

文章编号: 0258-7025(2009)07-1700-04

高功率激光二极管抽运的镱钠共掺氟化钙连续激光器

柴 路¹ 葛文琦¹ 闫 杰¹ 胡明列¹ 王清月¹ 苏良碧² 李红军² 郑丽和² 徐 军²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 中国科学院透明与光功能无机材料重点实验室, 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要 掺镱氟化钙($\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$)激光器是最近国际上研究的热点之一,2008 年报道的该类激光器,在 64 W 激光二极管(LD)的抽运下,实现了平均输出功率 10.2 W 的连续激光输出。利用国产镱钠共掺的氟化钙($\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$)激光晶体,采用三镜折叠腔型和激光二极管抽运,获得了该类激光器($\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2/\text{Yb}:\text{CaF}_2$)的高功率连续输出。实验参数为:输出耦合镜的透过率为 4%,激光二极管的最大输出功率为 40 W,中心波长为 976 nm。当吸收抽运功率 18.2 W 时,获得了 14.5 W 的最高功率连续激光输出,相应的斜率效率为 80%。结果表明,国产 $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ 晶体具有低激光阈值和高负载能力,是一种优良的高功率激光材料。

关键词: 激光器;激光二极管抽运; $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ 晶体; 连续激光; 高功率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1700

High-Power Laser Diode-Pumped Yb,Na:CaF₂ Continuous-Wave Laser

Chai Lu¹ Ge Wenqi¹ Yan Jie¹ Hu Minglie¹ Wang Qingyue¹
Su Liangbi² Li Hongjun² Zheng Lihe² Xu Jun²

¹ School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, University of Tianjin, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Transparent Opto-Functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Shanghai 200050, China

Abstract $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ laser has been intensively explored in recent years. In $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ continuous-wave (CW) laser, the highest output power of 10.2 W pumped by a laser diode(LD) of 64 W has been reported in 2008. The first demonstration of the highest output power of 14.5 W in a LD-pumped $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ CW laser is presented, under the conditions of an absorbed pump power of 18.2 W and a output coupler of 4%, which corresponds to a laser slope efficiency of 80%. The result shows that the novel $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ crystal is an excellent laser material for low-threshold and high-power lasers.

Key words lasers; laser diode-pump; $\text{Yb},\text{Na}:\text{CaF}_2$ crystal; continuous wave-laser; high power

1 引 言

近十几年来,对于 1 μm 波段的掺 Yb 激光材料和激光器的研究一直是激光技术领域中的主要关注点,国际上大量的优质掺 Yb 氧化物激光晶体已经实现连续或脉冲激光运转,主要有: $\text{Yb}:\text{YAG}$ 、 $\text{Yb}:\text{GdCOB}$ 、 $\text{Yb}:\text{KGW}$ 、 $\text{Yb}:\text{KYW}$ 、 $\text{Yb}:\text{BOYS}$ 、 $\text{Yb}:$

SYS 、 $\text{Yb}:\text{YVO}_4$ 等^[1]。国内具有自主知识产权的掺 Yb 氧化物激光晶体主要有中国科学院上海光学精密机械研究所的 $\text{Yb}:\text{GSO}$ ^[2]、 $\text{Yb}:\text{GYSO}$ ^[3]、 $\text{Yb}:\text{LYSO}$ ^[4]、 $\text{Yb}:\text{LPS}$ ^[5], 山东大学的 $\text{Yb}:\text{YAB}$ ^[6]、 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ ^[7], 以及中国科学院福建物质结构研究所的 $\text{Yb}:\text{GAB}$ ^[8]等。与氧化物晶体相比,氟化物晶体具

收稿日期: 2009-03-24; 收到修改稿日期: 2009-04-05

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家自然科学基金(60578024, 60508016, 60778036)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)资助项目

作者简介: 柴 路(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事超快激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

有非常宽的光谱透射范围,可以从深紫外一直到中红外;氟化物晶体的折射率比较低,可以减小使用光在其的表面反射率;氟化物具有低的吸收系数,相对色散大,损伤阈值高等特点。在众多氟化物晶体中,氟化钙(CaF_2)表现出更低的声子频率(328 cm^{-1})和更高的热传导率($10\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),以及容易生长大块单晶等优点^[9]。因此,掺 Yb 氟化物晶体在近几年重新成为研究的热点。

2004 年, V. Petit 等^[10]首次报道采用钛宝石 920 nm 激光抽运的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体实现 CW 激光运转,斜率效率达 50%。随后, A. Lucca 等^[11]就实现了激光二极管(LD)抽运的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体高功率可调谐激光运转,在 15 W 的抽运功率下获得了 5.8 W 的输出功率。随后,他们又实现了 CW 锁模运转,获得了脉宽 150 fs,平均输出功率为 880 mW 的锁模脉冲序列^[12]。最近,他们采用 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体,在 64 W 的 LD 抽运下,实现了平均输出功率为 10.2 W,斜率效率为 21.6% 的连续激光输出,这是迄今为止报道的 LD 抽运的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 连续激光器的最高功率水平^[13]。2005 年,中国科学院上海光学精密机械研究所首次提出了优化共掺 Na^+ 的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体,利用 Na^+ 离子与 Yb^{3+} 离子结合成 $\text{Yb}^{3+}-\text{Na}^+$ 离子对,能够有效防止 Yb^{3+} 的团簇和 Yb^{2+} 离子的生成,从而大大地提高 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体的发光效率和降低激光阈值^[14],当年就实现了这种新型 $\text{Yb}^{3+},\text{Na}^+:\text{CaF}_2$ 晶体在 1050 nm 的低阈值自调 Q 激光输出^[15,16]和脉宽为 1 ps 的调 Q 锁模脉冲^[17]。

本文报道了在 LD 抽运的国产 Yb, Na:CaF₂ 晶体中实现高功率连续激光运转。在吸收 18.5 W 的抽运功率的条件下获得了 14.2 W 的连续激光输出。

2 激光装置与实验

实验装置如图 1 所示。抽运源是光纤耦合的激光二极管(nLIGHT 公司, NL-PPS50),最大发射功率为 40 W,中心波长在 975 nm,光纤的芯径为 200 μm ,数值孔径为 0.22。采用非球面镜 F_1 (焦距 11 mm)和 F_2 (焦距 18 mm)构成的准直和聚焦系统将抽运光聚焦到激光晶体上。Yb, Na:CaF₂ 晶体被垂直切割,晶体尺寸为 4.7 mm × 4.6 mm × 5.6 mm,两个通光面仅抛光,未镀膜。掺 Yb 和 Na 的原子数分数分别为 3% 和 2%。晶体用铜片包裹,并固定于接有水冷循环系统的铜座上,水温控制

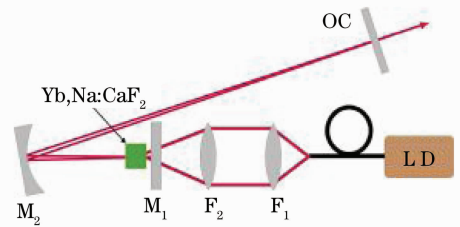


图 1 实验装置。 M_1 为平面双色镜; M_2 为曲面反射镜;
OC 为输出耦合镜; F_1 与 F_2 为准直和聚焦透镜组
Fig. 1 Schematic setup of the Yb, Na:CaF₂ laser.
 M_1 : flat dichroic mirror; M_2 : concave mirror;
OC: output coupler; F_1 and F_2 : a collimating
and focusing lens doublets

在 16 °C。为了得到稳定的 TEM₀₀ 模振荡,谐振腔采用三镜折叠腔结构, M_1 为平面双色镜,对抽运光 976 nm 高透(86%),对激光 1040 nm 高反(99.5%); M_2 是曲率半径 $R=200\text{ mm}$ 的平凹反射镜,对激光 1040 nm 高反;OC 为 4% 的激光输出耦合镜; M_1 与 M_2 间距 105 cm, M_2 到 OC 的距离为 480 cm,整个激光器腔长为 585 cm;激光晶体靠近 M_1 约 1 mm 间距放置。实验中采用逐渐增加抽运功率,适当调整腔参数以获得稳定且最大的输出功率后,再进行测量,分别确定激光阈值、斜率效率和最大输出功率,以及激光光谱和光束质量。实验中采用 Coherent 公司的功率计(FieldMate)测量激光功率, ANDO 公司的光谱仪(AQ-6315A)记录光谱,以及 Coherent 公司的光束质量分析仪(LaserCam-HR)监控光束质量。

3 结果与讨论

首先仔细测量了 LD 抽运光实际到达增益介质前表面的光功率和介质的吸收率,结果表明 LD 抽运激光经准直聚焦系统(F_1 和 F_2)以及 M_1 后有 78% 的抽运功率能够到达晶体前表面,晶体对 976 nm 抽运光的吸收率为 63%。在低功率抽运下 Yb, Na:CaF₂ 晶体在 1050 nm 以上波段有一定的可饱和吸收的作用^[18,19],而且上能级寿命比较长,有自调 Q 运转的趋势^[15,16]。因此在低功率抽运阶段应注意尽量使激光器工作在小于 1050 nm 的范围内或调节腔镜以压制其自调 Q 的趋势,然后逐渐增加抽运功率。经过仔细调节后,使激光器能够连续运转,然后逐步优化腔参数,实现输出功率最大化。输出的激光经过小孔光阑。两级高通滤波片去除残余抽运光后,进入上述几种测量仪器进行参数测量。采用以上方

式,测量了该激光器的连续工作特性,图 2 为输入-输出关系曲线。从图中可见,当吸收抽运功率在 10 W(对应 LD 抽运源的输出功率约为 21 W)以下时斜率效率为 53%左右,而在较高抽运功率时输出功率出现明显上升。经过仔细检查,结果表明这是由于 LD 抽运源不能进行温度控制,使其波长随输出功率增加产生漂移。当其工作在较低功率时,波长为 968 nm,小于该晶体的主吸收波长 976 nm 达 8 个纳米,因此抽运效率相对较低;当吸收抽运功率超过 10 W 后,LD 抽运源的工作波长随着抽运功率的增加开始向长波移动,并在其输出功率约为 40 W(LD 抽运源的极限值)时到达晶体的主吸收峰 976 nm 附近,从而导致晶体吸收率增大,激光发射增加,这就是图 2 中后半段斜率效率增加的原因。该激光器的晶体阈值吸收功率约为 800 mW,在吸收抽运功率为 18.2 W 时获得了最高输出功率 14.5 W(对应 LD 抽运源输出功率约为 37 W),相应的斜率效率为 80%。

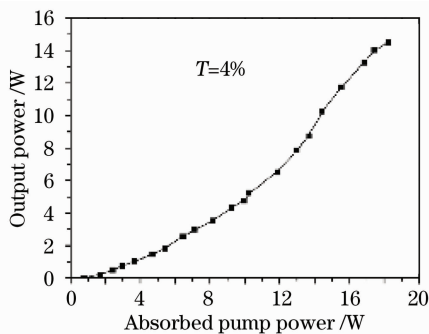


图 2 Yb,Na:CaF₂ 激光器的输出功率特性曲线

Fig. 2 Output characteristics of the Yb,Na:CaF₂ laser

我们采用 Coherent 公司的光束质量分析仪(LaserCam-HR)对该激光器的光束质量进行了测量,并拟合得出激光光束 M^2 因子:在低功率抽运时其值约为 1.3-1.4,在高功率抽运时约为 1.9-2.0;最高功率输出时的激光光斑如图 3 所示。从光斑形状和 M^2 因子的测量可以看到积累的热效应对光束质量产生了影响;相应的激光光谱如图 4 所示,最大峰值波长值为 1049.4 nm,平均谱宽约为 3 nm。其中的光谱干涉现象来自于未镀膜的晶体表面与 M_1 镜面之间的 F-P 效应;高功率运转下的长时间(2 h)功率稳定性为 5%左右。

4 结 论

在 LD 抽运的 Yb,Na:CaF₂ 连续激光器中,实现了高功率激光输出。在吸收抽运功率 18.2 W 时

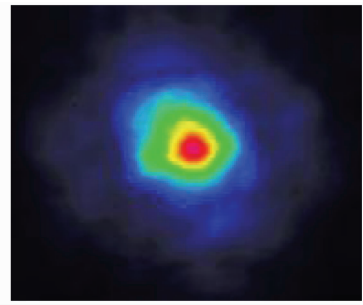


图 3 高功率抽运下的激光光斑

Fig. 3 Output beam profile under the high power pumping

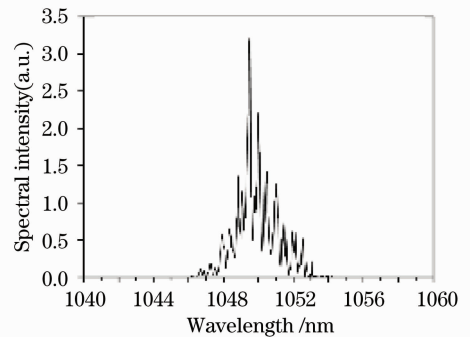


图 4 激光输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of the Yb,Na:CaF₂ laser

获得了最高 14.5 W 的输出功率,相应的斜率效率达 80%。结果表明,国产 Yb,Na:CaF₂ 晶体具有低激光阈值和高负载能力,是一种优良的高功率激光材料。

参 考 文 献

- 1 F. Druon, F. Balembois, P. Georges. New laser crystals for the generation of ultrashort pulses [J]. *C. R. Physique*, 2007, **8**: 153~164
- 2 Chengfeng Yan, Guangjun Zhao, Liangbi Su *et al.*. Growth and spectroscopic characteristics of Yb:GSO single crystal [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2006, **18**: 1325~1333
- 3 Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. LD pumped Yb:GYSO CW mode-locked laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 719~720
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型 Yb:GYSO 混晶实现连续锁模激光输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 719~720
- 4 Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Laser diode pumped efficient tunable Yb:LYSO laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 799~800
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型高效、调谐 Yb:LYSO 激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 799~800
- 5 Lihe Zheng, Guangjun Zhao, Chengfeng Yan *et al.*. Growth and spectroscopic characteristics of Yb:LPS single crystal [J]. *J. Crystal Growth*, 2007, **304**: 441~447
- 6 Huaidong Jiang, Jing Li, Jiyang Wang *et al.*. Growth of Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystals and their optical and self-frequency-doubling properties [J]. *J. Crystal Growth*, 2001, **233**: 248~252
- 7 Y. H. Xue, C. Y. Wang, J. Li *et al.*. A highly efficient and widely tunable bifunctional Yb:GdYAB Laser [J]. *IEEE J.*

- Quantum Electron.*, 2008, **44**(7) : 686~691
- 8 Z. Zhu, J. Li, B. Alain *et al.*. Growth, spectroscopic and laser properties of Yb^{3+} -doped $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal: a candidate for infrared laser crystal[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1) : 71~75
- 9 J. L. Doualan, P. Camy, R. Moncorgé *et al.*. Latest developments of bulk crystals and thin films of rare-earth doped CaF_2 for laser applications [J]. *J. Fluorine Chem.*, 2007, **128** : 459~464
- 10 V. Petit, J. L. Doualan, P. Camy *et al.*. CW and tunable laser operation of Yb^{3+} doped CaF_2 [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78** : 681~684
- 11 A. Lucca, M. Jacquemet, F. Druon *et al.*. High-power tunable diode-pumped $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29** : 1879~1881
- 12 A. Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet *et al.*. High-power diode-pumped $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$ femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23) : 2767~2769
- 13 J. Boudeile, J. Didierjean, P. Camy *et al.*. Thermal behaviour of ytterbium-doped fluorite crystals under high power pumping [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14) : 10098~10109
- 14 L. B. Su, J. Xu, H. J. Li *et al.*. Codoping Na^+ to modulate the spectroscopy and photoluminescence properties of Yb^{3+} in CaF_2 laser crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30** : 1003~1005
- 15 L. Su, J. Xu, X. Xue *et al.*. Low-threshold diode-pumped $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+ : \text{CaF}_2$ self-Q-switched laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15) : 5635~5640
- 16 Xue Yinghong, Wang Qingyue, Chai Lu *et al.*. Characterization of laser-diode-pumped self-Q switched laser operation of a $\text{Na}, \text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$ single crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10) : 1313~1316
- 薛迎红, 王清月, 柴 路等. 激光二极管抽运 Na, Yb 共掺 CaF_2 晶体自调 Q 激光特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10) : 1313~1316
- 17 J. Du, X. Liang, Y. G. Wang *et al.*. 1ps passively mode-locked laser operation of $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+ : \text{CaF}_2$ crystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20) : 7970~7975
- 18 Chai Lu, Yan Shi, Xue Yinghong *et al.*. Saturable absorption of $\text{Yb}^{3+}/\text{Na}^+$ codoped CaF_2 crystals at 1050nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5):2966~2970
- 柴 路, 颜 石, 薛迎红等. 镱、钠共掺的氟化钙晶体在 1050 nm 的可饱和吸收作用 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(5) : 2966~2970
- 19 L. Su, D. Zhang, H. Li *et al.*. Passively Q-switched Yb^{3+} laser with Yb^{3+} -doped CaF_2 crystal as saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5) : 2375~2379