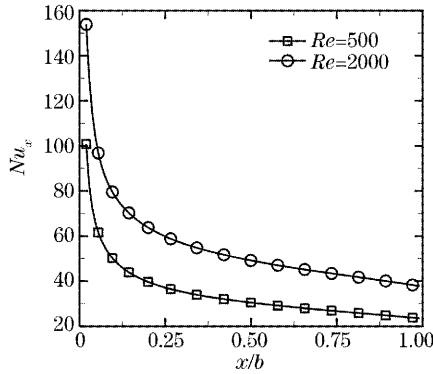


图 3 局部努塞尔数随 x/b 的变化

Fig. 3 Variations of local Nusselt number with dimensionless distance x/b

4.2 介质内温度分布

图 4 给出了雷诺数 $Re=500$ 时四种冷却方案下介质的温度分布。由图 4(a) 可见, 由于处于热入口段, 换热系数沿 x 方向减小, 激光介质温度逐渐升高。直接冷却时, 激光介质最高温度为 375.6 K。图 4(b) 给出的是 YAG 介质侧面热汇为复合介质时的温度分布。与直接冷却相比, 最高温度有所升

高, 为 376.4 K, 没有起到降低介质最高温度的作用, 这与端面抽运、侧面冷却的结果有所不同^[6]。在端面抽运、侧面冷却方式中, 复合介质不仅起到有效的热扩散作用, 而且增加了侧面的冷却面积, 降低了介质的温度水平。对于本文研究的侧面抽运、侧面冷却的板状激光介质而言, 如图 1(b) 所示, 由于冷却和抽运在同一方向, 与激光介质具有相同物性的复合介质的存在相当于增加了换热过程中的热阻, 从而引起最高温度的增加。因此, 对于本文研究的激光介质而言, 复合介质(YAG)冷却方案并不适用。图 4(c) 给出的是利用蓝宝石作为热汇时激光介质内的温度分布。与复合介质的情况相同, 在传热面添加蓝宝石热汇, 会增加对流换热热阻。另一方面, 蓝宝石的导热系数大约是 YAG 介质导热系数的 3 倍, 这有助于扯平介质内 x 方向的温度, 使激光介质最高温度有所减小, 为 374.5 K, 比直接冷却时降低 1.1 K。为了有效降低激光介质最高温度, 并使激光介质沿 x 方向温度均匀分布, 本文借鉴文献[13]的研究成果, 提出以金刚石作为热汇的构想。金刚石的导热系数比复合介质 YAG 大两个量级, 大约是蓝宝石的 50 倍, 可使激光介质内的温度沿 x 方向分布趋于均匀, 有效降低激光介质内沿 x 方向温度梯度, 从而消除不均匀换热系数的影响。其对应的最高温度仅为 367.8 K, 比方案 1 中的最高温度降低了约 8 K[图 4(d)]。

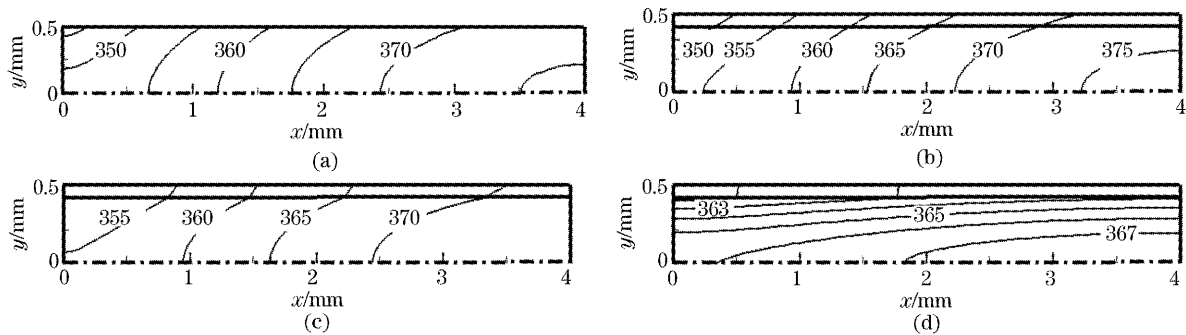


图 4 不同冷却方案下的温度分布。(a) 直接冷却, (b) 复合 YAG 介质热汇, (c) 蓝宝石热汇, (d) 金刚石热汇

Fig. 4 Temperature contours of the laser slab with different cooling schemes. (a) Water cooling without heat sink, (b) cooling with composite YAG heat sink, (c) cooling with sapphire heat sink, (d) cooling with diamond heat sink

4.3 介质内热应力分布

对应图 4, 图 5 为雷诺数 $Re=500$ 时四种冷却方案下的应力分布。其中, 应力图中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。由于激光介质的抗压性能好于抗拉性能, 在激光介质的热分析中, 我们主要关心激光介质的最大应力是否超过激光介质的破碎应力(Nd:YAG 材料所能承

受的破碎应力大致在 $130\sim 260$ MPa 的范围^[7])。

总体而言, 激光介质内部由于温度较高而受压, 外部温度较低而受拉。抽运面温度最低, 其拉应力值较高。同时, 由于入口段的影响, x 方向不对称的温度分布将导致介质在产生沿 x 分布的 z 方向弯曲应力。两者的综合作用, 造成激光介质抽运面靠近入口处和出口处应力值较大。直接冷却[图 5(a)]

时,最大应力位于抽运面靠近入口处,达19.2 MPa。图5(b)为复合介质热汇冷却时的应力分布。由于复合介质的导热冷却作用,降低了直接冷却方案中介质沿 x 方向温度梯度,从而改善了激光介质的应力分布,最高应力为14.5 MPa,降幅达24.5%。由于复合介质的导热系数与激光介质相同,对激光介质沿 x 方向温度不均匀分布改善有限。而利用蓝宝石作为热汇[图5(c)]后,降低了激光介质沿 x 方向温度梯度,激光介质热应力水平降低,最大应

力为13.2 MPa,比直接冷却时最大应力降低了31.2%。对于方案(d),由于金刚石的高导热性,几乎完全消除了换热系数不均匀的影响,激光介质沿 x 方向温度分布趋于均匀。此时,由于 x 方向不对称温度分布产生的 σ_z 基本消失,激光介质内的应力分布接近理想模型(一维、均匀内热源)下的结果。激光介质的最大应力仅9.3 MPa,比直接冷却时的最大应力降低了约51.6%。同时,其位置移至抽运面中心附近,避免了边角的应力集中。

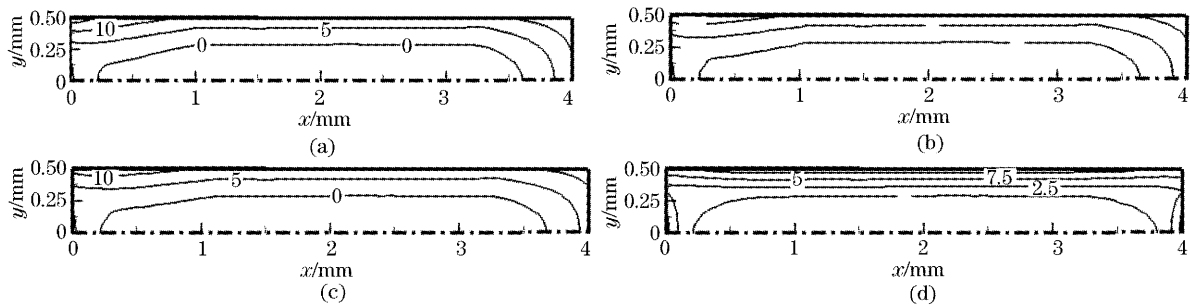


图5 不同冷却方案下的热应力分布。(a)直接冷却,(b)复合介质热汇,(c)蓝宝石热汇,(d)金刚石热汇

Fig. 5 Thermal stress contours of the laser slab with different cooling schemes. (a) Water cooling without heat sink, (b) Cooling with composite YAG heat sink, (c) cooling with sapphire plate, (d) cooling with diamond heat sink

4.4 雷诺数的影响

雷诺数增加,换热系数增加,激光介质内温度水平及热应力水平降低,温度场及热应力场的分布与 $Re=500$ 的相似。 $Re=2000$ 时,各个方案对应的最高温度和最大应力分别为:350.1 K/15.2 MPa; 351.2 K/12.4 MPa; 349.8 K/11.7 MPa 和 345.0 K/9.3 MPa。需要指出,金刚石冷却方案中当雷诺数从500增加到2000时,激光介质最大应力几乎相等。正如前文所说,在金刚石高导热材料的作用下,激光介质沿 x 方向温度分布基本均匀,激光介质内应力分布结果接近一维模型。由一维模型的结果可知^[14],应力分布与冷却强度无关,仅与介质的尺寸、物性和内热源强度有关。因此,金刚石热汇冷却方案下,激光介质内最大应力与雷诺数无关。

由以上讨论可知,四种方案中金刚石热汇冷却方案效果最好,传统的蓝宝石冷却方案次之。对于本文研究的侧面抽运、侧面冷却的激光介质而言,复合介质冷却方案虽然可以降低激光介质内应力水平,但同时激光介质最高温度有所升高。对于高功率侧面抽运、侧面冷却的板状激光介质,复合介质冷却方法不适用。比较以上冷却方法还可以看出,相同冷却强度(相同雷诺数)下,不同方法对激光介质

内最高温度改善有限,但对热应力改善效果差别明显。对激光介质温度分布的改善有限是由于激光介质内的温度水平受换热强度影响最大。因此在同样冷却强度下激光介质内的最高温度相差不大。而考虑入口段效应时激光介质内的最大热应力与激光介质内沿流动方向温度梯度分布关系很大,热汇法能有效地改善激光介质内的温度梯度,因此改善介质内的热应力分布。

5 结 论

本文主要研究了直接冷却、复合介质(YAG)、蓝宝石和金刚石热汇冷却四种冷却方案下,激光介质内的温度和应力分布。结果表明,换热系数的非均匀分布对激光介质内部的温度和应力分布影响很大,介质温度沿冷却工质流动方向变化,抽运面靠近入口和出口处应力水平较高。与直接冷却方案相比,由于金刚石优异的导热性能,采用金刚石热汇冷却方案可基本消除不均匀换热系数的影响,能明显降低激光介质内部的温度和热应力,冷却效果最好;蓝宝石热汇冷却方案次之;对于本文研究的侧面抽运、侧面冷却激光介质,复合介质冷却方案使介质最高温度有所升高,因而不宜采用。

参 考 文 献

- 1 D. C. Brown. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(5): 861~873
- 2 C. Yamanaka. Super high-power laser systems and their application [J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 2000, **32**(3): 263~297
- 3 Hailing Wang, Weiling Huang, Zhuoyou Zhou *et al.*. High power CW diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 541~543
- 4 Shi Peng, Li Daijun, Zhang Hengli *et al.*. High power partially end pumped slab laser with hybrid resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 491~494 (in Chinese)
石 鹏, 李代军, 张恒利 等. 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 491~494
- 5 R. Weber, B. Neuenschwander, M. M. Donald *et al.*. Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(6): 1046~1053
- 6 M. Tsunekane, N. Taguchi, T. Kasamatsu *et al.*. Analytical and experimental studies on the characteristics of composite solid-state laser rods in diode-end-pumped geometry[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1997, **3**(1): 9~18
- 7 D. Mudge, M. Ostermeyer, P. J. Veitch *et al.*. Power scalable TEM₀₀ CW Nd:YAG laser with thermal lens compensation[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2000, **6**(4): 643~649
- 8 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying *et al.*. Analyses of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 2004, **24**(6): 803~807 (in Chinese)
欧群飞, 陈建国, 冯国英 等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J], *光学学报*, 2004, **24**(6): 803~807
- 9 Sun Feng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning *et al.*. Thermal distortions in calcium fluoride, potassium chloride and fused silica windows at 1.315 μm [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 412~416 (in Chinese)
孙 峰, 程祖海, 张耀宁 等. 在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口热效应比较研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 412~416
- 10 Wang Junrong, Min Jingchun, Song Yaozu. Numerical simulation of temperature and thermal stress fields in the laser slab of a laser oscillator[J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2003, **24**(5): 855~857 (in Chinese)
王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 板状激光振荡介质温度场和应力场的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2003, **24**(5): 855~857
- 11 N. Noda, R. B. Hetnarski, Y. Tanigawa. *Thermal Stresses* [M]. New York: Taylor & Francis, 2003
- 12 Wang Junrong, Min Jingchun, Song Yaozu. Field coordination analysis of convective heat transfer in thermal entrance region in rectangular ducts with one side heated [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2004, **25**(3): 478~480 (in Chinese)
王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 单面加热矩形通道热入口段层流对流换热特性的场协同分析[J]. *工程热物理学报*, 2004, **25**(3): 478~480
- 13 Lu Pengcheng, Cui Bifeng, Li Jianjun *et al.*. Transient thermal characteristic analysis of tunnel regeneration high-power semiconductor laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 518~522 (in Chinese)
鲁鹏程, 崔碧峰, 李建军 等. 隧道再生大功率半导体激光器瞬态热特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 518~522
- 14 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser. I. Theory [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **20**(3): 289~301