

文章编号:1002-2082(2017)01-0120-06

热透镜控制激光光束质量技术研究

屈鹏飞,王石语,过 振,蔡德芳,李兵斌

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071)

摘 要:在端面抽运固体激光器中,就如何改善在高抽运功率时输出激光的光束质量,提出一种激光器的设计方法。在激光器谐振腔中放入多根掺杂浓度不同的激光介质,利用激光介质内部产生的热透镜控制抽运光和基模振荡光的空间分布,并且最大限度地使抽运光的分布区和基模振荡光分布区重叠,实现抽运光与基模振荡光在空间上高度匹配,进而提高抽运光能量的利用效率和振荡光的光束质量。实验表明,在不同抽运功率下,抽运光和基模振荡光在晶体内部的光斑的空间分布可通过热透镜加以控制。在端面抽运功率 200 W 附近时,实现了抽运光与基模振荡光较高度匹配,光束质量因子 M^2 由 14.7 改善为 4.1。

关键词:固体激光器;热透镜;空间分布;光束质量

中图分类号:TN248.1

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0107001

Controlling technique of beam quality by thermal lensing

Qu Pengfei, Wang Shiyu, Guo Zhen, Cai Defang, Li Bingbin

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at improving laser beam quality in designing high power end-pumped Nd:YAG laser, thermal lensing effect is employed to achieve high beam quality in Nd:YAG laser in this paper by placing two more Nd:YAG crystals with different doping concentrations in the resonator. Under action of pumping light, thermal lensing generated from the Nd:YAG crystal is used to shape special distribution of pump beam and fundamental mode beam. Tighter overlapping of both beams results in higher efficiency of pump power and better beam quality of laser. Experimental results show special distribution of pump beam and fundamental mode beam can be shaped by thermal lensing effectively under different pump power. Two beams are matched closely at pump power of 200 W, and M^2 is improved from 14.7 to 4.1.

Key words: solid-state laser; thermal lensing; special distribution; M^2

引言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)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^[1-5]。在 LD 抽运过程中,由于存在

量子差损等过程,导致了其输入的总能量中只有部分转化为激光输出,其余能量大部分为热消耗^[6]。由于受到抽运光不均匀分布和晶体周围散热系统的共同作用,使得晶体内部温度分布不均匀,形成温度梯度,引发晶体内部热效应,直接影响了激

收稿日期:2016-08-15; 修回日期:2016-10-27

基金项目:国家预研究基金(9140A020105)

作者简介:屈鹏飞(1987—),男,内蒙包头人,博士研究生,主要从事新型光电子器件方面的研究。

E-mail:qupengfei_119@163.com

导师简介:王石语(1966—),男,陕西临潼人,博士生导师,教授,主要从事新型光电子器件方面的研究。

E-mail:yshi@mail.xidian.edu.cn

光输出的稳定性和光束质量^[7-8]。因此,为了提高抽运光能量的利用效率和振荡光的光束质量,就需要使抽运光和振荡光低阶模匹配,即要求抽运光半径小,但实际中,抽运光存在一定的发散角,随着光束的传播,在激光晶体内部光斑半径会很快增大,如果不加以控制,大量的抽运光能量将会消耗在低阶模以外的区域,不但严重降低激光器效率,还会由于高阶模成分的增多影响激光器的光束质量。

基于上述问题,人们通常利用波导耦合、晶体间键合以及晶体形状的设计等方式^[9-11]来提高输出光的光束质量,但是却没有从根本上解决热透镜效应对激光器的影响,在大功率条件下,极大地影响了激光器的输出功率和光束质量。本文利用晶体内部热效应,让其形成焦距合适的热透镜,使抽运光和振荡光低阶模区域最大限度的重合,以抑制激光晶体内部高阶模的生成,提高激光器低阶模效率,获得好的光束质量。

1 理论分析

所研究的激光器结构示意图见图1,通过调节输出镜的前后位置以及晶体棒的间距,使抽运光照射在Nd:YAG晶体棒后,晶体棒内部形成光学参数相近的热透镜。抽运光在晶体边缘或晶体外汇聚成腰,且所有热透镜所形成的腰斑位置对称,其中前后热透镜共焦平面,实现抽运光区域和激光低阶模区域重叠。

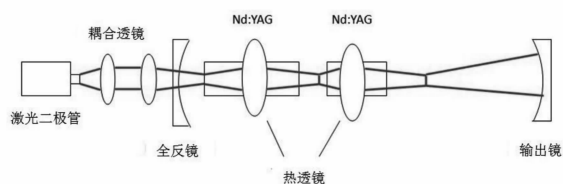


图1 二极管端面抽运激光器示意图

Fig. 1 Structure diagram of diode end-pumped solid-state laser

晶体内部的温度分布与抽运光产生的热耗、晶体的热物性参数、几何结构以及外部条件有关。在设计中,热透镜焦距和抽运光空间分布相互作用,需通过反复迭代来计算。我们在得知抽运光的初始分布情况下,计算激光晶体内部的热源功率密度分布,用得到的热源功率密度结合边界条件计算晶体内部的温度场分布,继而确定热透镜焦

距的大小。在此基础上,计算抽运光空间分布的变化,然后重新计算介质内部的热功率密度,如此反复迭代,直到稳定。具体如下:

第一步,首先根据初始抽运光分布,计算晶体内部热源的分布,进而得到稳态条件下介质内部的温度场分布。

采用稳态的热传导方程,在旋转对称的物理条件下,稳态热传导方程可以表示为

$$K(T) = \left(\frac{d^2 T(r, z)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r, z)}{dr} + \frac{d^2 T(r, z)}{dz^2} \right) + q_v(r, z) = 0 \quad (1)$$

式中: r 和 z 分别为柱坐标的径向坐标和轴向坐标,以晶体端面中心作为 r 和 z 的坐标零点; T 为晶体温度; $q_v(r, z)$ 为晶体内部热源; $K(T)$ 为晶体的导热系数。计算中采用数学形式比较简单的高斯分布抽运光进行端面抽运,这种情况下, $q_v(r, z)$ 计算如下:

$$q_v(r, z) = \frac{2\alpha\gamma P_{in}}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

式中: P_{in} 为介质吸收的抽运光功率; α 为晶体对抽运光的吸收系数; γ 为介质生热系数; ω 为抽运光束半径^[12-13]。

利用所得到的热源函数,结合边界温度,运用ansys软件有限元计算方法,得出晶体内部温度分布。

第二步,根据温度场分布,确定抽运光分布的变化。

在获得温度场分布的条件下,利用菲涅尔-基尔霍夫衍射积分公式计算抽运光分布的变化。根据菲涅尔-基尔霍夫衍射积分公式,在均匀介质中,若知光波场在任意空间曲面上的振幅和相位分布,就可以计算出该光波场在空间其他任意一个位置处的振幅和相位分布^[13],关系式如下:

$$u(x, y) = \frac{ik}{4\pi} \iint_S u(x', y') \frac{\exp(-ik\rho)}{\rho} (1 + \cos\theta) ds' \quad (3)$$

式中: $u(x, y)$ 表示某平面 M_2 上的光场场强; $u(x', y')$ 为已知平面 M_1 上任意一点 (x', y') 上的光场场强; ρ 为两点 (x, y) 和 (x', y') 之间的距离。

在端面抽运固体激光器中,对于温度场分布导致激光介质内折射率分布不均匀,由激光介质端面上的抽运光分布函数出发,利用公式(3)计算

空间光场的传播和分布。

在计算中,沿抽运光的传播方向,将激光介质分割成若干薄片,由薄片前表面上的光场计算薄片后表面的光场。计算时,由介质内部温度差计算得到其折射率的变化量,通过折射率的变化量得到抽运光通过每段晶体时的光程差分布,进而得到其相位差分布,采用这种方法将温度场的影响考虑进去。

介质温度与折射率之间的关系:

$$\Delta n(x, y, z)_T = [T(0, 0, z) - T(x, y, z)] \cdot \frac{dn}{dT} \quad (4)$$

式中: $T(0, 0, z) - T(x, y, z)$ 表示晶体任意一点与该平面所在平面中心温度的差; dn/dT 为折射率温度系数,近似当成一个常数。

由上述折射率差我们可以得到通过每段晶体时的光程差分布,其表达式为

$$\Delta \delta(x, y) = \int_L \Delta n(x, y, z)_T dz \quad (5)$$

进而得到其相位差分布:

$$\Delta \varphi(x, y) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta \delta(x, y) \right) \quad (6)$$

这样的相位差正是热效应对光场的调制,在利用介质薄片前表面光场计算后表面的光场时,给积分式(3)后乘一个相位调制因子:

$$\sigma(x, y) = \exp(-i\Delta \varphi(x, y)) \quad (7)$$

对所有介质薄层进行类似计算,便可以获得考虑温度分布的条件下介质内的新抽运光分布^[14]。

第三步,将所得到的抽运光分布代入第一步中,反复循环,直到稳定。

计算流程图如图2所示。

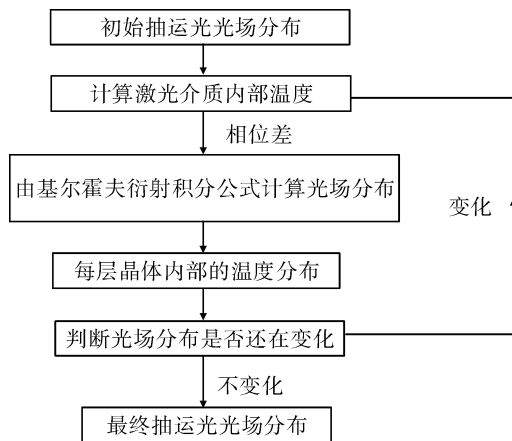


图2 自适应算法流程图

Fig. 2 Flowchart of self-adaptive algorithm

2 计算结果分析及实验验证

计算与实验所用激光器结构模型见图3。

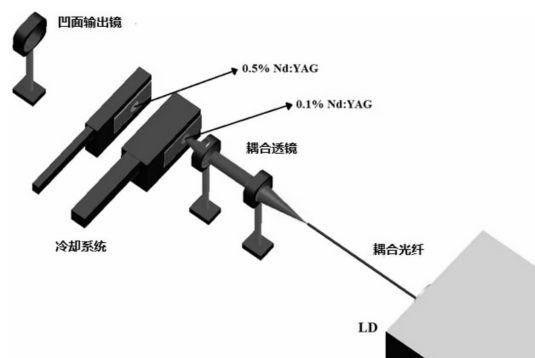


图3 实验所用激光器结构简图

Fig. 3 Structure diagram of experimental laser

图3中,抽运光选取波长为808 nm的半导体激光器,经光纤耦合系统输出,并通过透镜的准直和聚焦,进入到晶体棒中。前端选取掺杂浓度为0.1%,长度30 mm,直径3 mm的Nd:YAG晶体,后端用掺杂浓度为0.5%,长度10 mm,直径3 mm的Nd:YAG晶体。0.1%掺杂Nd:YAG晶体抽运光端面镀808 nm全透膜和1 064 nm全反膜,其他端面镀808 nm全透膜和1 064 nm全透膜,0.5%掺杂Nd:YAG晶体两端均镀808 nm全透膜和1 064 nm全透膜。晶体棒通过铜热沉进行散热。谐振腔腔长为160 mm,输出镜选取曲率半径为100 mm的凹面镜。

2.1 模拟结果分析

图4是抽运功率分别为100 W,150 W,200 W,250 W时,利用上述算法得到的抽运光与振荡光在晶体内传输时的光斑变化情况。图中阴影部分为两段晶体的间距。在计算中,初始抽运光是由抽运源经光纤输出,经耦合系统准直聚焦后由CCD截取到光场信息;所取初始光斑半径均为0.5 mm,其中高阶模为多种模式光场叠加后的混合模。

由图4我们可以看出,抽运光和基模振荡光的匹配程度随功率的增加而有所改善,在低功率下,由于热效应较弱,热透镜效应不明显,抽运光与基模振荡光不能很好地重叠在一起,这使得激光器的工作效率较低,并且抽运光在低功率下得不到有效的汇聚,进一步降低了激光器的工作效率。由图4(a)可以看出,高阶混合模与抽运光的匹配程度非常高,而抽运光的大部分能量不能很好地

集中在基模区域,致使激光器光束质量降低;随着抽运功率的提高,达到 150 W 时,由图 4(b)可以看出,抽运光与基模振荡光之间的匹配程度较之前明显改善,这种状态下,激光器光束质量与激光器基模效率也随之提升,提升程度也较为明显。当抽运功率进一步提高到 200 W 时,获得图 4(c)所描述的情况,这个时候,抽运光与基模振荡光基本上达到重合,这样使得抽运光的能量都集中在晶体的低阶模区域,使得基模的输出功率更高,进而提高了激光的光束质量。但当抽运功率继续升高至 250 W 时,如图 4(d)所示,这时候抽运光与基模

振荡光在晶体前端匹配较好,但在后端处,抽运光发散角较大,而基模振荡光发散角较小,二者光束逐渐分离,抽运光能量不能够很好地集中在基模振荡光处,这样便导致振荡光光束质量有所下降。

2.2 实验结果分析

为了验证理论结果,采用固定抽运功率,改变谐振腔的腔长和晶体间距,寻找最佳的腔长和晶体间距数据。表 1 为抽运光注入功率 195 W,抽运光光斑半径为 0.5 mm 时,腔长分别为 100 mm, 120 mm, 160 mm 和 180 mm 的 4 组实验所得到的振荡光功率和 M^2 实验数据。

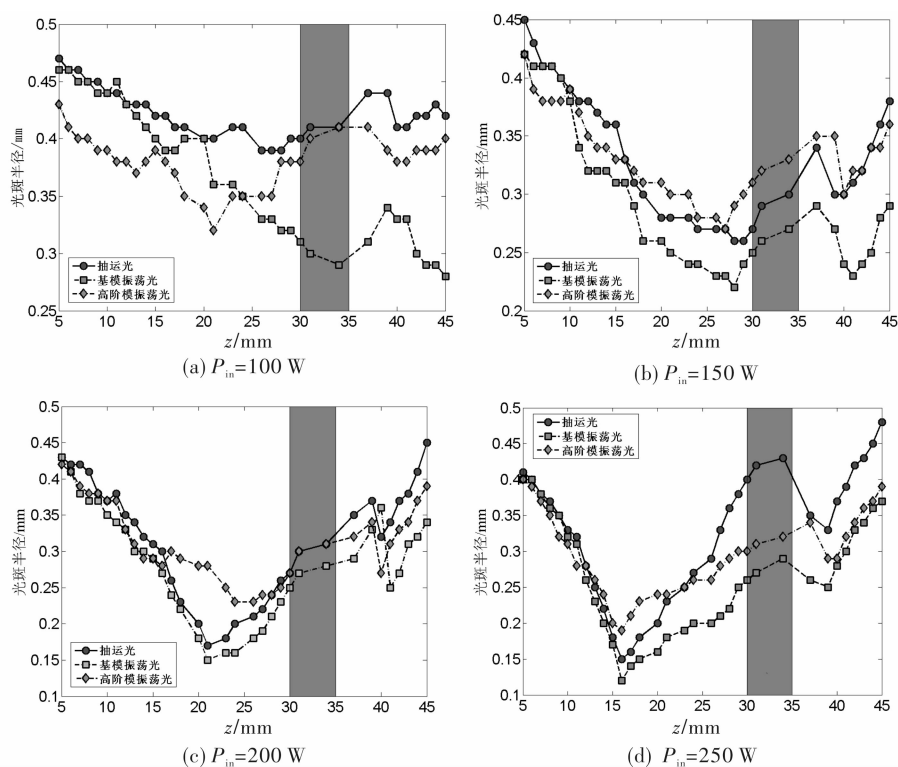


图 4 不同抽运功率下抽运光与振荡光光斑半径沿 z 轴方向变化

Fig. 4 Variation of radius of pump beam and oscillation modes in optic axis z direction in different pump powers

表 1 不同腔长条件下振荡光功率和 M^2 实验数据比照表

Table 1 Output power and M^2 in different kind of resonator length

实验	输出功率 P_{out}/W	M^2	腔长 L/mm	基模振荡光在晶体端面处光斑半径 R/mm	晶体间距 d/mm
1	80	22.6	100	0.384	2
2	65	14.7	120	0.401	2
3	72	4.1	160	0.423	4
4	51	7	180	0.445	2

从表 1 中可以看出,效果最佳的点给出的腔长数据是 140 mm,晶体间距为 4 mm,在晶体端面处基模振荡光光斑半径为 0.423 mm。与图 4(c)对

照发现,图 4(c)给出的基模振荡光光斑半径和晶体间距,与表 1 中实验 3 所给的数据基本吻合,这就说明前面的理论方法是正确的。

3 结果分析与讨论

在表1所给出的实验数据中,实验3是在实验2的基础上,对谐振腔长度以及两根晶体间间距进行调节,当基模振荡光在晶体端面处光斑半径与理论分析时的半径相近时,我们可以明显地观察到振荡光的光束质量得到大幅度的改善,由实验2的14.7变为实验3的4.1,同时,振荡光功率也有所增加。表1中实验4,其功率出现大幅大下降,同时所呈现的光斑非常杂乱,并不是一个圆斑,产生这样的原因在于其热透镜效应致使谐振腔由稳定腔变为非稳腔,腔内光斑的模式不再是低阶模。将实验结果与理论分析相结合,我们可以看出,当注入功率在200 W附近时,晶体内部所形成的热透镜对抽运光汇聚作用,达到较为理想的效果,使得抽运光与基模振荡光在空间上高度匹配,大部分抽运光能量被基模振荡光所吸收,激光器的效率和光束质量得到较大幅度的提升。在实验过程中,当抽运光功率和外界温度不再变化时,晶体内部的热效应分布和抽运光分布会发生相互作用,通过一段时间的弛豫,达到稳定状态,这时候晶体内部的热透镜焦距便不再发生变化,并可通过模拟计算估算出热透镜焦距的具体数值,当我们调整输出镜位置让其焦点与热透镜焦点重合时,这个时候激光器处于最佳工作状态,由于外部条件不再发生变化,故激光器的工作状态也处于稳定状态。与传统激光器相比较,这种方法设计的激光器主要用于高功率抽运条件下。在低抽运功率条件下时,抽运光和振荡光的匹配程度不高,输出光光束质量非常差;激光器在高功率抽运状态下工作时,我们通过调整抽运光功率以及改变输出镜位置的方式来设计激光器结构,在设计好激光器参数后,当抽运功率达到特定值时,激光器便会运作在最佳状态,得到高功率和高光束质量的激光输出,因此这种方法是具备良好的可行性及实用性。

4 结论

在激光器的设计中,通常为了缓解热效应,进行了比较复杂的设计与改进,在一定程度上影响了激光器的输出功率以及光束质量。文中提出了一种激光器的设计方法,通过利用热效应,使得抽运光和基模振荡光相匹配,达到控制激光器光束

质量与提高激光器输出效率的目的。通过理论计算,研究了不同抽运功率下,抽运光与振荡光二者光束的匹配程度,结果表明:在抽运功率100 W时,由于热效应较弱,抽运光与基模振荡光匹配程度较差,这时候激光器输出效率较低,随着抽运功率的增加,至150 W左右时,二者的匹配程度有了明显的改善,激光器效率也达到最大,但随着抽运功率的进一步增加,这时候热效应较之前更为剧烈,抽运光与基模振荡光的匹配程度降低,激光器效率降低。在进一步的实验中,通过调节输出镜前后距离和晶体间距进行优化,使得振荡光光束质量 M^2 由14.7改善到4.1,所得结果与理论分析基本吻合,证明了方案的可行性。

参考文献:

- [1] Mirzaeian H, Manjooran S, Major A. Simple technique for accurate characterization of thermal lens in solid state lasers[J]. SPIE, 2014, 9288: 928802-7.
- [2] Yu Shen, Yong Bo, Nan Zong, et al. Experimental and theoretical investigation of pump laser induced thermal damage for polycrystalline ceramic and crystal Nd: YAG[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 160-167.
- [3] Sanghera J, Shaw W, Kim W. Ceramic laser materials[J]. Materials, 2012, 5: 258-277.
- [4] Shibib K S, Minshid M A, Alattar N E. Thermal and stress analysis in Nd: YAG laser rod with different double end pumping methods [J]. Therm. Sci., 2011, 15(sup 2): 399-407.
- [5] Shen Y, Liu W B, Zong N, et al. Comparison of laser induced thermal fracture between polycrystalline ceramic and crystal Nd: YAG[J]. Opt. Lett., 2014, 39(7): 1965-1967.
- [6] Safari E, Kachanov A. Estimation of thermal lensing effect in the high-power end-pumped direct-cut crystal lasers[J]. Optics & Laser Technology, 2006, 38(7): 534-539.
- [7] Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng et al. Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd: GdVO₄ crystals[J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(7): 923-928.
- [8] 史彭, 李隆, 甘安生, 等. 端面抽运矩形截面 Nd: GdVO₄ [J]. 中国激光, 2005, 32(7): 923-928.
- [8] Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei, et al. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-

- pumped[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(3): 333-337.
- 张帅一,黄春霞,于果蕾,等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. 中国激光,2008,35(3): 333-337.
- [9] Hodgson N, Hoffman H J, Valerh T M, et al. Diode-pumped, 220W ultra-thin slab Nd : YAG laser with near-diffraction limited beam quality[C]. US: IEEE,2002;264-265.
- [10] Yasuhara R, Kawashima T, Lkegawa T, et al. Diode-pumped thermally controlled zig-zag laser with 20J pulse energy in 10 ns at 10 Hz repetition rate [R]. Osaka: Osaka University, 2005;150-151.
- [11] Mende J, Speiser J, Spindler G, et al. Mode dynamics and thermal lens effects of thin disk lasers[J]. SPIE, 2008,6871;1-11.
- [12] Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin, et al. Influences of heat-dissipation methods on thermal distortion of laser rods[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 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, 2009, 37(2): 351-357.
- [13] Yu Jin, Tan Huiming, Qian Longsheng, et al. Theoretical study on thermal beam fousing in longitudinally-pumped solid-state laser rods[J]. High Power Laser and Particul Beams, 2000, 12(1): 27-31.
- 余锦,谭慧明,钱龙生,等. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 27-31.
- [14] Huan Youwen. Study on the effect of pump light distribution to the oscillating light distribution characteristics [D]. Xi' an: Xidian University, 2013: 28-36.
- 宦友文. 泵浦光分布对振荡光分布特性的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013;28-36.