

激光二极管双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器

张伟桥, 刘洋*, 陈念江, 王超, 唐晓军, 谢桂娟, 陈露

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 报道了一种激光二极管阵列双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器。基于抽运光在晶体中的吸收特性, 建立双端双程抽运与双端单程抽运结构的抽运分布模型, 理论分析了双端双程抽运的优点。在抽运光重复频率为 400 Hz、脉宽为 1 ms、单脉冲总能量为 12 J 的条件下, 利用偏振复用技术实现双端双程抽运板条激光器, 获得单脉冲激光的输出能量约为 6.13 J, 光-光转化效率约为 50%。与具有相同掺杂浓度以及相同抽运光吸收效率的双端单程抽运方式相比, 双端双程抽运的输出激光能量更高, 转化效率更高, 稳定性更强。理论分析与实验结果证明双端双程抽运方式有利于进一步提升激光输出的能量与效率。

关键词 激光器; 激光二极管; 双程抽运; Yb:YAG

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101007

Laser Diode Double-Pass Double-End Pumped Yb:YAG Slab Laser

Zhang Weiqiao, Liu Yang*, Chen Nianjiang, Wang Chao, Tang Xiaojun,
Xie Guijuan, Chen Lu

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

Abstract This study reports a laser diode array (LDA) double-pass double-end pumped Yb:YAG slab laser. Pump distribution models of double- and single-pass double-end pump structures are created based on the absorption characteristics of the pump in the medium. The advantages of a double-pass double-end pump are theoretically analyzed. Under the pump frequency of 400 Hz, pulse width of 1 ms, and single pump energy of 12 J, the polarization multiplexing technology is used to realize the double-pass and double-end pump slab laser. The output laser energy is about 6.13 J with an optical-optical conversion of 50%. In comparison with a single-pass double-end pump mode with the same doping concentration and absorption efficiency of the pump light, the double-pass double-end structure demonstrates the advantages of higher laser energy, higher optical conversion efficiency, and greater stability. The theoretical analysis and experimental results prove that the utilization of the double-pass double-end pump can further improve laser output energy and efficiency.

Key words lasers; laser diode; double-pass pump; Yb:YAG

OCIS codes 140.2010; 140.3460; 140.5560; 140.3615

1 引 言

激光二极管阵列(LDA)抽运固体激光器和放大器具有稳定性好、效率高等优点,被广泛应用于军事、工业加工和生物医疗等工业和科学技术领域^[1-2]。随着激光二极管技术的发展,Yb:YAG以其能级结构简单、量子亏损小等优点,成为近年来备受研究人员关注的新型激光器材料之一^[3]。室温下

Yb:YAG的热能为 200 cm^{-1} ,受热后终端能级的粒子数会增加,形成准三能级的激光运行机制,这意味着室温下Yb:YAG固体激光器需要较高的抽运阈值。目前,通常采用直接对激光晶体注入高功率密度抽运光的方法来降低室温下Yb:YAG的抽运阈值。而对于泵入高功率密度抽运光的情况,为了保证激光晶体对抽运光的吸收效率,通常对激光晶体进行高浓度的Yb³⁺离子掺杂。在端面抽运的Yb:YAG

收稿日期: 2019-06-04; 修回日期: 2019-06-27; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 总装备部光电子预言项目、固体激光技术国防科技重点实验室基金(614240401010117)

* E-mail: 954757979@qq.com

固体激光器中,高功率密度的抽运光与高浓度 Yb^{3+} 掺杂会使激光晶体端头与中间位置形成巨大的抽运光强差,抽运光强沿晶体吸收方向分布不均匀,导致晶体中间激光提取效率低、端头热效应严重以及晶体断裂等问题,限制了激光功率的输出极限。为了减少抽运光分布不均匀引起的激光输出问题,科研人员采用不同浓度多段掺杂晶体或者低浓度掺杂多程抽运晶体两种方式。2016年,李密等^[4]设计了双掺杂浓度板条激光放大器,实现了功率为5.16 kW的激光输出,光-光转化效率为34.4%。之后,Li等^[5]通过理论分析,发现 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 多段掺杂板条脉冲放大器的储能效果比单掺杂时提升了9%。2007年,Bartnicki等^[6]设计了一种单端低浓度掺杂多程抽运 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器,实现抽运光在晶体吸收长度方向的匀化效果。然而,不同浓度多段掺杂晶体虽然能够在极大程度上改善端面抽运结构中的抽运光分布均匀性,但是其键合面多,加工工艺复杂。目前多程抽运结构多存在于单端抽运方式中,在双端抽运结构中报道较少。

本文基于低浓度掺杂,多程抽运匀化抽运光分布的方法,利用偏振复用技术,设计一种激光二极管双端双程抽运 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 板条激光器。理论计算证明了该结构具有匀化抽运分布,提升激光输出效率等优点。通过实验验证了双端双程抽运结构具有提升激光输出能量和光-光转化效率的优势。

2 双端双程抽运模型理论计算

根据双端单程抽运固体激光器的模型特性可知,抽运光沿着激光振荡方向被吸收,呈指数式衰减规律^[7],可表达为

$$I_p(z) = I_{p0} \exp(-\alpha \cdot z) + I_{p0} \exp[-\alpha \cdot (L - z)], \quad (1)$$

式中: I_{p0} 为注入的单端抽运光强; α 为晶体的吸收系数; L 为激光晶体的增益区总长度。

双端双程抽运结构的抽运光分布表达式为

$$\begin{aligned} I_p(z) = & I_{p0} \exp(-\alpha \cdot z) + \\ & I_{p0} \exp[-\alpha \cdot (L - z)] + \\ & I_{p0} \exp[-\alpha \cdot L - \alpha \cdot (L - z)] + \\ & I_{p0} \exp(-\alpha \cdot L - \alpha \cdot z). \end{aligned} \quad (2)$$

该理论分析中,假设单端注入的抽运光强为 30 kW/cm^2 ,增益区总长度为 102 mm ,单程、双程两种模型的抽运光吸收效率均为 95% 。对于双端单程结构,当抽运光吸收效率为 95% 时,晶体的吸收系数为 0.29 cm^{-1} ,晶体掺杂浓度(原子数分数,

下同)为 0.35% ;对于双端双程结构,当抽运光吸收效率为 95% 时,晶体的吸收系数为 0.15 cm^{-1} ,掺杂浓度为 0.19% 。根据这些参数,通过(1)式、(2)式可以得到当抽运的总吸收效率为 95% 时,双端单程抽运与双端双程抽运的抽运光在吸收长度方向的分布情况。从图1(a)所示的抽运强度分布曲线可以看出,双程抽运的端头与中间位置的抽运强度差 ΔI_p 为 9.72 kW/cm^2 ,小于单程抽运的 16.25 kW/cm^2 ,双程抽运的分布曲线相对于单程抽运较为均匀,而均匀的抽运光强分布能够减小晶体内的温度梯度^[8]。对于相同掺杂浓度的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体,单程抽运与双程抽运的抽运光光强沿吸收长度方向分布的情况如图1(b)所示。在相同的掺杂浓度下,双程抽运的抽运光强度大于单程抽运光强度。根据 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的激光动力学模型, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的局域提取效率(η_{ext})可表示为^[9]

$$\eta_{\text{ext}} = \left(1 - \frac{f_3^p}{f_1^p f_1^l - f_3^p f_2^l} \frac{I_{\text{sp}}}{I_p}\right) \left/ \left(1 + \frac{f_1^p}{f_1^p f_1^l - f_3^p f_2^l} \frac{I_{\text{sl}}}{I_l}\right)\right., \quad (3)$$

式中: f_i^l 和 f_i^p 分别为 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的上、下能级粒子在各斯塔克子能级的玻尔兹曼系数; I_p 为抽运光强度; I_l 为振荡激光光强; I_{sp} 为抽运饱和光强; I_{sl} 为激光饱和光强。从(3)式可以看出,激光的局域提取效率与抽运光强度成正比,双程抽运技术能够实现更高效率的激光输出。

3 实验装置

实验装置如图2所示,采用两端键合有纯 YAG 晶体的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 复合板条状激光晶体作为增益介质,介质的尺寸为 $120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,掺杂有 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的增益区尺寸为 $102 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。板条介质的两端切角为 45° ,镀有 1030 nm 的增透膜(AR)和 940 nm 的高反射膜(HR)。为了抑制放大自发辐射(ASE)与寄生振荡效应,对介质的两个侧面进行磨毛处理。对两个大面进行微通道水冷,以减少热负载。抽运源采用抽运波长为 940 nm 、TE模式偏振的激光二极管阵列。抽运光经过两个慢轴柱透镜 L_{x1} 、 L_{x2} (焦距 $f_{x1} = 50 \text{ mm}$, $f_{x2} = 50 \text{ mm}$)进行扩束,并经过两个快轴柱透镜 L_{y1} 、 L_{y2} (焦距 $f_{y1} = 60 \text{ mm}$, $f_{y2} = -240 \text{ mm}$)进行聚焦,形成一个与板条介质端头尺寸匹配的光斑。本实验采用 45° 偏振片、半波片(HWP)以及两个全反射镜结合的方式,利用偏振复

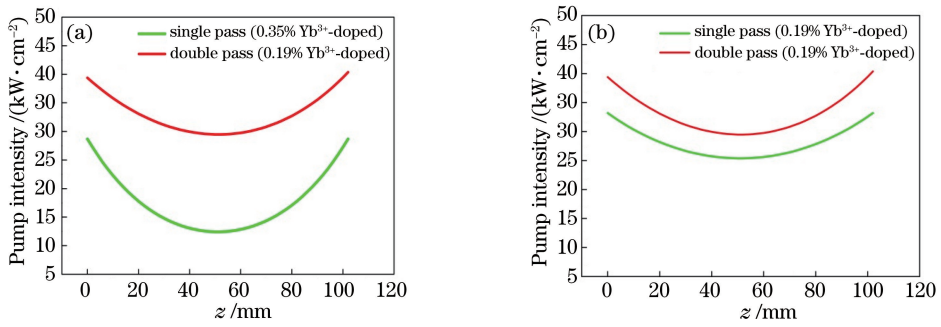


图 1 不同条件下的抽运光强分布曲线。(a)总吸收率为 95%;(b)晶体掺杂浓度为 0.19%

Fig. 1 Distribution curves of pump light in different conditions. (a) Total absorption efficiency is 95%; (b) doped concentration of crystal is 0.19%

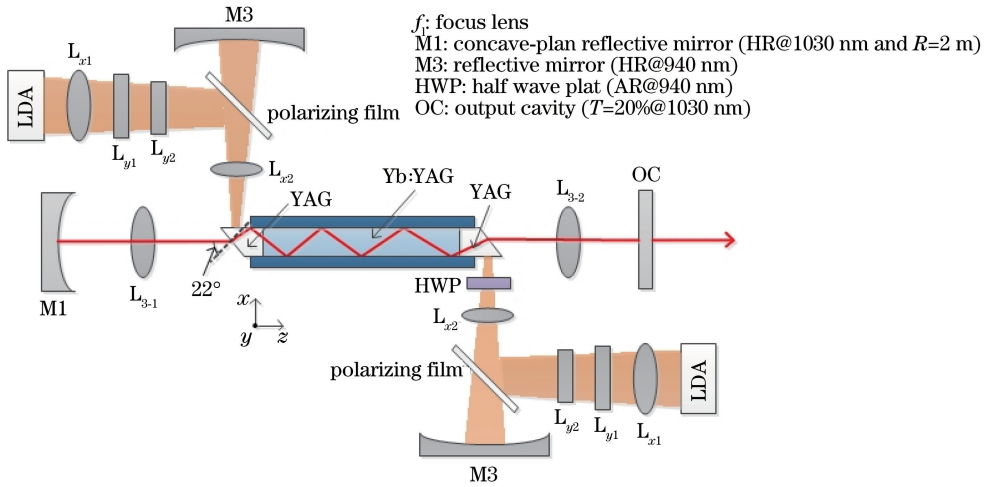


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental setup

用技术实现双端双程抽运。对 45°偏振片进行适当摆放,使其对 TE 模式光全反射,对 TM 模式光全透射。TE 模式的抽运光经 45°偏振片反射后进入板条,未被吸收的抽运光从板条另一端出射,经过半波片变成 TM 模式,透射过 45°偏振片后,经球面全反射镜 M3 反射进入板条形成第二程抽运;在装置的另一端,TE 模式的抽运光经 45°偏振片反射后,透过半波片变成 TM 模式进入板条进行第一程抽运,未被吸收的抽运光透过偏振片后,经球面全反射镜 M3 反射进入板条进行第二程抽运,形成双端双程抽运。另外,由于激光二极管阵列慢轴存在发散角,为了保证第二程抽运具有较高的耦合效率,其球面反射镜 M3 的半径为慢轴柱透镜 L_{x2} 焦距 f_{x2} 的两倍。M3 以及板条端头位于透镜 L_{x2} 的前后焦距上,形成一个像传递系统。平凹反射镜 M1、透镜 L_{3-1} 和 L_{3-2} (焦距均为 200 mm) 以及透过率为 20% 的输出平面镜(OC)构成一个内嵌 4f 系统的谐振腔,激光沿着与板条端面法线成 22° 的方向进行振荡。

4 实验结果与分析

该实验采用重复频率抽运源,抽运光重复频率为 400 Hz,抽运脉宽为 1 ms。图 3(a)所示为掺杂浓度为 0.19% 的 Yb:YAG 激光输出能量与抽运单脉冲总能量之间的关系。根据 Bourdet^[10] 提出的 Yb:YAG 激光输出模型,理论计算结果显示,当注入抽运光单脉冲总能量为 12 J 时,单程抽运结构的激光输出能量为 6 J,双程抽运的激光输出能量为 7.43 J。实验结果中,单程抽运与双程抽运过程中,激光输出能量均与抽运光单脉冲总能量呈良好的线性关系。当注入的抽运单脉冲总能量为 12 J 时,单程抽运结构的激光输出能量为 5.57 J,斜效率为 51%;双程抽运结构的激光输出能量为 6.13 J,斜效率为 64%。对比两种结构的实验结果,发现双程抽运的激光输出功率较单程抽运提升了约 10%。图 3(b)所示为掺杂浓度为 0.19% 的 Yb:YAG 激光输出的光-光转化效率与抽运光

强之间的关系。当注入的抽运光单脉冲总能量为 12 J 时,单程抽运的光-光转化效率为 45.66%,双程抽运的光-光转化效率为 50%,双程抽运的光-光转化效率较单程抽运提升了约 5%。当注入的抽

运光单脉冲总能量为 12 J 时,理论计算得到的单程抽运光-光转化效率为 50%,双程抽运的光-光转化效率为 61.92%,双程抽运的光-光转化效率较单程抽运提升了约 12%。

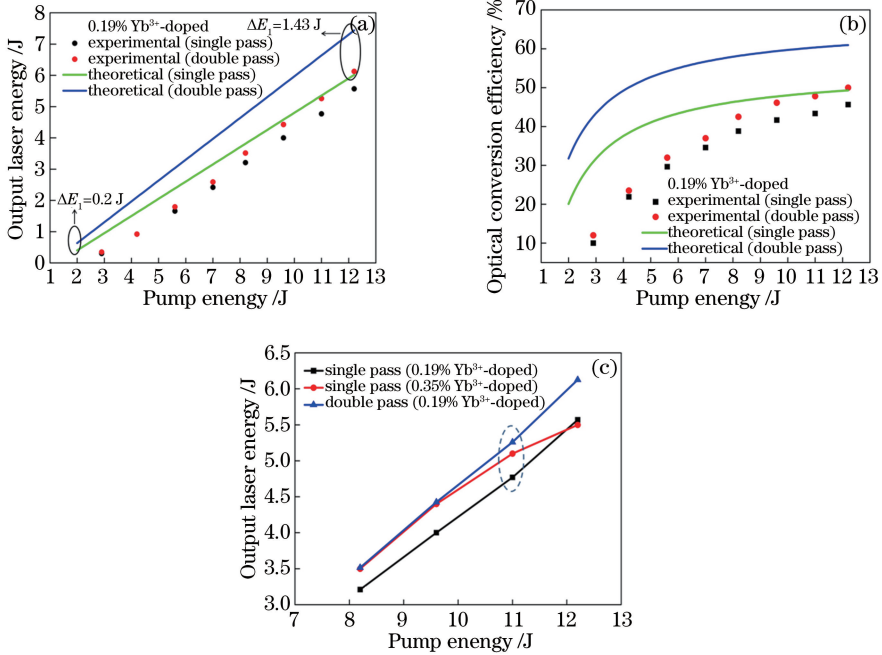


图 3 激光输出能量与光-光转化效率曲线。(a)输出能量曲线;

(b)光-光转化效率曲线;(c)掺杂浓度分别为 0.35%与 0.19%的激光输出能量曲线对比

Fig. 3 Laser output energy versus optical-optical conversion efficiency. (a) Laser output energy; (b) optical conversion efficiency; (c) comparison of laser output energy at doped concentrations of 0.35% and 0.19%

在高抽运能量下,双程抽运结构对激光输出能量的提升效果更加明显。从图 3(a)可以看出,当抽运光能量为 2 J 时,单程抽运与双程抽运激光输出能量差 $\Delta E_1 = 0.2$ J,当抽运光能量上升至 12 J 时,两种结构激光输出能量差 $\Delta E_1 = 1.43$ J,说明双程抽运结构更适用于高功率激光器。图 3(c)所示为掺杂浓度分别为 0.35%与 0.19%的激光输出能量曲线对比。从图 3(c)可以看出,当抽运能量小于 9.5 J 时,高掺杂浓度的端面热效应不明显,掺杂浓度为 0.35%的单程抽运和掺杂浓度为 0.19%的双程抽运对抽运光的吸收效率相同,输出功率和转化效率相差不大。而当抽运光能量从 9.5 J 增加至 11 J 时,0.35%掺杂单程抽运的激光输出能量斜效率从 64%下降至 46.7%,而当抽运光能量超过 11 J 时,0.35%掺杂单程抽运的激光输出能量斜效率下降至 40%,而双端双程结构在高抽运能量下的激光输出能量斜效率仍然维持在 64%左右,说明高掺杂浓度的单程抽运结构在高抽运能量条件下不利于高效的激光输

出。这主要因为,在高抽运光能量注入条件下,双端单程结构的抽运光主要分布在晶体端头位置,从而引起严重的端头热效应,以及抽运光沿吸收方向的不均匀分布引起的严重温度梯度导致晶体变形,激光在腔内振荡失谐,所以掺杂浓度为 0.35%的单程抽运结构的激光输出能量斜率快速下降。

在实验中激光输出光强与光-光转化效率的提升均小于理论计算的结果,其主要原因如下:1)激光高功率运转时产生的废热使得晶体出现热致双折射,抽运光在晶体中传输时发生退偏效应,导致第二程抽运的抽运光强低于理论计算的结果;2)抽运系统的耦合损耗约为 5%,第二程抽运进入晶体的抽运光能量无法达到理想的计算结果;3)激光二极管存在温飘,加载电流的大小会引起激光二极管波长、偏振态飘动,使偏振片对抽运光的反射、透射无法达到理想的 99.9%。为此,在下一步的工作中将会针对退偏效应、抽运耦合光学系统以及偏振片的镀膜波长范围等对双程抽运结构进行优化。

5 结 论

本文研究了一种激光二极管双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器的输出特性。理论计算得到双端双程抽运具有匀化抽运分布、提升输出功率与效率的优点。通过采用偏振复用技术实现双端双程抽运。在抽运光重复频率为 400 Hz、脉宽为 1 ms、抽运光的单脉冲总能量为 12 J 条件下,利用 $4f$ 平凹腔得到单脉冲激光输出能量为 6.13 J,光-光转化效率为 50%。对比相同掺杂浓度的双端单程抽运方式,双端双程抽运使激光输出能量提升了约 10%,光-光转化效率提升了约 5%。与具有相同抽运光吸收效率的双端单程抽运方式相比,双端双程抽运方式在高抽运光能量条件下,激光输出能量仍然具有良好的线性增长趋势,说明激光输出能量更加稳定。双端双程抽运理论分析与实验结果证明双端双程抽运的方式有利于进一步提升激光输出的能量与效率。

参 考 文 献

- [1] Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K, *et al.* Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 205-219.
- [2] Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [3] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, *et al.* Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1672-1674.
- [4] Li M, Hu H, Tang C, *et al.* Research on high power slab laser technology with dual doped concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914004.
李密, 胡浩, 唐淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914004.
- [5] Li M, Zhang X M, Yan X W, *et al.* Theoretical analysis of uniform longitudinal gain for a double-end-pumped Yb:YAG multi-slab pulsed amplifier [J]. Optics Communications, 2017, 393: 199-206.
- [6] Bartnicki E, Bourdet G L, Ynard M. Homogenizer and multipass pump beam combination for quasi-longitudinally diode-pumped solid-state lasers [J]. Applied Optics, 2007, 46(29): 7190-7195.
- [7] Siegman A E. Laser[M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [8] Fu X. Research on slab lasers nonuniformly pumped by laser diodes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
付星. 二极管非均匀抽运板条激光器研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [9] Chen X M, Xu L, Hu H, *et al.* High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24517-24523.
- [10] Bourdet G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers [J]. Applied Optics, 2000, 39(6): 966-971.