

文章编号: 0258-7025(2005)06-0734-05

半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面 抽运 Nd:YVO₄激光器

蔡志强^{1,3,4}, 温午麒^{1,3,4}, 姚建铨^{1,3,4}, 王勇刚^{2,3}, 张志刚^{2,3}, 丁 欣^{1,3,4},
周建勇^{1,3,4}, 周佳凝^{1,3,4}, 李 君^{1,3,4}, 王 鹏^{1,3,4}

{ 天津大学精仪学院¹ 激光与光电子研究所,² 超快激光实验室, 天津 300072
³ 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072
⁴ 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072 }

摘要 报道了利用国产半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现端面抽运 Nd:YVO₄激光器连续锁模(CWML)运转的实验结果。在 V 型腔结构的实验中观察到调 Q 锁模(QML)波形不稳并具有较强的直流成份,通过选择小透过率输出镜和增加腔长,解决了这两个问题。在腔长从 0.66m 增至 1.27m 和 1.86m 过程中,直流分量从 52% 降到 13.6%,0.3%,最终获得了重复频率约 80 MHz 的稳定连续锁模脉冲输出,光谱宽度为 0.15 nm。在考虑晶体热效应基础上,利用 ABCD 矩阵方法设计了四镜 Z 型腔,获得了 1 W 左右的连续锁模输出,重复频率约 150 MHz。分析和比较了 V 型腔和 Z 型腔的优缺点。

关键词 激光技术; Nd:YVO₄激光器; 半导体可饱和吸收镜; 连续锁模; 端面抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Continuous-Wave Passively Mode-Locked Diode End-Pumped Nd:YVO₄ Laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

CAI Zhi-qiang^{1,3,4}, WEN Wu-qi^{1,3,4}, YAO Jian-quan^{1,3,4}, WANG Yong-gang^{2,3},
ZHANG Zhi-gang^{2,3}, DING Xin^{1,3,4}, ZHOU Jian-yong^{1,3,4}, ZHOU Jia-ning^{1,3,4},
LI Jun^{1,3,4}, WANG Peng^{1,3,4}

{ ¹ Institute of Laser and Opto-Electronics, ² Ultra Fast Laser Laboratory, College of Precision Instrument
and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjing 300072, China
³ Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China
⁴ Cooperated Institute of Nankai University and Tianjing University, Tianjin 300072, China }

Abstract A diode end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ picosecond laser with home made semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is presented. By choosing a low-transmission output coupler and extending the cavity length, the Q-switching mode-locked pulses are suppressed and the proportion of direct current is decreased in V shaped resonator. When the cavity length is increased from 0.66 m to 1.27 m and 1.86 m, the proportion of direct current is decreased from 52% to 13.6% and 0.3%. At last, a stable continuous mode-locked pulses are attained and the pulse repetition rate is 80 MHz. The spectral width is measured to be 0.15 nm. Considering the thermal effect of the crystal, a four-mirror Z-cavity is designed using the matrix method. Average output power of 1 W at a pulse repetition rate of 150 MHz is obtained. The benefit and disadvantage of the V-shaped cavity and the four-mirror Z-cavity are compared and analyzed.

Key words laser technique; Nd:YVO₄ laser; semiconductor saturable absorber mirror; continuous wave mode-locked; end-pumped

收稿日期: 2004-07-01; **收到修改稿日期:** 2004-10-11

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311190)、国家自然科学基金(69988003,60278001)、教育部南开大学、天津大学联合研究院基金资助项目。

作者简介: 蔡志强(1980—),男,四川宜宾人,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生,主要从事全固态激光器、锁模激光器及其频率变换方面的研究。E-mail: sailor123a@163.com

1 引言

可饱和布拉格反射镜(SBR)或半导体可饱和吸收镜(SESAM)是采用分子束外延(MBE)或者金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术将半导体可饱和吸收体直接生长在半导体布拉格反射镜上形成的器件,1992年由 U. Keller 等^[1]研制成功并应用于锁模激光器。与主动锁模和染料被动锁模激光器相比,半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器具有结构简单、稳定可靠、光束质量好等特点。因此,半导体可饱和吸收镜在飞秒和皮秒锁模激光器中得到了广泛应用。当前全固态高平均功率皮秒被动锁模激光器在工业、医疗、材料加工、科学研究、非线性频率变换等方面有着广泛的用途^[2],并已获得了相当的发展^[3~6]。总的来看,国外设计和生长半导体可饱和吸收镜已比较成熟,其高平均功率连续锁模激光器已经发展到很高的水平。国内关于半导体可饱和吸收镜锁模尤其是利用国产半导体可饱和吸收镜进行锁模^[7]的报道很少,输出功率水平也不高。本文采用国产半导体可饱和吸收镜,用 V 型腔对皮秒被动锁模进行了研究,实现了连续被动锁模,抑制了实验中观察到的直流分量;然后采用四镜 Z 型折叠腔获得了 1 W 的连续锁模输出。

2 理论分析

在半导体可饱和吸收镜被动皮秒锁模激光器中,影响激光器性能的半导体可饱和吸收镜宏观参量主要有:饱和通量 $F_{\text{sat},A}$,调制深度 ΔR ,非饱和损耗 ΔR_{ns} ,饱和和恢复时间 τ_A ^[2]。

半导体可饱和吸收镜可饱和吸收体的引入,使激光器容易运转在调 Q 锁模状态,脉冲功率和能量不稳定^[4]。随着抽运电流的增加,激光器运转一般经历三个状态:连续运转(CW),调 Q 锁模(QML),连续锁模(CWML)^[5]。在大多数应用领域,要求脉冲功率恒定的脉冲,因此利用半导体可饱和吸收镜实现被动连续锁模的一个主要问题是抑制调 Q 锁模。要抑制调 Q 锁模,腔内脉冲能量 E_p 应满足关系^[8]

$$E_p^2 > F_{\text{sat},L} A_L F_{\text{sat},A} A_A \Delta R, \quad (1)$$

其中 $E_p = P_{\text{intra}}/f$, P_{intra} 为腔内功率, f 为脉冲重复频率, $F_{\text{sat},L} = h\nu_L/2\sigma_L$ 为激光介质的饱和通量, A_L , A_A 分别为腔模在激光介质和半导体可饱和吸收镜上的光斑面积。由(1)式可知,要抑制调 Q 锁模及获得好的激光输出,可从以下几方面考虑:

1) 采用小饱和通量和适合大小调制深度的半导体可饱和吸收镜。为了避免半导体可饱和吸收镜损伤和产生多脉冲,腔内的脉冲通量不能太高,通常应该小于半导体可饱和吸收镜饱和通量的若干倍^[4],同时选择适合的调制深度。

2) 受激发射截面 σ_L 越大,激光介质的饱和通量 $F_{\text{sat},L}$ 越小,越容易抑制调 Q 锁模。Nd:YVO₄ 的受激发射截面是 Nd:YAG 的几倍,因此比 Nd:YAG 更容易实现连续锁模运转。另外 Nd:YVO₄ 对抽运光的吸收带宽较宽,吸收系数大,对抽运光温度变化不敏感,本实验中采用 Nd:YVO₄ 作为激光增益介质。

3) 通过谐振腔设计控制激光基模光斑在激光介质和半导体可饱和吸收镜上的面积大小。一般情况下 A_L 和 A_A 应尽量小以减小调 Q 锁模的阈值。但是过小的 A_L 又使抽运光的设计难度增加,基模振荡光和抽运光不容易良好匹配,不能有效利用抽运光能量,使激光器效率下降。另外,过小的 A_A 也容易导致半导体可饱和吸收镜上脉冲通量太大,达到其破坏阈值,损坏半导体可饱和吸收镜。

4) 采用小透过率的输出耦合镜,可以增大腔内的脉冲能量,从而抑制调 Q 锁模。但是激光器输出功率变小。

5) 脉冲重复频率 $f=c/2L$ 。腔长越长,脉冲重复频率越小,腔内的脉冲能量 E_p 越大,越容易抑制调 Q 锁模。

3 实验研究

V 型腔实验装置如图 1 所示。抽运源为武汉凌云公司生产的带尾纤输出的 808 nm 激光二极管(LD),芯径 400 μm ,数值孔径 0.22,最大输出功率 13 W。抽运光经过耦合透镜组,聚焦到掺杂原子数分数为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体上,尺寸 3 mm×3 mm×5 mm,一端镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜,另一端镀 1064 nm 增透膜。晶体用钢皮包裹,放在紫铜夹具内通水冷却,冷却水温保持在 13 $^{\circ}\text{C}$ 。距晶体 L_1 远处放置输出耦合镜 M,其曲率半径为 200 mm,对

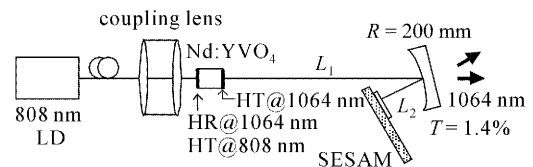


图 1 V 型腔实验装置图

Fig. 1 Schematic of V-shaped resonator setup

1064 nm 振荡光透过率为 1.4%。输出镜与半导体可饱和吸收镜的距离为 L_2 ，约为 10 cm，其间的折叠角尽量小，以减小由于折叠所产生的像散。调整 L_1 的长度可以改变腔长，调整 L_2 的长度可以改变半导体可饱和吸收镜上激光光斑的大小。

实验中所用的半导体可饱和吸收镜由中国科学院半导体所生长，因目前国内欠缺测量半导体可饱和吸收镜宏观参量的设备，该半导体可饱和吸收镜的参量不明，其特性需要在实验中摸索。

一般情形下，激光器极易运转在调 Q 锁模状态^[9]。基于理论分析，研究在采用小透过率输出耦合镜以增大腔内脉冲能量的基础上，不同的腔长激光器的性能。

在短腔时，不容易实现连续锁模运转，通常为调 Q 锁模。调 Q 锁模包络不规则起伏，调 Q 重复频率随时间不断变化，峰值功率极不稳定，有的脉冲具有相当高的峰值功率。图 2 所示的是在腔长为 0.3 m 时获得的比较规则的调 Q 锁模包络，一般情况下不太规则，由于 V 型腔稳区较小，在该腔长下，未能获得连续锁模。在调 Q 锁模状态下，脉冲通量很容易达到半导体可饱和吸收镜的破坏阈值。实验中观察到半导体可饱和吸收镜被损坏，因此调 Q 锁模是应该极力避免的锁模状态。

逐步增大腔长，在腔长分别约 0.66 m, 1.27 m,

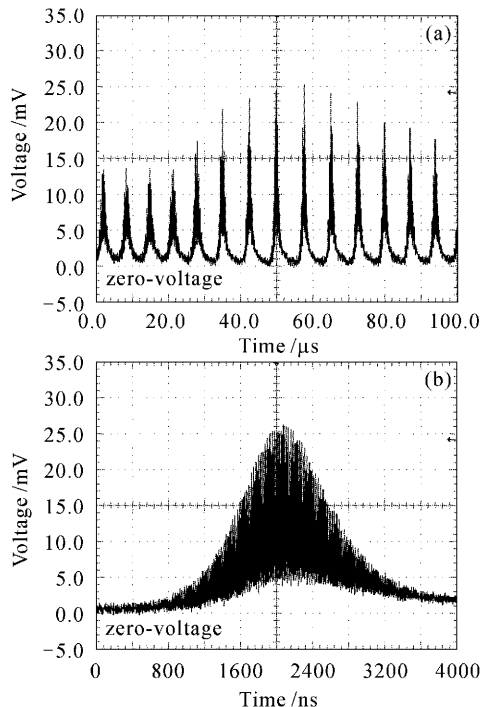


图 2 调 Q 锁模包络

Fig. 2 Q-switching mode-locking envelope

1.86 m 时，得到如图 3 所示的连续锁模波形，重复频率分别为 225.8 MHz, 117.6 MHz, 80.4 MHz，直流分量约占 52%, 13.6%, 0.3%。可以看出，随着腔长的增加，即随着重复频率的降低，直流分量大大减小，锁模的波形也越来越好，换用别的半导体可饱和吸收镜，也得到了相同的结果。关于直流形成的机理目前还没有弄清，相关文献也没有报道，有待进一步研究。在最好的锁模情况下，即腔长 1.86 m 时，用 Agilent 86142B 光纤光谱分析仪对连续锁模光谱进行了测量，如图 4 所示，光谱带宽约为 0.15 nm。

采用 V 型腔虽然获得了较好的连续锁模，但是输出功率太低，在腔长 1.86 m 时，功率仅十几毫瓦。考虑晶体的热效应，利用传输矩阵 ABCD 法改进并设计了新腔型，采用的四镜 Z 型折叠腔结构如图 5 所

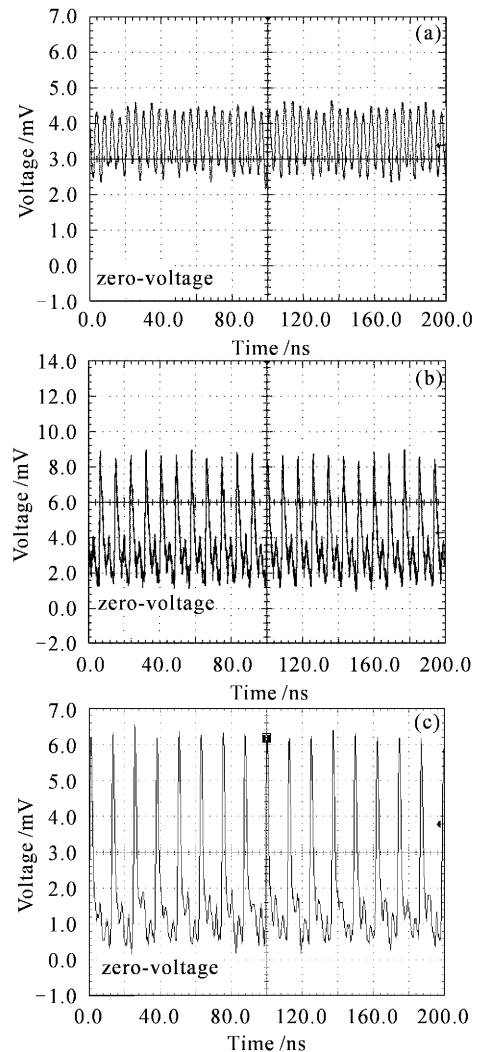


图 3 腔长 0.66 m (a), 1.27 m (b), 1.86 m (c) 时的波形图

Fig. 3 Oscilloscope waveform at 0.66 m (a), 1.27 m (b), and 1.86 m (c)

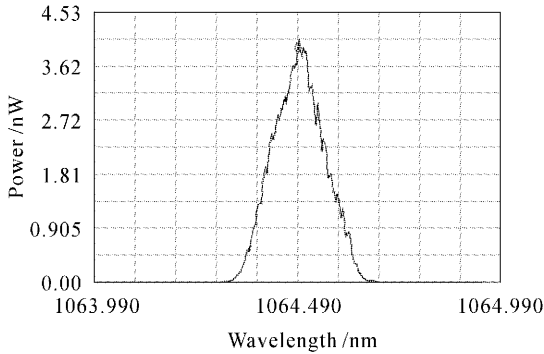


图 4 连续锁模光谱图

Fig. 4 Spectrum of CW mode-locked pulse

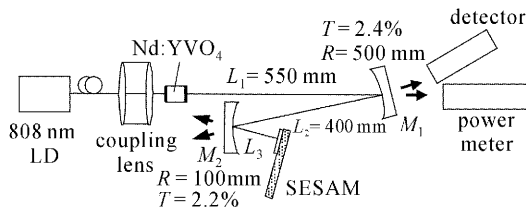


图 5 四镜 Z 型折叠腔装置示意图

Fig. 5 Schematic of four-mirror Z-cavity setup

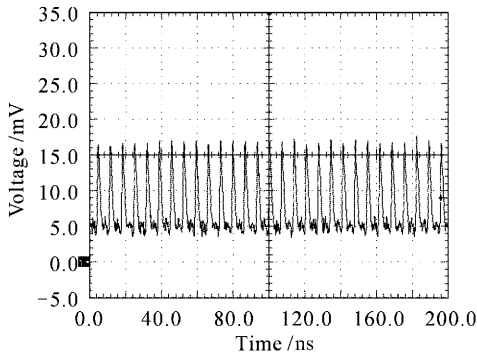


图 6 Z 型腔脉冲波形图

Fig. 6 Signal waveform of Z-cavity at the cavity length of 1 m

示。腔长约 1 m, 脉冲重复频率约 150 MHz, 由于凹镜的反射率不够高, 有两路很强的光从一个反射镜漏出, 通过镀高反膜和选择适合的输出镜可以改进该输出。随着抽运电流的增加, 热透镜效应越来越严重, 半导体可饱和吸收镜上的腔模半径由 100 μm 左右逐渐减小至 40 μm, Nd:YVO₄ 晶体上腔模半径为 300~500 μm。抽运电流为 21 A 时, 获得了总平均功率达 1 W 的稳定连续锁模脉冲, 但还存在一定的直流分量, 连续锁模波形如图 6 所示。

继续增大电流, 当单路光输出达 280 mW 时, 连续锁模仅维持了几秒钟, 功率直线下降, 移动半导体可饱和吸收镜的工作位置, 该现象重现, 说明处于工作位置的半导体可饱和吸收镜被损坏。原因可能是

半导体可饱和吸收镜的破坏阈值太低, 或者半导体可饱和吸收镜上的光斑半径太小, 功率密度过高。半导体可饱和吸收镜破坏时, 其上的脉冲通量约 1550 μJ/cm², 与国外半导体可饱和吸收镜相比, 其值较低。

图 7 所示的是 1.27 m V 型折叠腔和 1 m 四镜 Z 型折叠腔激光晶体和半导体可饱和吸收镜上的激光光斑半径与晶体热透镜焦距之间的关系比较图。从图中可以看出, V 型腔稳区较小, 在较高的抽运功率下进入非稳区, 激光停止振荡。另外, 在高功率端面抽运激光器中, 晶体的热效应严重, 除了热透镜效应之外, 热透镜产生的高阶球差将导致振荡光大的衍射损耗, 且该热致损耗将随着抽运功率的增大而增大, 激光振荡光斑半径应大小适中以克服热致损耗对激光器输出功率的影响。在我们的激光系统中, 抽运光半径约 200 μm, 在 V 型腔中, 激光晶体上的振荡光斑较 200 μm 大很多, 在考虑晶体热致损耗的情况下, 该腔型不利于高功率运转。而在 Z 型腔中, 基模光斑半径适中且变化缓慢, 稳区较大, 适合于高平均功率运转。以上结论得到了实验验证。

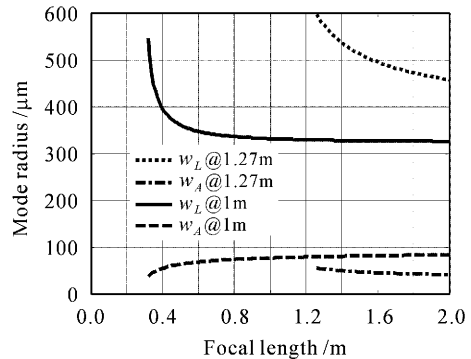


图 7 V 型腔, Z 型腔激光介质和半导体可饱和吸收镜上的光斑半径与热透镜焦距的关系比较图

Fig. 7 Calculated mode radii in the laser medium and on the SESAM as a function of the focal length of thermal lens in V-shaped cavity (at 1.27 m) and Z-shaped cavity (at 1 m)

4 结 论

采用中国科学院半导体所生长的半导体可饱和吸收镜, 实现了端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器的连续锁模运转。首先在 V 型腔结构中, 采用小透过率输出耦合镜和增大腔长的办法抑制了调 Q 锁模和减小了在实验中观察到的直流分量, 获得了光谱宽度约 0.15 nm, 重复频率 80.4 MHz 的连续锁模输出。改进腔型, 采用总腔长约 1 m 的四镜 Z 型折叠腔,

获得了平均功率达 1 W 的连续锁模脉冲,重复频率 150 MHz。

参 考 文 献

- 1 U. Keller, W. H. Knox, H. Roskos. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (23): 1377~1379
- 2 Ursula Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- 3 G. J. Spühler, R. Paschotta, U. Keller *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average power in a diffraction-limited beam [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(8): 528~530
- 4 G. J. Spühler, T. Südmeyer, R. Paschotta *et al.*. Passively mode-locked high-power Nd:YAG lasers with multiple laser heads [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**: 19~25
- 5 S. W. Tsai, Y. P. Lan, S. C. Wang *et al.*. High-power diode-end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector [C]. *SPIE*, 2002, **4630**: 17~23
- 6 E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner *et al.*. 60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 367~369
- 7 Chen Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 646~648
陈 檬,张丙元,李 港等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 646~648
- 8 R. Paschotta, J. Aus der Au, G. J. Spühler *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked lasers with high average power [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(Suppl.): S25~S31
- 9 Juan Du, Jingliang He, Jie Liu *et al.*. Q-switched mode-locked diode-pumped Nd:YVO₄ laser with a saturable Bragg reflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 275~277

掺钕陶瓷激光器获得 236 W 高功率激光输出

随着 1999 年陶瓷制备工艺的突破性进展,透明陶瓷作为激光增益介质取得了可与单晶相比拟的光学质量。Nd:YAG 单晶是目前应用最广泛的固体激光介质,然而传统提拉法生长的单晶的固有缺陷限制了它的进一步发展。同单晶相比,新型多晶陶瓷的制备具有许多显著的优点:1)易于构造;2)制备费用低;3)能够制备大尺寸和高浓度;4)能够制备多层和多功能结构;5)能够大规模生产。这些优点给予了陶瓷激光器更加灵活的潜在设计优势。研究表明,新型 Nd:YAG 透明陶瓷具有与 Nd:YAG 单晶同样优越的光谱特性、良好的化学稳定性以及优秀的物理和激光特性,完全有希望成为 Nd:YAG 单晶的替代品得到长足的发展和广泛的应用。目前国际国内对激光陶瓷的研究方兴未艾,很多研究小组都在致力于陶瓷激光器的研究以探索和开发陶瓷激光介质的潜能。最近,我们采用激光二极管(LD)阵列组侧面抽运的方式,获得了 236 W 准连续高平均功率激光输出,光-光转换效率达到 52.5%,斜率效率 60%。其高效率可与当今 Nd:YAG 单晶优秀的激光表现相媲美。

我们采用九条激光二极管阵列组从九个方向(间隔 40°)环绕陶瓷棒圆周排列的侧面紧包设计系统作为抽运源,每组线阵列包含五条准连续激光二极管阵列。单条激光二极管阵列以重复频率 1 kHz,脉宽 200 μs 准连续运转,输出波长在 808 nm 附近。当输入电流为 60 A 时,最大峰值输出功率为 50 W。九组激光二极管阵列侧面对称紧包排列的方式使得棒内抽运光强辐射更加均匀,其增益分布与激光谐振腔的低阶模实现最优化的交叠匹配。这套光学传输系统能够将大于 90%

的抽运光有效地导入 Nd:YAG 激光棒。同时,准连续的抽运方式使得陶瓷棒能够得到更好的冷却效果。

激光谐振腔为平平腔,腔长约 200 mm。后腔镜对 1064 nm 全反,并备有多片不同透过率的前腔镜。实验采用日本 Konoshima 公司制造的 Nd:YAG 透明陶瓷样品,掺杂原子数分数为 1%,直径 5 mm,长度 75 mm。陶瓷棒的侧面打毛浸液冷却,冷却水温设为 16 °C。通光面为平行平面,抛光并镀有 1064 nm 的增透膜。

当抽运平均功率约 48 W 时,开始出现波长为 1064 nm 的激光输出。继续增加输入电流至 60 A,总抽运平均功率达到 450 W。通过更换不同的输出耦合镜来寻找最佳耦合输出。当采用透过率为 22%的输出耦合镜,获得最佳耦合输出,输出激光的最大平均功率为 236 W,光光转换效率达到 52.5%,斜率效率为 60%。实验测得的激光输入功率与抽运功率形成良好的线性关系。且在实验过程中未见饱和现象,这意味着采用更高功率的激光二极管抽运源,激光输出功率有望得到进一步提高。此外,我们还采用 CCD 观测了输出激光的光斑形状并估算了其光束质量, M^2 较大。

对大功率 Nd:YAG 棒,热透镜效应和热致双折射效应会导致激光束的畸变,降低激光器的效率,限制其输出功率。我们将在今后的研究中对其进行探索。下一步我们将设计更好的激光谐振腔系统以进一步提高输出功率和改善陶瓷激光器的输出激光光束质量。

楼祺洪,朱小磊,漆云凤,纪江华
中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800
收稿日期:2005-05-13