

高平均功率腔倒空纳秒薄片激光器

戴隆辉^{1,2}, 刘锐¹, 公发全¹, 李想¹, 邓淞文¹, 贾勇¹, 金玉奇¹, 李刚^{1*}¹中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于自主研制的 24 通薄片泵浦模块, 开展了高重复频率、窄脉宽、高光束质量的腔倒空激光技术研究。首先, 基于朗伯-比尔定律, 计算了不同厚度的薄片晶体的吸收效率和泵浦多通数之间的关系; 其次, 基于准三能级速率方程, 计算了阈值泵浦功率、连续输出功率与输出镜透过率的关系, 并对腔倒空谐振腔中光子数密度随时间的变化规律进行了研究。最后, 采用该多通泵浦模块进行了连续出光实验, 获得了输出功率为 94.1 W 的 1030 nm 连续 p 偏振激光输出, 其光-光转化效率为 52.28%, 斜率效率为 60%, 光束质量为 $M_x^2 = 2.05, M_y^2 = 1.93$ 的基模输出; 不改变腔型结构, 插入普克尔盒和 1/4 波片, 获得了脉冲宽度为 7.43 ns, 重复频率为 100 kHz 的 1030 nm 脉冲输出, 平均输出功率为 65.4 W, 光-光效率为 36.33%, 斜效率为 45%, 光束质量 $M_x^2 = 2.37, M_y^2 = 2.20$ 。

关键词 激光器; 薄片激光器; 腔倒空; 多通泵浦; 重复频率; 光束质量

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1301002

1 引言

纳秒激光器用途广泛, 成本适中, 可靠性高, 广泛应用于激光加工、激光打标、激光清洗等领域。重复频率是描述单位时间内激光脉冲数量的重要指标, 重复频率越高, 单位时间内的工作脉冲数量越多, 在高速度、高精细度加工时可获得更高质量的加工效果。因此, 窄脉宽、高平均功率和高重复频率是这个领域的发展趋势^[1-3]。随着泵浦功率的提高, 传统的激光器如光纤激光器由于存在受激布里渊散射、背向散射等很强的非线性效应, 导致输出的脉冲宽度较宽, 峰值功率受到限制^[4]。棒状激光器由于产生的热量径向分布且温度分布不均匀, 径向的温度梯度会导致严重的热透镜效应, 影响纳秒激光的高功率输出和光束质量^[5]。

而薄片激光器的出现有效改善了这一现状^[6-7], 通过采用多通泵浦技术弥补了增益介质单程吸收效率过低的缺点, 提高了其泵浦吸收效率, 而单面泵浦背向冷却的方式, 又进一步减小了晶体的热透镜效应, 使得其在连续和脉冲领域获得了广泛的应用。

薄片激光器相较于光纤激光器, 由于其晶体厚度仅为 100~200 μm , 激光通过晶体的距离很短, 其非线性效应几乎可以忽略不计, 有效克服了非线性效应对输出脉冲激光光束质量的影响, 结合腔倒空调 Q 技术, 甚至可以产生百纳秒的脉冲宽度, 高达 GW 的峰值功率脉冲输出; 另一方面, 薄片激光器端面泵浦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, 从而可以实现接近衍射极限的光束质量, 并且薄片激光器具有厘米级的增益区域, 容易实现高平均功率的纳秒脉冲激光输出。因此, 综合以上特点, 基于多通泵浦薄片技术的腔倒空纳秒激光器可以有效实现高平均功率、高光束质量、窄脉冲宽度的纳秒脉冲输出。因此, 在纳秒脉冲激光领域, 多通泵浦薄片激光器迅速成为国内外各科研机构的研究热点。

近些年来, 研究人员对基于多通泵浦薄片技术的高重复频率、高光束质量的纳秒激光器进行了大量研究。2004 年, 德国斯图加特大学的 Butze 等^[1]采用声光调 Q 方式获得了重复频率为 13 kHz、平均输出功率为 64 W、脉冲宽度为 250 ns 的脉冲输

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 大连市科技创新基金(2018J11CY013)

通信作者: *lig@dicp.ac.cn

出,光-光转换效率为 25%。2010 年德国通快公司^[8]实现了最大输出功率 700 W、重复频率为 100 kHz、脉冲宽度在 200~750 ns 之间可调、光-光转换效率为 35% 的脉冲输出。2011 年,法国 Ricaud 等^[9]利用普克尔盒电光调 Q 获得了单脉冲能量为 1 mJ、重复频率为 100 Hz 的调 Q 脉冲输出,平均功率为 0.1 W,光-光转换效率为 16.9%。2008 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Cai 等^[10]利用声光调 Q 方式获得了最小脉冲宽度 166 ns、最大平均输出功率为 0.47 W 的调 Q 脉冲输出,重复频率在 1~30 kHz 可调。2010 年,中国工程物理研究院王春华等^[11]对 Yb:YAG 薄片晶体进行 16 通泵浦,通过声光调 Q 方式获得了重复频率 5 kHz、平均输出功率 10.2 W、脉冲宽度 150 ns、波长为 515 nm 的绿光输出,光-光转换效率为 12.5%。2017 年,哈尔滨工业大学闫仁鹏等^[12]使用普克尔盒腔倒空调 Q 获得了平均功率为 42 W,脉冲宽度为 20.3 ns,光-光转换效率为 21% 的脉冲输出。综上所述,由于技术和理论上的不成熟,国内在高功率脉冲输出的薄片激光器领域与国外仍有较大差距,获得的调 Q 脉冲输出光-光转换效率低且光束质量较差。基于薄片技术的纳秒激光器的技术难点主要体现在多通泵浦系统的设计、Q 开关电源调制技术和晶体焊接技术,而商用的薄片激光器由于制作成本高、技术要求高而被国外所垄断。

针对以上问题,本文对多通泵浦系统多通数与吸收效率的关系、输出镜透过率与输出功率的关系以及腔倒空调 Q 方式的光子数密度变化规律进行

了系统性的研究,优化了多通泵浦模块晶体厚度、多通数等关键技术参数,获得了腔倒空输出的纳秒脉冲波形。然后,基于以上优化参数,实验室自主设计了 24 通薄片泵浦模块,通过优化谐振腔腔型,研制了一台具有高动态稳定性和低阶模输出的腔倒空调 Q 激光器。最终,在 180 W 的泵浦功率下,实现了最高脉冲重复率达 100 kHz 的稳定脉冲,平均输出功率为 65.4 W,脉冲宽度为 7.43 ns,光束质量为 $M_x^2 = 2.37, M_y^2 = 2.20$ 的调 Q 脉冲激光输出。本文从理论和实验上研究了腔倒空薄片 Yb:YAG 激光器,建立了理论模型并进行了仿真计算,搭建了实验装置,理论预测得到实验验证,而且实验结果明显超过前人文献报道,对相关研究工作有重要的借鉴意义。

2 薄片激光器连续及腔倒空理论分析

2.1 吸收效率与泵浦通数之间的关系

多通泵浦薄片激光器一般由一个抛物面反射镜和几个直角转折反射棱镜组成,如图 1 所示,其工作原理为,当泵浦光注入到 Yb:YAG 晶体时,由于晶体有一定厚度,薄片晶体会吸收一部分光能,剩余反射光通过反射棱镜后再次聚焦于晶体上,周而复始,最终实现了一束泵浦光多次通过晶体,弥补了由于晶体厚度造成的吸收效率过低的缺点。假设入射的泵浦功率为 P ,转折棱镜的反射率为 R_1 ,抛物面镜的反射率为 R_2 ,晶体后表面的反射率为 R_Y ,晶体的吸收系数为 α ,晶体的厚度为 L ,晶体入射的角度为 θ 。当泵浦光通过薄片晶体一次时,晶体吸收两次泵浦光。

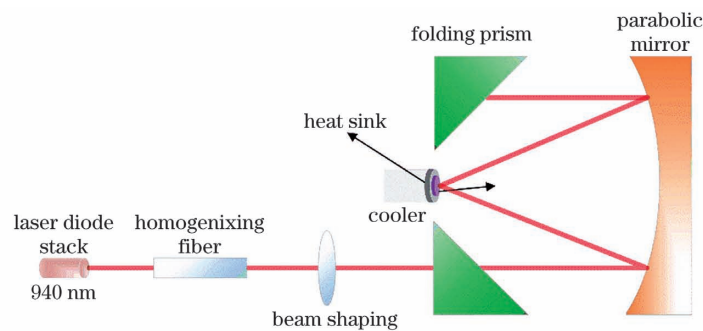


图 1 薄片激光器 24 通泵浦结构示意图

Fig. 1 Schematic of thin-disk laser with 24 pump beam passes

第 1 次吸收功率:

$$P_1 = PR_2 \cdot [1 - \exp(-\alpha L / \cos \theta)] \quad (1)$$

第 1 次吸收后剩余功率:

$$P_{1n} = P - P_1 = PR_2 \exp(-\alpha L / \cos \theta) \quad (2)$$

第 2 次吸收功率:

$$P_2 = P_{1n} \cdot R_Y \cdot [1 - \exp(-\alpha L / \cos \theta)] =$$

$$PR_2 R_Y \exp(-\alpha L / \cos \theta) [1 - \exp(-\alpha L / \cos \theta)] \quad (3)$$

第 2 次吸收后剩余功率:

$$P_{2n} = PR_2 R_Y \exp(-2\alpha L / \cos \theta) \quad (4)$$

为了简化公式,令 $A = \exp(-\alpha L / \cos \theta)$ 。那么,第 $N-1$ 、 N 次吸收的功率为

$$\begin{cases} P_{N-1} = PR(1-A) \cdot (R^5 A^2)^{N/2-1} \\ P_N = PR(1-A) \cdot (R^5 A^2)^{N/2-1} \cdot RA \end{cases} \quad (5)$$

于是,联立以上公式,得到薄片晶体对泵浦光的吸收效率为

$$\eta = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{N-1} + P_N}{P} = \frac{PR(1-A) \cdot (1+RA)[1 + R^5 A^2 + R^{10} A^4 + \dots + (R^5 A^2)^{N/2-1}]}{P} \quad (6)$$

(6)式中括号里面是一个等比数列,由求和公式可以得出 N 程对泵浦光的吸收效率:

$$\eta = R(1-A)(1+RA) \cdot \frac{1 - (R^5 A^2)^{N/2}}{1 - R^5 A^2} \quad (7)$$

基于我们光学精密加工实验室的平台优势,棱镜、抛物面反射镜等反射率可以达到 $R = 99.9\%$,掺杂摩尔分数为 7% 的 Yb:YAG 薄片晶体的吸收系数 $\alpha = 10.9 \text{ cm}^{-1}$,入射角度 θ 取为 30° 。将以上常数代入(7)式中,晶体厚度分别取 $100 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$,得到泵浦多通数与吸收效率之间的关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,同一晶体厚度下,吸收效率随多通数的增加而增加。同一多通数下,晶体厚度值越大,吸收效率越大。当 $N = 24$ 时, $200 \mu\text{m}$ 和 $300 \mu\text{m}$ 厚度的晶体吸收效率大于 $100 \mu\text{m}$ 厚度的晶体,而 $200 \mu\text{m}$ 与 $300 \mu\text{m}$ 厚度的吸收效率基本相当。因为多通数到达一定数量后,吸收效率会达到饱和。但是晶体厚度越厚,伴随的热透镜效应越显著。由此可见,为了获得高吸收效率的同时实现低的热透镜效应,减少晶体的厚度和增加泵浦多通数是行之有效的办法。但是,由于目前晶体的厚度越薄,加工难度越大,多通数越多,泵浦系统越复杂。

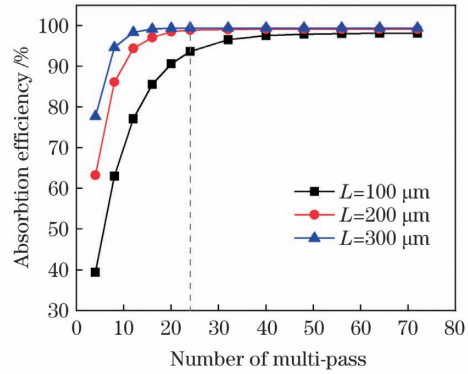


图 2 薄片晶体的吸收效率随多通数的变化

Fig. 2 Absorption efficiency of thin-disk crystal versus number of multi-pass

因此,为了实现吸收效率、热透镜效应与加工难度的平衡,多通泵浦模块的薄片晶体的厚度选取为 $200 \mu\text{m}$,多通数 $N = 24$,此时的吸收效率为 98.81% ,与饱和吸收效率基本相等。

2.2 连续输出时,泵浦功率、输出功率与输出耦合率的关系

图 3 为 Yb:YAG 中 Yb^{3+} 的能级结构,在工作状态下,Yb:YAG 由于泵浦的作用,基态能级和激发态能级产生 Stack 能级分裂,形成准三能级的激光运行机制。

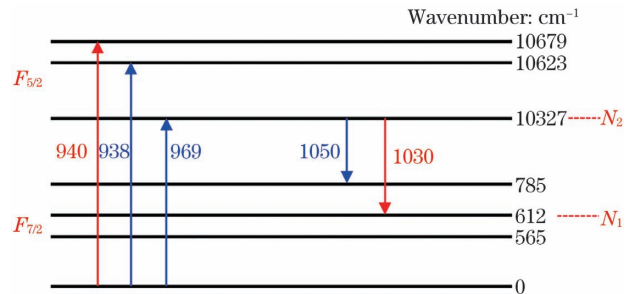


图 3 Yb:YAG 的能级结构

Fig. 3 Energy level structure of Yb:YAG

Yb:YAG 准三级系统的速率方程^[13]为

$$\frac{dN_2(r, z)}{dt} = f_2 R r_p(r, z) - \frac{N_2(r, z) - N_2^0}{\tau} - \frac{f_2 c \sigma [N_2(r, z) - N_1(r, z)]}{n} \varphi \varphi_0(r, z), \quad (8)$$

$$\frac{dN_1(r, z)}{dt} = -f_1 R r_p(r, z) - \frac{N_1(r, z) - N_1^0}{\tau} + \frac{f_1 c \sigma [N_2(r, z) - N_1(r, z)]}{n} \varphi \varphi_0(r, z), \quad (9)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r, z) \varphi \varphi_0(r, z) dV - \frac{c\delta}{2nL} \varphi, \quad (10)$$

式中: $N_1(r, z)$ 为稳态时下能级粒子数; $N_2(r, z)$ 为稳态时上能级粒子数; N_1^0 为热平衡时下能级的粒子数; N_2^0 为热平衡时上能级粒子数; f_1 、 f_2 分别为下能级、上能级粒子数占基态和激发态能级的权重;

c 为光速; σ 为受激发射截面面积; n 为增益介质的折射率; R 为泵浦速率; τ 为 Yb:YAG 上能级寿命; δ 为腔内的往返损耗,包括散射损耗、吸收损耗等; L 为腔长; φ 为腔内光子数; $r_p(r, z)$ 为泵浦光的

归一化空间分布函数,即 $\iiint r_p(r, z) dV = 1$ 。

对于薄片激光器,由于薄片晶体的特殊结构,晶体的厚度远小于腔长,故而积分区间严格控制在薄片晶体内。

对于薄片晶体均匀泵浦 $r_p = \frac{1}{\pi\omega_p^2 l}$ 。当谐振腔处于稳态时,速率方程可化简为

$$\frac{d\Delta N(r, z)}{dt} = fRr_p(r, z) - \frac{\Delta N(r, z) - \Delta N^0}{\tau} - \frac{c\sigma f \Delta N(r, z)}{n} \varphi\varphi_0 = 0, \quad (11)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r, z) \varphi\varphi_0(r, z) dV - \frac{c\delta}{2nL} \varphi = 0, \quad (12)$$

式中: $f = f_1 + f_2$; $\Delta N = N_2 - N_1$; $\Delta N_0 = N_2^0 - N_1^0$ 。

泵浦速率 R 可以表示为 $R = \frac{\eta_p P_{in} \eta_{abs}}{h\nu_p}$ 。对于多通泵浦, η_{abs} 可以根据(7)式进行迭代。对于 Yb:YAG 晶体, η_p 为量子效率。

联立(11)、(12)式即可解出 P_{in} , 此时的 P_{in} 即为阈值功率。

$$P_{th} = \frac{\pi\omega_p^2 h\nu_p}{2\eta_p \eta_{abs} \sigma \tau (f_1 + f_2)} (2N_1^0 \sigma l + \delta), \quad (13)$$

式中: $\delta \approx T + 2L_i$, T 为输出镜透过率, L_i 为包括散射损耗、吸收损耗在内的总附加单程损耗。

另外根据 Jafari 等^[3] 的文献,可以得出 Yb:YAG 薄片激光器连续出光的输出功率:

$$P_{out} = \frac{2(P_p - P_{th})\eta_{abs}\nu_l T}{\nu_p [1 + R(1 - L_i)] (T + 2L_i)}. \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式中,取透过率 $T = 2.5\%$, 其余参数 $\omega_p = 0.125 \text{ mm}$, $\tau = 0.95 \text{ ms}$, $l = 200 \mu\text{m}$, $\sigma = 2.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $N_1^0 = 4.47 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。通过数值分析得到阈值泵浦功率、输出功率与透过率的曲线。

从图 4 可以看出,腔内损耗 L_i 越小,连续输出的功率越大。在不同腔内损耗的条件下,输出功率随输出镜的透率先增加后减小。因此,存在一个最佳的输出透过率,此时输出功率最大。参考文献中腔内损耗的典型值 $L_i = 0.002$, 此时对应的最佳输出耦合率为 2.5% 。从图 5 可以看出,阈值泵浦功率与输出耦合镜透过率呈线性关系,当透过率为 2.5% 时,阈值泵浦功率为 36.67 W 。由此可得,腔内损耗和输出镜透过率是制约输出功率的关键因素,因此,为了获得最大的输出功率,需要设计合适

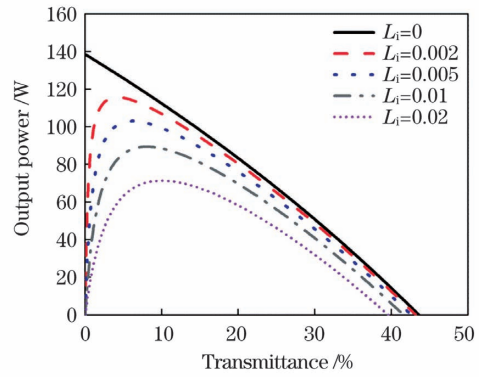


图 4 输出功率随输出耦合镜透过率的变化

Fig. 4 Output power versus transmittance of output coupler

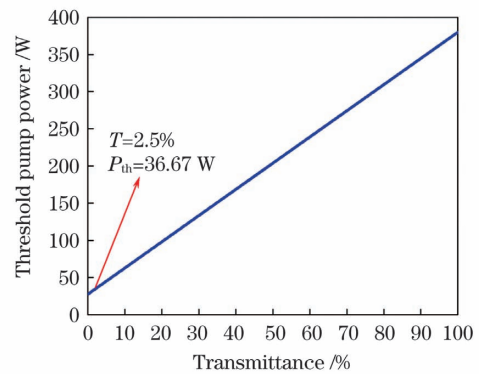


图 5 阈值泵浦功率随输出耦合镜透过率的变化

Fig. 5 Threshold pump power versus transmittance of output coupler

的腔长以及选择合适的输出镜透过率以实现较小的腔内损耗。

2.3 腔倒空调 Q 仿真模拟

偏硼酸钡(BBO)晶体在外加电场作用下,其折射率会发生变化,使通过晶体的不同偏振方向的光之间产生相位差,从而导致光的偏振状态发生变化。于是通过控制高压电源的开关,可以控制腔倒空激光器的状态(振荡不输出或输出不振荡)。

对于一个简单的腔倒空调 Q 激光器,即假设 Q 开关可以瞬时开启,则在 Q 开关开启后,激光器谐振腔的速率方程组为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi}{t_r} \left\{ 2\sigma n l - \left[\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \right\} + 2\xi \frac{n}{\tau_c} \frac{1 + l\sigma n}{t_r}, \quad (15)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma c \Phi n - \frac{n}{\tau_c} + p_{in}, \quad (16)$$

式中: Φ 为腔内光子数密度; n 为增益介质反转粒子数密度; l 为 Yb:YAG 薄片晶体的长度; R 为输出镜的反射率; L 为谐振腔的总损耗; $t_r = 2l/c$, 为光

子在谐振腔往返一周的渡越时间, l_c 为腔的光学长度; γ 为反转因子(三能级时 $\gamma=2$); τ_c 为 Yb: YAG 的上能级寿命; $p_{in} = W_{in}/h\nu_p \pi \omega_p^2 l$ 为平均泵浦速率; ξ 为自发辐射中振荡模式光子数占总自发光子数的比例(这一项的意义在于, 为腔内光子振荡提供最初的信号来源, 如果没有这一项, 当腔内光子数初始状态为 0 时, 则无法使光子数增加)。

从图 6 可以看出, 在 $0 \sim 2 \times 10^{-4}$ s 这段时间内, Q 开关关闭, 反转粒子数积累。在 2×10^{-4} s 的时刻, Q 开关打开, 积累的反转粒子数在一瞬间释放出来, 腔内的光子数倒空, 形成激光纳秒脉冲, 计算得到的脉冲宽度为 8.96 ns。在腔倒空 Q 方式中, 脉冲宽度只与谐振腔腔长和 Q 开关的速度有关, 与激光介质的增益特性和重复频率无关。理论上来说, 只要 Q 开关的速度足够快, 输出的激光脉冲宽度就等于激光在腔内的往返渡越时间。因此, 为了获得更窄的脉宽, 必须缩短腔长和选择更快的 Q 开关。同时, 结合图 4 可知, 腔长越短, 腔内损耗越小, 输出功率越大。

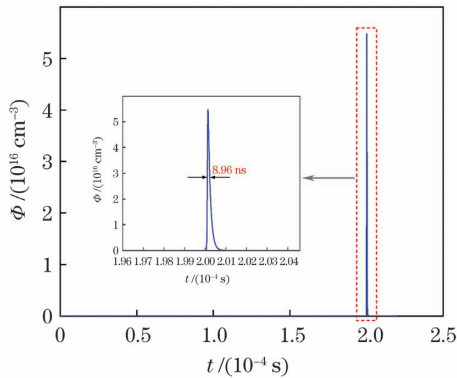


图 6 腔内光子数密度随时间的变化

Fig. 6 Intracavity photon density versus time

3 实验装置

实验室自主设计的 24 通泵浦结构如图 1 所示, 实物图如图 7 所示。Yb: YAG 薄片晶体厚度为 $200 \mu\text{m}$, 直径为 15 mm , 掺杂摩尔分数为 7% , 晶体前表面镀有对泵浦光(940 nm)和振荡光(1030 nm)的高透膜, 后表面镀有对泵浦光(940 nm)和振荡光(1030 nm)的高反膜, 晶体水冷温度为 $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 1 可以看出, 激光二极管输出的泵浦光经过匀化光纤匀化、透镜组准直后, 经过抛物面镜反射到 Yb: YAG 晶体上, 由于晶体后表面镀有高反膜, 这使得泵浦光每经过 1 次晶体, 完成 2 次泵浦过程。剩余反射光再通过转折棱镜使泵浦光再次通过晶

体, 最终往返经过薄片晶体 12 次, 实现 24 通泵浦, 由上节可知, 该参数的 24 通薄片晶体可实现对晶体 98.81% 的吸收效率。

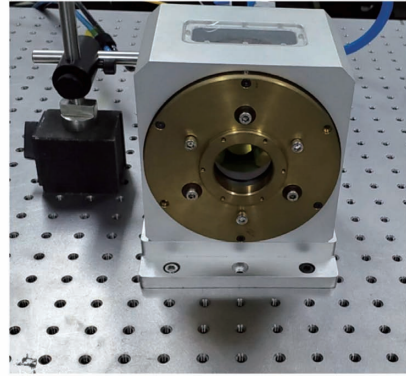


图 7 24 通泵浦模块实物图

Fig. 7 Photograph of 24-pass pump module

采用的泵浦源为光纤耦合输出 940 nm 的半导体激光器, 光纤的纤芯直径为 $400 \mu\text{m}$, 最大泵浦功率为 180 W 。经过透镜组准直后的泵浦光斑直径为 2.5 mm , 泵浦光斑图像由 CCD Camera (WAT-535EX2, Watec, 日本) 采集得到, 如图 8 所示。由图 8 可以看出, 泵浦光斑呈平顶分布, 均匀性良好。

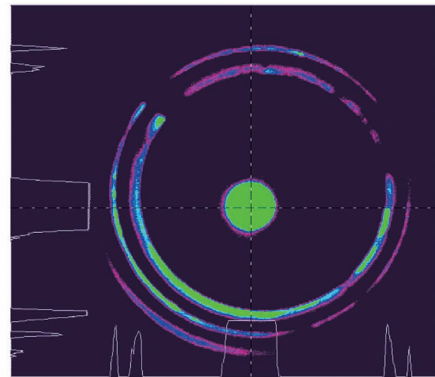


图 8 薄片 Yb: YAG 晶体上的均匀泵浦光斑

Fig. 8 Pump spot on the thin-disk Yb: YAG crystal

为了实现直接输出连续线偏振光的目标, 本实验设计了一种 Z 型腔, 实验简图和相关腔长数据如图 9 所示。TFP 为薄膜偏振片(实验室自主设计加工), 当入射角满足布儒斯特角(45°)时, 其对 s 偏振光的反射率可达到 99.9% 。此时, TFP 既是一个全反镜, 又是一个起偏器。根据图 5 的计算, 选择输出耦合镜的透过率为 2.5% 。按照前人的经验原则, 振荡光光斑直径在泵浦光斑直径的 $0.6 \sim 0.8$ 之间时, 光光效率较高。通过合理设计腔型、调整腔长以及各端镜的曲率半径, 使在晶体上光斑直径为 2.0 mm , 此时模式匹配比例为 80% 。

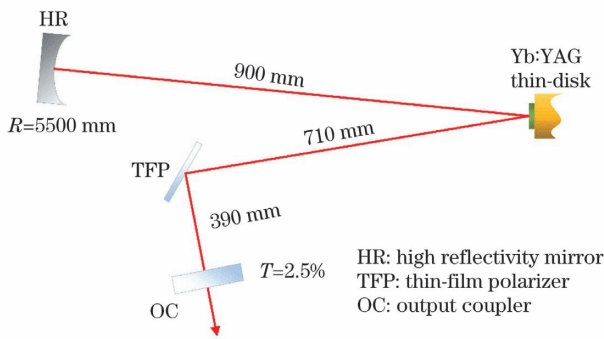


图 9 基于 Z 型腔的连续输出实验装置图

Fig. 9 Experimental setup of continuous-wave Z-type resonator

如图 10 所示,在连续输出的 Z 型腔的基础上,将输出耦合镜换成平面的全反镜,并在薄膜偏振片后端插入包含 BBO 晶体的普克尔盒(PCB3S-1064, EKSMA,立陶宛)作为电光开关,插入 1/4 波片调节纳秒激光脉冲的输出耦合率。普克尔盒的驱动电源(PCD-P4-100-T-H,福晶科技,福建)工作电压范围为 3~4 kV,重复频率范围为 10~100 kHz,上升沿标称值为 10 ns,满足普克尔盒对驱动电源的要求。

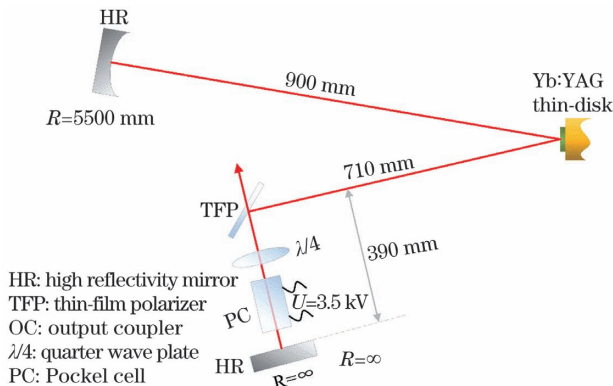


图 10 Yb : YAG 薄片激光器腔倒空实验装置图

Fig. 10 Experimental setup of cavity-dumped Yb : YAG thin-disk laser

4 实验结果与讨论

Yb : YAG 准三能级薄片激光器连续输出性能如图 11 所示,输出激光的光斑和测得的光束质量 M^2 如图 12 所示。从图 11 可以看出,当泵浦功率达到 30 W 时,激光器开始出光,与图 5 理论计算得到的泵浦阈值功率接近。同时,输出功率随泵浦功率的增加而线性增加,斜率效率为 62.1%,最大的输出功率为 94.1 W,最大的光-光转换效率 52.84%。从图 12 可以看出,输出的激光光强分布呈高斯分布,光束质量 M^2 接近于衍射极限。

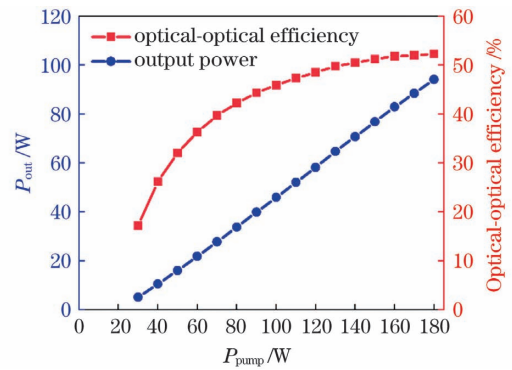


图 11 连续波输出功率和光-光效率随注入泵浦功率的变化

Fig. 11 Output power of continuous-wave and optical-optical efficiency versus incident pump power

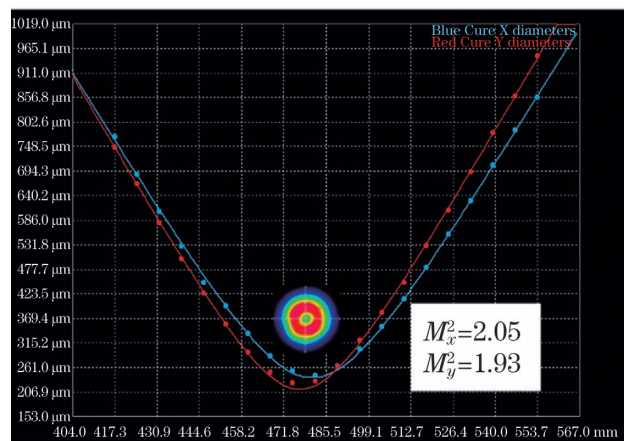


图 12 连续波输出时的光束质量和光强分布图

Fig. 12 Beam quality and spot diagram at continuous-wave output

腔倒空纳秒脉冲性能如图 13 所示。从图 13 可以看出,脉冲输出功率随泵浦功率的增加而增加,斜率效率为 45.3%。从图 13 右轴可以看出,光-光转

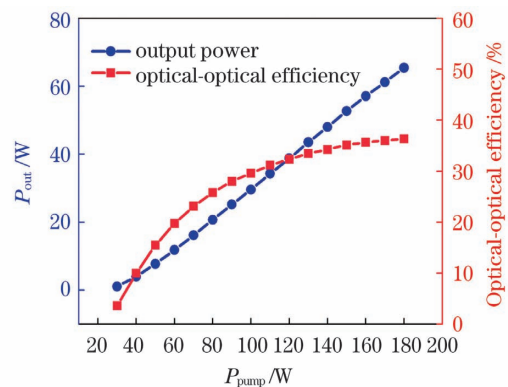


图 13 100 kHz 时腔倒空薄片激光器平均输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 13 Average output power of cavity-dumped thin-disk laser at 100 kHz versus pump power

换效率也随泵浦功率的增加而增加,并且逐渐趋于稳定。当泵浦功率达到 180 W 时,脉冲平均输出功率为 65.4 W,峰值功率为 88.02 kW,光-光转换效率高达 36.33%。

图 14 为 Yb:YAG 腔倒空薄片激光器脉冲序列和波形图。从图 14(a)可以看出,在重复频率 100 kHz 下,脉冲输出序列较为稳定,少部分脉冲幅值低于平均值。在实验中可以观察到明显的空

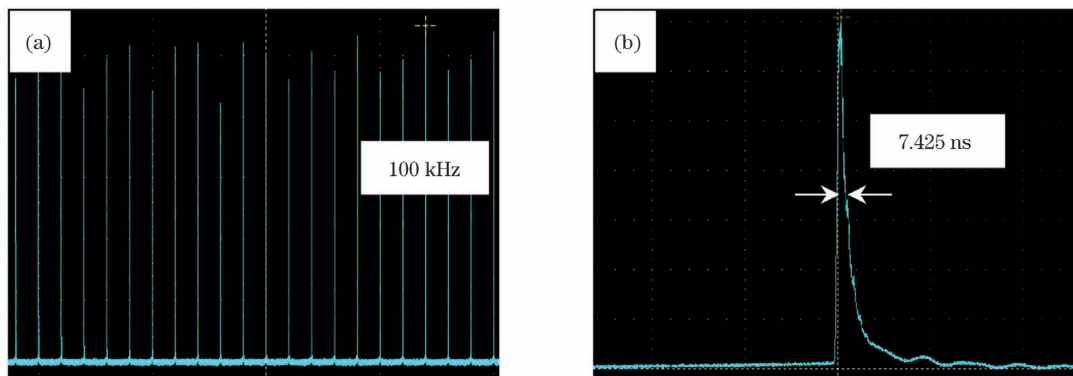


图 14 Yb:YAG 腔倒空薄片激光器脉冲序列和波形图。(a)重复频率为 100 kHz 的脉冲序列;(b)脉冲宽度为 7.425 ns 的脉冲波形

Fig. 14 Temporal pulse train and pulse profile of cavity-dumped Yb:YAG thin-disk laser. (a) Temporal pulse train at repetition rate of 100 kHz; (b) pulse profile with duration of 7.452 ns

利用 M^2 测量仪(Gentec,Beam-M2,加拿大)对输出的纳秒脉冲激光光强分布进行了测量,其光强分布和测量结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,激光光强分布为高斯分布,各个方向都具有良好的对称性。综合以上实验结果可得,基于薄片技术的腔倒空调 Q 激光器确实可以实现高平均功率、窄脉宽和高光束质量的脉冲输出。这也为下一步的多程

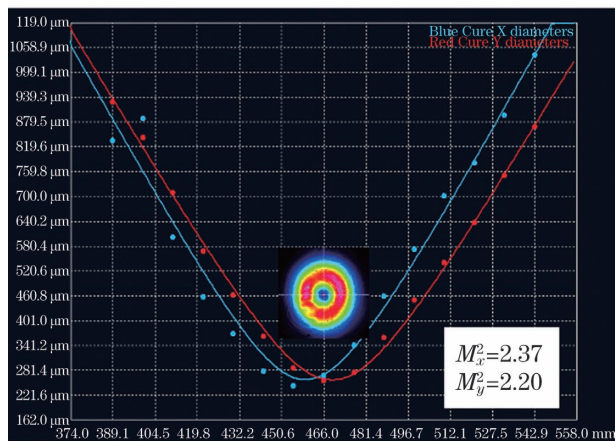


图 15 脉冲输出时的光束质量和光强分布图随泵浦功率的变化

Fig. 15 Beam quality and intensity distribution of output pulse versus pump power

气电离现象,由此推测产生脉冲序列不整齐的原因可能是整个谐振腔置于空气环境中,过高的峰值功率使空气发生电离,最终空气的扰动影响了脉冲输出的稳定性。从图 14(b)可以看出,输出脉冲的前沿很窄,后沿较宽,与图 6 理论计算得到的腔倒空波形图非常吻合,证明了之前腔倒空理论计算结果的正确性,实验最终测得的脉冲宽度为 7.425 ns。

放大及再生放大器奠定了良好的基础。

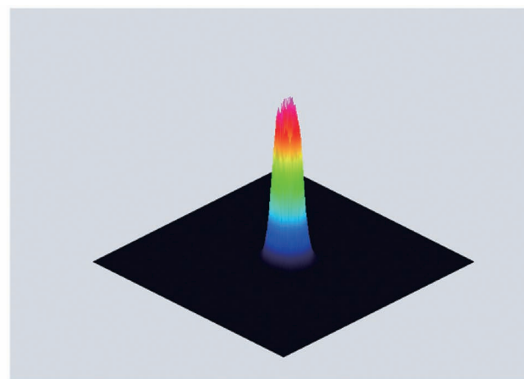


图 16 脉冲输出的光强分布三维图

Fig. 16 Three-dimensional graph of intensity distribution of output pulse

5 结 论

基于朗伯-比尔定律和准三能级速率方程,理论计算了 Yb:YAG 薄片激光器连续和脉冲输出的性能,分析了薄片激光器多通数、晶体厚度以及输出耦合镜透过率对激光器输出的影响,模拟了腔倒空调 Q 模式下光子数密度随时间的变化,得到了输出脉冲波形,并对薄片多通模块关键参数进行了优化。以实验室自主设计的 24 通泵浦模块为基础,通过优

化腔型设计,最终在泵浦功率为 180 W 时,连续输出的最大功率可达 94.1 W,光-光转换效率为 52.8%。在 100 kHz 下,脉冲输出最大平均输出功率为 65.4 W,脉冲输出的序列稳定,脉冲宽度窄至 7.425 ns,是目前所报道的脉冲宽度最窄的、光-光转换效率最高的腔倒空多通泵浦 Yb : YAG 薄片激光器,并且与理论仿真结果非常接近,这为后期设计不同脉冲宽度的腔倒空纳秒激光器奠定了理论基础。由于腔内峰值功率密度较高,谐振腔出现了空气电离现象,因此为了获得更高的光-光转换效率、更好的光束质量和脉冲稳定性,下一步准备将谐振腔置于真空环境中,减少空气带来的影响。

参 考 文 献

- [1] Butze F, Larionov M, Schuhmann K, et al. Nanosecond pulsed thin disk Yb : YAG lasers[C]// Advanced Solid-State Photonics 2004, February 1-4, 2004, Santa Fe, New Mexico, United States. Washington, D.C. : OSA, 2004: 237.
- [2] 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.
- [3] Jafari A K, Aas M. Continuous-wave theory of Yb : YAG end-pumped thin-disk lasers [J]. Applied Optics, 2009, 48(1): 106-113.
- [4] Lim E L, Alam S U, Richardson D J. The multipeak phenomena and nonlinear effects in Q-switched fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(23): 1763-1765.
- [5] MacDonald M P, Graf T, Balmer J E, et al. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods [J]. Optics Communications, 2000, 178 (4/5/6): 383-393.
- [6] Giesen A. Thin-disk solid state lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5620: 112-127.
- [7] Keller U. Ultrafast solid-state laser oscillators: a success story for the last 20 years with no end in sight [J]. Applied Physics B, 2010, 100(1): 15-28.
- [8] Stolzenburg C, Schüle W, Zawischa I, et al. 700 W intracavity-frequency doubled Yb : YAG thin-disk laser at 100 kHz repetition rate [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 75780A.
- [9] Ricaud S, Jaffres A, Loiseau P, et al. Yb : CaGdAlO₄ thin-disk laser [J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4134-4136.
- [10] Cai H, Zhou J, Zhao H M, et al. Continuous-wave and Q-switched performance of an Yb : YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970-nm laser diode [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(11): 852-854.
- [11] Wang C H, Wang W M, Ma Y, et al. Thin-disk laser at 515 nm with good beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2795-2798.
王春华, 王卫民, 马毅, 等. 高光束质量 515 nm 薄片激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2795-2798.
- [12] Yan R P, Yu X, Li X D, et al. High power continuous-wave and cavity-dumped Yb : YAG thin disk lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (7): 0701004.
闫仁鹏, 于欣, 李旭东, 等. 高功率 Yb : YAG 薄片激光器连续和腔倒空实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701004.
- [13] Taira T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb : YAG lasers [J]. Applied Optics, 1997, 36(9): 1867-1874.

Cavity-Dumped Nanosecond Thin-Disk Laser with High Average Power

Dai Longhui^{1,2}, Liu Rui¹, Gong Faquan¹, Li Xiang¹, Deng Songwen¹, Jia Yong¹,
Jin Yuqi¹, Li Gang^{1*}

¹Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract

Objective Laser-matter interaction research using nanosecond pulse lasers has resulted in industrial applications, such as laser processing, laser marking, and laser cleaning, because of its advantages of moderate cost and high reliability. The repetition rate is an important indicator to describe the number of laser pulses per unit time. The

higher the repetition frequency, the more the number of working pulses per unit time. Thus, high-quality processing results can be obtained via high-speed and high-precision processing using nanosecond pulse lasers. Therefore, development efforts in this field focus on achieving a narrow pulse width, high average power, and high repetition rate. With the increase in pump power, traditional lasers such as fiber lasers have strong nonlinear effects, such as stimulated Brillouin scattering and backscattering, resulting in a wider output pulse width; however, the peak power obtained is limited. Because of the radial distribution of the heat generated by the laser rod and the uneven temperature distribution, the radial temperature gradient will cause a serious thermal lens effect, which will affect the high power output and beam quality of the nanosecond laser. The emergence of thin-disk lasers has effectively improved this situation, wherein multipass pump technology is used to compensate for the considerably low single-pass absorption of the gain medium. The ingenious pump method improves its pump absorption efficiency, while the single-sided pumping back cooling method further reduces the thermal lens effect of the crystal, making it widely used in continuous and nanosecond pulse fields.

Methods A cavity-dumped laser based on an independently developed 24-pass thin-disk pump module was investigated with a high repetition rate, narrow pulse duration, and high beam quality. First, the relationship between media absorption and the number of pump passes was calculated according to the Beer-Lambert law. Then, using the quasi-three-level rate equations, the dependence of the threshold pump power and continuous output power on the transmittance of the output coupler was analyzed. Subsequently, to achieve the balance among absorption efficiency, thermal lens effect, and processing difficulty, the thickness of the thin crystal of the multipass pump module was selected to be 200 μm and the multipass number N was 24. Finally, to obtain the continuous and pulsed output of the linearly polarized laser, a Z-shaped cavity in which the thin film polarizer acts as both a polarizer and a high reflectivity mirror in the cavity, was designed.

Results and Discussions The continuous output performance of the Yb : YAG quasi-three-level thin-disk laser is shown in Fig. 11, and the spot of the output laser and the measured beam quality M^2 are shown in Fig. 12. Figure 11 shows that when the pump power reaches 30 W, the laser output starts. The pump power is close to the pump threshold power calculated theoretically (Fig. 5). Simultaneously, the output power increases linearly with the increase in pump power, the slope efficiency is 62.1%, the maximum output power is 94.1 W, and the maximum light-to-light conversion efficiency is 52.84%. Figure 12 shows that the output laser intensity distribution is Gaussian and the beam quality M^2 is close to the diffraction limit. In addition, the cavity-dumped nanosecond pulse performance is shown in Fig. 13. Figure 13 shows that the pulse output power increases with an increase in the pump power and the slope efficiency is 45.3%. It can be seen from the right axis of Fig. 13 that the optical-optical conversion efficiency also increases with an increase in the pump power and gradually stabilizes. When the pump power reaches 180 W, the average pulse output power is 65.4 W, the peak power is 88.02 kW, and the optical-optical conversion efficiency is as high as 36.33%. The Yb : YAG cavity-dumped thin-disk laser pulse sequence and waveform are shown in Fig. 14. Figure 14(a) shows that at a repetition frequency of 100 kHz, the pulse output sequence is stable, further, only some pulse amplitudes are lower than the average pulse amplitude. Air ionization can be observed in the experiment; therefore, it is speculated that the reason for the irregular pulse sequence may be that the entire resonant cavity is placed in an air environment. The excessive peak power causes the air to ionize, and finally, air disturbance affects the stability of the pulse output. It can be seen from Fig. 14(b) that the leading edge of the output pulse is very narrow and the trailing edge is wide, which is considerably consistent with the cavity-dumped waveform obtained from the theoretical calculation in Fig. 6, which proves the accuracy of the theoretical calculation results of the previous cavity dumping.

Conclusions Based on the Beer-Lambert-law and the quasi-three-level rate equations, the performance of the continuous and pulse outputs of the Yb : YAG thin-disk laser is theoretically calculated and the effect of the multipass number, crystal thickness, and transmittance of the output coupling mirror on the laser output is also analyzed. Based on the 24-pass pump module independently designed by the laboratory and optimized cavity design, the maximum continuous output power can reach 94.1 W and the optical-optical conversion efficiency is 52.8% when the pump power is 180 W. At a repetition rate of 100 kHz, the maximum average output power of the pulse output is 65.4 W, the pulse output sequence is stable, and the pulse width is as narrow as 7.425 ns. The theoretical predictions are verified experimentally, and the experimental results are significantly higher than those reported in the previous literature, which has important reference significance for related research work. Because of the high peak power density in the cavity, air ionization occurs in the cavity. Therefore, to obtain high optical-optical

conversion efficiency, better beam quality, and pulse stability, the next step is to place the cavity in a vacuum environment.

Key words lasers; thin-disk laser; cavity-dumped; multi-pass pump; repetition rate; beam quality

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3615