

文章编号: 0258-7025(2005)05-0593-04

激光二极管抽运的高效高重复频率 Nd:YAG 陶瓷激光器

杨成伟, 霍玉晶, 何淑芳, 冯立春

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 研制了激光二极管(LD)抽运的高效高重复频率声光调 Q Nd:YAG 陶瓷微型激光器件。激光器采用激光二极管纵向同轴抽运 Nd:YAG 陶瓷得到 1064 nm 近红外激光输出,采用熔融石英作声光介质,声光调 Q 重复频率 1 Hz~115 kHz 可调。使用 2W 的激光二极管抽运,获得脉冲宽度 16.4 ns,峰值功率 2.46 kW,单脉冲能量 40.5 μ J 的稳定运转。在重复频率 110 kHz 时获得 495 mW 的平均功率,总光-光转换效率达 24.75%。研究了重复频率及抽运功率对声光调 Q 脉冲激光器性能的影响,并对实验结果进行了相应的分析讨论,在理论上加以合理的解释。

关键词 激光技术; Nd:YAG 陶瓷; 声光调 Q; 高重复频率

中图分类号 TN2489.1 文献标识码 A

LD Pumped High-Efficiency High-Repetition-Rate Nd:YAG Ceramic Laser

YANG Cheng-wei, HUO Yu-jing, HE Shu-fang, FENG Li-chun

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on the analysis of the optical characteristic of Nd:YAG ceramic, a laser diode (LD) pumped high-efficiency high-repetition-rate acousto-optic (A-O) Q-switched miniature Nd:YAG ceramic laser was developed. Near infrared laser at 1064 nm was obtained with LD end-pumping Nd:YAG ceramic. Fused silica was adopted as A-O Q-switch crystal and the Q-switch repetition rate is adjustable from 1 Hz to 115 kHz. With a 2W LD pumping, stable operation with pulse width of 16.4 ns peak power of 2.46 kW and energy per pulse of 40.5 μ J, was achieved. At 110 kHz repetition rate, 495 mW average output power of 1064 nm was obtained, corresponding to total optical-to-optical conversion efficiency being as high as 24.75%. The experimental study about the influence of repetition rate and pumping power on the performance of A-O Q-switched pulse laser was emphasized, and the experiment results were analyzed and discussed.

Key words laser technique; Nd:YAG ceramic; A-O Q-switched; high repetition rate

1 引言

掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)单晶是当前最常用的固体激光材料之一^[1,2]。但是由于 YAG 单晶是用提拉法生长的,成本高,生长周期长,掺杂浓度低且掺杂不均匀,使它的应用受到一定的限制。与 Nd:YAG 单晶相比,Nd:YAG 陶瓷激光介质有以下优点:容易制造,成本低,可以生长大尺寸材料;机械特性良好,硬度比单晶大 1.5 倍,断裂韧度比单晶大 5 倍;掺杂浓度高,掺杂原子数分数可以达到 4% 的无梯度掺杂^[10],克服了 Nd:YAG 单晶光学吸收截面

小的缺点,引起人们广泛关注^[3~9]。多晶 Nd:YAG 陶瓷的热导率、吸收光谱、发射光谱、荧光寿命等都和单晶 Nd:YAG 相似。在激光二极管(LD)抽运激光器中,多晶 Nd:YAG 陶瓷具有与 Nd:YAG 单晶相当甚至更高的效率^[6,7,10]。本文对激光二极管抽运的 Nd:YAG 陶瓷声光调 Q 激光器进行了研究,报道了最新实验结果。

2 Nd:YAG 陶瓷的性质

通常 Nd:YAG 激光晶体的掺杂浓度原子数分

收稿日期: 2004-02-13; 收到修改稿日期: 2004-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50132010)资助项目。

作者简介: 杨成伟(1977—),男,山东省莱阳市人,博士研究生,主要从事全固态激光器及激光测距方面的研究。

E-mail: ycw99@mails.tsinghua.edu.cn

数一般不超过1%，生长周期长达几周。多晶Nd:YAG陶瓷的制备不需要铍坩锅，生长周期一般只需要几天，并且其掺杂浓度远高于单晶Nd:YAG，掺杂原子数分数最高可以达到6.8%^[9,11]。Nd:YAG陶瓷是用烧结方法制备的，不仅生产成本低，而且容易获得更大尺寸的优质材料。目前最大尺寸的多晶Nd:YAG是 $\phi 450\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ^[7]。多晶Nd:YAG陶瓷比单晶Nd:YAG具有更高的掺杂浓度，因而通过提高掺杂浓度可以提高材料对抽运光的吸收。单晶Nd:YAG和多晶Nd:YAG陶瓷的折射率相同，都为1.8，热导率相差很小，单晶Nd:YAG的热导率为 $10.5 \pm 0.5\text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ ，多晶Nd:YAG陶瓷的热导率为 $10.7 \pm 0.5\text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ ^[10]。

Baikowski 公司对该公司生产的相同掺杂浓度的Nd:YAG陶瓷和Nd:YAG单晶的光学性质进行了对比，其吸收光谱、发射光谱、荧光寿命等方面都几乎完全一致。Nd:YAG陶瓷的吸收峰都在808.6 nm，发射峰在1064.2 nm，掺杂的原子数分数分别为0.1%，0.6%，1%，2%，4%的Nd:YAG陶瓷样品的荧光寿命分别为258 μs ，252 μs ，234 μs ，174 μs ，96 μs ，与Nd:YAG单晶几乎完全一致^[6,7,10]。

在文献[10]里还比较了相同掺杂浓度的Nd:YAG陶瓷和Nd:YAG单晶激光器的光-光转换效率，实验结果表明：在激光二极管抽运的激光器系统中，Nd:YAG陶瓷具有与Nd:YAG单晶相当甚至更高的效率^[10]。

3 实验装置

实验用激光二极管纵向同轴抽运Nd:YAG陶瓷晶体得到1064 nm的近红外激光，利用声光调Q，获得脉冲激光。激光器的实验装置如图1所示。其

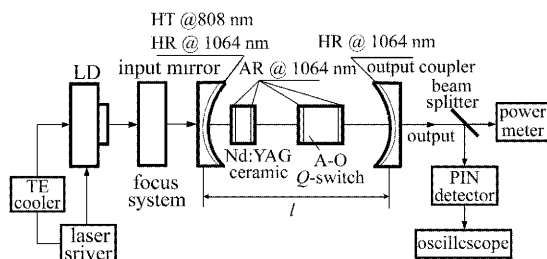


图1 激光二极管抽运的声光调Q Nd:YAG陶瓷激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LD pumped A-O Q-switched Nd:YAG ceramic laser

中，用中国科学院半导体研究所生产的连续输出功率为2 W，波长为808.6 nm的激光二极管作为抽运光源，它的发光面积为 $100\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ ；用日本Baikowski公司生产的 $\phi 4\text{ mm} \times L 5\text{ mm}$ ，原子数分数为1%的Nd:YAG陶瓷晶体棒作激光工作介质，它的两个通光面为平行平面，都镀有对1064 nm的增透膜(剩余反射率 $R < 0.1\%$)。

用本课题组研制的焦距为3 mm的非球面透镜把激光二极管的光束聚焦到激光晶体内部，激光二极管的光有88.5%被耦合到激光晶体内部；声光介质采用熔融石英，其两个通光表面上也都镀有对1064 nm光的增透膜(剩余反射率 $R < 0.25\%$)。采用双凹激光稳定谐振腔，其输入反射镜曲率半径为100 mm，对808.6 nm抽运光是高透射($T = 99.5\%$)、对1064 nm光是高反射($R = 99.7\%$)的；其输出耦合镜采用曲率半径为100 mm的介质膜反射镜，对1064 nm光高反射，反射率为 $R = 97\%$ 。如图1所示，激光器腔长为 $l = 4\text{ cm}$ 。

采用本课题组研制的HH型高稳定激光二极管驱动器为激光二极管提供稳定度优于1 mA的工作电流，并对激光器进行精度优于 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度控制，使其输出波长在Nd:YAG陶瓷的吸收峰为808.6 nm；使用声光Q开关调Q，超声波中心频率为70 MHz，声光调Q重复频率1 Hz~115 kHz可调；使用激光功率计(北京物料光电公司，LP-3A型)测量输出功率；使用PIN光电二极管对输出脉冲探测，并在示波器(Agilent 54622A)上显示脉冲波形。

4 实验结果及分析

4.1 连续激光输出

利用图1所示的激光器实验装置，声光Q开关驱动器不工作，可获得1064 nm的连续激光输出，使用2 W的激光二极管抽运，获得514 mW的基横模连续激光输出，光斑直径为0.2 mm，发散角为4 mrad，光束质量因子 $M^2 = 1.18$ ，总光-光转换效率为25.7%。此时把声光介质放入激光腔内进行连续激光器实验，是为了与声光调Q实验结果进行比较。

对相同条件(抽运源、腔结构)下的激光二极管抽运Nd:YAG激光器进行实验，获得567 mW的1064 nm连续激光输出，比Nd:YAG陶瓷激光器高约10%，这是因为限于实验条件，未对Nd:YAG陶瓷激光器的参量(包括掺杂浓度和晶体尺寸等)进行优化所致。在文献[10]的实验结果中，相同掺杂浓度(原子数分数0.6%)的Nd:YAG陶瓷具有与

Nd:YAG单晶相当甚至更高的效率^[10]。

4.2 声光调 Q 重复频率对脉冲激光输出的影响

4.2.1 平均输出功率与重复频率的关系

图 2 为使用 2 W 的激光二极管抽运时,实验测得的脉冲激光平均输出功率随重复频率的变化关系。由图 2 可以看出,随着重复频率的提高,脉冲激光的平均输出功率先是迅速增加,而后逐渐趋缓以至饱和,最终趋向于连续输出。当重复频率为 110 kHz 时,脉冲激光平均输出功率达到 495 mW,总光-光转换效率为 24.75%,接近于连续运转时的激光输出功率(514 mW)。

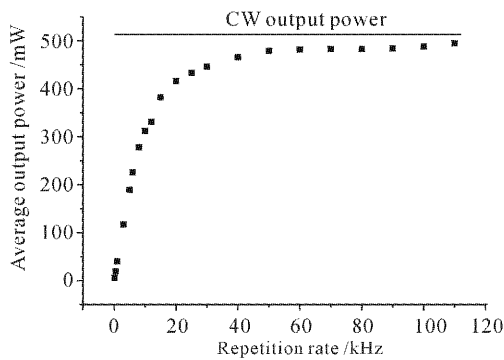


图 2 脉冲激光输出平均功率随重复频率的变化关系
Fig. 2 Average output power as a function of pulse repetition rate

产生这种现象的原因可能是:当激光器处于低重复频率时,脉冲的间隔周期相对较长,由于储能饱和的影响,激光单脉冲能量变化不大,所以平均功率随重复频率的提高而迅速增加;在高重复频率时,激光单脉冲能量随重复频率增加而快速下降,虽然重复频率在增加,但综合作用的结果是平均功率随重复频率增加而缓慢增加,最终趋向一个恒定值^[12,13]。

4.2.2 脉冲宽度与重复频率的关系

图 3 为使用 2 W 激光二极管抽运时,激光脉冲宽度随重复频率的变化关系。随着重复频率的提高,激光脉冲宽度也随之增加。在 150 Hz 的重复频率下获得 16.4 ns 的最窄脉冲宽度,到 110 kHz 的重复频率,激光脉冲的宽度已增加到 44.1 ns。在低重复频率(<1 kHz),脉冲宽度基本不变。图 4 为 150 Hz 重复频率下,示波器观察到的激光脉冲波形。

随着脉冲重复频率的提高,脉冲间隔周期缩短,即每周期内由抽运带来的储能减少,单程增益降低,脉冲从产生到形成需要在腔内往返更多的次数,从而使激光脉冲宽度变宽。

4.2.3 脉冲峰值功率与重复频率的关系

图 5 为使用 2 W 激光二极管抽运时,实验所得

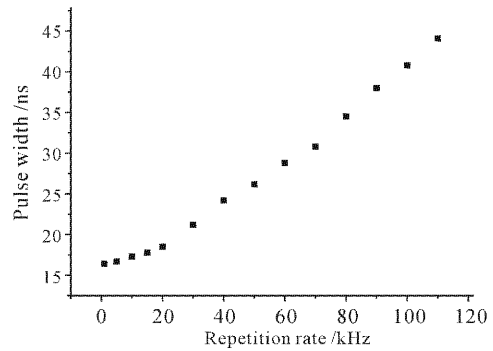


图 3 激光脉冲宽度随重复频率的变化关系
Fig. 3 Pulse width as a function of pulse repetition rate

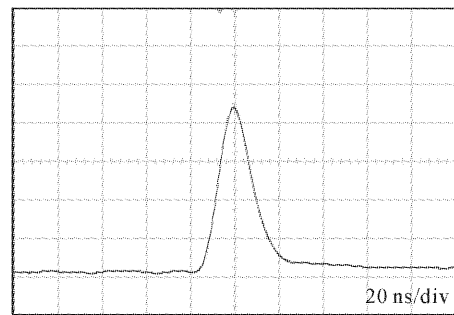


图 4 150 Hz 重复频率下的声光调 Q 激光脉冲波形
Fig. 4 Pulse shape of A-O Q-switched laser at 150 Hz repetition rate

的激光脉冲峰值功率随重复频率的变化关系。激光脉冲的峰值功率随着重复频率的升高而降低。在 1 kHz 重复频率下,激光脉冲峰值功率为 2.46 kW;在 110 kHz 重复频率时,激光脉冲的峰值功率已降低到 102 W。在低重复频率(<1 kHz),脉冲峰值功率基本不变。

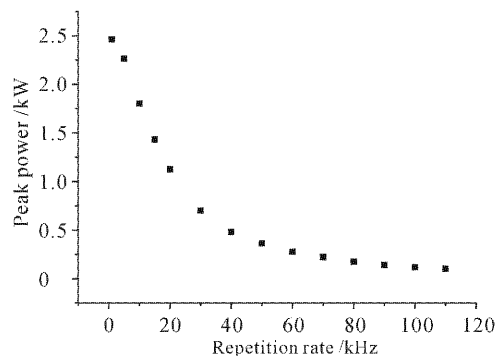


图 5 脉冲峰值功率随重复频率的变化关系
Fig. 5 Peak power as a function of pulse repetition rate

由于脉冲重复频率增加,脉冲间隔周期缩短,使每周期内储能减少,因而单脉冲能量降低;又由于脉冲宽度随重复频率增加而增加,所以峰值功率随重

复频率增加而降低。而在低重复频率(<1 kHz)下,由于储能饱和,激光脉冲的单脉冲能量和脉宽都基本保持不变,因而峰值功率也基本不变。

4.2.4 单脉冲激光能量与重复频率的关系

图6为使用2 W激光二极管抽运时,实验所得的激光单脉冲能量随重复频率的变化关系。激光脉冲的单脉冲能量随着重复频率的提高而降低。在1 kHz重复频率下,激光脉冲的单脉冲能量为40.5 μ J;重复频率到110 kHz时,激光脉冲的单脉冲能量则降低到4.5 μ J。这是由于脉冲重复频率增加,脉冲间隔周期缩短,从而使每周期内储能减少,因而单脉冲能量降低。在低重复频率(<1 kHz)下,脉冲的间隔周期相对较长,由于储能饱和的影响,激光单脉冲能量变化不大。

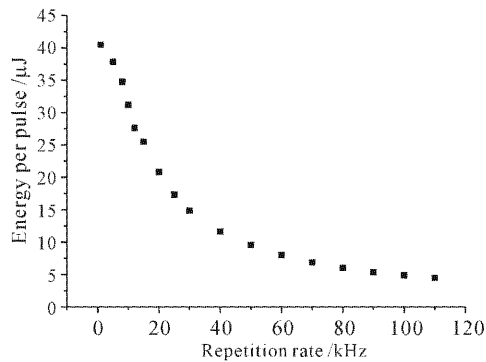


图6 单脉冲能量随重复频率的变化关系

Fig. 6 Energy per pulse as a function of pulse repetition rate

4.3 脉冲激光平均输出功率与激光二极管抽运功率的关系

图7为激光器在50 kHz重复频率下,平均输出功率随激光二极管输出功率变化的关系曲线。激光

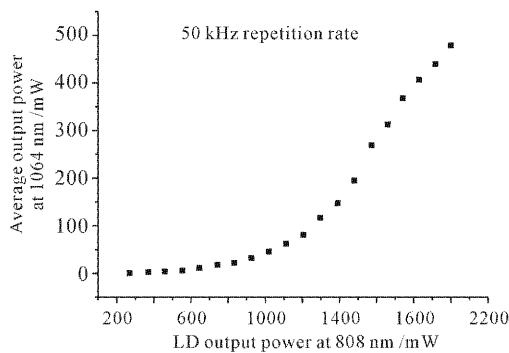


图7 脉冲激光平均输出功率与激光二极管输出功率的关系

Fig. 7 Average output power of pulse laser as a function of LD output power

器的阈值抽运功率约为150 mW,在2 W激光二极管抽运功率下,1064 nm激光平均输出功率为479 mW,总光-光转换效率为23.95%。

5 结 论

实现了激光二极管抽运的高效率高重复频率声光调Q Nd:YAG陶瓷全固态激光器,使用2 W激光二极管抽运,获得495 mW的最大平均输出功率,16.4 ns的最窄脉宽,2.46 kW的最大峰值功率和40.5 μ J的最大单脉冲能量。结果表明,随着重复频率的提高,脉冲激光的平均输出功率增加,激光脉冲宽度变宽,而峰值功率和单脉冲能量都随之降低。

参 考 文 献

- 1 Qiang Li, Zhimin Wang, Zhiyong Wang *et al.*. 600-W lamp pumped CW Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(9): 535~537
- 2 Hailin Wang, Weiling Huang, Zhuoyou Zhou *et al.*. High power CW diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(9): 541~543
- 3 Ichiro Shoji, Sunao Kurimura, Yoichi Sato *et al.*. Optical properties and laser characteristics of highly Nd³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(7): 939~941
- 4 Jianren Lu, T. Murai, K. Takaichi *et al.*. 72 W Nd:Y₃Al₅O₁₂ ceramic laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*,