

文章编号: 0253-2239(2010)08-2299-07

激光二极管双端抽运高功率高光束质量 Z 型 折叠腔 Nd:YVO₄ 激光器

侯军燕¹ 舒仕江² 汪岳峰¹ 陈卫标² 黄峰¹ 贾文武¹

¹军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003

²中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

摘要 在高功率激光二极管(LD)抽运条件下, 固体增益介质的热透镜效应是优化激光谐振腔系统所必须考虑的重要因素之一。利用带尾纤耦合输出的激光二极管和整形聚焦透镜组组合抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 用稳腔法测量了激光晶体的等效热焦距。利用 LAS-CAD 软件模拟了三种热稳腔结构在所测等效热焦距下的模式分布, 对 LD 双端抽运 Nd:YVO₄ 激光器 Z 字型谐振腔进行优化设计后, 实验选定后腔镜曲率半径 $R_1 = 300$ mm, 输出镜曲率半径 $R_2 = 100$ mm, 腔长 $L_{\text{total}} = 280$ mm, 耦合输出镜透射率 $T = 50\%$ 。当输入 61 W 抽运功率时, 激光最高输出功率达 21.3 W, 光束质量因子 $M^2 < 1.41$, 所得激光器输出结果与理论预期吻合得很好。

关键词 激光器; LD 双端面抽运; Nd:YVO₄ 晶体; 热焦距测量; 热效应补偿

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2299

High Power High Beam Quality LD Dual-End-Pumped Z Folded Resonator Nd:YVO₄ Laser

Hou Junyan¹ Shu Shijiang² Wang Yuefeng¹ Chen Weibiao² Huang Feng¹ Jia Wenwu¹

¹Teaching and Research Section of Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract When operating at a high-power region, thermal lens effect of diode pump solid state laser is an important factor which must be considered to optimize the laser system. The Nd:YVO₄ crystal is pumped by a fiber-coupled laser diode which is shaped and focused by a lens group. The focal length of thermal lens is measured by using stable cavity method. The mode distribution of three thermal stable resonators with the thermal focal length is simulated by LAS-CAD software. By using this results the LD dual-end-pumped Nd:YVO₄ laser Z-folded resonator has been optimized, with total reflection mirror radius of curvature $R_1 = 300$ mm, and output coupling mirror radius of curvature $R_2 = 100$ mm, with length of the resonator $L_{\text{total}} = 280$ mm, and transmittance of the output coupling mirror $T = 50\%$. CW TEM₀₀ mode output is 21.3 W when the pump power is 61 W, and beam quality factor M^2 is less than 1.41. The experimental results on laser output characteristics are in good agreement with the theoretical ones.

Key words lasers; LD dual-end-pumped; Nd:YVO₄ crystal; measurement of thermal focal length; compensation for thermal lens

1 引言

激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL)因其

光-光转换效率高、热负载小、结构紧凑、使用寿命长,而且能够获得优良的光束质量,越来越引起人们

收稿日期: 2009-10-26; 收到修改稿日期: 2009-11-18

作者简介: 侯军燕(1982—),女,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: junyan_hou@yahoo.com.cn

导师简介: 汪岳峰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光器,全固态激光器件与应用等方面的研究。

E-mail: YFwang-OEC@163.com

的关注^[1~5]。当激光器处于高功率运转时,增益介质的热透镜效应是优化激光系统所必须考虑的重要因素之一,因而 DPSSL 增益介质热透镜效应的理论和实验研究成为高功率激光器的一项重要的工作^[6~13]。折叠腔与直腔结构相比具有模参量调整灵活,腔内有效空间大。同时可进行双端抽运,减少单端抽运造成的增益介质吸收不均匀性,可以在晶体破坏条件允许的情况下增加增益,提高了对抽运光的利用率,易于获得基模光斑输出。近年来对于双端抽运折叠腔 Nd:YVO₄ 激光器国内外都做了很多的研究工作^[14~17];1995 年 W. L. Nighan Jr. 得到连续 1064 nm 激光最高输出功率 13.8 W,光束质量 $M^2 < 1.05$;2004 年山西大学在总抽运功率为 32.3 W 的情况下,得到 10.4 W 的单频 1064 nm 红外输出;2004 年中国科学院西安光学精密机械研究所抽运功率为 20.74 W 时获得了 11 W 的 1064 nm TEM₀₀ 模激光输出。

实验中,基于稳腔法测量了不同抽运功率时激光晶体的等效热焦距,利用 LAS-CAD 软件模拟了三种热稳腔在此热焦距下的模式分布情况,对激光器腔型进行了优化。当 61 W 抽运功率时,得到激光最高输出功率达 21.3 W,光束质量因子 $M^2 < 1.41$,激光器在高功率输出时保持了较好的光束质量,使得激光二极管(LD)双端面抽运 Z 型折叠腔低掺杂 Nd:YVO₄ 激光器得到优化设计。

2 理论和模拟分析

2.1 稳腔法测热焦距

图 1 是实验设计的谐振腔光路排布结构图,假设图中上臂长度 L_1 和下臂长度 L_4 分别为 $L_1 = L_4 = X$ mm,激光晶体 Nd:YVO₄ 的长度 $L = 12$ mm,将晶体近似等效成薄透镜,因此可将晶体长度算进光程里, f 为晶体热透镜焦距,图 1 中激光晶体与折叠反射镜间的距离 $L_2 = L_3 = 5$ mm,由 ABCD 传输矩阵理论可得,当以紧贴 M₁ 左端面的平面为参考平面,腔内单程传输矩阵如下:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{7.76 + L}{f} & (L + 7.76) \left(2 - \frac{7.76 + L}{f} \right) \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{7.76 + L}{f} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$g_1 = A_1 = 1 - \frac{7.76 + L}{f}, g_2 = A_2 = 1 - \frac{7.76 + L}{f},$$

稳定性条件 $0 < g_1 g_2 < 1$, 即

$$0 < \left(1 - \frac{7.76 + L}{f} \right)^2 < 1, \quad (2)$$

又因为 $f > 0$, 所以稳腔的临界条件为 $f = 3.88 + L/2$ 。

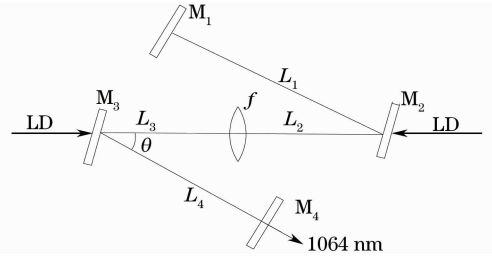


图 1 含热透镜 Z 型折叠腔的等效腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent cavity of Z-folded resonator with the thermal lens

由此可见双端面抽运时,当腔长一定且上下臂的长度相等时,不断增加抽运功率使腔刚刚出稳区时,此时的热焦距可用上述公式计算得出。此方法受到一定实验条件的限制,首先抽运功率要足够大,以至于可以使腔出稳区;其次实验台面要有足够的空间,以弥补抽运功率的不足。好处是方法简单易行,而且从实验结果可以看出测量值准确性较高,对腔参数的设计具有参考价值。

2.2 LAS-CAD 模拟腔内模式分布情况

根据实验值对模拟参数的设置进行修正,使之与实验结果更加贴近。激光器的谐振腔如图 1 所示, M₂, M₃ 均为平面镜,随着后腔镜 M₁ 的曲率半径 R₁ 和输出镜 M₄ 的曲率半径 R₄ 类型和尺寸的变化,激光器的谐振腔也有所变化。(R₁ = 300 mm, R₄ = 100 mm 时下文均用“R₃₀₀-R₁₀₀”名称代替,以此类推)Nd:YVO₄ 晶体各参数的取值为掺杂的原子数分数为 0.27%,尺寸 4 mm × 4 mm × 12 mm,热导率 K_{cx} = 0.0523 W/(cm·K), K_{cy} = 0.051 W/(cm·K), dn/dT = (4.7 ± 0.6) × 10⁻⁶ K⁻¹。激光二极管经光纤耦合器和整形聚焦透镜组入射到 Nd:YVO₄ 晶体内部 4.5 mm,抽运光产热效率 η_p 约为 25%,吸收系数 α = 21 cm⁻¹,光纤芯径 ω_p = 400 μm,振荡光波长 λ = 1.064 μm,两端抽运功率为 58 W,腔稳定性参数 A₁ × D₁ = 0.5, M² = 1 时,得到了以下模拟结果。

当抽运功率 P_m = 58 W, Nd:YVO₄ 晶体参数不变,三种腔型均处于稳定性最好时,图 2 显示了平-平腔和 R₃₀₀-R₁₀₀ 腔内模式分布图(R₅₀₀-R₁₀₀ 腔型的模式分布与 R₃₀₀-R₁₀₀ 图形差别不大,此处不再给出)。表 1 中列举了模拟计算出的三种腔型的模式分布。比较和分析表中数据可知:平-平腔型, TEM₀₀ 在晶体中模体积最小,小于抽运光模体积,因

此会有高阶模产生,故输出功率较大,但光束质量较差; $R_{300}-R_{100}$ 双凹腔时, TEM₀₀ 在晶体中的模体积增加,抑制了部分高阶模的产生,输出功率会有所降低,但是光束质量会明显改善; $R_{500}-R_{100}$ 双凹腔时,振荡光模体积继续增加,已经稍大于抽运光的模体

积,在抑制高阶模产生的同时,也加大了腔的损耗,因此输出功率会下降较大,光束质量与 $R_{300}-R_{100}$ 腔型相比也有所下降.说明三种腔型在热稳定性最好的状态下, $R_{300}-R_{100}$ 双凹腔的振荡光与抽运光模式匹配最佳,在保证光束质量的同时输出功率也会较大.

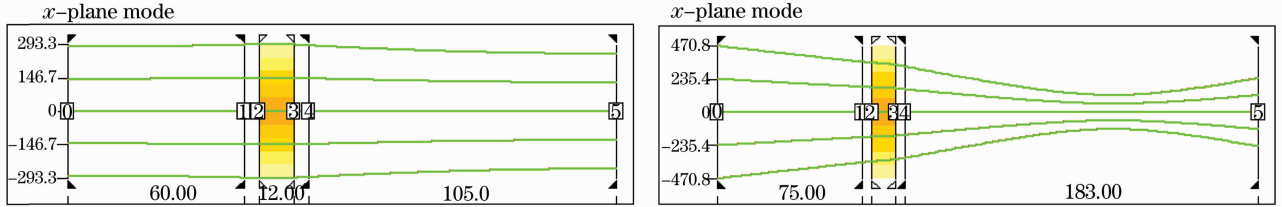


图 2 $P_{in}=58\text{ W}$, 激光腔内模式分布示意图。(a) 平-平腔; (b) $R_{300}-R_{100}$ 腔

Fig. 2 When $P_{in}=58\text{ W}$, the mode distribution plot of the resonance cavity. (a) Flat-flat cavity; (b) $R_{300}-R_{100}$ cavity

表 1 LAS-CAD 模拟腔内模式分布情况

Table 1 Mode distribution in the resonator by using LAS-CAD

Type of resonator	Stability parameter $A_1 \times D_1$	Spot size on crystal /mm	Spot size on output couple mirror /mm	Size of TEM ₀₀ beam waist /mm	Far-field beam angle /mrad
Flat-flat	0.5	0.59, 0.58	0.5	0.5	2.7
$R_{300}-R_{100}$	0.5	0.72, 0.67	0.52	0.23	5.7
$R_{500}-R_{100}$	0.5	0.98, 0.93	0.52	0.23	5.8

3 实验装置

实验装置如图 3 所示。系统中使用山东大学制造的 Nd:YVO₄ 晶体采用 α 轴切割,晶体两个端面镀 808 nm 和 1064 nm 双波长增透膜。为使 Nd:YVO₄ 晶体与冷却铜块保持良好的热接触,晶体使用钢皮紧裹,分别被置入精心设计的三面通有冷却水的铜块中,热沉中的水温 25 °C。抽运源由两个 32 W 光纤耦合二极管激光阵列组成,在 25 °C 输出波长为 808.6 nm,尾纤输出芯径为 0.4 mm,数值孔径为 0.17。抽运光由聚焦耦合透镜组以 1:1 的放大比例整形和聚焦后耦合进晶体内部,聚焦耦合透镜的焦距是 20 mm。激光腔由四面镜子组成,后腔镜 M_1 镀 808 nm 和 1064 nm 高反膜;输出镜 M_4 一面镀 808 nm 高反膜和一定透射率 1064 nm 增透膜,

另一面镀 1064 nm 增透膜;折叠镜 M_2, M_3 是两平面镜,一面镀与入射角成 30° 时 808 nm 高透膜,另一面镀与入射角成 30° 时 808 nm 增透膜和与入射角成 30° 时 1064 nm 高反膜。

4 实验结果及分析

4.1 热焦距的实验测量

在实验中,固定激光器上下折叠臂长相等且长度不变(尽量使臂长较大),通过改变抽运功率来寻找谐振腔的临界稳定点,在稳腔时,激光输出功率随抽运功率的变化基本上是线性增大的,但当抽运功率继续增大,接近临界点时,激光输出很不稳定,直到变为非稳腔时,功率迅速下降,直到完全降为 0。改变臂长值,激光输出功率突变时所对应的抽运功率也相应地变化,因此根据前面的推导结果, ($f=3.88+L/2$) 即为相应抽运条件下的热焦距值 (f_T)。图 4 即为采用稳腔法测量热焦距时激光器的吸收抽运功率与连续输出功率关系曲线,从图中可以明显看出在稳腔范围内激光输出功率随抽运功率的变化基本上是线性增大的,随着抽运功率的继续增加,谐振腔逐渐偏离稳区的中心,功率输出下降,接近临界点时,激光输出很不稳定,直到变为非稳腔时,功率迅速下降,最后完全降为 0。

表 2 总结了图 4 中四组不同抽运功率下的晶体热焦距。

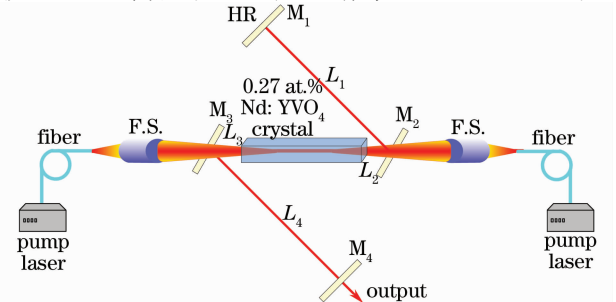


图 3 Z 型折叠腔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Z folded resonator

图 5 中对抽运功率 P_{in} 与热值距 f_T 的关系进行了拟合。

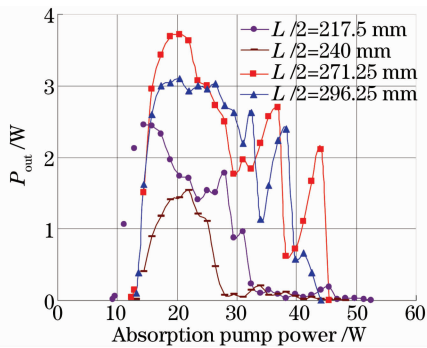


图 4 采用稳腔法测量热焦距时吸收抽运功率与连续输出功率关系曲线

Fig. 4 CW output powers as a function of absorption pump power when thermal focal length is measured by using stable cavity method

表 2 不同抽运功率下的晶体热焦距

Table 2 Thermal focal length with different pump powers

P_{in}/W	f_T/mm
52.5	217.5
48.2	240
45.4	271.25
44	296.25

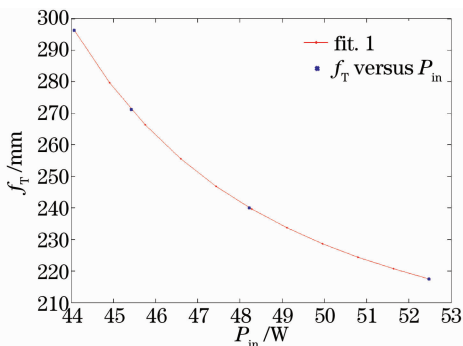


图 5 不同抽运功率下的热焦距

Fig. 5 Thermal focal length with different pump powers

4.2 不同腔型的实验结果

4.2.1 平-平腔型

激光腔的后腔镜 M_1 为平面镜, 输出镜 M_4 也是平面镜, 透射率 $T=40\%$, $L_{total}=187\text{ mm}$ ($L_1=60\text{ mm}$, $L_2=L_3=5\text{ mm}$, $L_4=105\text{ mm}$), 折叠角 $\theta=60^\circ$ 。

图 6 描述了 808 nm LD 输入功率与 1064 nm TEM₀₀ 连续输出特性, 在 58 W 抽运功率时, 最高输出功率达到 22 W, 光-光转换效率为 38%。在 32 W 抽运功率时, 光-光转换效率最高为 46%, 输出功率 14.4 W。

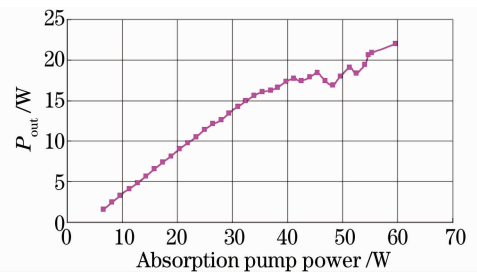


图 6 平-平腔的 Nd:YVO₄ 激光器吸收抽运功率与连续输出功率关系曲线

Fig. 6 CW output powers of Nd:YVO₄ laser using flat-flat resonator as a function of absorption pump power of LD

抽运功率 58 W 时, 光束质量测量图如图 7 所示, 图 7(a) 表示 M^2 测量仪进入入射口后, 不同距离处的光斑直径, M^2 测量时采用的是美国 Spiricon 公司型号为 $M^2-200-8$ 光束传输分析仪。图 7(b) 表示激光能量远场空间分布。在输出功率为 26 W 时, 光-光转换效率最高为 45%, 输出激光的光束质量 x 方向 $M_x^2=2.36$, y 方向 $M_y^2=1.76$, 光束束腰直径 $w_x=1.3\text{ mm}$, $w_y=0.85\text{ mm}$, 发散角 $\theta_x=2.4\text{ mrad}$, $\theta_y=2.7\text{ mrad}$ 。

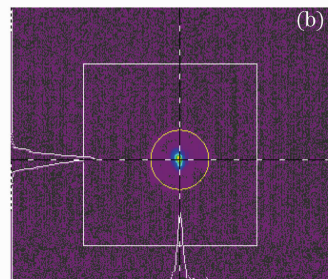
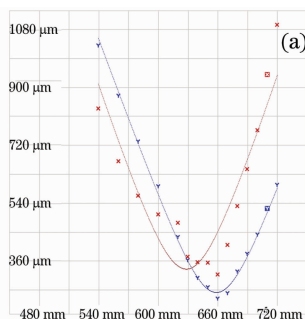


图 7 平-平腔输出功率为 22 W 时的光束质量。(a) 各测量点处的光斑大小; (b) 远场光强分布

Fig. 7 When the output power is 22 W, the beam qualities of flat-flat resonator laser. (a) Beam spot width at measured points; (b) beam intensity distribution in the far field

4.2.2 R₃₀₀-R₁₀₀ 双凹腔型

激光腔的后腔镜 M₁ 为平凹镜, 曲率半径 R = 300 mm, 输出镜 M₄ 也是平凹镜, 曲率半径 R = 100 mm, 透射率 T = 50%, L_{total} = 280 mm (L₁ = 75 mm, L₂ = L₃ = 5 mm, L₄ = 183 mm)。

图 8 描述 808 nm LD 输入功率与 1064 nm TEM₀₀ 连续输出特性。在 58 W 抽运功率时, 输出功率达到 20.8 W, 光-光转换效率最高为 36%。当增大抽运功率时输出功率会增加, 最大输出可达到 21.3 W, 此时抽运功率为 61 W。

光束质量测量图如图 9 所示, 左图表示与 M² 测量仪入射口不同距离处的光斑直径, 右图表示激光能量远场空间分布。在输出功率为 21.3 W 时, 输出激光的光束质量 x 方向 M_x² = 1.37, y 方向

M_y² = 1.41, 光束束腰直径 ω_x = 0.32 mm, ω_y = 0.24 mm, 发散角 θ_x = 5.1 mrad, θ_y = 7.9 mrad。

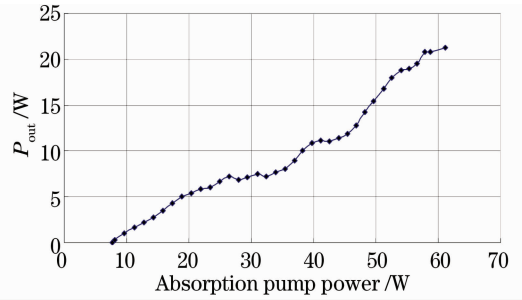


图 8 R₃₀₀-R₁₀₀ 双凹腔的 Nd:YVO₄ 激光器吸收抽运功率与连续输出功率关系曲线

Fig. 8 CW output powers of LD pumped Nd:YVO₄ laser using R₃₀₀-R₁₀₀ double concave resonator as a function of absorption pump power

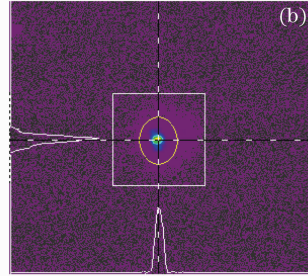
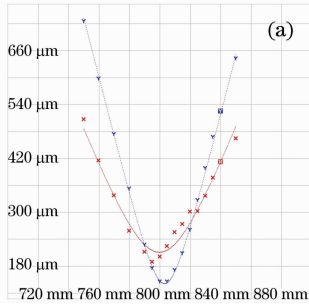


图 9 R₃₀₀-R₁₀₀ 双凹腔的输出功率为 21.3 W 时的光束质量。(a) 测量点处的光斑大小; (b) 远场光强分布

Fig. 9 When P_{out} = 21.3 W, the beam qualities of the R₃₀₀-R₁₀₀ double concave resonator laser.

(a) beam width at different points; (b) beam intensity distribution in the far field

4.2.3 R₅₀₀-R₁₀₀ 双凹腔型

激光腔的后腔镜 M₁ 曲率半径 R = 500 mm, 输出镜 M₄ 不变, L_{total} = 332 mm (L₁ = 80 mm, L₂ = L₃ = 5 mm, L₄ = 230 mm)。

图 10 描述 808 nm LD 输入功率与 1064 nm TEM₀₀ 连续输出特性。在 55 W 抽运功率时, 最高输出功率达到 14.2 W, 光-光转换效率最高为 26%, 增加抽运功率输出功率不再增大。输出功率 14.2 W 时, 光束质量测量图如图 11 所示, 图 11(a) 表示与 M² 测量仪入射口不同距离处的光斑直径, 图 11(b) 表示激光能量远场空间分布。在输出功率为 14.2 W 时, 输出激光的光束质量 x 方向 M_x² = 1.52, y 方向 M_y² = 1.7, 光束束腰直径 ω_x = 0.34 mm, ω_y = 0.25 mm, 发散角 θ_x = 6 mrad, θ_y = 9 mrad。

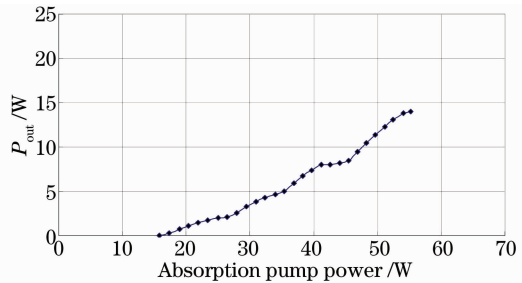


图 10 R₅₀₀-R₁₀₀ 双凹腔的 Nd:YVO₄ 激光器吸收抽运功率与连续输出功率关系曲线

Fig. 10 CW output powers as a function of absorption pump power of LD pumped Nd:YVO₄ laser using R₅₀₀-R₁₀₀ double-concave resonator

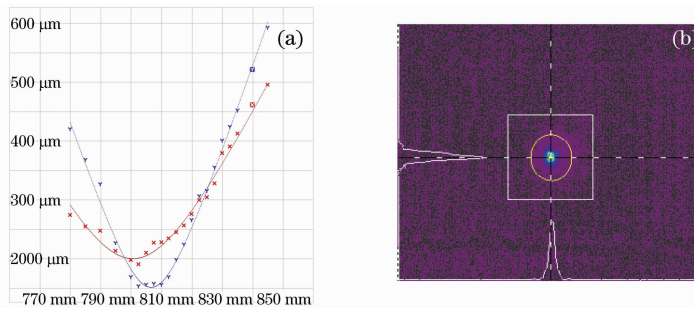


图 11 $R_{500}-R_{100}$ 双凹腔的吸收抽运功率为 37 W 时的光束质量。(a)测量点处的光斑大小;(b)远场光强分布

Fig. 11 Beam qualities of the $R_{500}-R_{100}$ double concave resonator when absorption pump power was 37 W. (a) beam width at different measured points; (b) beam intensity distribution in the far field

4.2.4 三种腔型热补偿比较

由表 3 中的数据可看出,采用平-平腔型的 Nd:YVO₄ 激光器输出激光的束腰直径最大,已产生高阶模,致使出光功率高,可达到 22 W,光-光转换效率高,但是高功率运转时光束质量差;采用 $R_{500}-R_{100}$ 双凹腔时,出光功率明显降低,但是高功率运转时光束质量有所提高,说明较大程度的抑制了高阶模的产生,而且晶体中振荡光的模体积大于抽运光的模体积,损耗增大,输出功率大大降低,只能达到 14 W。在光束质量方面,由于输出激光的束腰直径稍大于 TEM₀₀ 理论值,因此光束质量比平-

平腔时有所提高;而采用 $R_{300}-R_{100}$ 腔型时,输出激光的束腰直径和发散角得测量值与 TEM₀₀ 理论值最为接近,因此光束质量在三种腔型中最好,也说明此时振荡光的模体积与抽运光的模体积最为匹配,所以出光功率稳定在 20 W 以上水平,且在高功率运转时光束质量 $M^2 < 1.5$ 。由以上实验结果可以看出 $R_{300}-R_{100}$ 腔型在稳定性好的基础上,保证了抽运光与振荡光模体积匹配,使激光器高功率输出时有好的光束质量, $R_{300}-R_{100}$ 双凹腔型的热补偿效果最合适,而且是实验与理论结果最吻合的腔型。

表 3 不同腔型输出特性测量结果

Table 3 Measured results of output characteristics with different resonators

Type of resonator	Max. output power /W	Optical conversion efficiency	Measured size of beam waist /mm	Measured far-field beam angle /mrad	M_2 at max. output power
Flat-flat	22	45%	1.30, 0.85	2.4, 2.6	2.36, 1.76
$R_{300}-R_{100}$	21.3	36%	0.32, 0.24	5.2, 8.0	1.37, 1.41
$R_{500}-R_{100}$	14	25.6%	0.34, 0.25	6.0, 9.0	1.52, 1.7

4 结 论

对 LD 的光经光纤耦合和耦合器透镜组聚焦后抽运 Nd:YVO₄ 晶体,利用稳腔法测量了激光晶体的等效热焦距,比较了不同腔型对热效应的补偿情况,得到最优结果:后腔镜 $R_1 = 300$ mm,输出镜 $R_2 = 100$ mm,双凹腔型在腔长 280 mm,耦合输出镜透射率 $T = 50\%$,在 61 W 抽运功率时,连续光最高输出功率达到 21.3 W,光-光转换效率为 36%,光束质量因子 $M^2 < 1.41$ 。稳腔法测量得到的热焦距结果较准确,在腔型设计和优化中有较高的参考价值。

参 考 文 献

1 Y. Fant, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(6): 895~912

2 Du Chenlin, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin *et al.*. High power diode-end-pumped intra-cavity frequency doubled Nd:GdVO₄/LBO red laser [C]. *SPIE*, 2005, **6028**: 86~91

3 Du Chenlin, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin *et al.*. 6 W diode-end-pumped Nd:GdVO₄/LBO quasi-continuous-wave red laser at 671 nm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2013~2018

4 Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197

张铁犁,姚建铨,王鹏等.端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环形腔激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197

5 Wang Chunyu, Li Xiaoli, Zang Huaguo *et al.*. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1441~1446
王春雨,李小莉,臧华国等.激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1441~1446

6 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1831~1833

7 Shi Peng, Li Long, Chen Wen *et al.*. Influence of anisotropic

- thermal parameter on the thermal effect of Nd:YVO₄ crystal [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(2): 175~178
- 史 彭, 李 隆, 陈 文等. 各向异性热参量对 Nd:YVO₄ 晶体热效应的影响 [J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(2): 175~178
- 8 Zhang Chaobo, Song Feng, Meng Fanzhen *et al.*. Measurement of the laser diode end-pumped solid laser's thermal focal length by using the curve of output [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(7): 1517~1520
- 张潮波, 宋 峰, 孟凡臻等. 利用输出功率测量激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜焦距 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(7): 1517~1520
- 9 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd³⁺:YAG laser pumped by laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(9): 777~781
- 张行愚, 赵圣之, 王青圃等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究 [J]. *中国激光*, 2000, **27**(9): 777~781
- 10 Chen Huimin, Li Jiaye, The dynamic measurement of the thermal focal distance [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(4): 264~265
- 陈慧敏, 李家泽, 一种测量动态热焦距的方法 [J]. *激光与红外*, 2004, **34**(4): 264~265
- 11 Shi Peng, Chen Wen, Li Long *et al.*. Influence of laser distribution on thermal effect of Nd:YVO₄ crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 197~201
- 史 彭, 陈 文, 李 隆等. 激光分布对抽运 Nd:YVO₄ 晶体热效应的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 197~201
- 12 Li Qiang, Wang Zhimin, Wang Zhiyong *et al.*. Thermal lens focal length measurement of high power lamp pumped CW Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1117~1120
- 李 强, 王志敏, 王智勇等. 大功率连续 Nd:YAG 激光器热透镜焦距测量 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1117~1120
- 13 B. O. Zygus, J. Erhard. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers with transverse beat frequencies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(10): 1361~1362
- 14 William L. Nighan Jr. Diode bars pump solid-state crystals to high powers [J]. *Lasers Focus World*, 1995, 5, 97
- 15 Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. High power single-frequency Nd:YVO₄ laser dual-end-pumped by diode Laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(2): 87~92
- 赵晶云, 张宽收. LD 双端端面抽运的高功率连续单频 Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(2): 87~92
- 16 Hao Erjuan, Tan Huiming, Li Te *et al.*. High output and single-frequency ring Nd:YVO₄ laser end-pumped by diode laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 580~583
- 郝二娟, 檀慧明, 李 特等. LD 端面抽运的高输出单频 Nd:YVO₄ 绿光激光器 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 580~583
- 17 Li Long, Tian Feng, Zhao Zhimin. LD end-pumped folded cavity Nd:YVO₄/LBO laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 396~399
- 李 隆, 田 丰, 赵致民. LD 端面抽运折叠腔 Nd:YVO₄/LBO 激光器 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 396~399