

百瓦级高光束质量 Nd:YAG 板条激光放大器

汪丹^{1,2} 周唐建^{1,2} 王君涛^{1,2} 童立新^{1,2} 胡浩^{1,2} 李密^{1,2}

(¹ 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900
² 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 研究了一台端面抽运的 Nd:YAG 板条激光放大器, 采用低掺杂、键合的 Nd:YAG 板条晶体和 3 通放大结构, 实现功率 330 W, 光束质量 $M_x^2=1.23, M_y^2=1.73$ 的激光输出。采用 4f 像传递系统, 有效减小了板条入口的切光损耗, 并实现了板条内能量的均匀提取。根据 1、3 通放大功率计算了相应的增益系数, 并简要分析了多通放大结构对放大自发辐射 (ASE) 的抑制作用。

关键词 激光器; 板条激光放大器; 端面抽运; 光束质量; 波前; 增益系数

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002001

Hundreds Watts Nd:YAG Slab Laser Amplifier with High Beam Quality

Wang Dan^{1,2} Zhou Tangjian^{1,2} Wang Juntao^{1,2} Tong Lixin^{1,2} Hu Hao^{1,2} Li Mi^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract An end pumped Nd:YAG slab laser amplifier is presented. Low doped and composited Nd:YAG slab is used to obtain continuous wave output power of 330 W and beam qualities of $M_x^2=1.23, M_y^2=1.73$ under the 3 passes amplification structure. Taking advantage of 4f image system, the loss from light cutoff is reduced and the uniformed energy extraction is realized. In addition, gain coefficients are calculated by the output power of single and multiple pass amplifications. It is also investigated that the multiple amplification structure is good to restrain the amplified spontaneous emission.

Key words lasers; slab laser amplifiers; end pump; beam quality; wavefront; gain coefficient

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引言

二极管抽运的固体激光器 (DPL) 以其功率高、光束质量高、结构紧凑、系统稳定等特点被广泛应用于工业加工、科学研究、国防军事等领域^[1]。但随着抽运功率的增加, DPL 的功率和光束质量严重受限于增益介质的热效应^[2], 如热温度梯度, 热应力以及热致双折射等。主振荡功率放大 (MOPA) 结构^[3] 将激光模式选择与功率提升过程分开, 振荡器获得低功率高光束质量的种子激光, 放大器在提升激光功率的同时保持较好的光束质量。

相较于棒状增益介质, 板条型增益介质能有效减小介质内的热畸变与热应力^[2]。板条介质冷却面

积大, 冷却厚度薄, 可高效导出晶体中的废热, 不形成大的温度梯度。另外, 激光在晶体内呈 zig-zag 光路传播, 理论上, 介质中沿厚度方向的热畸变在传播的过程中得到完全补偿。由于板条结构优异的散热能力, 板条激光器是目前功率输出水平最高的固体激光器。2009 年, 诺格公司采用 7 路板条放大实现了 105 kW 的高功率输出, 光束质量 (BQ) 优于 3 倍衍射极限^[4]。

早期的板条激光器采用大面抽运, 大面冷却结构^[5]。采用这种结构虽然冷却效率高, 抽运光易耦合到板条内, 但是却要求大面具有高的平行度、光洁度, 增加了精密加工的难度。另外冷却液直接与板

收稿日期: 2013-04-25; 收到修改稿日期: 2013-05-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (60890201)

作者简介: 汪丹 (1983—), 男, 硕士, 主要从事固体激光技术及应用等方面的研究。E-mail: 20930103@zju.edu.cn

条接触,易造成板条污染。随后侧面抽运^[6]结构被提出,这种结构使抽运面与冷却面分离,有效解决了上述问题。但是侧面抽运吸收光程短,为增加增益介质的储能,需采用大吸收系数的增益介质,从而导致在抽运方向上产生严重的热畸变。2000年,Hagop等^[7]提出板条的端面抽运结构。这种结构实现了抽运光长程吸收,提高了系统效率。通过控制抽运光的波长,使得在晶体内部形成弱吸收,可实现抽运光在晶体中更为均匀的分布。另外这种抽运方式可采用板条键合技术^[8],以减小端面形变,有利

于实现高质量的激光输出。

以基横模光纤激光器作为种子源,以键合的Nd:YAG板条晶体作为增益介质,采用端面抽运和3通放大结构,在抽运功率为3000W时,实现了激光功率330W,光束质量因子 $M_x^2=1.23, M_y^2=1.73$ 的激光输出,光-光转换效率约为11%。

2 实验装置

端面抽运的激光板条放大器实验装置如图1所示。

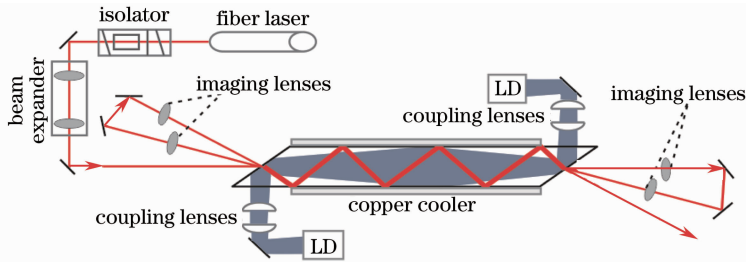


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

种子源为单频保偏光纤激光器,输出功率为3.5W,光束质量因子 $M^2=1.05$ 。为防止放大器内镜面回光以及放大自发辐射激光破坏光纤激光器,在种子源与放大器之间使用了偏振隔离系统。光纤激光器输出圆光斑,板条入射端面为矩形,为实现光瞳匹配,加入柱透镜扩束系统。键合的板条晶体Nd:YAG尺寸为150mm×10mm×2.5mm(长×宽×厚),端面45°切割,中间120mm为掺杂区,低掺杂浓度,两侧为非掺杂的YAG基质。整个晶体使用微通道冷却器对大面进行传导冷却。增益晶体被激光二极管阵列双端对称抽运。抽运源采用自行封装的激光二极管阵列,具有良好的封装精度与平行度。由柱透镜组构成的光束整形系统可实现抽运光在晶体中较为均匀的分布。半导体激光器(LD)的抽运电流超过阈值后,其发射功率与电流呈良好的线性关系。

用图中波前较平坦的区域。

图2表示抽运电流为90A时,由哈特曼波前测试系统测得的He-Ne标准光源通过板条后发生的波前畸变,其最大、最小幅值分别为0.37μm和-0.64μm。图中显示波前中心区域平坦,抽运吸收在此区域内分布均匀,热畸变小,有利于获得高光束质量的激光输出。图中边缘部分出现陡变,波前畸变大,利用此区域进行放大时,放大光束的相位中会出现高阶像差,恶化光束质量。为保证高质量的激光输出,扩束系统仅将种子光扩大至6mm,即使

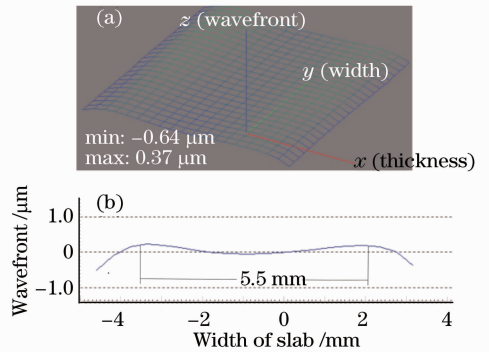


图2 未提取能量下的透射波前畸变

Fig.2 Wavefront under the un-extraction energy situation

1通放大后的激光在自由空间传输,由于衍射效应,激光光斑会展宽。当再次进入板条进行2通放大时,板条入口相当于光阑切光,会形成功率损耗。由于加工、装夹、焊接等工艺限制,板条内部应力分布不均,导致激光波前畸变。抽运不均产生的热畸变,也会使激光波前发生畸变,这些畸变可认为是激光相位因子中的高阶像差。当这种光束在自由空间传输时,光强分布会随着传输距离变化而变化,从而导致光斑强度分布不同于板条出口处的均匀强度分布。这种不均匀的光斑不能在板条中形成均匀的能量提取,从而降低放大功率及光束质量。为避免上述情况的出现,在每通放大之间采用4f像传递系统,减小激光在自由空间传输的距离,确保激光

在板条中均匀放大。

实验中,由于隔离系统的损耗,实际注入到板条放大器中的种子功率为 3 W,远小于 Nd:YAG 介质的饱和提取通量。单次通过板条的增益远大于损耗,因此增加激光在晶体中的光程,有利于放大功率的提升。但是由于采用了 4*f* 像传递系统,激光每通过一次板条,波前畸变就增加一次,并不利于光束质量的保持。另外,在一个板条上增加放大次数,光路的空间布局会更加复杂。当板条晶体中的光通量增加到一定程度时,考虑到增益与损耗的平衡关系,放大通次并非越多越好,因此综合参考以上因素,选择 3 次通过作为本实验的放大光路。

3 板条放大器调试

激光从晶体端面入射,在板条中沿 zig-zag 光路传播,如图 3 所示。

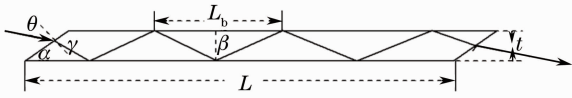


图 3 板条中 zig-zag 光路

Fig. 3 Zig-zag optical path in slab amplifier

在板条大面上入射角需满足全反射条件以减小大面漏光损耗。种子光需要在板条中以整数个 zig-zag 周期传播,以防止板条出射端面边缘切光,形成放大光斑分裂以及漏光损耗。根据折射、反射定律以及板条光路的特殊性,种子激光的入射角可计算如下

$$L = N \times L_b = N \times 2t \times \tan \beta, \quad (1)$$

$$\sin \gamma = \sin \theta / n, \quad (2)$$

$$\beta = \alpha + \gamma, \quad (3)$$

式中 L 为晶体长度 (mm), L_b 为 zig-zag 周期长度 (mm), t 为板条厚度 (mm), n 为 Nd:YAG 折射率, N 为 zig-zag 周期数, α 为板条端面切角, β 为大面上的反射角, γ 为晶体端面折射角, θ 为激光入射角。

根据计算结果,选取 42.1° 、 29.1° 、 23.6° 依次作为 3 通的入射角,其光程长度分别为 141.6、172.6、177.7 mm。

在光路调试过程中,透过板条的光斑形态以及在板条中的损耗可准确反映激光光路是否满足全反射条件以及整数条件。图 4 表示激光第 1、3 次通过板条后,距离板条 500mm 处的光斑形态。从图中可看出激光经过板条后,强度对称分布,无劈裂现象。

表 1 为激光每次通过板条后的损耗,平均每通损耗约为 4%。种子光第一次通过板条时,板条厚度略小于光斑宽度,在板条入口处形成较大的切光

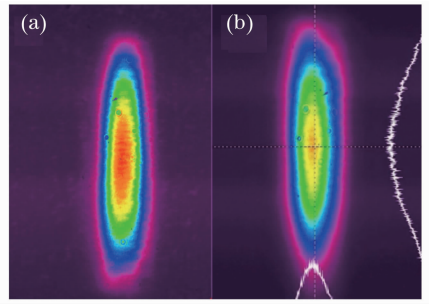


图 4 激光通过板条后的光斑分布。(a) 1 次通过板条后的光斑分布;(b) 3 次通过板条后的光斑分布

Fig. 4 Intensity profiles after passing the slab. (a) Profile after 1 pass; (b) profile after 3 passes

损耗。第二次通过板条,入射角小,板条对应入瞳大,切光损耗小,此时损耗主要来源于激光在板条中的散射及漏光损耗。第三次通过板条,入射角最小,逼近全反射极值条件,且光程最长,故损耗变大。

表 1 未加载电流时激光通过板条后的功率与损耗

Table 1 Power and loss after passing slab without pumping

	0 pass	1 pass	2 passes	3 passes
Power /W	3.1	2.95	2.86	2.7
Loss /%	0	4.8	3	5.7

调整完毕后,利用 M-200 型光束质量测试仪测得未抽运条件下,激光通过板条晶体后的光束质量因子 $M^2 < 1.3$,如图 5 所示。

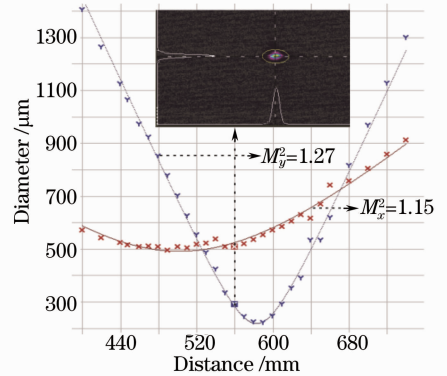


图 5 未抽运条件下 3 次通过后的光束质量

Fig. 5 Beam quality after 3 passes in the situation of un-pumping

4 板条放大器实验结果及讨论

图 6 是加载抽运电流时激光 1、2、3 次通过板条放大的功率变化曲线。当抽运电流为 90 A 时,3 通放大功率为 330 W,在 x 、 y 方向上的光束质量因子分别是 $M_x^2 = 1.23$, $M_y^2 = 1.73$,如图 7 所示。

根据损耗与增益的关系,激光放大功率可粗略

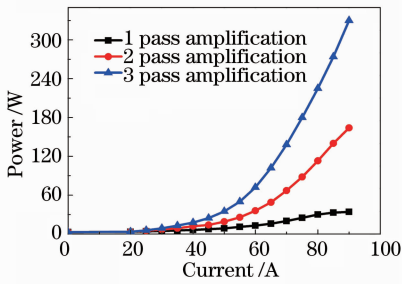


图 6 放大功率随电流变化

Fig. 6 Output power versus current

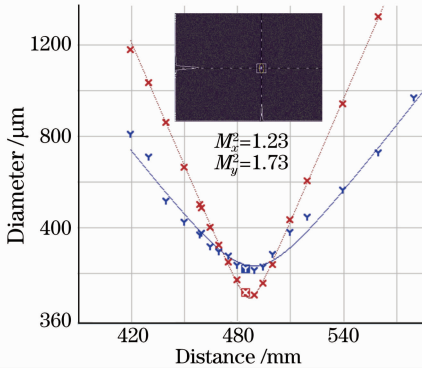


图 7 330 W 下的光束质量

Fig. 7 Beam quality with 330 W output power

表示为

$$I_{out} = I_{in}(1 - \alpha_c)\exp(gl). \quad (4)$$

由(4)式可推知增益系数为

$$g = \frac{1}{l} \ln \frac{I_{out}}{I_{in}(1 - \alpha_c)}, \quad (5)$$

式中 I_{out} 为放大功率(W), I_{in} 为入射功率(W), α_c 为损耗系数(mm^{-1}), g 为增益系数(mm^{-1}), l 为增益光程(mm)。

假定加载与非加载电流时的光路损耗不变,则通过(5)式可计算不同电流下的1、2、3通次的增益

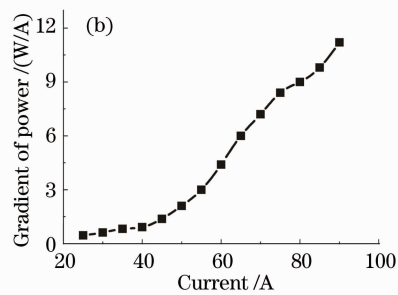
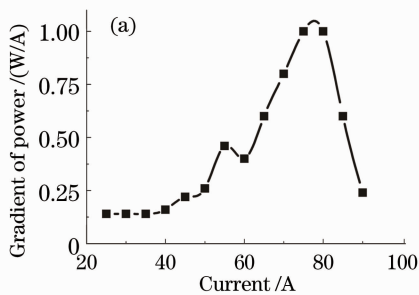


图 9 功率梯度随电流变化。(a) 1 通放大功率变化梯度; (b) 3 通放大功率变化梯度

Fig. 9 Power gradient varies with current. (a) Power gradient after 1 pass; (b) power gradient after 3 passes

5 结 论

通过采用低掺杂、键合的 Nd:YAG 板条介质,

系数,如图 8 所示。从图中可以看出,在相同电流下,1 通增益系数大于 2 和 3 通,且 3 种状态下的增益系数几乎呈线性增加。这种现象主要是由于注入种子功率较小,激光器工作在非饱和增益状态,随着抽运功率的线性增加,增益系数也相应地线性增加。另外,对于多通放大,虽然最初的注入功率都是 3 W,但是在进行第 2、3 通放大时,其注入功率远大于 3 W,所以 2、3 通平均增益变小。

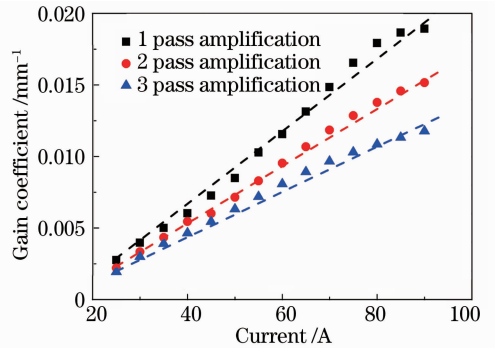


图 8 增益系数随电流的变化

Fig. 8 Gain coefficient versus current

图 9 表示不同抽运电流下,1、3 通放大功率梯度曲线。由于抽运电流与抽运功率呈线性关系,图 9 也表征了不同抽运功率下,放大功率的梯度曲线。从图中可知,仅 1 通放大时,抽运电流大于 80 A 后,功率增加变慢,而 3 通放大时,功率增加仍然较快。产生这种现象的原因主要是由于 1 通放大时注入种子功率较小,大量激活粒子不能被及时消耗。而这些未被消耗的激活粒子不断向下发生跃迁并得到放大,形成放大自发辐射(ASE)现象,影响了激光储能的提取和功率放大。3 通放大的情况下,由于平均注入功率较大,可以在一定程度上抑制 ASE 效应,因而放大功率持续增加。

有效减小了高功率抽运对端面形变和透射波前畸变的影响。通过分析板条透射波前畸变,获得满足高

光束质量激光输出的最佳使用范围,从而优化入射到板条中的种子激光光斑口径与发散角。同时平衡增益与损耗关系,优化整体放大结构,最终实现功率为 330 W,光束质量 $M_x^2=1.23$, $M_y^2=1.73$ 的激光输出,光-光转换效率约为 11%。根据放大输出功率计算了相应的增益系数,并简要分析了多通放大结构对 ASE 的抑制作用。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhimin, Xu Jianqiu, Chen Weibiao. Progress of high-power solid-state slab lasers [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 48-53.
王志敏, 徐剑秋, 陈卫标. 新一代大功率固体板条激光器的技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 48-53.
- 2 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan, *et al.*. Recent advances in high-power solid-state slab lasers [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 33-36.

- 张玲玲, 孟俊清, 黄燕, 等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 33-36.
- 3 Zhe Ma, Daijun Li, Peng Shi, *et al.*. Compact multipass Nd:YVO₄ slab laser amplifier based on a hybrid resonator[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(5): 1061-1065.
- 4 Northrop Grumman Corporation. Photorelease-Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser[OL]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575, 2003-7-12.
- 5 M Reed, K Kuhn, J Unternahrer, *et al.*. Static gas conduction cooled slab geometry Nd: glass laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1985, 21(5): 412-414.
- 6 R J Shine, Jr, A J Alfrey, *et al.*. 40-W CW TEM₀₀-mode, diode-laser-pumped Nd:YAG miniature-slab laser[J]. Opt Lett, 1995, 20(5): 459-561.
- 7 Hagop Injeyan, Carolyn S, Hoefer. End Pumped Zig-Zag Slab Laser Gain Medium[P]. US patent: 6094297, 2000-07-25.
- 8 Xing Fu, Qiang Liu, Xingpeng Yan, *et al.*. End-pumped Nd:YAG zigzag slab laser with weak pump absorption [J]. Chinese Opt Lett, 2009, 7(6): 492-494.

栏目编辑: 宋梅梅