

文章编号: 1001-3806(2007)01-0001-03

LD 阵列半环形对称抽运的固体激光器

郭云霄¹, 巩马理^{1*}, 薛海中², 翟刚³, 李晨¹, 闫平¹, 柳强¹, 陈刚¹

(1. 清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心, 北京 100084; 2. 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071; 3. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为解决激光晶体传导冷却与输出光束能量分布对称性之间的矛盾, 针对半导体激光器 (LD) 抽运高功率固体激光器, 提出了半环形侧面抽运的方式。对多 LD 阵列同时抽运激光晶体的吸收与增益情况进行了计算, 并在实验中予以验证, 采用半环形对称抽运的方式, 在 20Hz 的工作频率下, 以总抽运单脉冲 276mJ 的能量获得最大 63.6mJ 的圆形对称脉冲激光输出, 斜效率 34%。实验结果表明, 采用对称抽运结构能够有效地改善输出光束的空间分布, 获得较为对称的激光输出。

关键词: 激光器; 侧面抽运; 激光晶体; 对称; 半导体激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Sem i-circumferential LD arrays symmetrically-pumped solid-state lasers

GUO Yun-xiao¹, GONG Ma-li¹, XUE Hai-zhong², ZHAI Gang³, LI Chen¹, YAN Ping¹, LIU Qiang¹, CHEN Gang¹

(1. Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: To reduce the asymmetry of the output laser beam caused by the geometry of the conduct-cooled laser crystal in side pumped solid-state lasers, two pump modules were symmetrically placed and a semi-circumferentially mounted LD arrays were taken in each pump module. Numerical calculation and experiment were made, a maximum output power of 63.6mJ was gotten with 276mJ pump power at a frequency of 20Hz, the slope efficiency was 34%. Both numerical and experimental results prove the symmetrical geometry can effectively improve the beam quality and approximate symmetrical laser distribution can be obtained.

Key words: lasers; side pump; laser crystal; symmetrical; LD

引 言

半导体抽运固体激光器 (diode pumped solid-state laser, DPSSL) 使用半导体激光器 (laser diode, LD) 作为抽运源抽运固体激光介质, 以其效率高、寿命长、光束质量好、可靠性强等一系列优势, 被普遍应用于机械加工、医疗、航空等各个领域, 自上世纪 90 年代开始得到了迅速的发展^[1,2]。

在 DPSSL 系统中, 为稳定工作温度, 需对 LD 及激光晶体进行温度控制, 通常采用的冷却方式有水冷和传导冷却两种。对于高功率 DPSSL 普遍采用的侧面抽运方式, 水冷模式会降低系统的移动性, 而传导冷却则因抽运系统几何上的不对称而导致输出激光的不对称, 降低了激光输出的光束质量。为解决这一矛盾, 作者采用 LD 阵列半环形对称抽运的结构制作激光器,

在 20Hz 的工作频率下, 以总抽运单脉冲 276mJ 的能量获得最大 63.6mJ 的圆形对称脉冲激光输出, 斜效率 34%, 同时证明采用对称抽运结构能够有效地改善输出光束的空间分布, 获得较为对称的激光输出。

1 抽运结构

目前, DPSSL 中通常采用的抽运方式有端面抽运和侧面抽运两种^[1,3], 在端面抽运模式中, 抽运光与激光谐振腔的模式可以获得良好的匹配, 激光介质对抽运光的吸收充分, 能够较容易地获得阈值低、斜效率高的激光输出, 且装置简单。而在高功率固体激光器中, 需要采用大功率的半导体激光阵列作为抽运源, 由于阵列的发光面较大, 不利于端面抽运的形式, 因此, 在高功率的 DPSSL 中普遍采用侧面抽运的方式抽运固体激光介质^[2~4]。

LD 发射抽运光的中心波长会随工作温度的升高而加长, 当抽运光波长发生偏移后, 激光器的抽运效率会急剧降低, 与此同时 LD 的效率也会降低, 阈值将会升高^[5,6]; 温度的升高也会在激光介质内产生热应力

作者简介: 郭云霄 (1980-), 男, 博士研究生, 现主要从事半导体抽运固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gongml@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-12-16; 收到修改稿日期: 2006-01-09

及热透镜效应,影响激光输出的光束质量和转换效率^[7,8]。因此,要使 D PSS L 正常工作,必须对 LD 和激光介质进行冷却,将 LD 和激光晶体的工作温度稳定在一定范围内。

侧面抽运固体激光器一般采用水冷或是传导冷却的方式对激光晶体进行散热^[1,2]。采用水冷系统对激光晶体和 LD 进行冷却,能够从结构上保证激光介质所吸收抽运光能量分布的对称性,但由于使用液体作为冷却媒质,体积一般都比较庞大,不便于移动,实际使用中的移动性受到比较大的限制;传导冷却的方式一般使用金属作为热沉,用半导体制冷器作为冷却装置,省却了庞大的水冷却系统,实现了激光器的便携性,但由于热沉的存在使得在该结构中激光介质所吸收抽运光的能量分布不是圆形对称,影响了激光输出的模式,输出激光很难获得圆形的能量分布。

为解决侧面抽运激光器移动性与激光输出对称分布的矛盾,采用了 LD 阵列半圆型对称抽运双激光介质的抽运结构。其结构如图 1 所示。

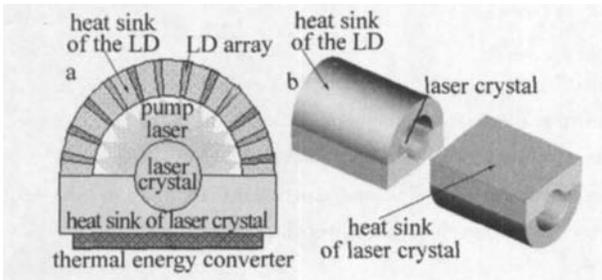


Fig 1 Schema of semi-circumferential LD arrays symmetrical pumped solid-state laser
a—two dimension schema of the section b—three dimension schema of the pump system

图 1a 为抽运系统的截面示意图,激光介质的热沉包围了激光介质一半的体积,抽运光仅从激光介质上部的半圆形表面进入介质内部并被其吸收。与普通抽运方式中通常采用的传导冷却方式所不同的是,在激光器结构中,将两个抽运单元串联,并使 LD 阵列对称排列,结构图如图 1b 所示。两个模块所产生的不对称光斑在空间上产生交叠,互相补充,从而使激光输出的空间分布近似成圆形分布,获得较高的光束质量。

实验中采用了 1.0% 掺杂的 Nd YAG 晶体作为激光介质,外形尺寸为 $\varnothing 5\text{mm} \times 60\text{mm}$,为了抑制晶体内放大的自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 效应的产生,将晶体的表面进行了打毛处理。抽运源采用了单条峰值功率 60W 的 LD 阵列半环形封装,LD 阵列发光面到晶体表面的距离为 6.5mm,每个半环封装 15 条 LD 阵列,共使用 30 条 LD 阵列对两条激光晶体进行抽运。

图 2 是实验所使用结构的示意图。LD 阵列在 LD

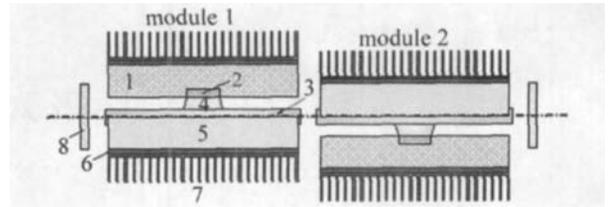


Fig 2 Structure of the experimental system
1—heat sink of the LD; 2—LD array; 3—Nd YAG crystal; 4—pump laser; 5—heat sink of the laser crystal; 6—TEC; 7—radiating fin; 8—cavity lens
热沉上呈半圆形排列,LD 阵列发光区域的长度为 10mm,抽运光从 LD 阵列出发到达 Nd YAG 晶体时对应抽运区域为晶体长度方向上 25mm~35mm 的位置。为进一步扩展能量并考虑到散热问题,分别将晶体热沉和 LD 热沉的底面做成 60mm×60mm,用于安置半导体制冷装置和散热片,散热片外部还安装了风扇用于强迫对流换热,风扇未在图 2 中画出。

模块 1 和模块 2 的构成元素相同,只是两模块在空间的摆放上呈对称分布。模块 1 和模块 2 中的激光晶体吸收抽运光后产生的激光辐射在由激光腔镜 8 组成的谐振腔内混合成为一体,最终形成空间分布对称性好的激光输出。

2 数值计算

在进行实验之前,采用光线追迹的方法对晶体吸收抽运光的情况进行了数值计算。针对单个模块的情况,计算抽运光从上半个圆周进入晶体时,晶体内吸收抽运光能量的分布情况如图 3 所示。其中图 3a 是晶

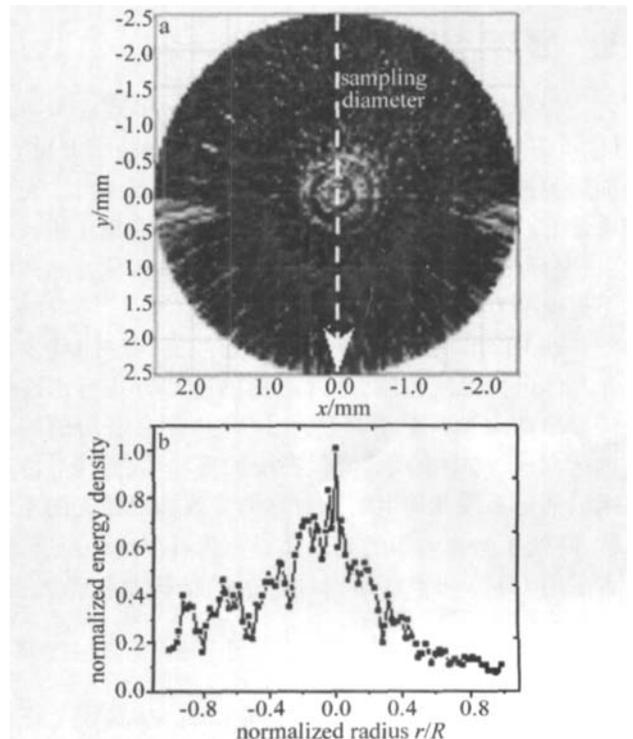


Fig 3 Distribution of the absorbed energy solved by the ray-tracing program
a—distribution in the section b—distribution along the diameter

体吸收的抽运光能量沿激光晶体长度方向叠加后得到的能量密度分布图,图 3b 是沿采样直径的能量分布曲线。从图 3 可以看出,能量的吸收主要集中在晶体的中心部位,最大值产生在晶体的中心,但吸收的分布呈现出明显的不对称,晶体上部吸收抽运光的能量要显然高于下半部吸收的能量。

分别计算两个模块中晶体吸收抽运光的分布情况,并将两个模块中抽运光的吸收情况进行空间上的叠加后可以得到图 4 的结果。可以看出,由于抽运结

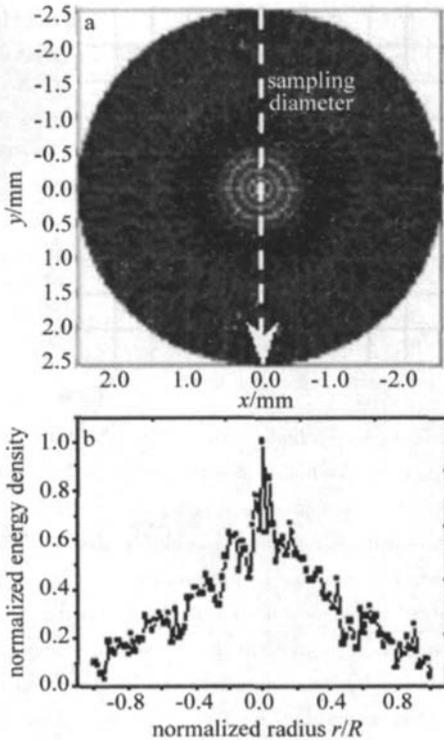


Fig 4 Combined density of two crystals absorbed energy

a—distribution in the section b—distribution along the diameter

构的对称设置,已经消除了由于半圆形抽运带来的不对称性,此时晶体对抽运光的吸收分布基本上呈现出圆形高斯分布的形状,这样的分布非常有利于抽运光与激光输出的模式匹配,容易获得低的阈值与高的斜效率。

在不考虑激光腔内损耗的情况下,激光器所输出的激光在晶体中所获得的增益与晶体吸收抽运光的能量密度基本成正比。所产生的激光在通过模块 1 后,将获得与图 3a 上抽运光能量吸收密度分布近似的增益;当激光再通过模块 2 后,由于模块 1 与模块 2 的对称放置,将最终获得与图 4a 上抽运光能量吸收密度分布近似的增益,其分布基本呈中心对称状态。即所产生的激光在腔体内经过一次单程传输,所获得的增益将等于在模块 1 和模块 2 中增益的叠加,其分布基本呈中心对称状态,消除了由于单个模块的不对称抽运而引入的激光增益的不对称。

3 实验结果

实验中采用了上面叙述的抽运结构,LD 阵列和激光晶体均使用半导体制冷器进行温度控制,将工作温度控制在 20℃,以保证激光晶体对 LD 输出抽运光的高效吸收。所用 LD 在驱动电流 55A 时单条峰值功率 40W,脉宽 230μs,总的抽运单脉冲能量为 276mJ,获得最大 63.6mJ 的脉冲激光输出,激光输出的频率为 20Hz。输出单脉冲能量和抽运电流之间的关系如图 5 所示,激光器阈值电流 28A,斜效率 34%。

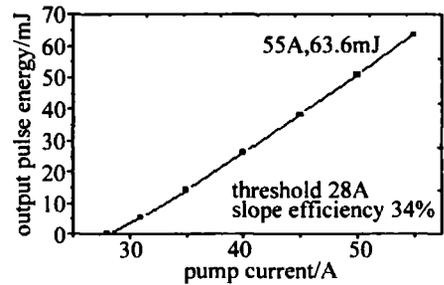


Fig 5 Output pulse energy versus pump current

对输出光斑的形状进行了测量,图 6 中给出了激光器输出激光的近场光斑形状,图 6a 是单个模块工作时的光斑形状,图 6b 是两模块对称抽运时的光斑形状;与之类似,图 7 中给出了激光器输出激光的远场光斑形状,图 7a 是单个模块工作时的光斑形状,图 7b 是两模块对称抽运时的光斑形状。

从图 6 和图 7 可以看出,单一模块工作时,激光器输出光斑的形状基本为半圆形,且中心位置的光强略有下降;当两模块对称抽运时,激光器输出的光斑形状为圆形,且由于对称叠加使得中心光强比单模块工作有明显增强,且呈现出中心强边缘弱的分布。

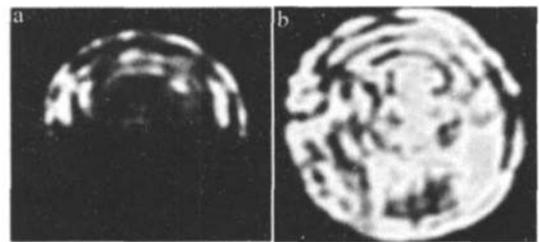


Fig 6 Near-field figure of the laser output

a—working with one pump module b—working with two pump modules

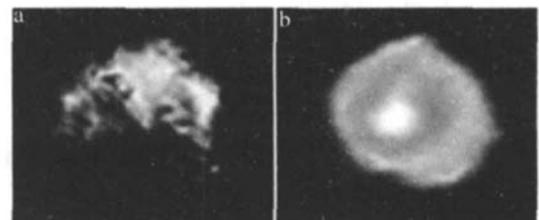


Fig 7 Far-field figure of the laser output

a—working with one pump module b—working with two pump modules

如参考图像不变,输入同样大小的字母“F”和“V”,相关结果见图2。

5 结论

提出了一种新型的旋转及尺度不变的圆谐梅林滤波器,该滤波器是通过利用圆谐展开函数的旋转不变性和梅林变换的尺度不变性综合而出,圆谐梅林变换对于不同的 p, q 值,就可以构造出一类相关滤波器,并且它们是旋转和尺度不变的。计算机模拟实验证明,该滤波器能很好地提取有尺度、旋转畸变物体的角点和边缘,其中角点尤为明显;而且该滤波器对孤立角点的输出峰值明显低于由两条边相交所成角点处的相关峰值,可以用角点处的相关峰值判断边的结构。

参考文献

- [1] VANDER-LUGT A. Signal detection by complex spatial filtering [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, IT-10 (2): 139 ~ 145.
- [2] HSU Y, ARSENAULT H. Rotation-invariant digital pattern recognition using circular harmonic expansion [J]. Appl Opt, 1982, 21 (22): 4012 ~ 4015.
- [3] YANG B Y, FENG D Y. Method for determining expansion centers for circular harmonic filter [J]. Optoelectronic Technology & Informa-

tion, 2005, 18 (3): 63 ~ 66 (in Chinese).

- [4] YU F T S, LI X, TAM E *et al*. Rotation invariant pattern recognition with a programmable joint transform correlator [J]. Appl Opt, 1989, 28 (22): 4725 ~ 4727.
- [5] MU G G, WANG Zh Q, WANG X M. The effects of rotation and scale change with amplitude-compensated filter [J]. Acta Optica Sinica, 1988, 8 (8): 764 ~ 766 (in Chinese).
- [6] CHENG H Q, NIE Sh P, BAN SL *et al*. The application of orthogonal Fourier-Mellin moments in optical pattern recognition [J]. Optoelectronic Engineering, 1996, 23 (4): 16 ~ 21 (in Chinese).
- [7] WANG Sh F. Application and theory of information optics [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003. 211 ~ 212 (in Chinese).
- [8] ZHANG W J, SHEN Y L. A minimizing algorithm for sum of disjoint products [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 1999, 19 (4): 15 ~ 19 (in Chinese).
- [9] CHEN X W, CHEN Zh P. Rotation invariant amplitude phase composite circular harmonic filter [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16 (3): 373 ~ 377 (in Chinese).
- [10] SUN Y, WANG Z Q, MU G G. Amplitude compensated matched filters using circular harmonics expansion and a Mellin transform [J]. Journal of Applied Optics, 1990, 29 (34): 4779 ~ 4783 (in Chinese).
- [11] RAVI CHANDRAN G, CASASSENT D. Advanced in-plane rotation invariant filters [J]. IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intelligence, 1994, 16 (4): 415 ~ 420.

(上接第3页)

实验中 LD 工作在 20Hz, 采用半环形对称抽运的结构后, 单个模块中晶体与热沉大面积接触获得了良好的制冷效果, 激光器工作稳定, 从而避免了水冷系统的使用。同时从计算和实验的结果可以看出, 激光在腔体内单程传播所得到的增益是两个模块中增益的叠加, 单个模块的抽运不对称性因为两个模块的对称放置而得到了补偿, 从而获得了圆形对称的激光输出。

4 结论

对 LD 抽运固体激光器的半环形对称侧面抽运结构进行了分析与计算, 并进行了相关的实验研究。计算结果与实验结果说明, 对称抽运的结构能够有效地改善激光器输出光斑的能量分布, 获得较为对称的激光输出, 同时又能对激光晶体实施有效的传导冷却, 免除了复杂的水冷系统。实验中获得了最大 63.6mJ 的脉冲激光输出, 斜效率 34%, 光光转换效率达到 23.0%。可以预期, 通过能量的拓展等手段, 在进一步的实验中, 将能获得更高的单脉冲输出和效率。采用半环形对称侧面抽运的结构制作固体激光器, 也将是

获得高对称性低阶激光输出与解决侧面抽运固体激光器移动性的有效途径。

参考文献

- [1] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed, Berlin: Springer-Verlag, 1999. 312 ~ 315.
- [2] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R *et al*. Laser theory [M]. 5th ed, Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 273 ~ 274 (in Chinese).
- [3] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, 24 (6): 895 ~ 912.
- [4] MAO Sh Q, HUANG T, WEN Zh Y *et al*. Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser [J]. Laser Technology, 1997, 21 (3): 185 ~ 188 (in Chinese).
- [5] KONDOW M, KITATAN I T, NAKAHARA K *et al*. Temperature dependence of lasing wavelength in a GaInAs laser diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12 (7): 777 ~ 779.
- [6] PANKOVE J. Temperature dependence of emission efficiency and lasing threshold in laser diodes [J]. IEEE J Q E, 1968, 4 (4): 119 ~ 122.
- [7] NEUENSCHWANDER B, WEBER R, WEBER H P. Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities [J]. IEEE J Q E, 1995, 31 (6): 1082 ~ 1087.
- [8] NEUENSCHWANDER B, WEBER R, WEBER H P. Thermal lens and beam properties in multiple longitudinally diode laser pumped Nd:YAG slab lasers [J]. IEEE J Q E, 1996, 32 (3): 365 ~ 370.