

doi:10.3788/gzxb20134203.0253

粗糙热传导表面下激光介质的热效应

连天虹, 王石语, 李兵斌, 蔡德芳, 过振

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要:在考虑激光介质与热沉不完全接触导热的情况下,用面热源自适应调整算法计算了激光介质的温度场,研究了其热效应.表面附近相位差存在起伏且深入一定深度使热效应复杂化.随抽运功率的增大,表面附近相位差的起伏增强,而起伏深度变化不明显;接触面积增大,相位差起伏减小,起伏的深度有所减小.抽运功率较小时,热致衍射损耗随抽运功率的增大近似线性增大,高斯光半径越大,增大的斜率越大,当抽运功率增加到一定程度时,热致衍射损耗增大的趋势减缓,半径大的减缓较明显.在抽运光功率变化范围内,半径大的高斯光热致衍射损耗大于半径小的.高斯光半径较小时,接触面积对热致衍射损耗的影响不明显,当高斯光半径较大时,接触面积减小热致衍射损耗增大.

关键词:激光技术;粗糙面导热下热效应;自适应算法;相位差;热致衍射损耗

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0253-5

Thermal Effect of Laser Medium with Rough Surface Heat Conduction

LIAN Tian-hong, WANG Shi-yu, LI Bing-bin, CAI De-fang, GUO Zhen

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Taking account of the fact that the laser medium always cannot contact completely with the heat sink, the temperature of the laser medium is computed and its thermal effect is studied. Phase difference near the surface has a sizable fluctuation and therefore complicates the thermal effect. The fluctuation near the surface becomes greater with the increasing pump power, while the change of its depth is unobvious. The phase fluctuation as well as its depth reduces with the increasing contact area. At low pump power, the diffraction loss increases linearly with it, the larger the beam radius, the bigger the slope, when the pump power increases to some values, the slope becomes smaller, especially the beam with larger radius. Compared to the smaller radius beams, the larger radius beams has bigger losses for all powers. The variation of the diffraction loss with the contact area is not significant in small beam radius, while the diffraction loss increases with the contact area reduces in larger beam radius.

Key words: Laser technology; Thermal effect with rough surface conduction; Adaptive algorithm; Phase difference; Diffraction loss

0 引言

激光二极管抽运的全固态激光器以其效率高、寿命长、结构紧凑、光束质量好等优点,被广泛应用于工业、医疗、科研、信息和军事等领域.热效应制约着固体激光器的光束质量和输出功率,限制了进一步拓展其应用领域^[1].研究人员对固体激光器热效

应进行了广泛、深入的研究^[2-4].固体激光器通常的散热手段是用热沉夹持激光介质,用循环水流或半导体制冷等方式带走激光介质中的热量.受加工准确度和装配压力等因素的影响,激光介质和热沉的不同位置配合程度有所差异而导致散热不对称.2010年,宋小鹿等人研究了这种情况下介质的热效应^[5],发现散热不对称导致激光介质的热畸变效应.

基金项目:国家重点实验室基金项目(No. 51438010205DZ0101)资助

第一作者:连天虹(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为固体激光技术. Email: tianhongl@126.com

导师(通讯作者):王石语(1966-),男,教授,博导,主要研究方向为固体激光技术. Email: yshi@mail.xidian.edu.cn

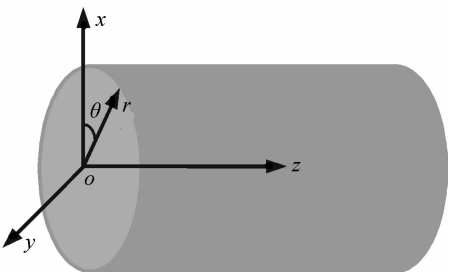
收稿日期: 2012-08-27; **录用日期:** 2012-12-06

2012年刘海强等人研究发现在热沉和晶体棒间增加加热界面物质时,晶体棒端面温度、波前畸变的分布的轴对称性变好^[6].填充热界面物质能增大接触面积,改善散热效果,但由于激光介质和热沉存在表面波纹度和表面粗糙度等因素,从更小的尺度上来看激光介质和导热介质不可能完全接触.接触区域热量能够有效传导,未接触区域热量不能有效传导.作者对这种散热条件下激光介质的温度场进行了计算分析^[7],结果表明激光介质的温度场呈现一定的随机起伏,越靠近边界,起伏越明显,介质中心区域起伏则不明显.温度场的起伏会引起介质折射率分布的起伏,进而引起光程差的起伏,使激光介质的热效应复杂化.本文研究这种边界条件下激光介质的热效应,包括其产生的相位差和热致衍射损耗两方面.

1 温度场计算

1.1 物理模型

在激光二极管端面抽运固体激光器中,抽运光从激光介质的一个端面入射被介质吸收,部分能量转化为热使介质温度升高.激光介质的温度分布是由热源分布和边界条件共同决定的.以抽运光入射端面中心为原点建立坐标系, z 轴为光轴方向,如图1所示.激光介质内的热功率密度可以表示为^[8]



$$Q_V(x, y, z) = \frac{2\alpha\gamma P_{in}}{\pi\omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \cdot \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2}\right] \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

式中 α 为介质对抽运光的吸收系数, ω_p 为抽运光束腰半径, γ 为介质的生热效率, P_{in} 为抽运光功率, l 为介质长度.

激光介质侧面通常与导热介质接触通过热传导方式散热,由于表面波纹度和粗糙度等因素的存在,它们并不能完全接触,只有部分小区域能有效接触.有效接触区域热量能有效传导,其温度近似为导热介质温度;未接触区域热量不能有效传导,在忽略热辐射、空气对流散热等其它散热途径的条件下,认为这些区域满足绝热边界条件.近似认为介质端面也

满足绝热边界条件.上述边界条件可以表示为

$$T(r) \Big|_{S_1} = T_c \quad (2)$$

$$-k \frac{dT(r)}{dn_0} \Big|_{S_2} = 0 \quad (3)$$

式中 S_1 为有效接触区域, S_2 为非接触区域,包含介质端面, k 为介质的热传导系数, T_c 为导热介质温度, r 为位置矢量, n_0 为介质表面外法向向量.

有效接触小区域和非接触小区域的分布与表面形貌和外加载荷等因素有关,小区域面积也不尽相等,准确确定其分布较为复杂.本文采用简化处理,认为各小区域面积相等,给定接触面积比 τ (侧面有效接触面积占侧面总面积的比例)后,有效接触小区域和非接触小区域随机混合分布.

1.2 温度场计算流程

用面热源自适应调整算法计算上述边界条件下的温度场.其步骤为:在介质的封闭边界上引入虚拟面热源,用自由空间的格林函数法^[9]表示为

$$T(r) = \int_{\Omega} Q(r_0) G(r, r_0) dr_0 \quad (4)$$

计算热源在介质表面产生的温度和热流密度,其中 $G(r, r_0)$ 为自由空间的格林函数.介质表面的法向热流密度为

$$q = -k \frac{dT(r)}{dn_0} \quad (5)$$

以此温度和热流密度分别与给定边界条件式(2)和式(3)的偏差为依据调整面热源,直至满足边界条件.然后用内部热源和虚拟面热源联合计算满足边界条件的温度分布.算法流程图如图2.

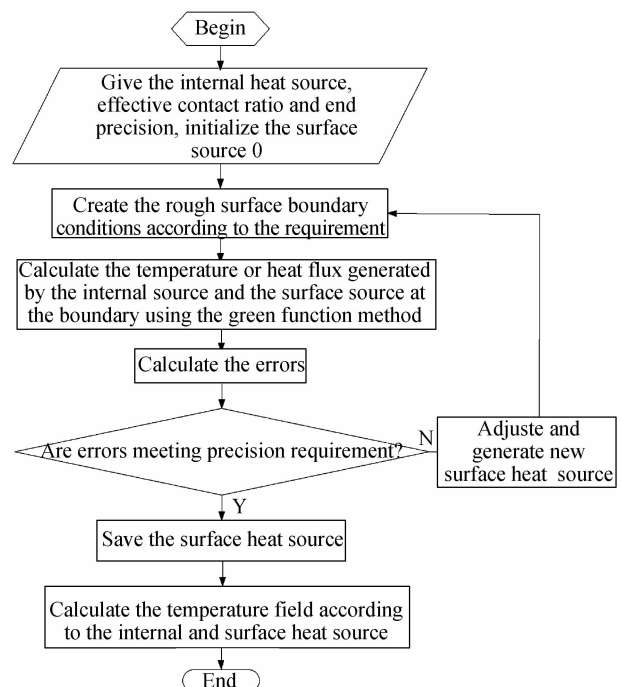


图2 自适应调整算法流程图
Fig. 2 Flow chart of the self-adaptive method

2 热效应计算

热效应所产生的直接后果有两个:热透镜效应以及热致衍射损耗.热透镜效应可以用其产生的相位差来衡量,而热效应所产生的热致衍射损耗,对激光器的输出功率和效率有着重要影响^[10].

2.1 相位差的计算

与温度有关的折射率变化为^[11]

$$\Delta\eta(x, y, z) = [T(x, y, z) - T_{\min}] \frac{d\eta}{dT} \quad (6)$$

式中 $d\eta/dT$ 为折射率随温度的变化系数, T_{\min} 为介质的最低温度.沿 z 轴传播的光波通过介质时,产生的相位差为

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \Delta\eta(x, y, z) dz \quad (7)$$

式中 λ 为光波长.由于表面附近温度场的随机起伏,光束通过介质时一定半径、不同角向位置产生的相位差不同,为描述一定半径上不同角向位置相位差的起伏程度,引入参量

$$\sigma(r) = \sqrt{\int_0^{2\pi} [\varphi(r, \theta) - \varphi_{\text{mean}}(r)]^2 d\theta} \quad (8)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi_{\text{mean}}(r)$ 为半径 r 上的平均相位差. σ 越大,相位差起伏越大.

2.2 热致衍射损耗的计算

通常激光器输出的主要横模成分是基模高斯光,对基模高斯光的损耗一定程度上决定着激光器的功率和效率.对基模高斯光的热致衍射损耗可以用式(9)计算^[12]

$$\zeta = 1 - \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\varphi(r, \theta) \right] \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} \right) r dr d\theta \right|^2}{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} \right) r dr d\theta \right|^2} \quad (9)$$

式中 ω_0 是高斯光半径, $\Delta\varphi(r, \theta) = \varphi(r, \theta) - \xi r^2$ 为波面相对参考球面的畸变,对一定的 $\varphi(r, \theta)$ 和 ω_0 , 改变 ξ 使热致衍射损耗达到最小时即为此时的热致衍射损耗.

3 结果与分析

以 Nd:YAG 激光晶体为例进行计算,计算中相关参量的取值^[13-14]:晶体尺寸 $\phi 1.5 \times 10$ mm,热传导系数 k 为 $14 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,抽运光吸收系数 α 为 0.5 mm^{-1} ,生热效率 γ 为 0.32 ,折射率随温度变化系数 $d\eta/dT$ 为 7.3×10^{-6} ,波长 λ 为 $1.06 \mu\text{m}$,热沉温度 T_c 为 20°C ,抽运光半径 ω_p 为 0.5 mm .

3.1 相位差起伏与抽运功率的关系

取激光介质侧面接触面积比 τ 为 0.5 ,计算了不同抽运功率下相位差分布,结果如图 3 所示.

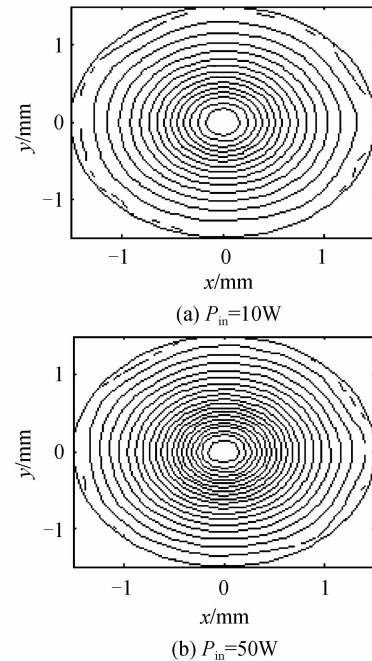


图 3 不同抽运功率 P_{in} 下的相位差等高线
Fig. 3 Contour line of phase difference in different pump power P_{in}

从图 3 可见,表面附近相位差存在较强起伏,并深入一定深度.在不同的抽运功率下,起伏情况有差异.

为了仔细分析抽运功率对相位差起伏的影响,计算了不同抽运功率下的相位差起伏 σ ,结果如图 4.

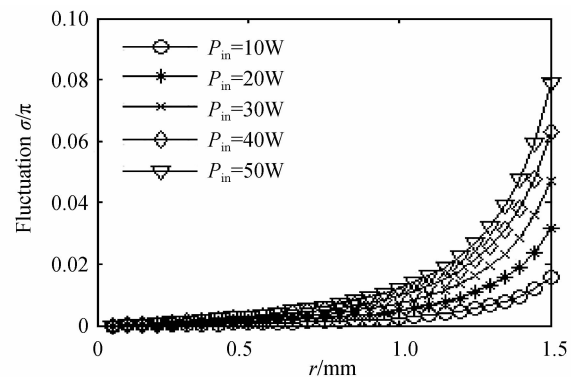


图 4 不同功率 P_{in} 下相位差起伏 σ 沿径向的变化
Fig. 4 Variation of phase difference fluctuation σ in radial direction in different pump power P_{in}

从图 4 可以看出,对一定的抽运功率,越靠近表面,相位差起伏越强;随抽运功率的增大,表面附近相位差的起伏增强.但相位差起伏主要集中在约表面附近 0.5 mm 深度内,中心 1 mm 之内相位差起伏较小.

3.2 相位差起伏与接触面积的关系

接触面积比对表面附近的温度场有较大影响,图 5 是抽运功率为 30 W 时不同接触面积比下的相位差分布.

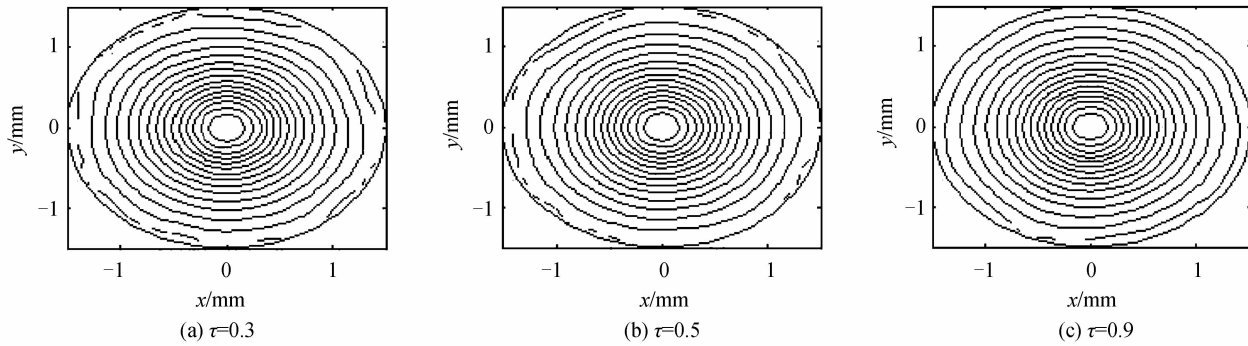


图 5 不同接触面积比 τ 下的相位差等高线

Fig. 5 Contour line of phase difference profile in different contact ratio τ

从图 5 可以看出,表面附近相位差起伏比较明

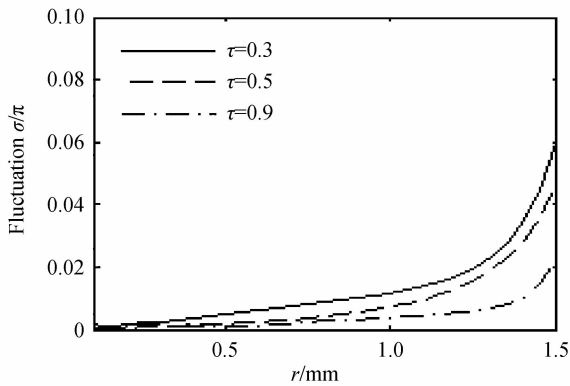


图 6 不同接触面积比 τ 下相位差起伏 σ 沿径向的变化
Fig. 6 Variation of phase difference fluctuation σ in radial direction in different contact ratio

显. 随着接触面积比的增大,起伏减小. 图 6 是不同接触面积比下相位差起伏沿径向的变化. 从图 6 可见,在一定的接触面积比下,表面附近相位差起伏较强;随着接触面积比的减小,表面附近相位差起伏增大. 当接触面积比为 0.9 时,相位差起伏从表面向中心减小较快,接触面积增大时,起伏深度有所减小.

3.3 热致衍射损耗与抽运功率的关系

图 7 是在不同的高斯光半径下,热致衍射损耗随抽运功率的变化,计算中接触面积比为 0.5,抽运光半径为 0.5 mm.

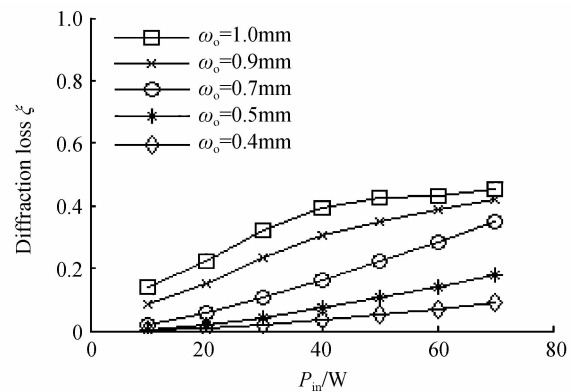


图 7 不同高斯光半径 ω_0 下热致衍射损耗 ζ 随抽运功率 P_{in} 的变化

Fig. 7 Variation of diffraction loss ζ on pump power P_{in} in different radius ω_0 of Gaussian beam

从图 7 可以看出,在抽运功率较小时,热致衍射损耗随抽运功率的增大近似线性增大,高斯光半径越大,增大的斜率越大,当抽运功率增加到一定程度时,热致衍射损耗增大的趋势减缓,半径越大,减缓越明显,但在抽运光功率变化范围内,相比于半径小的高斯光,半径大的高斯光的热致衍射损耗要大.

3.4 热致衍射损耗与接触面积的关系

表 1 是不同接触面积比和高斯光半径下的热致衍射损耗,计算中抽运功率取为 30 W,抽运光半径 0.5 mm.

表 1 不同接触面积比 τ ,不同高斯光半径 ω_0 下的热致衍射损耗 ζ

Table 1 Diffraction losses ζ in different contact ratio τ and radius ω_0 of Gaussian beam

Contact ratio τ	Diffraction losses ζ in different ω_0 /mm						
	$\omega_0=1.2$	$\omega_0=1.1$	$\omega_0=1.0$	$\omega_0=0.8$	$\omega_0=0.5$	$\omega_0=0.4$	$\omega_0=0.3$
0.3	0.505 8	0.422 0	0.331 7	0.165 0	0.042 7	0.020 1	0.005 8
0.5	0.486 7	0.406 2	0.320 2	0.161 5	0.042 7	0.020 1	0.005 8
0.7	0.478 1	0.398 9	0.314 6	0.159 5	0.042 7	0.020 1	0.005 8
0.9	0.474 1	0.395 4	0.312 0	0.158 5	0.042 6	0.020 1	0.005 8
1.0	0.470 2	0.392 1	0.309 1	0.157 4	0.042 5	0.020 1	0.005 8

分析表 1 可知,高斯光半径较小时,不同接触面积比对应的热致衍射损耗是相等的,表面附近温度场的起伏对热致衍射损耗影响不大,当高斯光半径较大时,接触面积减小,对应的热致衍射损耗增大.

当高斯光半径为 1.2 mm 时,接触比 0.3 对应的热致衍射损耗为 0.505 8,而完全接触($\tau=1$)对应的热致衍射损耗为 0.470 2. 这是因为高斯光半径增大时,介质表面附近光能量增加,随机起伏的温度场增

加了热致衍射损耗.

4 结论

本文在考虑由于表面粗糙度、波纹度等因素的存在,激光介质与热沉不能完全接触传导散热的情况下,用面热源自适应调整算法计算了激光介质的温度场,研究了其产生的相位差和热致衍射损耗.由于表面的非完全接触,表面附近的相位差存在起伏并深入一定深度.随抽运功率的增大,表面附近相位差的起伏增强,而起伏深度的变化不明显;接触面积增大时,相位差起伏减小,起伏的深度也有所减小.抽运功率较小时,热致衍射损耗随抽运功率的增大近似线性增大,高斯光半径越大,增大的斜率越大,当抽运功率增加到一定程度时,热致衍射损耗增大的趋势减缓,半径大的高斯光减缓较明显,在整个抽运光功率变化范围内,相比半径小的高斯光,半径大的热致衍射损耗要大.高斯光半径较小时,接触面积对热致衍射损耗的影响不明显,当高斯光半径较大时,随机起伏的温度场会增加衍射损耗,接触面积越小热致衍射损耗越大.

参考文献

- [1] ZHOU Shou-huan, ZHAO Hong, TANG Xiao-jun. High average power laser diode pumped solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1605-1618.
周寿桓,赵鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605-1618.
- [2] YAN Ying, ZHANG Heng-li, LIU Yang, *et al.* Thermal effects of laser diode end-pumped multi-segmented slab laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2174-2178.
闫莹,张恒利,刘洋,等. 激光二极管端面泵浦多段复合板条激光器热效应[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2174-2178.
- [3] SHI Peng, CHANG Rui, CHEN Wen, *et al.* Influence of the third boundary condition on the thermal effect of laser crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2539-2542.
史彭,常锐,陈文,等. 第三类热边界条件对激光晶体热效应的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2539-2542.
- [4] LIU Quan-xi, ZHONG Ming. Finite element method analysis on thermal lens effect of the rod laser end-pumped by LDA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 776-780.
刘全喜,钟鸣. LDA 侧面抽运棒状激光器热透镜效应的有限元法分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 776-780.
- [5] SONG Xiao-lu, GUO Zhen, LI Bing-bin, *et al.* Influences of heat-dissipation methods on thermal distortion of laser rods [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 351-357.
宋小鹿,过振,李兵斌,等. 散热方式对激光晶体热畸变效应的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 351-357.
- [6] LIU Hai-qiang, GUO Zhen, WANG Shi-yu, *et al.* Influence of thermal contact conductance in side-face of crystal on wavefront distortion in solid-state laser[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2012, **39**(2): 183-188.
刘海强,过振,王石语,等. 激光晶体侧面接触热导对波前畸变的影响[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2012, **39**(2): 183-188.
- [7] LIAN Tian-hong, WANG Shi-yu, GUO Zhen, *et al.* Temperature field analysis of laser medium with rough surface heat conduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0614001.
连天虹,王石语,过振,等. 粗糙热传导表面下激光介质温度场的计算分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0614001.
- [8] SONG Xiao-lu, LI Bing-bin, WANG Shi-yu, *et al.* Comparison of different cooling methods in DPL[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 73-76.
宋小鹿,李兵斌,王石语,等. DPL 中晶体散热效果的比较[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 73-76.
- [9] 张渭滨. 数学物理方程[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 276-277.
- [10] LIU Jun-hai, LU Jun-hua, LU Jian-ren, *et al.* Investigation of thermally induced losses in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, **17**(1): 48-53.
刘均海,吕军华,卢建仁,等. 固体激光器热致损耗的研究[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(1): 48-53.
- [11] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. 5th ed. Beijing: World Publishing Corporation, 2005: 415-416.
- [12] CHEN Y F, KAO C F, HUANG T M, *et al.* Influence of thermal effect on output power optimization in fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, **3**(1): 29-34.
- [13] SONG Xiao-Lu, GUO Zhen, LI Bing-bin, *et al.* Time-varying thermal effect of laser crystal in pulsed diode laser side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1700-1708.
宋小鹿,过振,李兵斌,等. 脉冲激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器晶体时变热效应[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1700-1708.
- [14] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. 5th ed. Beijing: World Publishing Corporation, 2005: 47-52.