

掠入射 Nd:YVO₄板条激光放大器的优化设计

唐超¹, 徐霜馥¹, 张翔², 汪勇¹, 刘斌¹, 刘东¹, 项震¹, 叶志斌³, 刘崇¹

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²江苏曙光光电有限责任公司, 江苏 扬州 225009;

³衢州学院电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000

摘要 采用基于半导体可饱和吸收镜的被动调 Q 微晶片激光器, 对三通掠入射 Nd:YVO₄ 板条激光放大器进行了实验研究。理论研究了水平方向模式匹配比和掠入射角对板条激光放大器热致畸变的影响。实验验证了掠入射板条激光放大器水平方向最优模式匹配比为 0.6, 且采用较小的掠入射角可以在保证高增益的同时产生较小的水平方向热致畸变。确定模式匹配比为 0.6 且三通掠入射角分别为 3°、5°、7° 时, 重复频率为 100 kHz、平均功率为 2 mW、光束质量因子 $M^2 = 1.17$ 的种子光源所产生的激光经过掠入射 Nd:YVO₄ 板条三通放大后, 最终获得 12.6 W 的激光输出, 光-光提取效率达到 28%, 脉冲峰值功率为 1.1 MW, 脉冲能量为 126 μJ, $M^2 = 1.4$ 。

关键词 激光器; 三通放大; 半导体抽运; 光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1201003

Optimization Design of Nd:YVO₄ Slab Laser Amplifier with Grazing Incidence

Tang Chao¹, Xu Shuangfu¹, Zhang Xiang², Wang Yong¹, Liu Bin¹, Liu Dong¹,
Xiang Zhen¹, Ye Zhibin³, Liu Chong¹

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²Jiangsu Shuguang Optoelectronics Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

³College of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China

Abstract A experimental study about a triple-pass grazing incidence Nd:YVO₄ slab laser amplifier is carried out based on a semiconductor saturable absorber and passively Q-switched microchip lasers. Influences of the mode matching ratio in horizontal direction and grazing incidence angle on thermal distortion of slab laser amplifier are analyzed theoretically. The experiment verifies that the mode matching ratio of the grazing incident slab laser amplifier in horizontal direction is optimized to be 0.6. Meanwhile, with a small grazing incidence angle, thermal distortion in horizontal direction can be alleviated and high gain can be obtained. When the repetition rate is 100 kHz and the seed source is with an average power of 2 mW and a seed beam quality factor M^2 of 1.17, a laser output of 12.6 W can be obtained after triple-pass amplification of grazing incidence Nd:YVO₄ slab with a mode matching ratio of 0.6 and a triple-pass grazing incident angles of 3°, 5° and 7°, respectively. The optical-optical extraction efficiency reaches 28%. The peak pulse power is 1.4 MW, the pulse energy is 126 μJ, and M^2 is 1.4.

Key words lasers; triple-pass amplification; semiconductor pumping; beam quality

OCIS codes 140.3280; 140.6810; 140.3480

收稿日期: 2017-07-04; **收到修改稿日期:** 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(61575172)、浙江省自然科学基金(LZ15F050001)、中央高校基本科研业务费专项资金、衢州市科技计划(2016Y012)、衢州学院师资队伍专项经费(BSYJ201705)

作者简介: 唐超(1992—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: townchao@163.com

导师简介: 刘崇(1978—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: chongliu78@hotmail.com(通信联系人)

1 引 言

高功率全固态激光器广泛应用于工业微加工领域^[1-2]。采用主振荡功率放大(MOPA)技术可以获得高功率、高光束质量的输出激光^[3-4]。基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动调Q微晶片激光器是常用的低功率种子源^[5-6]。利用光纤放大器可以实现高增益放大,但由于光纤中的光学损伤及非线性效应,其难以获得高功率输出^[7],因此利用多通固体增益介质放大器直接放大低功率的激光种子源是较好的替代技术。侧面抽运掠入射Nd:YVO₄板条激光放大器可以采用高功率抽运实现良好的激光与抽运光模式匹配,是实现低功率种子源高效放大的最佳方案之一^[8]。

近年来,针对增益高、结构简单可靠的掠入射板条放大器的研究日益增多。2009年,Nawata等^[9]报道了一种采用BaTiO₃晶体相位共轭镜对光束质量进行补偿的四通掠入射板条高增益MOPA系统,当重复频率为100 MHz(种子光功率约为200 mW)时,获得了27.9 W的放大激光输出。孙哲等^[10]设计了一种结构紧凑的半导体抽运Nd:YVO₄板条双通放大器,在重复频率为20 kHz时获得了平均功率为6.3 W、脉冲宽度为2.52 ns的激光输出。Yoshino等^[11]报道了三通掠入射板条高光束质量MOPA系统,获得了平均功率为65 W、斜率效率为46%的激光输出,并且分析了不同掠入射角水平方向的波前畸变。对于掠入射侧面抽运板条激光放大器,由于激光的掠入射提取以及采用非对称抽运结构,板条的热致畸变与种子光的尺寸和掠入射角相关。同时,种子光的尺寸和掠入射角还影响激光的提取效率。因此,需要对种子光的尺寸和掠入射角进行优化,以减小板条的热致畸变并提高激光的提取效率。然而,对掠入射Nd:YVO₄板条的热致畸变进行分析时,已有文献中对不同种子光掠入射角都采用了相同的种子光尺寸^[12],导致分析结果不准确。

本文将一种基于SESAM的被动调Q微晶片激光器作为主振荡器、将掠入射板条作为激光放大器的MOPA结构。从水平方向模式匹配比和掠入射角两个方面综合分析了板条的热致畸变。过大的水平方向模式匹配比会造成严重的热致畸变;对于固定的模式匹配比,较小的掠入射角会产生较小的热致畸变。通过模拟分析和对比实验确定了最优模式匹配比和掠入射角,优化设计了基于掠入射侧面抽运Nd:YVO₄板条结构的三通放大实验。当抽运功率为45 W时,采用平均功率为2 mW的种子光,经过掠入射Nd:YVO₄板条三通放大,获得了平均功率为12.6 W、峰值功率约为1.1 MW、单脉冲能量约为126 μJ、光束质量因子M²=1.4的激光输出。

2 热致畸变分析

掠入射Nd:YVO₄板条结构示意图如图1所示。坐标原点O位于板条的中心位置,x为板条宽度方向(宽度为w),y为板条厚度方向(厚度为h),z为板条长度方向(长度为d)。抽运面为前侧面(面积为d×h)。板条为沿c轴切割的Nd:YVO₄晶体,掺杂浓度为1%(原子数分数),尺寸(d×w×h)为20 mm×

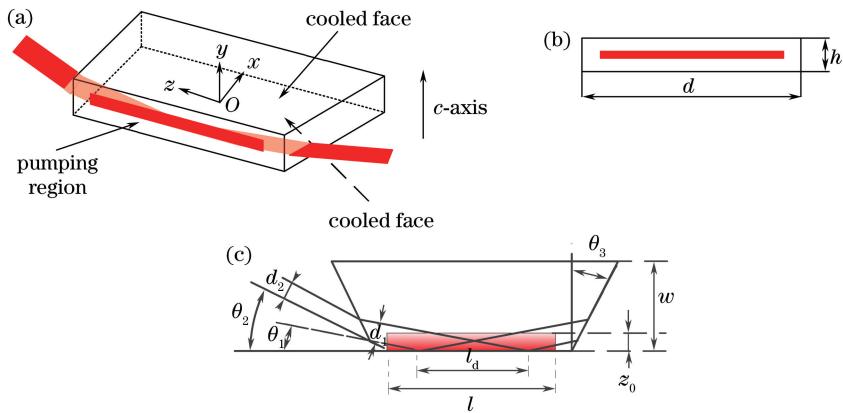


图1 Nd:YVO₄板条激光和抽运光几何参数。(a)板条结构示意图;(b) yOz面上抽运区域;
(c) xOz面上种子光在抽运面发生全反射

Fig. 1 Geometric parameters of Nd:YVO₄ slab laser and pump laser. (a) Structural diagram of slab;
(b) pumping region in yOz-side; (c) total reflection of seed light at pumping surface in xOz-side

5 mm×0.8 mm。将板条上下两个端面与热沉接触以进行散热,为了保证良好的接触传导,板条与热沉之间采用液态金属作为热传导材料。

为了研究板条的热致畸变,需要计算板条的温度分布,分析由温度变化导致的折射率改变对激光的影响。掠入射板条放大器采用线型巴条侧面抽运,对于各向异性 Nd:YVO₄ 晶体,板条的稳态热传导方程可以表示为^[13]

$$K_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

式中 $T(x, y, z)$ 为温度; $K_x = K_z = 5.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 分别为晶体沿 x 轴和 z 轴方向的热传导系数, $K_y = 5.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为晶体沿 y 轴方向的热传导系数; $Q(x, y, z) = \eta \alpha P_p \exp[-2(x^4/\omega_x^4 + y^2/\omega_y^2)] \exp[-\alpha \times (x + \omega/2)]/A_0$, 其中 η 为抽运光热转换效率, P_p 为抽运功率, ω_x 和 ω_y 分别为抽运光在水平、垂直方向上的光束半径, A_0 为归一化超高斯分布光斑面积, α 为有效吸收系数。

板条上下两个大面与热沉相接触冷却,侧面通过空气对流散热,其热分布边界条件可以表示为

$$\begin{cases} K_z \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z = \pm \omega/2} = H_a [T(x = \pm \omega/2, y, z) - T_a] \\ K_x \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} \Big|_{x = \pm d/2} = H_a [T(x, y, z = \pm d/2) - T_a] \\ T(x, y = \pm h/2, z) = T_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 H_a 为晶体两个端面的空气热对流系数; T_a 为空气温度; T_0 为晶体与热沉接触面的温度,这里考虑为理想散热情况(T_0 为水温)。基于上述热传导方程和边界条件,采用有限元软件 ANSYS 计算板条的温度分布。

种子光以掠入射方式通过板条,放大光路的具体参数如图 1(c)所示^[14]。分析时忽略种子光在板条内传播时的光束发散特性。种子光在板条外的横向宽度为 d_2 ,种子光外部入射角为 θ_2 ,板条的切割楔角为 θ_3 。种子光从左端通光面折射进入板条,板条内种子光的掠入射角为 θ_1 ,种子光在板条抽运面上的投影宽度为 l_d ,抽运光的宽度为 l 。空气折射率 $n_2 = 1$ 。种子光偏振方向平行于 c 轴(e 光),对应的晶体折射率 $n_1 = 2.165$ 。板条对 808 nm 抽运光的有效吸收系数 $\alpha_p \approx 24 \text{ cm}^{-1}$ 。由图 1 可得^[13]:

$$\begin{cases} n_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) = n_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \frac{d_1}{\sin(90^\circ - \theta_3 - \theta_1)} = \frac{d_2}{\sin(90^\circ - \theta_3 - \theta_2)}, \\ d_1 = l_d \sin \theta_1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 d_1 为种子光在晶体内部的横向直径。根据光路模型,种子光横向直径 d_1 、掠入射角 θ_1 、种子光在抽运面的横向投射宽度 l_d 及抽运光宽度 l 相互关联,不同的模式匹配比 l_d/l 及不同的种子光掠入射角需要采用与之匹配的种子光横向直径。

由(3)式计算得到不同掠入射角及不同模式匹配比下的激光在晶体内部的横向直径 d_1 和激光在板条外的横向直径 d_2 ,如表 1 所示。

表 1 不同掠入射角、不同模式匹配比下的激光尺寸

Table 1 Laser sizes with different grazing angles and different mode matching ratios

Grazing angle / (°)	$d_1(d_2)$ / mm		
	$l_d/l=0.4$	$l_d/l=0.6$	$l_d/l=0.8$
3	0.34(0.28)	0.50(0.42)	0.67(0.56)
4	0.45(0.36)	0.67(0.54)	0.89(0.72)
5	0.56(0.44)	0.84(0.65)	1.12(0.87)
6	0.67(0.50)	1.00(0.75)	1.34(1.00)
7	0.78(0.56)	1.17(0.84)	1.56(1.12)

掠入射侧面抽运板条结构在水平方向的热致畸变较严重^[15],因此在水平方向需要选取合适的种子光与抽运光模式匹配比,以避免过大的模式匹配比造成放大激光的光束质量退化,同时需要避免过小的横向模式匹配比造成种子光的提取效率降低。当模式匹配比固定时,不同掠入射角对热致畸变的影响也不同。因此

需要从水平方向模式匹配和掠入射角两个方面对板条的热致畸变进行分析。

激光以图 1 所示的掠入射方式通过晶体,在水平方向沿着光路对热致折射率 n 的变化进行积分,获得水平方向的光程差为

$$D_{\text{OP-S}}(S) = \frac{dn}{dT} \int_S \Delta T(x, y, z) dS, \quad (4)$$

式中 S 为光传播的几何路程。对(4)式进行多项式拟合,得到

$$\begin{cases} D_{\text{OP-S}}(j) = p(0) + p_1 j + p_2 j^2 + \dots + p_n j^n \dots \\ \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} D_{\text{OP-S}}(j) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 dn/dT 为 Nd:YVO₄ 晶体的折射率温度系数, $\Delta T(x, y, z)$ 为 Nd:YVO₄ 晶体的温升, $p(0)$ 为中心光束的光程, p_1 为线性分量系数, p_2 为二次项分量系数,高阶项 p_n 表示不同的相差项。 $p(0)$ 、 p_1 、 p_2 都与波前畸变无关,将(5)式中与波前畸变无关的项去掉,便可以得到热致光程差改变引起的波前畸变。

基于上述讨论,针对不同模式匹配比和不同掠入射角分析掠入射侧面抽运 Nd:YVO₄ 板条的热致畸变。设定水平与垂直方向的抽运光斑大小为 16 mm×0.2 mm,抽运功率为 45 W,板条热生成率为 0.3。以掠入射角为 3°为例,图 2 为模式匹配比为 1.0 时,根据(2)、(3)式计算得到的激光通过 Nd:YVO₄ 晶体后在水平方向的相位分布以及二项式拟合结果。图 3 为不同模式匹配比时各掠入射角引起的热致畸变。

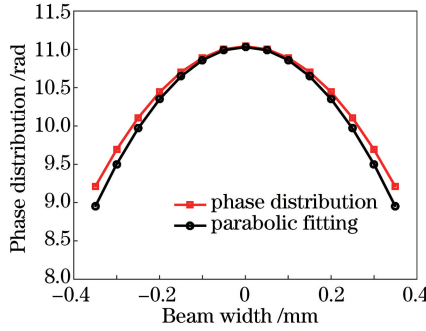


图 2 掠入射角为 3°、模式匹配比为 1.0 时,激光通过 Nd:YVO₄ 晶体后在水平方向上的相位分布及拟合结果

Fig. 2 Phase distribution and fitting result of laser in horizontal direction after passing through the Nd:YVO₄ crystal with grazing incidence angle of 3° and mode matching ratio of 1.0

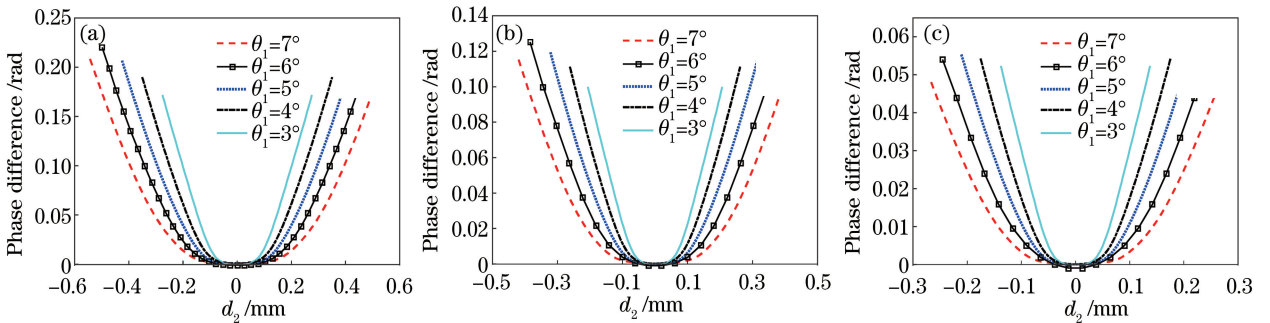


图 3 不同模式匹配比时,各掠入射角引起的热致畸变。(a) $l_d/l=0.8$; (b) $l_d/l=0.6$; (c) $l_d/l=0.4$

Fig. 3 Thermal distortion caused by various grazing incidence angles with different l_d/l .

(a) $l_d/l=0.8$; (b) $l_d/l=0.6$; (c) $l_d/l=0.4$

从图 3 可以看到,当模式匹配比为 0.8 时,掠入射角为 3°引起的热致畸变最小,最大相位差仅为 0.17 rad;掠入射角为 6°引起的热致畸变最大,最大相位差达到 0.22 rad。模式匹配比减小时,热致畸变也减小。当模式匹配比为 0.4 时,热致畸变非常小,掠入射角的变化对热致畸变的影响不明显。

之前关于不同掠入射角水平方向热致畸变的研究中,不同掠入射角都采用了相同的种子光横向宽度 d_2 ,经过分析得出掠入射角越大,水平方向热致畸变越小^[11-12]。然而,对于固定的种子光横向宽度 d_2 ,当掠

入射角增大时,种子光在抽运面的横向投射宽度 l_d 在减小,即水平方向模式匹配比减小,不再是保持不变的量。在这种情况下,热致畸变减小的真正原因并非是掠入射角的增大,而是水平方向模式匹配比的减小。

由图 3 可以得到,水平方向模式匹配比为 0.8 时会产生严重的热致畸变。减小水平方向模式匹配比,可以减小热致畸变。但是,随着水平方向模式匹配比的减小,种子光的提取效率不断下降。对于水平方向模式匹配比分别为 0.8,0.6,0.4 这 3 种情况,有如下结论:模式匹配比为 0.4 时,热致畸变最小,但种子光提取效率最低;模式匹配比为 0.8 时,种子光的提取效率最高,但热致畸变最大;因此可以预测水平方向模式匹配比取 0.6 较为适宜,此时热致畸变较小,种子光的提取效率较高。

对于固定的模式匹配比,不同掠入射角的种子光小信号增益 $g(\theta)$ 可以表示为^[16]

$$g(\theta) = \frac{2\alpha_0 z_0}{\sin \theta} \left[1 - \exp\left(\frac{-d \tan \theta}{2z_0}\right) \right], \quad (6)$$

式中 α_0 为抽运面的增益系数, $z_0 = 1/\alpha_p$ 为抽运光的吸收深度。

由(6)式计算不同掠入射角对增益的影响,结果如图 4 所示,激光的增益随掠入射角的增大而减小。因此过大的掠入射角不利于激光的提取,采用较小的掠入射角可以获得更高的增益。

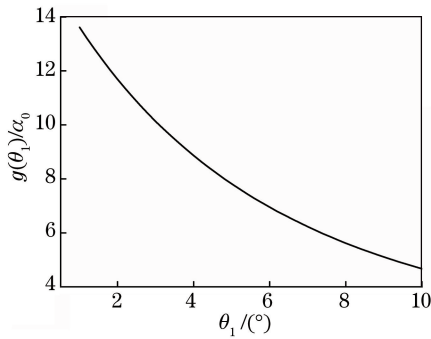


图 4 种子光增益与掠入射角的关系

Fig. 4 Relationship between seed light gain and grazing incidence angle

通过上述分析,选择合适的水平方向模式匹配比以及较小的掠入射角,理论上可以减小板条放大器的热致畸变。下文中,将从实验上对不同模式匹配比及不同掠入射角的三通掠入射板条结构放大器进行研究。

3 实验装置

掠入射 Nd:YVO₄ 板条结构三通放大结构图如图 5 所示。种子源为脉冲宽度为 90 ps、脉冲重复频率为 100 kHz、 $M^2 = 1.17$ 的低功率微晶片皮秒激光器。图 5 中,SL1(焦距 $f_{SL1} = 1000$ mm)、SL2(焦距 $f_{SL2} = 175$ mm)和 SL3(焦距 $f_{SL3} = 175$ mm)为球面透镜;HWP1 为 808 nm 的半波片,HWP2 和 HWP3 为 1064 nm 半波片,FR 为法拉第旋光器,PBS 为偏振分光片,HWP2、PBS、FR 与 HWP3 构成隔离器,防止返回的激光损伤种子源;HCL1(焦距 $f_{HCL1} = 500$ mm)为水平方向柱透镜,实验中通过改变 HCL1 的焦距及位置来实现对种子光横向直径的改变;VCL1(焦距 $f_{VCL1} = 40$ mm)和 VCL2(焦距 $f_{VCL2} = 200$ mm)为垂直方向

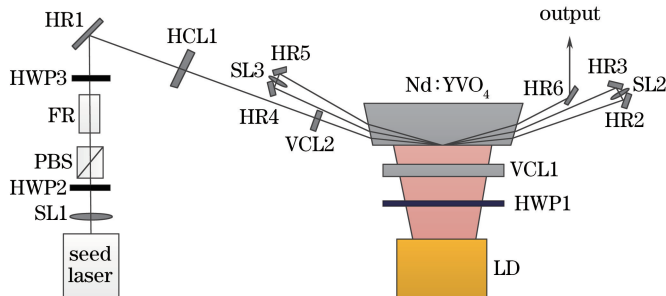


图 5 掠入射 Nd:YVO₄ 板条三通放大装置图

Fig. 5 Setup diagram of grazing incidence Nd:YVO₄ slab triple-pass amplifier

柱透镜。这里利用一个圆透镜和两个全反镜构成 $4f$ 系统,可以将透镜一侧两倍焦距处的物体等比例成实像于透镜另一端的两倍焦距处。激光通过板条后,利用 $4f$ 系统将其重新耦合进入板条并进行再次放大。在实验中,为了防止脉冲激光对光学元件造成损伤,高反射镜 HR2 和 HR3 上的光斑大小为 $1.2\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$,HR4 和 HR5 上的光斑大小为 $1.5\text{ mm} \times 10.2\text{ mm}$,HR6 上的光斑大小为 $1.5\text{ mm} \times 10.4\text{ mm}$ 。

板条上两个 $5\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 的通光面都镀有 1064 nm 的增透膜,并且端面切 13° 楔角形成梯形结构以抑制自激振荡。抽运侧面($20\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$)镀有 808 nm 增透膜,对后表面($22\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$)进行打毛处理以抑制寄生振荡。

抽运源为总输出功率为 45 W 的 808 nm 的二极管巴条,输出激光为横电偏振,采用 808 nm 半波片将其偏振方向旋转 90° ,得到横模偏振,使偏振态与 c 轴平行,以提高板条对其吸收系数。

4 实验结果与分析

4.1 水平方向不同模式匹配比放大

激光以掠入射方式通入板条并被放大,相比于单通放大,多通放大后激光功率的放大效果和热致畸变对激光波前的影响都比较明显,易于进行实验对比分析。事实上,相同条件下,采用单通放大也可得到同样的实验结果,然而单通放大后激光功率的放大效果对比不明显,光束质量的变化更不明显,不利于进行实验对比分析。因此实验针对三通掠入射板条结构放大器进行研究。实验第一通选择 3° 作为掠入射角,第二通、第三通掠入射角分别为 5° 和 7° 。对应的外入射角度分别为 23.6° 、 29.0° 和 34.8° 。设定水平与垂直方向抽运光斑的直径分别为 16 mm 和 0.2 mm ,将水平方向模式匹配比分别设置为 $0.8, 0.6, 0.4$,此时对应的板条外种子光横向直径 d_2 分别为 $0.56, 0.42, 0.28\text{ mm}$,种子光垂直方向的光斑直径为 0.16 mm 。为了抑制放大自发辐射(ASE)和自激振荡,板条垂直方向采用较大的抽运光斑以控制抽运功率密度。在实验中采用焦距为 40 mm 的柱透镜对抽运光进行上下聚焦,获得了 c 轴方向上约 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的增益区域。图 6 为种子光功率为 2 mW 、水平方向模式匹配比分别为 $0.4, 0.6, 0.8$ 情况下的三通放大输出功率。

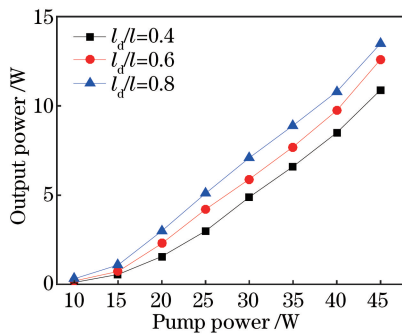


图 6 不同模式匹配比下的三通放大输出功率

Fig. 6 Output power after triple-pass amplification with different mode matching ratios

在种子光功率为 2 mW 、抽运功率为 45 W 的条件下,模式匹配比分别为 $0.4, 0.6, 0.8$ 时获得的放大激光功率分别为 $10.9, 12.6, 13.5\text{ W}$,对应的光-光提取效率分别为 $24.2\%, 28.0\%$ 和 30.0% 。

图 7 为模式匹配比分别为 $0.8, 0.6, 0.4$ 时,放大激光的光束质量因子及远场光斑分布。由图可见,当 $l_d/l=0.8$ 时,虽然种子光的提取效率较高,但是放大激光在水平方向上的光束质量因子 M_x^2 明显退化。在 $l_d/l=0.4$ 时,放大激光的光束质量最好,但此时种子光的提取效率最低,过小的 l_d/l 不利于激光的提取。因此, $l_d/l=0.6$ 是比较好的选择,此时种子光的提取效率较高,同时板条热致畸变对激光波前的影响较小。

4.2 不同掠入射角放大

选择 $l_d/l=0.6$,第一通掠入射角分别为 $3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 和 6° ,对应的 d_2 分别为 $0.42, 0.54, 0.65, 0.75\text{ mm}$ 。为了抑制 ASE 并方便光路调整,第二通、第三通掠入射角依次比第一通掠入射角大 2° 。因此,确定第一通掠入射角后,第二通和第三通掠入射角也随之确定。

图 8 为在种子光功率为 2 mW 、抽运功率为 45 W 的条件下,水平方向 $l_d/l=0.6$ 时第一通掠入射角分别

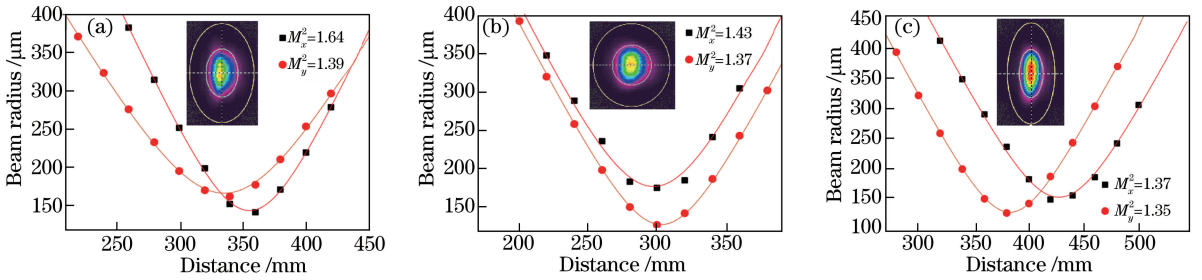


图 7 不同模式匹配比时放大激光的光束质量因子及远场光斑分布。(a) $l_d/l=0.8$; (b) $l_d/l=0.6$; (c) $l_d/l=0.4$
 Fig. 7 Beam quality factors and far-field facula distributions of amplified laser with different mode matching ratios.

(a) $l_d/l=0.8$; (b) $l_d/l=0.6$; (c) $l_d/l=0.4$

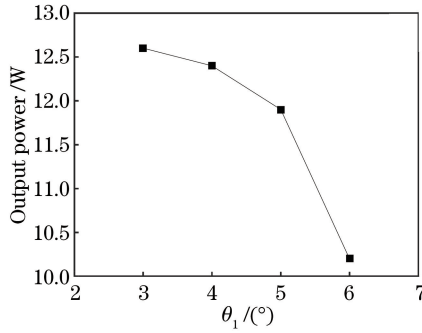


图 8 不同掠入射角下的三通放大输出功率

Fig. 8 Output power after triple-pass amplification with different grazing incidence angles

为 3° 、 4° 、 5° 和 6° 情况下的三通放大输出功率。

图 9 为模式匹配比 0.6、第一通掠入射角分别为 3° 、 4° 、 5° 、 6° 时,放大激光的光束质量因子及远场光斑分布。

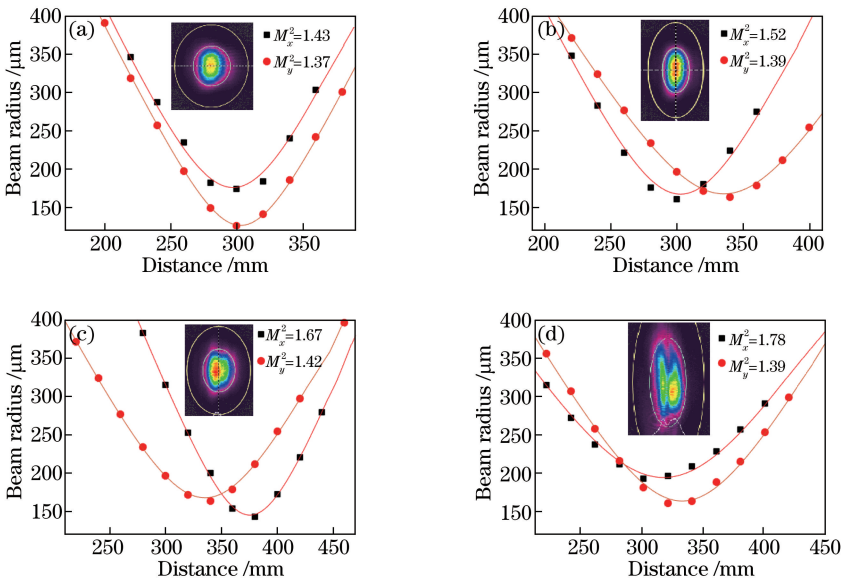


图 9 不同掠入射角时放大激光的光束质量因子及远场光斑分布。(a) $\theta_1=3^\circ$; (b) $\theta_1=4^\circ$; (c) $\theta_1=5^\circ$; (d) $\theta_1=6^\circ$

Fig. 9 Beam quality factors and far-field facula distributions of amplified laser with different grazing incidence angles.

(a) $\theta_1=3^\circ$; (b) $\theta_1=4^\circ$; (c) $\theta_1=5^\circ$; (d) $\theta_1=6^\circ$

可以发现,当掠入射角从 3° 变化到 6° 时,水平方向上的光束质量因子不断退化。验证了理论上掠入射角从 3° 变化到 6° 时水平方向热致畸变不断增大的结论。因此,采用较小的掠入射角可以产生较小的水平方向热致畸变。

通过对比实验可以看到,在水平方向种子光与抽运光模式匹配比为 0.6 的条件下,板条三通掠入射角分

别为 3° 、 5° 和 7° 时,放大激光的输出功率为 12.6 W(单通放大后的放大激光功率为 5.4 W,双通放大后的放大激光功率为 9.8 W),光束质量因子 $M_x^2 = 1.43$, $M_y^2 = 1.37$,激光的提取效率较高,同时热致畸变对激光波前的影响较小。实验结果与模拟分析的结论相符合,说明掠入射板条激光放大器采用合适的水平方向模式匹配比和较小的掠入射角时,可以减小热致畸变对激光波前的影响,板条放大器保证了较高的光-光提取效率和较好的光束质量。实验分析结果对于设计掠入射 Nd:YVO₄板条结构激光放大器具有很好的指导意义。

5 结 论

报道了一种高效的三通掠入射 Nd:YVO₄板条激光放大器。理论上研究了水平方向不同模式匹配比、不同掠入射角对热致畸变的影响,结合实验研究确定了最优的水平方向模式匹配比为 0.6,三通掠入射角分别为 3° 、 5° 、 7° 。种子源为基于 SESAM 的被动调 Q 微晶片激光器,在重复频率为 100 kHz 时获得平均功率为 2 mW、 $M^2 = 1.17$ 的基模种子激光。基于上述模式匹配比及掠入射角,在经过三通放大后,可获得平均功率约为 12.6 W、单脉冲能量为 126 μ J 的激光输出,光-光提取效率达到 28%, $M^2 = 1.4$ 。

参 考 文 献

- [1] Muhammad N, Whitehead D, Boor A, *et al.* Picosecond laser micromachining of nitinol and platinum-iridium alloy for coronary stent applications[J]. Applied Physics A, 2012, 106(3): 607-617.
- [2] Baird B W. Picosecond laser processing of semiconductor and thin film devices[C]. SPIE, 2010, 7580: 75800Q.
- [3] Dupriez P, Piper A, Malinowski A, *et al.* High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. Photonics Technology Letters, 2006, 18(9): 1013-1015.
- [4] Stolzenburg C, Giesen A. Picosecond regenerative Yb:YAG thin disk amplifier at 200 kHz repetition rate and 62 W output power[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2007: MA6.
- [5] Wushouer X, Yan P, Yu H, *et al.* High peak power picosecond hybrid fiber and solid-state amplifier system[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(9): 643-649.
- [6] Zayhowski J J. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 303/304: 393-400.
- [7] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [8] Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan, *et al.* Recent advances in high-power solid-state slab lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 33-36.
张玲玲, 孟俊清, 黄燕, 等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 33-36.
- [9] Nawata K, Okida M, Furuki K, *et al.* Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20816-20823.
- [10] Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, *et al.* Compact side pumped double pass Nd:YVO₄ slab laser amplifier[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(11): 2111-2115.
孙哲, 陈欣, 姜梦华, 等. 半导体泵浦双通 Nd:YVO₄板条激光放大器[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(11): 2111-2115.
- [11] Yoshino T, Seki H, Tokizane Y, *et al.* Efficient high-quality picosecond Nd:YVO₄ bounce laser system[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(4): 894-897.
- [12] Wang Wanyi, Lei Hong, Guo Meng, *et al.* Thermal effect study of grazing-incidence amplifier chain[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 051009.
王万祎, 雷甸, 郭猛, 等. 掠入射板条放大器链的热效应模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 051009.
- [13] Shen Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigang, *et al.* Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd:YVO₄ slab geometry[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1101004.
沈利洋, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射 Nd:YVO₄板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101004.
- [14] Wang C H, Shen L F, Zhao Z L, *et al.* 95-ps all-solid-state laser with a low-power microchip laser seed and a two-stage single-pass bounce geometry amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(5): 884-890.
- [15] Abe M, Seki H, Kowa M, *et al.* High average power, diffraction-limited picosecond output from a sapphire face-cooled Nd:YVO₄ slab amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(4): 714-718.
- [16] Teppitaksak A, Thomas G M, Damzen M J. Investigation of a versatile pulsed laser source based on a diode seed and ultra-high gain bounce geometry amplifiers[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12328-12336.