

端面抽运双包层Nd:YAG平面波导激光放大器设计

王君涛^{1,3} 王小军^{2,3} 周唐建^{1,3} 汪丹^{1,3} 童立新^{1,3} 胡浩^{1,3} 高清松^{1,3}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

³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 621900

摘要 设计了一种高效率、结构紧凑的高功率激光放大器。采用解析方法分析了对称结构Nd:YAG双包层平面波导增益介质的内部热应力,获得了其可承受的最大抽运光强。针对不同厚度的内包层结构,采用TracePro软件模拟分析得到了最佳的抽运源结构和耦合系统。为了便于进行激光模式控制,掺杂区厚度取为100 μm。内包层和外包层分别为纯YAG和蓝宝石,整个波导尺寸为60 mm×10 mm×2 mm。半导体激光器阵列输出的抽运光从波导的两个端面进入,两个大面和铜热沉焊接来获得良好的散热条件。种子光从一个端面注入,单通放大输出。通过模拟计算,在3384 W的抽运功率下,进入波导芯层的种子光功率为0.1 W,放大输出功率可以到达1322 W,光光效率约为39%。

关键词 激光器; 固体激光器; 平面波导; 热应力

中图分类号 T248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102009

Design of End-Pumped Double Cladding Nd:YAG Planar Waveguide Laser Amplifier

Wang Juntao^{1,3} Wang Xiaojun^{2,3} Zhou Tangjian^{1,3} Wang Dan^{1,3} Tong Lixin^{1,3}
Hu Hao^{1,3} Gao Qingsong^{1,3}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

³Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A high power laser amplifier with high efficiency and compactness is designed. The thermal stress of symmetrical double cladding planar waveguide with Nd:YAG as its core is analyzed theoretically, and the maximum pump light intensity is also obtained. For different inner cladding thicknesses, the optimized pump sources and coupling system are achieved with the simulation of the TracePro software. In order to control the laser mode effectively, the 100 μm thickness of the core is set. The inner cladding and outer cladding are pure YAG and sapphire, respectively, with the waveguide of the dimension of 60 mm×10 mm×2 mm. The pump light from the laser diode array is coupled into the waveguide from two ends, two surfaces of the outer cladding are welded with two copper heat sinks for heat transfer. The seed light is coupled into the waveguide from one end and amplified for single pass. By theoretical calculation, the output of 1322 W can be obtained when the pump power is 3384 W and the seeder power into the waveguide is 0.1 W, with the optical-optical efficiency of 39%.

Key words lasers; solid-state laser; planar waveguide; thermal stress

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.6810

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-08-19

作者简介: 王君涛(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: wjt_caep@126.com

1 引言

全固态激光器具有效率高、结构紧凑、性能稳定、输出光束质量好等诸多优点,在工业、军事、医疗和科研等方面有广泛应用。特别是在军事和工业加工方面,大功率全固态激光器有很好的应用前景,因此也一直是科学研究的热点。早期全固态激光器的增益介质通常选用圆棒或者块状结构,但是在高功率抽运下存在着严重的热透镜效应和双折射效应,这使增益介质产生很强的光学畸变,限制了激光的输出功率^[1]。为了增大散热表面积,获得高功率的激光输出,从激光发现之初人们就在增益介质形态上做了很多尝试和创新工作,出现了板条^[1-3]、薄片^[4-5]、光纤^[6-8]和平面波导^[9-11]等结构。

平面波导激光器通过提供热透镜效应的一维控制以及增加波导掺杂区的宽度和长度进行功率提升,提供了介于大体积固体激光器和光纤激光器的中间条件。与双包层光纤^[7]类似,双包层平面波导结构的出现,大大提高了抽运效率。内包层的引入扩大了抽运光耦合进入波导激光器的数值孔径,能够有效地提高抽运光耦合效率,并且,它有着很好的散热性能。平面波导激光器综合了块状固体激光和光纤激光的优点,同时又避免了两者的缺点。光纤激光的优点在于结构紧凑、效率高、废热导致的光束质量退化较小,缺点在于由于激光亮度极高,非线性效应直接限制最高输出功率。块状固体激光定标放大时则基本不存在非线性效应问题,但缺点是废热导致的光束质量退化严重,且结构难以实现小型紧凑化。所以,平面波导是一种比较理想的高功率全固态激光器的增益介质结构。

2 平面波导激光国内外进展

1972年世界上第一个平面波导激光器出现,增益介质是采用液相外延法生长的Ho:YAG^[9]。1973年,出现了采用液相外延法生长Nd:YAG平面波导激光器^[9]。1997年,英国南安普敦大学采用一种热键合技术制成了YAG/Nd:YAG/YAG平板波导^[12]。2000年,他们将双包层光纤的思想移植到平面波导中,通过热键合技术成功地制备了双包层平面波导激光器,使抽运效率得到很大的提高。2002年,他们将一块Cr⁴⁺:YAG晶片键合在双包层波导激光器中,制成被动调Q的单片波导器件。到目前为止,已经出现了很多种增益介质的平面波导激光:氧化物(Nd:YAG, Yb:YAG, Tm:YAG, Nd:GGG, Nd:GdVO₄等),氟化物(YLF, LaF₃等),钨化物(Yb:KYW, Tm:KYW, Yb:KGLW等)等^[13]。

根据结构特点,典型的平面波导激光器的常见抽运方式有端泵、侧泵和面泵3种形式,如图1所示。抽运源通常采用半导体激光器,经过整形耦合进入平面波导。

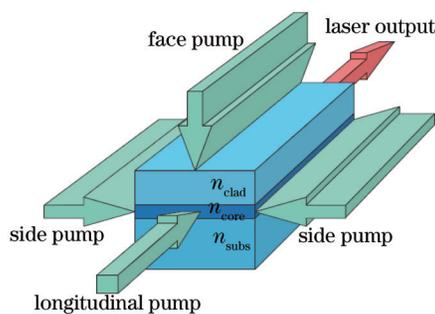


图1 平面波导激光器的三种抽运方式

Fig.1 Three pumping configurations of planar waveguide lasers

2.1 国外进展

Raytheon^[14]在2008年报道了端面抽运的Yb:YAG平面波导激光放大器,连续输出功率为16.1 kW,电光效率为20%。平面波导为双包层结构,增益介质Yb:YAG的厚度为200 μm ,内包层为非掺杂的纯YAG。注入种子光为200 mW时,放大输出功率为240 W,单程小信号增益为1200。当注入种子光为100 W时,输出激光功率为16.1 kW,单程增益为160。Raytheon计划2014年在单个平面波导放大器上获得30 kW的激光输出,结构如图2所示。种子光采用200 W输出的单模光纤激光器,经扩束从端面耦合进平面波导。

2010年,赫瑞瓦特大学在复合非稳腔中用Yb:YAG平面波导获得了400 W的连续激光输出^[15]。平面波导为单包层结构,增益区的厚度为150 μm ,Yb的原子数分数为2%。衬底和覆盖层都是1 mm厚的蓝宝石,

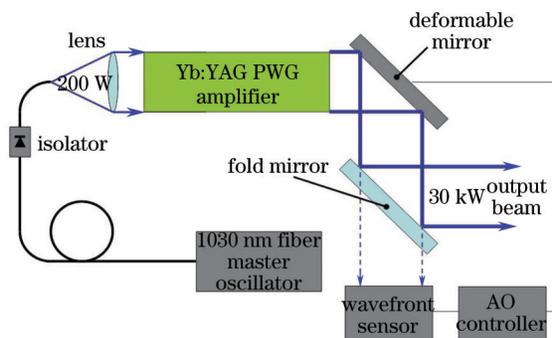


图2 Raytheon公司的30 kW平面波导激光放大器结构示意图
Fig.2 Schematic of Raytheon's 30 kW planar waveguide amplifier

整个波导的几何尺寸为13 mm×12 mm×2.15 mm。为了尽量减小寄生振荡,左右两个侧面与大面的角度分别为83°和70°,即横截面为左右不对称的梯形,如图3所示。抽运光从两个侧面进入,上下两个大面用来冷却,在长度方向建立谐振腔。为了保证未吸收的剩余抽运光不会进入到对面的叠阵中,两个叠阵相对于平面波导都成不同的角度,如图4所示。

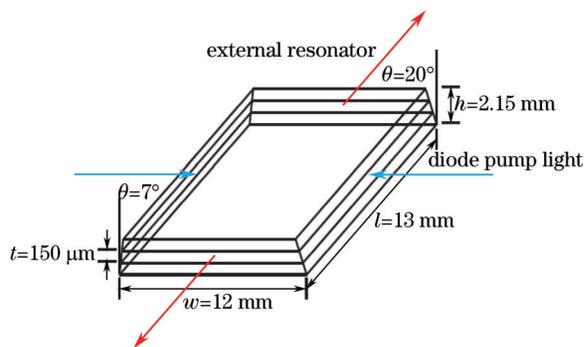


图3 Yb:YAG平面波导增益介质
Fig.3 Yb:YAG planar waveguide gain medium

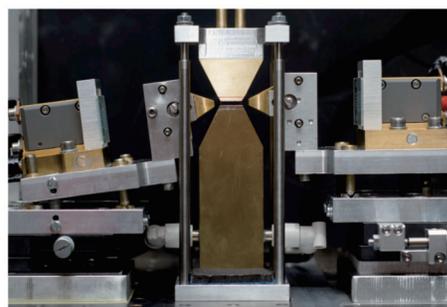


图4 抽运结构
Fig.4 Pumping structure

2.2 国内进展

2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所报道了非对称包层的Nd:YAG波导谐振腔激光器^[16]。平面波导的几何尺寸为58 mm×10 mm×1 mm,在底面上镀有3 μm厚的蓝宝石膜层。抽运光从侧面注入,与水平方向的倾角为5°,如图5所示。抽运源在1 kHz重复频率20%占空比的准连续模式下工作,在非稳腔中获得280 W的激光输出,斜率效率38%,板条宽度方向上的光束质量为 $M^2=1.5$ 。

2008年,清华大学报道了高效率的端面抽运Nd:YAG平面波导激光器^[17]。平面波导的几何尺寸为12 mm×5 mm×1 mm,中心0.4 mm的Nd:YAG增益区掺杂原子数分数为1%,上下的包层都是厚度为0.3 mm的纯YAG。波导的一个端面镀1064 nm高反膜和808 nm高透膜,作为后腔镜,另一个端面镀1064 nm高透膜和808 nm高透膜,输出镜用平面镜。使用2.0%的耦合输出镜时,获得了最大2.90 W的激光功率输出,光光效率为58%,图6为激光器装置示意图。

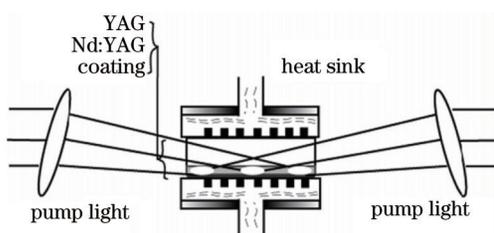


图5 倾斜抽运平面波导
Fig.5 Oblique side pumping of planar waveguide

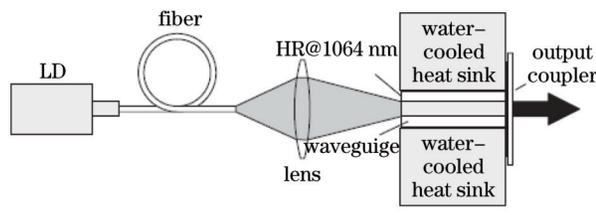


图6 激光器装置示意图
Fig.6 Schematic of laser system

3 实验设计

3.1 增益介质参数

与光纤类似,双包层结构可以很大程度上提高进入平面波导增益区的抽运光功率,大大提高增益介质的储能。采用双包层结构的平面波导增益介质,使用端面抽运以获取高光束质量。种子光和抽运光同端注入,利用两个大面进行冷却。芯层为 Nd:YAG,内包层为非掺杂的纯 YAG,外包层为具有优异导热性能和高断裂极限的蓝宝石。考虑到波导方向上的模式控制和芯层的加工工艺难度,芯层的厚度为 $d=100\ \mu\text{m}$ 。增益区长度 $L_a=50\ \text{mm}$,波导宽度 $w=10\ \text{mm}$ 。

为了保证芯层对抽运光的充分吸收(大于 95%),则必须满足 $\alpha_c \cdot L_a \geq 3$ 。其中 $\alpha_c = \alpha_d \cdot d/D$ 是等效吸收系数, α_d 是芯层对抽运光的吸收系数, D 是内包层厚度(包含芯层),所以需满足等效吸收系数 $\alpha_c \geq 0.6\ \text{cm}^{-1}$ 。

由于平面波导的纵横比很大,在计算其应力时将其当作无穷大尺寸的平板来处理。设 z 为波导长度方向, y 为宽度方向,当温度是 x 方向(厚度)的偶函数分布时,内部应力严格可解^[18]:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E}{1-\nu} [C - \alpha T(x)], \quad \sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (1)$$

$$C = \frac{\alpha}{t} \int_{-t/2}^{t/2} T(x) dx, \quad (2)$$

式中 α 是热膨胀系数, t 是波导厚度, ν 是泊松系数, E 是杨氏模量。

因为芯层的厚度 d 远小于波导厚度 t ,芯层和内包层都只做传热考虑,因此波导内的温度分布可以表示为

$$T(x) = \begin{cases} -\frac{qd}{2k_{\text{YAG}}} |x| + \frac{qdD}{4k_{\text{YAG}}} - \frac{qdD}{4k_{\text{Sph}}} + \frac{qdt}{4k_{\text{Sph}}} + \frac{qd}{2h} + T_F, & |x| \leq \frac{D}{2} \\ -\frac{qd}{2k_{\text{Sph}}} |x| + \frac{qdD}{4k_{\text{Sph}}} + \frac{qd}{2h} + T_F, & -\frac{t}{2} \leq x < -\frac{D}{2}, \frac{D}{2} \leq x < \frac{t}{2} \end{cases}. \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式,得到厚度方向上的应力分布。根据理论推导计算,平面波导内包层和外包层的最大拉应力在各自的最外侧,可以分别表示为

$$\sigma_{\max}^{(\text{YAG})} = \left\{ \frac{\alpha_{\text{YAG}} D^2}{8k_{\text{YAG}} t} - \left(1 - \frac{D}{t}\right) \left[(\alpha_{\text{YAG}} - \alpha_{\text{Sph}}) \frac{1}{2h} + (2\alpha_{\text{YAG}} - \alpha_{\text{Sph}}) \frac{t-D}{8k_{\text{Sph}}} \right] \right\} \frac{E_{\text{YAG}}}{1-\nu_{\text{YAG}}} qd, \quad (4)$$

$$\sigma_{\max}^{(\text{Sph})} = \left\{ \alpha_{\text{Sph}} + (2\alpha_{\text{YAG}} - \alpha_{\text{Sph}}) \frac{D}{t} \right\} \frac{t-D}{8k_{\text{Sph}}} + (\alpha_{\text{YAG}} - \alpha_{\text{Sph}}) \frac{D}{2ht} + \frac{\alpha_{\text{YAG}} D^2}{8k_{\text{YAG}} t} \left\} \frac{E_{\text{Sph}}}{1-\nu_{\text{Sph}}} qd, \quad (5)$$

式中 σ_{\max} 是最大应力, q 是芯层热功率密度, α_{YAG} 和 α_{Sph} 分别是 YAG 和蓝宝石的热膨胀系数, k_{YAG} 和 k_{Sph} 分别是 YAG 和蓝宝石的热传导系数, h 是冷却面换热系数, T_F 是冷却液温度。

对于双端抽运情况,注入增益介质的抽运光总功率 P_{pump} 与其中最大热负载 $q_0 d$ 的关系为

$$P_{\text{pump}} = 2q_0 dw / \alpha_c \eta_k, \quad (6)$$

式中 η_k 是产热比。

蓝宝石的断裂应力为 $4000\ \text{kg/cm}^2$,计算中取蓝宝石的最大应力为 $2000\ \text{kg/cm}^2$,即取两倍安全极限,根据(5)式反推出材料所容许的最大容许热负载 $q_0 d$,再由(6)式得到材料结构容许的注入增益介质的抽运光功率 P_{pump} ,由(4)式得到相应情况下 YAG 上的最大应力。产热比 η_k 取为 0.35,计算结果分别如图 7~9 所示。

取两倍安全极限,则 YAG 上的最大拉应力不应超过 $650\ \text{kg/cm}^2$,因此由图 9 可知,当波导厚度大于 1.2 mm 时,内包层在 400~700 μm 范围内的波导在蓝宝石可承受的最大热负载下, YAG 都是安全的。

可见,在一定的波导厚度下,内包层越薄,可承受的热负载功率就越大,相应的内包层外侧的应力也越小,所以理论上来说内包层厚度越小越好。

由图 8 中的曲线可以整理出不同波导厚度和不同内包层厚度下的最大抽运光功率,如表 1 所示。

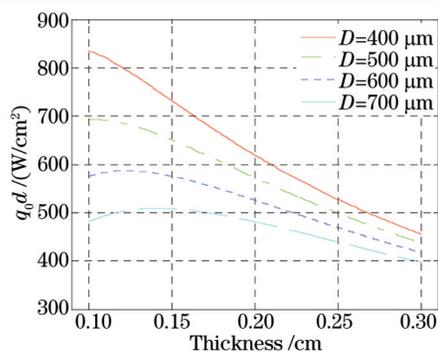


图7 蓝宝石上的最大热负载与波导厚度的关系

Fig.7 Relationship between maximum heat load on Sapphire and waveguide thickness

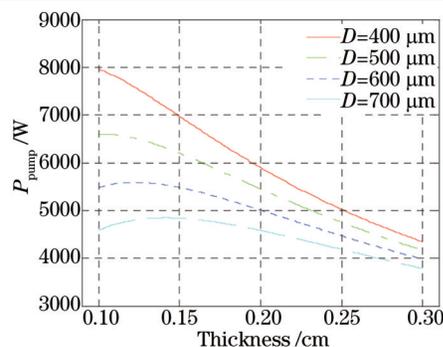


图8 最大抽运光功率与波导厚度的关系

Fig.8 Relationship between maximum pump power and waveguide thickness

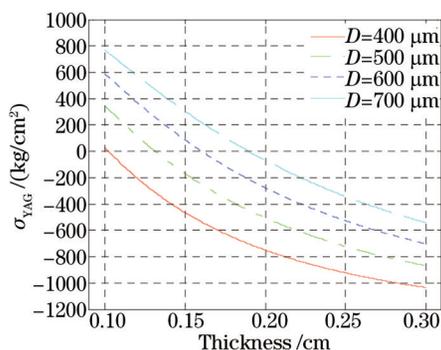


图9 YAG的最大应力与波导厚度关系

Fig.9 Relationship between maximum stress on YAG and waveguide thickness

表1 不同波导厚度 t 和内包层厚度 D 时的最大抽运光功率

Table 1 Maximum pump power at different waveguide thicknesses t and inner cladding thicknesses D

D	t			
	1.2 mm	1.5 mm	1.8 mm	2.0 mm
400 μm	7627 W	6970 W	6304 W	5895 W
500 μm	6532 W	6196 W	5753 W	5450 W
600 μm	5586 W	5481 W	5218 W	5008 W
700 μm	4787 W	4838 W	4714 W	4581 W

3.2 抽运耦合系统

采用实验室现有的半导体激光器 bar 条,单 bar 的长度为 10 mm。微透镜准直后快轴发散半角小于 0.2° ,慢轴发散半角小于 4° ,在 100 A 连续工作模式下 bar 条的最高输出功率为 90 W。

如果每个二极管阵列(LDA)包括 10 个 bar,bar 条之间的中心间距为 1.8 mm,两列 10 bar 条空间叠加后抽运光斑大小为 $18.9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (快轴 \times 慢轴),这两个方向上的发散半角分别为 0.2° 和 4° 。蓝宝石的折射率为 1.7659,YAG 的折射率为 1.8172,这样外包层的数值孔径(NA)为 0.4287。对 DLA 考虑快轴聚焦和慢轴聚焦两种聚焦方式,但是只有对抽运光快轴聚焦才能满足外包层的 NA 条件,实现抽运光的高效率耦合。

使用 TracePro 软件模拟计算 $18.9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 光斑的聚焦效果,平凸柱透镜的曲率半径为 30 mm,聚焦光斑约为 $550 \mu\text{m}$,模拟计算结果如图 10 所示。

针对不同的内包层厚度,选择不同的 bar 条叠加数量和不同的透镜焦距,使用 TracePro 软件模拟计算抽运源光斑聚焦效果。聚焦透镜焦距不能太小,否则像差会导致聚焦光斑变大,并且实际中透镜到波导的距离如果太小也会影响分光镜的放置。通过软件模拟计算,找到与内包层厚度相匹配的最大 DLA 规格及聚焦透镜参数,如表 2 所示。其中,考虑了空间叠加镜的效率为 94%。

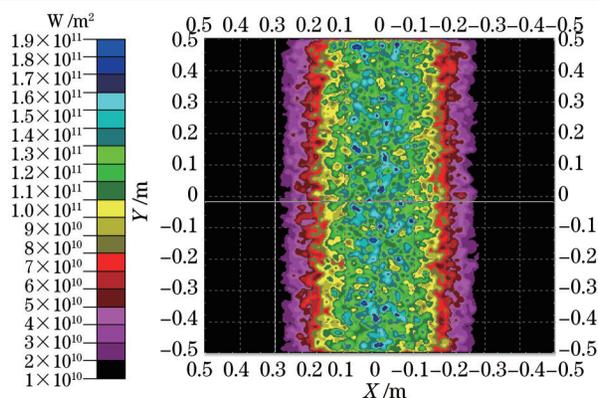


图 10 模拟聚焦光斑

Fig.10 Simulation of focusing

表 2 不同内包层厚度的抽运源参数

Table 2 Pump source parameters for different inner cladding thicknesses

Inner cladding thickness / μm	Maximum pump source	Focusing lens radius /mm	Output power of two pumping sources /W
400	2 \times 8 bar	20	2707
500	2 \times 9 bar	25	3046
600	2 \times 10 bar	30	3384
700	2 \times 12 bar	30	4061

对比表 1 和表 2 可知,能耦合进内包层的最大抽运光功率明显小于包层结构所能允许的抽运光功率,即表中的内包层厚度和抽运都满足使用条件。表 2 中,400 μm 和 500 μm 对应的抽运功率较低,舍弃这两个选项。并且在表 1 中,700 μm 内包层厚度所允许的抽运光功率比 600 μm 的低,考虑到以后抽运源功率的提高,这里选择内包层厚度为 600 μm 波导厚度为 2 mm 的平面波导增益介质。

3.3 光学系统设计

为了减小增益介质的端面效应,在掺杂区的两端键合纯 YAG,图 11 给出了 Nd:YAG 双包层平面波导结构示意图。整体波导尺寸为 60 mm \times 10 mm \times 2 mm,中心的 50 mm \times 10 mm \times 100 μm 为增益区,四周都是纯 YAG。用蓝宝石作为外包层,上下的蓝宝石尺寸为 60 mm \times 10 mm \times 700 μm 。为了保证对抽运光的充分吸收,增益区掺杂原子数分数取 1.2%。

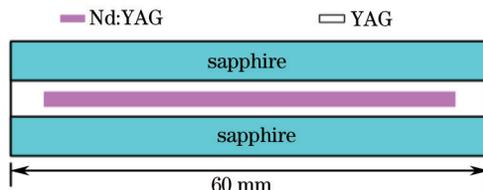


图 11 双包层平面波导结构示意图

Fig.11 Schematic of double cladding planar waveguide configuration

抽运源为 2 列 \times 10 bar 的空间叠加 LDA,单个抽运源的输出功率为 1692 W。抽运源光斑大小为 18.9 mm \times 10 mm(快轴 \times 慢轴),这两个方向上的发散半角分别为 0.2 $^\circ$ 和 4 $^\circ$ 。抽运光在快轴方向经过曲率半径 30 mm 的平凸柱透镜聚焦得到约 550 μm 的线光斑,进入平面波导的内包层。抽运光在 YAG 和蓝宝石的界面上多次全内反射,从而实现增益区对抽运光的充分吸收。

平面波导放大器的光路示意图如图 12 所示,采用双端抽运结构,借助于 808/1064 双色镜,实现种子光和抽运光的同端输入输出。种子光先经过法拉第隔离器,防止放大过程中的反向回光进入种子源而对种子光性能造成影响。经过扩束耦合系统后,种子光注入平面波导的芯层,放大后的激光从双色镜反射输出。为了防止未吸收的抽运光入射到对面的 LDA 上,抽运光需稍微倾斜注入到波导内包层,这对抽运光的注入效率不会产生影响。

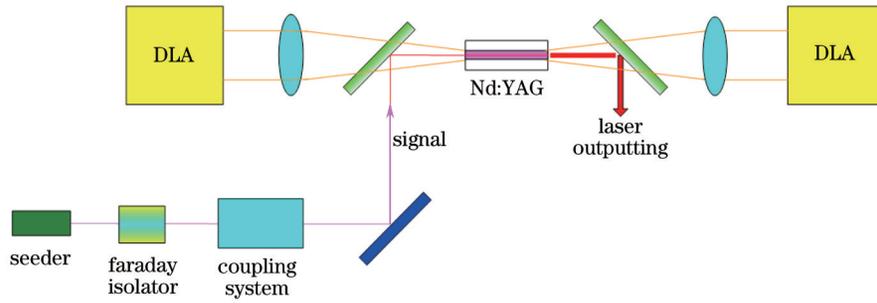


图 12 平面波导激光放大系统光学示意图

Fig.12 Schematic of planar waveguide laser amplifier system

3.4 激光放大器输出功率模拟计算

小信号增益系数 g_0 可以表示为^[1]

$$g_0 = \eta_Q \eta_s \eta_B P_{ab} / I_s V, \quad (7)$$

式中 η_Q 是量子效率, η_s 是斯托克斯因子, η_B 是交叠效率, P_{ab} 是吸收的抽运光总功率, I_s 是饱和功率密度, V 是增益区的体积。

对于单程激光放大器, 增益区内每点 x 处的能量密度为^[1]

$$\frac{dI(x)}{dx} = \frac{g_0 I(x)}{1 + I(x)/I_s} - \gamma I(x), \quad (8)$$

式中 γ 是损耗系数。

对于双端抽运, 增益区内 x 处的功率可以表示为

$$I(x) = 0.5P_p \{ \exp(-\alpha_c x) + \exp[-\alpha_c(L_a - x)] \}, \quad (9)$$

式中 P_p 是总的抽运光功率, α_c 是内包层对抽运光的等效吸收系数, L_a 是增益区长度。

将整个增益区分为 N 等份, 分别计算每个小区域吸收的功率, 再分别根据(8)、(9)式得到每个小区域内的小信号增益系数和光强。根据 3.3 节的设计参数, 抽运源输出的总功率为 3384 W, 双端泵浦时增益区内的小信号增益系数如图 13 所示。由于芯层的横截面积很小, 所以增益比较高。

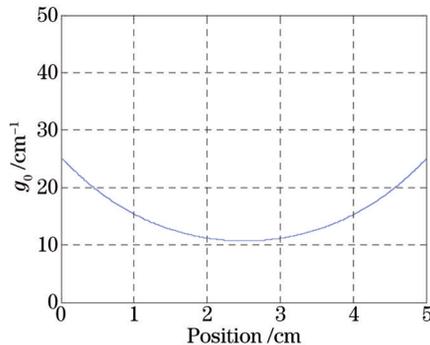


图 13 增益区内不同位置处的小信号增益 g_0

Fig.13 Small signal gain g_0 at different positions in gain zone

针对不同的种子光注入功率, 光斑宽度为 8 mm, 模拟计算增益区内不同位置处激光放大功率, 如图 14 所示。当进入波导芯层的种子光功率为 0.1 W 时, 刚进入增益区的一小部分区域内是小信号放大, 最终放大的功率为 1322 W, 光光效率约 39%。进入波导芯层的种子光功率为 1、10、100 W 时, 输出功率分别为 1374、1428、1538 W, 相应地提取效率分别为 40%、42%、43%。可见, 当注入的种子光功率从 0.1 W 变化到 100 W 时, 放大器的提取效率相差不大, 都是约 40%。

图 15 为不同的种子光功率下, 增益区内每个位置处的提取效率, 即提取功率与吸收的抽运光功率之比。从图可以看出, 很大部分区域内都是饱和提取放大。经计算, 种子光功率为 0.01 W 时, 进入增益区 6 mm 处光强就达到 5 倍的饱和光强 I_s , 在图中也可以看出 6 mm 之后的增益介质内提取效率变化不大。同

样,种子光分别为 1、10、100 W 时,光强达到 5 倍的饱和光强 I_s 的位置分别在进入增益区 4.6、3、0 mm。即种子光功率为 100 W 时,在介质增益区内都是饱和提取放大。因此,在高功率泵浦下的平面波导激光放大器中,种子光功率越大,小信号放大的区域越短,饱和放大的区域越长。

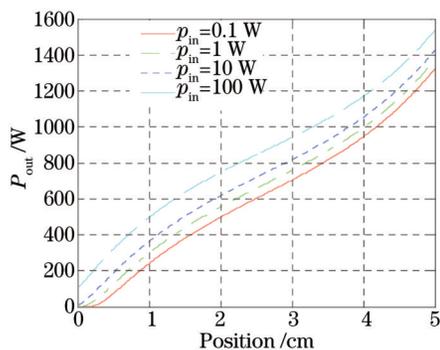


图 14 不同种子光功率时的激光放大功率-位置曲线
Fig.14 Output power versus position at different input seeder powers

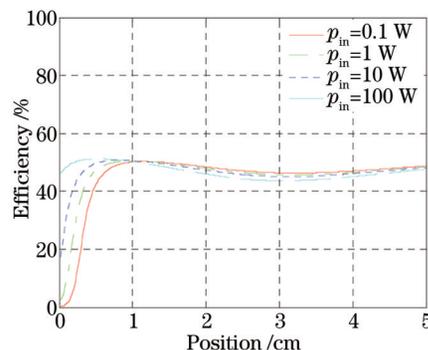


图 15 不同种子光功率时的激光提取效率-位置曲线
Fig.15 Extraction efficiency versus position at different input seeder powers

4 结 论

设计了一种高效率的千瓦级端面抽运 Nd:YAG 双包层平面波导激光放大器。增益区的大小为 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$,掺杂原子数分数为 1.2%。内包层和外包层分别纯 YAG 和蓝宝石,在芯层两端也键合纯 YAG 来减小热效应。上下内包层的厚度为 $250 \text{ }\mu\text{m}$,整个波导尺寸为 $60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。采用双端抽运,抽运源为 2 列 $\times 10 \text{ bar}$ 空间叠加 LDA,用曲率半径 30 mm 的平凸柱透镜对快轴聚焦进入波导内包层。种子光从端面进入,通过模拟计算可知,在 3384 W 的抽运情况下,吸收效率大于 95%。进入波导芯层的种子光功率为 0.1W,那么提取功率可以达到 1322 W,光光效率约为 39%。

参 考 文 献

- 1 W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 357-397.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文译. 北京: 科学出版社, 2002. 357-397.
- 2 Reed M, Kuhn K, Byer R L, *et al.*. Static gas conduction cooled slab geometry Nd:Glass laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21(5): 412-414.
- 3 Yin Liang, Ma Xiuhua, Lu Tingting, *et al.*. Conductively-cooled and bounce-pumped all-solid-state double-stage slab laser amplifier[J]. Chinese J Laser, 2010, 37(9): 2340-2345.
尹 亮, 马秀华, 陆婷婷, 等. 传导冷却反弹抽运结构的板条激光放大器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2340-2345.
- 4 C Stewen, K Contag, M Larionov, *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electron, 2000, 6(4): 650-657.
- 5 Cai Zhen, Wang Xiaojun, Jiang Jianfeng, *et al.*. Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser[J]. Chinese J Laser, 2010, 37(10): 2437-2440.
蔡 震, 王小军, 蒋建锋, 等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2437-2440.
- 6 E Snitzer. Optical maser action of Nd^{3+} in a Barium crown glass[J]. Phys Rev Lett, 1961, 7(12): 444-446.
- 7 E Snitzer, H Po, F Hakima, *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser[J]. Proc. Conf. Optical Fiber Sensors, 1988. PD5.
- 8 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(5): 0502003.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502003.
- 9 J P van der Ziel, W A Bonner, L Kopf, *et al.*. Laser oscillation from Ho and Nd ions in epitaxially grown thin aluminum garnet films [J]. Appl Phys Lett, 1973, 22(12): 656-657.
- 10 P J Chandler, S J Field, D C Hanna, *et al.*. Ion-implanted Nd:YAG planar waveguide laser[J]. Electron Lett, 1989, 25(15): 985-986.
- 11 Yang Tianxin, Yu Chao, Li Shuqing, *et al.*. Thermal stress analysis of double-cladding planar waveguide lasers[J]. Chinese J Laser,

- 2010, 37(1): 26-29.
- 杨天新, 于 超, 李树青, 等. 双包层平面波导激光器中热应力的分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 26-29.
- 12 C Brown, C Bonner, T Warburton, *et al.*. Thermally bonded planar waveguide lasers[J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(9): 1139-1141.
- 13 M Jelínek. Functional planar thin film optical waveguide lasers[J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(2): 91-99.
- 14 Filgas D, Rockwell D, Spariosa K. Next generation lasers for advanced EO systems[J]. Raytheon Technology Today, 2008, 1: 9-13.
- 15 I Thomson, H Baker, K Włodarczyk, *et al.*. 400 W Yb:YAG planar waveguide laser using novel unstable resonators[C]. SPIE, 2010, 7578: 75780K
- 16 L Xiao, X Cheng, J Xu. High-power Nd:YAG planar waveguide laser with YAG and Al₂O₃ claddings[J]. Opt Commun, 2008, 281(14): 3781-3785.
- 17 H X Kang, H Zhang, P Yan, *et al.*. An end-pumped Nd:YAG planar waveguide laser with an optical to optical conversion efficiency of 58%[J]. Laser Phys Lett, 2008, 5(12): 879-881.
- 18 Takeuchi Hirochiro. Thermal Strees[M]. Guo Yanwei, Li Anding Transl. Beijing: Science Press, 1977. 18-19.
- 竹内洋一郎. 热应力[M]. 郭延玮, 李安定 译. 北京: 科学出版社, 1977. 18-19.

栏目编辑: 张 雁