

高功率 Yb:YAG 薄片激光器连续和腔倒空实验研究

闫仁鹏^{1,2}, 于欣¹, 李旭东^{1,2}, 周劫¹, 于俊华¹, 周忠祥²

¹哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²哈尔滨工业大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 研究了高功率 Yb:YAG 薄片激光器连续及腔倒空调 Q 输出性能。基于平面波理论, 建立 Yb:YAG 准三能级激光连续运转模型, 对薄片激光器的晶体掺杂和抽运结构进行优化。通过优化实验方案, 研究半导体激光器抽运 Yb:YAG 薄片激光器连续输出性能, 在抽运功率为 199 W 时, 获得功率为 100 W 的 1030 nm 激光输出, 光-光转换效率为 50.2%, 斜率效率为 56.8%。利用 RTP 电光调 Q 开光, 搭建 Yb:YAG 电光腔倒空激光器, 研究 1030 nm 脉冲输出性能, 获得了脉冲宽度为 20.2 ns 的高重复频率 1030 nm 脉冲激光, 脉冲重复频率为 10~100 kHz, 当重复频率为 10 kHz 时, 1030 nm 激光的最大峰值功率达到 109.8 kW。

关键词 激光器; 薄片激光器; 调 Q 技术; LD 抽运; 高重复频率

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701004

High Power Continuous-Wave and Cavity-Dumped Yb:YAG Thin Disk Lasers

Yan Renpeng^{1,2}, Yu Xin¹, Li Xudong^{1,2}, Zhou Jie¹, Yu Junhua¹, Zhou Zhongxiang²

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Lasers, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Research on high power continuous-wave and cavity dumped Yb:YAG thin disk lasers is conducted. Based on the plane-wave quasi-three-level laser model, the parameters of Yb:YAG thin disk laser are optimized. The maximum output power in laser diode pumped Yb:YAG thin disk laser at 1030 nm reaches 100 W with an optical-to-optical efficiency of 50.2% and a slope efficiency of 56.8%. By using RTP electro-optical Q-switched, the cavity-dumped Yb:YAG thin disk laser at 1030 nm is constructed. A constant pulse duration of 20.2 ns is achieved within the repetition rate from 10 kHz to 100 kHz. The maximum output peak power at 1030 nm achieves 109.8 kW with a repetition rate of 10 kHz.

Key words lasers; thin disk laser; Q-switched technique; LD pump; high repetition rate

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3615

1 引言

掺镱离子(Yb³⁺)的激光介质可以产生 1.03 μm 附近的近红外激光, 在激光加工和激光通信等领域有着重要应用, 经过倍频产生的绿光激光可用作掺钛蓝宝石激光器的抽运源。掺镱钇铝石榴石(Yb:YAG)晶体具有热机械性能好、能级结构简单、量子效率高和可掺杂浓度高等特点, 与掺钕离子(Nd³⁺)激光器相比, 更适用于作为高功率连续激光器或者高重复频率激光器的增益介质^[1-4]。

热效应一直是限制高功率激光器输出性能的重要因素, 薄片结构激光器概念的提出明显改善了激光器的热管理能力, 极大地促进了高功率 Yb:YAG 激光器的发展^[5-8]。一方面, 端面散热使热传导方向与激光传输方向一致, 激光传输横截面不存在温度梯度引起的光束畸变; 另一方面, 超薄(约为几百微米)晶体厚度降

收稿日期: 2017-01-20; 收到修改稿日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61605032, 61505042)、中国博士后科学基金面上资助(2015M80263)、中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2017018)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ040164)

作者简介: 闫仁鹏(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: yanrenpeng@126.com

低了晶体形变所引入的热透镜效应。基于以上技术特点, Yb:YAG 薄片激光器的连续输出功率已经达到了千瓦量级^[9]。近些年来, 研究人员对 Yb:YAG 薄片激光器的高重复频率运转特性进行了大量研究, 并获得了高脉冲能量、高重复频率的近红外激光输出。2004 年, Butze 等^[10]利用声光调 Q 开光获得了重复频率为 1 kHz、脉冲能量为 18 mJ、脉冲宽度为 230 ns 的 1030 nm 脉冲激光输出。2007 年, Stolzenburg^[11]利用腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器获得了脉冲宽度为 190 ns 的激光输出, 重复频率最高达到 100 kHz。Hollemann 等^[12]报道了脉冲宽度为 200~700 ns、重复频率为 10~150 kHz 的腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器。可见, 薄片激光器可以获得高平均功率的激光输出, 但是由于 Yb:YAG 晶体的荧光寿命长, 因此其调 Q 激光器的输出脉冲宽度普遍较宽, 限制了激光器输出峰值功率的进一步提高。

本文通过建立 Yb:YAG 准三能级激光平面波理论模型, 分析了薄片激光器抽运往返次数、晶体掺杂浓度和长度、以及冷却温度对激光器输出功率和抽运阈值功率的影响。通过对实验参量优化, 实现了高效率的 LD 抽运 Yb:YAG 薄片激光器连续输出, 1030 nm 连续激光最大输出功率达到 100 W, 光光转换效率为 $\eta_{oo} = 50.2\%$, 斜效率为 $\eta_s = 56.8\%$ 。研究 Yb:YAG 电光腔倒空激光器输出性能, 采用 RTP 晶体作为调制元件, 获得了 10~100 kHz 的高重复频率 1030 nm 脉冲激光输出, 脉冲宽度为 20.2 ns, 脉冲宽度不随重复频率改变而变化, 重复频率为 10 kHz 的 1030 nm 激光脉冲输出的最大峰值功率达到 109.8 kW。

2 薄片激光器理论模型及参量优化

为了获得能够输出高性能激光的 Yb:YAG 薄片激光器, 首先对薄片激光器参量进行了优化。采用平面波理论模型对准三能级薄片激光器进行模拟, 其结构示意图如图 1 所示。其中, I_p^+ 和 I_L^+ 表示增益介质内的抽运和激光强度, 上标 + 和 - 分别代表正向和反向传播光强。

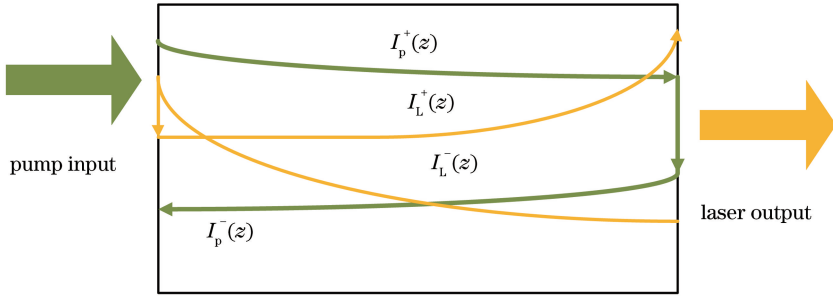


图 1 薄片激光器平面波模型示意图

Fig. 1 Schematic of plane wave model of thin disk lasers

掺 Yb³⁺ 离子的准三能级速率方程可表示为^[13-14]

$$\frac{\partial N_1(t, z)}{\partial t} = -\frac{\partial N_0(t, z)}{\partial t} = \sigma_p(f_0^p N_0 - f_1^p N_1) \frac{\sum_{i=1}^N (I_{p,i}^+ + I_{p,i}^-)}{h\nu_p} + \sigma_L(f_0^L N_0 - f_1^L N_1) \frac{(I_L^+ + I_L^-)}{h\nu_L} - \frac{N_1}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial I_{p,i}^+(t, z)}{\partial t} = \pm \sigma_p(f_0^p N_0 - f_1^p N_1) I_{p,i}^+(t, z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial I_L^+(t, z)}{\partial t} = \pm \sigma_L(f_0^L N_0 - f_1^L N_1) I_L^+(t, z), \quad (3)$$

式中 N_1 和 N_0 分别代表激光上下能级粒子数密度, $h\nu_p$ 表示抽运光子能量, τ 表示激光上能级寿命, f_0^L 和 f_1^L 分别表示激光上下斯塔克能级的波尔兹曼因子。 f_0^p 和 f_1^p 分别表示抽运上下斯塔克能级的波尔兹曼因子, 其具体数值可以通过波尔兹曼分布计算

$$f_i = \frac{\exp(-E_i/kT)}{\sum_i \exp(-E_i/kT)}, \quad (4)$$

式中 E_i 表示激光斯塔克分裂能级所对应的能量, k 表示波尔兹曼常数, T 表示温度。激光晶体两个能级

的总粒子数 N_i 可表示为

$$N_i = N_0 + N_1. \quad (5)$$

激光的受激发射截面(σ_L)和吸收截面(σ_P)是与温度有关的参量,Yb:YAG 的受激发射截面和吸收截面随温度的变化关系可表示为^[15]

$$\sigma_P(941, T) = \left[0.207 + 0.637 \exp\left(-\frac{T - 273}{288}\right) \right] \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \quad (6)$$

$$\sigma_L(1030, T) = [15.67386 - 0.07609T + 1.06911 \times 10^{-4} T^2] \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \quad (7)$$

式中 941 和 1030 分别为激光的吸收和发射波长。

在 Yb:YAG 薄片激光器中,抽运光和振荡光所满足的边界条件可表示为

$$I_{P,i}^-(l) = R_{r,P} I_{P,i}^+(l), I_L^-(l) = R_{r,L} I_L^+(l), \quad (8)$$

$$I_{P,i+1}^+(0) = R_{f,P} I_{P,i}^-(0), I_L^+(l) = R_{f,L} I_L^-(0), \quad (9)$$

式中 $R_{f,P}$ 和 $R_{f,L}$ 分别表示薄片后端全反对抽运光和振荡激光的反射率, $R_{r,P}$ 表示抛物镜和棱镜对抽运光的反射率, $R_{r,L}$ 表示输出镜对振荡光的反射率。在稳态过程中,往返振荡激光强度满足以下条件

$$R_{r,L} I_L^+(l)^2 = R_{f,L} I_L^-(0)^2. \quad (10)$$

通过求解(1)~(10)式可以获得晶体和抽运参量对阈值抽运功率和输出功率的影响。晶体长度和浓度的改变都使激光晶体的吸收特性和增益特性发生了改变,因此定义参量有效光学长度 $l_{\text{ocl}} = l \times n_{\text{doped}}$ 来对其进行统一分析,式中, n_{doped} 表示晶体中的掺杂浓度百分比。图 2 和图 3 分别为激光输出功率密度和阈值抽运功率密度随有效晶体长度和抽运往返次数的变化关系。数值模拟中所采用的参数数值为: $R_{f,P} = 0.992$, $R_{r,P} = 0.99$, $R_{r,L} = 0.99$, $R_{f,L} = 0.96$, $T = 300 \text{ K}$, $I_{P,0} = 5 \text{ kW/cm}^2$, $\tau = 951 \mu\text{s}$ 。由图 2 可见,激光输出功率密度随有效晶体长度的增加而增加,当有效晶体长度足够大,晶体对抽运光的吸收达到饱和时,激光输出功率密度也达到饱和。此时,增加有效晶体长度,激光输出功率密度不会再产生变化。对于 32 程和 24 程抽运,当有效光学长度 $l_{\text{ocl}} > 0.2$ 时,输出功率密度不会产生明显的变化。阈值抽运功率和晶体有效晶体长度的关系也呈现出类似规律,饱和状态下,晶体有效长度的增加对阈值抽运功率密度产生的影响不明显。有效晶体长度过大会增加激光器中的热效应,影响激光器的输出性能。此外,在相同晶体有效长度条件下,抽运往返次数的增加会明显提高激光输出功率密度,降低阈值抽运功率密度。

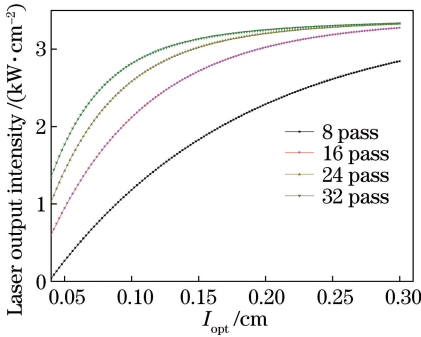


图 2 激光输出功率密度随有效晶体长度和抽运往返次数的变化曲线

Fig. 2 Variation of laser output intensity versus effective optical length and pump passes

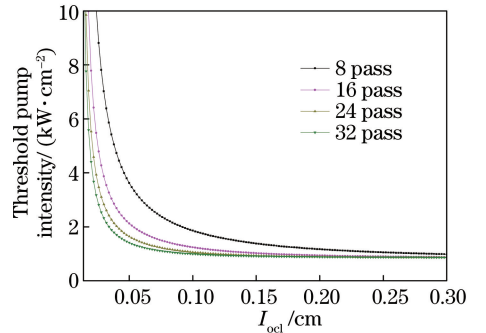


图 3 阈值抽运功率密度随有效光学晶体长度和抽运往返次数的变化曲线

Fig. 3 Variation of threshold pump intensity versus effective optical length and pump passes

由于晶体能级的粒子数布局量、受激发射以及吸收截面都与温度有关,因此,晶体的冷却温度对激光器的输出性能也会产生影响。图 4 为激光输出功率密度和阈值抽运功率密度随晶体温度变化的关系图,其中 $l_{\text{ocl}} = 0.2$ 。当温度上升时,激光下能级粒子数增加,导致激光输出功率密度的减少以及阈值抽运功率密度的增加,而往返抽运次数的减少也会使这种作用更加明显。

3 实验装置

薄片激光器所采用的抽运结构和抛物面反射镜如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,二极管激光器光纤耦

合输出的抽运光经过透镜组准直后,经过抛物面镜反射到晶体内。抛物面镜截面示意^[3]如图 5(b)所示,位置 1 为抽运光入射光斑,利用晶体后表面的反射膜可以使抽运光再次经过晶体,入射到抛物面镜位置 2 处,经反射到抛物面镜位置 3 处,第三次入射到晶体中,如此往返经过晶体 12 次后,利用反射棱镜使抽运光逆向经过上述光路,使其再次往返经过晶体 12 次,完成往返 24 次抽运晶体过程,使晶体充分吸收抽运光,抽运光在抛物面镜上的具体往返过程如图 5(b)所示。

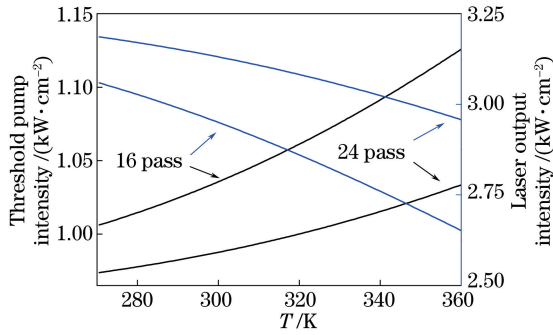


图 4 激光输出功率密度和阈值抽运功率密度随晶体温度变化的曲线

Fig. 4 Variation of laser output intensity and threshold pump intensity versus cooling temperature in crystal

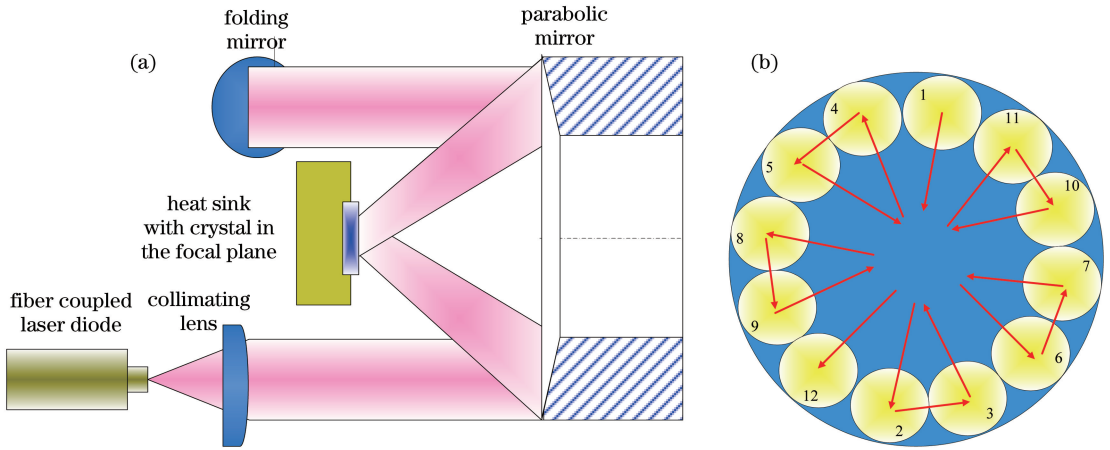


图 5 薄片激光器 24 程抽运结构示意图。(a)抽运光传输过程;(b)抛物面镜截面示意图

Fig. 5 Schematic of the thin disk laser with 24 pump beam passes. (a) Path of pump laser; (b) cross profile of the parabolic mirror

Yb:YAG 薄片1030 nm 激光器的实验装置如图 6 所示。Yb:YAG 晶体厚度为227 μm,直径为 9 mm,掺杂原子数分数为 9%,晶体的后表面镀有对抽运光和振荡光的高反膜(在 940 nm 和 1030 nm 处高反),晶体水冷温度为 20 °C。抽运光斑直径为 2 mm,晶体对抽运光的吸收效率可以达到 96%以上,输出镜对 1030 nm 激光的透过率为 4%。采用的抽运源为光纤耦合输出 940 nm 的半导体激光器,光纤的纤芯直径为

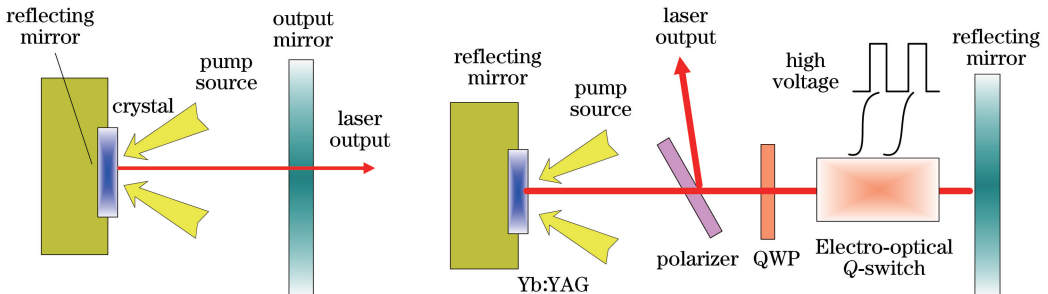


图 6 Yb:YAG 薄片激光器(a)连续和(b)腔倒空实验装置图

Fig. 6 Schematic of (a) continuous-wave and (b) cavity-dumped Yb:YAG thin disk laser

400 μm ,最大输出功率 200 W,最高输出功率时的中心波长为 938.4 nm($T=25\text{ }^\circ\text{C}$),波长分布 $\Delta\lambda<5\text{ nm}$,满足 Yb:YAG 薄片晶体对抽运源的要求。图 5(b)中为腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器的实验装置图,利用 RTP 普克尔盒作为腔倒空激光器的调制元件,最大工作电压为 2.5 kV,偏振片的消光比可以达到 200:1,腔倒空激光器的谐振腔长度为 250 mm。

4 实验结果与讨论

Yb:YAG 准三能级薄片激光器的连续输出性能如图7所示。1030 nm 激光输出功率随注入抽运功率呈良好的线性关系,激光器抽运阈值为 12 W,在抽运功率为 199 W 时获得的 1030 nm 最大连续输出功率为 100 W,光-光转换效率 $\eta_{\text{oo}}=50.2\%$,斜效率 $\eta_s=56.8\%$ 。图 7 中平面波模型下的 Yb:YAG 薄片激光器输出功率的理论计算斜效率 $\eta_s=66.8\%$ 。晶体在高功率抽运情况下存在微弱畸变,对谐振腔内的振荡激光模式分布有影响,模式间耦合效率的下降导致了激光器效率与理论计算结果的差别。利用光纤光谱仪(HR4000,海洋光学,上海)测量了 Yb:YAG 准三能级薄片激光器的1030 nm 输出光谱如图 8 所示。激光波长在 1029.8 nm 和 1030.6 nm 存在两个峰值,相对强度基本相同,分析认为波长的双峰分布主要是激光跃迁能级中的能级分裂造成的。

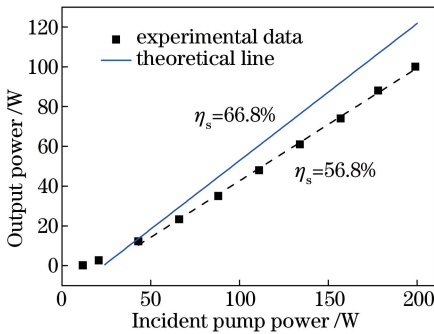


图 7 Yb:YAG 薄片激光器连续输出功率随注入抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Output power of continuous-wave in Yb:YAG thin disk laser versus input pump power

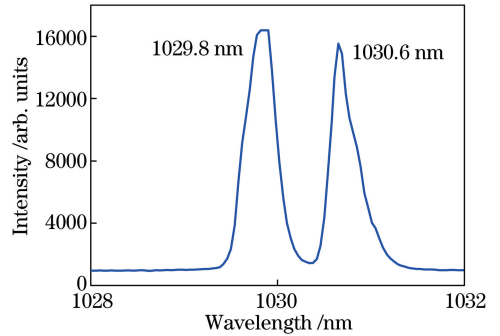


图 8 Yb:YAG 薄片激光器输出光谱图

Fig. 8 Output spectrum of Yb:YAG thin disk laser

图9为 Yb:YAG 薄片激光器100 kHz 腔倒空平均输出功率随注入抽运功率的变化曲线。腔倒空脉冲激光器的平均输出功率随注入抽运功率线性增长,斜效率 $\eta_s=22.7\%$,最大输出平均功率为 42 W,光-光转换效率为 21%。抽运功率为 200 W 时,腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器平均输出功率和峰值功率随重复频率的变化关系如图10 所示。在低重复频率时,输出平均功率随脉冲工作重复频率呈线性增长关系,当重复频率

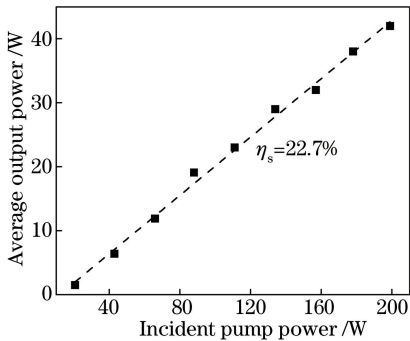


图9 100 kHz 腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器平均输出功率随注入抽运功率变化曲线

Fig. 9 Average output power of cavity-dumped Yb:YAG thin disk laser at 100 kHz versus incident pump power

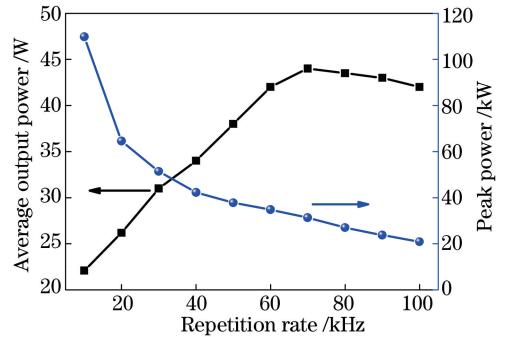


图 10 腔倒空 Yb:YAG 薄片激光器平均输出功率和峰值功率随重复频率的变化曲线

Fig. 10 Average output power and peak power of cavity-dumped Yb:YAG thin disk laser versus repetition rate

达到 70 kHz 时,平均输出功率达到最大值 43 W,随后平均功率呈现饱和,平均功率开始略微下降。而输出脉冲峰值功率随重复频率的增加而减小,10 kHz 时获得最大峰值功率为 109.8 kW 的脉冲激光输出,100 kHz 时的峰值功率减小为 20.9 kW。

图 11 为 Yb:YAG 腔倒空薄片激光器瞬态脉冲波形和脉冲序列图。当注入抽运功率和脉冲调制频率发生改变时,输出脉冲宽度并不发生改变,与腔倒空理论相一致,脉冲宽度在 20.5 ns 左右,最短脉冲宽度可达到 20.1 ns,如图 11(a)所示。图 11(b)所示为 Yb:YAG 腔倒空薄片激光器重复频率为 50 kHz 的脉冲序列图,脉冲序列的峰值和宽度间隔都十分稳定。

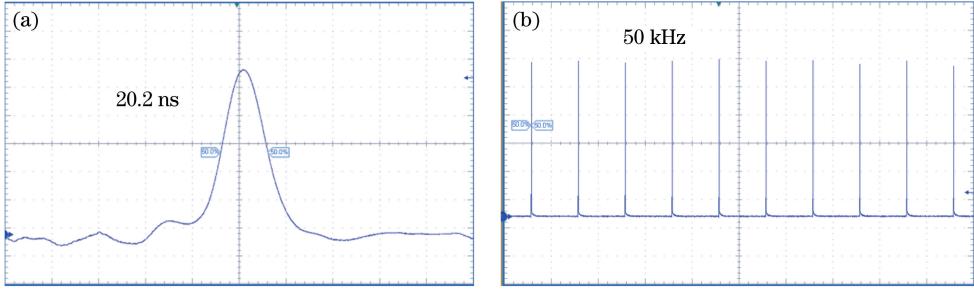


图 11 Yb:YAG 腔倒空薄片激光器脉冲波形和序列图。(a)脉冲宽度为 20.2 ns 的脉冲波形;
(b)重复频率为 50 kHz 的瞬态脉冲序列

Fig. 11 Pulse profile and temporal pulse train of cavity-dumped Yb:YAG thin disk laser.

(a) Pulse profile with pulse duration of 20.2 ns; (b) temporal pulse train at repetition rate of 50 kHz

利用光束轮廓分析仪(LBA-712PC-D,Spiricon 公司,美国)对 1030 nm Yb:YAG 薄片激光器输出的激光光强分布进行了测量,其光强分布如图 12 所示。此时激光输出为多模运转,光强分布近似平顶光束,且分布集中,各个方向都具有良好的对称性。

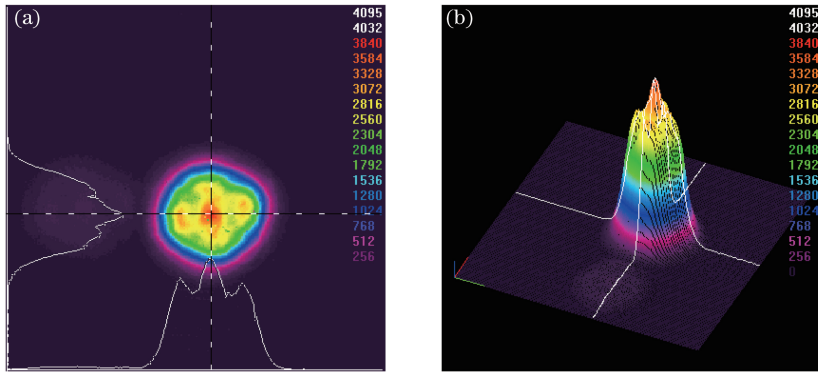


图 12 1030 nm Yb:YAG 薄片激光器输出光强分布图。(a)二维分布图;(b)三维分布图

Fig. 12 Output intensity distribution of Yb:YAG thin disk laser at 1030 nm.

(a) Two-dimensional distribution; (b) three-dimensional distribution

5 结 论

根据平面波理论模型,理论研究了 Yb:YAG 准三能级激光输出性能,分析了薄片激光器抽运往返次数、晶体掺杂浓度和长度以及冷却温度对激光器输出的影响,并对激光器参量进行了优化选择。当抽运功率为 199 W 时,LD 抽运 1030 nm Yb:YAG 薄片激光器的最大连续输出功率可以达到 100 W,光-光转换效率为 $\eta_{o-o} = 50.2\%$,斜效率为 $\eta_s = 56.8\%$,并与理论模拟结果进行了对比分析。利用 RTP 电光晶体,实验研究 Yb:YAG 电光腔倒空激光器输出性能,获得了高重复频率、窄脉冲宽度的 1030 nm 脉冲激光输出,脉冲重复频率为 10~100 kHz,脉冲宽度不随重复频率变化而变化,最窄脉冲宽度为 20.2 ns,进一步压窄了目前所报道的腔倒空 Yb:YAG 激光器的输出脉冲宽度。高功率 Yb:YAG 薄片激光器连续及腔倒空输出性能的研究,对于获得窄脉冲宽度高输出功率的 Yb:YAG 激光器具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Ma Yi, Wang Chunhua, Wang Weimin, *et al.* 16-pass pumped micro-channel cooled Yb:YAG thin disk lasers[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 82-85.
马毅, 王春华, 王卫民, 等. 16 通抽运微通道冷却 Yb:YAG 薄片激光器[J]. *激光技术*, 2011, 35(1): 82-85.
- [2] Geng Yingge, Li Long, Pan Xiaorui, *et al.* Temperature field of pulsed LD end-pumped square Yb:YAG crystal with variable thermal-conductivity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081401.
耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. 脉冲 LD 端面抽运变热导率方片 Yb:YAG 晶体温度场[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081401.
- [3] Yu Yang, Zhu Jiangfeng, Li Jiang, *et al.* High power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1001007.
于洋, 朱江峰, 李江, 等. 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001007.
- [4] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 598-609.
- [5] Kränkel C, Huber G, Petermann K. Solid-state lasers: status and future[J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B93-B105.
- [6] Giesen A, Hügel H, Voss A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Applied Physics B*, 1994, 58(5): 365-372.
- [7] Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Lü Huachang, *et al.* Laser-diode arrays symmetrically side-pumped thin disk laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 168-172.
张申金, 周寿桓, 吕华昌, 等. 激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 168-172.
- [8] Li Qiang, Cai Yanfang, Jiang Menghua, *et al.* Laser diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1793-1797.
李强, 蔡艳芳, 姜梦华, 等. 激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1793-1797.
- [9] Killi A, Stolzenburg C, Sutter D, *et al.* The broad applicability of the disk laser principle: from CW to ps[C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7193: 71931T.
- [10] Butze F, Larionov M, Schuhmann K, *et al.* Nanosecond pulsed thin disk Yb:YAG lasers[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Optical Society of America, 2004: 237.
- [11] Stolzenburg C, Giesen A, Bulze F, *et al.* Cavity-dumped intracavity-frequency-doubled Yb:YAG thin disk laser with 100 W average power[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1123-1125.
- [12] Hollemann G, Heist P, Heinitz S, *et al.* Pulsed Yb:YAG thin disk laser with 100 W at 515 nm[C]. *Proceedings of SPIE Lasers & Application in Science & Engineering*, 2007, 64510D: 1-7.
- [13] Lim C, Izawa Y. Modeling of end-pumped CW quasi-three-level lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(3): 306-311.
- [14] Jafari A K, Aas M. Continuous-wave theory of Yb:YAG end-pumped thin disk lasers[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): 106-113.
- [15] Huang L, Gong M, Liu Q, *et al.* Effects of the temperature dependence of absorption coefficients in edge-pumped Yb:YAG slab lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(9): 2081-2089.