

doi: 10.3788/gzxb20164507.0714001

Tm:YAG 激光器晶体热效应数值模拟

姚育成^{1,2}, 刘丹琳¹, 黄楚云^{1,2}, 徐国旺^{1,2}, 王贝^{1,2}

(1 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

(2 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 武汉 430068)

摘 要: 对采用晶体棒端部辅热方法实现低温工作的 Tm:YAG 激光器, 建立了晶体棒热效应理论模型, 采用有限差分法对晶体棒温度场、应力场及光学畸变进行模拟计算. 模拟结果表明: 辅热设计可显著减小晶体最大应力, 减小应力损坏; 端部辅热使得温度和应力分布复杂, 引起折射率分布多变, 但变化值小, 说明端部辅热对光线在晶体内的传播影响微小; 辅热区域结构紧凑, 且对激光器封装产生的影响较小.

关键词: 激光技术; Tm:YAG 激光器; 热效应; 数值模拟; 准三能级; 辅热

中图分类号: TN248.1; O434.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0714001-5

Crystal Thermal Effect Simulation of Tm:YAG Laser

YAO Yu-cheng^{1,2}, LIU Dan-lin¹, HUANG Chu-yun^{1,2}, XU Guo-wang^{1,2}, WANG Bei^{1,2}

(1 School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2 Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficient Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The theoretical model of the thermal effects of the Tm:YAG laser which works at a low temperature by heating the rod ends of crystal was established. The temperature, stress and optical distortion of the crystal were simulated by the finite difference method. The simulation results show that, the designing of heating the crystal rod ends can reduce the maximum stress of crystal and minimize the stress damage accordingly. Although the complexity of the distribution of the temperature and stress caused by the crystal rod ends heating can cause a complex refractive index distribution, but it makes little effect on the light propagation because of the small changing refractive index value. The heating area is small and has no enough influence on the laser packaging.

Key words: Laser technology; Tm:YAG laser; Thermal effects; Numerical simulation; Quasi-three-level; Auxiliary heating

OCIS Codes: 140.0140; 040.3060; 120.6810; 120.6780

0 引言

铥离子具有较长的激光上能级寿命(约 10.9 ms), 使得铥(Tm)激光器具有诸多优良特性. 近年来, 2 μm 波长的铥(Tm)激光器在激光雷达、测距及医疗等领域具有广阔的应用前景而得到迅速发展^[1-3]. 与热特性较好的光纤激光器相比, 全固态 Tm:YAG 激光器更容易实现大脉冲能量输出, 其在某些特殊探测及医疗应用领域更具优势^[4-6].

铥激光器以准三能级方式运转, 早期研究需要在液氮冷却条件下实现激光输出. 随着技术发展, 关于铥激光器在近常温条件下激光输出的研究取得巨大进步, 例如, 2002 年, K S Lai 等实现了固态 Tm:YAG 激光器在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 冷却条件下 150W 激光输出^[7]; E C Honea 等实现了在 3 $^{\circ}\text{C}$ 冷却条件下 115 W 的 Tm:YAG 激光连续输出^[8]; 国内 Caili Wang 等在 8 $^{\circ}\text{C}$ 水温冷却条件下实现 Tm:YAG 激光器 200 W、2.02 μm 波长激光输出, 并实现了 47 W、2.07 μm 波长激光输出^[9-11]. 所

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41301372)和太阳能高效利用湖北省协同创新中心开放基金(No. HBSKFMS2104022)资助

第一作者: 姚育成(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光技术. Email: yyuch18@sohu.com

收稿日期: 2015-10-29; 录用日期: 2016-04-08

<http://www.photon.ac.cn>

述研究实现了全固态钪激光大功率输出,也展现了其应用潜力,但它们都需要较低温度冷却条件,这使得在工程应用中很难实现。Jianguo Li 等在真空条件下研究了温度对 Tm:YAG 激光器输出的影响,给出了 80~300K 温度范围条件下的激光输出曲线,结果显示,冷却温度从 200K 上升到 300K,输出效率下降超过 60%,因此,说明钪激光器在低温状态下工作输出效率会得到极大提高^[12]。但低温条件会造成工作物质光学端面结露,且水对 2 μm 激光的强吸收而损坏光学面,因此,端面结露成为影响钪激光器能否实现低温工作状态的难题之一,依靠密封等解决端面结露的方法结构复杂,可靠性差。本课题组采用晶体棒端部辅热方式能较好地解决晶体低温带来的端部结露问题,结合新型封装技术可实现 Tm:YAG 激光器高效可靠运转^[13]。在端部辅热条件下,晶体热特性与常规冷却情况不同,其缺乏相关参考资料,因此对此种新型结构的激光器工作物质热特性分析具有较强实用意义。

随着计算技术的发展,数值模拟能够较好研究激光工作物质的热特性规律。文献[14]用 ANSYS 软件模拟了 Tm:YAG 工作物质的温度场,并结合热像实验,分析了温度对钪激光输出的影响。文献[15-16]模拟研究了端泵激光工作物质的温度及应力。目前所报道的研究都是针对常规冷却模型,且一般只研究了激光工作物质热特性中的某一方面。钪激光工作物质的温度、应力及光学畸变对激光输出产生较大影响,可以基于三者之间的关系建立统一模型进行讨论;端部辅热结构增加了工作物质热特性的复杂性,除温度外,还需考虑端部辅热带来的应力及折射率跃变对系统的影响。本文通过数值模拟综合分析了端部辅热的 Tm:YAG 激光器晶体棒的温度、热应力及光学畸变等热效应。

1 Tm:YAG 晶体棒温度场模拟

1.1 晶体棒温度场数学模型

图 1 为 Tm:YAG 固态激光器抽运、冷却及端部辅热结构。键合晶体棒 C 部分为掺杂抽运部分,两端 A 和 B 部分为无掺杂部分,用辅热套筒升温,防止结露,可以提高激光器效率和可靠性;B 和 C 部分通过冷却液流动冷却。

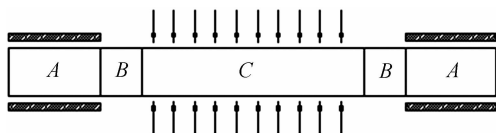


图 1 抽运、冷却及辅热结构

Fig. 1 Structure of pumping, cooling and auxiliary heating in laser diode (Laser Diode, LD) 侧面抽运条件下,晶体内生热近似均匀,晶体棒温度场近似用轴对称

模型描述,在连续抽运状态下,温度场为稳态 Poisson 分布,二维圆柱坐标系下的导热微分方程^[17]为

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \kappa \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = 0 \quad (1)$$

式(1)中, T 为温度; r, z 分别为径向和轴向坐标; κ 为导热系数; q 为体积生热率。

根据激光器工作特性,晶体棒温度场边界应满足第三类边界条件^[15],即

$$-\kappa \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (2)$$

式(2)中, T_w 为壁面温度, n 为表面的外法线方向, h 为壁面换热系数,在 B 和 C 区域为流动换热, T_f 为冷却液温度;在 A 区域,因套筒与晶体间气隙极小,表现为辐射和传导综合换热, T_f 为辅热筒温度。

1.2 模拟计算及分析

算例中晶体棒直径为 4 mm, C 部分长度为 60 mm, B 和 A 部分长度分别为 5 mm 和 15 mm。冷却液温度设置为 3 $^{\circ}\text{C}$,流动换热系数为 2 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,辅热筒温度设置为 50 $^{\circ}\text{C}$,综合换热系数为 0.5 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,体积生热率 $q = \eta P/V$,其中热转化系数 $\eta = 0.4$,输入功率为 950 W, V 为晶体体积,导热系数根据温度线性拟合得出^[18]。根据对称特性,取晶体棒 1/4 部分为计算域,如图 2,边界条件为: df 为流动换热, fg 为综合换热, ge 为绝热条件, od, oe 为对称边界条件。计算域离散网格 500 \times 40,采用有限差分法对温度场进行计算。

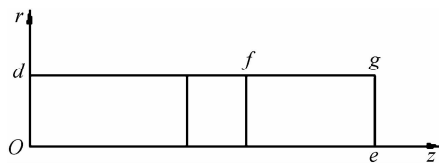


图 2 计算域示意图

Fig. 2 Sketch of the calculation field

晶体棒温度分布模拟结果如图 3,抽运区域中心最高温度为 72.3 $^{\circ}\text{C}$,表面温度为 30.2 $^{\circ}\text{C}$,非抽运区域因无内热源温度急剧下降,且在 5 $^{\circ}\text{C}$ 左右。端部在表面辅热条件下温度可达 40 $^{\circ}\text{C}$ 以上,因此在低温冷却条件下,较为容易解决端面结露问题。图 4 为晶体棒中心温度变化情况,结果显示,冷却与辅热区域温度快速变化,辅热区域在几毫米内便满足要求,有利于实现激光器封装结构紧凑。图 5 为端面温度分布,整个表面温度比较均匀。

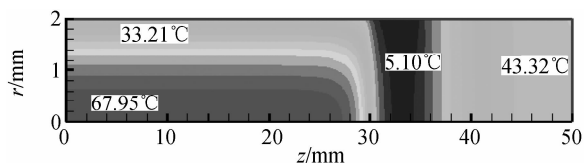


图 3 晶体棒温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution of crystal rod

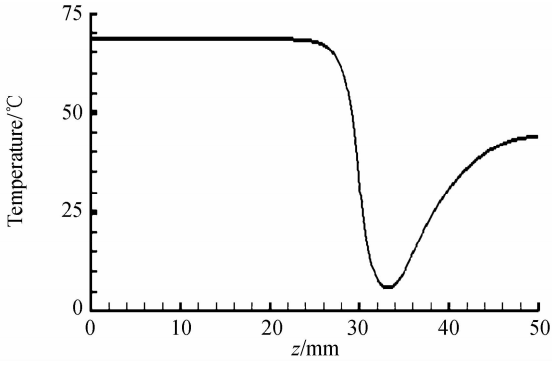


图4 晶体棒轴线温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of crystal rod central axis

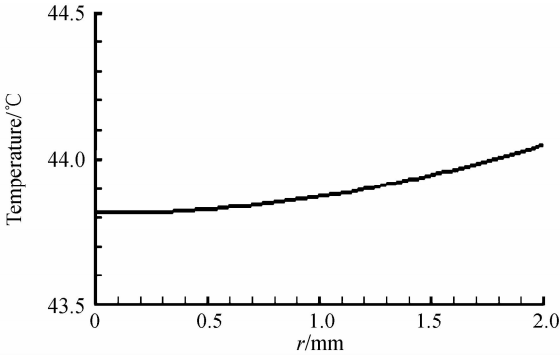


图5 晶体棒端面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of crystal rod end face

2 晶体棒热应力模拟

激光晶体在工作中可认为处于自由伸展状态,即外力为零,柱坐标系热弹性位移方程为^[17]

$$\begin{cases} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial r} + G(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2}) - \beta \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 u_z - \beta \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

应力位移关系表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) - \beta T \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{u_r}{r} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) - \beta T \\ \sigma_{zz} = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) - \beta T \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)中,柱坐标表示:体应变 $e = \partial u_r / \partial r + u_r / r + \partial u_z / \partial z$,剪切弹性模量 $G = E / [2(1 + \mu)]$,拉梅系数 $\lambda = E\mu / [(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$,热应力系数 $\beta = \alpha E / [1 - 2\mu] = \alpha(3\lambda + 2G)$, E 为弹性模量, μ 为泊松比, α 为热膨胀系数, u_r 、 u_z 分别为 r 、 z 方向位移分量, T 为温度差值, σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 分别为 r 、 θ 、 z 方向的应力。

根据图2的计算域, dg 、 ge 为自由边界条件,即 dg 边界: $\sigma_{rr} = 0$, ge 边界: $\sigma_{zz} = 0$; od 、 oe 为对称条件,即 od 边界: $u_z = 0$, oe 边界: $u_r = 0$ 。相应物性参数^[16] $E = 310\text{GPa}$, $\mu = 0.3$, $\alpha = 7.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

按前述网格离散计算域,将温度计算结果代入,采用有限差分法计算晶体应力特性,结果如图6:(a)为轴向应力分布,抽运区域与一维解析计算结果基本吻合,中心压应力,周围拉应力,同时在过渡区会产生较大的拉应力,从压应力快速过度到90MPa的拉应力,产生较大应力梯度;(b)为径向应力分布,在抽运区域边缘产生大应力梯度,辅热与过度区应力分布基本均匀;(c)为周向应力分布,抽运区域与一维解析计算结果基本吻合,抽运区域边缘产生较大应力梯度;(d)为合应力分布,晶体棒中心应力在95MPa以上,在冷却与辅热过度区产生较大的应力梯度,最大正应力与不考虑端面效应的一维解析计算结果接近。图7是一般(无辅热)情况下合应力模拟结果,在相同抽运功率条件下,棒中心正应力超过176MPa,是不考虑端面效应的一维解析计算值的近2倍,因为固态激光器实际封装时不可能避免端面冷却,一般情况如图7。因此通常简单的解析分析在工程中容易产生很大的误差,端部辅热虽然增加了温度分布的多变性,但极大减小了晶体棒最大应力,减小了晶体棒断裂损坏。

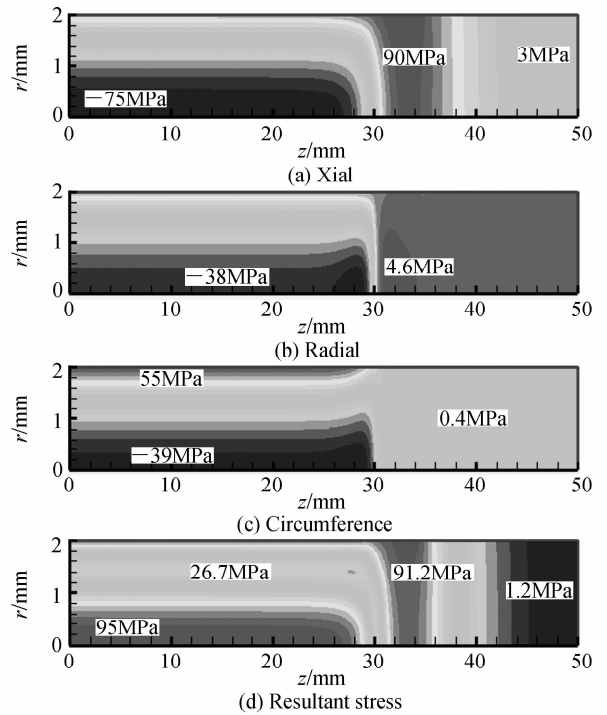


图6 晶体棒应力分布

Fig. 6 Stress distribution of crystal rod

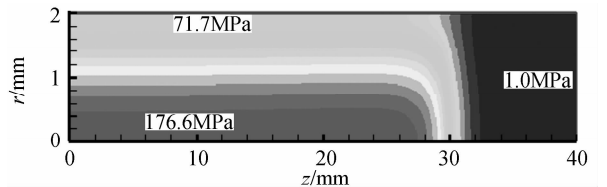


图7 无辅热晶体棒应力分布

Fig. 7 Stress distribution of no auxiliary heating crystal rod

3 热效应引起的光学畸变计算

温度梯度、应力将引起晶体棒折射率变化从而引起光学畸变,其中应力引起折射率变化的各向异性还会造成晶体棒应力双折射,折射率变化与温度梯度、应变关系式为^[16]

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \sum_{i,j=3}^3 \frac{\partial n}{\partial \xi_{ij}} \xi_{ij} \quad (5)$$

式中,晶体热光系数 $\partial n / \partial T = 7.3 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, ξ_{ij} 为晶体应变,根据激光棒轴向[111]方向,光束径向偏振光和切向偏振光折射率随应变的变化可由晶体应变光弹性系数 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{44} 求出^[15].将前面计算的温度变化和应变值代入式(5),得到图8所示的晶体棒折射率分布,其中(a)为径向偏振光折射率分布,可以看出在抽运及辅热过渡区折射率变化相对较大,但折射率变化量相对基础折射率很小,数值在 0.000 5 左右,所以即使在最大折射率变化区域也不会产生强烈的光学特性突变而影响光线轴向传播.(b)为切向偏振光折射率分布,与径向偏振光折射率分布基本相同,同一点差别在 0.000 02 以内.

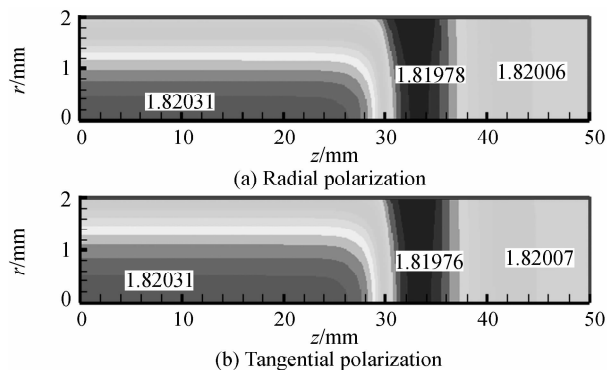


图8 晶体棒折射率分布

Fig. 8 Refractive index distribution of crystal rod

热效应引起的光学畸变通常用激光束波前变化来描述,温度梯度、应力双折射、激光棒端面效应共同形成晶体棒热透镜效应,热透镜形成的光程变化(Optical Path Difference, OPD)公式为^[18]

$$OPD = \int_0^L \left[\frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + (n_0 - 1) \xi_{zz} + \sum_{i,j=3}^3 \frac{\partial n}{\partial \xi_{ij}} \xi_{ij} \right] dz \quad (6)$$

式中, n_0 为晶体基础折射率, ξ_{zz} 为 z 方向正应变, L 为晶体长度,其他物理量意义同式(5).由式(6)计算不同效应形成的光程差分布如图9,曲线1为温度变化形成的光程差,棒中心光程超出边缘 0.008 8 mm;曲线2为应力形成的径向偏振光光程差,大小 0.002 4 mm,约为温度效应的 27%;曲线3、4分别为应力形成的切向偏振光光程差和端面效应形成的光程差,小于 0.000 1 mm,与温度效应相比可忽略,因此晶体棒应力双折射大小与应力效应在径向偏振方向影响大小相当.

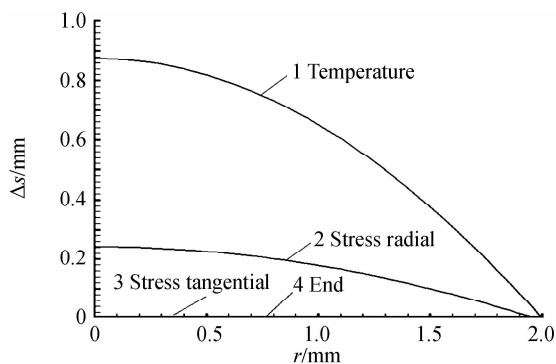


图9 不同效应形成的光程差分布

Fig. 9 Optical path difference distribution of different effect

图10为温度、应力及端面综合效应形成的光程差分布,曲线1为径向偏振光光程差,棒中心光程超出边缘 0.011 2 mm;曲线2为切向偏振光光程差,棒中心光程超出边缘 0.008 4 mm.由热透镜焦距 $f = r^2 / 2\Delta s$ 可得:径向和切向偏振光热透镜焦距 f_r 、 f_θ 分别为 178 mm和 238 mm,因此谐振腔设计时应考虑不同偏振光的振荡稳定性.用临界稳定法对模型(输入功率 950 W)进行热透镜焦距测量,以功率拐点判断谐振腔临界稳定性,测得 f_r 、 f_θ 分别分别为 195 mm和 253 mm,模拟与实验结果比较接近.

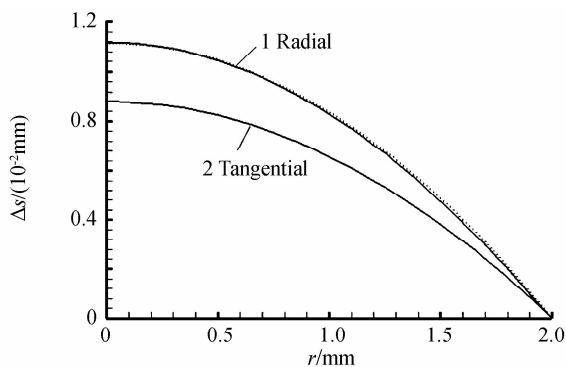


图10 切向偏振和径向偏振光程差分布

Fig. 10 Optical path difference distribution of tangential and radial polarization

4 结论

本文针对采用晶体棒端部辅热方法实现低温工作的 Tm:YAG 激光器结构建立了晶体温度、应力及光学畸变数学模型,采用有限差分法对高功率侧面抽运端部在辅热条件下晶体棒的温度场、应力场及光学畸变进行了模拟计算,实验测定了热透镜焦距并与模拟计算结果相比较.研究表明:端部辅热不但可以实现低温冷却,同时极大降低了晶体棒最大应力,模型中最大应力(95 MPa)远小于一般冷却方式晶体棒的最大应力(176 MPa),这有效避免晶体损坏,提高激光器输出能力;辅热使得温度和应力分布复杂,引起晶体内部折射率分布复杂变化,相对于 Tm:YAG 晶体的基础折射率

(1.82),数值变化量较小仅为0.0005,说明辅热对光线在晶体内的传播无明显影响;根据晶体棒轴向温度分布看出,很小的辅热区域即可满足辅热要求,说明辅热对激光器结构紧凑度不会产生太大影响。总之,晶体棒端部辅热可有效解决光学端面结露问题,实现Tm:YAG激光器在低温条件下工作,且提高效率。端部辅热的新型设计对提高钪激光器效率及性能具有重要意义。

参考文献

- [1] LIU Jiang, LIU Kun, TAN Fang-zhou, *et al.* High power thulium doped all fiber super fluorescent sources[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2014, **20**(5): 497-502.
- [2] TANG Yu-long, XU Jian-qiu. High-power pulsed thulium fiber oscillator modulated by stimulated Brillouin scattering [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(1): 0111034.
- [3] WAN P, YANG L M, LIU J. High pulse energy 2 μ m femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(2): 1798-1803.
- [4] LIN Zun-qi, CHEN Wei-biao, LOU Qi-hong, *et al.* Comments on some important progress of laser in recent years in China[J]. *China Science: Technology Science*, 2013, **43**(9): 961-978.
林尊琪,陈卫标,楼祺洪,等.我国近期激光前沿若干重要进展评述[J].*中国科学:技术科学*,2013, **43**(9):961-978.
- [5] MACKENZIE J I, LI Cheng, SHEPERD D P. Modeling of high power continuous-wave Tm:YAG side-pumped double-clad waveguide lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2002, **38**:222-230.
- [6] MARIO W K, MATHIAS W, HANNES C. Current evidence of transurethral Ho:YAG and Tm:YAG treatment of bladder cancer[J]. *World Journal of Urology*, 2015, **33**: 571 - 579.
- [7] LAI K S, XIE W J, WU R F, *et al.* A 150 W 2-micron diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Optical Society of America*, 2002, **68**: 535 - 539.
- [8] HONEA E C, BEACH R J, SUTTON S B, *et al.* 115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2000, **33**(9): 1592 - 1600.
- [9] CAO D, PENG Q, DU S, *et al.* A 200W diode side-pumped CW 2 μ m Tm:YAG laser with water cooling at 8°C [J]. *Applied Physics B*, 2011, **103**: 83-88.
- [10] WANG Cai-li, DU Shi-feng, NIU Yan-xiong, *et al.* Wavelength switchable high power diode-side pumped rod Tm:YAG Laser around 2 μ m[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 7156-7161.
- [11] ZHANG Chao, DU Shi-feng, NIU Yan-xiong, *et al.* A compact high power laser-diode side-pumped Tm, Ho:YAG laser nearly at room temperature with intracavity Tm:YAG laser[J]. *China Physics Letter*, 2014, **31**(4): 044201-3.
- [12] LIN Jiang-uo, TAO Yan, LIANG Jing-tao, *et al.* Measurement of output characteristics of Tm:YAG laser at 25 - 300K[J]. *Optics Communications*, 2015, **334**:118 - 121.
- [13] YAO Yu-cheng, XU Shao-gang, HUANG Chu-yun, *et al.* Experimental study on high-power thulium laser[J]. *Laser Journal*, 2015, **36**(6): 27-29.
姚育成,徐少刚,黄楚云,等.高功率钪激光器的实验研究[J].*激光杂志*, 2015, **36**(6):27-29.
- [14] LIU Xuan, HUANG Hai-tao, ZHU He-yuan, *et al.* A modified model for the LD pumped 2 μ m Tm:YAG laser: Thermal behavior and laser performance[J]. *Optics Communications*, 2014, **332**: 332 - 338.
- [15] ZHANG Xiao-long, SHEN Jin-hua, CAI De-fang, *et al.* Study of temperature distribution and deformation of the end-face in end-pumped [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):425-429.
李峰,范婷,白晋涛,等.端面抽运方形复合YAG温度场及热透镜研究[J].*光子学报*, 2008, **37**(3):425-429.
- [16] YANG Huo-mu, FENG Guo-ying, LI Wei, *et al.* Calculation of 3D thermal stress distribution of diode-end-pumped composite Nd:YAG rod[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **3**(37): 467-471.
杨火木,冯国英,李玮,等.端泵Nd:YAG高功率复合棒三维热应力分布的计算模拟[J].*红外与激光工程*, 2008, **3**(37): 467-471.
- [17] Ichiro takeuchi thermal stress[M]. Beijing: *Science Press*, 1997.
竹内一郎.热应力[M].北京:科学出版社,1977.
- [18] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. *Springer*, 2006.