文章编号：0258-7025(2002)Supplement-0115-04

高重复频率高峰值功率高光束质量 Nd:YAG 倍频激光器

张世文 唐晓军 孙维娜 杜 涛 赵之浩
(华北光电技术研究所，北京 100015)

提要 研究设计了高效均匀抽运、均匀冷却的聚光腔；采用双 YAG 棒中间加 90°旋光器，输出镜采用特制的变反射率介质膜与全反镜构成非稳定谐振腔，使振荡级在较高输出能量时获得近衍射极限的激光输出；放大级采用光学性能一致的 YAG 棒（"姊妹棒"）中间加 90°旋光器构成减少热退偏的放大单元，经过两个放大单元及相应的级间隔离光学扩束、匹配等减小光束畸变，获得了高重复频率、高光束质量、高峰值功率激光输出。其性能指标为：1）输出峰值功率：$\lambda_1=1064$ nm，$P_1=388$ MW/p，$\lambda_2=532$ nm，$P_2=158$ MW/p；2）脉冲宽度：$\tau_1=8$ ns($\lambda_1=1064$ nm)，$\tau_2=6.8$ ns($\lambda_2=532$ nm)；3）光束质量：$M^2=1.62$(1.6 倍衍射极限)；4）重复频率：$f=61$ Hz；5）连续工作时间：$t=20$ min。

关键词 高峰值功率，高重复频率，高光束质量，YAG，倍频激光器
中图分类号 TN248.1+3 **文献标识码** A

High Repetition Frequency, High Peak Power and High Beam Quality Nd:YAG Doubling Frequency Laser

ZHANG Shi-wen TAN Xiao-jun SUN Wei-na DU Tao ZHAO Zhi-hao
(*North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing* 100015)

Abstract This paper has designed a high effecient uniformly pumping and cooling reflector; Using dual YAG rods having consistent optical properties into which a 90° rotator is inserted, and special output mirror having a variable reflectivity coating forming an unstable resonator with a total reflection mirror, the output beam from resonator with near diffraction limit under high pulse energy is got; the amplifier also uses dual YAG rods into which a 90° rotator is inserted for decreasing thermal depolarization, by amplifying, optical isolating, beam expanding and phase matching, a high repetition frequency, high beam quality and high peek power is achieved. The following are details: 1) pulse peek power: $\lambda_1=1064$ nm, $P_1=388$ MW/p, $\lambda_2=532$ nm, $P_2=158$ MW/p; 2) pulse width: $\tau_1=8$ ns($\lambda_1=1064$ nm), $\tau_2=6.8$ ns($\lambda_2=532$nm); 3) beam quality: $M^2=1.62$; 4) pulse repetition frequency: $f=61$ Hz; 5) continuous work time: $t=20$ min。

Key words high peek power, high repetition frequency, high beam quality, YAG, doubling frequency laser

1 引 言

高重复频率高峰值功率固体激光器的平均功率较高，激光介质的热透镜效应、热致双折射引起光束畸变和热退偏，限制了峰值功率及光束质量的提高。

灯抽运固体激光器在高重复频率运转时，因激光介质吸收抽运光使温度升高。加热与冷却的共同作用导致介质内形成一定的温度分布。在均匀加热和热导率与温度无关假设下，棒状介质可等效成透镜。Konelnik[1]建立了分析这种含透镜谐振腔的理论。Kortz[2]等人对高功率抽运下的含热透镜腔进行了详尽的分析，得到了输出功率与光束参数积关系的理论表达式[3]。然而大量的实验结果与理论相差较远。主要原因是高功率抽运下介质光学特性比较复杂。

闪光灯抽运棒状 Nd:YAG 激光器中转移到 0.3 μm～1.5 μm 波段的辐射功率约 50%，其中激光棒吸收约为 8%，激光棒吸收的功率中用于产生受激发射的功率约≤3%，其余即为棒的热耗散[4]。造成激光介质的热效应。

在重复频率工作情况下，热弛豫时间

$$\tau = r_0^3/4k' \tag{1}$$

τ 是温度随时间变化达到稳定分布的判据。r_0 为棒的半径，k' 为热扩散率。当抽运脉冲间隔时间远小于弛豫时间时，温度分布可视为稳态。对 Nd:YAG 棒一般认为重复频率大于10 Hz 后温度分布即视为稳态分布。

在考虑了折射率随温度和应力变化及棒端面曲率畸变的综合效应后，热焦距表达式为：

$$f = \frac{kA}{P_h}\left[\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T} + \alpha C_r C_\varphi n_0^3 + \frac{\alpha r_0(n_0-1)}{l}\right]^{-1} \tag{2}$$

式中 A 为棒的截面积，P_h 为棒耗散功率，$\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 是折射率随温度的变化，C_r、C_φ 为介质光弹性系数的函数，对径向和切向具有不同的数值，造成热致双折射现象。第三项表征端面效应，对 Nd:YAG 折射率随温度的变化是构成热透镜的主要因素。折射率随应力的变化约占20%，端面效应小于6%。

热效应的存在不仅限制了输出功率，更主要的是致使激光束的光束质量产生很大的畸变和严重的退偏，造成倍频效率下降。在激光器系统设计中要尽量减小由热效应引起的这些不利因素。

2 方案的选取

2.1 均匀抽运、均匀冷却的抽运腔

激光介质的热畸变影响光束质量，为了减小在高功率抽运下由于抽运不均匀引起的激活介质的热畸变，应实现均匀抽运。为此我们研究了聚光腔的抽运均匀性及冷却均匀性，并通过实验测量对比其特性。测量聚光腔抽运特性的实验装置，如图1。

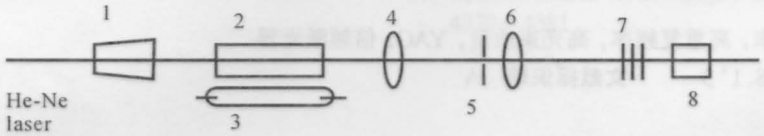
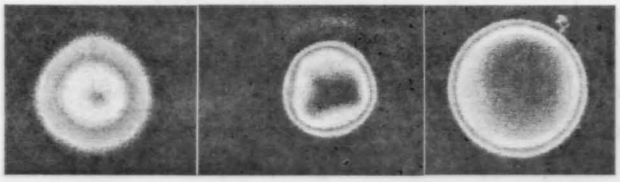


图1 测量聚光腔抽运特性的实验装置. 1:扩束镜;2:Nd:YAG 棒;3:氙灯;4:透镜 1;5:光阑;6:透镜 2;7:衰减器

Fig. 1 Experimental set-up for the measurement of pumping uniformity. 1: beam expanding telescope; 2:Nd:YAG rod; 3:flash-lamp;4,6:lens;5:diaphragm;7:attenuater;8:CCD

图1由一实共焦望远镜、一个位于望远镜实焦点上的小孔光阑和一位于透镜的后焦平面上的CCD组成，通过分析CCD采集得到的图像可得到聚光腔抽运均匀性。金属反射体聚光腔(单椭圆腔)、玻璃聚光腔及陶瓷漫反射聚光腔，在高重复频率、高功率下抽运均匀性如图2所示。



(a) (b) (c)

图2 聚光腔抽运均匀性比较. (a) 金属腔; (b) 玻璃腔; (c) 陶瓷腔

Fig. 2 Comparison of the pumping uniformity (a) metal cavity; (b) glass cavity; (c) earamic cavity

2.2 振荡级的谐振腔

振荡器的谐振腔考虑到为获得较大能量输出要求有足够的模体积，因此选用非稳腔。按几何光学分析方法，我们选用的是望远镜型虚共焦非稳腔，满足：

$$R_1/2 + R_2/2 = L \tag{3}$$

共轭像点的位置为：

$$I_1 \to \infty, \qquad I_2 \to R_2/2 \tag{4}$$

即一个像点在无穷远，另一个像点在公共焦点上，相应的一个几何自再现波形是平面波，另一个是以公共焦点为虚中心的发散球面波，如图3两个像点都在腔外，且能获得一个平面波输出，这是虚共焦腔的突出优点。

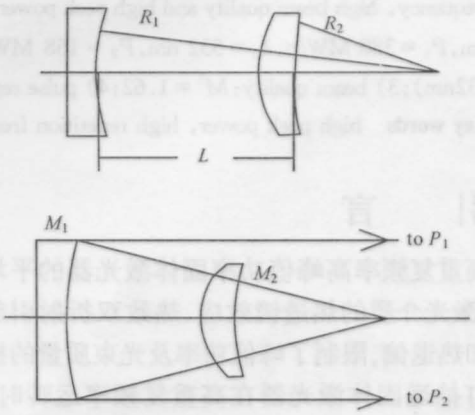


图3 虚共焦非稳腔的共轭像点及几何自再现波. R_1:全反镜半径; R_2:输出镜半径; L:腔长

Fig. 3 The virtual confocal unstable resonator and its geometry self-consistent wave

由于要求光束质量近衍射极限光束输出，以往输出镜采用硬边膜，非稳腔近场为一圆环，远场光斑旁瓣波较明显，光束质量不够理想。若采用渐变反射软边膜，可很好地克服硬边膜的衍射效应，从而获得近衍射极限光束输出。

具有超高斯线型反射率分布的变反射镜反射率线型定义为：

$$R(r) = R_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_m}\right)^n\right] \tag{5}$$

R_0 为中心反射率，r 为极坐标半径，ω_m 为镜上光斑的尺寸，n 为超高斯阶数。

按含热透镜的光学谐振腔等价分析法，对模式及失谐特性进行了分析，考虑到振荡级输出的能量大，因此输出光斑横向分布最好呈平顶。当 $R_0M^2 = 1$ 时，光强分布均匀，光束通过的元件不易损伤，另一方面能量集中，非线性效率会提高。从能量提取的角度来说 n 值不能选得太小，太小能量提取率低，但也不能选得太大。太大有两方面的缺点：1）输出光斑中心凹陷；2）超高斯近于硬边光阑，使光束质量下降。

我们对不同 R_0M^2 值，高斯光束和硬边镜光斑输出情况加以讨论，研究其各自的远场分布，从而为谐振腔的优化设计提供理论依据。

中心反射率 R_0 的选取和器件工作方式有关，对 Q 开关激光器而言也与抽运特性有关。R_0 太小，则阈值高，热效应明显，光束质量下降。若 R_0 太大，则阈值低，但耦合输出变小，腔内功率密度变大，易损伤元件。

放大倍率 M 的选取应注意到模式鉴别及激光器的阈值。放大倍率可选取 $2 < M < 4$。变反膜的设计曲线见图 4。振荡级光路图如图 5 所示。

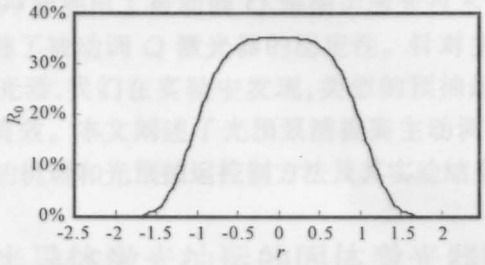


图4 变反膜的设计曲线

Fig. 4 Curve of the VRM

2.3 放大级单元

放大级单元的设计要尽量缩小体积和提高可靠性，选用了两级放大单元。每个单元为两支 Nd:YAG 棒（通常两级单通放大器），考虑为消除光束畸变，每放大器单元加 90°石英旋光器组成热退偏补偿的放大器单元。放大器单元的原理见图 6。

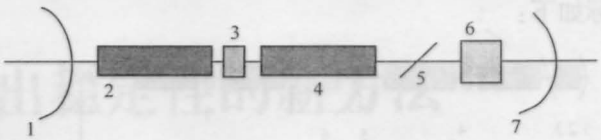


图 5 振荡级光路图. 1:输出镜;2、4:YAG;3:旋光器;5:偏振片;6:普克尔盒;7:全反镜

Fig. 5 Rod imaging unstable resonator. 1:output mirror; 2,4:YAG;3:90° quartz rotator;5:polarizer;6:Pockels cell;7:total reflection mirror

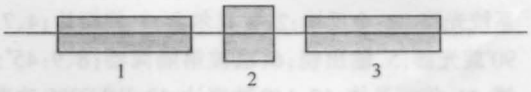


图 6 热退偏补偿的放大级单元. 1、3:YAG; 2:旋光器

Fig. 6 Schematic diagram of the amplifier for compensating thermally induced de-polarization. 1,3:YAG;2:90° quartz rotator

根据理论推导[5]可知，该补偿原理是将第一根 YAG 的径向偏振光，经 90°石英旋光器，将其变为第二根 YAG 棒的切向偏振光，而第一根棒的切向偏振光经 90°石英旋光器变为第二根棒上的径向偏振光，从而补偿了热退偏，同时为了在高重复频率运转下消除热透镜效应，对 YAG 棒的端面修凹。

上述的理论分析基础是以两根 YAG 的光学特性一致为前提，因此我们将一根长的 YAG 棒中分为两根，并在激光器中按确定的相对方位放置。使单元的偏振度达到 90%。

2.4 隔离器

为了防止后级的反馈光对振荡器的影响，在振荡级和第一放大级之间加一法拉第隔离器，隔离器由 45°法拉第旋光器和两个偏振器组成。

2.5 大功率的倍频器

在高功率下对 1064 nm 光倍频可选用的非线性晶体有 KTP，BBO 及 LBO 等。对倍频晶体的倍频效率的比较，可知 BBO 晶体是本方案的优选者之一，而 LBO 非临界相位匹配抗损伤阈值高，其倍频效率也可达到 BBO 的水平。KTP 晶体倍频效率较高，但抗激光损伤阈值偏低，在高功率下易损伤。

3 实验与结果

3.1 实验装置

实验装置的光路图如图 7。

3.2 实验结果

实验选定各种实验条件在样机上达到的技术指

标如下：

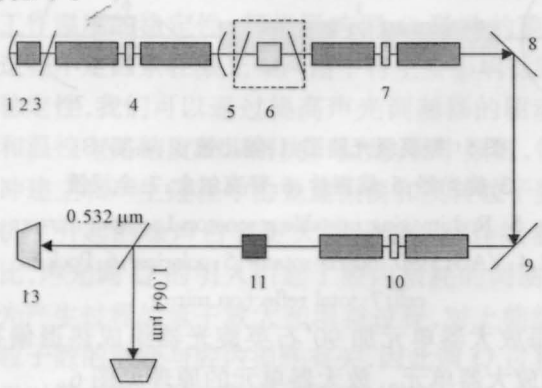


图7 系统光路. 1:全反镜;2:普克尔盒;3:偏振片;4、7、10:90°旋光器;5、输出镜;6:法拉第隔离器;8、9:45°全反镜;11:倍频晶体;12:148 功率计;13:P&E200 功率计

Fig.7 Schematic of the experimental set-up. 1: total reflection mirror; 2: pockels ceel; 3: polarizer; 4, 7, 10: 90° quartz rotator apparatus; 5: output mirror; 6: Faraday isolator; 8, 9: 45° reflection mirror; 11: doubling crystal; 12: 148 power meter; 13: P&E200 power meter

1) 峰值功率：$\lambda_1=1.064\ \mu m$, $P_1=388$ MW/p, 3.1 J/p; $\lambda_2=0.532\ \mu m$, $P_2=158$ MW/p, 1.1 J/p;

2) 脉冲宽度(半峰值宽度) $\tau_1=8$ns, $\tau_2=6.8$ns;

3) 光束质量: $M^2=1.62$;

4) 重复频率 $f=61$ Hz;

5) 连续工作时间 $t=20$ min。

4 讨 论

1) 高重复频率、高峰值功率、高光束质量固体激光器是由一级振荡加多级放大构成的，其抽运的抽运均匀性、冷却均匀性是至关重要的。由抽运功率决定不同的抽运腔结构及材料，本系统采用三种规格的漫反射聚光腔。

2) 提高光束质量首先要有高光束质量的振荡光源，我们设计了双棒加旋光器的输出镜为VRM膜非稳腔振荡器，实现了近衍射极限输出的激光源。

3) 为保持经放大后的激光束光束质量，减小热畸变，放大级选用双棒加旋光器及修凹YAG棒，提出了姊妹棒的方案达到了热补偿的目的。

4) 在放大的过程中消除级间反馈是应充分重视的，尤其是对振荡级与放大级间加隔离器是解决放大级与振荡级间的反馈耦合的关键。

5) 大功率倍频时要获高功率倍频光的稳定输出，应做到基波高偏振度、高光束质量，同时应对倍频器的温度控制在最佳状态。将LBO的非临界相位匹配的温度控制在147.4 ℃，达到了稳定输出，但仍有能量起伏。而对KTP晶体控温在80 ℃时，可获得较为稳定的激光输出，但功率密度达300 MW/cm^{2}附近产生了破坏迹象。

参 考 文 献

1 H. Konelnik. *Bell Syst. Tech.*, 1965, **44**:455

2 H. P. Kortz *et al.*. Stability and Beam Divergence of Multimode Lasers with Internal Variable

3 H. Weber *et al.*. High Power Nd-Laser for Industrial Applications. *Proc. SPIE*, 1986, **650**:92~100

4 W. 克希奈尔. 固体激光工程(第二版). 北京：北京科学出版社, 1983. 348

5 Lü Qitao, N. Kugler. A Novel Approach for Compensation of Birefringence in Cylindrical Nd:YAG Rods. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 57