

10 J 级二极管抽运非稳腔薄片激光器

安向超^{1,2} 唐淳¹ 尚建力¹ 于益¹ 蒋建峰¹

(¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)
(² 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

摘要 利用 ABCD 传输矩阵对多片串接正支非稳腔进行分析, 给出了谐振腔最优参数, 并利用谐振腔自再现条件计算不同薄片上的振荡光束尺寸, 根据理想谐振腔阈值条件, 得到谐振腔的输出能量。针对上述分析进行了实验验证, 在非稳腔放大率为 2.0、重复频率为 25 Hz、脉宽为 250 μs 的条件下, 输出单脉冲能量为 10.52 J, 斜效率为 22.75%, 实验结果与理论设计基本吻合。

关键词 激光器; 薄片激光器; 非稳腔; 静态焦距; Nd:YAG

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802001

10 J Diode-Pumped Thin-Disk Laser in Unstable Resonator

An Xiangchao^{1,2} Tang Chun¹ Sang Jianli¹ Yu Yi¹ Jiang Jianfeng¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract Using the method of ABCD transmission matrix to analyze the positive-branch unstable resonator which consists of multi thin disks, appropriate resonator parameters are got. The self-repeat of resonator is used to calculate oscillation beam size in different disks. The basis of ideal resonator's threshold gives out the max output energy. Experiment has been carried to verify the analyze, finally we get 10.52 J output laser every single pulse, the magnification is 2.0, the frequency is 25 Hz, the oblique efficiency is 22.75%, the experimental results and the theoretical are totally conformed.

Key words lasers; thin-disk laser; unstable resonator; static focus length; Nd:YAG

OCIS codes 140.3480; 140.3538; 140.3580

1 引言

1993 年, 德国斯图加特大学的 Giesen 等^[1] 提出了薄片激光器的设计理念, 由于薄片激光器优秀的热管理方式, 它能够同时实现高功率、高光束质量、高效率的激光输出, 因而成为固体激光研究热点及主要发展方向之一^[2-3]。

目前, 单一薄片能够实现 5 kW 的连续激光输出^[4], 更高功率的激光输出需要多薄片串接来实现^[5]。德国的 Trumpf 公司已开发出 8 片串接的薄片激光器产品, 该激光器采用稳腔工作, 输出功率为 16 kW, 光束质量为 12 mm · mrad。然而稳腔中, 高能量和高光束质量不能兼得^[6], 要在保证光束质量的前提下提高激光输出功率, 采用非稳腔是一种

有效的解决方案。

美国的 Boeing 公司在 2008 年利用商用薄片激光模块, 采用非稳腔内 10 个薄片串接, 实现了 27 kW 的激光输出, 光束质量良好^[7]。Boeing 公司的薄片激光器采用变反射率镜 (VRM) 作输出镜, 其薄片口径较小, 能够与 VRM 非稳腔较好匹配。对于介质口径较大的情况, 基于 VRM 的非稳腔存在较大的技术困难。

本文针对大口径增益介质应用于非稳腔进行了一些研究, 非稳腔采用挖孔镜输出, 利用 ABCD 传输矩阵对谐振腔进行计算分析, 根据谐振腔阈值条件, 得到谐振腔的输出能量, 并用实验对上述分析进行了验证。

收稿日期: 2013-11-08; **收到修改稿日期**: 2014-02-13

作者简介: 安向超 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事薄片激光器方面的研究。E-mail: for_those_dreams@163.com

导师简介: 唐淳 (1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光方面的研究。

E-mail: tangchun21@vip.sina.com

2 非稳腔设计

单一薄片的稳腔实验表明,在耦合输出镜反射率为 80%~95%时,能实现较好的能量提取。非稳腔的放大率与腔内增益水平密切相关,针对单片激光增益,六薄片串接时的非稳腔放大率设计为 $M=2.0$ 。

图 1 为六薄片串接正支非稳腔示意图。 R_1 为凹面反射镜, R_2 为凸面反射镜,非稳腔通过在 R_2 附近的挖孔镜输出激光,TD₁~TD₆ 为 6 个依次串接的薄片,薄片尺寸为 $\phi 40\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。

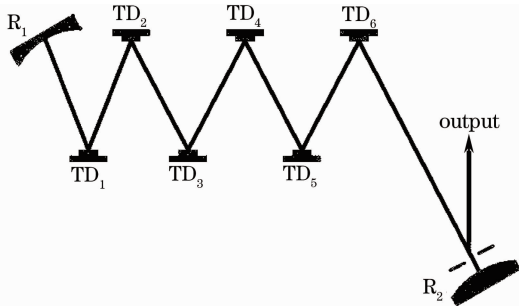


图 1 六薄片串接非稳腔示意图

Fig. 1 Experimental set-up of the unstable resonator of six thin disks

2.1 薄片增益模块

尽管 Yb:YAG 被证明更适合作为薄片增益介质,但 Nd:YAG 也有其固有的优势,如激光阈值低、介质生长技术成熟等。此外,对大口径谐振腔而言,Yb:YAG 会由于高掺杂有较大的放大自发辐射(ASE)效应,相应的多通抽运结构也比较复杂^[8]。本文最终选取 Nd:YAG 作为激光增益介质,薄片后表面镀有 808 nm 的高反膜,激光的通光路径 30° 入射进入薄片,在薄片的前后表面镀有对 1064 nm 激光和 655 nm 指示红光的增透膜或高反膜。

图 2 为薄片增益模块的示意图,Nd:YAG 薄片焊接在铜制微通道冷却器上,抽运光采用简单的波导匀化方式输出正六边形的光斑,正六边形内切 $\phi 40\text{ mm}$ 的圆,圆内的光斑均匀度为 90%,从二极管叠阵到 $\phi 40\text{ mm}$ 的圆光斑,整个传输效率为 80%,抽运系统结构简单、可靠性高^[9]。抽运激光以 0° 角入射进入薄片介质,利用后表面的高反膜实现双通抽运,Nd:YAG 掺杂浓度(原子数分数)为 2.0%,厚度为 2 mm,该厚度既能保证双通抽运结构实现 88% 左右的抽运吸收,又能在较高重复频率(200 Hz)左右实现均匀冷却。

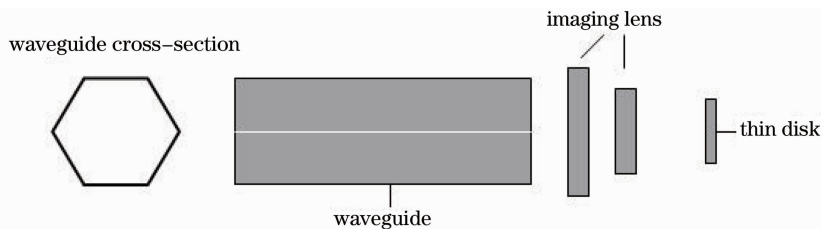


图 2 薄片增益模块

Fig. 2 Thin disk gain model

2.2 非稳腔参数选取

图 3 是非稳腔的等效直腔示意图, R_1 、 R_2 的曲率半径分别 ρ_1 、 ρ_2 , R_1 与 TD₁ 距离为 $l_1=0.24\text{ m}$,薄片与薄片间距为 $l_2=0.2\text{ m}$,TD₆ 距离挖孔镜 l_3 ,挖孔镜与 R_2 距离为 $d_1=0.05\text{ m}$,薄片静态焦距为 f 。假定各薄片的薄透镜焦距 f 相等,光学传输中不考

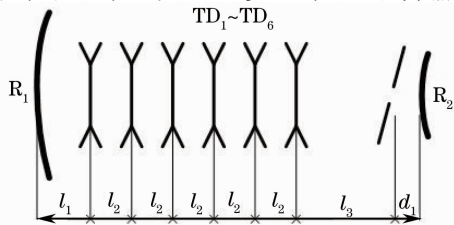


图 3 非稳腔的等效直腔

Fig. 3 Equivalent resonator of the unstable resonator

虑薄片的厚度。以 R_1 为参考的单程传输矩阵为

$$t = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

往返一周的矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d & b \\ c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}. \quad (2)$$

等效非稳腔的 G 参数为 $G_1 = a - \frac{b}{\rho_1}$, $G_2 = d - \frac{b}{\rho_2}$,

对正支非稳腔有 $G_1 G_2 > 1$,非稳腔往返一周的放大率为

$$M = 2G_1 G_2 - 1 + 2\sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)}. \quad (3)$$

图 4 为哈特曼波前传感器测得的单一薄片的静态波面，峰谷值 $d_{PV} = 0.5 \mu\text{m}$ ，等效焦距 $f = -400 \text{ m}$ 。对于 $M = 2.0$ 的放大率，选择合适的 $M_0 = \left| \frac{R_1}{R_2} \right| \approx 1.8$ 。最终选取 $\rho_1 = 7.96 \text{ m}$ ， $\rho_2 = -4.37 \text{ m}$ 。

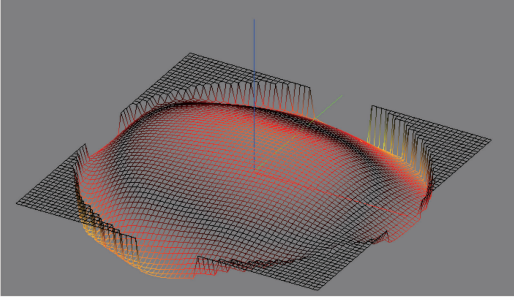


图 4 静态面形图

Fig. 4 Static surface shape

图 5 为放大率与 l_3 的关系，对于 $M = 2.0$ 的放大率，合适的 $l_3 \approx 0.6 \text{ m}$ 。

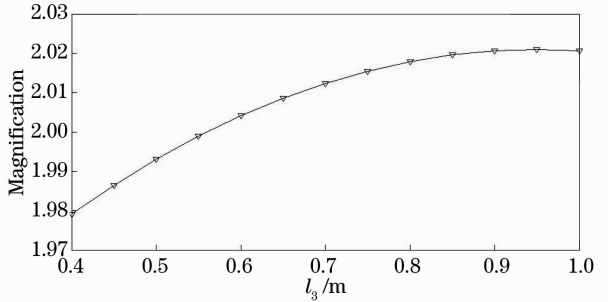


图 5 放大率 M 随 l_3 的变化

Fig. 5 Magnification as a function of l_3

2.3 非稳腔中振荡光束的尺寸

非稳腔中，腔镜处非稳腔的本征球面波波面曲率半径应当满足自再现条件^[10]。根据 ABCD 定律和自再现条件，求解得到 R_1 处本征球面波波曲率半径 r_1 为

$$\frac{1}{r_1} = \frac{D-A}{2B} + \frac{1}{B} \sqrt{\left(\frac{A+D}{2}\right)^2 - 1} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{lG_2} \sqrt{G_1 G_2 (G_1 G_2 - 1)}. \quad (4)$$

利用传输矩阵可以得到某条光线在非稳腔中的传输路径，特别地，当这条光线能够通过薄片增益介质实现有效增益，并且刚好能通过挖孔镜时，这条光线就确定了谐振腔中振荡光束的边界，非稳腔中正向和反向振荡光束尺寸是不同的。

利用振荡光束尺寸可以求解合适的挖孔镜尺寸。假定挖孔镜为自由限制条件，仅仅以增益区域为限定条件，腔内振荡光束尺寸如图 6 所示。

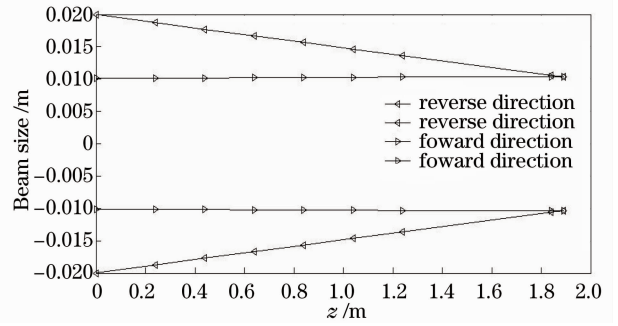


图 6 腔内振荡光束尺寸

Fig. 6 Oscillation beam size in resonator

挖孔镜处的振荡光束尺寸为 21.2 mm ，反向振荡光束半径 $[0.0187 \ 0.0177 \ 0.0167 \ 0.0156 \ 0.0146 \ 0.0136]$ ，正向振荡光束半径为 $[0.0101 \ 0.0102 \ 0.0102 \ 0.0102 \ 0.0103 \ 0.0103]$ 。把正向交叠效率和反向交叠效率的平均数作为 6 个薄片的交叠效率得 $\eta_B = [0.8780 \ 0.7832 \ 0.6945 \ 0.6119 \ 0.5350 \ 0.4638]$ 。

非稳腔参数已全部确定，谐振腔参数如下表 1 所示。

表 1 谐振腔参数

Table 1 Resonator parameter

Parameter	Parameter specification	Value /m
R_1	Radius of curvature of concave mirror	7.96
R_2	Radius of curvature of convex mirror	4.37
l_1	Distance of TD ₁ with R_1	0.24
l_2	Slice space	0.2
l_3	Distance of TD ₆ with the hole	0.6
d_1	Distance of the hole with R_2	0.05
l_a	Length of the hole	21.4

2.4 非稳腔中的能量提取

由光腔理论可知，稳态时激光器始终工作在阈值增益 g_{th} ，其大小由谐振腔内能量平衡条件决定：

$$\text{Rexp}(2g_{th}l - L) \equiv 1, g_{th} \equiv (L - \ln R)/(2l), \quad (5)$$

式中 R 为腔镜耦合的反射率， l 为腔内单程增益长度， L 为腔内损耗。光腔内的增益介质中的增益水平 g_s 由增益饱和和机制决定：

$$g_{th} = \frac{g_0}{1 + I_{in}/I_s},$$

$$g_0 = \eta_{tot} P_{in}/VI_s, V = A_p l. \quad (6)$$

式中 g_0 为小信号增益， I_{in} 为介质内激光强度， I_s 为介质饱和光强， $\eta_{tot} = \eta_T \eta_a \eta_q$ 为抽运耦合过程的总效率， η_T 、 η_a 和 η_q 分别为传输效率、吸收效率和量子效

率与 Stokes 效率之积; P_{in} 为输入抽运功率, V 为增益介质体积, A_p 增益介质上的抽运面积。激光器稳

定工作时, 介质内饱和增益 g_{sat} 等于光腔阈值增益 g_s , 则介质内激光强度为

$$I_{in} = I_s \left(\frac{g_0}{g_{th}} - 1 - \frac{I_{ASE}}{I_s} \right) = I_s \left[\frac{2KP_{in}}{L - \ln R} - \left(1 + \frac{I_{ASE}}{I_s} \right) \right], K = \frac{\eta_{tot}}{I_s A_p}. \quad (7)$$

进一步地, 由光腔内外激光强度近似关系 $I_{out} = \frac{1-R}{1+R} I_{in}$, 可知激光输出功率可表示为 $P_{out} = I_{out} A_1$, 谐振腔激光输出功率总可以写成 $P_{out} = \sigma_s (P_{in} - P_{th})$ 的形式, 从而

$$P_{out} = I_{out} A_1 = \frac{1-R}{1+R} \frac{2KI_s A_1}{L - \ln R} (P_{in} - P_{th}) = \sigma_s (P_{in} - P_{th}), \quad (8)$$

式中 $\sigma_s = \frac{1-R}{1+R} \frac{2KI_s A_1}{L - \ln R} = \frac{1-R}{1+R} \frac{2\eta_{tot}\eta_B}{L - \ln R}$, $P_{th} = \frac{L - \ln R}{2K} = \frac{L - \ln R}{2\eta_{tot}} I_s A_p$, P_{out} 为激光输出功率, P_{in} 输入抽运功率, σ_s 为斜率效率, P_{th} 为阈值功率, $\eta_B = A_1/A_p$ 为交叠效率。

实际上, 上述分析忽略了 ASE 效应对激光器性能的影响, ASE 对激光输出性能的影响主要体现在使得 E_{in} 增大, 并不影响激光器的斜效率。

以 2.1 节和 2.2 节得到的谐振腔参数为例, Nd:YAG 对 808 nm 激光的饱和光强为 $I_s = 4.04 \text{ kW/cm}^2$, 薄片 $A_p = \pi r^2$, 非稳腔放大率 $M = 2.0$, 谐振腔输出耦合反射率约为 $R = 1/M^2 = 0.25$, 实验中抽运耦合效率 $\eta_r = 0.80$, 薄片吸收效率为 $\eta_a = 0.88$, $\eta_n = 0.722$ 。Nd:YAG 的散射损耗 $\alpha_{sc} \approx 0.002 \text{ cm}^{-1}$, 评估激光通过单一薄片的损耗约为 0.8%, 腔内单程损耗约为 $L = 0.047$ 。根据 2.2 节中计算的交叠效率, 各薄片的能量提取斜效率为

$$\sigma = [0.3734 \ 0.3330 \ 0.2953 \ 0.2602 \ 0.2275 \ 0.1972], \quad (9)$$

平均的能量提取斜效率为 28.11%。

谐振腔的阈值功率为 $P_{th} = 7.1786 \times 10^4 \text{ W}$, 抽运电源脉宽为 $250 \mu\text{s}$, 则会有 $E_{out} = \sigma(E_{in} - E_{th})$, 其中 E_{in} 为抽运的单脉冲能量, $E_{th} = 17.95 \text{ J}$ 为阈值单脉冲能量。实验所用的抽运源最大加载的单脉冲能量为 56.25 J, 则最大输出能量为 10.77 J。

3 非稳腔实验研究

六薄片串接的非稳腔如图 7 所示, 6 片串接的非稳腔实验采用的谐振腔参数如下: $\rho_1 = 7.96 \text{ m}$, $\rho_2 = -4.37 \text{ m}$, 挖孔镜尺寸为 $l_a = 21.4 \text{ mm}$, 总的腔长为 $L_{tot} = 1.89 \text{ m}$ 。

实验在低抽运功率状态下对谐振腔调谐, 然后逐步增加抽运功率, 最终在脉冲抽运频率 $f = 10 \text{ Hz}$, $E_{in} = 56.25 \text{ J}$, 脉宽 $250 \mu\text{s}$ 情况下, 得到了单脉冲能量 10.9 J 的激光输出。从输出的单脉冲能

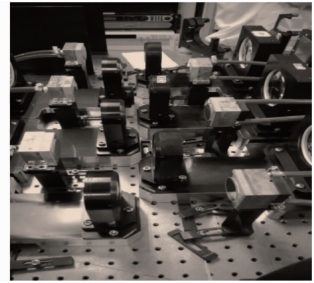


图 7 非稳腔实物图

量来看, 实验结果与理论计算吻合得很好。

从图 8 可以看出, 输出激光能量随着抽运能量增加而增加。光-光转换效率为 19.38%, 斜效率为 23.46%, 并且斜效率稳定度较好。使用实验数据拟合出的输出能量表达式为 $E_{out} = 0.2345 \times (E_{in} - 11.1304) \text{ J}$, 实验得到的斜效率和阈值能量均较理论值小, 可能的原因为非稳腔耦合输出率 $T < 1 - 1/M^2$ (几何预期值), 即非稳腔的耦合输出的等效反射率大于 $1/M^2$ [11], R 越大, 斜效率 σ 越小, 阈值能量 E_{th} 越小; 其次为实际实验中用到的挖孔镜比理论

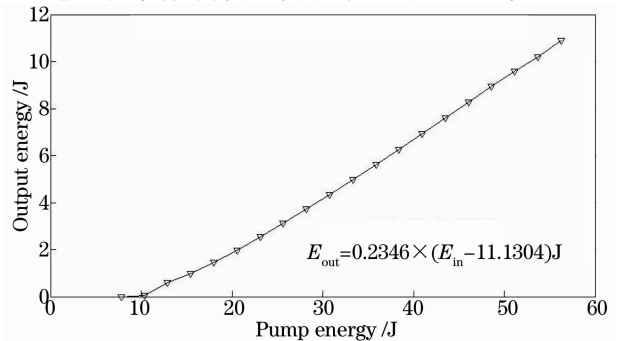


图 8 输出单脉冲能量随抽运能量的变化
Fig. 8 Output energy of single pulse as a function of pump energy

值偏大,会造成部分可提取的激光能量散逸到腔外。

如图9为激光输出光斑的近场图像,圆环亮度比较均匀,圆环内外径之比约为2。



图9 激光输出近场光斑图像

Fig. 9 Image of the output laser's near field

改变抽运频率,分别在 $f = 25 \text{ Hz}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 下,改变抽运的单脉冲能量,测量激光器的能量输出。如图10所示为3种加载频率下输出单脉冲能量随抽运单脉冲能量变化的示意图。

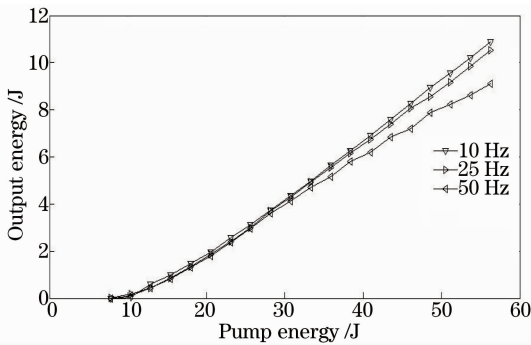


图10 三种频率下输出能量随输入能量的变化

Fig. 10 Output energy as a function of pump energy in three different frequency

从图10可以明显看出,单脉冲抽运能量小于30 J时,频率对非稳腔激光器输出的单脉冲能量影响不大。随着抽运能量的增加,25 Hz和50 Hz两种情况下激光输出的单脉冲能量均比10 Hz小,而且50 Hz下激光输出较25 Hz下的激光输出小。这3组实验数据的对比反映了热对非稳腔输出的影响,随着抽运功率的增加,薄片增益介质上沉积的热也断增加,薄片的热透镜作用和静态离焦作用耦合作用于非稳腔,共同影响非稳腔的输出。

4 结 论

使用 ABCD 传输矩阵的方法对正支谐振腔进行了优化设计;根据理想谐振腔阈值条件,得到谐振

腔的斜效率、阈值能量、输出输出能量等参数。实验中,抽运脉宽为 $250 \mu\text{s}$,最大抽运单脉冲能量为 56.25 J,非稳腔放大率为 2.0,在 10 Hz 下得到了 10.9 J 的激光输出;在 25 Hz 下得到了 10.52 J 的激光输出;在 50 Hz 下得到了 9.1 J 的激光输出。按照静态离焦量设计的非稳腔在低抽运下能较好地提取能量,实验结果与理论计算基本吻合,随着抽运功率的增加,薄片的热透镜作用越来越明显,必须重新对非稳腔进行设计,这也是下一步研究工作的重点。

参 考 文 献

- 1 Adolf Giesen, H Hiigel, A Voss. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. Appl Phys B, 1994, 58 (5): 365-372.
- 2 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 37-40. 姚震宇, 蒋建峰, 涂波. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 37-40.
- 3 Liu Yang, Wang Chao, Tang Xiaojun, et al.. Laser diode-pumped four Nd:YAG disks laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202007. 刘洋, 王超, 唐晓军. 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202007.
- 4 Adolf Giesen, Jochen Speiser. fifteen years of work on thin-disk lasers; results and scaling laws[J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- 5 Wu Xingsheng, GaoJiancun, Tang Xinchun, et al.. 20.6 W Nd:YVO₄ thin disk laser with laser-diode direct upper-state pumping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001. 吴兴盛, 高健存, 唐新春, 等. 20.6 W 激光二极管直接上能级抽运 Nd:YVO₄ 薄片激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202001.
- 6 Siegman A E. Lasers[M]. California: University Science Books, 1986. 913-919.
- 7 Petras V Avizonis, David J Bossert, Mark S Curtin, et al.. Physics of high performance Yb:YAG thin-disks[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009. 1-2.
- 8 Wang Chunhua, Wang Weimin, Ma Yi, et al.. Thin-disk laser at 515 nm with good beam quality[J]. Chinese J 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.
- 9 Cai Zhen, Wang Xiaojun, Jiang Jianfeng, et al.. Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2437-2440. 蔡振, 王小军, 蒋建峰, 等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2347-2440.
- 10 Lü Baida. Laser Optics[M]. Beijing: Higer Education Press, 2002. 429-435. 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 429-435.
- 11 W Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl, Beijing: Science Press, 2002. 240. W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002. 240.

栏目编辑: 宋梅梅