

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0022-04

高功率高光束质量腔内倍频绿光激光器

马毅 崔玲玲 王卫民 高剑蓉

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对高功率腔内倍频激光器光束质量影响因素进行了初步分析,提出了谐振腔优化设计、热效应补偿等改善光束质量的措施并进行了相应的实验研究。采用光束质量控制措施后,在 10 kHz 重复频率下,利用优质 8 mm×8 mm×12 mm KTP 晶体获得了 63.7 W, $M^2 \approx 9.65$ 的高光束质量倍频绿光输出,光-光转换效率达到 9.7%;在 15 kHz 重复频率下,利用优质 8 mm×8 mm×30 mm LBO 晶体获得了 79 W, $M^2 \approx 6.46$ 的高光束质量倍频绿光输出,光-光转换效率达到 9.8%。

关键词 激光器;激光技术;腔内倍频;光束质量控制

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0022

High Average Power and High Beam Quality Intracavity Frequency Doubled Green Laser

Ma Yi Cui Lingling Wang Weimin Gao Jianrong

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Preliminary influence factor analysis of beam quality of high-average-power and high-beam-quality intracavity frequency doubled green laser is presented. The methods of improving beam quality such as optimal design of resonator cavity and compensation of thermal effects are described. The corresponding experimental research is done. With the control of beam quality, the green laser power of 63.7 W is obtained in a 8 mm×8 mm×12 mm KTP crystal with an M^2 value of 9.65 and an optical-to-optical conversion efficiency of 9.7% at a pulse repetition rate of 10 kHz, and the green laser power of 79 W is generated in a 8 mm×8 mm×30 mm LBO crystal with an M^2 value of 6.46 and an optical-to-optical conversion efficiency of 9.8% at a pulse repetition rate of 15 kHz.

Key words lasers; laser technique; intracavity frequency doubling; beam quality control

1 引言

在激光加工等民用领域以及光电对抗等军事领域广泛的需求牵引下,二极管激光器(DL)抽运 Nd:YAG 腔内倍频绿光激光器得到了较快发展,近年来,国内外均有百瓦级高功率腔内倍频绿光激光器的报道^[1~6]。但是,由于激光介质热效应等原因使高功率运转下的绿光激光器都为多模输出,光束质量难以保持较高的水平,从而制约了高功率腔内倍频绿光激光器的广泛应用和发展速度,也难以见到商用化百瓦级高光束质量腔内倍频绿光激光器。

为了推进百瓦级腔内倍频绿光激光器的实用化发展,拓宽其在军用和民用领域的应用范围,在提高输出功率的同时,应加强光束质量控制,使其满足应用需求。本文对高功率腔内倍频激光器光束质量影响因素进行了初步分析,提出了改善光束质量的措

施并进行了相应的实验研究,结果表明,采用多种光束质量控制措施后,腔内倍频激光器可以在高功率水平下保持较好的光束质量。

2 激光器布局与光束质量影响因素

激光器光路布局如图 1 所示。采用双棒串接直线谐振腔结构,激光介质选用直径为 4 mm 的 Nd:YAG 圆棒,抽运模块为自行研制的 5 边侧抽运模块,每个抽运模块使用了 20 只连续 DL。腔内插入的谐波分色镜使腔内双向倍频绿光从一个方向输出。

高功率运转条件下,影响激光器输出光束质量的因素主要包括谐振腔结构、激光棒热效应、激光棒抽运增益分布均匀性以及倍频晶体等光学元件的质量等。首先,谐振腔的模参数直接影响腔内振荡光的模式分布,从而影响输出激光的光束质量,故谐振

腔结构是影响光束质量的关键因素。而高功率运转下激光棒的热效应以及抽运增益分布的均匀性对光束质量的影响也不容忽视,这是因为,在高功率抽运强度和强制冷却的双重作用下,激光棒中将产生较大的温度梯度和应力双折射,棒端面也将发生畸变,在这些因素的综合影响下,激光棒已经成为具有大像差的双焦正透镜,热透镜使谐振腔模式结构受到

影响,大像差特性将引起波前畸变,而激光棒不均匀的抽运产生的非球面像差将使波前畸变进一步加大,最终影响输出激光的光束质量。另外,倍频晶体等光学元件的光学均匀性将直接影响谐振腔振荡光的波前分布,而光学元件对基频激光和倍频激光的线性吸收和非线性吸收产生的热效应可改变谐振腔的模式结构,从而引起光束质量的退化。

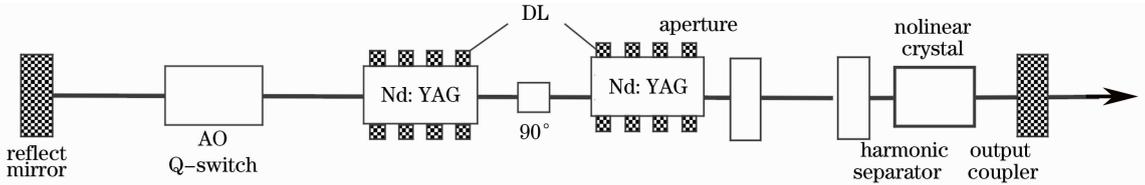


图1 腔内倍频激光器布局图

Fig.1 Layout of the intracavity frequency doubled green laser

3 光束质量控制

为了使激光器在高功率水平下保持较高的光束质量,需要采用谐振腔优化设计、热效应补偿等多种光束质量控制措施。

3.1 谐振腔优化设计

具有较大基模体积的谐振腔是获得高功率高光束质量激光输出的前提。选择图1所示的平平对称谐振腔结构。借助 LASCAD 分析软件(该软件全称为 Laser cavity analysis & design,可用于分析驻波腔、环形腔等的模式分布、束腰大小、稳定性等谐振腔的模参数,更详细的介绍请访问 www.las-cad.com。)对谐振腔进行了优化设计。

激光棒在高功率运转下表现出的热透镜效应将影响谐振腔的模参数。为了简化,可将工作时的激光棒等效为一薄透镜,当抽运电流范围为 20~28 A 时,根据文献[7]中(7.29)式可以获得每根激光棒的热透镜焦距变化范围为 757~366 mm (对应抽运功率变化范围为 189~391 W)。当腔长为 870 mm (热透镜主面到腔镜的距离为 335 mm,两个热透镜主面之间

的距离为 200 mm)时,利用 LASCAD 软件,获得了基模光斑半径在腔镜和激光棒上的分布曲线、谐振腔的稳定性图以及基频激光光束质量 M^2 (将多模光斑的半径设计为激光棒半径的四分之三)随抽运电流的变化曲线,分别如图2和图3所示。从图2,图3可以看出,该谐振腔可以获得较好的稳定性,而且光束质量与激光棒的热透镜效应密切相关,在较高抽运强度下,激光棒中较强的热透镜效应使棒中的基模体积较大,从而可以获得较好的光束质量。

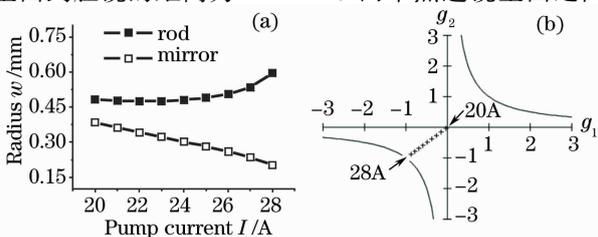


图2 基模光斑半径与抽运电流的关系曲线(a)与谐振腔稳定性图(b)

Fig.2 Dependence of fundamental mode radius on pump current (a) and stability diagram (b)

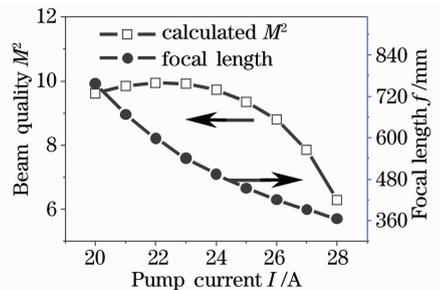


图3 热透镜焦距、光束质量 M^2 (@1064 nm)与抽运电流的关系曲线
Fig.3 Dependence of thermal lens and beam quality M^2 (@ 1064 nm) on pump current

3.2 其他控制措施

热效应补偿。由于高功率运转下热效应使激光棒成为具有大像差的双焦透镜,棒中径向和切向偏振光具有不同的焦距。为了补偿激光棒的热效应,在双棒中间插入 90°石英旋转器,在一根激光棒中产生的径向与切向偏振光的相位延迟将在另一根棒中得到较好的补偿。

高阶横模抑制。高功率运转条件下,激光增益较强,高阶横模极易形成激光振荡,为了减少参与振

荡的高阶横模的阶数,在谐振腔内插入适当尺寸的限制光阑,这将有利于光束质量的改善。

抽运增益分布优化。通过抽运模块的优化设计和激光晶体掺杂浓度的优化选择,可以在高功率抽运条件下使激光棒获得比较均匀的抽运分布。图4是实际测量获得的激光棒截面的二维荧光分布图(Nd掺杂原子数分数为0.6%)。

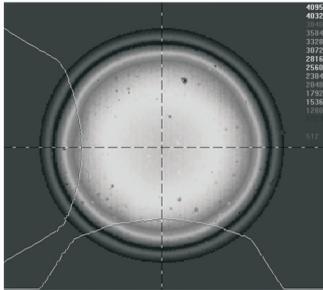


图4 $\phi 4$ mm Nd:YAG 棒截面的二维荧光分布图

Fig. 4 Measured fluorescence distribution on the cross section of $\phi 4$ mm Nd:YAG rod

为了进一步控制激光光束质量,在选择倍频晶体等光学元件时注意质量控制。

4 实验结果与分析

首先对谐振腔的基频激光性能进行了研究(输出镜的反射率为50%@1064 nm),实验获得的基频激光输出功率、光束质量与抽运电流的关系曲线以及不同尺寸的光阑对输出功率和光束质量的影响曲线分别如图5和图6所示。从图5可以看出,插入 90° 石英旋转器后,输出功率得到了提高,谐振腔的稳区范围有所扩大,光束质量也得到了改善,这得益于激光棒的热效应得到了有效的补偿;另外,基频输出光束质量随抽运电流的变化趋势与前面的分析基本吻合。从图6可以看出,加入光阑后,光束质量有明显改善,而且光阑的孔径越小,光束质量改善越明显,但同时输出功率也有不同程度的降低。实验表明,在双棒间插入 90° 石英旋转器,腔内插入限制光阑是改善光束质量的有效措施,平平谐振腔可以在较高功率水平下获得较好的光束质量。

最后,在采用直径2.9 mm的限制光阑的情况下,对国产优质KTP晶体(晶体尺寸为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 24.8^\circ$)和LBO晶体(晶体尺寸为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, $\theta = 25.6^\circ$, $\phi = 90^\circ$)的倍频性能进行了比较,倍频时均采用II类临界相位匹配,匹配温度均为 80°C 。在谐振腔不变的情况下,采用KTP晶体倍频的最大输出功率为

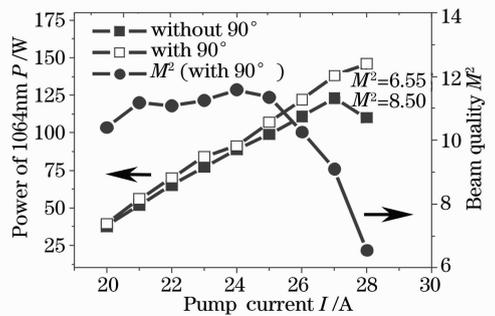


图5 1064 nm 输出功率与光束质量及抽运电流的关系曲线

Fig. 5 Dependence of output power and beam quality M^2 @ 1064 nm on pump current

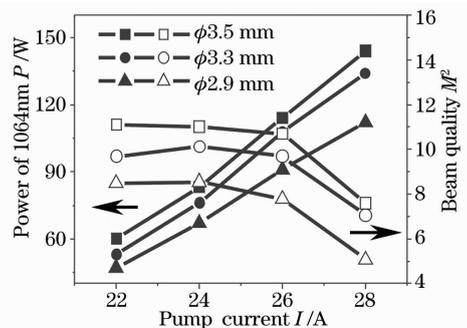


图6 光阑尺寸对1064 nm 输出功率与光束质量的影响

Fig. 6 Influence of aperture size on output power and beam quality M^2 @ 1064 nm

$63.7\text{ W}@25.5\text{ A}$,光-光转换效率达到了9.7%,采用LBO晶体倍频的最大输出功率达到 $81\text{ W}@28.5\text{ A}$,光-光转换效率达到了10.0%,详细对比数据见图7(a)。为了分析倍频晶体的热效应,采用与端抽运棒的分析模型类似的分析方法^[8],可以估算倍频晶体产生的热透镜焦距为

$$f = \frac{(2\pi\omega_p^2 K_c)}{[(P_{1064}\alpha_{1064} + P_{532}\alpha_{532})L\chi]}, \quad (1)$$

式中 ω_p 为倍频晶体处光斑半径, K_c 为热导率, P_{1064} , P_{532} 分别为作用到倍频晶体上的基频光和倍频光功率, α_{1064} , α_{532} 分别为倍频晶体对基频光和倍频光的吸收系数, L 为倍频晶体长度, χ 为晶体的热光系数,计算倍频晶体热透镜焦距所采用的参数与计算结果见表1,其中(a)抽运电流为26 A;(b)抽运电流为28 A。根据表1的计算数据,利用LASCAD软件获得的倍频时谐振腔稳定性图如图7(b)所示。从表1和图7可以看出,在高功率条件下,KTP晶体严重的热效应使谐振腔的结构发生了明显的变化,谐振腔稳定区域明显变窄,在抽运电流为26A时谐振腔已经处于稳区的边缘,与KTP晶体比较,LBO晶

体的热效应较小,对谐振腔的影响可以忽略。

表1 计算倍频晶体热透镜焦距所采用的参数与结果

Table 1 Selected parameter and result of calculated focal length of nonlinear crystal

Crystal	ω_p /cm	K_c/W /(cm·K)	α_{1064} /cm ⁻¹	α_{532} /cm ⁻¹	χ /10 ⁻⁶ K ⁻¹	P_{1064} /W	P_{532} /W	L /cm	f /cm
KTP	0.08	0.13	0.005	0.015	34	320 ^(a)	58 ^(a)	1.2	51.9 ^(a)
LBO	0.08	0.10035	0.0003	0.0006	-1.8	$\begin{cases} 320^{(a)} \\ 390^{(b)} \end{cases}$	$\begin{cases} 60^{(a)} \\ 75^{(b)} \end{cases}$	3.0	$\begin{cases} -5661.2^{(a)}, \\ 4612.8^{(b)} \end{cases}$

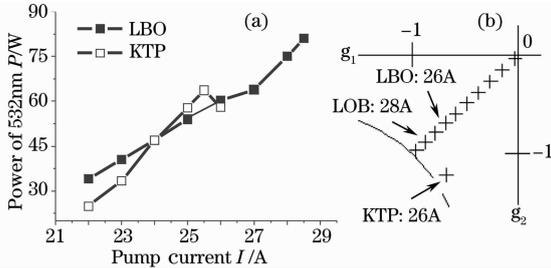


图7 倍频输出功率对比(a)与谐振腔稳定性图(b)

Fig. 7 Output comparison @532 nm (a) and stability diagram (b)

效应补偿、限制光阑等改善光束质量的措施后,激光器可以在较高的输出功率水平下保持较好的光束质量。采用平平对称谐振腔设计,利用腔内倍频获得了较高功率和较高光束质量的绿光输出:在 10 kHz 重复频率下,利用优质 8 mm×8 mm×12 mm KTP 晶体获得了 63.7 W, $M^2 \approx 9.65$ 的高光束质量倍频绿光输出,光-光转换效率达到了 9.7%;在 15 kHz 重复频率下,利用优质 8 mm×8 mm×30 mm LBO 晶体获得了 79 W, $M^2 \approx 6.46$ 的高光束质量倍频绿光输出,光-光转换效率达到 9.8%。

倍频输出光斑分布与光束质量对比如图 8 所示,可以看出,采用 LBO 晶体倍频可以获得更好的光束质量,而且输出光束中也没有出现采用 KTP 倍频时明显的“双光斑”现象,这要归因于 LBO 晶体较小的热效应:LBO 晶体的热畸变对振荡模式的影响较小,因此可以获得更高的光束质量;而较长的热透镜焦距也避免了双向倍频绿光的束腰位置不同而引起“双光斑”现象。

参 考 文 献

- Chang J. J., Dragon E. P., Bass I. L.. 315 W pulsed-green generation with a diode-pumped Nd:YAG laser[C]. *CLEO '98*, 1998, CPD2: 2~4
- Konno S., Kojima T., Fujikawa S. et al.. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 105~107
- Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo et al.. 162W laser diode-pumped Nd:YAG intracavity-doubled laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1460~1462
- Xu Degang, Yao Jianquan, Guo Li et al.. 104 W laser diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG green light laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 925~928
- Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun et al.. 120 W diode-pumped green Nd:YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(s0): 7~10
- Geng A. C., Bo Y., Bi Y et al.. High beam quality green generation with output 140 W based on thermally-near-unstable flat-flat resonator [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(1): 125~127
- W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 364
- Chénaïs S., Balembois F., Druon F. et al.. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-Part I: Theoretical analysis and wavefront measurements [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(9): 1217~1234

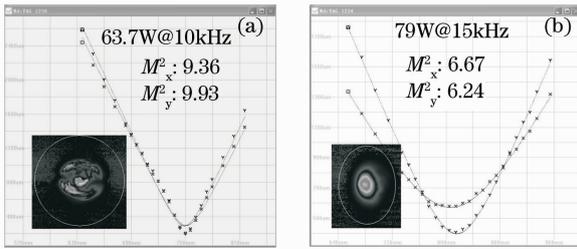


图8 KTP晶体(a)和LBO晶体 (b)倍频输出光束质量对比

Fig. 8 Comparison of beam profile and beam quality between KTP (a) and LBO (b)

实验结果表明,采用多种光束质量控制措施后,腔内倍频激光器可以在高功率水平下保持较好的光束质量。但是,同国内外同类研究的最高水平相比,该激光器光束质量水平和光-光转换效率还有一定的差距,需要进一步优化和改进。

5 结 论

对于腔内倍频激光器,采用谐振腔优化设计、热