

二极管抽运的高功率、倍频 Nd:YAG 激光器

周寿桓 姜东升 赵 鸿

(华北光电技术研究所 北京 100015)

提要 报道二极管抽运高重复频率 Nd:YAG 激光器的计算机模拟和实验研究结果,根据模拟所选取的元件参数与实际结果非常接近。采用 KD*P 电光 Q 开关,在 200 Hz 工作重复频率时,获得每个脉冲输出 35 mJ,8 ns (1064 nm),经 KTP 倍频,每个脉冲输出 20 mJ,7 ns(532 nm),低阶模。扼要介绍了激光器几个关键部分的设计要点和结构。

关键词 二极管抽运,侧面抽运,高重复频率,倍频, Q 开关

中图分类号: TN 248.1⁺3

文献标识码: A

Diode-pumped High Power, Frequency Doubling Nd:YAG Laser

ZHOU Shou-huan JIANG Dong-sheng ZHAO Hong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015)

Abstract The computer simulation and experimental results of diode pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser are reported. According to the calculations and the experimental results, the parameters of components were determined. By using KD*P crystal for E-O Q-switching, an 8 ns Q-switched laser pulse output of 35 mJ was obtained under pulse repetition rate of 200 Hz. By using KTP crystal for SHG, the double frequency laser output of 20 mJ at 7 ns pulse width was realized. Furthermore, the design principles and structures of the laser are also introduced.

Key words diode-pumped, side-pumped, high repetition rate, frequency doubling, Q-switched

由于对传统的灯抽运固体激光器的两个主要缺点(效率低、热效应严重)有重大的改善,以及其他一些特殊的性能,使得二极管抽运的固体激光器(DPSL)越来越受到人们的重视。有关研究十分活跃且富有成果,短短几年时间,DPSL 的输出功率提高了一个量级,光束质量也明显改善(输出平均功率 940 W,重复频率 100 Hz,两倍衍射极限^[1])。但对工作重复频率 ≥ 200 Hz,绿光输出兆瓦级,结构小巧,适合外场恶劣环境应用的激光器报道并不多见。本文是这方面的初步研究工作,二极管抽运的 Nd:YAG 激光器,工作重复频率 200 Hz, KD*P Q 开关,每个脉冲输出 4.5 MW(1064 nm), KTP 倍频,每个脉冲输出 3 MW(532 nm),低阶模。

1 设计要点

1.1 抽运方式

端面抽运具有效率高、模式好^[2~4]、工作物质的

冷却结构比较简单且几乎不影响抽运效率的优点。其缺点是抽运系统较复杂,高平均功率工作时,工作物质端面局部热效应严重,故适于中小功率应用。要求大能量、高平均功率时,则多采用侧面抽运方式^[5~7]。在本文的功率水平下,采用端面抽运不会造成任何麻烦,但聚光系统要复杂些,二极管和聚光系统的体积、成本都要增加。我们设计了小巧、紧凑、牢固、高效(光-光传递效率约 90%)的侧面抽运系统,其体积约为二极管本身的 30%。但抽运的均匀性、输出激光的模式,都明显不如端面抽运的好。为克服这一缺点,采用了以下措施:(1) 采用多管、对称抽运结构。计算机模拟和实验结果表明,采用双管抽运并注意调节两管间的夹角以及抽运光焦点在工作物质中的位置,即可改善抽运的均匀性,获得近 TEM₀₀ 模的激光输出。(2) 采用漫反射腔改善抽运的均匀性,同时又提高了对抽运光的二次利用,使激光效率大大改善。单管抽运的实验表明,采用漫反射腔后激光效率提高了近 40%。

1.2 工作物质选取

目前,适用于二极管抽运的晶体主要有:Nd:

YAG,Nd :YLF,Nd :YVO₄ 三种。在设计激光器时要根据所要求的输出脉冲能量大小、重复频率范围进行选取。就本文的要求而言,选用 Nd :YLF 比较合算。但因其抽运波长为 797(792) nm,与我们现有的抽运 Nd :YAG,Nd :YVO₄ 的二极管不能共用。因此我们仍选用性能适中的 Nd :YAG 晶体。

1.3 腔型设计

腔型设计要注意以下几点:(1) 用二极管抽运时,进入工作物质的热大大减少,使一些问题的处理变得方便、容易。但是用二极管抽运并没有完全“消除热效应”,有时还可能相当严重。在中等功率、大于 50 Hz 重复频率激光器的实验研究中,已经可以观察到热效应的影响,随着输入平均功率的增加,热效应的影响变得越来越明显。在我们的实验中,输入平均抽运功率约 40 W(200 Hz,220 mJ),热效应可以简单看成一个焦距为 f_t 的透镜。(2) 要特别注意聚焦系统的设计和选用,尽量减少在工作物质横截面内造成抽运的不均匀性。否则将引起光学畸变,其结果是输出功率降低、光束质量变差。(3) 因为本实验的激光器是没有放大级的小巧、紧凑结构,因此要在获得低阈值、良好光束质量和高效率之间进行合理取舍。

谐振腔设计主要考虑了:(1) 尽可能补偿热透镜效应;(2) 最佳输出耦合度;(3) 尽可能增大工作物质内基模的光斑尺寸;(4) 小巧和热稳定性。

1.4 计算机模拟

Nd :YAG 属四能级系统,上能级寿命约 230 μ s,下能级寿命约 300 ns,能级间热弛豫约 12 μ s。当采用电光 Q 开关时,通常输出激光脉宽都为纳秒量级,远小于上、下能级寿命和热弛豫时间。为进一步简化,更突出主要问题,可作为二能级系统来处理。并假定 Q 开关打开前无自发辐射,Q 开关打开后光抽运立即停止,腔内损耗 δ 是阶跃函数。于是可得^[8]

$$E = \frac{1}{2} V h \nu (\Delta n_i - \Delta n_f) \cdot \frac{\ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\ln \left(\frac{1}{R} \right) + L}, \quad (1)$$

$$t_p = \frac{E}{P_{\max}} = t_c \cdot \frac{\Delta n_i - \Delta n_f}{\Delta n_i - \Delta n_f \left[1 + \ln \left(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_f} \right) \right]} \quad (2)$$

式中, E 为脉冲输出能量; V 为激光有效模体积; $h\nu$ 为激光光子能量; Δn_i 为 Q 开关打开瞬间的反转粒子数密度; Δn_f 为 Q 开关关闭后的反转粒子数密度; R 为输出镜的反射率; L 为无用的光学损耗; t_p 为

激光脉冲宽度; t_c 为腔内光子寿命; Δn_i 为 Q 开关打开后的阈值反转粒子数密度。

通过数值模拟计算可以看出,采用短腔结构,合理选取输出耦合度,Q 开关开、闭时的损耗,抽运功率密度,抽运光与振荡光的交叠程度等,可以获得窄脉宽、大能量激光输出。图 1 是激光脉宽、最佳输出耦合度的数值计算结果。在腔长为 30 cm,抽运能量为 220 mJ,最佳输出耦合度选为 40 % 时,可获得能量约 35 mJ,脉宽为 9.8 ns 的 Q 开关激光输出,此时能量抽取效率为 78 %,与实验结果基本一致。

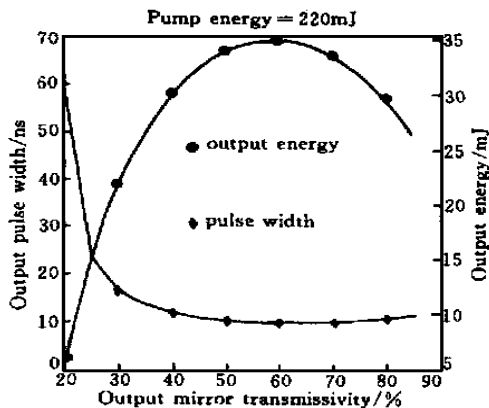


图1 最佳输出耦合度、激光脉宽的计算机模拟曲线
Fig.1 Computer simulation of the relation between the optimum output coupling and the pulse width

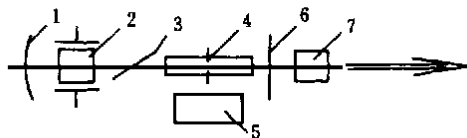


图2 激光器实验布置图

1:全反后镜;2:KD*P;3:偏振片;4:Nd :YAG;5:抽运二极管及光学耦合系统;6:输出镜, $T = 40\%$;7:KTP 倍频晶体,其外围与基座热接触

Fig.2 Sketch map of laser experiment

1: reflector; 2: KD*P; 3: polarizer; 4: Nd :YAG; 5: diode laser and optic coupling system; 6: output mirror; 7: KTP double frequency crystal

2 实验装置和结果

激光器实验布置如图 2。激光二极管的输出在垂直于结面方向经微透镜阵列校正后,再用柱透镜聚焦,在工作物质内形成 10 mm $\times$ 2 mm 的强抽运带。二极管、微透镜、柱透镜经构架连接成为一个小巧、牢固的整体。为了获得良好的模式,采用两个这样组装的二极管,它们相互成 60° 放置。其间的夹

角、每个抽运焦线在工作物质中的深度、抽运焦线相对于工作物质的取向均可单独或整体自由调节, 以获得最佳抽运密度和最佳抽运光与振荡光交叠度。 $\phi 3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的 YAG 棒包 0.4 mm 厚的钢箔(仔细除去抽运光进入工作物质的入口处)后, 固定在由半导体制冷的开槽铜反射器中, 如图 3 所示。这种结构既减小了热阻又增加了对抽运光的二次利用。实验表明, 是否有效利用二次抽运光, 对提高激光器的总体效率非常重要。

图 4 是双管抽运 Q 开关激光输出与输入能量的关系曲线。当抽运能量为 220 mJ 时, 输出激光脉冲能量为 35 mJ, 脉宽为 8 ns。图 5 是双管抽运 Q 开关输出激光光强分布。可以看出, 抽运的均匀性、输出激光的模式与单管抽运相比都大大改善了。图 6 是倍频输出能量与基频输入能量的关系曲线。在工作重复频率为 200 Hz, 基频输出 35 mJ 时, 倍频输出 20.2 mJ, 7 ns, 3 MW, 功率效率约为 67 %。

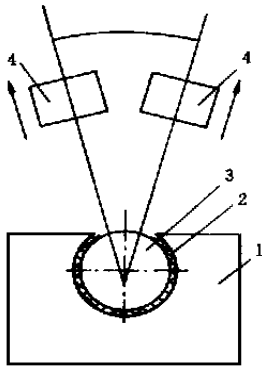


图 3 二极管、工作物质、散热装配结构图

1: 铜聚光腔兼热沉; 2: 钢箔; 3: Nd:YAG; 4: 抽运二极管及聚光系统

Fig. 3 Sketch map of diode laser, laser medium and radiator

1: copper-made optical condenser and sink; 2: indium foil;

3: Nd:YAG; 4: diode laser and focus system

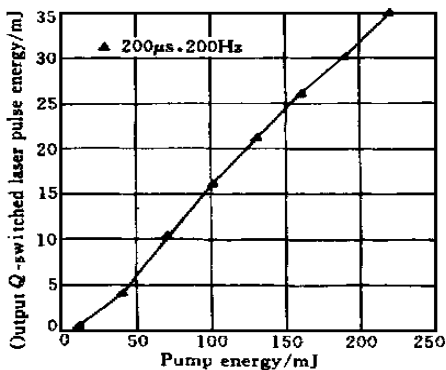


图 4 双管抽运 Q 开关激光输出与输入能量的关系曲线

Fig. 4 Output Q-switched laser energy vs input energy for two diodes pumped laser

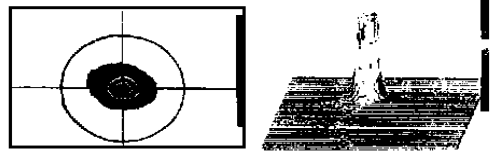


图 5 双管抽运 Q 开关输出激光的光强分布

Fig. 5 Output Q-switched laser intensity profile distribution for two diodes pumped laser

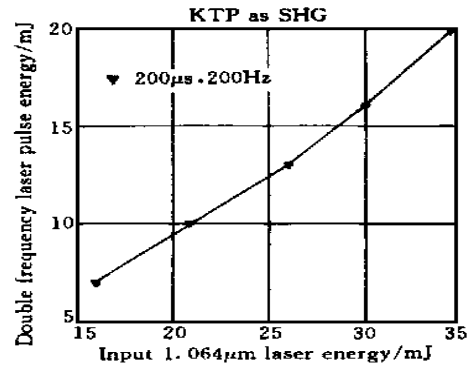


图 6 倍频输出能量与基频输入能量的关系曲线

Fig. 6 Output energy of double frequency vs incident energy of basic frequency

参 考 文 献

- 1 Randall J. St. Pierre, David W. Mordaunt, Hagop Injeyan *et al.*. Diode array pumped kilowatt laser. *SPIE*, 1998, 3264:59~65
- 2 Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Scott C. Mitchell. 183-W, $M^2 = 2.4$ Yb:YAG Q-switched laser. *Opt. Lett.*, 1999, 24(3):154~156
- 3 Steve C. Tidwell, Jonathan F. Seaman, Mark S. Bowers *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(4):997~1009
- 4 Gilles Feugnet, Claude Bussac, Christian Larat *et al.*. High-efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array. *Opt. Lett.*, 1995, 20(2):157~159
- 5 T. Brand. Compact 170-W continuous-wave diode-pumped Nd:YAG rod laser with a cusp-shaped reflector. *Opt. Lett.*, 1995, 20(17):1776~1778
- 6 Kazuyoku Tei, Masaaki Kato, Yoshito Niwa *et al.*. LD-pumped 0.62 J, 105 W Nd:YAG green laser. *SPIE*, 1998, 3265:212~218
- 7 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser. *Opt. Lett.*, 1999, 24(10):679~681
- 8 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, 25(2):214~220