

用于 Nd:YAG 板条增益介质的非稳腔技术

雷 健, 刘 洋, 李天琦, 李 宝, 王 喆, 唐晓军

中国电子科技集团公司第十一研究所激光技术研究部固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 非稳腔在大菲涅耳数条件下可实现光的高效提取效率,也可保持高光束质量。设计了一款用于 Nd:YAG 板条增益介质的传导冷却端面抽运结构的望远镜型离轴介稳-非稳混合谐振腔,输出耦合镜为变反镜。该混合腔的宽度方向(板条增益介质的 x 方向)为非稳腔,厚度方向(板条增益介质的 y 方向)为介稳腔。通过理论分析得出,当抽运功率为 10 kW 时,该介稳-非稳混合腔结构的输出功率为 4428.7 W,光-光转换效率为 0.4429。

关键词 激光器; 半导体激光器; 激光谐振腔; 传导冷却端面抽运结构; 变反镜

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101403

Unstable Resonator Technique for Nd:YAG Slab Gain Medium

Lei Jian, Liu Yang, Li Tianqi, Li Bao, Wang Zhe, Tang Xiaojun

Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Laser Technology Research Department,
The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China

Abstract An unstable resonator can obtain high extraction efficiency of light as well as high beam quality under the condition of the large Fresnel number. We design a telescopic off-axis metastable-unstable hybrid resonator with conduction-cooled end-pumped structure which can be used as the Nd:YAG slab gain medium, and its output coupling mirror is a variable reflectivity mirror. The resonator in the width direction of the hybrid resonator (the x direction of the slab gain medium) is an unstable resonator, and the resonator in the thickness direction (the y direction of the slab gain medium) is a metastable resonator. Through the theoretical analysis, an output power of 4428.7 W of this metastable-unstable hybrid resonator structure and an optical-optical efficiency of 0.4429 can be obtained when the pump power is 10 kW.

Key words lasers; semiconductor lasers; laser resonator; conduction-cooled end-pumped structure; variable reflectivity mirror

OCIS codes 140.2020; 140.3410

1 引 言

近年来,随着激光技术的快速发展,人们对激光器光束质量的要求也越来越高。光束质量是评价激光器整体性能的重要指标之一,主要涉及激光器的能量特性、光束空间分布特性及时间分布特性等方面^[1]。由于模体积的限制,稳定腔激光器很难有较大的低阶模增益体积,从而限制了高功率、高光束质量的激光输出。非稳腔具有较大的体积,介质增益区尺寸较大时,可在保证高光束质量的同时实现高光束激光输出^[2-3]。

Siegman^[4]于 1965 年对非稳腔进行了描述。非稳腔最大的特点是在大菲涅耳数条件下可产生大体积基模,并且具有良好的空间选模特性^[5]。1990 年 Kuba 等^[6]将离轴非稳腔-稳定腔共焦混合谐振腔应用到板条激光器中,以减小输出光束的发散角。张恒利等^[7-9]利用激光二极管阵列端面抽运 Nd:YVO₄ 板条晶体,结合稳定-非稳混合腔,实现了高功率、高效率和高光束质量的激光输出。稳定-非稳混合腔激光器是一种可以应用于高功率、高光束质量激光器的新型谐振腔^[10],但稳定腔方向的光束质量仍然不是很好。为了改善

收稿日期: 2017-03-30; **收到修改稿日期:** 2017-05-07

作者简介: 雷 健(1990—),男,硕士研究生,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: 1336280482@qq.com

导师简介: 唐晓军(1971—),男,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: txj0012@vip.sina.com

这种情况,可以采用介稳-非稳混合腔结构。该混合腔结构结合了介稳腔和非稳腔各自的特点,板条增益介质宽度方向为非稳腔,可以保证大的基模体积;板条增益介质厚度方向为介稳腔,其较小的尺寸可以有效抑制高阶模振荡,同时可以提高激光系统的稳定性并降低耦合输出的难度。将增益介质的宽度方向选作非稳腔时,无论增益介质的宽度方向尺寸多大都可以获得近衍射极限的光束质量,非常有利于功率提升^[6];同时在增益介质的厚度方向上设计介稳腔结构,由于这类腔的波形限制能力较强,可以获得发散角相当小且场强均匀性较好的光束质量^[11],在保证高功率输出的同时,保证在宽度和厚度两个方向上均有良好的光束质量。

2 非稳腔方向设计

在板条激光器中,非稳腔常用离轴共焦非稳腔结构。离轴混合腔是一种非常适合于矩形截面增益介质激光器的谐振腔结构,可输出高质量激光束,其损耗小于常规非稳腔^[12]。

所选用板条增益介质的尺寸为 121 mm×28 mm×2 mm。图 1 为所设计的正支虚共焦非稳腔方向示意图,其中 M1 为平凹柱面镜,M2 为平凸柱面镜, x 方向为虚共焦非稳腔, y 方向为平-平介稳腔。

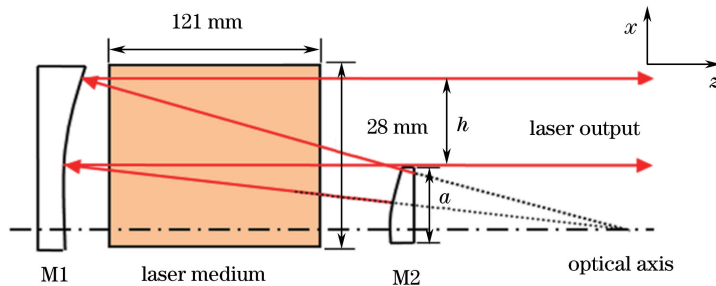


图 1 非稳腔方向示意图

Fig. 1 Direction diagram of unstable resonator

在非稳腔设计中,需要通过理论计算出该混合腔结构的结构参数(包括谐振腔反射镜 M1 和输出镜 M2 的曲率半径 R 、最佳透过率 T_{out} 和最佳放大率 M ,输出镜 M2 尺寸 a 以及非稳腔方向光斑宽度 h)、输出功率和光-光转换效率。板条具体参数为:单个光子能量 $h\nu = 1.86 \times 10^{-19}$ eV;荧光寿命 $\tau_f = 230$ μ s,吸收效率 $\eta_a = 0.85$;斯托克斯因子 $\eta_s = 0.76$;量子效率 $\eta_Q = 0.9$;交叠效率 $\eta_B = 0.62$;输入抽运功率 $P_{in} = 10$ kW。

2.1 最佳放大率 M 的确定

为了得到非稳腔的最佳放大率,首先需模拟运转稳定腔得到最佳透过率 T_{out} ,最佳透过率表达式为

$$T_{out} = (\sqrt{2g_0 l/S} - 1) S, \quad (1)$$

式中 g_0 为小信号增益, l 为增益介质的长度, S 为总的损耗。其中 $g_0 l = KP_{in}$, $K = \eta_Q \eta_a \eta_s \eta_B / (AI_s)$ 为转换因子, $I_s = h\nu/\tau_f$ 为材料参量, A 为板条端面面积。

由于该混合腔只有宽度方向为非稳腔,所以该混合腔的 M 与 T_{out} 之间的关系为

$$T_{out} = 1 - \frac{1}{M}, \quad (2)$$

代入具体数值,得到 $T_{out} = 0.6$, $M = 2.5$ 。

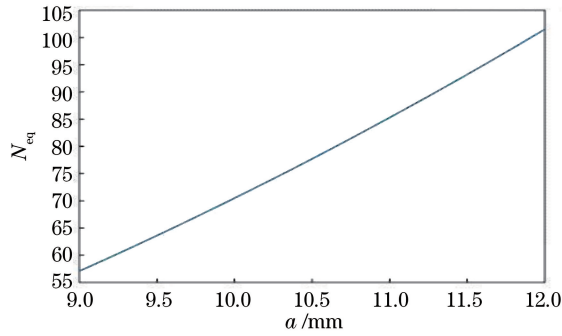
2.2 输出耦合镜 M2 尺寸 a 的确定

为了使非稳腔有很好的模式鉴别能力,选择合适的腔长 L 使得等效菲涅耳数 N_{eq} 为半整数, N_{eq} 与 L 和 a 之间的关系为

$$N_{eq} = \frac{(M-1)a^2}{2L\lambda}. \quad (3)$$

考虑具体实验条件,选择 $L = 1000$ mm。由增益介质的宽度方向尺寸 $w \geq Ma$,可以确定 $a \leq 11.2$ mm。

为了使等效菲涅耳数为半整数,在 9~11.2 mm 范围内选取合适的 a 值。 N_{eq} 与 a 之间的关系如图 2 所示,当 $N_{eq} = 84.5$ 时, $a = 11.2$ mm。

图2 a 与 N_{eq} 之间的关系Fig. 2 Relationship between a and N_{eq}

2.3 谐振腔镜曲率半径的确定

设谐振腔反射镜 M1 和输出镜 M2 的曲率半径 R_1 和 R_2 分别为

$$R_1 = \frac{2ML}{M-1}, R_2 = \frac{-2L}{M-1}. \quad (4)$$

计算得到 $R_1 = 3333 \text{ mm}$, $R_2 = -1333 \text{ mm}$, $g_1 = 1 - S/R_1 = 0.7$, $g_2 = 1 - S/R_2 = 1.75$, $g_1 g_2 = 1.32 > 1$, 即在板条宽度方向 (x 方向) 的谐振腔为正分支非稳腔, 满足设计要求。

2.4 非稳腔方向光斑大小

设有效增益介质的宽度为 l' , 则输出光斑在非稳腔方向的宽度 $h = Tl' = (1 - 1/M)l' = 16.8 \text{ mm}$, 其中 T 为谐振腔的输出耦合率。

2.5 非稳腔腔参数修正

在腔内加入光学元件(如激光晶体、调 Q 元件等), 当光线从晶体的端面倾斜入射时, 几何折射光线会产生一定偏移, 从而导致焦点产生偏移。正分支共焦非稳腔结构如图 3 所示, 从输入镜 M1 向输出镜 M2 传播的光线为平行光, 光线垂直入射激光晶体, 不会在轴向产生偏移。从输出镜 M2 向输入镜 M1 传播的光线斜入射激光晶体, 光线折射造成光线偏移, M2 的焦点从 F' 点平移到 F 点, 偏移距离为 ΔL 。为保证 M1 和 M2 的焦点重合, 要求 M1 向左平移 ΔL , 所以最终修正后的腔长 $L' = L + \Delta L$, L 为修正前腔长。下面将根据图 3, 并利用几何光学的方法, 计算偏移距离 ΔL , 进而得到修正后的几何腔长。图中 w 为板条晶体 z 方向上的长度。

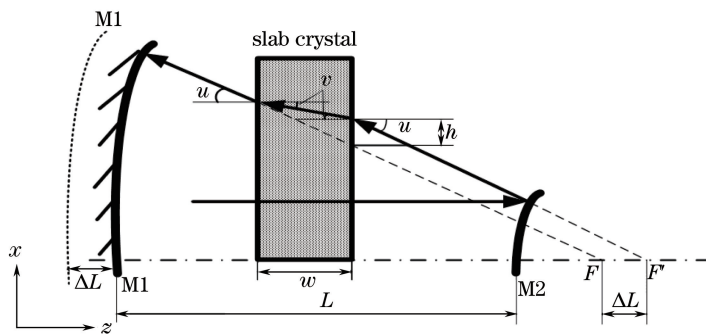


图3 正分支共焦非稳腔示意图

Fig. 3 Schematic of positive branch confocal unstable resonator

根据几何光学原理可得

$$h = w[\tan u - \tan v], \quad (5)$$

$$\Delta L = h / \tan u, \quad (6)$$

式中 u, v 分别为几何光线通过板条晶体前后表面的折射角。由折射定律可得

$$\sin u / \sin v = n, \quad (7)$$

式中 n 为晶体的折射率。对(5)~(7)式取旁轴近似可得

$$\Delta L = h/u = w(u-v)/u. \quad (8)$$

修正后的腔长可表示为

$$L' = (R_1 + R_2)/2 + \Delta L = (R_1 + R_2)/2 + w(1 - 1/n). \quad (9)$$

考虑腔内插入多个光学元件时,设它们的折射率为 n_i ,沿晶体 z 方向的长度为 w_i ,则修正后的腔长为

$$L' = (R_1 + R_2)/2 + \sum_i w_i(1 - 1/n_i). \quad (10)$$

由以上分析可知,为了保证共焦非稳腔内光线传输性质不发生改变,在腔内插入光学元件时需要调整非稳腔的光学腔长。此外,根据几何光学方法,可以得到非稳腔的其他参数(如几何放大率、输出耦合的大小以及非稳腔方向输出平行光束的宽度)没有受到影响,均与腔内没有光学元件时的情况相同。

该谐振腔内存在光学增益介质,折射效应使得反射曲面的焦点产生漂移。为保证谐振腔的共焦性,需要对腔长进行修正。当腔内存在折射率为 n (Nd:YAG 的折射率 $n = 1.8169$,波长 $\lambda = 1064$ nm)、长度为 $l = 121$ mm 的增益介质时,焦点偏移量 $\Delta L = l(1 - 1/n) = 54.4$ mm, $L' = L + \Delta L = 1054.4$ mm。

3 介稳腔方向设计

由于介稳腔这类腔的波形限制能力较稳定腔强,可获得发散角相当小且场强均匀性较好的输出光束。介稳腔方向示意图如图 4 所示,其等效图如图 5 所示。利用矩阵光学方法对此多元件腔进行分析。以 M1 为参考,腔内单程变换矩阵 \bar{M} 可表示为

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_{L_2} M_{f_T} M_{L_1}, \quad (11)$$

式中 A, B, C, D 为矩阵的 4 个元素, $M_{L_i} = \begin{bmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ($i = 1, 2$), $M_{f_T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix}$, f_T 为板条晶体的热焦距。

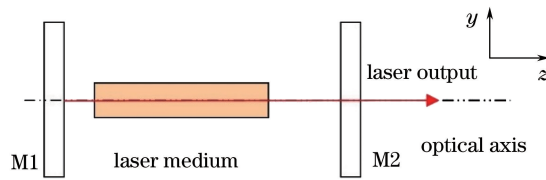


图 4 介稳腔方向示意图

Fig. 4 Direction diagram of metastable resonator

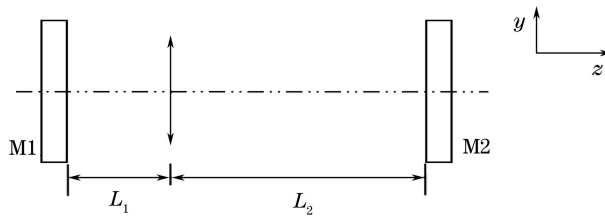


图 5 介稳腔方向的等效图

Fig. 5 Equivalent diagram in metastable resonator direction

令 $G_1 = A - B/R_1$, $G_2 = D - B/R_2$, 由于介稳腔方向有 $R_1 = R_2 = \infty$, 因此 $G_1 = A$, $G_2 = D$, 两腔镜处的基模光斑半径为

$$\begin{cases} \omega_1^2 = \frac{\lambda B}{\pi} \left[\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2} \\ \omega_2^2 = \frac{\lambda B}{\pi} \left[\frac{G_1}{G_2(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2} \end{cases} \quad (12)$$

Matlab 仿真结果如图 6 所示。两腔镜处的基模光斑半径 $\omega = 1.257$ mm, 小于板条的厚度(2 mm)。热透镜在谐振腔中处于不同位置时,基模半径在 1.227~1.257 mm 范围内变化,保证了抽运光和腔内基模振荡

光很好地匹配,从而有利于高效率、高光束质量的激光输出。

在具体的设计过程中还要考虑谐振腔中热透镜的影响,热透镜的变化会造成 M 的变化,热透镜焦距较小时,可能导致 $M=1$,此时没有激光输出,因此需设计具有热稳定特性的非稳腔。考虑晶体热透镜效应对放大倍率的影响,根据

$$M = 2g_1g_2 \pm 2\sqrt{g_1g_2(g_1g_2 - 1)} - 1, \quad (13)$$

可以得到 M 与 f_T 的关系。单程变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 a, b, c, d 为矩阵元素。对应的 G 参数: $g_1 = a - b/R_1, g_2 = d - b/R_2$ 。计算仿真结果如图 7 所示,当热透镜焦距为 6.15 m 左右时,放大率下降至 1。

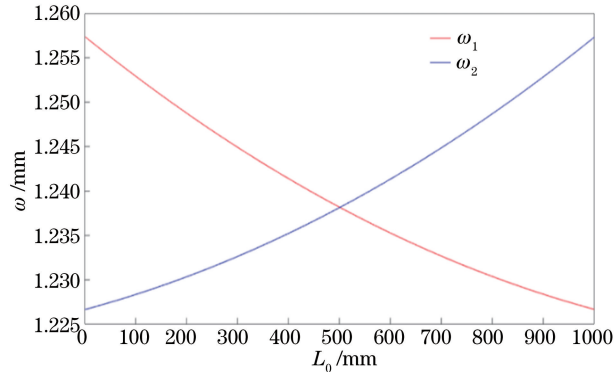


图 6 基模半径 ω 与热透镜位置 L_0 之间的关系

Fig. 6 Relationship between fundamental mode radius ω and position of thermal lens L_0

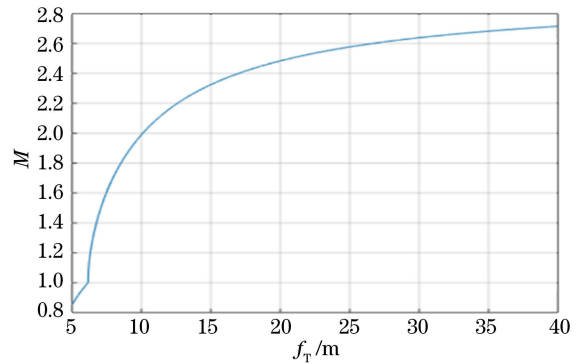


图 7 放大率 M 与热透镜焦距 f_T 之间的关系

Fig. 7 Relationship between magnification M and thermal lens focal length f_T

4 具有一维变反镜的非稳腔设计分析

谐振腔设计采用几何近似,以离轴虚共焦为设计目标。采用平凸超高斯变反镜作为输出镜,以减小硬边输出时产生的损耗。非稳腔输出功率的一个重要参数是输出耦合率 T ,非稳腔输出镜变反膜中心反射率 R_0 决定了 T 的大小。计算得到 $M=2.5$,并利用变反膜设计公式可得

$$T = 1 - \frac{R_0}{M}. \quad (15)$$

非稳腔输出镜变反膜设计的一般原则为: $R_0 M^n = 1$ (n 为变反膜的阶数)时,输出光束中心为平顶,光束质量最好;但由于此时的输出耦合度过高、输出功率过低,不适用于高平均功率设计。兼顾输出功率和光束质量,取输出镜变反膜中心的反射率范围为 $0.85 < R_0 < 0.90$ 。板条增益介质的通光孔径为矩形,且呈非轴对称,因此可将变反膜的反射率分布设计为一维分布。考虑到子午面上板条增益介质的通光孔径较大 (28 mm), n 取较大数值时有利于输出功率的提高。实验证明, $6 < n < 15$ 是合理的。变反膜尺寸根据 4% 的截断准则确定。

当 $\omega_0 = 0.4$ 时,不同高斯阶数 n 对应的反射率分布曲线图和高斯光束经过具有不同高斯阶数的变反镜后的光束状态如图 8 所示。

对于包含反射率可变的耦合输出的非稳腔,放大率 M 的表达式为

$$M = [1 + (\omega/\omega_m)]^{1/2}, \quad (16)$$

式中 ω_m 为透镜上光斑的尺寸。对于高斯光束,有效平均反射率为

$$R_{\text{eff},00} = R_{\text{max}}/M, \quad (17)$$

式中 R_{max} 为最大反射率。对于高阶模,有效平均反射率^[13]为

$$R_{\text{eff},mn} = R_{\text{max}}/M, \quad (18)$$

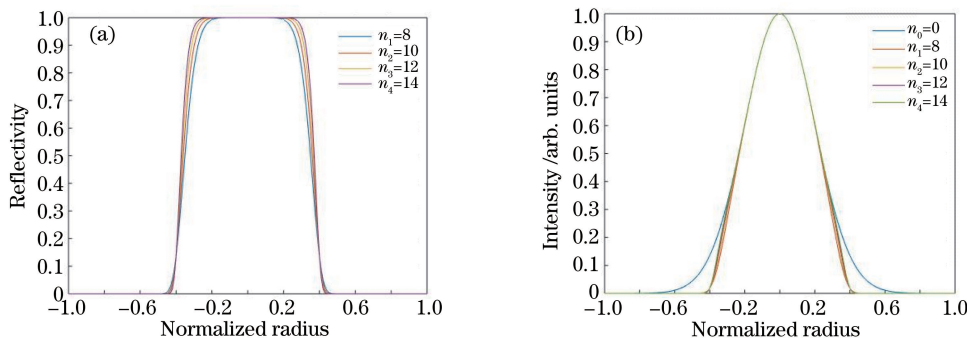


图 8 (a)不同高斯阶数时的反射率分布曲线图;(b)高斯光束经过具有不同高斯阶数的变反镜后的光束状态

Fig. 8 (a) Reflectivity distribution curves under different Gauss orders; (b) beam states after passing through varied reflectivity mirror with different Gauss orders

式中 m, n 为横模模数。由此可以得出,非稳腔高阶模的损耗随着基模(TEM_{00})的增大而呈指数增大,从而使得部分高阶模被有效抑制。

5 输出功率计算

在非稳腔结构中,输出功率计算公式为

$$P_{\text{out}} = A_b I'_s \frac{1 - V}{1 - V + \sqrt{V}(1/V_s - V_s)} (gl_0 - |\ln \sqrt{VV_s^2}|), \quad (19)$$

式中 $A_b = Mad$ 为当填充因子为 1 时的光束传输横截面积, I'_s 为饱和强度, gl_0 为小信号增益, $V = 1/M$ 为损耗因子, V_s 为腔内损耗因子。

当抽运光功率 $P_{\text{in}} = 10 \text{ kW}$ 时, $P_{\text{out}} = 4428.7 \text{ W}$, 光-光转换效率 $\eta = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = 0.4429$ 。

6 结 论

分析用于 Nd:YAG 板条增益介质的望远镜型离轴介稳-非稳腔混合结构相对于稳定腔在两个方向上的优势。通过理论计算可得,抽运功率为 10 kW 时,介稳-非稳混合腔结构的输出功率为 4428.7 W,光-光转换效率为 0.4429。分析和仿真了一维变反镜在耦合输出镜的高斯阶数 n 分别为 8, 10, 12, 14 时的反射率分布曲线和高斯光束经过不同高斯阶数变反镜后的光束状态。

下一步研究工作将通过实验验证该混合腔在不同腔参数(放大率 M 、腔长 L 和腔镜曲率半径 R)和模式选择下对输出激光功率、光束质量(远场分布)的影响等。

参 考 文 献

- [1] Liu Haiqiang, Li Wenjuan, Chang Kun, *et al.* Error characteristics of laser beam quality based on knife-edge measuring method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121402.
刘海强, 李文娟, 常坤, 等. 基于刀口测量法的激光光束质量误差特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121402.
- [2] Shang Jianli, Yu Yi, An Xiangchao, *et al.* Influence and compensation of intra-cavity defocusing in unstable resonator Nd:YAG thin-disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102005.
尚建力, 于益, 安向超, 等. 非稳腔 Nd:YAG 薄片激光器腔内离焦的影响和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102005.
- [3] Cai Haidong, Shang Jianli, Su Hua, *et al.* Research of non-conjugated aberration compensation in passive unstable resonator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1102005.
蔡海动, 尚建力, 苏华, 等. 无源非稳腔内非共轭像差补偿研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102005.
- [4] Siegman A E. Unstable optical resonator for laser application[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(3): 277-287.
- [5] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. 5th ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

- [6] Kuba K, Yamamoto T, Yagi S. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 121-123.
- [7] Zhang Hengli, Yan Ying, Liu Yang, *et al.* Laser diode stack end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with hybrid resonator at 1064 nm and 1342 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2766-2768.
张恒利, 闫莹, 刘洋, 等. 激光二极管阵列端面抽运混合腔 Nd:YVO₄板 1064 nm 和 1342 nm 激光特性研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2766-2768.
- [8] Yuan Jiahua, Zhang Hengli, Mao Yefei, *et al.* 160 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with positive branch hybrid resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194206.
苑佳华, 张恒利, 毛叶飞, 等. 160 W 端面抽运正支混合腔板条激光器的研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194206.
- [9] Mao Yefei, Zhang Hengli, Xu Liu, *et al.* Laser diode double-end-direct-pumped slab laser with hybrid resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(1): 014203.
毛叶飞, 张恒利, 徐浏, 等. 激光二极管双端直接抽运混合腔板条激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(1): 014203.
- [10] Li Jing, Zhang Hengli, Cui Li, *et al.* LD end-pumped Nd:YVO₄ slab laser amplifier with a hybrid resonator[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(9): 957-960.
李静, 张恒利, 崔丽, 等. 激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄混合腔板条激光放大器[J]. *激光与红外*, 2010, 40(9): 957-960.
- [11] He Guangsheng, Lei Shizhan. The based design of laser[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1979.
赫光生, 雷仕湛. 激光器设计基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [12] Hodgson N, Weber H. Laser resonator and beam propagation[M]. 2nded. New York: Springer, 2005.
- [13] Webet H. Laser resonators[M]. Qiu Junlin, Sun Yin, Transl. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1983.
韦伯. 激光谐振腔[M]. 邱军林, 孙荫, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 1983.