

文章编号: 0253-2239(2006)03-0415-4

大功率准连续 Nd:YAG 陶瓷激光器研究

纪江华 漆云凤 朱小磊 楼祺洪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 采用侧面环绕均匀排布的紧凑型抽运结构, 实现了激光二极管阵列侧向抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器高效率激光输出。理论计算得到谐振腔输出镜的最佳输出耦合透射率为 22.2%, 并在输出耦合镜透射率为 22% 的条件下, 用掺杂原子数分数为 1%, 尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 陶瓷棒, 获得了平均功率大于 230 W 的准连续 1064 nm 激光输出, 其光-光效率和斜率效率分别高达 52.4% 和 61%。并测得输出激光脉冲宽度为 160 μs , 光谱线宽略小于 0.8 nm, 光束发散角为 16 mrad。实验结果显示, Nd:YAG 陶瓷激光器输出功率 Nd:YAG 单晶激光器相当。

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

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

High-Power Quasi-Continuous-Wave Nd:YAG Ceramic Laser

Ji Jianghua Qi Yunfeng Zhu Xiaolei Lou Qihong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: With uniformly side-around arranged compact pumping structure, high conversion efficiency operating of diode-laser-array side-pumped Nd:YAG ceramic laser was demonstrated. Using a $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ sized Nd:YAG ceramic rod with 1% dopant fraction of number of atoms, the laser generated a quasi-continuous-wave (QCW) output with an average power of about 230 W at 1064 nm, and the output coupler transmission was 22%, which corresponded to the calculated result of 22.2%. The optical-to-optical conversion efficiency was 52.4%, and the slope efficiency was 61%. Besides, the pulse width of the beam was detected to be 160 μs , the line width was less than 0.8 nm, and the beam divergence angle was 16 mrad. The experiment results showed that the output power Nd:YAG ceramic laser was comparable to that of Nd:YAG single crystal laser.

Key words: lasers; ceramic laser; Nd:YAG; side pump; diode laser array

1 引 言

在固体激光器领域, 自首台红宝石固体激光器出现以后, Nd:YAG 单晶材料以其高增益、低阈值、热特性和机械性能优良而迅速成为应用最为广泛的固体激光增益介质。然而, Nd:YAG 单晶材料固有的生长周期长、掺杂浓度低、生产成本高等因素在一定程度上制约了其应用范围^[1]。近年来, 随着透明光学陶瓷材料制备工艺的突破, 掺激活离子的激光陶瓷作为一种新型激光介质材料得到迅速的发展, 大有取代单晶之势^[2~6]。激光陶瓷是一种由细小、紧密填充的晶粒构成的马赛克结构, 该材料除具有陶瓷的多晶体性质外, 采用真空烧结方法制备的激

光陶瓷还展现出非常接近单晶的透明性和热机械特性^[7]。Nd:YAG 激光陶瓷不仅具有与 Nd:YAG 单晶几乎相同的热导率、吸收光谱(吸收峰均为 808.6 nm)、荧光光谱(最主要的发射峰值为 1064.18 nm)和荧光寿命, 而且相对于单晶材料还有制作简单、成本低、尺寸大、掺杂浓度高、多功能性、可大批量生产等优点。正是由于光学陶瓷材料弥补了单晶的很多不足, 因此, 在固体激光器的众多应用领域, Nd:YAG 陶瓷材料很有希望成为单晶材料的一种强有力的替代品。

目前有很多科研人员正致力于陶瓷激光器的研究, 且已经有了很多成果^[8~14]。由于 Nd:YAG 激

作者简介: 纪江华(1982~), 男, 湖北人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事大功率二极管抽运全固态激光器的研究。E-mail: tinygreat@163.com

收稿日期: 2005-05-02; 收到修改稿日期: 2005-08-22

光陶瓷材料可以获得大尺寸、高掺杂浓度,因此很适合作为大能量、高功率激光器的工作物质。但是目前陶瓷激光器输出的光束质量较差,需要进一步提高其性能。本文报道在设计侧面环绕均匀排布的紧凑型激光二极管阵列(LDA)抽运结构的基础上,获得准连续高功率 Nd:YAG 陶瓷激光输出的实验结果。该激光器采用 9 组环绕侧面抽运的平-平腔结构,有效地改善了抽运均匀性,通过选择合适的输出耦合参量,获得了高效率、高平均功率的激光输出。

2 激光器设计

激光二极管阵列侧向抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器谐振腔及抽运结构示意图如图 1 所示。激光器腔长为 195 mm,后腔镜镀 1064 nm 全反膜,前腔镜为不同输出耦合率的平面输出耦合镜,见图 1(a)。激光二极管阵列抽运原理结构设计如图 1(b)所示,九

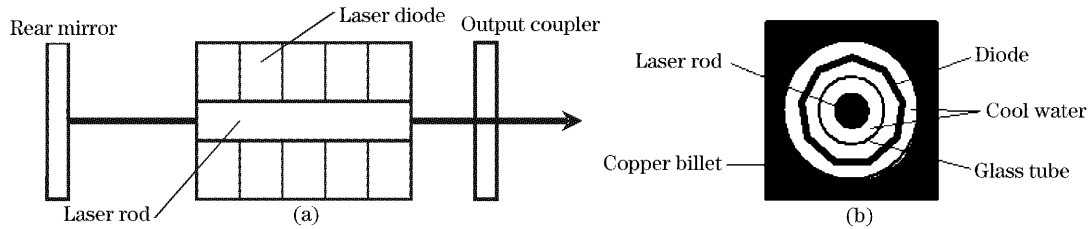


图 1 谐振腔(a)及抽运结构(b)示意图

Fig. 1 Scheme of the resonator (a) and the pumping structure (b)

由于激光器的输出耦合率直接影响输出特性,实验中首先对 Nd:YAG 陶瓷激光器的最佳输出耦合率进行理论分析。考虑到 Nd:YAG 陶瓷为四能级,且激光二极管阵列抽运脉冲宽度(200 μs)略小于介质的荧光寿命(234 μs),所以实验设计的陶瓷激光器属短脉冲激励的四能级系统。谐振腔的输出耦合最佳透射率可用下式计算^[15]:

$$T_m = \beta[(E_{in}/E_{th}^0)^{1/2} - 1], \quad (1)$$

其中 E_{in} 为抽运脉冲能量, E_{th}^0 为输出镜透射率 $T = 0$ 时工作物质吸收的抽运能量,且有

$$E_{th}^0 = h\nu_p(\Delta n_{th})_{T=0}V_R/\eta_F, \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常量, ν_p 为抽运光中心频率, V_R 为增益介质体积, $(\Delta n_{th})_{T=0}$ 为 $T = 0$ 时的阈值反转粒子数,即有

$$(\Delta n_{th})_{T=0} = \beta(\sigma_{21}l), \quad (3)$$

式中 σ_{21} 为介质的受激辐射截面, l 为介质长度。 η_F 为抽运效率: $\eta_F = \eta_T\eta_Q\eta_{ab}$, η_T 为抽运光进入介质的传输效率, η_Q 为量子效率, η_{ab} 为抽运光模与振荡模的耦合效率。对于 Nd:YAG 陶瓷材料分别有: $\eta_T = 0.9$, $\eta_Q = 0.95$, $\eta_{ab} = 1$, 则 $\eta_F = 0.855$ 。 β 为谐

组抽运激光二极管阵列等角度均匀环绕排布,围成一个圆周。热汇设计成准微通道水冷结构,对激光二极管阵列进行高效率快速冷却。Nd:YAG 陶瓷棒套上玻璃管,在玻璃管和陶瓷棒之间通水实现对陶瓷棒冷却。采用九组激光二极管阵列从九个方向对陶瓷棒进行侧向抽运,可使得陶瓷棒内的抽运光强分布非常均匀,从而提高增益均匀性,减小热效应。实验所用的 Nd:YAG 陶瓷棒购自 BAIKOWSKI 公司,尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为 1%,侧面打毛,避免高功率抽运条件下的寄生振荡产生;棒两个端面磨成平面,均镀 1064 nm 增透膜,以减少腔内损耗。激光二极管阵列激光输出最大平均功率为 450 W,中心波长 808 nm,工作重复频率为 1 kHz,驱动电流脉冲宽度约 200 μs (FWHM),占空比为 20%。

振腔的往返损耗,包括衍射损耗、吸收损耗和散射损耗,考虑到腔镜直径远大于振荡光斑直径,所以计算时忽略衍射损耗。Nd:YAG 陶瓷材料吸收和散射损耗系数为 0.008 cm^{-1} ,介质长度 $l = 75 \text{ mm}$,则 $\beta = 0.12$ 。此外,掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 陶瓷受激发射截面^[16] σ 为 $4.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,陶瓷棒($\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$)体积 V_R 为 $5.89 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,设抽运光中心波长为 $\lambda = 808 \text{ nm}$,其中心频率为 $\nu_p = c/\lambda$,当单脉冲抽运能量为 $E_{in} = 450 \text{ W}/1000 \text{ Hz} = 0.45 \text{ J}$ 。由以上参量和(1)式~(3)式,可算得陶瓷激光器输出耦合最佳透射率约为 $T_m = 22.2\%$ 。

3 实验结果及讨论

3.1 单晶与陶瓷的比较

为比较 Nd:YAG 单晶与陶瓷在激光二极管抽运激光器中的性能,实验中,在输出镜透射率为 70% 的条件下,先用 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 单晶棒作为工作物质,测量了在不同平均抽运功率下的输出功率,然后换上 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的 Nd:

YAG 陶瓷棒,重复前面的实验,共测得两组激光输出功率随抽运输入功率变化数据。图 2 为实验结果。当抽运光功率为 450 W 时,陶瓷棒的输出功率为 125 W,单晶的输出功率为 116 W,斜率效率分别为 47%和 43%,陶瓷比单晶激光输出略大。可以看到,在准连续激光输出条件下,Nd:YAG 陶瓷材料的激光输出功率已经赶上单晶。

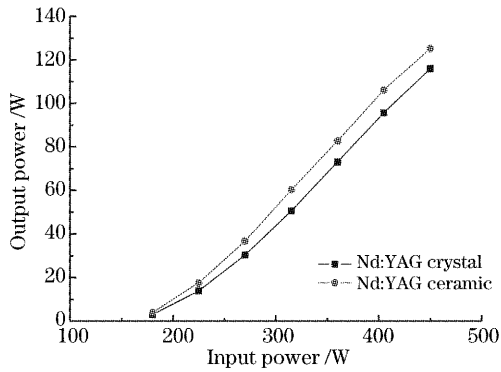


图 2 Nd:YAG 陶瓷及单晶激光功率输出特性

Fig. 2 Output power of Nd:YAG ceramics and crystal laser

3.2 激光器的最佳输出耦合率的确定及最大输出功率的获得

在 kHz 准连续运转的条件下,为了确定激光二极管阵列侧向抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器的最佳透射率,获得最大输出功率,我们通过变换激光器输出耦合镜的方法,测量在不同输出耦合率的条件下激光器输出功率变化,最终确定陶瓷激光器的最佳输出耦合率。图 3 是实验采用输出耦合镜透射率分别为 50%、37%、26%、22%及 17%时实际测得的输入-输出变化曲线。实验结果清楚地显示,当激光器的输出耦合透射率为 22%时陶瓷激光器获得最大激光功率输出,最大输出平均功率达 236 W,峰值功率为 1.5 kW,测量得到此时的光束发散角为 16 mrad(全角)。光-光转换效率及斜率效率分别达到 52.4%及 61%。通过实验数据分析可以看出,在输出耦合透射率 $T=$

22%时激光器的光-光效率和斜率效率均达最大,这一结果与本文前面通过理论分析得出的激光二极管阵列侧向抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器的最佳透射率约为 22.2%的预期相吻合。此外,从输出功率曲线上看,在最大抽运功率输入的条件下,Nd:YAG 陶瓷激光器的输出并没有出现明显的饱和现象。所以,在实验设计的 Nd:YAG 陶瓷激光器结构中,如果进一步提高抽运功率,有望获得更高平均功率的激光输出。

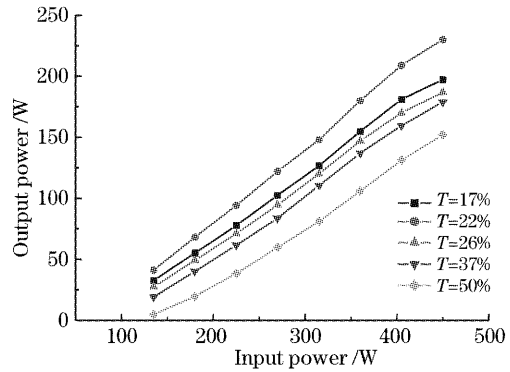


图 3 不同输出耦合条件下激光器输出变化

Fig. 3 Performance of laser at different transmissions of output coupler

3.3 激光光束及时间波形、谱线特性分析

光束质量的优劣对 Nd:YAG 陶瓷激光器的应用具有很大的影响。实验中我们用 CCD 激光光束分析仪对 Nd:YAG 陶瓷激光器的输出光斑进行了初步测试,图 4(a)为 CCD 探测到的陶瓷激光器输出光斑光强分布,显现出光束强度空间分布有干涉条纹存在,并非是高斯或准高斯分布,陶瓷激光器输出的光束具有较大的 M^2 值,约为 30(236 W 输出,约 16 mrad 发散角)。陶瓷激光器光束质量受陶瓷材料内部多晶态结构及散射颗粒团簇的影响,明显差于单晶材料激光器,所以陶瓷材料还需在提高激光光束质量上有所改进。图 4(b)为通过理论计算获得的 Nd:YAG 陶瓷棒横截面内抽运光强分布的仿真结果。

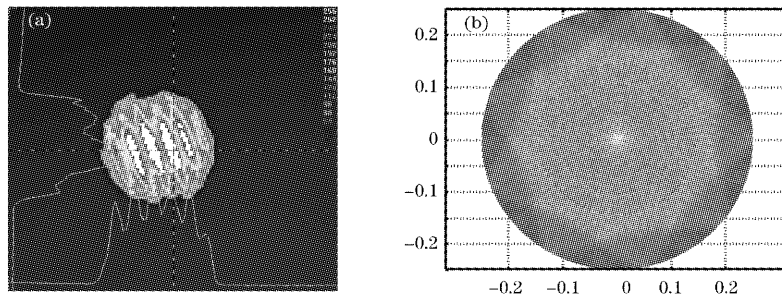


图 4 陶瓷激光器输出光斑(a)及抽运光强分布(b)

Fig. 4 Output beam facula (a) of the ceramic laser and the pumping light intensity distribution (b)

图 5 为用示波器测得的激光时间波形。其形状为一矩形波,与激光二极管阵列的驱动电流源波形相似,脉宽为 $160 \mu\text{s}$,略小于驱动电流脉冲宽度 $200 \mu\text{s}$,这是因为激光脉冲的产生需要一定的时间,即激光脉冲相对抽运脉冲有一定的延迟所致。

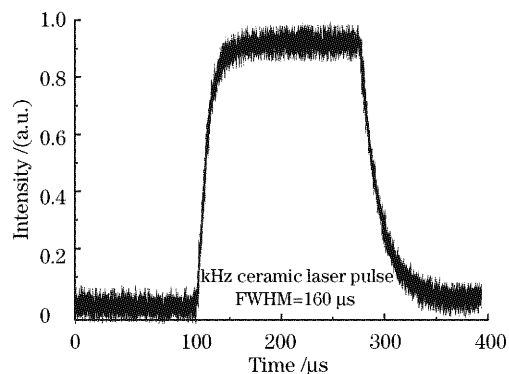


图 5 激光输出时间波形

Fig. 5 Waveform of the output laser beam

图 6 为用光纤光谱仪探测到的 Nd:YAG 陶瓷激光器激光光谱,输出激光线宽(FWHM)小于 0.8 nm ,而文献[1]中查到的 Nd:YAG 陶瓷的荧光光谱显示 1064.1 nm 谱线峰的线宽为 0.78 nm ,与我们的实验结果基本一致。

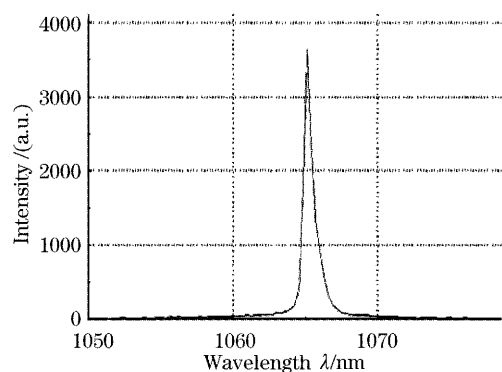


图 6 激光输出光谱

Fig. 6 Spectrum of the output laser beam

4 结 论

应用自主设计的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 陶瓷激光器的准连续高功率输出。采用平平腔结构,当腔长为 195 mm ,输出耦合透射率为 22% 时,得到最大激光输出功率 236 W ,光束发散角 16 mrad 。激光二极管阵列抽运重复率为 1 kHz ,占空比为 20% ,输出激光脉冲宽度约为 $160 \mu\text{s}$ (FWHM),光-光效率为 52.4% ,斜率效率为 61% 。实验中还比较了 Nd:YAG 多晶陶瓷和 Nd:YAG 单晶的激光输出性能,在

相同条件下,发现 Nd:YAG 陶瓷的准连续输出功率已经超越单晶,但光束质量较差。考虑到陶瓷材料可以做到大尺寸、高掺杂浓度及各种结构,陶瓷激光器的输出功率可望得到进一步提高。因此,Nd:YAG 陶瓷材料在大功率激光器方向有很好的应用前景。

致谢 感谢李小莉工程师在光束发散角测量上提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 Ma Haixia, Lou Qihong, Ling Lei *et al.*. Current advances in ceramic lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(2): 45~51 (in Chinese)
马海霞,楼祺洪,凌 磊等. 陶瓷激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(2): 45~51
- 2 Yanagitani T, Yagi H, Ichikawa M. Manufacture Method of Fine Powder of YAG[P]. *Japan Patent*, 1998. 102101333
- 3 Yanagitani T, Yagi H, Hiro Y. Manufacture Method of Fine Powder of YAG[P]. *Japan Patent*, 1998. 102101411
- 4 Ken-ichi Ueda. High power lasers based on ceramic materials[C]. *CLEO*, 2002. 61
- 5 Yang Lin, Huang Weiling, Qiu Junlin *et al.*. Diode-end-pumped Nd:YAG $1.06 \mu\text{m}$ CW ceramic laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 16~18 (in Chinese)
杨 林,黄维玲,丘军林等. 激光二极管端面抽运的多晶 Nd:YAG $1.06 \mu\text{m}$ 连续激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 16~18
- 6 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
- 7 Zhao Jing. Introduction of ceramic laser, which is comparable to solid-state laser[J]. *OME Information*, 2004, (6): 17~20 (in Chinese)
赵 静. 可与固体激光器性能相媲美的陶瓷激光器[J]. *光机电信息*, 2004, (6): 17~20
- 8 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
- 9 J. Lu, T. Murai, K. Takaichi *et al.*. Highly efficient polycrystalline Nd:YAG ceramic lasers [J]. *CLEO-Technical Digest*, 2001, **1**: I206~I207
- 10 J. Lu, M. Prabhu, K. Ueda *et al.*. Potential of ceramic YAG lasers[J]. *Laser Physics*, 2001, **11**(10): 1053~1057
- 11 J. Lu, K. Ueda, H. Yagi *et al.*. Neodymium doped yttrium garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) nanocrystalline ceramics-a new generation of solid state laser and optical materials[J]. *J. Alloy. Compd.*, 2002, **341**: 220~225
- 12 J. Kong, D. Y. Tang, B. Zhao *et al.*. 9.2-W diode-end-pumped $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramic laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(16): 161116-1~161116-3
- 13 Michel Mortier, Daniel Vivien. Ceramic and glass-ceramic lasers [J]. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 2003, **28**(6): 21~33
- 14 Lou Qihong, Ma Haixia, Qi Yunfeng *et al.*. 5 W CW output $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ transparent ceramic laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 431~432 (in Chinese)
楼祺洪,马海霞,漆云凤等. 透明陶瓷激光器获得 5 W 连续激光输出[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 431~432
- 15 Li Shimin *et al.*. *Laser Instrument Principle and Design* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 156 (in Chinese)
李适民等. *激光器件原理与设计*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 156
- 16 M. Sekita, H. Haneda, T. Yanagitani *et al.*. Induced emission cross section of Nd: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(1): 453~458