采用导光管耦合的钕玻璃多程行波放大

赵天卓1 余 锦1* 黄 科1 麻云凤1 张 雪1

(¹中国科学院光电研究院,北京 100094 ²北京国科世纪激光技术有限公司,北京 100192)

摘要 介绍了一种采用导光管耦合的钕玻璃多程行波放大结构。在分析导光管结构参数与耦合效率关系的基础 上,设计了包含 8 个激光二极管阵列的抽运结构,并模拟了输出情况。该抽运结构将 168 个 bar 条发出的抽运光会 聚在 8 mm×8 mm 的范围内,获得 7.3 J 的能量输出。根据该抽运结构的输出特性,设计了以钕玻璃作为工作物质 的旋转多程行波端面抽运放大结构,并在信号光注入能量为300 J 时实现了能量为15 mJ的放大输出。 关键词 激光光学;多程行波放大;钕玻璃;导光管耦合;激光二极管阵列;端面抽运 中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0402004

Multi-Pass Traveling-Wave Nd: Glass Amplification with a Duct for Coupling

> Zhao Tianzhuo¹ Yu Jin¹ Huang Ke¹ Ma Yunfeng¹ Zhang Xue¹ Fan Zhongwei^{1,2}

¹ Opto-Electronics System Department, The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China ² Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

Abstract A multi-pass traveling-wave Nd: glass amplifier with a duct for coupling is introduced. Based on the analysis results of the relations between structural parameters and coupling efficiency of dust, a pumping structure contains 8 laser diode arrays is designed, and it's output status is simulated. The pumping structure converges pumping energy generated from 168 bars on the area of 8 mm \times 8 mm, and about 7.3 J output energy is obtained. According to the output characters of the pumping structure, a rotated multi-pass traveling-wave amplification structure is designed, which based on the working material of Nd: glass, and 15 mJ output energy is obtained with a 300 µJ injected signal laser.

Key words laser optics; multi-pass traveling-wave amplification; Nd:glass; duct coupling; laser diode arrays; end-pumping OCIS codes 120.1880; 140.3580; 140.3538

弓[言 1

在进行光束尺寸较大(比如光束截面 10 mm× 10 mm)的激光端面抽运放大时,为了保证能量密 度,通常会需要激光二极管堆栈(LDS)的发光面积 大大超过工作物质的截面积,因此对抽运光的缩束 和整形变得十分重要[1]。而导光管作为一种较好的 耦合器件,具有以下几个优点:传输效率可以达到 90%左右;出射光的光斑面积可以有效缩小;避免了 光的会聚可能导致的热损伤;结构简单,成本较 低[2]。目前针对导光管的分析主要都是基于简单的 光源模型,比如 Eichhorn 等^[3~5]的研究成果主要集 中在导光管自身光学特性的研究上,并忽略了光源 输出特性的影响。而对于相同的导光管,不同的光 源模型显然具有不同的输出结果。本文将导光管的

基金项目:国家自然科学基金(61205136)、中国科学院科研装备研制项目(YZ201216)和中国科学院光电研究院创新项 目(Y30B16A13Y)资助课题。

作者简介:赵天卓(1980—),男,博士,副研究员,主要从事激光放大方面的研究。E-mail: zhaotianzhuo@aoe.ac. cn * 通信联系人。E-mail: jinyu@aoe.ac. cn

收稿日期: 2012-10-23; 收到修改稿日期: 2012-12-10

侧壁等效展开分析方法与 LDS 中 bar 条发光特性 相结合,理论分析了针对 LDS 进行匀光缩束时导光 管效率的计算方法;然后依照该理论设计了抽运方 案,并建立了光学追迹分析模型,得到了导光管模拟 效率和抽运光输出特性;最后依照模型加工了导光 管和 LDS,实验测试得到了输出抽运光的特性。在 此抽运结构的基础上,研究了以钕玻璃为工作物质 的12 程旋转行波放大结构,来进一步匀化导光管耦 合的抽运光分布,在信号光注入能量为 300 μJ 时, 实现了能量为 15 mJ 的放大输出。

2 导光管耦合效率的近似模型

在考察二维的导光管时,其主要结构参数有:导 光管的长度 L;导光管的入光口宽度 A;导光管的出 光口宽度 a。此外导光管侧壁与轴线夹角为

$$\beta = \arctan \frac{A-a}{2L}.$$
 (1)

对于 bar 条上的任意一个发光点,考察其在某 个平面内的光强分布,可以定义为

$$I(\theta) = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^2\right], \qquad (2)$$

式中 θ 为特定的光束角度方向, α 为激光二极管 (LD)在截面内的光束发散角。如果只考虑导光管 的一个平面 MNQP 内的光线,可以相对于导光管 的一个侧壁 PQ 作出另一个侧壁的投影 P'Q',如此 反复直至形成一个近似的圆周,如图1所示。这样 使得在导光管平面内传播的光线 OB1-B2-B 等价 于图中的射线 O-B₁-B₂'-B'。由反射定律可知,对于 从导光管出口射出的光线,需要经过导光管的出口 NQ 或者某个相邻的等效出口,并目光线穿越侧壁 线族的次数就是光线在导光管内部反射的次数。如 果光线 OB_1 - B_2 -B 的等价射线 OB_1 - B'_2 -B' 不能经 过某个出口,而是从外侧射出,则表示光线在导光管 中经过多次反射后从导光管的入口回射出去,例如 图中的射线 OA。在截面内与内圆相切和相割的光 线可以经过多次反射从出口射出,而相离的光线则 会从导光管入口反射出去,即 OC、OD 为能够反射 的临界光线。



图 1 二维平面导光管的侧壁等效展开图

Fig. 1 Equivalent unfoldment of planar duct side walls

图 1 中内圆与外圆的半径分别为

$$r = \frac{a}{2\tan\beta} = \frac{aL}{A-a},\tag{3}$$

$$R = \frac{A}{2\tan\beta} = \frac{AL}{A-a} = r + L. \tag{4}$$

在设计导光管时,通过(3)、(4)式计算r和R,进而

确定导光管出口镜面反射的理想球半径。然后结合 导光管的长度,分析进入耦合导光管的光线在半径 为r的球面上的覆盖范围,并可以由此反推得到导 光管入口处 LDS 的高效率区域。如果 LDS 的发光 点均处于该高效率区域内,导光管的理论光传输效 率就会很高。假设发光点 O 到导光管入口 MP 的 距离为 l,LDS 高度为 H,O 点到轴线的距离为 h。 各物理量之间的几何关系如图 2所示,可以得到

$$\frac{r}{h} = \frac{L + r + l + x'}{\sqrt{x'^2 + h^2}}.$$
 (5)



图 2 LDS 不同发光点的光传输效率计算模型

Fig. 2 Computational model of optical transmisson efficiency of different points on LDS

在图 2 中,按A、B、C三个位置可将全部光线划 分成三类,其中 γ 和 γ' 分别表示发光点与出口圆的 两个切线角, γ 数值为

$$\gamma = \arctan \frac{h}{x'},\tag{6}$$

第一类以 A 点为代表,表示 LDS 发出的光全 部被出口圆所接收,其范围为 $\gamma > \frac{\alpha}{2}$,理论光传输效 率 $\eta = 1$ 。

第二类以 B 点为代表,表示 LDS 发出的光部分 被遮挡,其范围为 $-\frac{\alpha}{2} < \gamma < \frac{\alpha}{2}$,在这部分中每个点 的理论光传输效率为

$$\eta = \frac{\int\limits_{-\frac{\alpha}{2}}^{\gamma} I_0 \exp\left[-2\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^2\right] \mathrm{d}\theta}{\int\limits_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} I_0 \exp\left[-2\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^2\right] \mathrm{d}\theta},$$
(7)

所对应的发光点位置范围为

$$\frac{r}{\cos\frac{\alpha}{2}} - (l+L+r)\tan\frac{\alpha}{2} < h < \frac{r}{\cos\frac{\alpha}{2}} + (l+L+r)\tan\frac{\alpha}{2}.$$
(8)

在实际计算中,需要根据(8)式计算 LDS 发光面上 的有效发光范围,然后考虑从哪个发光点开始效率 不为1,再根据每个 bar 条的间距上可以排布的发 光点数量,分别计算各个发光点的光传输效率并对 其求和。

第三类以 C 点为代表,表示 LDS 发生的光完全 被遮挡,其范围为 $\gamma < -\frac{\alpha}{2}$,理论效率为 $\eta = 0$ 。此 外,如果忽略阵列的线间距带来的影响,假设理论效 率达到 100%,则导光管入口宽度 A 应与 LDS 高度 H 相等,即

$$H \leqslant \frac{r}{\cos\frac{\alpha}{2}} - (l+L+r)\tan\frac{\alpha}{2},\qquad(9)$$

此时导光管的长度满足

$$L \ge \frac{(A-a)\left(\frac{A}{2}\cos\frac{\alpha}{2} + l\sin\frac{\alpha}{2}\right)}{a - A\sin\frac{\alpha}{2}}.$$
 (10)

对于常用的 LD 可以按照(10)式在水平和垂直 方向上进行长度计算,得到相应的长度取值范围。 此外对于常用的 LD,由于慢轴发散角和经过准直 的快轴发散角的半角的正弦数值较小,而且在实际 应用中 l 的数值也不会很大,因此 $lsin \frac{\alpha}{2}$ 项可以 忽略。

3 抽运结构的光学追迹分析及实验

在实验和模拟过程中,采用的激光二极管阵列的 结构参数:单个 bar 条输出功率为 150 W,工作脉冲宽 度为 350 µs,单线含有 75 个发光点,发光区长度为 10 mm, 宽 0.12 mm, 经讨准直后快轴发散角为 3°, 慢 轴发散角为9°,快轴在准直的同时将光束在距 LDS 发光面 250 mm 处压缩成 8 mm 宽的带状光束。单列 21 个 bar 条制成阵列后两行 LD 间距为 1.2 mm。单 个阵列模块发光区域为 25.2 mm×10 mm,8 个相同 的阵列模块按4行2列排布后由于存在间隙,总的发 光区域约为 115 mm×35 mm。制作的导光管结构参 数:入口尺寸为40 mm×120 mm,出口尺寸为8 mm× 8 mm,长 250 mm。所设计的光源和导光管结构,在 快轴方向上理论光传输效率为100%,慢轴方向上的 光传输效率可以通过导光管的入口和出口尺寸以及 出口处的光斑无反射能量分布计算得到,阵列的效率 损失应该主要在慢轴方向上。使用 Zemax 软件进行 追迹,模拟过程假定 LD 发出的光束符合二维高斯分 布。对于每个 LD 上的发光点,均采用上述的各项参 数,对于整个阵列共追迹了 2×10⁶ 条光线。分析时 认为每条光线具有相同的光功率,因而探测面上的 光强分布与光线数量呈现相同的分布特性。通过计 算光线的条数,可以得到等效光强分布,从而计算导 光管的效率和反射次数等参量。导光管及LDS的

抽运结构如图 3 所示。

经过模拟可以得到导光管出口和距出口 10 mm 外的光斑如图 4 所示。通过上述模拟可知,光经过导 光管整形后光斑尺寸缩小到 8 mm×8 mm,并且光传 输效率达到了 90%以上。图 4(a)表明,导光管出口处 的能量分布比较均匀,各点的能量密度一致;而图 4(b) 表明,在空气中传输 10 mm 后,经过导光管整形的光斑 发生了扩散,出现了光斑散开及水平垂直方向不一致 的问题。光束的扩散程度与抽运阵列发光面的尺寸与 导光管出口尺寸密切相关。









Fig. 4 Simulation results of output energy distribution after duct coupling

实验结果表明,当8个 LD 阵列同时工作时,耦 合前单脉冲激光的输出能量为8.6 J,经过导光管整 形会聚后为7.1 J,导光管耦合过程中的损耗主要是 受导光管侧壁反射以及导光管和阵列位置的精确性 不够等因素的影响所致。对于导光管侧壁反射损耗 主要是因为 bar 条发光角度较大使得光线在导光管 侧壁上的反射率降低,同时粘接时导光管存在接缝, 会吸收一定比例的抽运光,此外 bar 条发光朝向和 角度不一致也是影响反射率的因素之一。实测光传 输效率为 82.6%低于 90%的模拟效率。通过相纸 记录的距离导光管出口 0、2、4、6、8、10 mm 处的光 斑分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着远离 导光管的出口,光场逐渐扩散。光场只能在距出口 4 mm 以内保持较好的光斑形状。因此,从输出光 斑的特性来看,耦合结构并不能用于厚度过大的工 作物质。当然,如果考虑到抽运光进入钕玻璃后的 折射,钕玻璃内部的抽运光场分布会优于在空气中 的抽运光场分布。



图 5 不同距离处导光管的输出光场分布 Fig. 5 Output optical field distribution of the duct at different distances

4 行波放大结构设计

在多程放大系统中,有多种因素会导致放大光 在截面上能量分布不均匀,其中主要包括:1)抽运光 场在抽运区域内分布不均匀;2)从钕玻璃片中提取 能量时,每次的增益不同;3)多次提取过程中钕玻璃 内部的光斑轨迹不对称重叠。这些因素在结合了不 同情况下的抽运能量提取效率、增益饱和效应、热效 应等问题后,放大光输出特性难以提升^[6~8]。因此, 在多程放大结构中,将放大光斑进行空间旋转,让 8 mm×8 mm 光斑的每个角每次经过钕玻璃片的 不同位置,因而使得最终输出的光斑分布更均匀。 所设计的 12 程放大结构采用的思路是将信号光照 射在钕玻璃片上后,由镀在钕玻璃后表面的高反膜 将信号光反射到指定反射镜上,信号光经再次反射 后以不同于第一次入射时的角度再次照射在钕玻璃 上。在这个反射过程中,光斑发生了左右对调的旋 转。经过两次反射后,第二次经过钕玻璃片时光斑 发生了相对于钕玻璃片垂直中轴的旋转。所设计的 旋转多程放大结构和实验装置如图 6 所示。



图 6 旋转多程放大的(a)结构示意图和(b)实验装置图

Fig. 6 (a) Structure diagram and (b) experimental setup of rotate multi-pass amplification

12 程放大的光路结构如图 7 所示。扩束后的 1053 nm 信号光经过光阑变成 8 mm×8 mm 的方 光斑,能量约 300 μJ,按顺序依次经过偏振片、1/2 波片和法拉第旋光器后,照射在钕玻璃片上。信号 光经过多次反射后,按原路返回,再次经过法拉第旋 光器、1/2波片后被偏振片反射到能量计中。从种 子源出射的信号光是垂直于实验台面方向的线偏振 光,偏振片的透光方向也是垂直方向。在经过光轴 与垂直方向呈 22.5°的倾斜放置的 1/2 波片后,线偏 振光的方向旋转了 45°,进入法拉第旋光器。法拉 第旋光器将偏振光再旋转 45°进入 12 程行波结构, 然后再经过法拉第旋光器旋转 45°后,光的偏振方 向与垂直方向夹角为 45°,经过 1/2 波片后变为水平 方向,这时被偏振片反射到 E 处。测试结果表明, 12 程行波结构的插入损耗和退偏总和为 18.0%。





在测试过程中,远离法拉第旋光器的各点的平 均功率的均方根(RMS)值为 0.7%,但是法拉第旋 光器前的 $C \le RMS$ 值为 7%,法拉第旋光器后的 RMS 值超过了 10%。这主要由于法拉第旋光器附 近具有很强的磁场。因此 C 点的测量数值仅具有 参考价值。当脉冲每次入射时,可以测得 D 点能量 为 0.3 mJ。抽运系统启动后,在相同的注入信号光 参数下,测得 E 点输出能量为 12.1~14.4 mJ。如 果关闭注入信号,单次抽运时在 E 点没有明显的信 号光输出。但是在间隔 3~5 s 的连续触发几次后, 突然挡住信号光,测得 E 点输出能量的 0.63 mJ,这 时的能量输出主要是由 12 程行波放大结构和钕玻 璃退偏引起的自激造成的。钕玻璃片在在抽运过程 中会发生严重的热畸变现象,这种热致形变使得钕 玻璃片等效成一个透镜,对信号光产生了会聚作 用^[9]。相比较而言,如果采用双程或者4程的放大 结构,实验中所用的钕玻璃片只能够实现约 3.5 倍 的增益,而采用12程放大时能够实现50倍或更高 的增益。就光束质量而言,12程放大引入旋转对称 结构后,可以在一定程度上弥补抽运光空间分布不 均匀导致的光束质量下降。但由于钕玻璃材料的导 热性差,热畸变大,无论是采用水冷加窗口片的冷却 方法还是白宝石紧贴钕玻璃片的冷却方法,都不能 使得钕玻璃均匀散热,这正是高增益钕玻璃片状放 大难以解决的问题[10,11],也限制了钕玻璃片状放大 结构只能工作在低重复频率状态下。

了分析,并以此为依据进行了模拟和实验测试。在 此基础之上,针对空心导光管的输出特性,设计了 12 程钕玻璃旋转行波放大结构,在低重复频率抽运 条件下,当注入信号光能量为 300 μJ 时实现了 15 mJ的光放大输出。导光管输出抽运光在较长距 离内如何实现均匀分布,以及多程行波放大的热问 题是该技术方案下一步的研究重点。

参考文献

- 1 Satoshi Yamaguchi, Tetsuro Kobayashi, Yoshimasa Saito *et al.*. Efficient Nd: YAG laser end pumped by a high-power multi-stripe laser diode bar with multi-prism stack coupling [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **38**(9): 1430~1435
- 2 Raymond J. Beach. Theory and optimization of lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(12): 2005~2015
- 3 Marc Eichhorn. Theory and optimization of hollow ducts [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(11): 1740~1744
- 4 Gao Hongyun, Fu Rulian, Chen Desheng *et al.*. Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA [J]. J. Optoelectronics · Laser, 2005, 16(5): 419~423
- 部洪云,傅汝廉,陈德胜等.LDA 端抽运固体激光器的耦合系
 统-空心导管的设计[J].光电子・激光,2005,16(5):419~423
- 5 Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong et al.. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode array [J]. Chinese J. Lasers, 2004, 31(8): 939~942
- 贾 伟, 胡永明, 李明中 等. 空心透镜导管的模拟与设计 [J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 939~942
- 6 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(4): 327~332 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素 [J]. 中国 激光, 1997, **24**(4): 327~332
- 7 Qian Liejia, Zhang Zhuhong, Zhu Baoqiang *et al.*. Focusing characteristics and beam quality of phase aberrated beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(2): 166~169
 钱列加,张筑虹,朱宝强等. 位相畸变光束的聚焦特性与光束质量[J]. 光学学报, 1995, **15**(2): 166~169

5 结 论

对基于导光管耦合的高能量密度抽运结构进行

8 Deng Xuegong, Li Yongping, Qiu Yue. Quantatitive description

of beam quality in uniform illumination experiments [J]. Chinese J. Lasers, 1996, **23**(11): 1021~1026

- 邓学功,李永平,丘 悦. 均匀照明中光束质量的定量描述 [J]. 中国激光,1996,**23**(11):1021~1026
- 9 Wu Wuming, Guo Shaofeng, Xi Fengjie *et al.*. Analysis of selfadjusting compensation of thermal lens in rod-glasses heatcapacity laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 107~109 吴武明, 郭少锋, 习锋杰等. 棒状钕玻璃热容激光器热透镜自平 衡补偿方法分析 [J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 107~109
- 10 Zhang Wei, Zhu Jianqiang. Experimental investigation on

surface/subsurface damage of Nd-doped phosphate glass [J]. Acta Optica Sinica, 2008, **28**(2): 268~272

张 伟,朱健强.磷酸盐钕玻璃表面/亚表面损伤特性实验研究 [J]. 光学学报,2008,**28**(2):268~272

11 Zhang Ying, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua et al.. Spectral shaping in high-power Nd: glass chirped pulse amplification system [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1767~1771 张 颖,魏晓峰,朱启华等.高功率钕玻璃啁啾脉冲放大系统光 谱整形 [J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1767~1771

栏目编辑:张 腾