

doi:10.3788/gzxb20144310.1014001

直接水冷的 Yb : YAG 薄片激光器系统设计 与实验研究

宋琼阁^{1,2},程光华¹,白晶¹,刘欣¹,唐文龙¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:设计了一台二极管泵浦的具有新型四通泵浦结构及接触式水冷装置的 Yb : YAG 薄片激光器. 激光泵浦源采用中心波长为 940 nm 的二极管激光器,利用多模光纤进行耦合输出. YAG 晶体 Yb³⁺ 离子掺杂浓度为 10%,几何尺寸为直径 10 mm,厚度 500 μm . 激光晶体的散热装置采用自来水直接冷却,自来水通过铜热沉中打通的 V 型槽与薄片晶体直接接触. 泵浦耦合系统采用聚焦透镜和一对直角棱镜的组合实现四通泵浦,聚焦透镜规格为直径 50 mm,焦距 50 mm. 模拟了谐振腔的稳定性及不同腔长条件下所对应的激光光斑半径,设计了不同腔型的 Yb : YAG 薄片激光器. 在 F-P 腔中采用透过率为 5% 的输出耦合镜,获得了最大功率为 3.28 W 的 1 031 nm 连续激光输出,光束质量因子 $M_x^2 = 1.79$, $M_y^2 = 1.86$,斜效率为 20.5%.

关键词:激光器;固体激光器;薄片激光器;直接水冷;泵浦结构设计;激光晶体;Yb : YAG

中图分类号:TN224

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1014001-6

System Design and Research of Yb : YAG Thin Disk Laser with Direct Cooling Arrangement

SONG Qiong-ge^{1,2}, CHENG Guang-hua¹, BAI Jing¹, LIU Xin¹, TANG Wen-long¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A Yb : YAG thin disk laser with a novel four-pass pumped structure and direct water cooling device was designed. The multi-mode pump radiation was from a fiber-coupled 940 nm diode laser. The Yb : YAG disk with 10 mm diameter and 500 μm thickness was employed. The Yb³⁺ atom fraction was 10%. The direct cooling arrangement was put forward, tap water was contacted with the Yb : YAG through a V groove. The four-pass pump coupling system was well designed with a pair of rectangular prism and a focusing lens which had a diameter of 50 mm and focus of 50 mm. Then simulated the stability of the resonator and calculated the radius of the laser spot in different position of the resonator with the different cavity length. Different types of laser cavity were set up. With the output coupling rate of 5%, the maximum output power of 3.28 W at 1 031 nm was obtained in F-P resonator. The beam quality $M_x^2 = 1.79$, $M_y^2 = 1.86$. The slope efficiency was 20.5%.

Key words: Lasers; Solid state laser; Thin disk laser; Direct water cooling; Pump structure design; Laser crystal; Yb : YAG

OCIS Codes: 140.3464; 140.3480; 140.3615

基金项目:国家自然科学基金(No. 61223007)和陕西省科学基金(No. Y235141D04)资助

第一作者:宋琼阁(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为高功率固体激光器. Email:songqiongge@opt.cn

导师(通讯作者):程光华(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为超短脉冲激光产生与放大及飞秒光刻波导技术. Email:gcheng@opt.ac.cn

收稿日期:2013-05-05;录用日期:2014-01-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

薄片激光器是一种特殊的二极管泵浦固体激光器,其概念由1990年德国斯图加特大学 Adolf Giesen 课题组最先提出^[1],是全固态激光器历史上的一个里程碑.薄片激光器的激光介质一般具有较大的口径/厚度比,激光晶体较多采用面泵浦、面冷却.这种结构中端面泵浦所带来的热量几乎在一个方向上产生,且沿着激光模式的光轴方向^[2],因此热流很容易被水冷装置带走,从而对激光晶体起到较好的散热作用,进而提高晶体的光—光转换效率.薄片激光器一般通过精密光学系统的设计使光纤耦合输出的泵浦光在晶体薄片(厚度通常为100~500 μm)中多次(通常为8次~32次)通过,从而增加激光介质对泵浦光的吸收(通常吸收能达到90%以上).因此,薄片激光器顺应了高亮、高平均功率发展的需要.但是,其多通泵浦结构设计非常复杂,元器件多,高功率泵浦晶体时要求在很小的面积(约几十 mm^2)上将 kW 级的热带走,因此其散热系统的设计十分困难.目前,德国 Dausinger+Giesen GMBH 公司生产的多通泵浦模块和晶体散热模块已被国内外广泛使用和借鉴,但其成本很高并且利用抛物面镜实现24通甚至更多通数的泵浦核心技术仍被德国所垄断.

在大多数薄片激光器所使用的掺 Yb^{3+} 离子的激光晶体中, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 因其具有宽的吸收和发射带宽^[3]等优势成为最受瞩目的激光晶体.另外, YAG 晶体可以实现较高浓度的 Yb^{3+} 离子掺杂,从而有效地减小了增益介质的厚度(降低了热透镜效应),并且高的掺杂浓度也可以有效减少泵浦光通过晶体的次数,从而降低了多通泵浦结构的复杂性.尽管 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体有上述很多优点,但是因为其准三能级^[4-5]的特点使得它对温度的升高很敏感,为了避免这个问题并减小由于温升对晶体带来的损害,设计一种有效提取晶体热量的水冷方式是十分必要的.

本文设计了一种新型的具有四通泵浦结构和直接水冷装置的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 薄片激光器. $\text{Yb}:\text{YAG}$ 中 Yb^{3+} 离子掺杂浓度为10%,厚度为500 μm .利用透过率5%的输出耦合镜在 F-P 腔中获得3.28 W 的1031 nm 连续激光输出,激光斜效率达到20.5%.

1 激光晶体的直接水冷装置

通常情况下,薄片激光器中激光晶体的水冷装置是用钢^[6]或金锡^[7-8]等焊料将晶体后表面与热沉焊接起来.由于金锡焊具有很大的脆性,需要设计与晶体和热沉热膨胀系数相匹配的缓冲层,这样会导致过多的交界面,整个焊接过程在工艺不成熟的情况下容易产生空洞,为器件的热管理带来诸多困难.

尝试在真空回流炉中通过镀钢将晶体与铜热沉焊接起来,但由于焊接前没有对晶体进行金属化处理,导致晶体上直接蒸镀钢的附着力很差,并且,在焊接过程中,由于回流炉中的温度最高值超过反射膜的阈值,破坏了晶体后表面的高反膜,使高反膜出现褶皱,严重影响激光的振荡和对晶体生成热量的提取.因此,实验中利用紫外光敏胶作为激光晶体和热沉的粘合剂,设计了晶体背面和自来水直接接触的水冷装置.实验采用的接触式水冷结构如图1,将 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 圆薄片的后表面边缘涂上紫外光敏胶,粘在打有圆孔洞的铜热沉上,在铜热沉中打通了一个V型水槽,晶体可以看作铜热沉的一个窗口,使冷却自来水和 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 薄片直接接触以达到良好的冷却效果.图1左边为模块的侧视图,右边为模块的前视图.通过进水口和出水口实现自来水在V型槽中的循环.

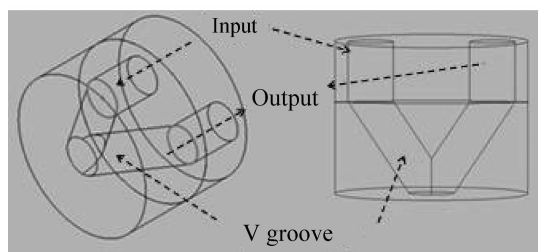


图1 直接水冷模块机械设计图

Fig. 1 The module of mechanical design of the direct watercooling device

在该系统中,冷却的自来水通过V型槽与晶体的后表面直接接触,从而有效减小了晶体的热效应.自来水的温度是15 $^{\circ}\text{C}$,流速大约为1L/min.这种直接水冷的方法不仅可以有效地带走晶体轴向所产生的热,同时也可以降低由于晶体与铜热沉具有不同的热膨胀系数而使晶体破碎的可能性.

2 泵浦结构的设计

在室温下, Yb^{3+} 离子掺杂浓度为10%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 实现粒子数反转需要的阈值功率密度为18.31 kW/cm^2 ^[9],为了克服光学损耗并达到阈值,就需要更高的泵浦功率密度,因此在实际操作中,通常将激光器泵浦到其阈值之上的5至6倍.实验中所选用的泵浦源为带尾纤输出的二极管激光器(DILAS, $\Phi=400 \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.22$),最大输出功率为100 W,故根据阈值功率密度可以估算泵浦光聚焦到 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体上的光斑半径应为600 μm .在实验中 Yb^{3+} 离子掺杂浓度为10%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的厚度为500 μm .激光晶体的前表面镀有对激光和泵浦光(1030 nm 和 940 nm)均高透的增透膜,在其后表面镀有对激光和泵浦光高反($R>99.5\%$)的反射膜.由于 Yb^{3+} 离子的掺杂浓度较高,因此在激光泵浦结构中采用四通泵浦,图2为多通

泵浦结构示意图.

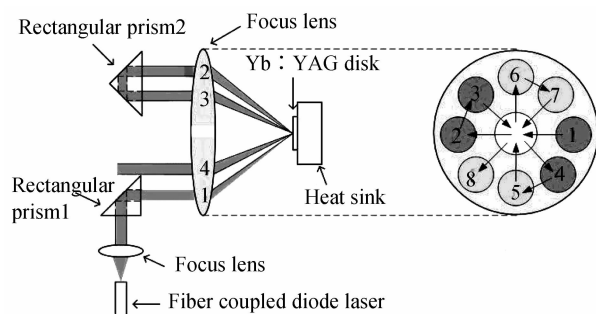


图2 Yb:YAG 薄片激光器多通泵浦结构示意图
Fig. 2 Multi-pass pump structure of the Yb:YAG thin disk laser

从图中可以看出,940 nm 泵浦光从二极管激光器的尾纤中耦合输出,利用焦距 $f=15$ mm 的准直透镜对光纤输出的 940 nm 激光进行准直,经过准直的泵浦光通过直角棱镜 1 的斜面反射后,被焦距 $f=50$ mm 的中心打孔的聚焦透镜聚焦到激光晶体 Yb:YAG 上,晶体上泵浦光斑的大小取决于所选准直镜和聚焦镜焦距的大小.由于晶体很薄,不可能将泵浦光完全吸收,因此,未被晶体吸收的那部分泵浦光在通过晶体后表面高反膜反射后,对称地经过聚焦透镜准直并到达直角棱镜 2 上,经过第二个直角棱镜的直角边反射,泵浦光产生一个横向位移,之后被再一次聚焦到激光晶体上.通过这种方式,泵浦光四次经过薄片晶体.理论计算了泵浦光四次通过晶体后,晶体对泵浦光的吸收效率^[10]约为 84%,实验中实际测得有 81% 的泵浦光可以被激光晶体吸收.通过调整两个直角棱镜,四通泵浦光所产生的两个聚焦光斑在晶体上可以完全重合.为了避免聚焦透镜对激光振荡的影响,在聚焦镜中心打通了一个直径为 5 mm 的圆孔.在图 2 中,泵浦光斑依次通过聚焦镜的顺序用数字 1 到 4 来表示.在此系统中,可以通过在图 2 的 4,5 和 6,7 处增加两个直角棱镜来提高泵浦光通过晶体的次数,实现泵浦光的 8 程泵浦,从而能够进一步提高薄片晶体对泵浦光的吸收.

3 激光谐振腔的模拟

对于激光谐振腔来说,利用谐振腔模拟软件可以分析出谐振腔的稳定性及谐振腔中不同位置激光振荡的光束半径随腔长的变化关系.薄片晶体的厚度为 500 μm ,其一个表面镀有激光和泵浦光的增透膜,另一个表面镀有两个波长的高反膜,并粘合在铜热沉上进行冷却.基于此结构,薄片激光器通常采用直腔或折叠腔的形式,即薄片的全反射面和耦合输出镜构成的直线腔,或是将薄片作为折叠镜的折叠腔.

泵浦光束在增益介质内与激光光束的空间交叠程度对全固态激光器的输出效率以及光束质量有很大影响^[11].薄片晶体的直径大约 1 cm 左右,晶体上的泵浦

光斑则远小于激光晶体的尺寸,由于 Yb:YAG 对 1 000 nm 左右的激光有比较强的吸收作用,因此,Yb:YAG 的泵浦区激发 1 030 nm 附近的激光,而其非泵浦区则对该波段激光存在一定的吸收,故可将 Yb:YAG 上的泵浦区看作一个软光阑^[12].当泵浦光光斑半径小于激光晶体上的激光光斑半径时,虽然空间交叠程度比较高,但受到软光阑的影响,腔内将产生严重的损耗,不利于得到较大功率的激光输出,而当增益介质上泵浦光斑半径较多的大于激光光束半径时,泵浦区的软光阑对高阶模的限制作用减少,会使腔内的高阶横模起振,从而导致光束质量变差.所以在设计时,必须依照模式匹配原则,优化腔型结构以使泵浦光斑半径与激光光斑半径比最优化^[13-14].由于薄片在低功率下热焦距很小,可以认为是无穷大,在高功率工作时才表现出有限的热焦距,从而影响了谐振腔的稳定性.所以,为了保证薄片激光器从低功率到高功率过渡过程中的稳定性,设计谐振腔参量时应按照由简到繁、逐步优化的原则.

对于直线腔来说,焊接到热沉上的 Yb:YAG 作为直线腔的一个端镜,故只需要加一个曲率适当的耦合输出镜就可以形成谐振腔,可变参量有耦合输出镜的曲率半径、透过率及谐振腔腔长.利用 ABCD 传输矩阵在软件中模拟了两镜直线腔,Yb:YAG 晶体的曲率半径为 R_1 ,耦合输出镜的曲率半径为 R_2 ,谐振腔长度为 L ,则

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix},$$

将 Yb:YAG 晶体看作平面镜,则 R_1 近似看成无穷大,有

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2L}{R_2} & 2L - \frac{2L^2}{R_2} \\ -\frac{2}{R_2} & 1 - \frac{2L}{R_2} \end{bmatrix},$$

对于平行平面腔也就是 F-P 腔来说,其作为一种典型的直线腔.耦合输出镜为平面镜,故 R_2 为无穷大,则

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2L \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

按照谐振腔稳定性判定条件,此时, $\left| \frac{A+D}{2} \right| = 1$,即平行平面腔为临界腔.对于临界腔来说,其具有光束方向性好,模体积极大,容易获得单模振荡的优点,但由于其介于稳定腔与非稳腔之间,故对谐振腔的调整准确度有很高的要求.对于平凹两镜腔,按照谐振腔稳定条件要求,即 $\left| \frac{A+D}{2} \right| < 1$ 时平凹腔为稳定腔,因此可以得出: $0 < \frac{L}{R_2} < 1$,并利用式(1)可以得出腔内不同位置处

激光光束的光斑半径^[15].

$$W_0 = \left[\left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \frac{2B}{\sqrt{4 - (A+D)^2}} \right]^+ \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, A 、 B 、 D 为传输矩阵中所对应的与腔镜曲率 R 和腔长 L 有关的参量.图3模拟了当平凹腔输出耦合镜曲率半径 $R=500$ mm时,腔内不同位置处激光光束的光斑大小随腔长 L 的变化关系.图中,当 $L=25$ cm时,Yb:YAG晶体上的激光光斑半径为295 μm ;当 $L=40$ cm时,晶体上的激光光斑半径为260 μm ;当 $L=45$ cm时,晶体上的激光光斑半径为220 μm .由此可以看出,当平凹腔凹面镜曲率半径 R 固定时,激光晶体上的激光光斑半径随腔长 L 的增长而减小.因此可以通过变换腔长在薄片晶体上获得不同的激光光斑半径,从而可以更好地与泵浦光斑模式匹配.

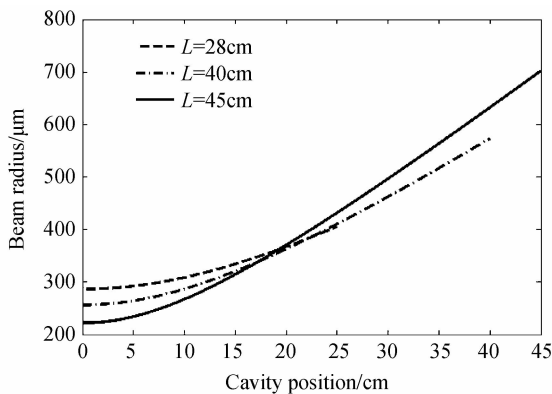


图3 平凹腔内激光光束光斑半径随腔长的变化关系
Fig. 3 The radius of laser beam in plane-concave laser resonator with the different cavity length

对于折叠腔来说,主要模拟了V型腔,即平-凹-平三镜腔.按照前面直线腔所述的 $ABCD$ 传输矩阵的计算方法,图4模拟了当V腔型中凹面镜曲率半径 $R=500$ mm时,在不同腔长条件下,谐振腔中不同位置处的激光光束的光斑大小.图中拐点左边的曲线表示从Yb:YAG晶体到凹面镜的距离 L_1 所对应的Yb:

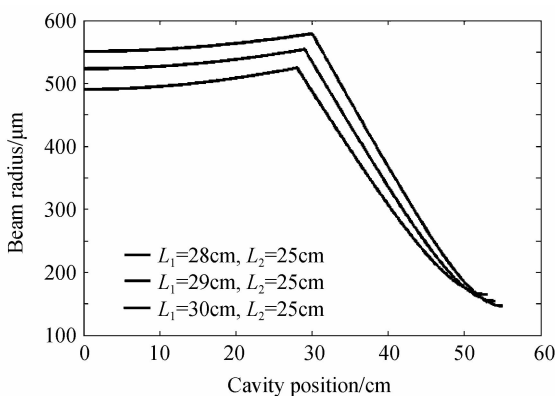


图4 V型腔内激光光束光斑半径随腔长的变化
Fig. 4 The radius of laser beam in V laser resonator with the different cavity length

YAG晶体上的激光光斑半径;拐点右边的曲线则为从凹面镜到V型腔另一平面端镜的距离 L_2 所对应的晶体上的激光光斑半径.当 $L_1=28$ cm, $L_2=25$ cm时,Yb:YAG上的激光光斑半径为490 μm ;当 $L_1=29$ cm, $L_2=25$ cm时,晶体上的激光光斑半径为525 μm ;当 $L_1=30$ cm, $L_2=25$ cm时,晶体上的激光光斑半径为550 μm .即当V型腔中凹面镜曲率半径不变时,薄片晶体上的激光半径随腔长的增长也随之增大.

在保证激光谐振腔工作在稳定区域的条件下,通过改变谐振腔的可变参量,即各个臂长 L ,可以在薄片晶体上得到不同的激光光斑半径.在实验中,为了得到高功率及高光束质量的激光输出,激光晶体上的泵浦光斑和激光光斑应符合一定的模式匹配原则,一般情况下,泵浦光斑与激光光束的比值应在1.23~1.27之间^[16].由于泵浦光聚焦到Yb:YAG晶体上的光斑半径为600 μm ,为了较好地符合泵浦光与激光模式匹配的原则,故根据上述模拟,在平凹腔中选取曲率半径 $R=500$ mm的凹面镜作为输出耦合镜,腔长 $L=250$ mm;在V型腔中选取曲率半径 $R=500$ mm的凹面镜作为折叠镜,两臂长分别为 $L_1=280$ mm, $L_2=250$ mm.

4 实验结果

根据四通泵浦结构的设计和谐振腔的模拟,在光学平台上搭建了平凹腔、V型腔和F-P腔三种腔型,均获得稳定的1031 nm连续激光输出.

平凹腔中选用曲率半径 $R=500$ mm,透过率 $T=2\%$ 的平凹镜作为输出耦合镜,腔长 $L=250$ mm,在泵浦功率为28.6 W时,经过四通泵浦后,最终获得1.24 W的1031 nm激光输出,激光斜效率为6.3%.根据谐振腔的模拟,Yb:YAG晶体上的激光光斑为295 μm ,与泵浦光斑的模式匹配较差,故输出激光功率及斜效率不高.

V型腔中Yb:YAG晶体作为一个端镜,选用曲率半径 $R=500$ mm,透过率 $T=2\%$ 的凹面镜作为腔镜,另一个端镜是全反镜,谐振腔两个臂长分别为 $L_1=280$ mm, $L_2=250$ mm.泵浦光聚焦到晶体上的光斑半径为600 μm ,经过谐振腔模拟分析,Yb:YAG晶体上的激光光斑半径为490 μm ,符合模式匹配原则.当泵浦功率28.6 W时,实现了852 mW的1031 nm连续激光输出.

F-P腔的输出耦合镜是透过率 $T=5\%$ 的平面镜,腔长 $L=12$ cm,图5是用Spectra-Physics 407A型功率计测得的F-P腔中1031 nm激光随泵浦光入射功率的变化情况.从图中可以看出,当泵浦功率为28.6 W,可获得最大输出功率为3.28 W的1031 nm激光,斜效率为20.5%.通过高斯拟合得到了F-P腔输

出的 1 031 nm 激光的光束质量为 $M_x^2 = 1.79$, $M_y^2 = 1.86$ 。图 6 是利用 CCD 拍摄的输出激光光斑图。从图中可以看出,激光光斑对称性良好。考虑到由于四通泵浦结构紧凑,一部分未被吸收的泵浦光会沿原路返回,使泵浦源光纤输出端温度升高,因而未进行更高功率的实验。

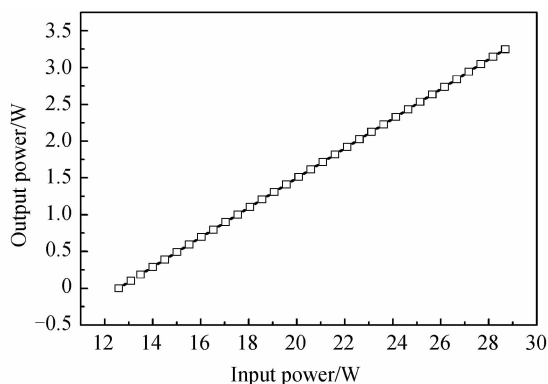


图 5 1 031 nm 输出激光随泵浦光功率变化关系
Fig. 5 Output 1 031 nm laser power vs pump power

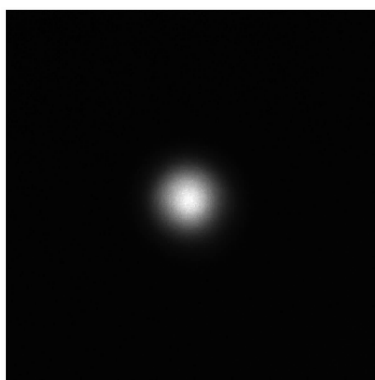


图 6 CCD 拍摄的激光光斑图

Fig. 6 The CCD image of the output laser spot

在实验过程中发现,激光晶体的温度一定程度上影响着激光器的输出功率,这主要是由 Yb : YAG 晶体的准三能级结构决定的^[17]。下一步将继续优化直接水冷结构,利用可控温的内部循环水代替受环境影响的自来水对晶体进行直接冷却,进一步降低 Yb : YAG

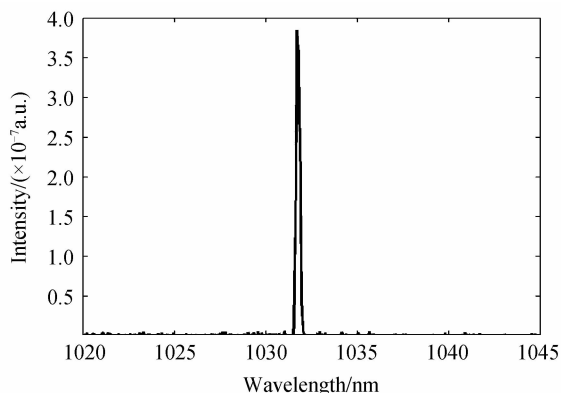


图 7 Yb : YAG 薄片激光器输出激光光谱图

Fig. 7 The spectrum of the Yb : YAG thin disk laser

晶体上的温度,并继续优化泵浦结构,尝试采用 8 通泵浦,进一步提高晶体对泵浦光的吸收效率,以获得更高功率、高光-光转换效率的激光输出。

图 7 为日本 YOKOGAWA 的 AQ6370C 型光谱仪测得的 Yb : YAG 薄片激光器的激光光谱图。

图 8 为二极管泵浦的 Yb : YAG 薄片激光器 F-P 腔的实验装置图。

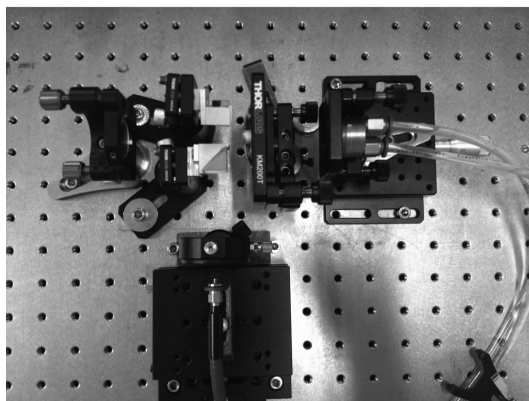


图 8 Yb : YAG 薄片激光器实验装置图

Fig. 8 The experimental device of Yb : YAG thin disk laser

5 结论

利用直径为 10 mm、厚度为 500 μm 、Yb³⁺ 离子掺杂浓度为 10% 的 Yb : YAG 薄片晶体,设计了具有接触式水冷装置的四通泵浦的 Yb : YAG 薄片激光器,并模拟了不同腔型中空腔长对晶体上激光光斑大小的影响。在泵浦功率为 28.6 W 时,采用透过率为 5% 的输出耦合镜,在 F-P 腔中获得了最大功率为 3.28 W 的 1 031 nm 连续激光输出,斜效率为 20.5%。

参考文献

- [1] GIESEN A, HIIGEL, VOSS A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high power solid-state lasers [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1994, **58**(5): 365-372.
 - [2] AUSDERAU J, SPUHLER G J, SUDMEYER T, *et al.* 16.2 W average power from a diode-pumped femtosecond Yb : YAG thin disk laser[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(11): 859-860.
 - [3] YANG Pei-zhi, DENG Pei-zhen, LIU Yu-pu, *et al.* Ti: Sapphire pumped 10% Yb : YAG thin chip with 320mW CW laser output of 1053nm[J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2000, **9**(1): 8-10.
 - [4] BRUESSELBACH H W, SUMIDA D S, REEDER R A, *et al.* Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb : YAG lasers [J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 1997, **3**(1): 105-116.
 - [5] TAIRA T, TULLOCH W M, BYER R L, *et al.* Modeling of quasi-three level lasers and operation of CW Yb : YAG lasers [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(9): 1867-1874.
 - [6] YAN Li-hua, XU Hui-wu, ZHANG Jing, *et al.* Investigation on indium electroplating [J]. *Process Technique and Materials*, 2009, **34**(8): 763-766.
- 闫立华,徐会武,张静,等. In 焊料电镀工艺研究[J]. 工艺技术与材料, 2009, **34**(8): 763-766.

- [7] PITTROFF W, ERBERT G, KLEIN A, *et al.* Mounting of laser bars on copper heat sinks using Au/Sn solder and CuW submounts [C]. Electronic Components and Technology Conference, 2002; 276-281.
- [8] TSUNEKANE M, TAIRA T. 300W continuous-wave operation of a diode edge pumped, hybrid composite Yb : YAG microchip laser[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(13): 2003-2005.
- [9] WANG Chun-hua, WANG Wei-min, MA Yi, *et al.* Design of Yb : YAG thin disk laser with multipass pumped coupling system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(5): 1229-1232.
王春华, 王卫民, 马毅, 等. Yb : YAG 薄片激光器多通泵浦耦合系统设计实验[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(5): 1229-1232.
- [10] YANG Hong-ru, ZUO Tie-chuan. Investigation on thermal effects and output of all-solid-state miniature Yb : YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 907-910.
杨鸿儒, 左铁钊. 全固体小型 Yb : YAG 激光器热效应及输出特性研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 907-910.
- [11] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size-optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **3**(1): 105-116.
- [12] MENDE J, SPEISER J, GIESEN A, *et al.* Mode dynamics and thermal lens effects of thin-disk lasers[C]. SPIE, 2008, **6871**: 68710M.
- [13] TAIRA T, SAIKAWA J, KOBAYASHI T, *et al.* Diode-pumped tunable Yb : YAG miniature lasers at room temperature; modeling and experiment [J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 1997, **3**(1): 100-104.
- [14] WU Zi-lu, WANG Xian-hua, CHEN Guo-fu, *et al.* Experimental study of mode matching of double-end-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 223-225.
武自录, 王贤华, 陈国夫, 等. 双端泵浦固体激光器模式匹配问题的实验研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 223-225.
- [15] 姚建栓, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] TIAN Yu-bing, LI Yan-tao, LU Qi-peng, *et al.* Optimization of 4.81W Yb : YAG/1030nm thin disc laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2505-2509.
田玉冰, 李颜涛, 卢启鹏, 等. 4.81W Yb : YAG/1030nm 薄片激光器优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2505-2509.
- [17] GAN An-sheng, LI Long, SHI Peng. Thermal effect of Yb : YAG slice laser by diode laser end-pumped [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 631-635.
甘安生, 李隆, 史彭. 激光二极管端面泵浦 Yb : YAG 薄片激光器的热效应[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 631-635.