

高功率 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的 理论设计与实验研究

李密^{1,2,3}, 周唐建^{1,2}, 徐浏^{1,2}, 高清松^{1,2}, 章健⁴, 邬映臣^{1,2}, 汪丹^{1,2}, 胡浩^{1,2},
唐淳^{1,2}, 于益^{1,2}, 吴振海^{1,2}, 李建民^{1,2}, 石勇^{1,2}, 赵娜^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999;

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

⁴中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

摘要 理论设计和制作了 Yb:YAG 陶瓷板条, 通过钢砷化镓(InGaAs)二极管抽运、1030 nm 种子激光注入以及双程放大, 在室温下实现了高功率的 1030 nm 激光输出。种子激光注入功率为 1.18 kW 和总抽运功率为 19.98 kW 时, 获得了 5.97 kW 的放大激光功率, 光-光转换效率约为 24.0%, 斜率效率为 27.9%。测量了 Yb:YAG 陶瓷板条的透射波前, 模拟了不同耦合效率和温度时的输出功率。实验结果表明, 室温下 Yb:YAG 在高亮度抽运和高亮度种子光注入时可以实现高功率的激光输出。

关键词 激光器; Yb:YAG; 自吸收; 陶瓷板条; 激光放大器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0114001

Theoretical Design and Experimental Research on High Power Yb:YAG Ceramic Slab Laser Amplifier

Li Mi^{1,2,3}, Zhou Tangjian^{1,2}, Xu Liu^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}, Zhang Jian⁴,
Wu Yingcheng^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Hu Hao^{1,2}, Tang Chun^{1,2}, Yu Yi^{1,2},
Wu Zhenhai^{1,2}, Li Jianmin^{1,2}, Shi Yong^{1,2}, Zhao Na^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621999, China;

³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

⁴Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A Yb:YAG ceramic slab is designed theoretically and fabricated, and the high power laser output is achieved at 1030 nm under room-temperature with InGaAs diode pumping, 1030 nm seed laser injecting and double-pass amplifying. The amplified laser power is 5.97 kW when the total pumping power is 19.98 kW and the injected power of the seed laser is 1.18 kW. The optical-to-optical conversion efficiency is 24.0% and the slope efficiency is 27.9%. The transmission wavefront of the Yb:YAG ceramic slab is measured and the output powers with different coupling efficiencies and working temperatures are simulated. The experimental results show that the high power laser output can be achieved in Yb:YAG under room-temperature with high intensity pumping and high intensity seed laser injecting.

Key words lasers; Yb:YAG; self-absorption; ceramic slab; laser amplifier

收稿日期: 2017-08-24; 收到修改稿日期: 2017-09-05

作者简介: 李密(1981—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

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

E-mail: tangchun21@gmail.com

1 引 言

诺格公司和达信公司分别于 2009 年和 2010 年实现了 100 kW 的高功率激光输出,此后,科研工作者们对高功率固体激光器的电光效率更加关注。高功率固体激光器最常用的两种激活离子分别为钕离子(Nd^{3+})和镱离子(Yb^{3+})^[1]。 Nd^{3+} 为四能级激光系统,在 808 nm 抽运、1064 nm 激光输出时的量子亏损约为 24%; Yb^{3+} 为准三能级激光系统,在 941 nm 抽运、1030 nm 激光输出时的量子亏损约为 9%;因此 Yb^{3+} 激光器可获得更高的光-光转换效率^[2-3]。同时, Yb^{3+} 量子亏损的减小还可以有效减小激光器的热负载比^[4],因此 Yb^{3+} 激光材料可以承受更高的抽运功率密度,实现更高功率的激光输出,具有很大的发展潜力。

Marmo 等^[5] 研制了传导冷却端面抽运的 Nd:YAG 板条激光放大器,单模块输出功率约为 4 kW,并于 2009 年率先实现了 100 kW 激光输出。中国工程物理研究院应用电子学研究所也一直致力于高功率板条激光技术的研究,2012 年,该课题组使用 30 mm 宽度的单掺 Nd:YAG 晶体板条,实现了 4 kW 的激光输出功率;2013 年,李密等^[6] 利用 30 mm 宽度的单掺 Nd:YAG 晶体板条并通过平凹腔振荡获得了输出功率超过 3 kW 的激光输出,于 2016 年使用 30 mm 宽度的双浓度掺杂 Nd:YAG 晶体板条实现了超过 5 kW 的激光输出^[7],并于 2017 年使用 30 mm 宽度的双浓度掺杂 Nd:YAG 陶瓷板条实现超过 7 kW 的激光输出和 39% 的光-光转换效率^[8]。

基于以上研究,开展了室温下的 Yb:YAG 陶瓷板条激光器的实验研究,设计并制作了 Yb:YAG 陶瓷板条激光器,完成了 Yb:YAG 陶瓷荧光光谱和光学传输损耗的测量。在铟镓砷(InGaAs)二极管抽运、1030 nm 种子激光注入并双程放大的条件下,种子激光注入功率为 1.18 kW 和总抽运功率为 19.98 kW 时获得了 5.97 kW 的 1030 nm 激光输出,光-光转换效率为 24.0%,斜率效率为 27.9%。

2 Yb:YAG 陶瓷板条设计

图1为 300 K 时 Yb:YAG 的能级结构图^[9],图 2 为室温下 Yb:YAG 陶瓷与 Yb:YAG 晶体的荧光光谱。由图 2 可见,Yb:YAG 陶瓷和 Yb:YAG 晶体的

荧光光谱基本一致,荧光谱线中心均在 1030.2 nm, Yb:YAG 陶瓷在 1030 nm 附近的荧光光谱略窄一些。

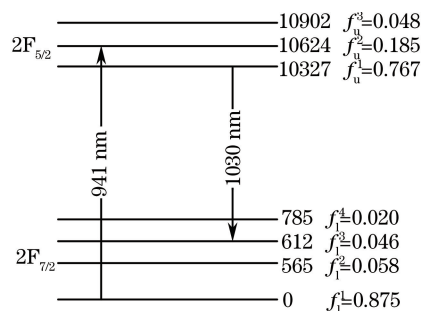


图 1 300 K 时 Yb:YAG 的能级结构图

Fig. 1 Energy level structure of Yb:YAG at 300 K

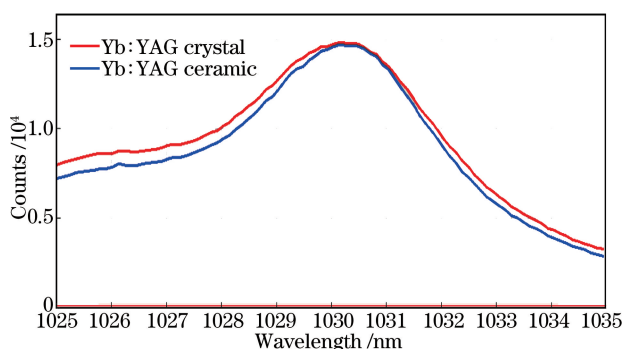


图 2 室温下 Yb:YAG 陶瓷与 Yb:YAG 晶体的荧光光谱

Fig. 2 Fluorescence spectra of Yb:YAG ceramic and Yb:YAG crystal at room temperature

吸收截面的测量准确度受材料内部散射损耗的影响,而发射截面测量的准确度会受到更多因素的干扰,因此很难准确地测量 Yb:YAG 陶瓷的吸收截面和发射截面。由于 Yb:YAG 陶瓷与 Yb:YAG 晶体的光谱差异很小,因此利用 Yb:YAG 晶体的参数进行数值计算。

定义 $^2F_{5/2}$ 能级的粒子数密度为 n_u , $^2F_{7/2}$ 能级的粒子数密度为 n_l , 则 Yb^{3+} 的粒子数密度可以表示为 $n = n_u + n_l$, 各子能级的玻尔兹曼因子如图 1 所示。根据 Yb:YAG 的能级结构, $^2F_{5/2}$ 能级的粒子数因 941 nm 波长的受激吸收而增加,也会因 941 nm 波长的受激发射而减小,抽运光对 $^2F_{5/2}$ 能级的粒子数密度变化速率的影响可表示为

$$\frac{dn_u}{dt} = \frac{\sigma_a n_l f_l^1 I_p}{h\nu_p} - \frac{\sigma_a n_u f_u^2 I_p}{h\nu_p}, \quad (1)$$

式中 σ_a 为抽运光吸收截面, f_l^1 为基态子能级的玻尔兹曼小数, f_u^2 为 10624 cm^{-1} 子能级的玻尔兹曼小数,如图 1 所示。 I_p 为抽运光光强, h 为普朗克常数, ν_p 为抽运光频率, $h\nu_p$ 为单个抽运光子的能量。

根据吸收系数的定义,将(1)式简化并求得 Yb:YAG对抽运光的吸收系数为

$$\alpha = \sigma_a (n_1 f_1^2 - n_u f_u^2) \quad (2)$$

在室温(约为 300 K)下, $f_1^2 = 0.875$, $f_u^2 = 0.185$,取 $n_u = 0.15n$, $n_1 = 0.85n$,根据(2)式可以求得 Yb:YAG 对941 nm 抽运光的吸收系数为

$$\alpha = 0.716\sigma_a n \quad (3)$$

设定 Yb:YAG 陶瓷板条掺杂区的总长度为 13 cm,设计方法参照文献[6]中所述的端面抽运双浓度掺杂 Nd:YAG 板条的基本设计方法。具体设计方法为:1)设定 Yb:YAG 对抽运光的吸收比例不低于95%;2)板条内掺杂区与非掺杂区的交界面以及两种掺杂区交界面的热沉积功率密度一致。

将一种双浓度掺杂设计为:两个低掺杂区的长度为 5 cm,对应的吸收系数 $\alpha_1 = 0.186 \text{ cm}^{-1}$;中间高掺杂区的长度为 3 cm,对应的吸收系数 $\alpha_2 = 0.372 \text{ cm}^{-1}$ 。

在 300 K 时, Yb:YAG 对941 nm 波长抽运光的吸收截面 $\sigma_a = 7.85 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ [10],根据(3)式和高、低掺杂区各自对应的吸收系数,求得高掺杂区和低掺杂区的掺杂浓度(原子数分数)分别为 0.48%和 0.24%。根据上述设计参数,同时考虑到 Yb:YAG 陶瓷在烧结过程中的收缩率,首先制作出合适大小的模具(略大于陶瓷毛坯的尺寸),将不同掺杂浓度的粉体分别填充进模具的不同位置并挤压成型。通过预烧结得到塑坯,再将塑坯放入真空烧结炉进行正式烧结,通过退火获得需要的 Yb:YAG 陶瓷毛坯,最终通过精密光学加工将其制作成 Yb:YAG 陶瓷板条。

制作好 Yb:YAG 陶瓷毛坯后,测量了陶瓷内部的传输损耗,由于 Yb:YAG 对1030 nm 的激光存在自吸收,故不能用 1030 nm 激光测量内部损耗。将 Yb:YAG 陶瓷毛坯的两端抛光但不镀膜,将一束口径大小为 5 mm×2 mm 的 1064 nm 探测光垂直入射到 Yb:YAG 陶瓷毛坯表面。若探测光垂直入射时 Yb:YAG 陶瓷光滑表面与空气之间的透过率为 T ,陶瓷的总长度为 L ,陶瓷内部的传输损耗系数为 δ ,则探测光的总透过率可以表示为[11]

$$T_{\text{total}} = \frac{T^2 \exp(-\delta L)}{1 - (1 - T)^2 \exp(-2\delta L)} \quad (4)$$

根据 Yb:YAG 陶瓷的折射率可以求得 $T = 0.916$,陶瓷毛坯的总长度约为 160 mm。实验中测得 1064 nm 探测光的功率由入射前的 1.35 W 减小到出射时的 1.09 W。根据(4)式可以求得制作的

Yb:YAG陶瓷毛坯内部的平均传输损耗系数 δ 约为 0.0028 cm^{-1} 。

通过精密光学加工将 Yb:YAG 陶瓷毛坯加工为外尺寸为 150.0 mm×15.0 mm×2.0 mm 的 Yb:YAG板条,端面切角为 45°;再对 Yb:YAG 板条端面镀1030 nm 增透膜、Yb:YAG 大面镀倏逝膜;最后将 Yb:YAG 陶瓷板条大面与铜微通道冷却器焊接在一起以实现高效均匀散热。

3 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大研究

图3为 Yb:YAG 陶瓷板条双程激光放大器示意图。InGaAs 二极管阵列从板条两端进行抽运,抽运光的口径大小为 14.0 mm×2.0 mm;1.18 kW 种子激光两次通过 Yb:YAG 陶瓷板条,种子激光口径大小为 12.5 mm×2.0 mm,入射角分别为 45.0°和 28.8°。图中 $M_1 \sim M_4$ 均为平面反射镜(镀 1030 nm 高反射膜),球透镜 F_1 和 F_2 (镀 1030 nm 增透膜)的焦距均为 340 mm, F_1 、 F_2 与 $M_1 \sim M_3$ 构成像传递系统。抽运光从板条大面入射、在板条端面被反射后沿着板条长度方向近似按照直线传输(在厚度方向的发散角约为 10°),并逐渐被吸收。种子光按照 zig-zag 光路传输,以 45°入射时的光程约为160 mm,以 28.8°入射时的光程约为 170 mm。

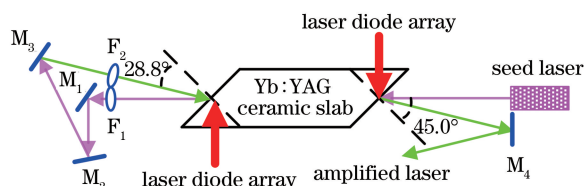


图3 Yb:YAG 陶瓷板条双程激光放大器示意图
Fig. 3 Schematic of double-pass laser amplifier with Yb:YAG ceramic slab

掺杂浓度为1%的 Yb:YAG 对1030 nm 波长透明(即 612 cm^{-1} 和 10327 cm^{-1} 两个子能级的粒子数相等)时,需要吸收的抽运功率密度为 $1.74 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-3}$,再结合 Yb:YAG 陶瓷板条的掺杂浓度和掺杂区的体积,从理论上计算出当 Yb:YAG 陶瓷板条对1030 nm 种子激光透明时需要吸收的抽运光功率为 1.87 kW。实验中测得二极管的抽运耦合效率为 85%,Yb:YAG 陶瓷板条对抽运光的吸收效率约为89%(此时二极管的工作电流较低,抽运光的中心波长约为 932 nm),推算可得二极管总抽运功率达到 2.47 kW 时可使 Yb:YAG 陶瓷板条对 1030 nm 的种子激光变得透明。

图4为实验中的种子光光谱,该种子光光谱有

两个峰,其中一个峰位于 1029.6 nm,另一个峰位于 1031.4 nm,这两个峰相对于 Yb:YAG 荧光光谱的峰值 1030.2 nm 均有一定偏离。

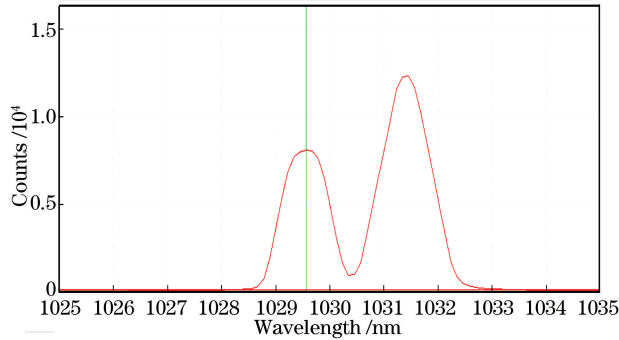


图 4 种子激光光谱

Fig. 4 Spectrum of seed laser

图 5 为 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的输出功率曲线,由图中蓝色虚线可以看出,双程放大器的输出功率为 1.18 kW 时对应的总抽运功率约为 3.06 kW。双程激光放大光路的传输损耗约为 10%,当 Yb:YAG 陶瓷板条对 1030 nm 种子激光正好透明时双程激光放大器的输出功率约为 1.06 kW,而由图 5 可以看出,拟合得到该状态下的总抽运功率约为 2.52 kW,可见 Yb:YAG 陶瓷板条正好透明时需要的总抽运功率的理论计算结果与实验测量结果吻合。

由图 5 可知,总抽运功率为 19.98 kW 时可获得功率为 5.97 kW 的 1030 nm 激光输出,光-光转换效率约为 24.0%,斜率效率约为 27.9%,激光输出功率与抽运功率具有较好的线性关系。

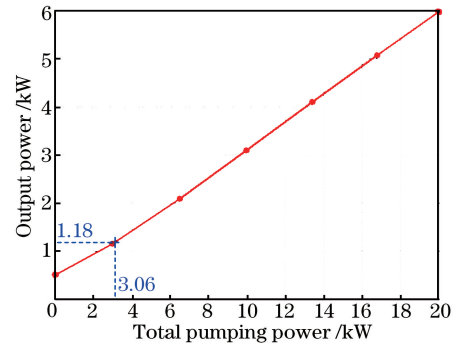


图 5 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的输出功率曲线

Fig. 5 Output power curve of Yb:YAG ceramic slab laser amplifier

通过数值模拟计算 Yb:YAG 陶瓷板条双程放大器的输出功率。用 $I_1(z)$ 和 $I_2(z)$ 分别表示板条中正向和反向传输的激光光强,用 $I_3(z)$ 和 $I_4(z)$ 分别表示板条中正向和反向传输的抽运光强,用 $\alpha(z)$ 和 $g(z)$ 分别表示抽运光的吸收系数和激光的增益系数,激光束在板条内的传输损耗系数 $\delta \approx 0.0028 \text{ cm}^{-1}$,根据激光放大和抽运光吸收规律可得

$$\begin{cases} \frac{dI_1(z)}{I_1(z)dz} = g(z) - \delta, & \frac{dI_2(z)}{I_2(z)dz} = \delta - g(z) \\ \frac{dI_3(z)}{I_3(z)dz} = -\alpha(z), & \frac{dI_4(z)}{I_4(z)dz} = +\alpha(z) \end{cases} \quad (5)$$

(5)式中 $I_1(z)$ 和 $I_2(z)$ 的增益系数以及 $I_3(z)$ 和 $I_4(z)$ 的吸收系数相差一个负号是由传输方向相反导致的。根据 Yb:YAG 准三能级结构推导出的激光增益系数与抽运光吸收系数分别为

$$g = \sigma_e n \left[(f_u^1 + f_l^3) \frac{f_l^1(I_3 + I_4)/I_{sp} + f_l^3(I_1 + I_2)/I_{sl}}{1 + (f_l^1 + f_u^2)(I_3 + I_4)/I_{sp} + (f_l^3 + f_u^1)(I_1 + I_2)/I_{sl}} - f_l^3 \right], \quad (6)$$

$$\alpha = \sigma_a n \left[f_l^1 - (f_l^1 + f_u^2) \frac{f_l^1(I_3 + I_4)/I_{sp} + f_l^3(I_1 + I_2)/I_{sl}}{1 + (f_l^1 + f_u^2)(I_3 + I_4)/I_{sp} + (f_l^3 + f_u^1)(I_1 + I_2)/I_{sl}} \right], \quad (7)$$

式中 σ_e 为受激发射截面, I_{sp} 和 I_{sl} 分别为 Yb:YAG 饱和抽运光强和饱和激光光强, σ_a 与抽运波长有关,抽运功率为 19.98 kW 时抽运光的中心波长约为 936 nm。此时二极管的工作电流尚未达到预期值,因此波长未达到 941 nm。由于二极管与 Yb:YAG 陶瓷板条共用冷却循环水,提高冷却水温度虽然能使抽运光中心波长向 941 nm 方向靠近,但同时也会增加 Yb:YAG 下能级的热粒子数。实验中 Yb:YAG 的工作温度约为 360 K,根据玻尔兹曼因子的定义求得 (6)、(7) 式中的各因子为 $f_u^1 = 0.712$, $f_u^2 = 0.217$, $f_l^1 = 0.810$, $f_l^3 = 0.070$ 。

Yb:YAG 对抽运光的吸收截面和激光的发射截面均与温度有关,已知 Yb:YAG 对 941 nm 抽运光的吸收截面和 1030 nm 激光的发射截面随 Yb:YAG 温度的变化规律分别为^[10,12]

$$\sigma_a(T) = \left[0.207 + 0.637 \exp \left(\frac{-(T - 273)}{288} \right) \right] \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \quad (8)$$

$$\sigma_e(T) = \left[0.953 + 33.608 \exp \left(-\frac{T}{92.8} \right) \right] \times 10^{-20} \text{ cm}^2. \quad (9)$$

在 $T = 360 \text{ K}$ 时,根据 (8)、(9) 式求得 $\sigma_a \approx 6.78 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_e \approx 1.65 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。由于抽运

光中心波长未达到 941 nm,因此其有效吸收截面小于(8)式的计算结果,根据 Yb:YAG 的吸收光谱拟合出 360 K 时 Yb:YAG 对 936 nm 抽运光的吸收截面约为 $5.90 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

Yb:YAG 饱和抽运光强和饱和激光光强的定义分别为

$$I_{sp} = h\nu_p / (\sigma_a \tau), \quad (10)$$

$$I_{sl} = h\nu_l / (\sigma_e \tau), \quad (11)$$

式中 τ 为激光上能级荧光寿命。

根据 (5)~(10) 式,并结合各项实验参数和边界条件,数值模拟了不同抽运耦合效率和不同工作温度下 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的输出功率,如图 6 所示。图 6 中红色圆圈表示实际工作温度 (360 K) 和实际抽运耦合效率为 85% 时理论计算得到的放大器输出功率,计算结果比实验结果大 0.42 kW。理论计算结果大于实验结果的主要原因是理论计算时没有考虑自发辐射放大效应对 Yb:YAG 激光上能级粒子数的消耗;此外,注入的种子光光谱与 Yb:YAG 陶瓷板条的荧光光谱未实现精确匹配(图 4),实际受激发射截面小于理论计算时采用的数据。

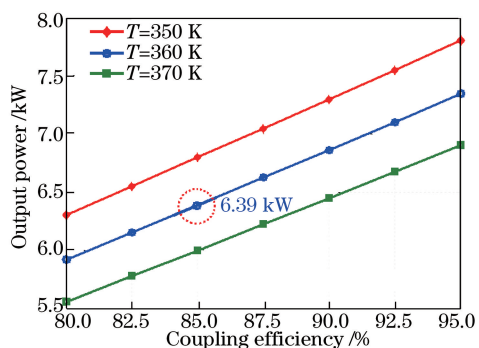


图 6 不同抽运耦合效率和温度下 Yb:YAG 板条放大器的输出功率

Fig. 6 Output power of Yb:YAG slab amplifier at different coupling efficiencies and temperatures

实验测量和理论计算结果均表明板条对抽运光的吸收效率仅为 84%,该结果与两个因素有关:1)激光器的提取效率不高,有较多的粒子残留在上能级;2)Yb:YAG 的吸收截面随着温度的升高而减小,而掺杂浓度是按室温条件设计的,因此 Yb^{3+} 的掺杂浓度偏低。

由于注入种子光的光束质量 M^2 约为 15,测量得到的放大后的激光光束质量并不能很好地反映 Yb:YAG 陶瓷板条工作时光束质量的优劣,因此通过测量 Yb:YAG 陶瓷板条的透射波前来表征光束

质量。图 7 是 632.8 nm 激光作为探测光单次通过 Yb:YAG 陶瓷板条时的透射波前,由图 7 可知,总抽运功率为 19.98 kW 时,板条 12 mm 宽度范围的透射波前畸变的峰谷值(PV)约为 $3.3 \mu\text{m}$ 。

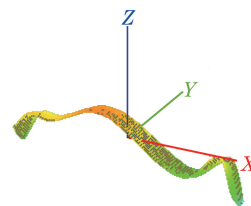


图 7 Yb:YAG 陶瓷板条的透射波前

Fig. 7 Transmission wavefront of Yb:YAG ceramic slab

4 结 论

设计和制作了 Yb:YAG 陶瓷板条,初步开展了室温下的 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器实验研究,获得了 5.97 kW 的高功率输出,光-光转换效率为 24.0%,斜率效率为 27.9%。测量了 Yb:YAG 陶瓷板条的透射波前畸变,开展了 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器输出功率的理论计算,为进一步开展高功率和高效率的 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器研究建立了基础。

基于此次实验结果,下一步将开展以下的工作:通过对抽运耦合系统和冷却器进行优化设计来控制 Yb:YAG 陶瓷板条的透射波前畸变;通过提高二极管的抽运耦合效率和种子激光的注入光强、降低 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的工作温度、优化掺杂设计以及抑制板条内 ASE 效应等技术途径,提高 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的输出功率和光-光转换效率。

参 考 文 献

- [1] Bowman S R. High-power diode-pumped solid-state lasers[J]. Optical Engineering, 2013, 52(2): 021012.
- [2] Sueda K, Takahashi H, Kawato S, et al. High-efficiency laser-diodes-pumped microthickness Yb:Y₃Al₅O₁₂ slab laser[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(15): 151110.
- [3] Ripin D J, Ochoa J R, Aggarwal R L, et al. 165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(18): 2154-2156.
- [4] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [5] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at

- Northrop Grumman[C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- [6] Li M, Hu H, Li J M, *et al.* Technology research on high power slab laser end-pumped with laser diode arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514004.
李密, 胡浩, 李建民, 等. 激光二极管阵列端面抽运高功率板条激光器技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514004.
- [7] Li M, Hu H, Tang C, *et al.* Research on high power slab laser technology with dual-doped concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914004.
李密, 胡浩, 唐淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914004.
- [8] Li M, Hu H, Gao Q S, *et al.* Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003.
李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双掺杂浓度的 Nd:YAG复合陶瓷板条激光器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514003.
- [9] Krupke W F. Ytterbium solid-state lasers: The first decade[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1287-1296.
- [10] Liu Q, Fu X, Gong M L, *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.
- [11] Huang C H, Huang J H, Zhang G, *et al.* A method for accurate calculation of the absorption coefficient of optical materials[J]. Laser Journal, 2001, 22(6): 45-46.
黄呈辉, 黄见洪, 张戈, 等. 一种精确计算光学材料吸收系数的方法[J]. 激光杂志, 2001, 22(6): 45-46.
- [12] Chen B, Dong J, Patel M, *et al.* Modeling of high power solid-state slab lasers[C]. SPIE, 2003, 4968: 1-10.