

文章编号: 1001-3806(2003)06-0551-03

## 二极管泵浦圆盘激光器技术研究进展\*

王鹏飞 张 栋 吕百达

孙年春

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

(成都东骏激光公司, 蒲江, 611630)

**摘要:** 概述了二极管泵浦薄片圆盘激光器的技术进展, 分析了功率定标放大的技术方案和相关实验结果, 并对实际应用存在的问题进行了讨论。

**关键词:** 圆盘激光器; 二极管泵浦; 功率定标; 高功率

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Recent advances of diode-pumped thin disc-laser

Wang Pengfei, Zhang Dong, Lü Baida

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Sun Nianchun

(Chengdu Dongjun Laser Company, Pujiang, 611630)

**Abstract:** Recent advances of diode-pumped thin disc-laser are reviewed. The power-scalable experiment schemes and related results are analyzed. Some problems for practical applications are discussed too.

**Key words:** disc-laser; diode pumping; power scaling; high power

## 引 言

二极管激光泵浦的固体圆盘激光器是一类有潜力的高功率激光源, 其主要优点是能有效去除增益介质的热沉积, 在获得高功率激光输出同时, 保持高效率和高光束质量。笔者从物理概念、定标放大实验技术方案、相关实验结果以及实际应用中存在的问题几方面, 对二极管泵浦高功率圆盘固体激光技术中的研究进行分析。

### 1 二极管泵浦圆盘激光器的物理概念

在一般高功率棒状固体激光器中, 激光晶体在泵浦中产生的热透镜效应和热致应力双折射是严重的问题。为了减少热透镜效应, 板条激光器之类的激光器结构得到发展。但棒和板条均存在相对于激光光束的横向热流, 难于兼顾二极管泵浦高功率固体激光器高光束质量的要求, 因此提出了薄片圆盘激光器的概念。

\* 国家高技术基金及华中科技大学激光技术国家重点实验室基金资助项目。

作者简介: 王鹏飞, 男, 1977 年 9 月出生。硕士研究生。主要从事高功率激光技术的研究。

收稿日期: 2002-11-29; 收到修改稿日期: 2003-02-20

圆盘激光器的设计原理较为简单, 就是把激活介质加工成薄的圆盘, 平表面上安装一个散热器, 该平面还是激光器的反射镜之一。这一结构的一个优点在于: 允许非常高的功率密度但在晶体内不会有太高的温升。在纵向泵浦的平顶泵浦光束作用下这种结构可以产生垂直于圆盘表面、几乎均匀的一维热流, 增益介质不存在横向热梯度, 因而热效应影响较小<sup>[1]</sup>。这种设计相比于传统方式大大减小了热畸变, 特别适合于需要高泵浦密度的准三能级系统。

准三能级系统 Yb:YAG 增益介质是是目前优先选用的圆盘材料, 它表现出了一系列比传统的掺 Nd 介质更适用于二极管泵浦的特性: 低的量子亏损 (91% 的量子效率)、宽的吸收带和发射带 (在 940nm 处大约为 10nm)、高的斜率效率 (在 300K 时达到 72%)、高的掺杂浓度而无浓度淬灭 (大于 20%) 等<sup>[2]</sup>。此外, 它的荧光寿命为 Nd:YAG 的 3~4 倍, 增加了储能和减少了吸收与发射间的量子缺陷。该材料的缺点在于低能级的热集聚 (约在基态能级上  $612\text{cm}^{-1}$  处), 这要求有高的泵浦功率密度 (在 300K 时的阈值大于  $1.5\text{kW/cm}^2$ )。晶体内的温度分布对输出功率有较大影响, 材料热导率与温度  $T$ 、掺杂浓度  $c_{\text{Yb}}$  间关系为<sup>[6]</sup>:

$$(T, c_{\text{Yb}}) = (300\text{K}, c_{\text{Yb}}) \cdot \left( \frac{204}{T - 96} \right)^{0.48 - 0.46c_{\text{Yb}}} \quad (1)$$

式中,

$$(300K, c_{Yb}) = (7.28 - 7.3c_{Yb})W/mK \quad (2)$$

发射波长 1030nm 的 YbYAG 之所以是目前优先选用的薄片圆盘材料,还有一个原因是它对 940nm 波长的泵浦光有很高吸收。但在特定泵浦功率密度下, YbYAG 圆盘可比 NdYAG 做得更薄,再加上它有高的量子效率,因此 YbYAG 呈现出优良的光-光转换效率。此外, NdYVO<sub>4</sub> (1064nm, 915nm), NdYAG (1064nm, 946nm, 1330nm), Nd:LSB (1063nm), TmYAG (2μm) 等都是适合于薄片圆盘激光器的晶体。

由于圆盘介质的冷却面同时也是激光器的反射面,故这种激光器被称为主动镜激光器,它是不依赖于泵浦功率水平可获得高光束质量的一种构型,图 1 是一个圆盘激光器的示意图<sup>[3]</sup>。图 2 是 YbYAG 圆盘激光器(圆盘直径 7mm,厚 0.3mm)的实验结果,可以看出这种激光器的显著特点。首先,对于给定的谐振腔,光束质量因子  $M^2$  几乎与泵浦功率水平无关,这说明在百瓦级圆盘激光器中热效应很小。此外,还可以通过采取适当的腔配置提高光束质量,但输出功率和效率降低很少。

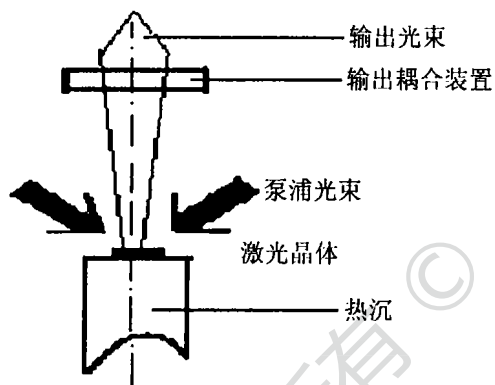


图 1 薄片圆盘激光器示意图

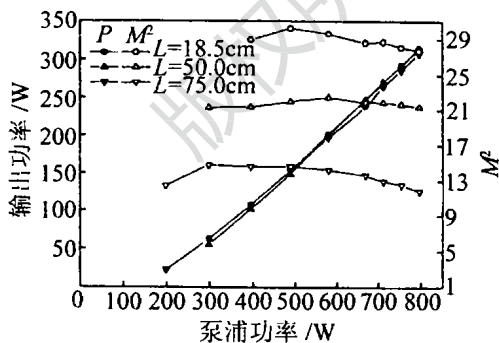


图 2 光束质量因子、输出功率与泵浦功率之间的关系

## 2 二极管泵浦圆盘激光器功率、能量定标放大的技术方案

圆盘激光器输出定标放大到高功率可行的技术

方案之一为沿着折叠腔的光轴使用多个圆盘,图 3

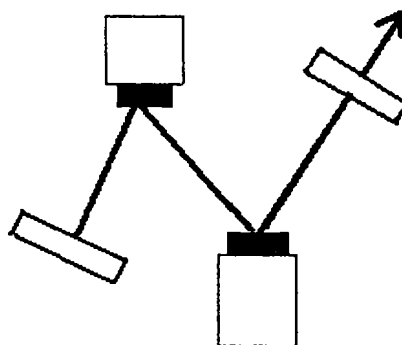


图 3 多圆盘功率定标放大示意图

是多圆盘功率定标放大示意图,实验发现,当泵浦光束直径一定时,输出功率随圆盘个数的增多成比例地提高<sup>[3]</sup>。采用薄圆盘激光器设计可以获得 12% ~ 15% 的总效率。此外,在一定的泵浦功率密度下增加在圆盘上的泵浦光束直径也是一个可行的方案,在泵浦直径远大于晶体厚度且光束分布为近平顶时,热流可以看成一维分布其方向指向热沉,这使得晶体内的温度和热应力为均匀分布,使这种方法较之传统的冷却方法有更少的热畸变,因此在保持泵浦功率密度的情况下简单地增加泵浦光束直径就可以将激光器定标放大到更高功率。多束泵浦光通过激光介质可以有效提高泵浦功率密度,也能有效提高介质对泵浦光的吸收,同时由泵浦粒子数决定的阈值泵浦密度也能显著地减小,因此也是一个可行的技术方案。

对于数千瓦的功率定标,几个相同模块的耦合可能是一个合适的技术。这可以通过两种方式实现:(1)将几个模块的输出激光束耦合进一根光纤;(2)通过数根较小的光纤单独传送到工件。其中后者可以使得多焦点技术简单地得到实现<sup>[3]</sup>。利用光纤耦合激光二极管代替二极管层叠阵列泵浦使得激光器的设计不再依赖于激光二极管的设计。实验中已经获得高达 255W 的多模激光,单纵模运行下获得 28W 的近衍射极限的激光<sup>[1]</sup>。

采用振荡器-放大器结构是输出定标放大的另一个有效途径。文献[4]中采用一个被动锁模 750fs YbYAG 激光器作为振荡器提供种子光,二极管泵浦 YbYAG 薄片圆盘激光器作为放大器,重复频率 750Hz 时,获得脉宽 2.3ps、脉冲能量 180μJ 的脉冲输出,相应的峰值功率达到 78MW,在 1kHz 的重复频率下脉冲能量为 120μJ。

单次通光期间薄盘不能完全吸收泵浦辐射光,为能充分利用泵浦光能,泵浦光必须几次通过圆盘。激光器设计要仔细权衡允许泵浦光多次通过圆盘介

质的参数。在已有的实验基础上,通过增加泵浦光束的直径、泵浦光多次通过增益介质和(或)利用多个圆盘增益介质,结构紧凑、数千瓦输出的二极管泵浦固体激光器是可实现的。

### 3 典型圆盘激光器的实验装置和实验结果

图 4 是一个利用薄片圆盘激光晶体多程吸收进行功率定标放大的系统示意图<sup>[1]</sup>。光纤束末端被 4

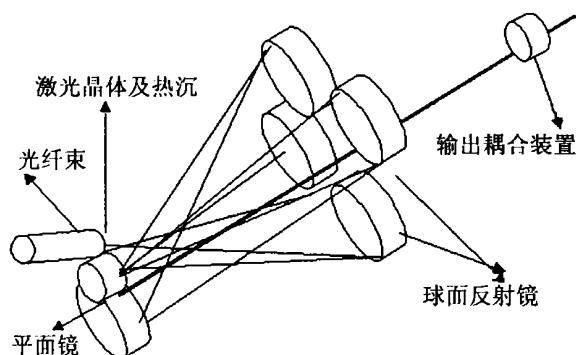


图 4 8 程泵浦光通过晶体的圆盘激光器泵浦示意图

个球面镜和一个平面镜重复成像,泵浦光在晶体内得到 8 程反复吸收,因而获得大约 90% 的泵浦光吸收。实验参数为:球面镜曲率半径  $r = 51\text{mm}$ ,直径  $= 38\text{mm}$ 。圆盘端面之一作为反射镜,曲面输出耦合镜的透过率为 2% ~ 5%, YbYAG 圆盘的直径、厚度和掺杂浓度的典型值分别为:7mm, (0.3 ~ 0.4)mm 和 (8 ~ 13)%, 光纤耦合 InGaAs 激光二极管端面泵浦, 光纤参数:纤芯直径  $600\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.37$ 。激光介质安装在一个铜制热沉上,酒精液体冷却。在冷却液体温度为  $-67^\circ\text{C}$ 、光纤束末端泵浦功率为 519W 时获得功率高达 255W 的多模运行激光,斜率效率 55%,光学效率 49%,在 0 时最大输出功率为 194W,斜率效率和光学效率分别降为 47%、37%,这说明对准三能级系统来说,系统效率对温度的依赖性是很强的。

图 5 是单个抛物面反射镜的泵浦结构,它可以

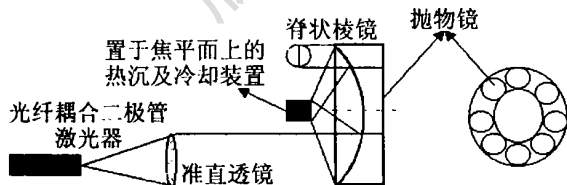


图 5 采用单个抛物面反射镜的泵浦结构

使泵浦光 16 次通过 YbYAG 圆盘晶体,超过 90% 的泵浦功率得到吸收<sup>[5]</sup>。获得高的泵浦吸收并减少激光的再吸收是圆盘激光器设计中的一个关键问题:增加掺杂浓度固然可以增大泵浦吸收,但同时激光吸收也增加,导致损耗大大增加。计算表明仅通过

增加掺杂浓度总光效率被限制在 20% 以下,而在同样圆盘厚度下,减少掺杂浓度,对于 24 程泵浦吸收总光效率可以超过 60%。此外,实验还表明,圆盘激光器的效率几乎与光束质量因子无关。

千瓦级的薄片圆盘激光器也已经有报道。数值计算表明,室温下采用泵浦光束 16 程吸收时,输出功率达到 1kW、光学效率 50% 甚至更高都是可能的,输出功率的定标放大可以通过增加泵浦光束的面积实现<sup>[6]</sup>。实验中采用一个圆盘时获得 647W 的最大输出功率、光-光转换效率 51%,采用 4 个圆盘时获得 1070W 的输出功率、光-光转换效率 48%,冷却水的温度为  $15^\circ\text{C}$ 。近来,Refin Sinar 公司演示了采用单个 YbYAG 圆盘得到输出功率 1.5kW 的实验结果,光-光转换效率 56%。 $M^2 = 10$ (输出功率 1kW),及  $M^2 = 5$ (输出功率 0.5kW)。采用多圆盘技术后功率可以进一步放大到数千瓦<sup>[5]</sup>。

由于掺 Yb 材料具有宽的可调谐范围,超短脉冲的产生和放大也可以利用圆盘结构来实现。实验中已经获得重复率 10kHz、脉宽 4.5ps、平均功率为 10W 的输出,在另一个实验中,利用一个 YbYAG 圆盘再生放大器作为增益介质,获得平均功率 16.2W、脉宽达到 730fs 的输出<sup>[5]</sup>。

### 4 存在问题和讨论

热效应是在二极管泵浦高功率圆盘激光器的设计中需要考虑的重要问题。为了解决低能级的热集聚问题,系统常需要低温运转,实验表明,YbYAG 圆盘激光器效率对温度的依赖性比较强,故有效的冷却和温控系统非常重要,激光器的设计中散热面同时作为反射面,它镀有对泵浦波和基波的高反射膜层,在极高的功率密度下,防止膜层损坏是一个必须考虑的问题。二极管泵浦光发射的方向性很强,且空间分布不均匀,这又要求先进的泵浦光整形技术。

此外,消除泵浦吸收和激光再吸收之间的相互影响对所有准三能级系统都是必不可少的,单纯提高掺杂浓度来提高效率已经证明是不行的,应该选择一个适当的掺杂浓度,并尽量增加泵浦光在薄片内的通光次数,以此来提高效率。此外,自发辐射效应(ASE)对光束质量和激光器效率的影响也需要作进一步研究。

(下转第 566 页)

决定,瑞利区域在工业界称作焦深(depth of focus, DOF),其物理表达式为<sup>[41]</sup>:

$$H_{\text{DOF}} = 16 (f/D)^2 / \lambda \quad (7)$$

式中, $\lambda$ 为波长, $f$ 和 $D$ 分别为会聚透镜的焦距和直径。焦深给出的是切割厚度的上限。若选用 $\text{CO}_2$ 激光器, $f$ 透镜焦距200mm,直径40mm,则计算得 $H_{\text{DOF}} = 1.35\text{mm}$ 。

最后讨论一下打孔速度的影响因素。若打孔图样为行列整齐的矩阵,将垂直于材料运动方向定义为行,则打孔的行间距由下式决定:

$$L = v \cdot (t_1 \cdot n + t_2) \quad (8)$$

式中, $t_1$ 为打一个孔的激光作用时间, $n$ 为每行孔数, $t_2$ 为光束偏转机构的空走时间, $v$ 为材料运动速度。由上式可见,为提高材料的运动速度,并要求群孔疏密不变(行间距 $L$ 不变,每行孔数 $n$ 不变),必须减小打一个孔的激光作用时间 $t_1$ 和光束偏转机构的空走时间 $t_2$ ,为减小 $t_1$ 必须增加激光功率,为减小 $t_2$ 必须选择高速偏转机构。

### 3 实验结果比较

图7是在厚度为0.5mm的化纤织物上进行打孔实验的效果图。图7a显示了在被打孔材料沿图示箭头方向以6m/min左右的速度运动,激光未做任何补偿,输出5×4点阵时的效果图。由图可明显看出,原本四方的点阵由于被打孔材料速度的影响被“拉成”了菱形,且每一孔还出现了孔形拉长现象;图7b是静态情况下的打孔效果图,激光输出5×5点阵,没有进行双振镜扫描校正,可明显看出存在桶形和枕形失真。图7c则是在速度6m/min左

右的动态情况下,将动态跟踪校正和双振镜扫描校正共同作用于激光输出,得到了预定义图样的正确输出。孔形无拉长现象,孔大小、疏密一致,行列均匀,达到了预想的目的。由以上实验图示可看出,动态跟踪校正和双振镜扫描校正正在打孔算法中起到重要作用,动态跟踪校正和双振镜扫描校正的精确与否直接影响打孔效果。

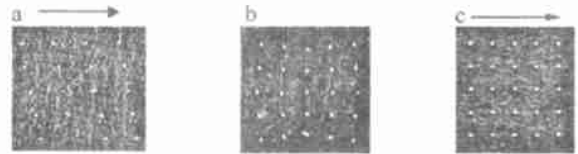


Fig. 7 a—the result without any correction in dynamic state b—the result without correction for dual galvanometer scanning in static state c—the result with correction for dual galvanometer scanning and dynamic track in dynamic state

### 4 结论

在理论分析的基础上对基于振镜的高速动态打孔方法进行了研究,实现了很好的动态打孔效果。所述打孔系统可适应连续生产线生产的需要,打孔速度快,打孔图样调整灵活,能广泛应用于薄型材料透气孔、通光孔、通风孔的加工。该系统已成功应用于某著名企业,并长期可靠运行。对动态跟踪和双振镜校正方法的研究也为进一步实现动态精确切割和标刻等相关加工领域打下了基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 周卓尤,陈培锋.薄型材料高速激光打孔方法.中国专利:CN1327897A,2001-12-26.
- [2] 周予为主编.自动检测技术.武汉:华中理工大学出版社,1996:60~63.
- [3] 虞孝舜.激光与红外,1998,28(2):45~47.
- [4] 黄开金,谢长生.激光与光电子学进展,1998,35(4):1~4.

(上接第553页)

### 5 小 结

已有的理论和实验表明,薄片圆盘薄片激光器是二极管泵浦固体激光器向高功率发展的一个很有潜力的技术方案,可有效地实现能量、功率的定标放大并保持良好光束质量和高效率。在国际上,已研制成功了千瓦级的圆盘固体激光器。我国清华大学、上海光机所和中国工程物理研究院应用电子学研究所等多个单位也开展了圆盘固体激光器的研究工作,但与国外水平相比,尚有差距。对实用化高功率圆盘固体激光器二极管泵浦技术方案和系统冷

却技术,热效应和降低热效应影响的措施,以及放大自发辐射对光束质量的影响和抑制等问题应做进一步的研究。

#### 参 考 文 献

- [1] Karsten C,Uwe B,Adolf G *et al.* SPIE,2986:2~9.
- [2] Gesen A,Hügel H,Voss A *et al.* Appl Phys,1994,B58:365~372.
- [3] Hügel H. Optics and Lasers in Engineering,2000,34(4~6):213~229.
- [4] Hönninger C,Johannsen I,Möser M *et al.* Appl Phys,1997,B65:423~426.
- [5] Gesen A. CLEO-Technical Digest,2001,1:1548~1549.
- [6] Stewen C,Contag K,Larionov M *et al.* IEEE J S T Q E,2000,6(4):650~657.