

角抽运 Nd:YAG 复合板条 $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长 连续运转激光器

刘 欢 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

摘要 报道了一种适合中小功率输出的全固态激光器的角抽运方法, 抽运光从板条激光器中板条晶体的角部入射, 可获得较高的抽运效率和较好的抽运均匀性。采用单角抽运方式, 进行了角抽运 Nd:YAG 复合板条 $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长连续运转激光器的实验研究。激光腔采用紧凑型平-平直腔结构, 腔长仅为 22 mm。当注入抽运功率为 50.3 W 时, $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长激光连续输出功率最高达 10.9 W, 光-光转换效率为 21.7%, 斜率效率为 22%。当注入抽运功率为 48 W 时, $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长激光连续输出功率短期不稳定性小于 0.6%。

关键词 激光器; 全固态激光器; 角抽运; Nd:YAG 晶体; 连续波; 多波长激光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202001

Corner-Pumped Nd:YAG/YAG Composite Slab Continuous-Wave $1.1\ \mu\text{m}$ Multi-Wavelength Laser

Liu Huan Gong Mali

(Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Corner-pumped type is a new pumping type in the laser diode-pumped solid-state lasers, which has the advantages of high pump efficiency and favorable pump uniformity. Using the single corner pumped type, an efficient corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave $1.1\ \mu\text{m}$ multi-wavelength laser is demonstrated in this paper. The compact plano-plane linear cavity configuration is adopted and the cavity length is only 22 mm. When the pump power is 50.3 W, the maximal output power is up to 10.9 W with an optical-to-optical conversion efficiency of 21.7% and a slope efficiency of 22%. The short-term instability of the output power is better than 0.6% when the pump power is 48 W.

Key words lasers; all-solid-state laser; corner-pumped; Nd:YAG crystal; continuous-wave; multi-wavelength laser

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.3410

1 引 言

角抽运方式是清华大学光子与电子技术研究中心提出的一种抽运方式, 具有自主知识产权^[1~3]。其基本原理是在板条状激光介质的角部切出一个倒角, 抽运光通过这个倒角耦合到激光介质内部, 利用抽运光在介质内的全反射来实现多程吸收, 大大增加了吸收路程, 在较低的掺杂浓度下也能获得高的抽运效率和较好的抽运均匀性。角抽运方式和热键合技术结合起来能获得更好的激光输出^[2], 通过热扩散的方法在掺杂介质的两边键合非掺杂介质, 能

把抽运光吸收区限制在中间的掺杂区, 防止激光在介质内形成回路, 有利于抽运光能量的提取和激光介质的散热。

近年来, 作者所在研究小组已经成功实现了千瓦级连续输出的激光二极管(LD)角抽运 Yb:YAG 激光器稳定运转^[2], 光-光转换效率高, 但光束质量不高, 像散比较严重, 限制了它的应用。目前, 中小功率输出的全固态基模激光器有着更加广阔的应用前景。角抽运方式作为一种新的抽运形式, 既具有端面抽运效率高、激光晶体冷却方法简单的优点, 又

收稿日期: 2010-07-05; 收到修改稿日期: 2010-09-13

作者简介: 刘欢(1980—), 女, 助理研究员, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: lh@mail.tsinghua.edu.cn

具有侧面抽运均匀性好、功率扩展性强的优点^[4~6]。因此利用角抽运方式,开展中小功率全固态激光器的实验研究具有十分重要的应用价值。从原理上分析,角抽运中小功率输出的复合板条固体激光器是完全可行的,但是其耦合系统、激光介质、腔型结构、输出功率特性等与大功率时存在一些差异,这需要进行深入细致的理论计算和实验研究^[7~10]。

在中小功率固体激光器的发展过程中,通常使用 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 作为增益介质,两者都实现了较好的激光输出^[11~13]。Nd:YAG 的主要优点是热机械性能好,而 Nd:YVO₄ 的主要优点是有效受激发射截面大,偏振输出,有利于消除热致双折射带来的影响。对于角抽运方式,由于其吸收光程比较长,因此对掺杂浓度和有效发射截面要求不高。Nd:YVO₄ 的优点得不到充分发挥,所以在中小功率角抽运固体激光器增益介质的选择中,采用 Nd:YAG 材料作为增益介质更为合适。目前已经成功实现了角抽运 Nd:YAG 复合板条 1064 nm 激光及其倍频光准连续、高效、稳定输出^[14] 和角抽运 Nd:YAG 复合板条 1319 nm/1338 nm 双波长激光连续、高效、稳定输出^[15]。

近年来,人们开始对 Nd:YAG 的 1.1 μm 附近的谱线产生了极大的兴趣,其中主要包括对 1112 nm 和 1123 nm 激光器的研制^[16~23]。1112 nm 激光经倍频可获得 556 nm 的黄光,该波长非常接近人眼最敏感波长 555 nm,非常适合于激光显示和照明。1123 nm 激光器可以作为掺铈光纤的抽运源,通过上转换得到 481 nm 的蓝光输出^[16];同时 1123 nm 的倍频光 561 nm 黄光在医学、生物荧光实验研究和全息照相存储等领域有着极大的用途^[17]。1997 年,R. Paschotta 等^[16] 利用激光二极管抽运 Nd:YAG,获得了 1.6 W 的 1123 nm 激光输出,再将该激光抽运掺铈光纤,经频率上转换获得 230 mW 的 481 nm 蓝光输出。1999 年,N. Moore 等^[18] 展示了衍射极限输出的 1123 nm 驻波腔激光器,注入抽运功率 5.6 W 时,激光输出功率 1.7 W;同时,他们构建了一个单向环形腔单频 1123 nm 激光器,产生 180 mW 的单频输出。2004 年,台湾的 Y. F. Chen 等^[19] 采用 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q,在抽运功率 1.5 W 时,获得了 150 mW,10 kHz 的调 Q 输出,脉宽 50 ns。采用声光调 Q,在抽运功率为 19.2 W 时获得了平均功率 3 W 的调 Q 输出,重复频率 20 kHz,峰值功率大于 1 kW;激光器连续运转时,1123 nm 输出功率高达 3.8 W^[20]。2005 年,蔡

志强等^[21] 报道了一台 LD 端面抽运 Nd:YAG 1123 nm 连续运转激光器,最高输出功率为 2.6 W,光-光转换效率为 16.4%,斜率效率为 18%。2006 年,F. Q. Jia 等^[22] 采用内腔倍频技术,在抽运功率为 1.6 W 时,实现了 109 mW 的连续 556 nm 黄光输出。2007 年,E. J. Zang 等^[23] 报道一台输出功率达 1.25 W 的 1123 nm 单频激光器,斜率效率为 39%,激光频率调节范围超过 3 GHz。2009 年,S. S. Zhang 等^[24] 实现了 LD 端面抽运陶瓷 Nd:YAG 1123 nm 连续运转激光器 10.8 W 稳定输出,光-光转换效率高达 41.4%。本文采用角抽运技术,实现了 10.9 W 的连续 1112 nm/1116 nm/1123 nm 多波长激光稳定输出,光-光转换效率 21.7%,斜率效率 22%。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,LD bar 的最大连续输出功率为 50 W,发光面积为 10 mm×0.7 mm,有一定的发散角,而激光介质角面的尺寸为 3 mm×0.8 mm,因此实验中使用由柱面透镜组成的耦合系统对抽运光进行压缩整形。在快轴方向使用一个焦距为 12.7 mm 的柱面透镜,在慢轴方向使用两个焦距为 30 mm 的柱面透镜,通过调整各个柱面透镜的位置,可以把抽运光完全耦合到激光介质中,实验结果表明耦合效率可以达到 95% 以上。根据光线追迹的数值计算方法,对角抽运复合板条的抽运吸收效率和均匀性进行了理论分析,并设计出单角复合板条各项参数的最佳范围^[25]。采用上述的抽运耦合系统和优化的复合板条晶体,抽运吸收效率可达 92.6%^[25]。根据理论的指导,加工了优化的单角 Nd:YAG 复合板条。Nd:YAG 复合板条的掺杂原子数分数为 1.0%。掺杂区域的尺寸为 14 mm×

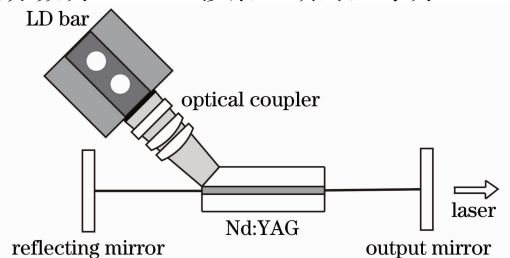


图 1 角抽运 Nd:YAG 复合板条 1.1 μm 多波长激光连续运转激光器示意图

Fig. 1 Experimental setup of a corner-pumped composite Nd:YAG slab continuous-wave 1.1 μm multi-wavelength laser

$0.8\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$, 两条非掺杂区域的尺寸为 $14\ \text{mm} \times 3.5\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$, 在复合板条的一角沿 45° 切一个倒角作为抽运光的入射面。

由于 $1123\ \text{nm}$ 的受激发射截面约为 $1064\ \text{nm}$ 的 $1/15$, 约为 $1319\ \text{nm}$ 的 $1/3$, 约为 $946\ \text{nm}$ 的 $3/5$, 因此为了获得增益较小的 $1112, 1116$ 和 $1123\ \text{nm}$ 3 条激光谱线的运转, 不仅需要抑制 $1064\ \text{nm}$ 激光的振荡, 还需要抑制 $1319\ \text{nm}$ 和 $946\ \text{nm}$ 的振荡。选择激光谱线的方法很多, 比如腔内加入色散棱镜、在谐振腔镜上镀制特殊要求的膜系等。这里通过提高谐振腔两腔镜对 $1064, 1319$ 和 $946\ \text{nm}$ 的透射率, 抑制其起振, 同时提高谐振腔对 $1112, 1116$ 和 $1123\ \text{nm}$ 的反射率, 以获得这 3 种波长激光的运转。但值得注意的是, 仅通过镀制窄带的反射膜系, 很难实现三者当中任意一条激光谱线的单独运转, 还需插入相关的选频器件, 比如标准具、双折射滤波片等。实验中采用平-平直腔结构, 考虑到谐振腔需要抑制掉 $1064, 1319$ 和 $946\ \text{nm}$ 的激光振荡, 对两腔镜镀制了特殊的膜系。高反镜上镀制了对 $1123\ \text{nm}$ 高反 ($R > 99.8\%$), 对 $1064\ \text{nm}$ ($T > 74\%$), $1319\ \text{nm}$ ($T > 79\%$), $946\ \text{nm}$ ($T > 80\%$) 高透的膜系; 输出镜上镀制了对 $1123\ \text{nm}$ 部分透射 ($T = 2\%$), 对 $1064\ \text{nm}$ ($T > 73\%$), $1319\ \text{nm}$ ($T > 34\%$), $946\ \text{nm}$ ($T > 80\%$) 高透的膜系。实验结果表明, $1064, 1319$ 和 $946\ \text{nm}$ 的激光振荡被成功抑制, 获得了 $1.1\ \mu\text{m}$ 附近激光的稳定运转。由于 $1112, 1116$ 和 $1123\ \text{nm}$ 这 3 条激光谱线的相对性能和受激发射截面比较接近, 因此在特定的抽运功率下它们很容易同时起振。在实验中也观察到三波长同时振荡的情况。为了尽量扩展激光器的稳区范围, 提高多波长激光的输出功率, 采用线性短腔结构, 腔长仅为 $22\ \text{mm}$ 。

3 实验结果

图 2 给出了多波长激光连续输出功率与注入抽运功率之间的关系曲线。当注入抽运功率为 $50.3\ \text{W}$ 时, 连续输出功率最高可达 $10.9\ \text{W}$, 光-光转换效率为 21.7% , 斜率效率为 22% 。在 $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长激光输出功率为 $10.9\ \text{W}$ 时, 利用光谱仪观测激光器输出光谱, 如图 3 所示, 可观测到 $1112, 1116$ 和 $1123\ \text{nm}$ 3 波长同时振荡, $1064\ \text{nm}$ 激光已经被完全抑制, 同时分别测量了这 3 个波长的线宽, 分别为 $0.114, 0.091$ 和 $0.108\ \text{nm}$ 。利用光谱仪监测了不同抽运功率时的激光器输出谱线, 均未发现 $1064, 1319$ 和 $946\ \text{nm}$ 的激光振荡。当注入抽运功

率为 $48\ \text{W}$ 时, 对多波长激光连续输出功率的短期不稳定性进行了实验分析, 每隔 $1\ \text{min}$ 读取一个输出功率, 在 $15\ \text{min}$ 内, 输出功率的不稳定度小于 0.6% , 测量结果如图 4 所示。当 $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长激光输出功率为 $10.9\ \text{W}$ 时, 利用 Spiricon M^2 -200 光束质量分析仪测量了 $1.1\ \mu\text{m}$ 多波长激光的光束质量因子 M^2 。经过仔细调节, 多波长激光的光束质量

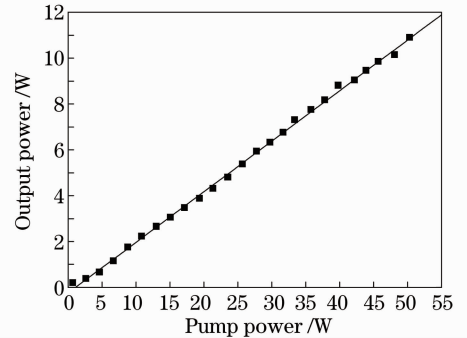


图 2 注入抽运功率与多波长激光连续输出功率的关系

Fig. 2 Output power of the continuous-wave $1.1\ \mu\text{m}$ multiwavelength laser versus pump power

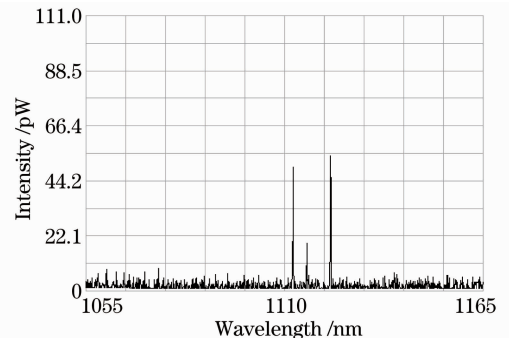


图 3 激光输出功率 $10.9\ \text{W}$ 时, 从 $1055\ \text{nm}$ 到 $1165\ \text{nm}$ 的光谱图

Fig. 3 Spectrum from 1055 to $1165\ \text{nm}$ at an output power of $10.9\ \text{W}$

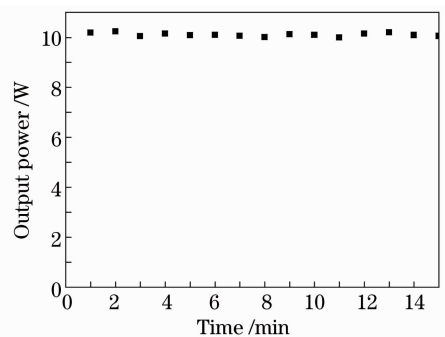


图 4 当抽运功率为 $48\ \text{W}$ 时, 多波长激光连续输出功率的短期不稳定性

Fig. 4 Short-term instability of the multiwavelength laser output power when the pump power is $48\ \text{W}$

因子为 $M_x^2=10.18, M_y^2=2.75$, 测量结果如图 5 所示。束腰宽度在 x 和 y 方向分别为 $672 \mu\text{m}$ 和 $337 \mu\text{m}$ 。

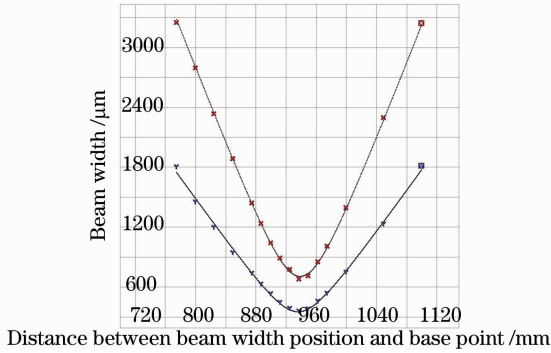


图 5 多波长激光输出功率 10.9 W 时光束质量因子的测量曲线

Fig. 5 Quality factor of the multiwavelength laser output beam with output power of 10.9 W

4 结 论

采用角抽运技术进行了角抽运 Nd:YAG/YAG 1.1 μm 多波长连续运转激光器输出特性的实验研究,得到了比较理想的实验结果。连续 1.1 μm 多波长激光最高输出功率达到 10.9 W,光-光转换效率为 21.7%,斜率效率为 22%,在抽运功率为 48 W 时,多波长激光连续输出功率的不稳定度小于 0.6%。当 1.1 μm 多波长激光输出功率为 10.9 W 时,它的光束质量因子为 $M_x^2=10.18, M_y^2=2.75$ 。由于仅采用腔镜镀膜的方式很难实现 1.1 μm 波段单一谱线的稳定运转,因此下一步将在腔内插入双折射滤波片或者标准具等选频器件,以实现 1.1 μm 波段单一谱线的高功率稳定输出。

参 考 文 献

- 1 M. Gong, C. Li, Q. Liu *et al.*. 200-W corner-pumped Yb:YAG slab laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(3): 265~267
- 2 Q. Liu, M. Gong, F. Lu *et al.*. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101113
- 3 M. Gong, C. Li, Q. Liu *et al.*. Corner-pumping method and gain module for high power slab laser[P]. US. 7388895. 2008
- 4 Q. Liu, F. Lu, M. Gong *et al.*. 15 W output power diode-pumped solid-state lasers at 515 nm[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(1): 30~32
- 5 Q. Liu, M. Gong, F. Lu *et al.*. 520-W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728
- 6 Liu Qiang, Gong Mali, Li Chen *et al.*. Corner-pumped Yb:YAG lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 721~725
柳强, 巩马理, 李晨等. 角抽运 Yb:YAG 激光器[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 721~725
- 7 F. Lu, M. Gong, H. Xue *et al.*. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers[J].

- Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(1): 43~48
- 8 F. Lu, M. Gong, H. Xue *et al.*. Optimizing the composite slab sizes in corner-pumped lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(5): 949~952
- 9 Xue Haizhong, Lu Fuyuan, Xue Mei *et al.*. Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6): 585~588
薛海中, 陆富源, 薛梅等. Yb:YAG 板条激光器谐振腔设计与光束质量测量[J]. *激光技术*, 2006, **30**(6): 585~588
- 10 Sheng Dacheng, Gong Mali, Liu Qiang *et al.*. Analysis of thermal effects in corner-pumped slab-state lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 86~89
盛大成, 巩马理, 柳强等. 角抽运板条固体激光器热效应的分析[J]. *激光技术*, 2006, **30**(1): 86~89
- 11 Chen Xinyu, Jin Guangyong, Yu Yongji *et al.*. Electro-optic Q-switched of double LDA alternate symmetric side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3098~3102
陈薪羽, 金光勇, 于永吉等. 双激光二极管阵列侧面交错抽运的电光调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3098~3102
- 12 Hu Hao, Jiang Jianfeng, Lei Jun *et al.*. Diode laser side pumped kW-class Nd:YAG slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 30~33
胡浩, 蒋建锋, 雷军等. 千瓦级二极管激光侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 30~33
- 13 X. Yu, F. Chen, R. Yan *et al.*. High power diode-pumped 914-nm Nd:YVO₄ laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 499~501
- 14 H. Liu, M. Gong. Compact corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab laser[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(6): 1062~1066
- 15 H. Liu, M. Gong. Compact corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab 1319 nm/1338 nm laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(2): 124~129
- 16 R. Paschotta, N. Moore, W. A. Clarkson *et al.*. 230 mW of blue light from a thulium-doped upconversion fiber laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(4): 1100~1102
- 17 E. Räikkönen, O. Kimmelma, M. Kaivola *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAG/KTA laser at 561 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15-16): 4088~4091
- 18 N. Moore, W. A. Clarkson, D. C. Hanna *et al.*. Efficient operation of a diode-bar-pumped Nd:YAG laser on the low-gain 1123-nm line[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(27): 5761~5764
- 19 Y. F. Chen, Y. P. Lan, S. W. Tsai. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG laser at 1123 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1-6): 309~313
- 20 Y. F. Chen, Y. P. Lan. Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser at 1123 nm[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(1): 29~31
- 21 Z. Q. Cai, M. Chen, Z. G. Zhang *et al.*. Diode end-pumped 1123-nm Nd:YAG laser with 2.6-W output power[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 281~282
- 22 F. Q. Jia, Q. Zheng, Q. H. Xue *et al.*. LD-pumped Nd:YAG/LBO 556 nm yellow laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(8): 569~572
- 23 E. J. Zang, J. P. Cao, Y. Li *et al.*. Single-frequency 1.25 W monolithic lasers at 1123 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 250~252
- 24 S. S. Zhang, Q. P. Wang, X. Y. Zhang *et al.*. Continuous-wave ceramic Nd:YAG laser at 1123 nm[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(12): 864~867
- 25 S. Gao, H. Liu, D. Wang *et al.*. LD bar corner-pumped TEM₀₀ CW composite Nd:YAG laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **17**(24): 21837~21842