

文章编号: 1001-3806(2010)01-0008-05

## 高功率 Yb:YAG 微片激光器热效应研究

李 隆<sup>1,2</sup>,董武威<sup>1</sup>,史 彭<sup>1</sup>,甘安生<sup>1</sup>,许启明<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 为了研究抽运光在 Yb:YAG 晶体内产生的非均匀性温升以及引起的热效应问题,以半解析热分析理论为基础,结合超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片工作特点分析,采用热传导方程一种新的求解方法,得出了 Yb:YAG 微片内部温度场、热形变场、附加光程差的半解析计算表达式。并定量分析了超高斯光束不同阶次、不同光斑尺寸抽运时对于 Yb:YAG 微片温度场、热形变场的影响。结果表明,若使用 50W、光斑半径 300 $\mu\text{m}$  的 5 阶超高斯光束端面抽运掺镱离子原子数分数为 0.08 的 Yb:YAG 微片,抽运面上可获得 52.18 $^{\circ}\text{C}$  最高温升量,产生 0.1195 $\mu\text{m}$  最大热形变,引起 0.2152 $\mu\text{m}$  的附加光程差。该研究结果对于微片激光器热不敏谐振腔最优化设计具有理论指导作用。

**关键词:** 激光器;微片激光器;Yb:YAG 晶体;热效应;超高斯光束;半解析分析

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.003

### Thermal effect of high power Yb:YAG microchip solid-state laser

LI Long<sup>1,2</sup>, DONG Wu-wei<sup>1</sup>, SHI Peng<sup>1</sup>, GAN An-sheng<sup>1</sup>, XU Qi-ming<sup>2</sup>

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the nonuniform temperature rise and thermal effect in the Yb:YAG crystal, based on the theory of semi-analytical thermal analysis and working characteristic analysis of Yb:YAG microchip with super-Gaussian beam end-pumping and back-face cooling, a new solution of heat conduction equation was introduced and the general expressions of temperature field, thermal distortion field and additional optical path differences (OPD) of Yb:YAG microchip were obtained respectively. Some factors affecting the temperature distribution and thermal distortion of Yb:YAG microchip, such as the super-Gaussian beam with different orders, different spot radius, were quantitatively analyzed. If a Yb:YAG microchip with 0.08 atom fraction of ytterbium is end-pumped by the fifth order super-Gaussian beam with power of 50W in 300 $\mu\text{m}$  radius, its maximal temperature raise was up to 52.18 $^{\circ}\text{C}$  and its maximum thermal distortion was 0.1195 $\mu\text{m}$  and maximum additional OPD was 0.2152 $\mu\text{m}$ . The results can provide theoretical instruction for the heat insensitivity cavity design of microchip laser.

**Key words:** lasers; microchip laser; Yb:YAG crystal; thermal effect; super-Gaussian beam; semi-analytical thermal analysis

## 引 言

激光二极管抽运的微片激光器既具有高的输出功率(连续或脉冲),又具有较好的光束质量,成为了全固态激光器发展的一个方向<sup>[1,2]</sup>。将 Yb:YAG 晶体与 Nd:YAG 相比, Yb<sup>3+</sup> 的荧光寿命是 Nb<sup>3+</sup> 的 4 倍,利于抽运光能量的储存;量子缺陷低,吸收带宽(约 18nm),对抽运源没有苛刻的温控限制;允许 Yb<sup>3+</sup> 掺杂浓度高,吸收系数大,利于抽运光的吸收与晶体厚度的减小,这些都有极大地促进了 Yb:YAG 微片激光器

的小型化发展<sup>[3]</sup>。目前已实现了 Yb:YAG 微片激光器的连续<sup>[4-5]</sup>、调 Q<sup>[6]</sup> 以及锁模<sup>[7]</sup> 等运转方式。

在全固态 Yb:YAG 微片激光器设计时为了提高对于抽运光的吸收率,一般选用较高掺杂浓度的 Yb:YAG 晶体(原子数分数为 0.08 ~ 0.13 左右)。考虑到 Yb:YAG 晶体对于 1030nm 波长的光有较强的再吸收现象, Yb:YAG 微片厚度应选择尽量薄(0.3mm ~ 1mm 左右)。另外,在 Yb:YAG 微片冷却面镀 940nm 抽运波长的高反射膜以增加对于抽运光的利用率。然而, Yb:YAG 晶体为准三能级结构,这使得激光器的性能对于 Yb:YAG 微片的热效应较为敏感<sup>[4,8]</sup>。采用端面抽运方式,抽运光的能量被聚集在 Yb:YAG 微片很小的区域内,抽运光在 Yb:YAG 晶体内产生的非均匀性温升以及引起的热效应问题极大地影响了激光器的性能以及输出光束质量<sup>[9-11]</sup>。

本文中通过光纤耦合 LD 端面抽运 Yb:YAG 微片

基金项目:陕西省工业攻关项目资助项目(2008K05-15);  
陕西省教育厅专项科研资助项目(07JK284)

作者简介:李 隆(1972-),男,副教授,博士后,硕士生导师,主要从事全固态激光技术及其应用研究。

E-mail: lilong7211@126.com

收稿日期:2009-01-06;收到修改稿日期:2009-03-03

固体激光器工作特点研究,考虑到光纤耦合抽运光有着超高斯分布、Yb:YAG 微片具有抽运面近似绝热、背向冷却等特点,建立了符合 Yb:YAG 微片实际情况的热模型,利用 Poisson 方程,得出了超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片温度场、热形变场的一般解析表达式。通过激光热透镜效应的分析,定量地给出了超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片因热效应产生的附加光程。研究将为激光二极管端面抽运 Yb:YAG 微片全固体激光器热稳腔设计提供了理论依据。

## 1 端面抽运、背向冷却激光微片热效应半解析分析

### 1.1 端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片热模型

采用 LD 端面抽运方式,抽运光可被有效地耦合进入激活介质的 TEM<sub>00</sub> 模体积内,易于实现抽运光与振荡激光的空间模式匹配,使得激光器具有较高的斜效率与稳定的基模输出。LD 抽运 Yb:YAG 激光器采用非线性晶体腔内倍频,可获得接近 Ar 离子激光器的输出波长,其研究在激光领域内受到广泛地关注<sup>[12-13]</sup>。

为实现端面抽运方式,Yb:YAG 微片的抽运面镀 940nm 和 1030nm 双波长增透膜 (AR @ 940nm & 1030nm, 反射率小于 0.2%), 冷却面镀 940nm 和 1030nm 双波长高反膜 (HR @ 940nm & 1030nm, 反射率大于 95%)。将 Yb:YAG 微片用铜焊接在热沉紫铜块上,紫铜块内掏微循环水通道,用水冷方式对 Yb:YAG 微片进行冷却。Yb:YAG 微片镀膜结构及工作方式见图 1。

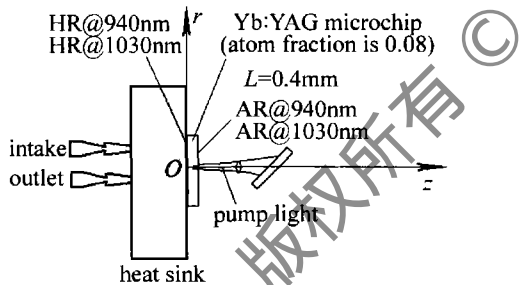


Fig. 1 Operating characteristic and coating of Yb:YAG microchip with end-pumped and back-surface cooled

Yb:YAG 微片与热沉之间有着良好的热接触,微片背面温度保持相对恒定。其抽运面与空气相接触,微片产生的热量大多经背面以热传导方式散失,可假设微片抽运面以及侧面处于绝热状态。建立柱坐标系,坐标原点  $O$  处于 Yb:YAG 微片冷却面中心。LD 端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片热边界条件数学表达式为:

$$\begin{cases} u(r, \varphi, z) |_{z=0} = 0 \\ \frac{\partial u(r, \varphi, z)}{\partial z} |_{z=L} = 0 \\ \frac{\partial u(r, \varphi, z)}{\partial r} |_{z=R} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $L$  为晶体的长度(取  $z$  方向),  $R$  为晶体半径。

### 1.2 端面抽运、背向冷却激光微片温度场半解析表达式

LD 发光阵列经由微透镜组合整形后,耦合进入到光纤,经耦合器聚焦到 Yb:YAG 微片的抽运端面,其光束一般假设为高斯分布或所谓“大礼帽”分布,这些分布可归结为不同阶次的超高斯分布<sup>[14]</sup>。超高斯分布的抽运光沿  $z$  轴垂直入射到 Yb:YAG 微片抽运端面 ( $z=L$  面),其光强度分布表达式为<sup>[15]</sup>:

$$I_i(r, L) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为抽运光中心的强度;  $w$  为抽运光束的高斯半径; 而  $k$  为超高斯分布阶次。当  $k=1$  时,为理想的高斯分布; 当  $k=4, 5, \dots$  时,为“大礼帽分布”; 当  $k=\infty$  时,为平顶均匀分布。图 2 所示为不同阶次超高斯分布对比图。

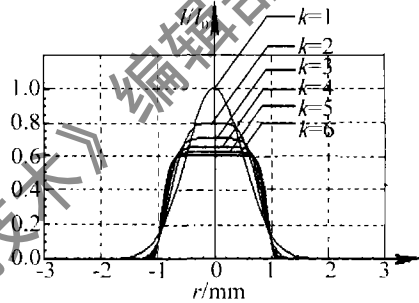


Fig. 2 Distributions of different orders super-Gaussian beams

Yb:YAG 晶体对 940nm 抽运光波长的吸收系数为  $\beta$ , 由吸收定律,可得抽运光在微片内  $z=z$  面的光强为:

$$I_i(r, z) = I_i(r, L) \cdot \exp[-\beta(L-z)] \quad (3)$$

当抽运光传播至 Yb:YAG 微片冷却面时 ( $z=0$ ) 的光强为:

$$I_i(r, 0) = I_i(r, L) \cdot \exp(-\beta L) \quad (4)$$

Yb:YAG 微片冷却面镀有 940nm 和 1030nm 双波长高反膜 (HR), 则经微片冷却面反射回来的抽运光光强为:

$$I_r(r, 0) = \zeta_r I_i(r, L) \cdot \exp(-\beta L) \quad (5)$$

式中,  $\zeta_r$  为 940nm 高反膜的反射率。

反射回的抽运光在微片内再次被吸收,其光强为:

$$I_r(r, z) = I_r(r, 0) \cdot \exp(-\beta z) = \zeta_r I_i(r, L) \cdot \exp(-\beta L) \cdot \exp(-\beta z) \quad (6)$$

在 Yb:YAG 微片内任意位置处抽运光的总光强为:

$$I(r, z) = I_i(r, z) + I_r(r, z) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) \times \{ \exp[-\beta(L-z)] + \zeta_r \exp(-\beta L) \cdot \exp(-\beta z) \} \quad (7)$$

由于激光晶体荧光量子效应和内损耗吸收抽运光的能量远大于其它原因晶体吸收的能量,仅考虑激光晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收抽运光的发热量<sup>[16]</sup>。在 Yb:YAG 微片内  $z=z$  面的热功率密度为:

$$q_v(r, z) = \beta \eta I(r, z) = \beta \eta I_0 \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) \times$$

$\{\exp[-\beta(L-z)] + \zeta, \exp(-\beta L) \cdot \exp(-\beta z)\}$  (8)  
式中,  $\eta$  为由激光晶体荧光量子效应和内损耗所决定的热转换系数,  $\eta = 1 - \lambda_p/\lambda_1$ .  $\lambda_p$  为抽运光波长(940nm),  $\lambda_1$  为激光器振荡激光波长(1030nm)。

Yb:YAG 晶体为各向热传导同性材料, 其内部温度场分布遵守 Poisson 方程:

$$\frac{\partial^2 u(r, \varphi, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u(r, \varphi, z)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u(r, \varphi, z)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u(r, \varphi, z)}{\partial z^2} = -\frac{q_v(r, z)}{\lambda} \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  为 Yb:YAG 晶体的导热系数或热导率。

依据端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片的边界条件以及热功率密度分布特点, 利用半解析热分析方法, 可得微片内部温度场分布的表达式:

$$u(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} \sin\left[\frac{(2m+1)\pi z}{2L}\right] J_0\left[\frac{x_n^{(1)}}{R}r\right] \quad (10)$$

式中, 常数  $A_{nm}$  为:

$$A_{nm} = \frac{16I_0\beta\eta L}{\lambda \{(2m+1)^2\pi^2 R^2 + 4L^2[x_n^{(1)}]^2\} J_0^2[x_n^{(1)}]} \times \int_0^R \int_0^L \exp\left(-2\frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) \{\exp[-\beta(L-z)] + \zeta, \exp[-\beta(L+z)]\} \sin\left[\frac{(2m+1)\pi z}{2L}\right] J_0\left[\frac{x_n^{(1)}}{R}r\right] dz \cdot r dr \quad (11)$$

式中,  $x_n^{(1)}$  为 1 阶贝塞尔函数第  $n$  个零点,  $J_0$  为 0 阶贝塞尔函数。

### 1.3 端面抽运、背向冷却激光微片热形变半解析表达式

端面抽运形式在激光晶体内形成的增益区域较为集中, 局域的温升引起该区域的热形变。假设 Yb:YAG 微片沿抽运方向上的微形变量为  $d\Delta_z = \alpha T(r, z) dz$ , 其中  $\alpha$  为 Yb:YAG 晶体的热膨胀系数。微片的热形变量为:

$$\Delta_z(r) = \int d\Delta_z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} B_{nm} J_0\left[\frac{x_n^{(1)}}{R}r\right] \quad (12)$$

式中, 比例系数  $B_{nm}$  为:

$$B_{nm} = \frac{32\alpha I_0\beta\eta L^2}{\lambda (2m+1)\pi \{(2m+1)^2\pi^2 R^2 + 4L^2[x_n^{(1)}]^2\} J_0^2[x_n^{(1)}]} \times \int_0^R \int_0^L \exp\left(-2\frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) \{\exp[-\beta(L-z)] + \zeta, \exp[-\beta(L+z)]\} \sin\left[\frac{(2m+1)\pi z}{2L}\right] J_0\left[\frac{x_n^{(1)}}{R}r\right] dz \cdot r dr \quad (13)$$

### 1.4 超高斯光束端面抽运、背向冷却激光微片的附加光程的计算

激光晶体内非均匀温升产生出的晶体折射率变

化、热形变以及双折射效应, 使得光学谐振腔内振荡光束在通过晶体时产生了附加光程(optical path distance, OPD)<sup>[17]</sup>。作者已经对此进行了研究, 得出这 3 个因素在 Yb:YAG 微片内部任意点  $(r, z)$  沿轴向  $dz$  微元内产生的附加光程差分别为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} d_1 = 6.64 \times 10^{-6} T(r, z) dz \\ d_2 = 7.30 \times 10^{-6} T(r, z) dz \\ d_3 = 0.82 \times 10^{-6} T(r, z) dz \end{cases} \quad (14)$$

则在 Yb:YAG 微片  $dz$  元内产生的附加总光程差为:

$$d(r) = \int 14.76 \times 10^{-6} T(r, z) dz \quad (15)$$

## 2 超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片热效应分析

### 2.1 超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片温度场分析

取阶次为 5, 光斑半径为 300  $\mu\text{m}$  的超高斯光束端面抽运微片激光器。如果抽运功率为 50W, Yb:YAG 微片尺寸为  $\varnothing 6\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 。掺 Yb<sup>3+</sup> 原子数分数为 0.08 的 Yb:YAG 晶体对于 940nm 波长抽运光的吸收系数为 8.28  $\text{cm}^{-1}$ , YAG 基质导热系数为 0.14  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[19,20]</sup>。Yb:YAG 微片冷却面镀有 940nm 波长的高反膜, 反射率为 95%。

根据半解析热分析表达式(10)式, 可得 5 阶超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片温度场分布如图 3 所示, 其等温线分布如图 4 所示。其中 Yb:YAG 微片抽运端面最高温升为 52.18  $^{\circ}\text{C}$ 。

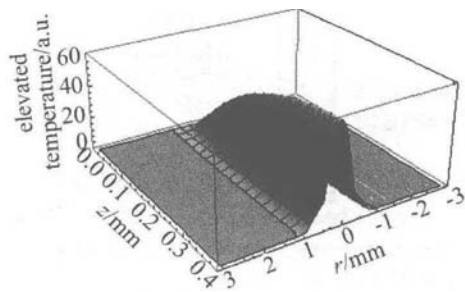


Fig. 3 Temperature field distribution of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

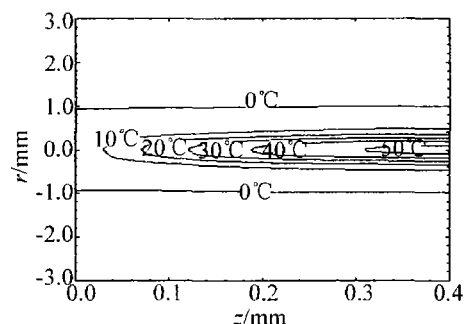


Fig. 4 Isotherm distribution of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

2.1.1 不同阶次超高斯光束对于 Yb:YAG 微片温度场的影响 改变(10)式中的阶次  $k$  大小,可得到不同阶次超高斯光束抽运光 Yb:YAG 微片温度场分布图。图 5 所示为不同阶次超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片抽运面的温升对比图。由图得出:使用超高斯光束

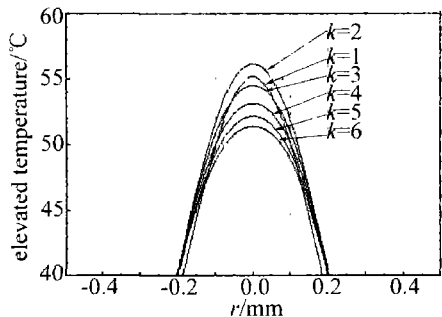


Fig.5 Temperature rise on the pump-face of Yb:YAG microchip end-pumped by different order super-Gaussian beams

阶次分别为 1,2,3,4,5,6 时, Yb:YAG 微片抽运面中心最高温升分别为 55.09°C, 56.18°C, 54.54°C, 53.18°C, 52.18°C, 51.42°C。2 阶超高斯光束在 Yb:YAG 微片抽运面产生的温升值最高。随着阶次增加,超高斯光束光强趋于均匀分布, Yb:YAG 微片抽运面最高温升值降低。因此,使用高阶超高斯抽运光将有利于减小 Yb:YAG 微片的热效应。

2.1.2 不同超高斯光束光斑半径对于 Yb:YAG 微片温度场的影响 抽运光斑与激光介质之内振荡光斑之间的最佳匹配是影响微片激光器效率的主要因素。采用不同焦距的平凹透镜组合,即可改变光学聚焦系统的物像比。与图 3 相同抽运条件下,改变 5 阶超高斯光束的光斑半径,可得不同光斑对于 Yb:YAG 微片温度场的影响,如图 6 所示。由图得出:当 5 阶超高斯

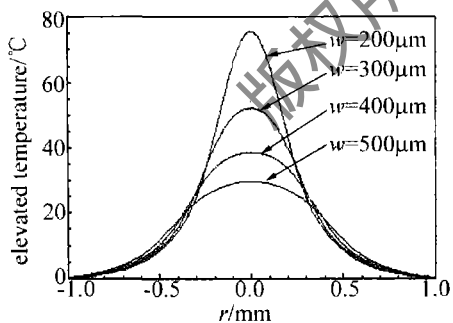


Fig.6 Temperature rise on the pump-face of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam with different radius

光束光斑半径为 200 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$ , 500 $\mu\text{m}$  时, Yb:YAG 微片抽运面中心最高温升分别为 75.59°C, 52.18°C, 38.38°C, 29.67°C。通过谐振腔的设计适当地增大微片内振荡光斑的半径,即增大抽运光斑尺寸,有助于减小 Yb:YAG 微片的热效应。

2.2 超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片热形变分析 由于 Yb:YAG 微片背面与热沉接触,晶体抽运端面

温升较高,利用(12)式可计算抽运面上热形变分布。

在与图 3 相同的抽运条件下,得出 5 阶超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片热形变的分布图,如图 7 所示。Yb:YAG 微片抽运面最大热形变量为 0.1195 $\mu\text{m}$ 。

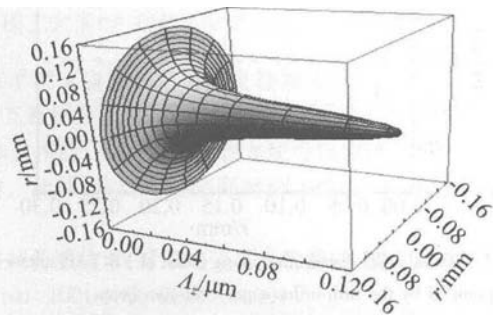


Fig.7 Thermal distortion on the pump-face of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

改变阶次,可以定量分析出不同阶次超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片的热形变场,如图 8 所示。由

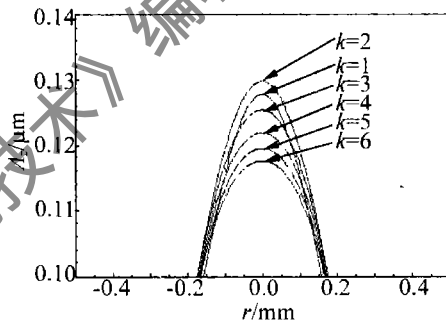


Fig.8 Thermal distortion on the pump-face of Yb:YAG microchip end-pumped by different order super-Gaussian beams

图得出:使用超高斯光束阶次分别为 1,2,3,4,5,6 时, Yb:YAG 微片抽运面最大热形变量分别为 0.1279 $\mu\text{m}$ , 0.1299 $\mu\text{m}$ , 0.1256 $\mu\text{m}$ , 0.1221 $\mu\text{m}$ , 0.1195 $\mu\text{m}$ , 0.1176 $\mu\text{m}$ 。高阶超高斯光束的采用可以减小抽运面的热形变量。

### 2.3 超高斯光束端面抽运 Yb:YAG 微片附加光程及热焦距

Yb:YAG 微片附加光程的定量分析是研究激光晶体热透镜效应的关键。利用(15)式可计算 Yb:YAG 微片附加光程的分布。在与图 3 相同的条件下,得到 5 阶超高斯光束端面抽运、背向冷却 Yb:YAG 微片由

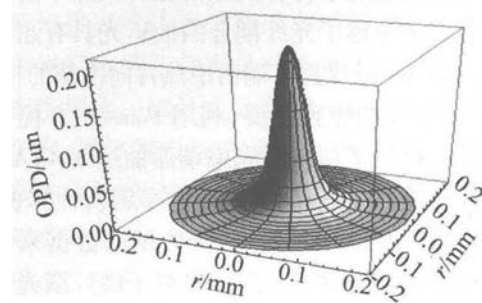


Fig.9 Additional OPD distribution of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

于温升引起的附加光程分布,如图9所示。在抽运光中心处产生的附加光程为 $0.2152\mu\text{m}$ 。图10所示为附加光程差随晶体半径的变化。

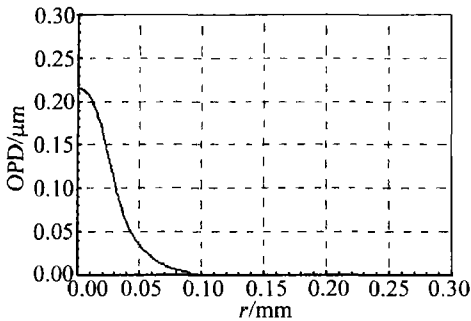


Fig. 10 Additional OPD distribution along radial of Yb:YAG microchip end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

在抽运区域,热透镜焦距可以近似地用球面透镜焦距计算公式来拟合<sup>[17]</sup>:

$$f = \frac{r_e^2}{2[d_0 - d(r_e)]} \quad (16)$$

式中, $r_e$ 为抽运光有效半径,由于阶次为5的超高斯光产生的附加光程差范围为 $w$ ,则 $r_e$ 取 $w$ ;  $d_0$ 为轴心处的光程差; $d(r_e)$ 为抽运光有效半径处的光程差。在与图3相同的条件下,微片Yb:YAG晶体热焦距随抽运功率增加时所产生的热焦距变短,对激光束质量有明显的影

响,如图11所示。

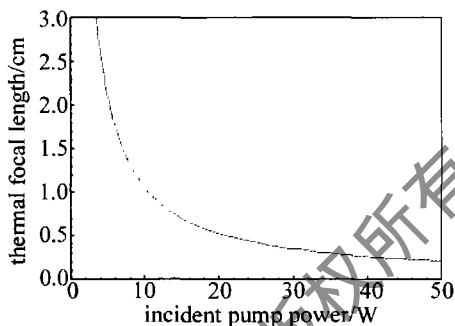


Fig. 11 Thermal focal length of the Yb:YAG microchip crystal as a function of LD pump power

### 3 结论

作者在分析LD端面抽运Yb:YAG微片激光器工作特点的基础上,建立了符合实际情况的微片半解析热分析模型,研究中考虑了光纤耦合的抽运光具有超高斯分布特点,Yb:YAG微片具有端面绝热背向冷却的特点,结合Yb:YAG微片的镀膜需要,利用Poisson方程一种新的求解方法,得出了超高斯光束端面抽运Yb:YAG微片内部温度场、热形变场、附加光程差半解析计算表达式。由于Yb:YAG微片半解析热分析依据的数据来源于激光器设计中的实验所得,研究结果对于微片激光器热不敏谐振腔最优化设计具有理论指导作用。

### 参考文献

- [1] BRINKMANN U. Yb:YAG thin-disk laser is single-frequency tunable [J]. *Laser Focus World*, 2006, 42(3): 18-22.
- [2] SHAN X Y, WEI X Y, WU N L, *et al.* Study on the beam quality of diode pumped Yb:YAG thin disk laser and the intracavity frequency doubling in V-type resonator [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21(5): 587-591 (in Chinese).
- [3] ZHANG Zh W. Thin disk Yb:YAG laser and its applications [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s0): 11-14 (in Chinese).
- [4] TAIRA T, TULLOCH M W, BYER L R. Modelling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG laser [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(9): 1867-1874.
- [5] CAO H Zh, TAN H M, PENG H Y, *et al.* Laser diode end-pumped Yb:YAG/LBO 537.8 nm green laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 593-595 (in Chinese).
- [6] BRUESSELBACH H W, SUMIDA D S. 69W-average-power Yb:YAG laser [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 480-482.
- [7] WANG Y G, MA X Y, ZHONG B, *et al.* Passive Q-switching of diode-pumped Yb:YAG microchip laser with ion-implanted GaAs [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(1): 31-33.
- [8] BEACH R J. CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators [J]. *Opt Commun*, 1996, 123(1/3): 385-393.
- [9] CHENAIS S, DRUON F, BALEMBOIS F, *et al.* Thermal lensing measurements in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW [J]. *Optical Materials*, 2003, 22(1): 129-137.
- [10] PEI Zh P, TANG Ch, TU B, *et al.* Simulation of thermal effect on beam distortion in Nd:YAG thin disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1615-1618 (in Chinese).
- [11] XUE H Zh, LU F Y, XUE M, *et al.* Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6): 585-588 (in Chinese).
- [12] SAIKAWA J, KURIMURA S, SHOJI I, *et al.* Tunable frequency-doubled Yb:YAG microchip lasers [J]. *Optical Materials*, 2002, 19(1): 169-174.
- [13] ZHANG Q L, JIANG H H, YIN Sh T. Properties of LD edge-pumped Yb:YAG laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 82-86 (in Chinese).
- [14] NADGARAN H, SABAIAN M. Pulsed pump; thermal effects in solid state lasers under super-Gaussian pulses [J]. *Paramana Journal of Physics*, 2006, 67(6): 1119-1128.
- [15] XIE W J, KWON Y, HU W T, *et al.* Thermal modeling of solid state lasers with super-Gaussian pumping profiles [J]. *Opt Engng*, 2003, 42(6): 1787-1794.
- [16] YU J. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(1): 27-31 (in Chinese).
- [17] XIE W J, TAM S C, LAM Y L, *et al.* Analysis of a dynamical procedure on diode-end-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(10): 1368-1372.
- [18] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.* Semianalytical thermal analysis of thermal focal length on Nd:YAG rods [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(26): 6655-6661.
- [19] LI L, YANG S H, SUN W F, *et al.* Study of LD end-pumped Yb:YAG solid state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(s1): 43-45 (in Chinese).
- [20] MAO Y L, DING F, GU Y Z. The influence of concentration of Yb<sup>3+</sup> ions on luminescence and fluorescence lifetime in Yb:YAG crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 365-68 (in Chinese).