

文章编号: 1001-4322(1999)05-0521-06

高效 LD 端面泵浦 CW Cr:LiSAF 激光器的实验研究^{*}

阮双琛^{1,2}, 龙井华¹, 张 帆¹, 侯 洵¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060)

摘 要: 在优化准直聚焦系统的基础上, 对 LD 端面泵浦 Cr:LiSAF 的连续运转进行了实验研究, 从掺杂浓度为 5.5% 的 Cr:LiSAF 晶体获得最大输出功率 41mW, 斜效率 21%, 中心波长 857nm; 借助 CCD 测量系统, 研究了 LD 输出光在泵浦系统中的演化, 测量了不同腔型输出激光的光斑, 分析了模式匹配对激光输出特性的影响。

关键词: LD; Cr:LiSAF

中图分类号: TN241; TN781

文献标识码: A

半导体泵浦固体激光器以其体积小、重量轻、效率高、长寿命和全固态等优点成为国际上新型激光器的研究热点。Cr:LiSAF 晶体有非常宽的辐射线宽(780~1020nm), 它增益高, 激发态吸收小, 有更长的上能级寿命和足够的发射截面等优势, 并且在红光区域有很强的吸收, 适合于红光半导体激光器直接泵浦。我们曾报导过 Ar⁺ 泵浦的 Cr:LiSAF 激光器^[1,2] 和半导体泵浦的 Cr:LiSAF 激光器^[3~5], 在以前研制的半导体泵浦 Cr:LiSAF 连续和准连续运转的基础上, 又研制成功了准连续锁模运转的 Cr:LiSAF 激光器, 并从实验上对微型 Cr:LiSAF 激光器中泵浦光与输出光光斑进行了测量^[6]。本文在优化准直聚焦系统的基础上, 对 LD 端面泵浦 Cr:LiSAF 的连续运转进行了实验研究, 从掺杂浓度为 5.5% 的 Cr:LiSAF 晶体获得最大输出功率 41mW, 斜效率 21%, 中心波长 857nm; 借助 CCD 测量系统, 研究了 LD 输出光在泵浦系统中的演化, 测量了不同腔型输出激光的光斑, 分析讨论了模式匹配对激光输出特性的影响。

1 泵浦光的准直及光强分布的测量

由于 LD 输出的光具有不对称、高度发散及像散的特点, 为获得高的增益, 提高泵浦光与激光腔模的高效匹配, 必须要通过一定的准直聚焦系统来消除这些不利因素。

泵浦系统包括泵浦源和准直聚焦系统, 如图 1 所示。图中 1 为 LD, 准直聚焦系统由准直镜(2)、柱面镜对(3)、聚焦镜(4)构成。LD 发射面尺寸为 $100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ($x \times y$, x, y 分别表示与 LD 结平面平行和垂直的方向, 图示为 xoz 平面), 远场发散角 $\theta_x = 6^\circ$, $\theta_y = 30^\circ$ 。描述光束质量的 M^2 因子分别为 $M_x^2 \approx 12$, $M_y^2 = 1$, 就是说在水平方向光束为非衍射极限光, 它是限制泵浦光与腔模匹配的主要因素。LD 输出光远场光强分布为椭圆, 光斑轮廓为一竖直的长方形。

准直镜是复合透镜($f = 8\text{mm}$, 数值孔径 $A = 0.5$), 此镜的优化设计已考虑到修正球差、慧差和像散, 其大的数值孔径利于收集垂直方向大的发散角。柱面镜对由两个曲率半径不同的

* 国家 863 激光技术领域资助课题

1999 年 6 月 20 日收到原稿, 1999 年 9 月 20 日收到修改稿。第五届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文
阮双琛, 男, 1963 年 10 月出生, 硕士, 研究员。现调往深圳大学工程技术学院工作

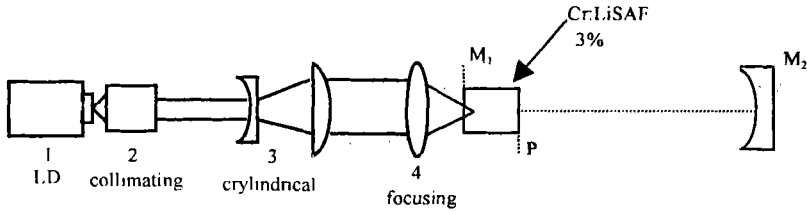


Fig. 1 Collimating and focusing system

图 1 准直聚焦系统及平凹腔示意图

柱面镜组成,在泵浦光波长附近镀增透膜,透过率大于 95%,两镜在水平方向的放大率为 10,对该方向上的光束进行扩束,但对垂直方向的光没有改变,从而减小了泵浦光的椭圆度。事实上准直镜和柱面镜对的作用正是修正 LD 输出光的 M^2 因子,使之减小,从而接近衍射极限。最后用 CCD 镜头($f=12\text{mm}$)作为聚焦镜把泵浦光聚焦于晶体。此系统对泵浦光的耦合效率为 70%。

在实验中,我们将准直镜紧贴在 LD 发射窗前,经准直镜后光束在远处纸屏上呈一水平细亮线,此时,垂直方向上大的发散角得到压缩。水平方向上小的发散角使光几乎从镜的中心部分通过,没有明显的变化。泵浦光经过柱面镜对后在远处屏上呈现为矩形光斑,改变两镜之间的距离,矩形的长宽比例发生变化,经仔细调节,我们让它尽量成一正方形。最后,泵浦光经聚焦镜后呈一非常小的光斑,这时,可以将晶体放在屏的位置再做精细调节,直到泵浦光在晶体为一细小均匀的光束。在加上输出腔镜调节出光的过程中,还需精细调节聚焦镜和晶体的位置。各个元件的机械位置对调节非常敏感,因此整个过程需要利用一纸屏来定标进行精细调节,而且应避免振动。

为了研究泵浦光经准直聚焦系统的演化情况,我们对系统各处的光斑强度分布作了测量。

测量系统由 CCD 探测器、视频监视器、图像处理卡和计算机等组成。该系统能对连续激光和脉冲激光进行采集处理。通过监视器调节激光强度,使光强度最大值临近 CCD 探测器的饱和值,同时调节 CCD 的位置,使监视器上的图像清楚。图像信号由图像采集卡采集,并转换成数字信号进行存贮,并得到某一位置光束的三维强度图分布曲线。通过光束的强度分布,可以

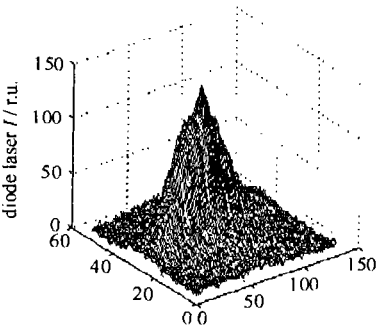


Fig. 2 Pump light of the LD (from the emitting surface 2.5 cm)

图 2 LD 直接输出的泵浦光 (距发射面 2.5cm 处采像)

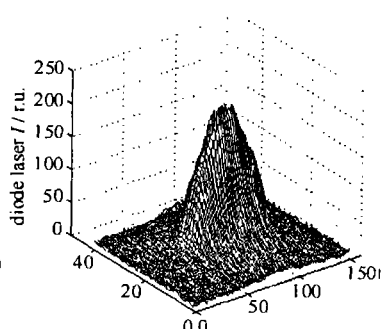


Fig. 3 Pump light after collimating lens (at the surface of the lens)

图 3 经准直镜后的泵浦光 (在准直镜出射面处采像)

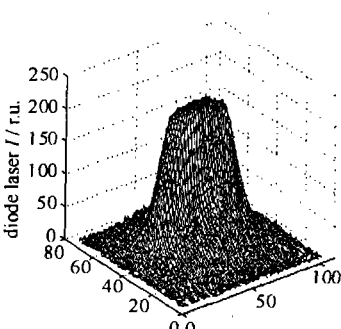


Fig. 4 Pump light after first cylindrical lens (at the surface of cylindrical lens)

图 4 经第一个柱面镜后的泵浦光 (在柱面镜的出射面处采像)

了解泵浦光经上述准直聚焦系统的演化情况,进而可以分析泵浦光与激光腔模的匹配。用上述测量系统,对泵浦光经过准直聚焦系统各光学元件后的强度分布进行测量,图2~图6分别给出了测量的结果。

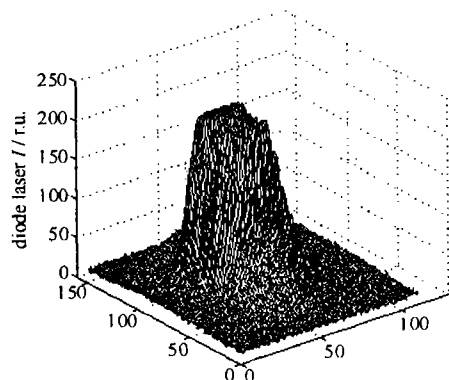


Fig. 5 Pump light after second cylindrical mirror
(from the surface of the second cylindrical mirror 2.5 cm)

图5 经柱面镜对以后的泵浦光
(在第二个柱面镜后 2.5cm 处采像)

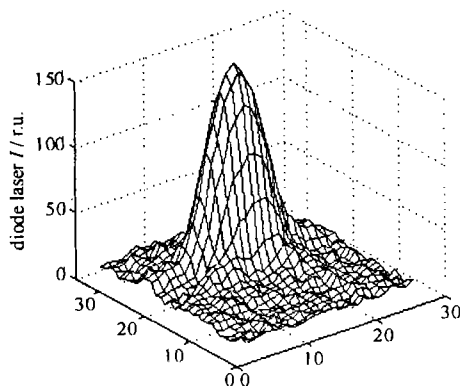


Fig. 6 Pump light after focusing

图6 聚焦以后的泵浦光
(光斑尺寸约为 $130\mu\text{m} \times 115\mu\text{m}$)

通过上述光束强度分布图可以看到,从LD直接输出的泵浦光发散度大,光斑椭圆度大,经过准直聚焦后,在垂直方向上的大的发散角得到压缩,这可以从三维图的坐标看出;光束束宽大大减小,经过聚焦后的光斑为 $130\mu\text{m} \times 115\mu\text{m}$,接近一般的腔模尺寸。从二维强度分布曲线可以看到,由于柱面镜对的扩束作用,椭圆度较大的泵浦光得到整形,在焦点处接近一圆形光斑。另一方面,聚焦后对应于LD高倍衍射极限方向(x 方向)的光斑半径较大,表明这个方向是影响泵浦光与腔模匹配的主要因素。

2 激光腔的设计及实验研究

LD端面泵浦固体激光器的基本腔型是平凹腔。在晶体的一平面端镀双色膜,对泵浦光增透,对激光高反,构成腔镜,另一腔镜为输出凹面镜。这种腔型适合中小功率的自由振荡器。另一种腔型为折叠腔,它突破了腔长的限制,激光介质放在有较小光腰的折叠臂处,保证有较低的域值,而在长臂内可以放置调Q或锁模等元件。但是折叠腔有一个固有的缺点,只要腔内有斜入射使用的球面(或柱面)反射镜,或束腰附近有带角度放置的光学元件存在,这种腔就有像散。对像散腔而言,如果腔参数选择适当,可以使上述两种元件产生的像散相互抵消,实现像散补偿^[7]。

在实验中,我们选择两种Cr:LiSAF晶体。一种晶体是两端均为平面切割的圆柱型棒,横截面直径6mm,中心长度2mm,掺杂浓度5.5%。棒的一个平面端镀双色膜,在泵浦光波长673nm附近增透,透过率 $T=95\%$;对激光波长800~900nm高反,反射率 $R>99.5\%$ 。对这种晶体,采用平凹腔进行研究。腔型结构如图1所示,镀双色膜的平面端作为腔镜 M_1 ,输出凹面镜 M_2 镀双色膜,对泵浦光增透,对激光输出透过率 $T=0.5\%$ 。

另一种Cr:LiSAF晶体是平面-布氏角切割的圆柱型棒,直径6mm,中心长度3mm,浓度3%。在平面端镀双色膜,情况和前一种晶体相同。对这种晶体,分别采用有像散存在的两镜腔

和像散补偿了的三镜折叠腔。腔型结构如图 7、8 所示,其中 M_2 在两镜腔中作为输出镜($T=0.7\%、0.5\%$)。在三镜腔中, M_2 对泵浦光和激光均为高反($R>99.8\%$), M_3 是平面输出镜,镀双色膜,对泵浦光高反,对激光部分透过,实验中,我们选择了透过率 $T=0.7\%$ 及 0.5% 的两种输出镜。像散补偿的折叠角 θ 根据公式^[7]

$$[(n^2-1)\sqrt{n^2+1}]/n^4=f\sin\theta\cdot\tg\theta/d$$

确定,同时考虑使腔工作于稳区内,我们选择 $\theta=8.1^\circ$ 。

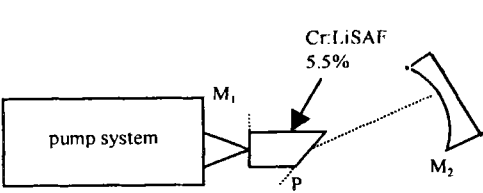


Fig. 7 Two mirrors cavity
图 7 两镜像散腔

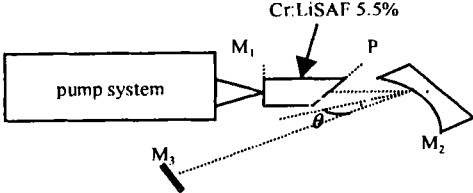


Fig. 8 Three mirrors cavity
图 8 三镜腔

Table 1 Experimental results of laser output
表 1 激光输出特性的实验结果

	plane concave cavity		two-mirror cavity				three-mirror cavity	
	$T=0.5\%$		$T=0.5\%$		$T=0.7\%$		$T=0.5\%$	$T=0.7\%$
	10℃	27℃	10℃	27℃	10℃	27℃	10℃	10℃
$P_{abs,th}/mW$	22	25	52	57	57	74	40	40
$P_{out,m}/mW$	41	29	26	18	19	13.5	2.5	17
$\eta,/\%$	21.1	16.1	18.7	13.5	12.4	10	7.0	9.2

对以上三种腔型的激光系统进行实验研究,实验装置图分别如图 1、图 7 和图 8 所示。其中,晶体棒用锡皮包裹置于铜块上,铜块通冷却水以保证晶体较低的温度。在实验中我们让晶体在通水中冷却(10℃)和室温(27℃)下空气自然冷却的两种情况下运转,以比较晶体的热效应对激光性能的影响。同时,也选取了不同透过率的输出镜作比较。对三种腔型在不同条件下的域值吸收功率 $P_{abs,th}$ 、最大输出功率 $P_{out,m}$ 和斜效率 η 列于表中。在此需要强调的一点是,平凹腔中所用 Cr:LiSAF 晶体的浓度为 5.5%,而在后两种腔中,所用 Cr:LiSAF 晶体浓度为 3%。我们测得了各种情况下的输入-输出功率曲线(见图 9)。

利用前面的光斑强度测量系统,我们又对三种腔型输出激光光斑的强度作了测量,由于输出为红外光,所以首先用红外卡接收出射光。图 10 是测量结果给出的三维强度图。可以看出,平凹腔和三镜腔输出光束质量较好,基本上属于 TEM₀₀ 模,三镜腔测量中由于光强过强,超过

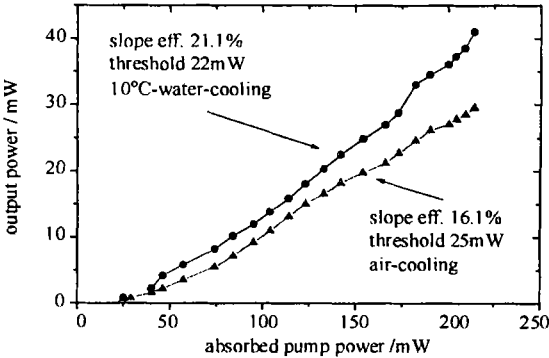


Fig. 9 Output power vs input power in plane concave cavity ($T=0.5\%$)
图 9 平凹腔系统的输入-输出功率曲线

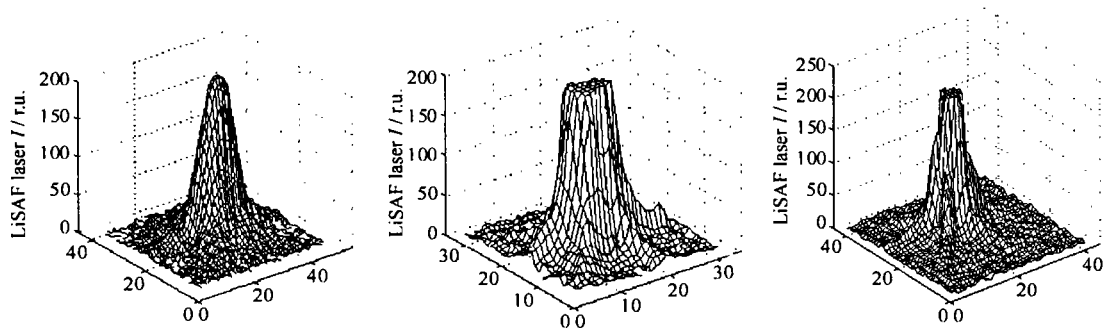


Fig. 10 Profile of the laser output in plane concave cavity (a), two mirrors cavity (b), and three mirror cavity (c)

图 10 平凹腔(a), 二镜腔(b)和三镜腔(c)的激光强度分布

了 CCD 探测的饱和值,故测量效果较差。两镜像散腔的输出光斑具有明显不对称的特点。如果我们将这些结果和 LD 直接输出光的测量结果相比,可以清楚地看到 LD 泵浦固体激光器的光束质量远比 LD 的光束质量高,这是全固化激光器受到青睐的原因之一。

3 实验结果分析

(1) 晶体浓度对输出特性有很大的影响。平凹腔中高浓度的棒易于产生粒子数反转,故而域值低,而且输出功率大,斜效率高。实验中获得了 41mW 的最大输出功率。虽然三镜腔也有较低的域值,但在实验中,我们只选用了浓度为 3% 的晶体,因此它与平凹腔相比的优越性并没有显示出来。

(2) 像散补偿后的三镜折叠腔比两镜像散腔有更低的域值。这是因为三镜腔有更细的光束腰斑,使其吸收功率密度变大,易于产生粒子数反转。但是它的输出功率和斜效率较低,原因在于聚焦后的泵浦光光斑半径(测量后约为 $130\mu\text{m} \times 115\mu\text{m}$)大于腔模半径($55.2\mu\text{m} \times 54.2\mu\text{m}$),两者的耦合效率较低。而在像散腔中,腔模有较大的半径($197.6\mu\text{m} \times 188.5\mu\text{m}$),泵浦光与之有较好的耦合。可见,如果要使泵浦光在三镜腔中与腔模高效耦合,还需要进一步提高泵浦系统的效率,使泵浦光光斑半径减小到小于腔模半径。这样一来,可以提高腔内功率,同时利用三镜腔低域值、高束质及长腔长的特点,便于在腔内加倍频晶体或可饱和吸收体。

(3) Cr:LiSAF 晶体有明显的热效应。晶体经冷却后,域值降低,输出功率增大,斜效率增大,而且在泵浦功率增加时,这种效应更加明显。实验中 LD 最大驱动电流 0.88A 时,进入晶体的泵浦光功率为 214mW。对于浓度为 3% 的晶体,当吸收功率较低时(小于 300mW),其主要热源是量子缺和上转换所产生的热,而温度淬灭的影响较小。对于浓度为 5.5% 的 Cr:LiSAF 晶体,其上转换和温度淬灭的影响相对较大。晶体内部距中心轴处的温度与晶体表面的温度之差为^[8]: $\Delta T = (Q_0/4\pi\kappa l)[1 + 2\ln(R/r)]$, Q_0 为晶体吸收的热量, κ 为材料的热导率, l 为吸收长度, R 为棒的外径。Cr:LiSAF 有较小的热导率,而浓度大的晶体有更短的吸收长度,因此其内部温度变化较大。晶体内的三种热源与温度有关的是上转换和温度淬灭,它们对上能级反转粒子数的影响由下式决定^[9]:

$$\frac{dN_2(r,z)}{dt} = Rr_p(r,z) - N_2(r,z)\left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right) - (\sigma_r - \sigma_{ESA})\frac{cs(r,z)S}{n}N_2(r,z) - \gamma N_2^2(r,z)$$

式中 τ_r 和 τ_{nr} 分别是辐射和非辐射寿命, γ 是上转换系数, $s(r,z)$ 表示归一化的光子数分布函数, S 为 t 时刻腔内总光子数。可见,晶体的热效应直接影响介质的上能级粒子数。对于四能级

系统、高掺杂的介质就更为明显。

(4) 不同的腔结构有不同的最佳输出透过率。对浓度为 3% 的棒, 在三镜腔中, $T=0.7\%$ 时的最大输出功率和斜效率都要高于 $T=0.5\%$ 的情况, 而在两镜像散腔中情况正好相反。可见, 三镜腔对应的最佳透过率较大, 而两镜腔对应的最佳透过率小。一定泵浦功率下, 激光器的最佳输出透过率为^[10] $T_{\text{opt}} = \sqrt{2G_0 l \alpha} - \alpha$, 其中 $2G_0 l$ 为小信号往返增益, α 为腔内无用往返损耗(激光器内总损耗包括有用输出损耗和无用往返损耗)。可见随着 $2G_0 l$ 增大, 对应会有更大的 T_{opt} 和输出功率。三镜腔的腔模半径小, 相应的吸收功率密度大, 小信号增益大, 因此它的最佳输出透过率就大, 从而输出功率也就会增大。

参考文献

- 1 阮双琛, 侯 洵, 王水才等. 可调谐连续波 Cr:LiSAF 激光器的研究. 激光与光电子学进展, 1995, 11:9~10
- 2 Ruan S C, Wang S C, Hou X, et al. Generation of 45fs pulses from a Cr:LiSAF laser. 17th Congress of International Commission for Optics. Taejon, Korea, 1996
- 3 杜戈果, 毛艳丽, 阮双琛. 半导体泵浦 Cr:LiSAF 可调谐激光器. 中国激光, 1998, A25(3):209~212
- 4 毛艳丽, 阮双琛, 侯 洵. 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
- 5 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):201~202
- 6 阮双琛. 微型 Cr:LiSAF 激光器中泵浦光与输出光光斑形状的测量. 光子学报, 1999, 28(5):420~423
- 7 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995
- 8 Kopf D, et al. *Opt Lett*, 1994, 19(24):2143
- 9 Eicherholz Jason M, et al. *IEEE J*, 1998, 34(5):910
- 10 陈钰清, 王静环. 激光原理. 杭州: 浙江大学出版社, 1992

HIGH EFFICIENCY END-PUMP CW Cr:LiSAF LASER

RUAN Shuang-chen, LONG Jing-hua, ZHANG Fan, HOU Xun

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

ABSTRACT: The property of the LD pump source and Cr:LiSAF crystal laser were described. In the optimum collimating the pump light, we get 41 mW output power, and profiles of pump source and laser output at different positions are studied.

KEY WORDS: LD; Cr:LiSAF