

文章编号: 1001-3806(2010)06-0802-04

端面抽运板条放大器抽运均匀性和热效应模拟

侯军燕¹, 汪岳峰^{1*}, 竹孝鹏², 黄峰¹, 贾文武¹, 张强¹

(1. 军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要: 为了使激光二极管抽运的全固态激光器能够得到高光束质量、高功率的激光输出, 对激光介质的温度分布和热透镜效应的研究很重要。利用 ZEMAX 软件的非序列模块, 根据光束追迹的方法模拟了端面抽运结构下, 高功率二极管抽运激光放大器的抽运光在增益介质中的光场分布情况。结果表明, 此抽运方式下光场分布均匀。将激光介质中吸收的抽运光功率密度分布结果代入 LAS-CAD 软件, 计算出在种子光未注入和注入情况下, 抽运功率为 2400W 时, 增益介质最大温差分别为 68℃, 54.7℃ 以及最大热应力分别为 90N/mm², 67N/mm², 因此当抽运功率小于 2400W, 运转的全过程对于激光增益介质是没有威胁的。该模拟结果对于高功率二极管抽运板条激光放大器的设计具有一定参考价值。

关键词: 激光器; 板条放大器; 端面抽运; 温度分布; 热应力分布

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.022

Numerical simulation of pumping uniformity and thermal effects of LD end-pumped slab amplifier

HOU Jun-yan¹, WANG Yue-feng¹, ZHU Xiao-peng², HUANG Feng¹, JIA Wen-wu¹, ZHANG Qiang¹

(1. Department of Optics and Electronic, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Shanghai Key Laboratory of All Solid-state Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to obtain high bright and high-average-power output of diode pumped solid-state laser, the temperature distribution in the laser medium and thermal lens effects, essential for improving the laser performance, were analyzed. With the help of ZEMAX software, the distribution of pump light in gain material was analyzed when end-pumped by high power LD. Simulation results showed that the optical field distribution was uniform with that in end-pumped structure. Then applying the pump power density in gain material to LAS-CAD software, under the condition of the amplifier before and after being seeded, with the pump power of 2400W, the maximum temperature differences were 68℃ and 54.7℃ respectively, maximum thermal stress were 90N/mm² and 67N/mm² respectively. Therefore, when the pumping power was lower than 2400W, there was no threat for the laser gain medium under the entire operation of the amplifier. The simulation results have a certain reference value for the design of high-power diode-pumped slab amplifier.

Key words: lasers; slab amplifier; end-pumped; temperature distribution; stress intensity distribution

引言

激光二极管抽运的板条激光器是一种重要的高平均功率固体激光器, 是军事和工业领域很有前途的光源。热致应力双折射、热聚焦和应力断裂效应使得棒状激光介质获得高功率、高光束质量激光输出遇到了困难。在均匀抽运和冷却条件下, 锯齿形板条激光介质能够提供比棒状激光介质较大的增益长度与几何长

度的比率, 从而提高了效率。更重要的是可以在锯齿形面内消除 1 阶热聚焦、应力双折射和退偏效应, 理论上可以获得高光束质量、高功率的偏振激光输出^[1-7]。本文中从热传导方程出发, 在传导冷却、端面抽运和大功率抽运条件下, 分析端面抽运结构下抽运光强度分布和抽运的不均匀性导致的温度场分布和热致应力分布。

1 端面抽运时抽运吸收效率、抽运吸收均匀性和抽运品质因数的理论计算

端面抽运板条的结构示意图如图 1 所示。坐标原点在几何中心, 复合 Nd:YAG 板条的尺寸 1.7mm ×

作者简介: 侯军燕(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yfwang_OEC@163.com

收稿日期: 2009-11-18; 收到修改稿日期: 2009-12-01

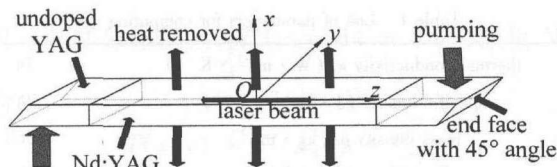


Fig. 1 Sketch of an end-pumped slab (coordinate axes are defined)

5.6mm × 67mm, 中间有 49mm 的掺杂区域, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.003。对于这种激光介质掺杂原子数分数为常数的端面抽运板条结构, 假设抽运光是单一波长的均匀平面波, RUTHERFORD 等人给出了沿 z 轴方向的吸收功率密度分布方程^[8] (z = 0 为板条的中心位置):

$$\rho_{\text{abs}}(z) = \frac{\alpha P_p (1 - R_p)}{tw} \frac{\exp\left(-\frac{\alpha l}{2}\right)}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \cosh(\alpha z) \quad (1)$$

晶体对抽运光的吸收效率:

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{tw \int_{-l/2}^{l/2} \rho_{\text{abs}}(z) dz}{P_p} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \quad (2)$$

抽运均匀性 U:

$$U = \frac{\rho_{\text{abs}}(0)}{\rho_{\text{abs}}(l/2)} = \text{sech}\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \quad (3)$$

抽运品质因数 F:

$$F = U\eta_{\text{abs}} = \frac{1 - \exp(-\alpha l)}{1 - R_p \exp(-\alpha l)} \text{sech}\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \quad (4)$$

式中, ρ_{abs} 为吸收功率密度; P_p 为抽运总功率; R_p 为抽运光在晶体上的反射率; $\alpha = n_d \sigma_a$ 为吸收系数; n_d 为掺杂浓度; σ_a 为有效吸收截面; t 为晶体厚度; w 为晶体宽度; l 为晶体长度。

对于 R_p 和 αl 的选择将会使抽运品质因数 F 得到优化。图 2 是抽运吸收效率, 抽运吸收均匀性和抽运

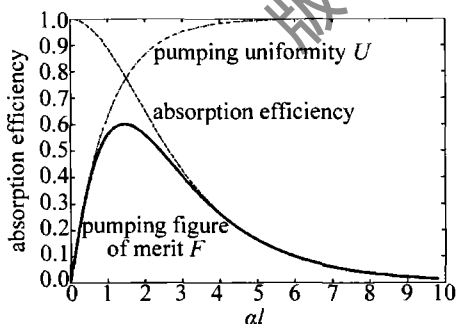


Fig. 2 Pump absorption efficiency, pump absorption uniformity and pumping figure of merit as a function of absorption depth for the case $R_p = 0$

品质因数与吸收深度的关系曲线图 (假设反射率 $R_p = 0$), 由图中可看出, 吸收效率和吸收均匀度均在 78% 左右时品质因数是最优的。研究最优吸收深度对于今后复合板条的长度选取是有指导意义的。

由图 2 可知, 抽运效率和功率分布对比度存在制约关系, 得出在 $\alpha l = 1.5$ 时有最优结果^[9-10]。如果要提高吸收效率, 则必须以降低抽运吸收功率分布均匀性为代价, 这在大功率激光放大器中, 将会导致大的温度梯度, 进而产生大的热应力, 甚至于高出板条的应力极限, 导致板条断裂。

2 ZEMAX 软件对端面抽运结构的耦合效果和激光介质中光场分布模拟

在 ZEMAX 软件中假设抽运光快轴发散角为 40°。激光介质的中间为掺杂区域, 掺杂区两端均键合了非掺杂的 YAG, 目的是为了减少因掺杂区域产生的热而引起的端面效应。采用两个全内反射 (total internal reflection, TIR) 面作为冷却面, 中间的掺杂部分在铜层的间隔下与热沉接触。图 3 是 zig-zag 板条端面抽运



Fig. 3 Schematic of the end-pumped zig-zag slab coupling system

结构示意图。一种特殊的柱透镜 (折射率为 1.52) 对每个堆栈发射出来的抽运光的快轴方向进行整形和聚焦, 耦合效率约为 83.2%。当总抽运功率 $P_p = 3600\text{W}$ 时, 抽运光在板条一个端面上的峰值辐照度为 28920W/cm^2 。抽运光通过第 1 个切割成 45° 角的端面下方注入, 成 45° 入射角经过此 TIR 的反射进入增益介质的掺杂区域, 并且因为上下 TIR 可以使抽运光一直沿板条的长度方向传播直至被完全吸收为止, 从而保证了端面抽运的高效性和均匀性。通过模拟计算可知, 几乎 83.2% 耦合进激光介质中的抽运光被板条吸收。

当抽运光进入晶体后, 首先要经过未掺杂区域, 之后到达吸收界面, 在这段路程中, 抽运光由汇聚逐渐变为发散, 到达四周的全反射面后发生全反射, 继续在板条中传播。图 4 中的 4 幅图分别显示了抽运光在未掺杂区域内 $z = -30\text{mm}$, 在吸收界面 $z = -22.5\text{mm}$, 激光介质中 $z = -18.5\text{mm}$ 和激光介质中心位置处的吸收抽运功率密度 (其中垂直方向为宽度, 水平方向为厚度), 分别为 $8.79 \times 10^4\text{W/cm}^2$, $2.72 \times 10^4\text{W/cm}^2$, $2.10 \times 10^4\text{W/cm}^2$ 和 $3.79 \times 10^4\text{W/cm}^2$, 右边标示柱由下到上显示了功率密度由小至大的变化。模拟结果显示, 此抽运方式下光场分布均匀, 不均匀性为 2.28%。可见键合未掺杂的晶体帽对端面抽运的抽运光在吸收界面处的分布均匀性起了促进作用。

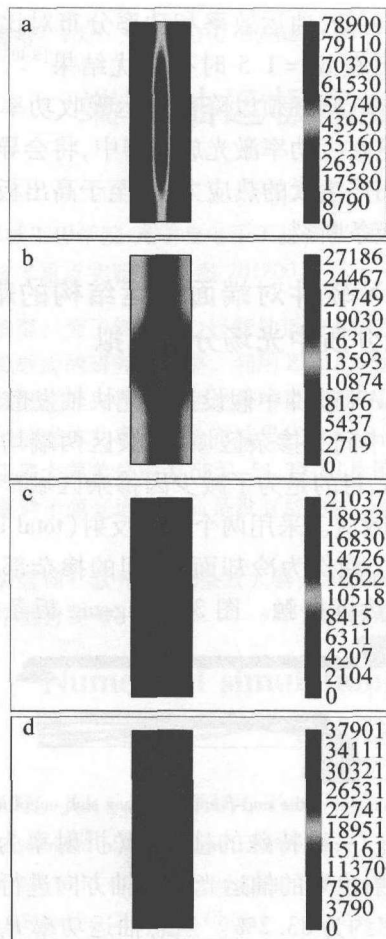


Fig. 4 Absorbed pump power density on width-thickness planes, $z = -30\text{mm}$, $z = -22.5\text{mm}$, $z = -18.5\text{mm}$ cross faces of the slab and middle of the slab

3 LAS-CAD 软件对端面抽运下的板条增益介质温度场和应力场分布模拟

3.1 激光介质的温场分布

激光板条的热源可以看成与抽运光强度 I 成正比,表示为:

$$Q_{\text{abs}}(x, y, z) = \eta I(x, y, z) \quad (5)$$

式中, $Q_{\text{abs}}(x, y, z)$ 为激光介质吸收的热沉积; $\eta = \eta_p \eta_{\text{abs}} \eta_t$, 由 3 部分组成, η_p 为抽运耦合系统的耦合效率, η_{abs} 为激光介质对抽运光的吸收效率, η_t 为产热比。计算中用到的主要参量如表 1 所示。激光介质吸收抽运光除一部分转化为激光输出外,大部分以热的形式沉积在激光介质中,激光板条内的稳态温度场分布可以表示为^[11]:

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{in}} = 0 \quad (6)$$

冷却表面边界条件: $T = 20^\circ\text{C}$, 另外两个非通光面: $\partial^2 T / \partial y^2 = 0$ 。其中, κ 为激光介质的热导率, T 为激光介质内的温度分布, Q_{in} 为激光板条内热源。

由于 3600W 和 2400W 时的温度和热应力分布云

Table 1 List of parameters for computing

thermal conductivity $\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	14
specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	590
mass density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4560
Young's modulus E / GPa	3
Poisson ratio ν	0.28
thermal expansion coefficient α	7.5×10^{-6}
film coefficient for fluid cooling $h / (\text{W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	0.05
initial temperature of heat sink T_0 / K	290
beam waist w_0 / mm	2
absorption coefficient a / m^{-1}	400
coupling efficiency η_p	85%
absorption efficiency η_{abs}	80%
heat load ratio η_t	32% (43%)

图在形式上区别不大,所以图 5 中只给出了 2400W 时的分布情况。图 5a 为对应的不同抽运功率端面抽运结构稳态温度分布云图。从温度分布图来看,温度梯度均沿厚度方向上。抽运功率为 3600W 和 2400W 时对应最大温差分别为 54°C 和 38.5°C ,且在端面附近端面热梯度较小,约为 12.8°C 。

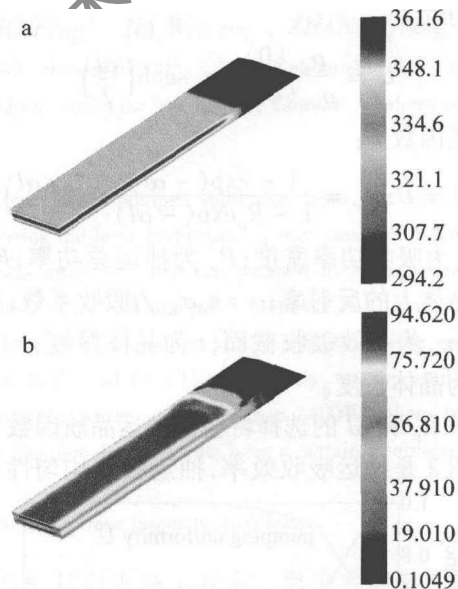


Fig. 5 Pump power is 2400W temperature distribution and stress intensity distribution

3.2 激光介质的应力场分布

由于抽运导致的体积热源和表面冷却双重作用,导致激光介质内部温度分布不均匀,使得其内部存在热应力,胡克定律使应变张量 ϵ 与应力张量 σ 服从于^[12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1-\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) \times (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right] \quad (7)$$

式中, α , E 和 ν 分别为板条材料的热膨胀系数、杨氏模量和泊松比, δ 是克罗内克函数。在稳态下,设已知截

面相对温度分布满足 $\int_A T'(x,y)dA = 0$ 时,温度可表示为:

$$T(x,y) = T'(x,y) + T_{avg} \quad (8)$$

式中, T_{avg} 为平均温度。则该截面的应力分布有如下关系:

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E\alpha T'(x,y) \quad (9)$$

式中, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 x, y, z 方向的应力分量, $T'(x,y)$ 为温度分布。文中应用有限元方法计算得到的等效热应力分布如图 5b 所示,从不同抽运功率的热应力模拟结果可以看出,抽运功率为 3600W 和 2400W 时,端面热致应力分别为 127N/mm² 和 90N/mm²,较大的热应力势必导致较大的热变形,键合激光板条能够减小晶体的端面热应力。激光板条在抽运面凸形弯曲,该面受到张应力所致,冷却面呈现凹形弯曲,由于该面受到压应力所致。

将 ZEMAX 模拟的抽运光强度 $I(x,y,z)$ 的分布结果导入 LAS-CAD 软件,计算晶体的温度分布和压强分布情况。图 5 是 LAS-CAD 软件对于端面抽运方式下的晶体热效应的模拟结果,包括温度和热应力强度分布。

根据固体激光工程上 Nd:YAG 的抗张强度为 1800kg/cm² ~ 2100kg/cm²,板条所能承受的一般为极限强度的 70%^[13],即板条的最大热应力不可以大于 123.48N/mm² ~ 144.06N/mm²。表 2 中总结了有、无

Table 2 Temperature distributions and equivalent stress of laser slab media

pump power/W	no seed		have seed	
	temperature difference/°C	thermal stress / (N · mm ⁻²)	temperature difference/°C	thermal stress / (N · mm ⁻²)
2400	68	90	50.7	67
3600	96	127	72	95

种子光注入情况下板条增益介质中最高温度和等效热应力的模拟结果。由表 2 中的数据可以看出,当抽运功率为 3600W 时,还没有种子光注入时,激光增益介质的最高温度差为 96°C,最大热应力强度为 127N/mm²,这时的运转对于增益介质有一定损伤的危险;当有种子光注入时,温度差有所下降,达到 72°C,应力强度也相应减小到 95N/mm²,此时的运转对增益介质没有太大威胁。

当抽运功率减小为 2400W,没有种子光注入时,增益介质的最高温度差为 68°C,最大热应力强度为 90N/mm²,这是的运转对于增益介质没有危险,当有种子光注入时,温度差下降到 50.7°C,应力强度也相应减小到 67N/mm²,此时的运转对于晶体是比较安全的。

可见在采用端面抽运方式时,在现有冷却方式下,抽运光的注入不能大于 3600W,否则有可能达到增益介质的损伤阈值,会对激光介质造成损伤。当抽运功

率为 2400W 时,从抽运光注入直至种子光注入,运转的全过程对于增益介质是没有威胁的。

4 结 论

在端面抽运结构的锯齿形激光板条中,在传导冷却、双端面抽运和大功率抽运条件下,对其温度场和热致应力作了较详细的理论计算和数值模拟。采用光线追迹方法,得到了端面抽运结构下抽运光在激光增益介质中的光强分布情况,并采用有限元方法计算出相应介质中温度和热应力分布。模拟结果显示,此抽运方式下光场分布均匀,不均匀性为 2.28%。增益介质在种子光未注入和注入情况下,抽运功率为 2400W 时,最高温度差分别为 68°C, 54.7°C 以及最大热应力分别为 67N/mm² 和 95N/mm²,因此当抽运功率小于 2400W,运转的全过程对于激光增益介质是没有威胁的,键合激光板条在消除端面效应方面有较大优势。

参 考 文 献

- [1] COMASKEY B J, BEACH R, ALBRECHT G, *et al.* High average power diode pumped slab laser[J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4):992-996.
- [2] SCHNITZLER C, HOFER M, LUTTMANN J, *et al.* A CW kW-class diode end pumped Nd:YAG slab laser[C]//IEEE, Lasers and Electro-Optics, CLEO'02. Long Beach, CA: IEEE, 2002:766-768.
- [3] SHI P, LI D J, ZHANG H L, *et al.* High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator[J]. Acta Optical Sinica, 2004, 24(4):491-494 (in Chinese).
- [4] LIU Q, GONG M L, LU F Y, *et al.* 520W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser[J]. Opt Lett, 2005, 30(7):726-728.
- [5] SRIDHARAN A K, SARAF S, SINHA S, *et al.* Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers; batch fabrication and parasitic oscillation suppression[J]. Appl Opt, 2006, 45(14):3340-3351.
- [6] GONG M L, LU F Y, LIU Q, *et al.* Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser[J]. Appl Opt, 2006, 45(16):3806-3810.
- [7] SHENG D Ch, GONG M L, LIU Q, *et al.* Analysis of thermal effects in corner-bumped slab solid-state lasers[J]. Laser Technology, 2006, 30(1):86-89 (in Chinese).
- [8] RUTHERFORD T, TULLOCH W M, GUSTAFSON E K, *et al.* Edge pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling[J]. IEEE J Q E, 2000, 36(2):205-219.
- [9] COMASKEY B J, BEACH R, ALBRECHT G, *et al.* High average power diode-pumped slab laser[J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4):992-996.
- [10] ZHANG Sh W. High average power Nd:YAG slab laser with improved beam quality[J]. Proc SPIE, 1996, 2289:120-126.
- [11] OZISIK M N. Heat conduction [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983:4-12 (in Chinese).
- [12] EGGLESTON J M, KANE T J, KUHN K, *et al.* The slab geometry laser—Part 1: theory[J]. IEEE J Q E, 1984, 20(3):289-301.
- [13] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002:357-366 (in Chinese).