

LD双端面泵浦Nd:YAG激光器实验研究*

范嗣强

(重庆师范大学光电材料与工程重庆市重点实验室,重庆401331)

摘要:【目的】对双端面泵浦的Nd:YAG激光器进行实验研究。【方法】设计了一种对激光晶体YAG进行双端面泵浦的结构方式,提出对激光晶体介质进行传导冷却与水冷冷却相结合的散热方法,并进一步分析在双端面泵浦下晶体内部的热功率分布,并对晶体内的温度场分布进行了数值模拟计算。【结果】采用U型平行平面腔结构,在注入总泵浦光为33.8W时,得到最高输出功率22.30W,光-光转换斜效率为71.2%,出光阈值功率为6.68W,输出光束为基模, M^2 为1.4。【结论】双端面泵浦YAG激光器比单端面泵浦具有更高的转换效率、更好的光束质量,具有很强的实用价值。

关键词:双端面泵浦;Nd:YAG激光器;激光功率;斜效率

中图分类号:TN248.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)04-0098-05

全固态激光二极管泵浦激光器(DPSSL)以结构紧凑、效率高、稳定性好、光束质量好等优点在工业、医疗、国防、科研等领域有广泛的应用^[1-2]。早期DPSSL的典型结构为:激光二极管输出的激光光束不经过整形,直接侧面泵浦Nd:YAG激光晶体棒^[3-5]。该方式具有结构简单、输出功率高的优点,缺点是光-光转换效率低、光束质量差。随着半导体激光器耦合技术、光纤输出技术的发展,中小功率的DPSSL均采用光纤输出半导体激光器对Nd:YVO₄激光晶体进行端面泵浦^[6-7]。该方式的优点是激光阈值低、转换效率高、输出光束质量好,但由于端面泵浦限制了泵浦光的注入功率,使得它的输出激光功率偏低。如何优化DPSSL的出光质量、出光功率和转换效率一直是这一领域的研究热点^[8-9]。近些年来在超快激光器和特殊波长激光器的研究过程中为了获得更加优良的基频光源,人们开始探索激光二极管端面泵浦Nd:YAG的激光器结构方式,相关研究人员对这一方式的晶体热效应^[10-12]、被动调Q技术^[8,13]、晶体键合技术^[14]、微片激光器^[13]、腔体结构技术^[15]、倍频技术^[16]等领域进行了大量的研究。

为进一步优化DPSSL的性能,本研究创新性地提出双端面泵浦Nd:YAG晶体激光器的设计思想并成功进行了相应实验。新的激光器结合了YAG晶体和双面泵浦方式的优点,温度场分布更为均匀,热效应更小,输出的激光功率更高,光束质量更好,具有极好的应用前景。

1 激光二极管双端面泵浦Nd:YAG激光器实验结构

对于中小型的DPSSL而言,采用双端面激光二极管泵浦的方式可以使泵浦光在谐振腔内形成的增益区与激光腔模体空间交叠增大,从而实现降低阈值功率、提高斜效率的目的;更进一步地,相比于单端泵浦,采用该方式可使热源区更加均匀,热效应更低,输出光束质量更好。在双端面泵浦光的照射下,一部分能量被激光晶体吸收,一部分变为废热;这会影响激光器的正常工作。因而对晶体棒进行冷却散热十分必要,常用的方法是水冷冷却或者传导冷却。图1为激光二极管双端面泵浦Nd:YAG晶体结构简图,本研究中的激光介质晶体采用中国电子科技集团11所研制的Nd:YAG,为3mm×3mm×10mm的长方体结构,掺杂浓度为1%,受激发射截面为 $2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,热导率为 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。两台光纤输出半导体激光器(输出波长808nm)经过耦合透镜组从晶体的两个端面入射。通常单端泵浦的激光谐振腔为直线腔,双端泵浦时采用U形折叠腔,腔长为400mm,晶体放置在谐振腔中心处,由全反镜(1064nm波长全反)、两个45度镜(1064nm全反和808nm全

* 收稿日期:2017-12-20 修回日期:2018-04-10 网络出版时间:2018-07-26 16:50

资助项目:重庆市教育委员会应用基础研究项目(No. KJ1600311; No. KJ130636); 重庆市科学技术委员会前沿基础研究项目(No. cstc2014jcyjA70005); 重庆市高校创新团队计划(No. CXTDX201601016); 重庆师范大学博士启动项目(No. 16XLB004)

第一作者简介:范嗣强,男,博士,高级实验师,研究方向为激光元器件, E-mail:mikefan111@163.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180726.1650.032.html>

透)、输出镜(1 064 nm 90%反射)组成,激光晶体两个通光面镀膜分别为 808,1 064 nm 波长的双色增透。

半导体激光器泵浦光的光纤芯径为 400 μm,从尾纤出来具有一定的发散角;为了有效地将泵浦光注入到晶体中,采用两个焦距分别为 60,30 mm 的平凸透镜组成望远镜系统耦合透镜组。该透镜组放大比例为 2 倍,使得泵浦光在晶体端面的焦斑直径为 800 μm;并在两个耦合透镜底座放置水平可调装置,在本研究中调节耦合透镜与晶体端面的距离以便输出最大功率(图 1)。

1.1 半导体激光器泵浦源及输出特性

实验中的泵浦源采用大族天成半导体公司的 808 nm 半导体光纤输出激光器,型号为 M808±3-30-D400/22-T6-P,如图 2 所示。中心波长 808 nm,光谱宽度 3 nm,最高输出功率 38 W,阈值电流 1.54 A,斜效率 5.21 W·A⁻¹,电光转换效率 41.6%。采用 T 封装模式,输出光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.22。

1.2 激光晶体、散热结构及热分析

在中小型 DPSSL 中,常用的是 YAG 与 YVO₄ 两种晶体,两者各有优缺点:YAG 的热传导系数高,多用于侧面泵浦、浸泡式水冷冷却,可实现高功率输出,但是提取效率和转换效率低;YVO₄ 吸收系数高,多用于端面泵浦、传导冷却,但是输出功率不高。双端面泵浦 Nd:YAG 激光器能够将两者的优点结合起来。传统的侧面 YAG 激光器由于光-光转换效率不高,晶体发热量大,散热方式通常为水冷却,通过直接冲刷晶体表面来带走热量。水冷的缺点是水温不稳定,影响激光功率输出的稳定性。端面泵浦由于转换效率高,发热量小,故一般采用传导冷却的方式;而双端面泵浦进一步降低了发热量,同时为了确保冷却效果,本研究采用晶体表面传导冷却、热沉通水的方式进行散热。

根据 Nd:YAG 激光晶体的形状,设计了用含铜 4.5% 的硬铝(编号 6061)来制作散热热沉,热导率为 177 W·mK⁻¹。热沉由底座和左上紧固块构成,晶体放置在中间通孔内,孔的尺寸与晶体尺寸相同,见图 3。为了更好地散热,用钢膜包裹晶体的侧面,通过紧固螺丝 1 和紧固螺丝 2 提供压力使晶体侧面和热沉表面紧密结合并固定晶体。将热沉固定在通水基座上,确保冷却的效果;同时也使得冷却水的温度变化被热沉吸收,晶体内的温度分布均匀、热流量恒定、输出激光稳定。

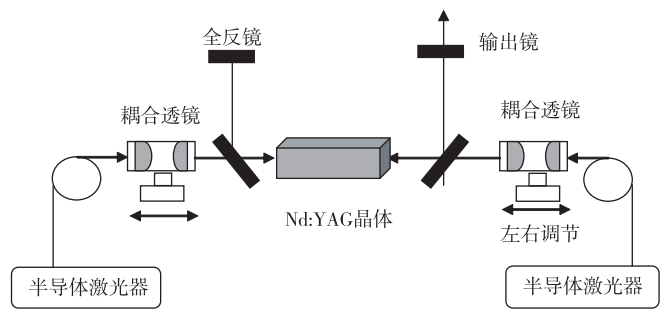


图 1 激光二极管双端面泵浦 Nd:YAG 激光器示意图
Fig. 1 Schematic of LD double end pumped ND:YAG laser

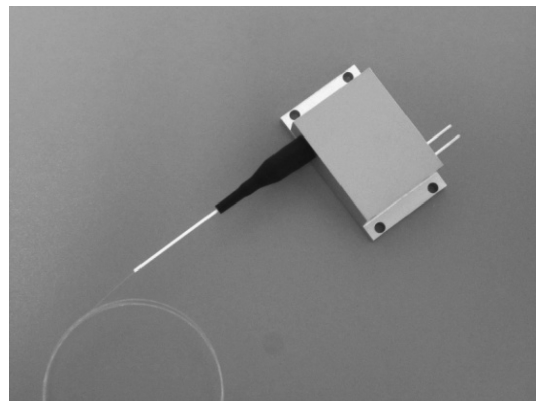


图 2 光纤输出半导体激光器
Fig. 2 Semiconductor laser by fiber output

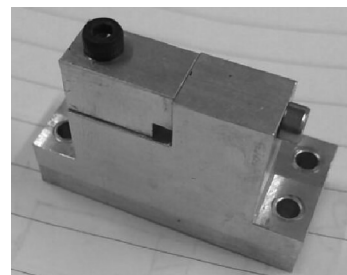
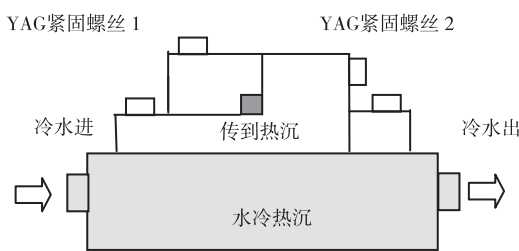


图 3 晶体热沉结构示意图与实物图
Fig. 3 Schematic and picture of crystal heat sink

对于激光二极管输出的激光光束的分布,较多文献将它视为平行平面光或者理想高斯光束。但对于光纤耦合输出泵浦光而言,激光二极管出射光束经过微透镜聚焦后进入光纤,从尾端射出,再经过耦合透镜进入激光晶

体棒的端面,光斑分布采用超高斯光束描述更为合理^[17]。超高斯光束沿 z 轴进入棒的两个端面($z=0, z=1$), 光束光强分布表达式为:

$$I(r) = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^{2k}}$$

其中: ω_0 为注入处的高斯光斑; k 为超高斯的阶次。 k 取 1 时为理想高斯光束; k 取 2, 3, ... 时为超高斯分布; 当 k 取无穷大时, 激光光束趋于平顶均匀光束。激光二极管泵浦入射到 Nd:YAG 晶体端面泵浦功率为 P , 且有

$$P = \int_0^{\infty} I_0 e^{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^{2k}} dr。$$

设 Nd:YAG 对泵浦光吸收系数为 β , 它在晶体内部的强度会因为吸收而减弱, 在双端面泵浦晶体内任意处的光强分为两个部分为的叠加:

$$I_1(r, z) = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^{2k}} \cdot e^{-\beta z}, I_2(r, z) = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^{2k}} \cdot e^{-\beta(1-z)}。$$

激光晶体 Nd:YAG 产生热能的原因很多, 主要来源是荧光量子效应, 此处只考虑其中产生的热量, 则晶体两边注入泵浦光在体内产生的热功率密度为左右两边注入光热量之和, 左边泵浦光在晶体内产生的热源分布为:

$$q_1(r, z) = \frac{2\beta\eta P_{in} e^{-2r^2/\omega_p^2} e^{-\beta z}}{\pi\omega_p^2},$$

右边泵浦光在晶体内产生的热源分布为:

$$q_2(r, z) = \frac{2\beta\eta P_{in} e^{-2r^2/\omega_p^2} e^{-\beta(1-z)}}{\pi\omega_p^2},$$

其中, 光量子效率 $\eta = 1 - \frac{808}{1064} = 0.24$, 808 为泵浦光波长数值, 1064 为输出激光波长数值。由于采用热传导和通水冷却两种制冷方式的组合, 有效地保证了冷却效果。设定激光晶体的侧表面为恒温(室温 300 K), 两个通光面与空气接触, 面积小、无热交换, 设定为绝热。在注入功率均为 20 W 双端泵浦情况下, 利用 Matlab 软件对晶体的内部温度场进行了数值模拟计算, 温度场分布如封三彩图 4 所示, 从图中可以看出晶体内两端面中心处温度最高为 525 K, 且对称分布, 相比于单端注入 40 W 的功率热效应更小。

2 激光二极管双端面泵浦 Nd:YAG 激光器实验及数据分析

按照本研究方案搭建好实验装置后, 打开水冷设备, 确保水温恒定在 20 °C。用一个电源控制系统控制泵浦光的输出功率, 确保两端注入的泵浦光功率相同。在输出镜后面用激光功率计进行输出功率测试。采用中国计量科学研究院生产的 NIM-P1000 激光功率计测得的数据如表 1 所示; 第 1 列行为半导体激光器电流, 第 2 列、第 3 列分别为在相应电流下单端输出的功率与双端输出功率, 第 4 列为振荡激光输出功率。

表 1 泵浦光电流、单泵源功率、双泵源功率和激光输出功率数据

Tab. 1 Electricity of pumping light, power of single pumping light, power of single pumping light, and power of output laser

电流/A	单泵输出/W	双泵输出/W	振荡输出/W	电流/A	单泵输出/W	双泵输出/W	振荡输出/W
3.0	3.80	7.6	0.78	6.5	12.9	25.8	13.8
3.5	5.10	10.2	2.81	7.0	14.2	28.4	15.9
4.0	6.40	12.8	4.23	7.5	15.5	31.0	17.8
4.5	7.75	15.5	5.76	8.0	16.8	33.6	19.1
5.0	9.05	18.1	7.92	8.5	18.1	36.2	21.2
5.5	10.3	20.7	9.79	9.0	19.4	38.8	22.3
6.0	11.6	23.2	11.80				

根据表 1 的数据得到双端面泵浦 Nd:YAG 激光器的输出激光和泵浦光的拟合关系图如图 5 所示。可以看出, 激光输出功率与泵浦功率呈线性关系、均匀增强, 对应拟合线性方程为

$$P_{out} = 0.712 \times P_{in} - 4.756,$$

在注入功率为 38.8 W 时, 输出最大功率 22.3 W, 阈值功率为 6.68 W, 光-光转换斜效率为 71.2%, 说明实验装

置具有极高的转换效率。

采用激光 M^2 测试仪对该激光器的输出光束进行测试,得到如封三彩图6所示的输出激光光斑。该输出激光光束模式为基模,测试 M^2 为 1.4,可见采用双端泵浦方式极高的提升了 YAG 激光器的输出光束质量。

3 结论

本研究分析了 Nd:YAG 与 Nd:YVO₄ 的特点,结合 Nd:YAG 晶体与端面泵浦的优点,创新性地提出对 Nd:YAG 晶体进行双端面泵浦的激光器结构,采用晶体传导冷却、热沉通

水的冷却结构,实现了端面泵浦 YAG 激光器高功率线性输出,在注入功率 38.8 W 时获得 22.3 W 的高输出功率和 71.2% 的高光-光转换斜效率。得到光束为基模、 M^2 为 1.4 的输出光束质量。该结构激光器可作为倍频激光的基频光,可在体积和能耗上实现极大的优化,为相应的激光器实现小型化、便携式提供重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译. 北京:科学出版社,2002.
KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. SUN W,JIANG Z W,CHENG G X,et al,translation. Beijing:Science Press,2002.
- [2] 李斌,姚矣,李永大,等. LD 泵浦 Nd:YAG 全固态蓝光激光器[J]. 应用激光,2008,28(4):306-309.
LI B,YAO Y,LI Y D,et al. LD-pumped Nd:YAG all solid-state blue laser[J]. Applied Laser,2008,28(4):306-309.
- [3] 商继敏,任宇芬. 侧面紧耦合泵浦微型激光器研究[J]. 红外与激光工程,2013,42(5):1174-1178.
SHANG J M,REN Y F. Tightly coupled side-pumping technology ofminiature solid state laser[J]. Infrared and Laser Engineering,2013,42(5):1174-1178.
- [4] 王茜,王勇刚,段利娜,等. LD 侧面泵浦半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器[J]. 光子学报,2015,44(7):120-124.
WANG X,WANG Y G,DUAN L N,et al. LD side-pumped passive mode-locked Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror[J]. Acta Photonica Sinica,2015,44(7):120-124.
- [5] 王喆,刘洋,刘磊,等. LD 侧泵 Nd:YAG 薄板条 MOPA 激光器[J]. 激光与红外,2015,45(4):364-368.
WANG Z,LIU Y,LIU L,et al. Laser diode side-pumped Nd:YAG thin slab laser based on MOPA[J]. Laser & Infrared,2015,45(4):364-368.
- [6] 王志勇,李晓青,焦月春,等. 激光二极管端面纵向泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的热效应研究[J]. 量子光学学报,2011,17(2):158-162.
WANG Z Y,LI X Q,JIAO Y C,et al. Investigation of thermal lensing effect in Nd:YVO₄ laser end-pumped by laser-

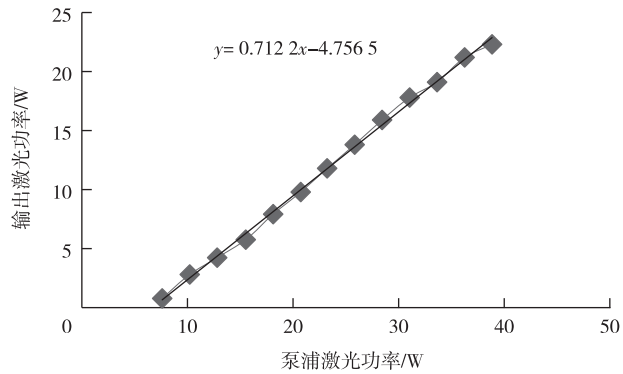


图5 输出激光与注入激光关系曲线

Fig. 5 Graph of relation of power of output and power of input

- diode[J]. Acta Sinica Quantum Optica,2011,17(2):158-162.
- [7] 侯立群,樊仲维,王培峰,等. LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光器热管理结构的研究[J]. 红外与激光工程,2011,40(3):424-428.
HOU L Q,FAN Z W,WANG P F,et al. Thermal management configuration of laser diode end-pumped d:YVO₄ laser [J]. Infrared and Laser Engineering,2011,40(3):424-428.
- [8] 刘宗华,郑义. LD 泵浦被动调 Q-Yb³⁺:YAG 微晶片激光器的优化设计[J]. 发光学报,2013,34(9):1219-1226.
LIU Z H,ZHENG Y. Design and optimization of LD-pumped passively Q-switched Yb³⁺:YAG microchip laser [J]. Journal of Luminescence,2013,34(9):1219-1226.
- [9] 郑加安,赵圣之,王青圃,等. 晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J]. 光子学报,200,30(6):724-729.
ZHENG J A,ZHAO S Z,WANG Q P,et al. Influence of thermal effect in gain-media on optimum design of LD end-pumped sold state laser[J]. Acta Photonica Sinica,2001,30(6):724-729.
- [10] 郑义,高明义,姚建铨. LD 端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究[J]. 光电子激光,2003,14(10):1094-1098.
ZHENG Y,GAO M Y,YAO J Q. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped[J]. Journal of Optoelectronics • Laser,2003,14(10):1094-1098.
- [11] 李隆,聂建萍,史彭,等. 端面泵浦热传导各向异性激光棒的温度场[J]. 光学精密工程,2009,17(12):2931-2938.
LI L,NIE J P,SHI P,et al. Temperature field characteristics of thermal conductiveanisotropic laser rods by LD

- end-pumped[J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(12): 2931-2938.
- [12] 李隆, 耿鹰鸽, 余庚华, 等. 脉冲激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 圆棒晶体热效应[J]. *应用激光*, 2015, 35(5): 597-602.
- LI L, GENG Y G, YU G H, et al. Thermaleffect of Nd:YAGrod crystal end pumped by pulse LD[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(5): 597-602.
- [13] 王旭, 程光华, 孙哲. LD 泵浦的被动调 QYb:YAG 薄片激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 51-55.
- WANG X, CHENG G H, SUN Z. Research of LD-pumped passively Q-switched Yb:YAGthin disk laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 51-55.
- [14] 江炜, 何青, 陈振强, 等. 基于 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体 LD 侧面泵浦激光器[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 139-142.
- JIANG W, HE Q, CHEN Z Q, et al. LD side-pumped laser based on Nd:YAG/Cr:YAG compositecrystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 139-142.
- [15] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率圆片 Yb:YAG 激光器的热效应[J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 103-107.
- GENG Y G, LI L, PAN X R, et al. Thermal effect of variable thermal-conductivity circular Yb:YAG crystal end pumped by pluse LD[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 103-107.
- [16] 李义民, 檀慧明, 付喜宏, 等. LD 泵浦腔内倍频 Nd:YAG/LBO 蓝光 473nm 激光器的低噪声运转[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 11-15.
- LI Y M, TAN H M, FU X H, et al. LD pumped intracavity frequency doubling473nmNd:YAG/LBO laser with low noise operation[J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(1): 11-15.
- [17] 齐兵, 李隆, 甘安生, 等. LD 端面泵浦变热传导系数 Nd:YAG 晶棒温场特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1174-1179.
- QI B, LI L, GAN A S, et al. Temperature field characteristics analysis of Nd:YAG rod withvariable thermal-conductivity coefficient by LD end-pump[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1174-1179.

Experimental Study of LD Dual End-Pumping Nd:YAG Laser

FAN Siqiang

(Key Laboratory of Photoelectric Material and Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] Experimental study on the Nd:YAG laser of double end pump is conducted. [Methods] Innovative proposed to the YAG laser crystal structure of the double pump, the conduction cooling and water cooling both been used in YAG crystal and the thermal dissipation structure been designed. The distribution inside of crystal thermal under the double pumping been analyzed, and within the crystals on the numerical simulation on temperature field distribution. The laser gain dielectric Nd:YAG was cooled by a U-type parallel flat cavity structure. [Findings] The maximum output power is 22.30 W when the total pump was 33.8 W. Light - light conversion efficiency of oblique was 71.2%, and the threshold power is 6.68 W. The output beam was the base model and the M^2 was 1.4. [Conclusions] Experiments show that double end-pumped YAG laser has a strong practical value with its higher conversion and better beam quality.

Keywords: double end-pump; Nd:YAG laser; laser power; oblique efficiency

(责任编辑 许 甲)

(接正文95页)

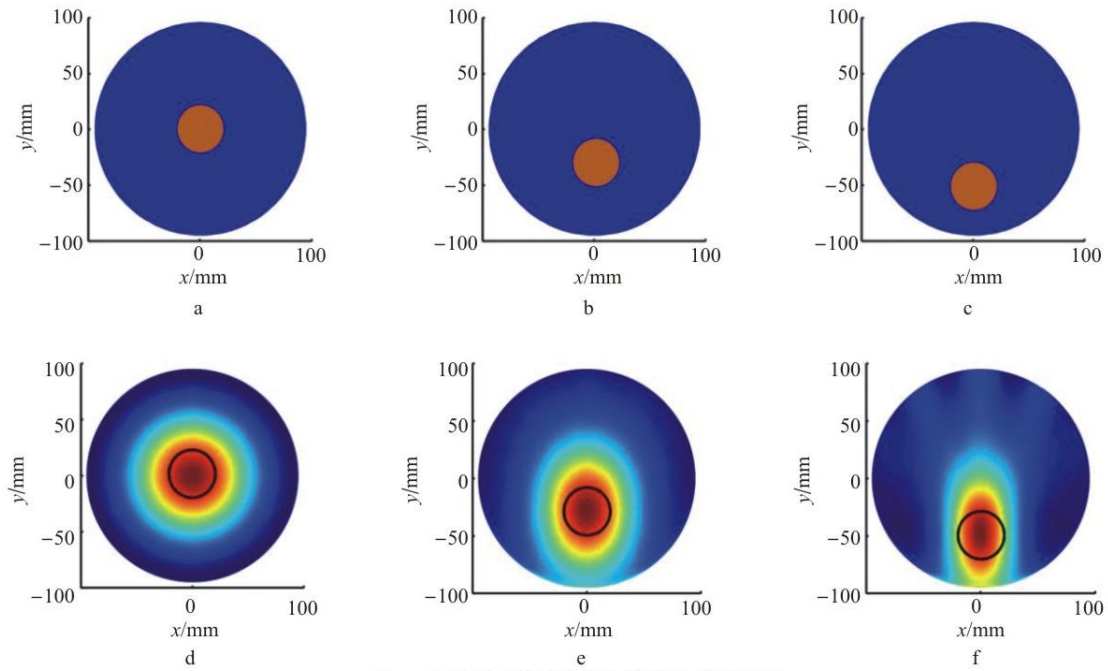


图 4 不同位置的异物的模型和成像结果

Fig. 4 The model and imaging results of disturbance objects in different locations

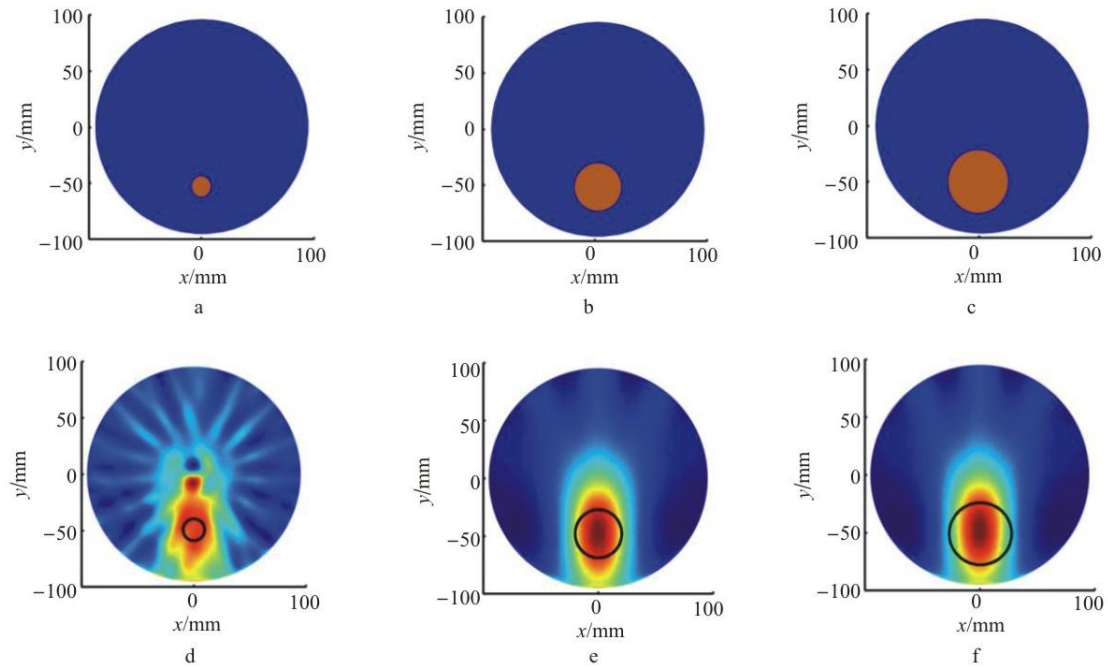
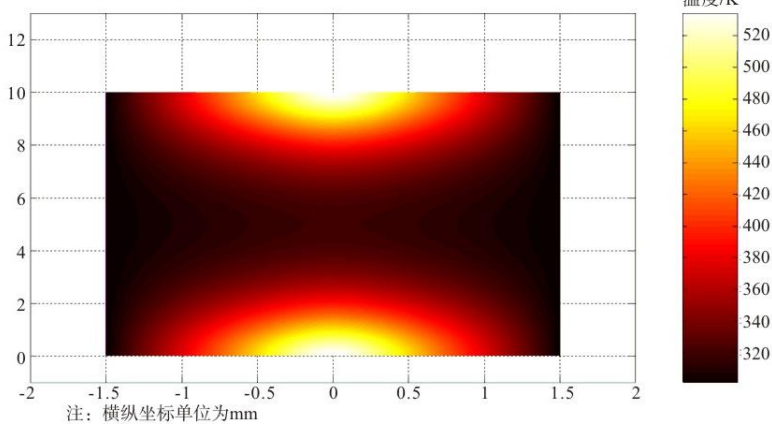


图 5 不同直径的异物的模型和成像结果

Fig. 5 Model and imaging results of disturbance bodies with different diameters

(接正文100页)



注: 横纵坐标单位为mm

图 4 注入功率均为20 W时双端面泵浦下温度场分布
Fig. 4 Emperature field distribution of double end-pumping by 20 W LD power

(接正文101页)

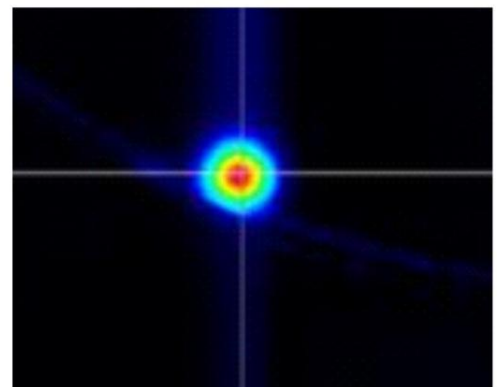


图 6 1 064 nm激光光斑分布及 M^2 平方因子
Fig. 6 Intensity of facula and M^2 factor of 1 064 nm wavelength laser