

文章编号: 0258-7025(2008)12-2001-04

侧面抽运国产 Nd:YAG 陶瓷棒的激光特性

唐昊¹ 朱小磊¹ 姜本学² 潘裕柏²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 200050)

摘要 实验研究了激光二极管阵列(LDA)侧向抽运国产 Nd:YAG 陶瓷棒的准连续及被动调 Q 激光输出特性。该陶瓷激光器采用 LDA 侧面紧密环绕均匀排布的抽运结构, 陶瓷棒抽运区域长度为 20 mm, 其总尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 $\sim 1\%$ 。在千赫兹准连续运转条件下, 当平-平谐振腔的输出耦合镜透过率为 47.3% 时, 获得最大平均功率 23 W 的 1064 nm 激光输出, 光束发散角为 4.5 mrad, 斜率效率达 12%。在谐振腔内插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动调 Q 开关, 成功地实现了陶瓷激光器千赫兹重复频率调 Q 激光脉冲输出, 当 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体初始透过率为 60% 时, 输出激光脉冲宽度(半峰全宽)可窄至 14.5 ns, 调 Q 动静比约为 40%。

关键词 激光器; Nd:YAG 陶瓷; 激光二极管阵列; 侧面抽运; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083512.2001

Laser-Diode-Array Side Pumped Nd:YAG Ceramic Laser

Tang Hao¹ Zhu Xiaolei¹ Jiang Benxue² Pan Yubai²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract The quasi-continuous-wave and passively Q-switched output performance of laser-diode-array(LDA)-side-pumped domestic Nd:YAG ceramic laser were studied. A uniformly side-around arranged compact LDA pumping structure with pumping length of 20 mm was used in this laser. The Nd:YAG ceramic rod was $\phi 3 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ sized and 1% (atomic percent) doped. In a plano-plano concave resonator, with the working frequency of 1 kHz, and the output coupler transmission of 47.3%, a quasi-continuous-wave output with an average power of about 23 W at 1064 nm is obtained. The beam divergence angle is 4.5 mrad, and the slope efficiency is up to 12%. In the same condition, using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal as the passive Q-switcher, the 1 kHz Q-switched laser pulse is obtained successfully, when the original transmission ratio of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal is 60%, the pulse width (FWHM) is less than 14.5 ns, and the dynamic to static ratio is about 40%.

Key words lasers; Nd:YAG ceramic; laser diode array; side pump; passively Q-switched

1 引言

目前,国内外很多研究小组都致力于高性能光学陶瓷材料的烧制,以期开发陶瓷激光介质的应用潜能。由于 Nd:YAG 透明陶瓷材料拥有与 Nd:YAG 单晶介质同样优越的光谱特性和物理化学性能,并且具有容易制备、成本低、可掺杂浓度高等优点,完全有希望成为 Nd:YAG 单晶的替代品而得到长足发展和广泛应用。自 1995 年第一台

Nd:YAG 陶瓷激光器在日本面世以来^[1],随着光学陶瓷材料制备工艺的不断突破, Nd:YAG 陶瓷在全固态激光器上的应用越来越广泛^[2~4]。目前,采用激光二极管阵列(LDA)对 Nd:YAG 陶瓷进行侧面抽运已获得 236 W 的准连续高平均功率激光输出^[5],光-光转换效率达到 52.5%,斜率效率为 60%,其高效率与优质 Nd:YAG 单晶材料相当。在提高输出功率方面,2005 年,美国达信公司采用

收稿日期:2008-05-08; 收到修改稿日期:2008-06-26

作者简介:唐昊(1984-),男,重庆人,硕士研究生,主要从事全固态激光器高重复频率电光调 Q 技术的研究。

E-mail: tanghao_1984@163.com

导师简介:朱小磊(1966-),男,浙江人,研究员,博士生导师,主要从事固体激光技术及激光应用系统的研究。

E-mail: xlzhu@mail.siom.ac.cn

Nd:YAG陶瓷板条激光器,实现了 5 kW 的高功率连续激光输出^[6]。2006 年,美国的 Livermore 实验室用自己烧结的 5 块尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm 的高质量 Nd:YAG 陶瓷材料,采用热容运转方式,最高获得了 67 kW 的激光输出^[7]。相对而言,我国烧制 Nd:YAG 光学陶瓷的工艺与先进国家相比存在差距,2006 年 5 月,由中国科学院上海硅酸盐研究所制备的 Nd:YAG 透明陶瓷,首次实现了激光输出,端面抽运激光连续输出功率达到 1003 mW^[8]。2007 年 1 月,采用热容运转方式,双端面抽运的陶瓷激光输出功率达到了 10 W^[9]。侧面抽运的国产陶瓷激光器目前尚未见报道。本文报道采用国产 Nd:YAG 陶瓷圆棒状材料,在课题组独特设计的 LDA 侧面环绕均匀抽运的激光腔结构中^[5],通过选择合适的耦合输出率,在 1 kHz 的重复频率下,获得了 23 W 平均功率的准连续激光输出,且光束发散角为 4.5 mrad。在此基础上,用 Cr⁴⁺:YAG 晶体对 Nd:YAG 陶瓷激光器进行被动调 Q 实验研究,成功地获得了调 Q 激光脉冲输出,脉宽(FWHM)可窄至 14.5 ns,调 Q 动静比约为 40%。

2 理论分析

2.1 最佳输出耦合率计算

谐振腔的输出耦合率直接影响到激光器的输出特性,所以首先要对 Nd:YAG 陶瓷激光器的最佳输出耦合率进行理论计算。

对于激光二极管(LD)抽运的 Nd:YAG 陶瓷激光器,最佳输出耦合率为

$$T_m = \sqrt{2g_m l \beta} - \beta, \quad (1)$$

式中 g_m 为小信号增益系数,与抽运功率有关; β 为往返指数净损耗因子, l 为增益介质长度。又有

$$\frac{g_m}{g_t} = \frac{P_p}{P_{pt}}, \quad (2)$$

式中 $g_t = \Delta n_t \sigma_{21}$ 为阈值增益系数, σ_{21} 为受激辐射截面, P_p 为抽运功率, P_{pt} 为阈值抽运功率。对于 Nd:YAG 单晶, $\Delta n_t = 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\sigma_{21} = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$; $P_{pt}/V = 21 \text{ W/cm}^3$, V 为抽运体积。经测试,该激光棒对 1064 nm 波长光的透过率为 82%,即材料的单程损耗系数约为 0.06 cm^{-1} ,则 $\beta = 0.12 \text{ cm}^{-1}$ 。在本文实验条件下,由(1),(2)式可得 $T_m = 34.8\%$,但国产 Nd:YAG 陶瓷的性能参数与 Nd:YAG 单晶有较大差异,所以上述结果只作为实验参考,最佳输出耦合率应由实验最终确定。

2.2 谐振腔设计

在 1kHz 高功率运转时,介质的热效应相当严重,所以首先要估算陶瓷棒的热焦距。侧面抽运 Nd:YAG 介质的热焦距为^[11]

$$f = \frac{KA}{P_a} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\varphi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中, K 为热传导系数, A 为介质截面积, P_a 为介质耗散的总热量,约为抽运能量的 40%, dn/dT 为介质折射率温度系数, α 为热膨胀系数, $C_{r,\varphi}$ 为介质弹光系数的函数, r_0 为介质半径, n_0 为介质折射率, L 为介质长度。Nd:YAG 陶瓷的物理化学性能与 Nd:YAG 单晶相似,根据文献[11]中的数据,当抽运功率达到 200 W 时, $f_{r,\varphi}$ 分别为 27.04 cm 和 33.31 cm。

根据 ABCD 定律,将 Nd:YAG 陶瓷视为 $f = 27 \text{ cm}$ 的透镜,其单程变换矩阵为

$$m = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

式中 l_1 , l_2 分别为输出镜和后腔镜到介质的距离。对于平-平腔, $G_1 = a$, $G_2 = d$,谐振腔为稳定腔的条件为

$$0 < G_1 \cdot G_2 < 1, \quad (4)$$

取 $l_2 = 50 \text{ mm}$,则腔稳定性与腔长的变化曲线如图 1 所示。

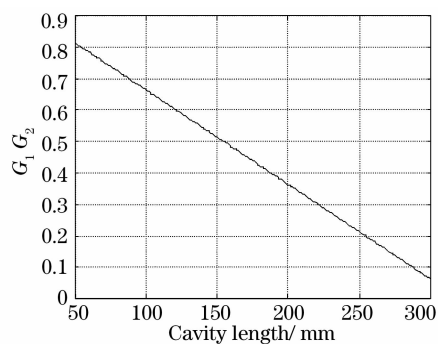


图 1 腔稳定性与腔长的变化曲线

Fig. 1 Stability of cavity at different cavity lengths

可以看到,腔长取 100~200 mm 之间较为合理,但考虑到制备的 Nd:YAG 陶瓷棒有较严重的散射损耗(单程损耗系数为 0.06 cm^{-1}),为了便于激光振荡,必须降低谐振腔的损耗,这里采用平-平腔短腔结构,取 $l_1 = 60 \text{ mm}$,即腔长为 110 mm。

3 Nd:YAG 陶瓷准连续运转实验

3.1 实验装置

侧面抽运 1 kHz 重复频率 Nd:YAG 陶瓷激光器实验装置如图 2 所示, 激光器谐振腔长为 110 mm, M_2 为后腔镜, 镀 1064 nm 全反膜, M_1 为输出耦合镜, 实验中可以选用不同输出耦合率。由于侧面抽运的 9 条 LDA 环绕 Nd:YAG 陶瓷棒等角度排布, 虽然没有微柱透镜准直 LDA 光束发散度, 但仍然可以实现抽运光强在陶瓷棒内的均匀分布, 达到改善输出激光光束质量的目的。陶瓷棒内的抽运光强模拟分布如图 3 所示。

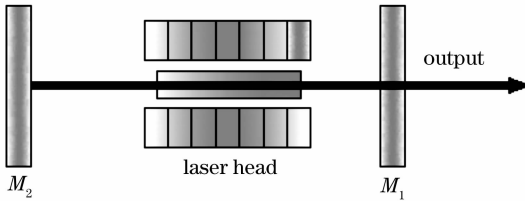


图 2 Nd:YAG 陶瓷激光器实验装置图
Fig. 2 Experimental setup of LDA pumped Nd:YAG ceramic laser

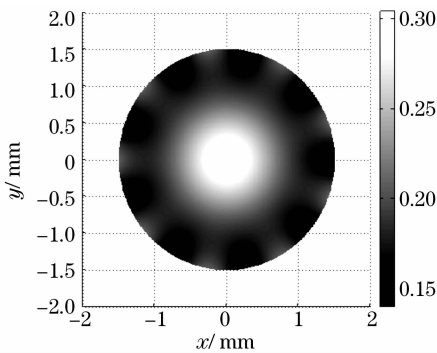


图 3 陶瓷棒内的抽运光分布

Fig. 3 Pumping light intensity distribution in ceramic rod

实验中 LDA 的中心波长为 808 nm 附近, 采用微通道水冷结构对 LDA 进行冷却, 水温控制在 24℃。激光电源重复频率设置为 1 kHz, 电驱动脉冲宽为 200 μ s。实验所用的 Nd:YAG 陶瓷棒由中国科学院上海硅酸盐研究所制备的, 尺寸为 $\phi 3$ mm \times 35 mm, 掺杂原子数分数为 1.0%, 棒两端面均镀 1064 nm 增透膜。

3.2 实验结果分析

首先, 实验设计易于起振的平-平腔短腔结构探索其最佳输出率。实验中, 分别采用输出耦合率为 12.5%, 20%, 40%, 47.3% 及 50% 的输出耦合镜, 都获得了激光输出, 陶瓷激光器不同输出耦合率条件下的输入-输出激光功率变化曲线如图 4 所示。

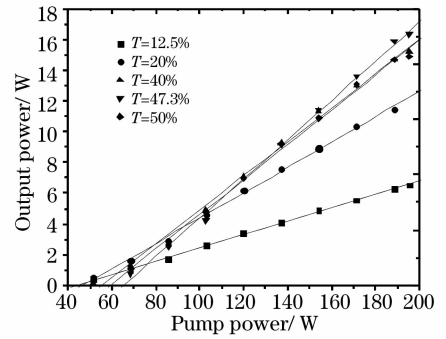


图 4 在不同输出耦合率条件下激光器的功率输出变化
Fig. 4 Performance of laser output power at different transmissions of the output coupler

从图 4 中可以看到, 在实验给定的抽运功率条件下, 输出耦合镜的透过率为 47.3% 时, 激光器能够获得最大激光功率输出。当抽运功率为 194 W 时, 输出激光功率为 16.4 W, 此时的最大光-光转换效率和斜率效率分别为 8% 和 12.7%, 最佳透过率与理论计算值不符, 这说明国产 Nd:YAG 陶瓷各性能参数与 Nd:YAG 单晶确有较大差异。在当前谐振腔的最佳输出耦合条件下, 设法将 LDA 的驱动电流在极限条件下作进一步提高。当 LDA 输出抽运光功率达到 256 W 时, 获得了 23 W 的最大功率输出, 斜率效率保持在 12% 左右, 并没有出现饱和现象, 具有进一步提升输出功率的潜力, 如图 5 所示。据我们所知, 在国产陶瓷激光器中, 尚未见 23 W 准连续输出的报道。但受到陶瓷棒散射损耗系数较大的影响, 激光器目前的光-光转换效率和斜率效率都还相对较低, 有待提高。

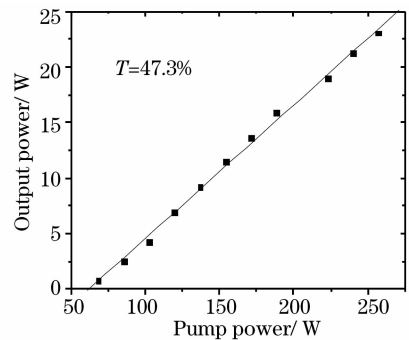


图 5 最佳输出耦合率时激光器的功率输出变化
Fig. 5 Performance of laser output power at the optimal transmissions of the output coupler

4 Nd:YAG 陶瓷激光器调 Q 特性

4.1 实验装置

在原实验装置中, 插入不同初始透过率的

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动调 Q 开关进行陶瓷激光器调 Q 特性研究,主要考察不同 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体初始透过率对输出功率和脉宽的影响,谐振腔耦合输出镜 M_1 透过率仍为 47.3%,整个实验装置如图 6 所示。

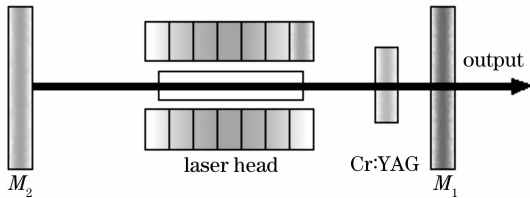


图 6 被动调 Q 实验装置

Fig. 6 Scheme of passively Q-switched experimental setup

4.2 实验结果分析

由于实验所用的陶瓷棒存在较严重的散射损耗,使得激光器要求较高的抽运阈值功率,所以,当插入初始透过率为 50% 以下的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时,在驱动电源所能提供的驱动电流条件下,激光器达不到起振的阈值条件。当采用初始透过率为 60% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时,激光器阈值抽运功率较为适中,约为 110 W,此时,随着抽运功率的上升,激光输出功率也随之提高。在 154 W 的抽运条件下,实验获得调 Q 脉冲序列的平均功率为 4.5 W,调 Q 动静比约为 40%,此时调 Q 脉冲的宽度为 14.5 ns (FWHM),参见图 7。由于该陶瓷棒内部存在的无晶态颗粒簇,在导致相对严重的吸收和散射损耗的同时,也造成了陶瓷激光 Q 脉冲宽度的展宽^[12],随着陶瓷棒质量的提高,可有望获得更窄脉宽的调 Q 脉冲。

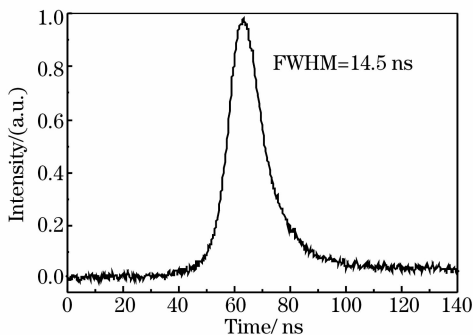


图 7 调 Q 陶瓷激光器脉冲输出的时间波形

Fig. 7 Temporal waveform of Q-switched ceramic laser

5 结 论

采用国产 Nd:YAG 陶瓷棒材料,运用侧面环绕均匀排布的高效率激光二极管阵列侧向抽运结构,

成功地实现了 Nd:YAG 陶瓷激光器的千赫兹准连续和被动调 Q 脉冲输出。采用平-平腔结构,腔长为 110 mm,当耦合输出镜透过率为 47.3% 时,获得最大输出功率为 23 W,斜率效率达到 12%,光束发散角为 4.5 mrad。在相同条件下,获得了动静比约为 40%,脉宽可窄至 14.5 ns 的被动调 Q 脉冲输出。随着大尺寸、高掺杂浓度陶瓷材料的研制成功,国产陶瓷材料的输出功率可望得到进一步提高,应用领域也将越来越广。

参 考 文 献

- 1 A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata *et al.*. Fabrication and optical properties of high performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, **78**(4):1033~1040
- 2 A. Lapucci, M. Ciofini. Efficiency optimization for a diode-pumped Nd:YAG ceramic slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**: 4388~4393
- 3 Yunfeng Qi, Qihong Lou, Haixia Ma *et al.*. Highly efficient Nd:YAG ceramic CW laser with 59.8% slope-efficiency [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 89~91
- 4 Li Haifeng, Xu Degang, Yao Jianquan *et al.*. Experimental 511 W composite Nd:YAG ceramic laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(10): 2565~2567
- 5 Ji Jianghua, Qi Yunfeng, Zhu Xiaolei *et al.*. High-power quasi-continuous-wave Nd:YAG ceramic laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 415~418
- 6 纪江华,漆云凤,朱小磊等. 大功率准连续 Nd:YAG 陶瓷激光器研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 415~418
- 7 D. W. Trainor. Ceramic slab Nd:YAG laser emits 5 kW [J]. *Laser Focus World*, 2005, **41**(10): 11
- 8 R. Yamamoto, K. Alen, R. Almon *et al.*. A solid state laser for the battlefield [C]. *25th Army Science Conference of United States*, 2006, UCRL-CONF-225230
- 9 Li Jindong, Jiang Benxue, Pan Yubai *et al.*. Domestic Nd:YAG ceramic get laser output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 864
- 10 李劲东,姜本学,潘裕柏等. 国产 Nd:YAG 陶瓷获得激光输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 864
- 11 Chen Yahui, Zhou Yong, Pan Yubai *et al.*. Domestic Nd:YAG ceramic laser emits 10.0 W [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 660
- 12 陈亚辉,周勇,潘裕柏等. 国产 Nd:YAG 透明陶瓷实现 10.0 W 激光输出 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 660
- 13 Zhou Binkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principles of Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001, 174~175
- 14 周炳琨,高以智,陈炯嵘等. 激光原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000: 174~175
- 15 W. Koechner, Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002, 363~364
- 16 W. 克希耐尔著. 固体激光工程 [M]. 北京:科学出版社, 2002, 363~364
- 17 Ji Jianghua, Qi Yunfeng, Meng Junqing *et al.*. Laser-diode pumped Q-switched ceramic Nd:YAG laser with 5 W output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 157~160
- 18 纪江华,漆云凤,孟俊清等. 输出 5 W 的电光调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 157~160