

高增益掠入射板条激光放大器的实验研究

徐霜馥¹, 唐超¹, 汪勇¹, 郑峰¹, 项震¹, 刘东¹, 张翔², 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 为了替代主控振荡功率放大结构中的多级光纤预放结构, 对小信号高增益的掠入射板条放大器进行了模拟和实验研究。利用板条内线性温度梯度引起的轴棱镜结构, 测量了板条晶体的热转换系数。结果表明: 0.1 mW 和 1 W 种子光提取时, 热转换系数分别为 0.37 和 0.28; 抽运光功率为 55 W 时, 两种情况下板条最大温升相差 16 K; 小信号提取时, 板条晶体内的温升是制约增益提高的主要因素; 采用 0.1 mW 种子光注入且抽运光功率为 50 W 时, 可获得 1.8 W 的激光输出, 增益高达 43 dB, 水平方向光束质量因子 $M_x^2 = 1.30$, 垂直方向光束质量因子 $M_y^2 = 1.28$ 。

关键词 激光光学; 板条放大器; 小信号; 高增益; 热转换系数; 热效应

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101008

Experimental Study of Grazing Incidence Slab Laser Amplifier with High Gain

Xu Shuangfu¹, Tang Chao¹, Wang Yong¹, Zheng Feng¹, Xiang Zhen¹, Liu Dong¹,
Zhang Xiang², 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 In order to replace multi-stage fiber pre-amplification structure in a master oscillator power amplification structure, a grazing incidence slab laser amplifier with small signal and high gain is simulated and studied experimentally. The thermal conversion coefficient of the slab crystal is measured by an axicon structure caused by the linear temperature gradient in the slab. The results show that the thermal conversion coefficient are 0.37 and 0.28 for 0.1 mW and 1 W seed laser extraction, respectively. When the pump light power is 55 W, the maximum temperature rise difference of the slab between two cases is 16 K. Under small signal extraction, the temperature rise in the slab crystal becomes the main constraint on the gain increasing. The laser output power of 1.8 W is obtained when the power of seed laser is 0.1 mW and the pump light power is 50 W. The gain is as high as 43 dB, the horizontal beam quality factor M_x^2 is 1.30 and the vertical beam quality factor M_y^2 is 1.28.

Key words laser optics; slab amplifier; small signal; high gain; thermal conversion coefficient; thermal effect

OCIS codes 140.3280; 140.3430; 140.3480; 140.3580

1 引 言

激光二极管(LD)抽运固体激光器具有结构紧凑、性能稳定、寿命长、成本低等优点,在材料加工、

医疗、科学研究、军事等领域有着广泛应用^[1-2]。主控振荡功率放大(MOPA)结构是获得高功率、高光束质量激光输出的常用方法,种子源功率一般在毫瓦量级,需要采用多级光纤预放大^[3]将激光功率提

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-09-19

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(BSYJ201705)

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

升至瓦量级,再将激光通入侧面抽运或者端面抽运结构中进行放大。然而,多级光纤预放系统结构复杂,且受限于光纤中的非线性效应以及光纤自身的损伤^[4],难以获得高峰值功率的脉冲输出。

近年来,基于板条放大装置直接放大低功率种子光源的技术在国际上引起了广泛的关注。Sridharan 等^[5]设计了一种 zig-zag 结构的端面抽运 Nd:YAG 板条放大器,单通增益 $[G = 10 \lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})]$,其中 P_{out} 和 P_{in} 分别为输出、输入功率]为 13 dB,四通增益为 35 dB。Shoup 等^[6]报道了一种 zig-zag 结构的 Nd:glass 板条放大器,单通增益为 35 dB。Bernard 等^[7]设计了一种掠入射结构的 Nd:YVO₄ 板条放大器,单通增益为 30 dB。因此,采用板条对小信号种子光进行预放也能获得较高的增益,然而在小信号种子光入射时,由于提取效率较低,与大信号光提取时相比,热转换系数大幅提高。而以往的热分析^[8-9]大都未考虑这一点,在分析小信号提取时也采用大信号提取情况下的热转换系数或者随意取值,这必然导致研究结果不准确。

本文报道了一种高增益掠入射板条结构的激光放大器,研究了板条内的温度梯度,获得了一种测量热转换系数的新方法。在 0.1 mW 和 1 W 种子光提取情况下,分别对板条晶体的热转换系数和最高温升进行测量。随着抽运功率的增加,0.1 mW 小信号提取时,板条的温升远大于 1 W 大信号提取时的温升,导致小信号提取时增益相对降低,且放大自发辐射(ASE)与种子光的竞争限制了放大器输出功率的提高。在抽运功率为 50 W 时,0.1 mW 的种子光单通放大得到了 1.8 W 的激光输出,增益为 43 dB,水平方向光束质量因子 $M_x^2 = 1.30$,垂直方向光束质量因子 $M_y^2 = 1.28$ 。

2 实验装置

侧面抽运掠入射 Nd:YVO₄ 板条结构示意图如图 1 所示。坐标原点位于板条抽运面中心位置, x 为板条长度方向(长度为 d), y 为板条厚度方向(厚度为 h), z 为板条宽度方向(宽度为 w)。Nd:YVO₄ 板条晶体的尺寸为 20 mm × 5 mm × 0.8 mm,沿 a 轴切割,掺杂浓度(原子数分数)为 1%。板条前表面(20 mm × 0.8 mm)镀 808 nm 的增透膜,后表面(22 mm × 0.8 mm)镀 808 nm 的全反膜,两个通光端面(5 mm × 0.8 mm)镀 1064 nm 的增透膜,斜切 26° 的楔角以抑制自激振荡。抽运面为板条前表面,抽运光沿 z 轴正方向入射。板条

中的热通过与晶体上下两个大面相接触的紫铜热沉带走,为了改善导热条件,热沉与晶体之间放置液态金属^[10]并将其作为导热材料。4 个侧面与空气接触,通过空气对流散热。

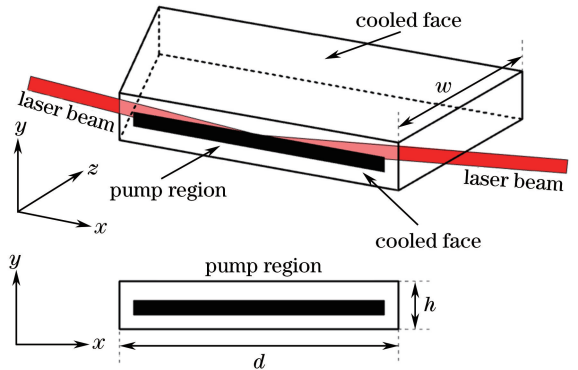


图 1 掠入射侧面抽运 Nd:YVO₄ 板条结构示意图
Fig. 1 Schematic of Nd:YVO₄ slab structure with grazing incident and side pumping

图 2 为 Nd:YVO₄ 板条结构单通放大装置图。种子光源输出的种子光的光束质量因子 $M^2 = 1.2$,经焦距为 500 mm 的球面透镜(SL)聚焦和全反镜(HR)折转光路后,进入由 1064 nm 半波片 HWP 1、偏振分光片(PBS)和法拉第旋光器(FR)组成的光学隔离器,通过调节 HWP 1 可以改变种子光功率。将光学隔离后的种子光通过 1064 nm 的半波片 HWP 2,其偏振方向平行于板条 c 轴,经过焦距为 500 mm 的水平方向柱透镜 HCL 1 和焦距为 200 mm 的竖直方向柱透镜 VCL 1 的整形,其光斑束腰(大小为 0.65 mm × 0.12 mm)恰好掠入射到板条前表面,在前表面反射后从放大器中输出,从而实现单通放大。

抽运源为 808 nm 的二极管巴条,最大输出功率为 55 W,采用 808 nm 半波片 HWP 3 将抽运光的偏振方向旋转 90°,使其呈横磁偏振并使偏振态与 c 轴平行,以提高板条对抽运光的吸收系数,同时通过焦距为 40 mm 的竖直方向柱透镜 VCL 2 将抽运光束腰聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体的前表面中心,光斑束腰尺寸为 16 mm × 0.12 mm。种子光的掠入射角度和填充因子(种子光束腰尺寸与抽运光束腰尺寸的比值)对输出激光性能的影响很大。实验中,选取种子光掠入射角度为 5°^[10],此时水平方向填充因子为 0.6,在这个角度下不仅能保证较高的增益,而且减小了激光边缘的畸变效应^[11],从而可控制激光在水平方向上的畸变。竖直方向的填充因子为 1.0 时,能提取更多的抽运功率,并减少热沉积。

探测光源为波长为 632 nm 的氦-氖(He-Ne)激

光,激光器出口处的激光光束半径约为 0.3 mm,远场发散角为 1.13 mrad。激光经非球面透镜(AL)的

准直后,掠入射到板条前表面,经前表面的反射后出射。

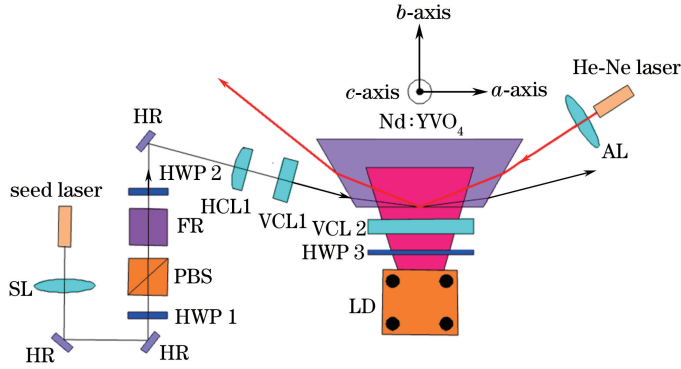


图 2 Nd:YVO₄板条结构单通放大装置图

Fig. 2 Setup of single-pass amplification with Nd:YVO₄ slab structure

3 热转换系数测量

在热分析中,一个非常重要的参数就是热转换系数 ξ ^[12],即板条内热功率与板条吸收抽运功率的比值。Nd:YVO₄的热转换系数可以通过非稳腔法^[13-14]和二次谐波法^[15]等方法测量,这些方法测得晶体掺杂浓度为1%,2%和3%时,热转换系数范围分别为0.24~0.26,0.32~0.33和0.43~0.48,这些值都是在抽运功率提取效率很高的情况下测量获得的,当抽运光的提取效率较低时,热转换系数必然会提高。对于不同的增益介质晶体以及不同的放大结构,热转换系数是不同的,但是实际上,在侧面抽运的Nd:YVO₄板条结构中,通常将热转换系数取为定值(约0.3)进行分析,而不考虑激光的提取状态,这样分析有一定的局限性^[8-9]。为了对不同提取情况下的热转换系数进行分析,实验中在0.1 mW和1 W种子光提取时分别测量热转换系数 ξ 。

板条结构通过上下两个大面散热,板条顶面和底面的温度固定,冷却水温为291 K。实验中将竖直方向抽运光斑直径聚焦为120 μm ,在板条厚度方向,抽运以及由于抽运吸收而产生的热,主要发生在晶体中心附近约0.1 mm范围内,如图1所示。板条晶体抽运面沿厚度方向上的温度分布,在未抽运区域呈线性,引起折射率的线性变化,形成轴棱镜结构^[16],在抽运中心线附近区域呈抛物线,引入折射率分布中的二次项,形成热透镜^[17]。当一束准直的He-Ne激光通过板条晶体时,由于光束尺寸比板条厚度方向抽运尺寸大得多,只有轴棱镜部分的影响比较明显,He-Ne激光将分裂成两部分^[18],轴棱镜引起的探测光分裂如图3所示,其中 φ 为轴棱镜的

楔角。此外,抽运面的形变也会引起He-Ne激光分裂,但是抽运面形变带来的He-Ne激光分裂角度仅占总分裂角度的16%左右^[17],因此这里未对抽运面形变的影响进行深入研究。

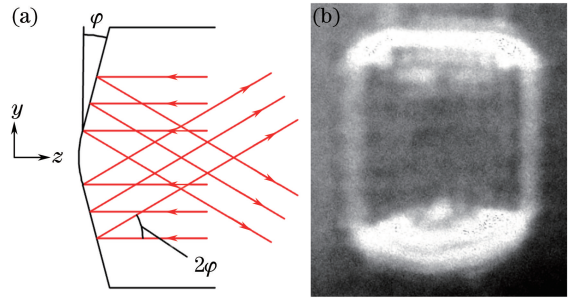


图 3 轴棱镜引起的探测光分裂。(a)原理图; (b)分裂后的光斑分布

Fig. 3 Probe beam splitting caused by axicon. (a) Principle diagram; (b) light spot distribution after splitting

用板条的轴棱镜部分,可以很方便地测量热转换系数,McInnes等^[17]在zig-zag结构Nd:YAG板条振荡器中完成了热转换系数的测量。假设抽运中心线附近区域所有的热量均匀沉积,结合如图4所示的掠入射光路图,并根据积分关系可以得到板条抽运面的最大温升和轴棱镜楔角^[19]。

板条抽运面最大温升为^[19]

$$\Delta T = \frac{P\xi h}{4ZLk}, \quad (1)$$

式中 P 为抽运功率, Z 为晶体宽度方向上的热源深度, L 为光束在板条抽运区域内传播的距离, k 为导热系数。轴棱镜楔角为^[19]

$$\varphi = \frac{\kappa Z \Delta T}{h}, \quad (2)$$

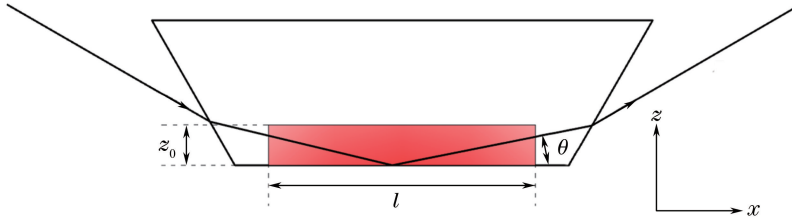


图 4 掠入射光路

Fig. 4 Grazing incidence optical path

式中 κ 为热膨胀系数。考虑到掠入射 Nd:YVO₄ 板条结构对抽运能量的高吸收,因此将 Z 取为抽运光吸收深度 z_0 的 2 倍,即 $Z=2z_0=2/\alpha_p$, α_p 为抽运有效吸收系数,即 $L=l/\cos\theta$, l 为抽运区域长度, θ 为内入射角度。

由轴棱镜引起的分裂角度为

$$\beta_n = \frac{2L\Delta T}{h} \frac{dn}{dT}, \quad (3)$$

式中 dn/dT 为折射率温度系数。由抽运面形变引

起的分裂角度为

$$\beta_\varphi = 2\kappa Z\Delta T/h. \quad (4)$$

He-Ne 激光在轴棱镜部分的总分裂角度为

$$\beta_T = n(\beta_\varphi + \beta_n), \quad (5)$$

式中 n 为折射率,这里近似取为 1064 nm 的 e 光折射率。将 L, Z 和 ΔT 代入,得到

$$\beta_T = \frac{nP\xi}{2k} \left(\frac{\kappa}{l} + \frac{\alpha_p}{2\cos\theta} \frac{dn}{dT} \right). \quad (6)$$

板条的物理、热和光学参数的值如表 1 所示。

表 1 板条的物理、热和光学参数

Table 1 Physical, thermal and optical parameters of slab

Symbol	Description	Value
P /W	Input power	Up to 55
ξ	Fractional thermal loading	0.37 (measured)
H /mm	Height of the slab	0.8
z_0 /mm	Absorption depth of pump	0.41
α_p /cm ⁻¹	Effective absorption coefficient of pump	24
l /mm	Length of pump area	16
θ /(^{\circ})	Internal incidence angle	5
dn/dT /K ⁻¹	Temperature coefficient of the refractive index	2.9×10^{-6}
k /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Thermal conductivity	5.23
κ /K ⁻¹	Coefficient of thermal expansion	11.37×10^{-6}
n	Refractive index of Nd:YVO ₄ slab at 1064 nm	2.1652

由(6)式可知,对于给定的板条结构,He-Ne 激光的分裂角度只与抽运输入功率和热转换系数有关。实验中分别使用 0.1 mW 种子光和 1 W 种子光提取时,测量不同抽运功率下 He-Ne 激光的分裂角度,并进行线性拟合,得到 0.1 mW 和 1 W 种子光提取时的 He-Ne 激光的分裂角度如图 5 所示。由图可见,0.1 mW 种子光提取时的热转换系数为 0.37,1 W 种子光提取时的热转换系数为 0.28,线性拟合的相关系数均大于 0.96,这说明小信号提取时的热转换系数与大信号提取时有较大差别,实验中应针对不同的提取情况实时地测量热转换系数,才能使热分析更加准确。

得到热转换系数 ξ 后,将其代入(1)式,可以得到抽运面的最高温升,为了验证轴棱镜模型的准确

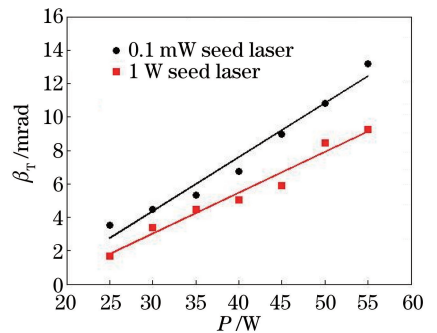


图 5 0.1 mW 和 1 W 种子光提取时的 He-Ne 激光分裂角度

Fig. 5 He-Ne laser splitting angle with 0.1 mW and 1 W seed laser extraction

性,将其与另外两种方法获得的最高温升进行对比: 1)取 $\xi=0.37$,对应于 0.1 mW 种子光提取,采用有限元分析软件 ANSYS 模拟板条抽运面的温度分

布,获得最大温升;2)实验中通过热像仪(型号 Ti27,Fluke Corporation 公司,美国)测量 0.1 mW 种子光入射时板条抽运面在不同抽运功率下的最高温升的实际值。3 种方法测量得到的板条最大温升的比较结果如图 6 所示。

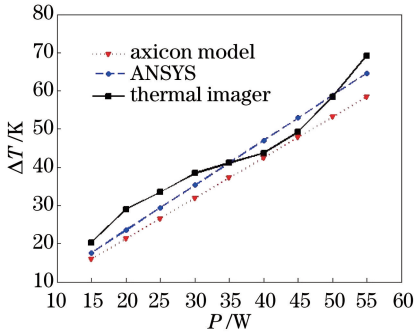


图 6 通过轴棱镜模型、ANSYS 与热像仪获得的板条最大温升比较
Fig. 6 Comparison of maximum temperature rise of slab measured by axicon model, ANSYS and thermal imager

由图 6 可以看出,采用轴棱镜模型、ANSYS 和热像仪获得的板条最大温升基本吻合,说明利用 He-Ne 激光分裂角度测定热转换系数是比较准确的。

4 热效应分析

侧面抽运板条时,抽运面的光强分布为 $I_p(x, y, z)$, 则板条吸收的抽运功率密度 $P_{abs}(x, y, z)$ 为

$$P_{abs}(x, y, z) = \alpha_p I_p(x, y, z), \quad (7)$$

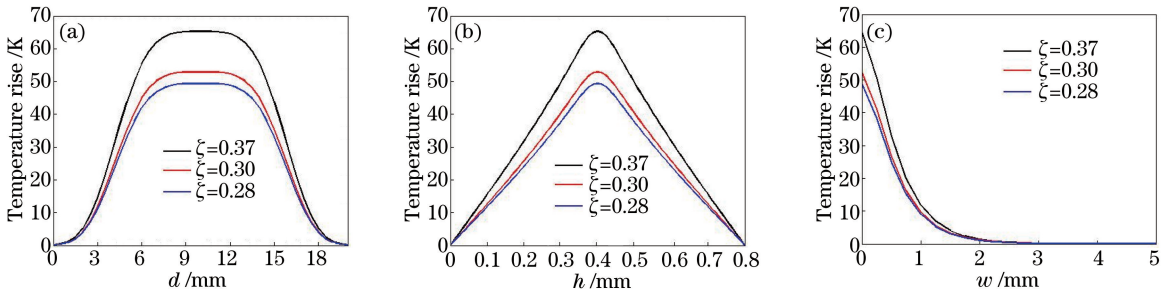


图 7 不同热转换系数时板条抽运面的温升。(a)沿 x 方向;(b)沿 y 方向;(c)沿 z 方向

Fig. 7 Temperature rise of slab pumping surface at different thermal conversion coefficients.

(a) Along x direction; (b) along y direction; (c) along z direction

实验中,在抽运光功率为 50 W、种子光功率为 0.1 mW 时,通过改变晶体热沉的温度改变晶体的温度^[22],测量不同晶体温度(热像仪测得的板条抽运面温度)下单通放大后的增益,板条单通增益随晶体温度的变化曲线如图 8 所示。当热沉温度从 291 K 增加到 296 K 时,晶体温度从 356 K 增加到 372 K,放大器增益降低了 3 dB,说明小信号提取时,晶体温度对放大器的增益有显著的影响。

对应产生的热功率密度 $Q_{abs}(x, y, z)$ 为

$$Q_{abs}(x, y, z) = \xi P_{abs}(x, y, z). \quad (8)$$

晶体内的热源主要包括量子亏损、无辐射跃迁和荧光淬灭等。

抽运光功率为 55 W 时,不同热转换系数下 ANSYS 模拟得到的板条抽运面的温升如图 7 所示。0.1 mW 种子光提取时, $\xi=0.37$, 板条抽运面的最大温升为 338 K; 1 W 种子光提取时, $\xi=0.28$, 板条抽运面的最大温升为 322 K; $\xi=0.30$ 时,板条抽运面的最大温升为 326 K。说明在小信号提取和大信号提取时,板条内的温度分布有较大差异。对于侧面抽运的 Nd:YVO₄ 板条结构,小信号提取情况下,取 $\xi=0.37$, 因此对 $\xi=0.30$ 的情况进行分析^[8-9] 是不准确的。由图 7(b)可以看出,晶体抽运面沿厚度方向上的温度梯度在未抽运区域呈线性,在抽运中心线附近呈抛物线,这也进一步验证了轴棱镜模型。

Nd:YVO₄ 晶体的增益与其绝对温度相关^[20]。随着板条温度的升高,其受激发射截面大幅减小,中心发射谱线出现漂移,增益减小。对于掺杂浓度为 1% 的 Nd:YVO₄ 晶体,在 200~350 K 的温度范围内,温度每升高 10 K,其受激发射截面减小约 4%^[20]。Wang 等^[21] 报道了不同边界温度条件对输出激光性能的影响,边界温度每升高 20 K,屈光度增加约 2 m⁻¹,最大输出功率下降约 3 W。

由于板条结构通过上下两个大面散热,板条的热效应引起的热致畸变在水平和垂直两个方向上不同,放大激光附加波前畸变后,光束质量退化,而且入射激光会在抽运面上产生一次内全反射,光束的畸变较为复杂。s 偏振态激光以光束路径 S 通过晶体所产生的光程差(OPD)可以表示为^[8]

$$D_{OPD} = \frac{dn}{dT} \int_S \Delta T dS. \quad (9)$$

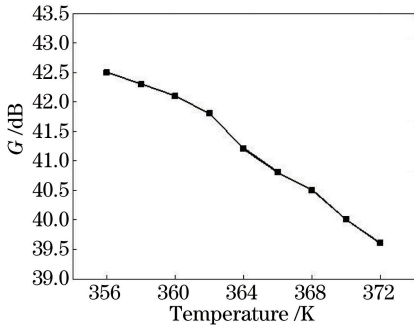


图 8 板条单通增益随晶体温度的变化曲线
Fig. 8 Variation in single-pass gain of slab with crystal temperature

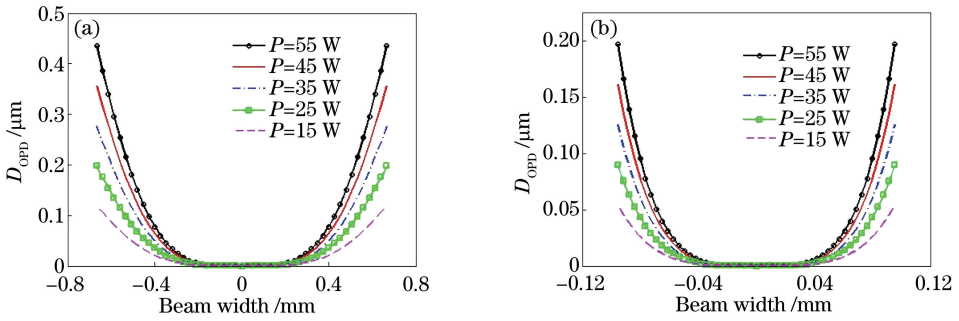


图 9 不同抽运功率时的热致畸变。(a)水平方向;(b)垂直方向
Fig. 9 Thermal distortion at different pump powers. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

5 实验结果和分析

实验中研究了 0.1 mW 种子光和 1 W 种子光单通放大激光输出功率和 ASE 功率,如图 10(a)、(b)所示。种子光功率为 1 W 时,输出功率随着抽运功率呈直线上升,而 ASE 功率较低,进一步提升抽运功率可以获得更高的激光输出功率。种子光功率为 0.1 mW 时,在抽运功率为 50 W 处出现输出功率拐点,抽运功率增加时,输出功率反而下降。这是因为与大信号种子光相比,小信号种子光对抽运功率的提取较少,晶体热转换系数增大,由 1 W 种子光提取时的 0.28 上升到 0.1 mW 种子光提取时的 0.37,抽运光功率为 55 W 时最高温升上升了 16 K,这使得小信号提取时晶体温度相对较高,种子光增益降低,而 ASE 激光变得越来越严重,并与种子光相互竞争,更多的反转粒子被 ASE 放大消耗,最终 ASE 提取出可与种子光提取相比拟的功率,使放大激光输出功率大幅下降。此时,板条晶体内的温升成为限制系统增益提高的主要因素,因此需要有效降低板条温度以使种子光得到更高增益,从而抑制 ASE 对激光的提取。

0.1 mW 种子光单通和双通放大激光输出功率和 ASE 功率如图 10(a)、(c)所示。0.1 mW 种子光双通

在光斑束腰尺寸为 16 mm×0.12 mm、种子光掠入射角度为 5°、热转换系数 $x=0.37$ 时,由(9)式得到光路对应的 D_{OPD} ,并进行多项式拟合,从而得到不同抽运功率下水平和垂直方向的热致畸变,如图 9 所示。随着抽运功率的增加,水平和垂直方向的热致畸变均呈线性增加,但是水平方向的热致畸变较大,约为相同抽运功率下垂直方向的 2 倍。这将导致更高功率抽运时,水平方向光束质量受热致畸变的影响较大,光束质量恶化更为严重。在更高功率抽运时,可以采用 1 W 种子光获得更高的抽运光功率提取效率,以有效降低热转换系数,降低板条温升,减小热效应引起的热致畸变,从而改善光束质量。

后放大效率得到提高,抽运光功率为 50 W 时输出功率有所提高,由 1.8 W 提高到 4.4 W,但 ASE 功率也同样有所提高,由 1.2 W 提高到 3.6 W。这是因为双通时需要引入 4f 系统将放大激光重新耦合进板条,同时 4f 系统也会将与种子光路径不同的 ASE 进行会聚,会聚光进入板条中被放大,使输出激光中伴有大量的 ASE,影响输出激光性能,降低放大激光光束质量。单通时 M_x^2 和 M_y^2 均在 1.3 以下,双通后 M_x^2 和 M_y^2 均在 1.4 以上。若希望在双通状态下保持 M_x^2 和 M_y^2 小于 1.3,则只能降低垂直方向抽运功率密度,将垂直方向抽运直径由 120 μm 增加到 200 μm ,但是此时输出激光功率只有 2 W,与单通后放大功率相当。

实验中,在小信号种子光提取的情况下,并未使用过高的抽运功率,否则晶体温度较高,小信号种子光增益大幅下降,影响输出功率;也并未采取双通和多通放大结构,否则光路复杂,ASE 严重,影响输出激光的光束质量。在激光光路的设计中,采用高消光比的光学隔离器,并将透镜略微调偏以抑制 ASE 和自激振荡。在种子光功率为 0.1 mW、抽运功率为 50 W 时,最终获得了 1.8 W 的单通输出,增益为 43 dB, $M_x^2=1.30$, $M_y^2=1.28$,种子光功率为 0.1 mW 时放大激光光束质量及远场光斑分布如图 11 所示。

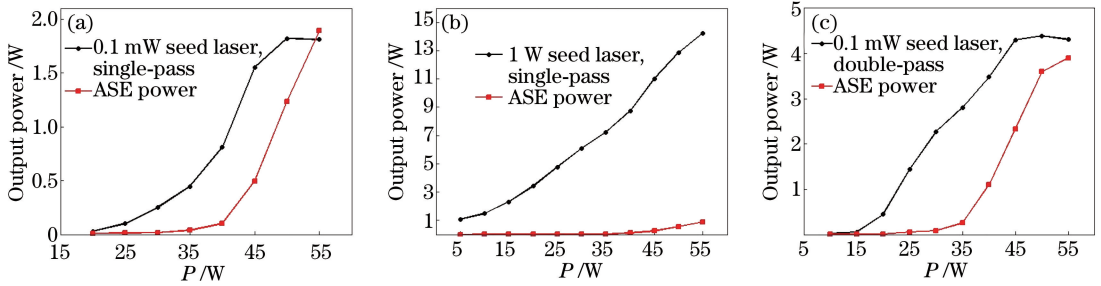


图 10 (a)种子光功率为 0.1 mW 时的单通放大激光输出功率和 ASE 功率;(b)种子光功率为 1 W 时的单通放大激光输出功率和 ASE 功率;(c)种子光功率为 0.1 mW 时的双通放大激光输出功率和 ASE 功率

Fig. 10 (a) Single-pass amplified laser output power and ASE power with seed laser power of 0.1 mW; (b) single-pass amplified laser output power and ASE power with seed laser power of 1 W; (c) double-pass amplified laser output power and ASE power with seed laser power of 0.1 mW

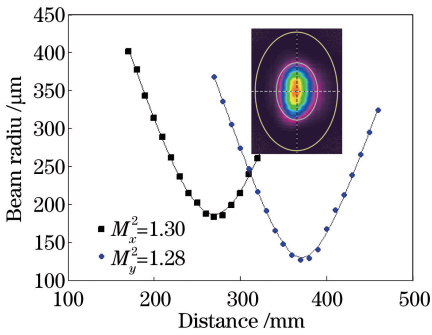


图 11 种子光功率为 0.1 mW 时放大激光光束质量及远场光斑分布

Fig. 11 Beam quality and far field spot distribution of amplified laser with seed laser power of 0.1 mW

6 结 论

研究了板条内的温度分布和抽运面的轴棱镜结构,提出了一种测量热转换系数的新方法,并从模拟和实验的角度加以验证。测量了 0.1 mW 和 1 W 种子光提取时板条晶体的热转换系数,分别为 0.37 和 0.28;抽运光功率为 55 W 时,两种情况下板条最大温升相差 16 K,说明提取情况不同时,板条热转换系数和最大温升有较大差别。小信号提取时,热转换系数较大,高功率抽运导致板条晶体温度过高,增益降低,输出功率下降,ASE 严重,因此需要有效降低板条温度才能获得更高输出功率。在种子光功率为 0.1 mW、抽运光功率为 50 W 时,得到了 1.8 W 的激光输出,增益高达 43 dB, $M_x^2=1.30, M_y^2=1.28$ 。基于掠入射 Nd:YVO₄ 板条结构的激光放大器可对小信号激光输入进行高增益放大,具有结构简单、成本低等优点,可用于 MOPA 结构中,替代多级光纤预放,因此具有很大的工业应用前景。

参 考 文 献

- [1] Sugioka K, Cheng Y, Midorikawa K. Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2005, 81(1): 1-10.
- [2] Mian A, Newaz G, Vendra L, et al. Laser bonded microjoints between titanium and polyimide for applications in medical implants[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2005, 16(3): 229-237.
- [3] Kouznetsov D, Moloney J V. Highly efficient, high-gain, short-length, and power-scalable incoherent diode slab-pumped fiber amplifier/laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(11): 1452-1461.
- [4] 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.
- [5] Sridharan A K, Byer R L, Saraf S. High-gain, end-pumped, Yb:YAG zig-zag slab amplifier for remote sensing applications[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2007: TuB15.
- [6] Shoup M J, Kelly J H, Smith D L. Design and testing of a large-aperture, high-gain, Brewster's angle zigzag Nd:glass slab amplifier[J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 5827-5838.
- [7] Bernard J E, McCullough E, Alcock A J. High gain, diode-pumped Nd:YVO₄ slab amplifier[J]. Optics Communications, 1994, 109(1/2): 109-114.
- [8] Bermudez G J C, Pinto-Robledo V J, Kir'yanov A V, et al. The thermo-lensing effect in a grazing incidence, diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Optics Communications, 2002, 210(1/2): 75-82.

- [9] Yan X P, Gong M L, He F H, *et al.* Numerical modeling of the thermal lensing effect in a grazing-incidence laser [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1851-1857.
- [10] 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.
- [11] Li M, Hu H, Tang C, *et al.* Edge distortion suppressing in Nd:YAG slab laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1214003.
李密, 胡浩, 唐淳, 等. Nd:YAG 板条激光器边缘畸变抑制[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1214003.
- [12] Comaskey B, Moran B D, Albrecht G F, *et al.* Characterization of the heat loading of Nd-doped YAG, YOS, YLF, and GGG excited at diode pumping wavelengths[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(7): 1261-1264.
- [13] Sennaroglu A. Experimental determination of fractional thermal loading in an operating diode-pumped Nd:YVO₄ minilaser at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3253-3257.
- [14] Mukhopadhyay P K, George J, Ranganathan K, *et al.* An alternative approach to determine the fractional heat load in solid state laser materials: Application to diode-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(3): 253-258.
- [15] Chen Y F, Kuo H J. Determination of the thermal loading of diode-pumped Nd:YVO₄ by use of thermally induced second-harmonic output depolarization[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(11): 846-848.
- [16] Schäfer F P. On some properties of axicons[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1986, 39(1): 1-8.
- [17] McInnes A, Richards J. Thermal effects in a coplanar-pumped folded-zigzag slab laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(7): 1243-1252.
- [18] Dallas J L, Afzal R S. Modeling of a diode-side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2365-2370.
- [19] Carslaw H S, Jaeger J C. *Heat in solids*[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [20] Turri G, Jenssen H P, Cornacchia F, *et al.* Temperature-dependent stimulated emission cross section in Nd³⁺:YVO₄ crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(11): 2084-2088.
- [21] Wang Y J, Yang W H, Zhou H J, *et al.* Temperature dependence of the fractional thermal load of Nd:YVO₄ at 1064 nm lasing and its influence on laser performance[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18068-18078.
- [22] Shen L F, Jiang H B, Zhao Z G, *et al.* Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd:YVO₄ slab geometry [J]. *Chinese Journal of 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.