

激光二极管端面抽运 Nd:YAG 表层增益板条激光器

刘 洋 唐晓军 王 喆 吴昌洁 赵 鸿 周寿桓

华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 结合板条激光器和薄片激光器的特点设计了一种表层增益板条激光器结构。采用基于慢轴像中继的抽运耦合系统实现抽运光在板条宽度方向的均匀分布。利用表层增益板条激光器实现了稳定的准连续激光输出,在抽运频率 300 Hz、抽运脉宽 200 μ s,抽运单脉冲能量 354 mJ 条件下,实现了单脉冲能量 121.3 mJ 的 1064 nm 激光输出,对应的光光转换效率和斜率效率分别为 34.3%和 45%。

关键词 激光器; 表层增益板条; Nd:YAG; 像中继抽运; 增益

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1001004

Laser Diode End Pumped Nd:YAG Surface Gain Slab Lasers

Liu Yang Tang Xiaojun Wang Zhe Wu Changjie Zhao Hong Zhou Shouhuan

Science and Technology on Solid-State Lasers Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract We designed a novel surface gain slab laser combining the characteristics of slab lasers and disk lasers. A pumping system based on image relaying along the slow axis was used to obtain the uniform distribution of pumping light in the slab width direction. We achieved stable quasi-continuous laser output with the surface gain slab laser. The maximum output energy of 1064 nm laser pulse is 121.3 mJ when the pumping repetition rate is 300 Hz, the pulse width is 200 μ s, and the pumping energy of a single pulse is 354 mJ. The corresponding optical-to-optical efficiency and the slope efficiency are 34.3% and 45%, respectively.

Key words lasers; surface gain slab; Nd:YAG; image relaying pumping; gain

OCIS codes 140.3460; 140.3410; 140.3480; 140.3580

1 引 言

激光二极管(LD)抽运全固态激光器具有结构紧凑、可靠性高等特点,广泛应用于工业、国防及医疗等多个领域。对于传统的 LD 抽运棒状激光器,热效应等问题严重制约了输出激光的功率和光束质量。高功率、高光束质量的全固态激光器研究一直受到多国科研工作者的关注。

为有效解决固体激光器中的热效应问题,科研人员开展了大量的研究^[1-2],并提出了切实可行的措施。改变增益介质的几何形状可有效解决激光器的热效应问题,比较有代表性的是板条激光器和薄片激光器。板条激光器中激光在板条内部以之字形传播,有效补偿板条增益介质内部的热畸变,有利于实现高光束质量的激光输出。2000 年,Injeyan 等^[3]提出了传导冷却端面抽运板条激光器结构(CCEPS),这种板条结构采用端面键合方式以减小板条端头的热效应和形变,从而实现高光束质量的激光输出。美国诺格公司利用该结构的单板条实现了大于 4 kW 的激光输出,4 个板条组成主振荡功率放大(MOPA)结构,实现了单链 15 kW 近衍射极限的激光输出^[4]。1994 年,Giesen 等^[5]提出了薄片激光器的概念,薄片激光器中增益介质很薄

收稿日期: 2016-05-10; **收到修改稿日期:** 2016-06-01

作者简介: 刘 洋(1985—),男,博士研究生,工程师,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: hench0594@163.com

导师简介: 周寿桓(1937—),男,中国工程院院士,主要从事固体激光技术和非线性光学等方面的研究。

E-mail: zfhuan@aliyun.com

(100~200 μm), 直接通过焊接和高效散热冷却器接触进行有效散热, 由于薄片激光器中热流方向和激光传输方向基本相同, 可以有效避免增益介质内部温度梯度对激光波面的影响。2009年, Mende等^[6]实现了单薄片 5.3 kW、四薄片串接 20 kW 的激光输出。2014年, Schad等^[7]利用薄片结构实现了 4 kW 近基模的高光束质量激光输出。

结合薄片与板条激光器各自的特点, 提出了表层增益板条结构(或三明治板条)的概念^[8]。板条(厚度为 2 mm 左右)上下两面键合厚度为百微米量级的 Nd:YAG 或 Yb:YAG 掺杂层, 抽运光通过耦合系统从板条斜面耦合进入板条, 并与主激光一样在板条内部以之字形光路传输, 在板条端面附近通过两个双色镜实现主激光与抽运光的分离。该结构可以作为激光谐振腔或放大器使用。表层增益板条激光器结合了板条激光器和薄片激光器的优点: 1) 激光在板条内部以之字型光路传输, 可以有效补偿板条内部的热效应, 有利于实现高光束质量激光输出; 2) 抽运光在板条内部同样以之字型光路传输, 在上下两个掺杂层得到充分吸收; 3) 与薄片激光器相似, 板条增益薄层直接与热沉接触, 散热能力强, 有助于高抽运功率的注入和实现高功率激光输出。

本文介绍了一种多面键合的表层增益板条激光器及其特点, 设计了基于慢轴像中继的抽运耦合系统实现抽运光在板条宽度方向的均匀分布, 利用表层增益 Nd:YAG 板条构成谐振腔, 在抽运频率 300 Hz、脉宽 200 μs 、单脉冲能量 354 mJ 条件下, 实现了 121.3 mJ 的 1064 nm 激光输出, 对应的光光转换效率和斜率效率分别为 34.3% 和 45%。

2 像中继抽运耦合系统设计

由于板条激光器之字型光路的特点, 激光在板条厚度方向的热效应能够得到有效的补偿, 所以影响板条增益模块光束质量的主要因素是板条宽度方向的光学质量, 主要包括板条宽度方向的抽运均匀性、散热均匀性、板条在静态和动态过程中的残余应力和热应力等。常见的抽运匀化方式为平板波导匀化, 但是为了实现较好的匀化效果, 波导一般较长, 且平板波导会使整个系统的耦合效率下降。针对激光二极管面阵的特点, 利用像中继的抽运耦合方式实现抽运光在板条宽度方向的均匀分布。

一般的商用激光二极管面阵由数个巴条组成, 每个巴条由多个激光二极管组成, 微透镜对快轴方向进行准直, 发散角控制在 $0.2^\circ \sim 0.3^\circ$, 慢轴方向的分散角为 $8^\circ \sim 10^\circ$ 。由于慢轴方向的空间填充比较大, 激光二极管巴条传输数毫米后在慢轴方向即可实现均匀的光强分布。以实验中使用的激光二极管面阵为例, 每个巴条由 63 个激光二极管构成, 利用 Zemax 非序列光线追迹软件模拟单巴条在发光面及距离发光面 3 mm 处的光强分布, 如图 1 所示。

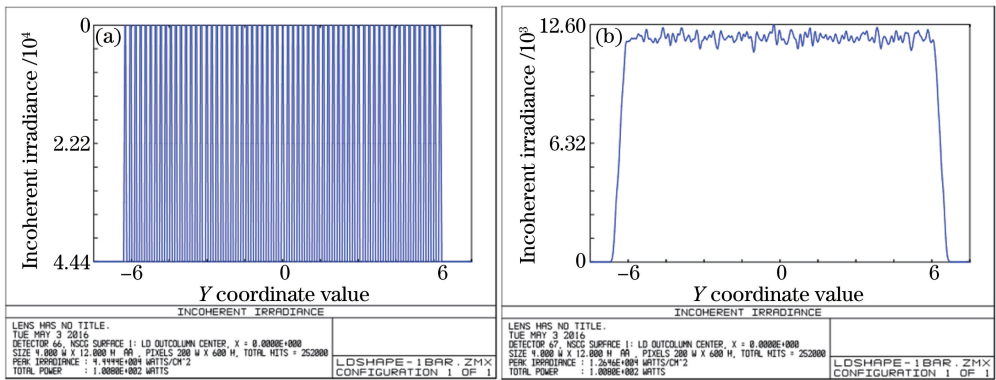


图 1 激光二极管巴条慢轴方向光强分布。(a)发光面处;(b)距离发光面 3 mm 处

Fig. 1 Intensity distribution of a laser diode bar along the slow axis. (a) At the emitting surface; (b) at the position 3 mm away from the emitting surface

从模拟结果可以看出, 由 63 个激光二极管组成的巴条自由传输 3 mm 左右即可在慢轴方向实现比较均匀的光强分布。结合实验中使用的表层增益板条的尺寸(长 67 mm, 宽 11 mm, 厚 1.7 mm), 将距发光面 3 mm 处的光斑成像到板条端面上即可实现板条在宽度方向抽运光的均匀分布, 而快轴方向由于微透镜的准

直发散角较小,可以用1片柱透镜直接聚焦到板条端面处。

结合上述模拟结果,设计了基于慢轴像中继的抽运耦合系统,耦合系统由5片柱透镜组成,快轴方向使用1片柱透镜直接聚焦,慢轴方向用4片柱透镜将距激光二极管发光面3 mm处的像传递整形到板条端面。激光二极管面阵是由15个巴条组成的垂直叠阵,系统在二维方向的示意图如图2所示。利用Zemax软件模拟计算得到板条端面抽运光光强分布及二维方向的光强分布曲线如图3所示。从模拟结果可以看出,抽运光在板条的宽度方向近似平顶分布,有利于控制板条宽度方向的光束质量。

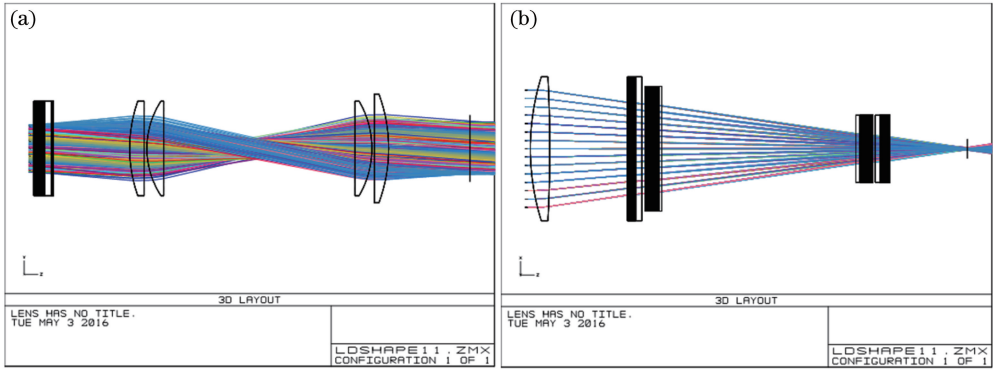


图2 慢轴像中继系统二维方向示意图。(a)慢轴方向;(b)快轴方向

Fig. 2 Schematic of the slow-axis image relaying system in two dimensions. (a) In slow axis direction; (b) in fast axis direction

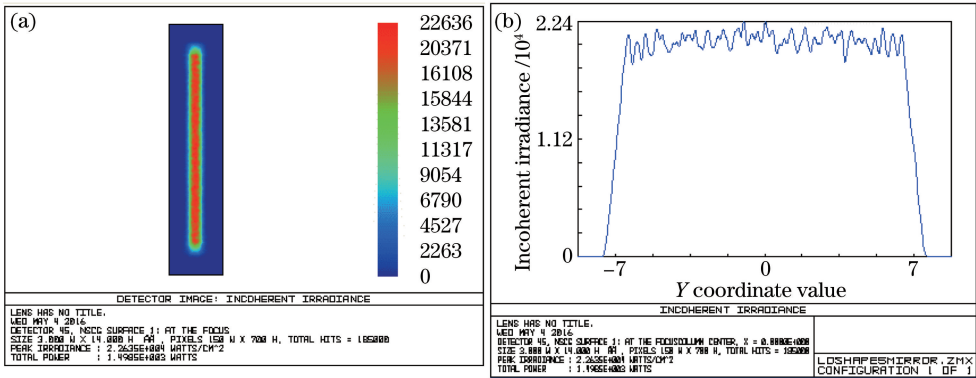


图3 板条端面抽运光强度分布模拟结果。(a)强度分布图;(b)板条宽度方向强度分布曲线

Fig. 3 Simulated pumping intensity distribution at the end of slab. (a) Intensity distribution; (b) intensity distribution curve in the direction of slab width

3 表层增益板条增益计算

对于激光二极管抽运的Nd:YAG固体激光器^[9],饱和光强 I_s 定义为小信号增益系数 g_0 减小到一半时的参量,其表达式为

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_{21}\tau_f}, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常量, ν 为振荡光频率, σ_{21} 为受激发射截面面积, τ_f 为荧光寿命。代入相关参数,计算得到808 nm抽运的Nd:YAG激光器饱和光强 $I_s = 2.89 \text{ kW/cm}^2$ 。

利用吸收的抽运功率表示小信号增益系数,

$$g_0 = \frac{\eta_Q \eta_S \eta_B P_{ab}}{I_s V}, \quad (2)$$

式中 η_B 为模式匹配效率, η_Q 为量子效率, η_S 为斯托克斯效率, P_{ab} 为吸收的抽运功率, V 为抽运体积。实验中抽运激光二极管阵列的峰值功率为1800 W,将Nd:YAG表层增益板条结构的相关参数代入,计算得到小信号增益系数 $g_0 = 1.3558 \text{ cm}^{-1}$ 。

对于稳定的四能级激光谐振腔,其激光输出功率可表示为

$$P_{\text{out}} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{L - \ln R} - 1 \right), \quad (3)$$

式中 A 和 l 为板条增益介质的截面面积和增益长度, R 为输出镜的反射率, L 为板条晶体的往返损耗。计算不同输出镜反射率对应的输出功率,图 4 为不同输出镜反射率对应的归一化输出功率曲线,从图中可以看出输出镜反射率约为 0.7 时谐振腔输出功率最高。

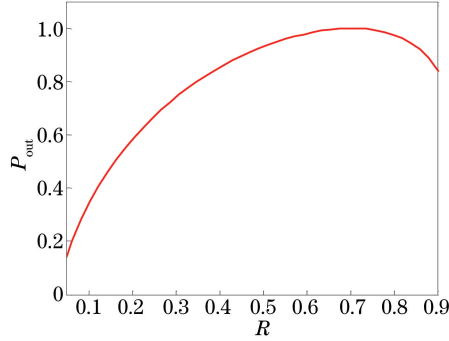


图 4 不同输出镜反射率对应的归一化输出功率

Fig. 4 Normalized output power corresponding to the reflectivity of output mirror

4 实验装置与结果

激光二极管端面抽运 Nd:YAG 表层增益板条激光器的谐振腔如图 5 所示,实验中采用的抽运源为苏州长光华芯生产的 15 巴条准连续激光二极管面阵,通过恒温水冷系统对激光二极管面阵和热沉进行温度控制。激光二极管面阵带有微透镜阵列,可对每个巴条的快轴方向进行准直。利用上述慢轴像中继抽运耦合系统,在板条的入射端面上获得一条沿慢轴方向近似均匀分布、尺寸约为 11 mm×2 mm 的抽运线。

Nd:YAG 板条采用多面键合的表层增益介质,其尺寸为 67 mm×11 mm×1.7 mm,板条端面的切割角度为 45°,板条上下两面掺杂区的尺寸为 50 mm×11 mm×0.2 mm,Nd 掺杂浓度为 0.8%(原子数分数)。上下两个大面(67 mm×11 mm)为冷却面,通过铜焊连接到带有微通道的水冷热沉上。板条两个端面为通光面(11 mm×1.7 mm),加镀增透膜,对 808 nm 和 1064 nm 波长的 24°左右入射光增透。为保证抽运光和振荡激光在板条上下两个大面的全反射,两个大面(67 mm×11 mm)加镀 3 μm 厚 SiO₂ 膜,用于抑制倏逝波。

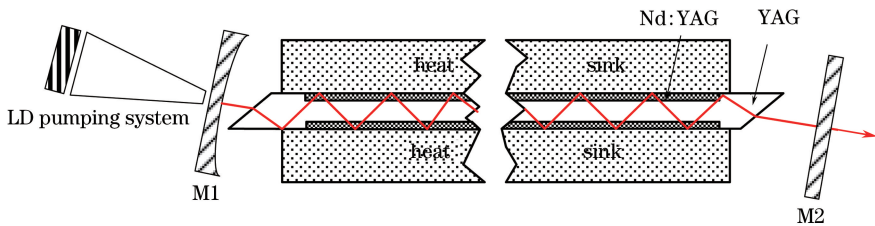


图 5 激光二极管阵列端面抽运表层增益板条激光谐振腔原理图

Fig. 5 Schematic of laser diode stack end pumped surface gain slab laser

激光谐振腔由全反射球面镜 M1 和输出平面镜 M2 构成,全反射球面镜的曲率 $r = 500$ mm,一面镀 808 nm 0°增透膜,另一面镀 808 nm 0°增透膜和 1064 nm 0°高反膜。

为了保证振荡激光在板条内部以整数倍光程传输,控制振荡激光在板条端面的入射角度为 24°,振荡激光在板条上下两个大面的反射角为 57.9°,大于全反射角,振荡激光在板条内的全反射次数为 24 次。抽运光同样以 24°角入射并在板条内部以之字形光路传输,抽运光在板条内部的有效吸收长度为 15 mm,实验中近 96.5%的抽运光被有效吸收,接近理论吸收值 97%。

实验中选用透过率 T 分别为 25%,30%,35%,40%的 4 种输出平面镜进行谐振腔实验,得到的输入输出能量曲线如图 6 所示。可以看出在相同抽运条件下,输出镜透过率为 30%时单脉冲输出能量最大,最佳

耦合率接近理论值。输出镜透过率为 30%，抽运电流为 120 A，抽运频率为 300 Hz，抽运脉宽为 200 μs 时，抽运单脉冲能量达到 354 mJ，获得了单脉冲能量为 121.3 mJ 的 1064 nm 稳定激光输出，对应的输出功率为 36.4 W，光光转换效率和斜率效率分别为 34.3% 和 45%。测量此条件下的输出激光波形(图 7)，在光电探测器前加上 1064 nm 的窄带滤波片以消除抽运光对测量的影响。从图 7 可以看出，抽运脉宽为 200 μs 时输出激光的脉冲宽度为 168 μs 。

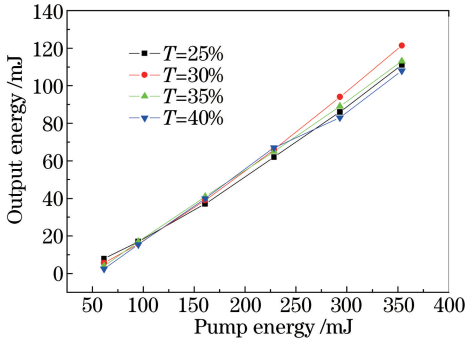


图 6 谐振腔输入-输出能量曲线

Fig. 6 Output energy versus input energy

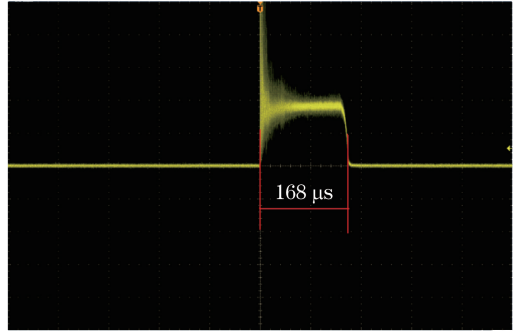


图 7 激光脉冲波形

Fig. 7 Waveform of the laser pulse

输出激光在近场为 11 mm×1.7 mm 的条状光斑，由于使用了紧凑的平凹稳定腔，输出激光存在多个模式，利用 Spiricon M^2 200 s 光束分析仪测量输出激光二维方向的光束质量，测量得到板条厚度方向和宽度方向的光束质量因子 M^2 分别为 2.5 和 33.5。

从图 6 可以看出，输出能量呈线性增长趋势，没有出现饱和现象，如果继续增加抽运电流，输出能量将进一步增加，而在实际应用中，如果继续增加抽运电流或抽运频率，输出功率会出现明显的饱和趋势甚至功率下降现象，且输出的激光光斑形态会发生剧烈的变化。初步分析其原因，表层增益板条的热载荷主要集中在与热沉直接接触的板条外表面，如果散热不均匀，会在板条局部形成较大的热梯度，从而影响输出激光性能。所以在表层增益结构的板条激光器中，高效、均匀的散热尤为重要。

5 结 论

介绍了一种表层增益板条激光器的结构及其特点。为提高抽运光在板条宽度方向的均匀性，设计了基于慢轴像中继的抽运耦合系统。利用表层增益板条增益模块构成稳定谐振腔，在抽运频率 300 Hz、抽运脉宽 200 μs 、抽运单脉冲能量 354 mJ 条件下，实现了 121.3 mJ 的 1064 nm 激光输出，对应的光光转换效率和斜率效率分别为 34.3% 和 45%。该种结构的表层增益板条激光器对于高效、均匀的冷却具有更加苛刻的要求。

表层增益板条激光器由于其极强的散热能力，具有实现单板条高功率激光输出的潜力，下一步可以围绕实现更高功率激光输出开展相关工作。此外，为了实现表层增益板条激光器高光束质量的激光输出，需要在高效均匀冷却、激光放大技术和非稳腔技术等方面开展相关的研究工作。

参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 7(36): 1605-1618.
周寿桓, 赵 鸿, 唐晓军. 高平均功率全固态激光器 [J]. 中国激光, 2009, 7(36): 1605-1618.
- Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝, 郭少峰. 高能固态激光器技术路线分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602006.
- Injeyan P, Hofer C S, Palese S P. End pumped zig-zag slab laser gain medium: US6268956B1 [P]. 2001-07-31.
- Redmod S, McNaught S, Zamel J, et al. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007: CtuHH5.
- Giesen A, Hugel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high power solid-state laser [J]. Applied Physics

- B, 1994, 58(5): 365-372.
- 6 Mende J, Spindler G, Speiser J, *et al.* Concept of neutral gain modules for power scaling of thin-disc lasers[J]. Applied Physics B, 2009, 97: 307-315.
- 7 Schad S S, Kuhn V, Gottwald T, *et al.* Near fundamental mode high-power thin-disk laser[C]. SPIE, 2014, 8959: 89590U.
- 8 Tang Xiaojun, Zhou Shouhuan, Du Tao, *et al.* Gain medium plate bar with sandwich structure and its making method: CN101242071A[P]. 2008-08-13.
唐晓军, 周寿桓, 杜涛, 等. 三明治结构增益介质板条及其制备方法: CN101242071A[P]. 2008-08-13.
- 9 Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 78-90.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 78-90.