

高效率连续激光二极管泵浦 Cr : LiSAF 激光器^{*}

龙井华^{*} 张 帆 阮双琛 侯 洵, 刘玉华^{**}

(^{*} 西北大学物理系, 西安 710069)

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(^{**} 佛山大学物理系, 佛山 528000)

摘 要 报道了 500mW 激光二极管端面泵浦 Cr : LiSAF 激光器连续运转的实验研究结果。特别是在分析了泵浦光与腔模的耦合情况后, 提出了一套与泵浦源相适应的准直聚焦系统, 提高了耦合效率。实验对两种不同掺杂浓度和不同形状的 Cr : LiSAF 晶体进行了研究, 在 850nm 的中心波长处获得最大输出功率分别为 20mW 和 13mW, 斜效率分别为 10.3% 和 7.8%, 并对实验结果作了讨论。

关键词 激光二极管; Cr : LiSAF 激光器; 端面泵浦; 耦合效率

0 引言

半导体激光二极管(LD)泵浦的固体激光器以其高效、紧凑、稳定、长寿命和全固态的优势已成为激光器件发展的主流方向。新型激光晶体 Cr : LiSAF 在近红外激光二极管波长处有一吸收带, 加上它具有宽发射光谱和长的上能级寿命, 尤其吸引研究人员的关注。在这一研究方面, 国内最早是由中科院西安光机所报道的利用光纤耦合的半导体激光二极管阵列(LDA)泵浦 Cr : LiSAF 激光器¹, 并先后获得了宽带可调谐 Cr : LiSAF 激光器² 和在准连续下运转的飞秒 Cr : LiSAF 激光器³。

单个激光二极管发光面是一微小的长方形, 输出光在空间的分布不对称, 远场光分布呈椭圆高斯光束。在 LD 端面泵浦时, 将非衍射极限的泵浦光与圆高斯分布的振荡腔模最佳耦合, 高效率的准直-聚焦系统是提高输出功率和斜效率的关键。本文报道用功率为 500mW 的单发光元激光二极管端面泵浦 Cr : LiSAF 激光器连续运转的实验研究。实验中经反复比较, 我们采用复合

准直镜-柱面镜对-聚焦镜的泵浦系统, 提高了耦合效率。对两种 Cr : LiSAF 晶体进行实验, 获得最大输出功率为 20mW 和 13mW, 斜效率分别为 10.3% 和 7.8%。

1 泵浦系统的设计依据

1.1 LD 单发光元的发光特点

LD 单一发光元为 $100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 的长方形, 在与发光结平面垂直(y, z) 和平行(x, z) 的两个方向上, 激光的光场分布不对称, 由于衍射作用, 相互正交的光束有不同的发散角: $\theta = 6^\circ$ (FWHM), $\theta = 30^\circ$ (FWHM)。远场光强为椭圆高斯分布, 其基模光强可表示为⁴

$$I(x, y, z) = B_0^2 \exp \left\{ -2 \left[\frac{x^2}{\omega^2(z)} + \frac{y^2}{\omega^2(z)} \right] \right\} \quad (1)$$

$\omega(z)$, $\omega(z)$ 是光束在 x, y 方向上的束腰, 坐标原点在发光面中心。

1.2 泵浦光与腔模的耦合分析

固体激光腔的本征模一般为高斯光束, 固体

* 中国科学院“百人计划”资助项目

收稿日期: 1999-01-18

介质的有效吸收长度比腔模的共焦长度短得多,所以,腔基模束腰可以认为是一常数,腔基模也可以看成半径为 ω (基模束腰半径) 的圆柱. 椭圆泵浦光与腔模有效重叠,不但需要减小泵浦光束的发散角 θ ,而且需要改变泵浦光束横向截面的形状.

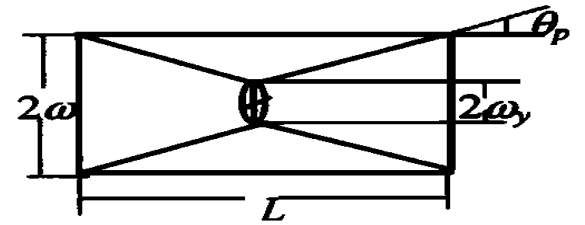


图 1 增益介质内泵浦光束和激光腔模的分布示意图
Fig.1 Schematic of the pump beam and laser mode in the gain medium

文献 5 从空间相关的速率方程出发,给出了椭圆高斯光束泵浦时,激光输出功率与重叠系数的关系为

$$P_{out} = (T/2\gamma) \eta P_{tho} f_1(\alpha\beta) [\xi - f_0(\alpha\beta)] \quad (2)$$

式中 $f_0 = [(\alpha\beta + 1)(\alpha + 1)]^{1/2} / \beta$, $f_1 = \alpha\beta[(\alpha\beta + 2)(\alpha + 2)] / [(\alpha + 1)(\alpha\beta + 1)]$, $P_{tho} = \pi I_{sat} \bar{\omega}_e / 2\eta$, $\alpha = (\omega / \bar{\omega}_e)^2$, $\xi = (p_{in} / p_{out}) f_0$ 为归一化阈值, f_1 为泵浦光与腔内基模的重叠系数 f_0, f_1 分别对应于激光器的阈值和斜效率. T 为输出镜透过率, γ 为单程对数损耗, η 为泵浦效率, ω 为腔基模束腰, $\bar{\omega}_e = \min\{\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y\}$, α 可以看成腔基模与泵浦光束横截面积之比, β 为椭圆短轴与长轴之比, $(1/\beta)$ 定义为椭圆度 $(0 < \beta \leq 1)$, I_{sat} 为饱和光强, P_{tho} 为极限泵浦阈值(基模体积为零).

分析表明,在泵浦光束的椭圆度和泵浦功率一定的情况下,参数 α 增加,斜效率增加,同时阈值增加,所以 α 存在一个最佳值,使输出功率最大,并且最佳值随泵浦功率增加而增大. 当 α 一定的情况下,即在腔基模和泵浦光束截面大小确定时,泵浦光束的椭圆度增加(β 减小),固体激光器的阈值将会增加,斜效率降低. 因此,在理想的圆柱型腔模体积中,为使激光介质的激活体积最有效地与之重叠,提高两者的耦合效率,泵浦光束半径应小于腔基模束腰半径,而且应尽量减小泵浦光束的椭圆度. 分析同时表明,一定的椭圆度也是允许存在的,因为当 β 较大时,它对阈值和斜效率的影响并不显著,这一结论有一定的现实意义.

义.

2 实验装置

依据上面的分析,经过实验的反复比较,我们采用了复合准直镜-柱面镜对-聚焦镜组合的准直聚焦系统. 如实验装置图 2 所示. 用 Melles Griot GL002 复合透镜($f = 8\text{mm}$, $NA = 0.5$) 作为准直镜,它的设计已考虑到消除球差和象散. 然后用一对柱面镜对垂直于发射结方向上的光束扩束(放大倍数为 10),减小该方向上的发散角. 仔细调节柱面镜之间及其与准直镜之间的距离,使光束成为平行光束,并尽量使远场光斑在垂直和平行方向上对称分布. 最后用 CCD 镜头($f = 12\text{mm}$) 作为聚焦镜将泵浦光聚焦于晶体内,并仔细调节晶体的位置,使聚焦后的光斑尽量细小. 测量泵浦光经此系统后的功率变化,泵浦耦合效率可达 70%.

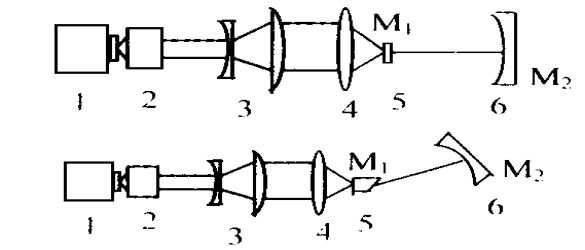


图 2 两镜腔激光器实验装置图
1. 激光二极管 2. 复合准直镜 3. 柱面无焦系统 4. 聚焦镜 5. Cr:LiSAF 晶体 6. 凹面镜

Fig.2 Schematic of the laser cavity
1 LD 2 Compound collimator lens
3 Cylindrical afocal system 4 Focusing lens
5 Cr:LiSAF Crystal 6 concave lens

泵浦光源为 CW 500mW 单发光元二极管,中心波长 673nm. 选用两种 Cr:LiSAF 晶体进行实验,一种是平面圆形薄片,厚度 2mm,掺杂浓度 5.5%. 另一种是平面-布儒斯特角切割的圆棒, $\Phi 6 \times 3\text{mm}$, 掺杂浓度 3%. 薄片的一个平面和圆棒的平面端镀双色膜(800~900nm 高反, $R > 99.5\%$; 670nm 增透, $T = 95\%$). 晶体用铜皮包裹安装在铜架上,自然冷却.

谐振腔为平凹腔,如图 2 示. 晶体镀膜的一端作为平面腔镜 M_1 , M_2 为输出镜,曲率半径 $R = 100\text{mm}$,对 850nm 激光波长的透过率 $T = 1\%$.

3 实验结果及讨论

经仔细调整,我们得到了 Cr:LiSAF 激光器

的连续运转,中心波长为 850nm .对于薄片晶体,泵浦阈值为 27mW,在 242mW 的泵浦下,获得最大输出功率 20mW,斜效率 10.3% .输入-输出曲线如图 3 所示 .对于圆棒晶体,阈值泵浦功率为 75.6mW,功率为 284mW 时最大输出功率 13mW,斜效率 7.8% .输入-输出曲线如图 4 所示 .

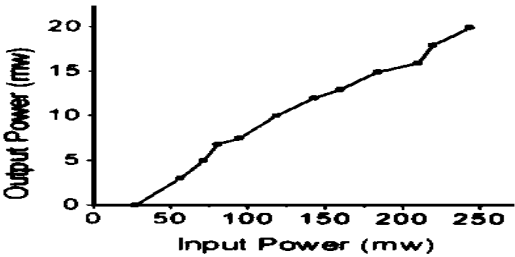


图 3 薄片晶体输入-输出曲线
Fig.3 Output power versus input power for thin crystal

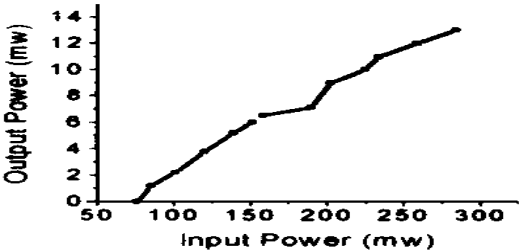


图 4 棒形晶体输入-输出曲线
Fig.4 Output power vs input power for cylinder crystal
实验发现,两种晶体的斜效率随泵浦功率增

加均有明显降低,测出斜效率随泵浦功率增大的变化曲线如图 5 所示 .图中曲线 a 表示薄片晶体的变化情况,曲线 b 表示布氏角切割的圆棒的变化情况 .

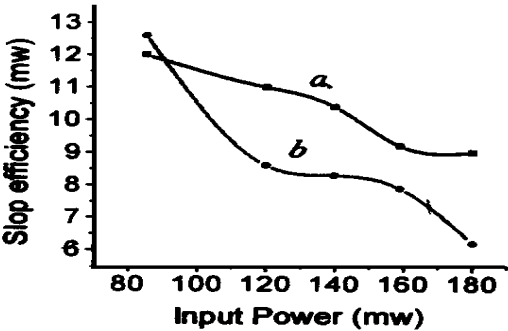


图 5 斜效率随输入功率的变化曲线
Fig.5 Slope efficiency versus input power

我们知道 Cr : LiSAF 晶体的热导性较差,随着泵浦功率的增加,其热效应比较明显,而且泵浦功率增加也易使泵浦光高阶模振荡,光束发散角增大 .

从图 5 中我们也可以看到薄片晶体的斜效率随泵浦功率的变化幅度较小 .根据谐振腔理论,对于薄片晶体,泵浦光的焦斑应在平面腔镜上,即晶体的前表面内侧,而对圆棒晶体,其焦斑在晶体的吸收长度中心,在一定的发散角下,泵浦光与腔模的有效重叠,前者要好于后者 .可以认为,前者泵浦系统的耦合效率要高于后者 .

参考文献

- 1 阮双琛,杜戈果,侯洵 .半导体激光器泵浦的 Cr : LiSAF 激光器 .光子学报,1997,26(3) :201~203
- 2 杜戈果,毛艳丽,阮双琛 .半导体激光泵浦的 Cr : LiSAF 可调谐激光器 .中国激光,1998,25(3) :209~212
- 3 毛艳丽,阮双琛,杨建军 .LD 泵浦准连续运转 Cr : LiSAF 激光器谐振腔的设计与实验研究 .光子学报,1997,26(12) :1107~1110
- 4 Butler J K,Sommers H S,Kressel Jr A .Appl phys Lett,1970,17(5) :403~406
- 5 Laporta P,Bussard M .Design Criter for mode size optimization in diodepumped solid-state-lasers .IEEE J Quant Electron,1991,27(10) :2319~2326

LASER DIODE END-PUMPED CW Cr³⁺LiSAF
LASER WITH HIGH EFFICIENCY

Long Jinghua^{*}, Zhang Fan, Ruan Shuangchen, Hou Xun, Liu Yuhua^{**}

^{*}Physics Department of Northwest University, Xi'an 710069

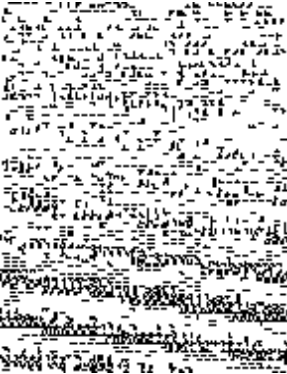
State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and
Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068

^{**}Department of Applied Physics, University of Foshan, Foshan 528000

Received date: 1999-01-18

Abstract High efficiency collimating and focusing system for the LD end-pumped the Cr³⁺LiSAF laser is analyzed and reported in this paper. The pump source is 500 mW laser diode, and two kind of Cr³⁺LiSAF crystals with different Cr concentration and shape are performed. It is obtained the CW operation with this pump system at the wavelength of 850 nm. The maximum output power is 20 mW and 13 mW, the slop efficiency is 10.3% and 7.8% respectively.

Keywords Laser diode; Cr³⁺LiSAF laser; End-pumped; Coupling efficiency



Long Jinghua was born on August 24th, 1972. She graduated from Physics department of Shaanxi Normal University in 1993. Since 1996 she has been working towards the M.S degree in the Physics department of Northwest University.