

## 分区域主动冷却薄片激光介质的理论和实验研究\*

母健<sup>1)</sup> 冯国英<sup>1)†</sup> 杨火木<sup>1)</sup> 唐淳<sup>2)</sup> 周寿桓<sup>1)3)</sup>

1) (四川大学电子信息学院, 成都 610064)

2) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

3) (华北光电技术研究所, 北京 100015)

(2013年1月22日收到; 2013年3月4日收到修改稿)

针对薄片激光介质抽运和温度分布不均匀的问题, 设计了分区域主动冷却控制薄片激光器. 根据热传导方程, 对端面抽运方形薄片激光介质在均匀冷却和分区域主动冷却两种冷却方式下的温度和应力分布进行了模拟计算. 结果显示: 分区域主动冷却能使薄片介质横向温度分布趋于均匀, 相对于均匀冷却时最大温差的改善率达到了约86%, 介质边缘的张应力转变为低值压应力, 有效地抑制了热应力炸裂. 搭建了分区域主动冷却控制实验装置, 并进行了验证实验, 实验结果与模拟结果相符. 为薄片激光器的热管理方式提供了新的思路.

**关键词:** 薄片激光器, 端面抽运, 分区域主动冷却, 数值模拟

**PACS:** 42.55.Rz, 42.60.By, 42.60.Lh, 44.05.+e

**DOI:** 10.7498/aps.62.124204

## 1 引言

薄片激光器因其具有同时实现高效率、高输出功率和高光束质量的潜力而得到广泛的应用<sup>[1]</sup>. 但研究显示, 在高平均功率运行的薄片激光器中依然存在严重的热效应<sup>[2-6]</sup>. 在高平均功率薄片激光器中, 鉴于热量较大, 需要采取液冷等冷却方式才能够实现有效的冷却. 目前普遍采用的是介质一端面作为通光面, 另外一端面焊接在热沉上进行冷却或者直接冷却. 在这种单端面冷却方式中, 介质两个端面之间存在温度差, 形成不同的热膨胀程度, 介质发生变形弯曲, 变形引起传输光束出现相位畸变, 影响激光的产生和传输<sup>[2,7,8]</sup>. 相位畸变可以分为二次相位畸变和高阶相位畸变. 对于二次相位畸变, 通过在腔中加入光学元件或者腔形特别的设计, 可以有效地消除二次相位畸变带来的影响. 对于高阶相位畸变带来的影响, 即使采用复杂的自相位适应系统也难以实现有效的补偿或者消除. 针对薄片激光增益介质的热变形, 人们提出了各种抑制薄片激光增益介质变形的办法<sup>[7,9]</sup>. 研究表明: 对于

薄片激光增益介质, 当温度在与轴方向垂直的平面内(即端面上)为均匀分布时, 热透镜效应引起的相位畸变基本上都是二次相位畸变, 高阶相位畸变的成分基本可以忽略不计<sup>[5]</sup>. 在实际的薄片激光器系统中, 往往采用的是光纤或者石英管耦合端面抽运的方式. 在这种抽运方式中, 抽运光在激光增益介质横截面上的分布近似为高斯分布或者平顶分布, 抽运光尺寸要小于介质横向尺寸, 引起了横向截面内温度的非均匀分布. 为了提高抽运的吸收效率和均匀性, 降低抽运引起的温度梯度, 文献[10—12]分别提出了角抽运和边缘抽运的方式对激光介质进行抽运, 有效降低了抽运引起的热效应. 对介质的直接冷却, 王军荣等<sup>[13]</sup>提出了针对侧面抽运激光介质的热汇冷却, Kemp等<sup>[14]</sup>提出采用金刚石放置在薄片的抽运端面的方法, 从而降低了薄片的热效应. 就激光介质的冷却方式而言, 从已有的公开发表的文献来看, 多为整体冷却的方式, 对介质局部温度不能得到有效控制.

本文在传统热管理的基础上, 针对端面抽运薄片激光器抽运和温度分布不均匀的问题, 提出了采用半导体制冷片对薄片激光介质进行分区域主动

\* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 60890200)和国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(批准号: 10976017)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guoing\_feng@scu.edu.cn

冷却的方法,在保留端面抽运优点的同时,还能实现均匀的横向温度分布,使薄片激光介质边缘的张应力变成低值压应力,能有效地降低介质的热效应,改善激光的输出质量.

## 2 理论推导及数值模拟

为验证分区域主动冷却控制的效果,进行了相关的数值模拟分析.模拟分析中采用的增益介质掺杂浓度为 1.0 at% 的 Nd:YAG 介质,尺寸为  $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ .热沉单元采用的热电冷却器件假定是目前普遍通用的半导体冷却器件.基于该分析的目的在于验证该分区域主动冷却控制方法的潜在可行性,在模拟分析中假设半导体冷却器件对每个独立冷却区域的热抽运能力不受任何限制,即可以任意设定每个冷却区域的热流密度和温度.在该假设基础上,得出图 1 所示的由增益介质、焊剂层和热沉单元组成的分区域主动冷却分析模型.焊剂层采用的是金-锡焊接剂(Au 80%, Sn 20%).鉴于热膨胀系数匹配的原则,热沉选用的材料为 Cu-W 合金.焊剂层和热沉的厚度分别为 0.4 和 0.6 mm.分析中用到的参数如表 1 所示.介质的热转换系数为 0.32,吸收系数为  $4.5\text{ cm}^{-1}$ .分析中分别假定抽运光呈高斯分布,假定抽运半径为 3.6 mm,分别对抽运总功率从 100 W 到 300 W 进行了模拟.由于增益介质很薄,可以假定抽运光半径在轴向上保持不变.

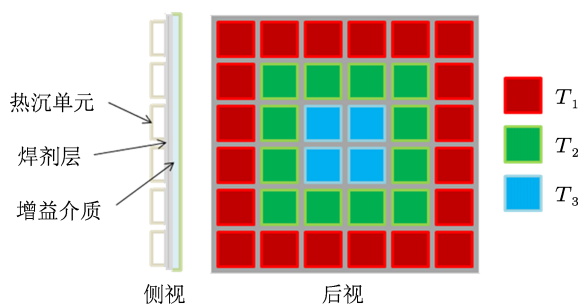


图 1 分区域主动冷却模型温度控制示意图

直角坐标系下,激光介质中热源的三维稳态热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{K_c}, \quad (1)$$

式中,  $T$  为晶体上的温度分布,  $K_c$  为激光介质的热导率,  $q_v$  为激光介质吸收抽运光产生的热功率密

度:

$$q_v(x, y, z) = \eta_h \alpha I_0 \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2} - \alpha z\right], \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为激光介质对抽运光的吸收系数;  $\eta_h$  为荧光量子效率和内损耗决定的热转换系数;  $\omega_p$  为抽运光半径,因薄片很薄,所以认为薄片内  $\omega_p$  保持不变;  $I_0$  为抽运光中心处强度,  $I_0 = \frac{2P_p}{\pi\omega_p^2}$ , 其中  $P_p$  为入射到薄片上的抽运光功率.

表 1 薄片介质热结构分析所用参数

| 材料   | 导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 热膨胀系数/ $10^{-6}\text{ K}^{-1}$ | 弹性模量/GPa | 泊松比   |
|------|--|--------------------------------|----------|-------|
| 增益介质 | 13   | 7.5                            | 307      | 0.300 |
| 焊剂层  | 57   | 16.0                           | 68       | 0.405 |
| 热沉   | 221  | 7.6                            | 248      | 0.300 |

薄片前表面与空气对流换热,后表面与主动冷却介质进行分区域对流换热,因此薄片前后表面的边界条件分别为

$$K_c \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_1 [T_a - T(x, y, z)|_{z=0}], \quad (3)$$

$$K_c \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=l} = h_2 [T_b - T(x, y, z)|_{z=l}], \quad (4)$$

式中,  $h_1$  为晶体与空气的对流换热系数,  $h_2$  为晶体与分区域制冷器件的对流换热系数,  $T_a$  为周围环境温度,  $T_b$  为晶体后边面各区域的温度,  $T(x, y, z)|_{z=0}$  和  $T(x, y, z)|_{z=l}$  分别是晶体前后表面的温度分布.

由于增益介质和热沉中存在温度梯度,所以产生了热应力.根据弹光效应,应力会使增益介质折射率发生变化,产生热致双折射效应<sup>[15]</sup>.此外,温度梯度还会引起应变和变形,对激光的传输产生影响.当光束传输通过该薄片时,光束的波前相位会发生畸变.如果进一步加大抽运功率,逐渐增大的热应力最终会使激光增益介质发生炸裂.为了全面考察热效应对薄片激光器的影响,有必要分析探讨其热应力的分布及变化.这里,我们不给出应力的详细计算步骤,仅给出分析结果,详细计算可以参考相关文献[15, 16].

模拟分析中,假设半导体冷却器件对热沉能实施准确的温度控制.将其分为  $6 \times 6$  冷却单元进行温度控制.针对高斯抽运光分布,设定冷却单元温度控制如图 1 所示.图中,冷却单元间有一定间隔(0.2 mm).为比较分区域主动冷却效果,分别计算了

均匀冷却 (数值分析中假定各个冷却单元的温度均为 300 K) 时和按表 2 所示的分区域冷却下的温度和应力分布.

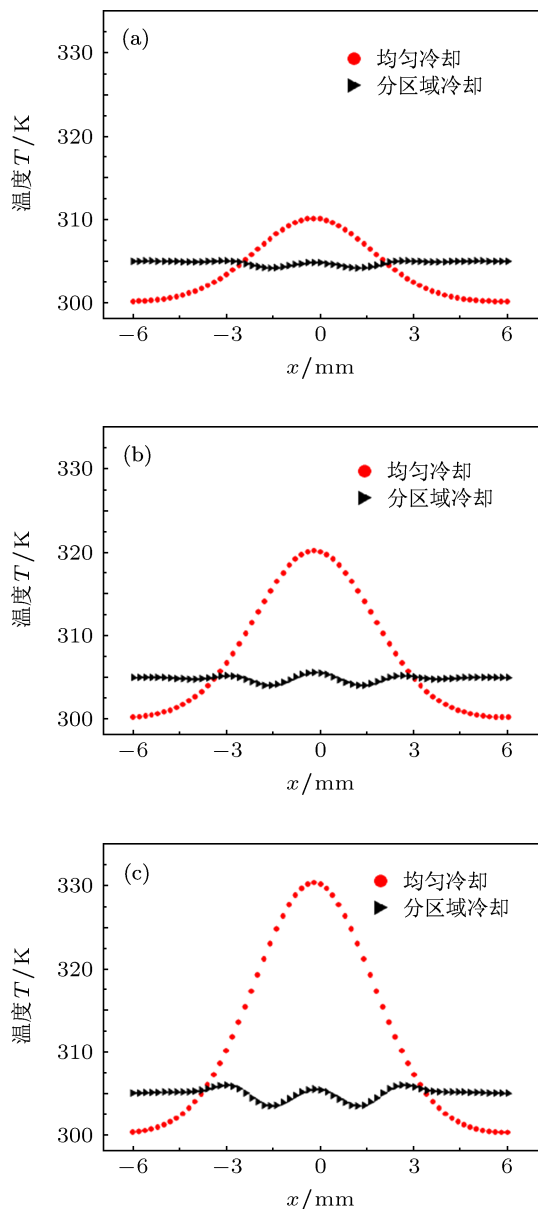


图 2 Nd:YAG 介质抽运端面的温度分布对比曲线 抽运光强度分布为高斯分布, 抽运功率为 (a)  $P_p = 100$  W, (b)  $P_p = 200$  W, (c)  $P_p = 300$  W 时, 对薄片采取均匀冷却和分区域冷却控制得到的薄片介质表面径向温度分布对比曲线

利用有限元分析软件 ANSYS 进行模拟, 将计算得到的数据导入 Matlab 软件进行分析. 针对高斯抽运光分布, 分别采取均匀冷却和采取分区域主动冷却控制时的计算结果得到温度分布曲线, 如图 2 所示. 由图 2 可见, 采取均匀冷却时, 薄片抽运端面上的温度分布呈高斯分布, 且随着抽运功率的提高而大幅提高; 采取分区域主动冷却控制方法后, 薄

片抽运端面上温度分布不均匀的问题得到很好的解决, 而且温度随抽运功率的变化很小.

表 2 不同抽运功率下分区域冷却控制参数

| 抽运功率 $P_p$ /W | $T_1$ /K | $T_2$ /K | $T_3$ /K |
|---------------|----------|----------|----------|
| 100           | 305      | 303      | 294      |
| 200           | 305      | 301      | 284      |
| 300           | 305      | 300      | 273      |

定义抽运面上最大温差为

$$\Delta T = \max\{T_{i,j}\} - \min\{T_{i,j}\}, \quad (5)$$

定义最大温差改善率为

$$W = \frac{\Delta T_{\text{均匀冷却}} - \Delta T_{\text{分区域冷却}}}{\Delta T_{\text{均匀冷却}}} \times 100\%. \quad (6)$$

则从图 3 中可以得出, 高斯抽运下, 经过分区域的主冷却控制以后, 介质抽运端面的最大温差  $\Delta T$  变化为  $P_p = 100$  W 时, 从 10.1 K 降至 1.3 K;  $P_p = 200$  W 时, 从 20.2 K 降至 2.5 K;  $P_p = 300$  W 时, 从 30.2 K 降至 3.8 K. 由 (6) 式可以算出, 三种功率下的最大温差改善率  $W$  分别为 85.4%, 86.3%, 87.4%. 说明采用分区域主动冷却控制方法能有效地降低光束传输横截面上的温度差.

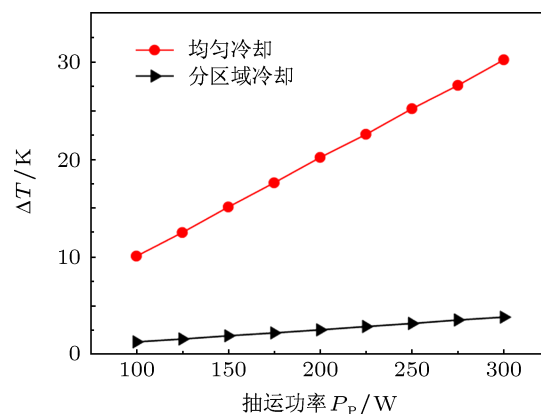


图 3 不同抽运功率下 Nd:YAG 介质抽运端面内的最大温差曲线

介质内部最大张应力的值及其出现的位置对于高功率运行的激光介质来说极为重要, 主要原因是分布在介质表面的张应力比较容易引起晶体炸裂. 在高斯抽运光分布下, 分别采取均匀热抽运方式和分区域主动冷却控制方式, 模拟得出主应力分布及其值 (图 4 为介质内的第一、二主应力分布曲线图).

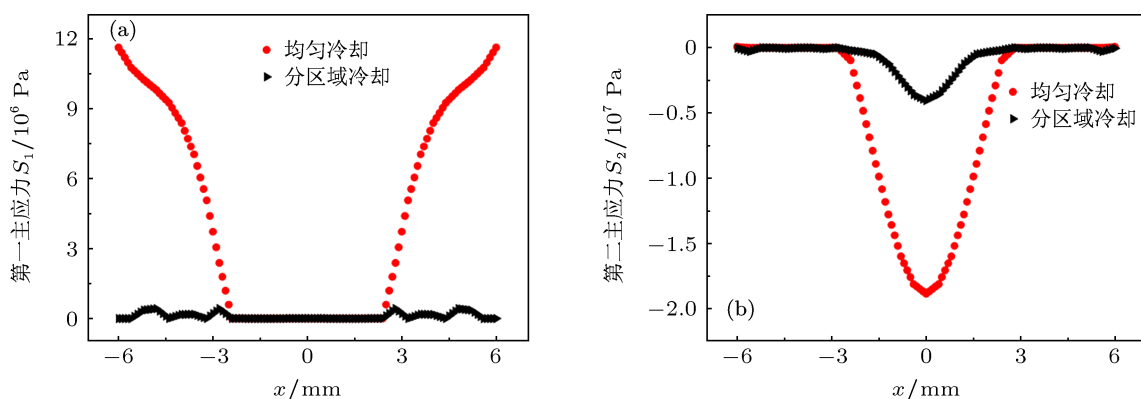


图4 高斯抽运光分布下,  $P_p = 200 \text{ W}$ , 对介质分别采取均匀抽运和分区域主动冷却控制时的介质表面主应力分布曲线图 (a) 第一主应力分布; (b) 第二主应力分布

由图4可见, 高斯抽运光分布下, 均匀冷却时抽运面上出现的第一、二主应力值得到大幅度降低, 且介质抽运面边缘的张应力从  $11.6 \text{ MPa}$  变成了  $1.7 \text{ kPa}$  的压应力. 一般来说, 介质边缘棱线位置处是最容易发生炸裂的位置. 采用分区域主动冷却控制方法后, 抽运面边缘的张应力转换为压应力, 有效地抑制了热应力炸裂.

### 3 实验研究

我们搭建了如图5所示的实验装置并进行了验证性实验, 半导体制冷片的分布如图6所示. 单片半导体制冷片的尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , Nd:YAG介质的尺寸为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ . 实验中, 选用波长为  $808 \text{ nm}$  的半导体激光器作为抽运

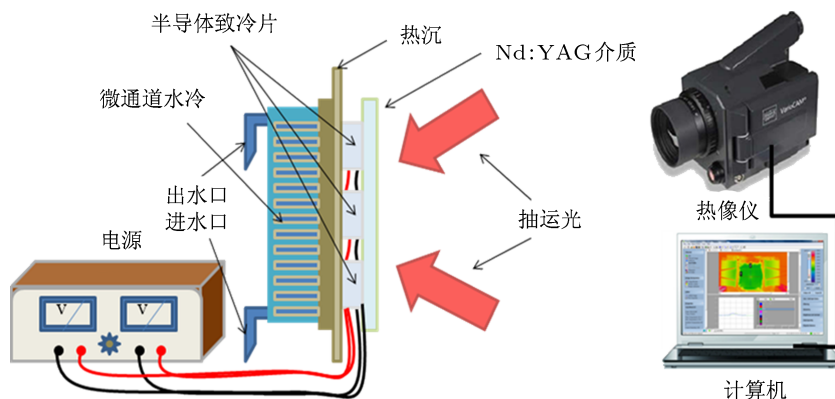


图5 分区域主动冷却控制实验示意图

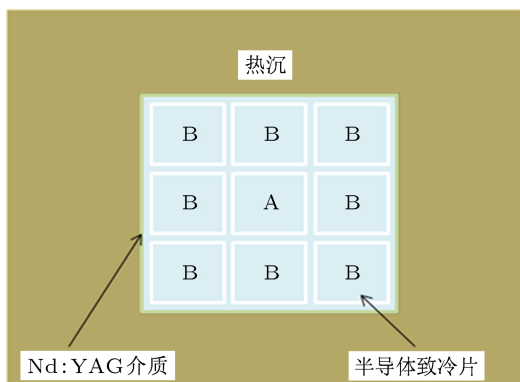


图6 半导体制冷片分布示意图

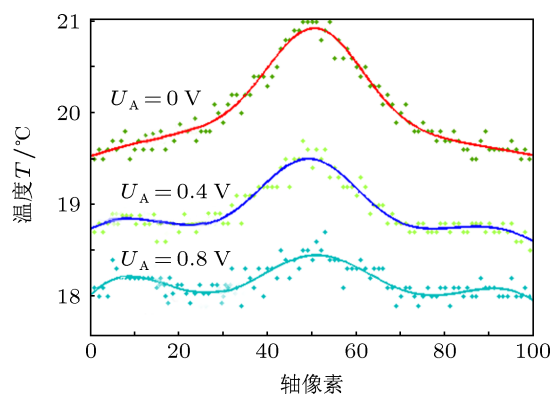


图7  $P_p = 3 \text{ W}$ ,  $U_B = 3.2 \text{ V}$  高斯抽运光抽运下的温度分布

源(抽运光呈近似高斯分布),观测了抽运半径为 5 mm,抽运功率为 3.0 W 时的分区域主动冷却效果.所选取的热电器件是型号为 TEC1-00703 的半导体致冷片,随着电压的升高,其冷面温度不断下降,当致冷片两端电压为 0.8 V 时,其冷面温度趋于最低,致冷效率最高.实际测量时,将  $3 \times 3$  的半导体制冷片分为了 A, B 两组(见图 6),A 组为最中心的 1 片, B 组为周围的 8 片串联,对 A, B 分别进行供电.初始电压设定为  $U_A = 0$  V,  $U_B = 3.2$  V(实验中  $U_B$  保持不变).以 0.1 V 为步长调节 A 组电压直至 0.8 V,用型号为 NEC H2600 的红外热像仪观测 Nd:YAG 介质抽运端面的温度分布,并用热像仪软件对介质抽运端面的红外图像做了参考线(介质表面的中心对称线),提取出这条线的温度数据,用 Matlab 进行分析,结果如图 7 所示(横轴表示轴向的像素,每个像素的尺寸为 0.4 mm).可以看出抽运端面内部的最大温差(线上最高温度和最低温度之差)

随着中心制冷片工作电压  $U_A$  的变化而发生改变,  $U_A = 0.8$  V 时温差最小,最大温差值从 2.51 °C 降低为 0.67 °C,由 (6) 式得出其改善率达到了 73.3%.且温度分布逐渐趋于平坦,即 Nd:YAG 介质的横向温度分布趋于均匀.

## 4 结论

本文针对薄片激光介质抽运和温度分布不均匀的问题,提出了分区域主动冷却控制方法.从理论和实验两个方面对该方法的可行性进行了验证.数值模拟结果显示,介质横截面上的温差改善率为 86%左右,且介质边缘的张应力转为了低值的压应力,能有效地抑制热应力炸裂.实验结果中介质的温差改善率  $W$  达到了 73.3%,与模拟结果符合.说明该分区域主动冷却控制方法具有可行性,能有效地提高薄片激光器的热管理性能.

- 
- [1] Giesen A, Speiser J 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **13** 598
- [2] Kemp A J, Valentine G J, Burns D 2004 *Prog. Quan. Electron.* **28** 305
- [3] Speiser J, Giesen A 2007 *Advanced Solid-State Photonics* Vancouver, Canada, January 28, 2007 pWB9
- [4] Sazegari V, Milani M R J, Jafari A K 2010 *Appl. Opt.* **49** 6910
- [5] Yang H M, Feng G Y, Zhou S H 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1006
- [6] Zhao J T, Feng G Y, Yang H M, Tang C, Chen N J, Zhou S H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084208 (in Chinese) [赵建涛, 冯国英, 杨火木, 唐淳, 陈念江, 周寿桓 2012 物理学报 **61** 084208]
- [7] Liao Y, Miller R, Armstrong M R 1999 *Opt. Lett.* **24** 1343
- [8] Mende J, Speiser J, Spindler G, Bohn W L, Giesen A 2008 *Proc. SPIE* **6871** 68710M
- [9] Vetrovec J, Shah R S, Endo T, Koumvakalis A, Masters K, Wooster W, Widen K C, Lassovsky S 2004 *Proc. SPIE.* **5332** 235
- [10] Lu F, Gong M, Xue H, Liu Q, Gong W 2007 *Opt. Lasers Eng.* **45** 43
- [11] Liu Q, Fu X, Ma D, Yan X, He F, Huang L, Gong M, Wang D 2007 *Laser Phys. Lett.* **4** 719
- [12] Liu Q, Gong M L, Pan Y Y, Li C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2159 (in Chinese) [柳强, 巩马理, 潘圆圆, 李晨 2004 物理学报 **53** 2159]
- [13] Wang J R, Min J C, Song Y Z 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 829 (in Chinese) [王军荣, 闵敬春, 宋耀祖 2005 光学学报 **25** 829]
- [14] Kemp A J, Millar P, Lubeigt W, Hastie J E, Dawson M D, Burns D 2009 *Advanced Solid-State Photonics* Denver, Colorado, February 1, 2009 pWE7
- [15] Chen G, Liao L J, Hao W 2007 *Fundamentals of Crystal Physics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [陈纲, 廖理儿, 郝伟 2007 晶体物理学基础(北京: 科学出版社)]
- [16] Yan Z D, Wang H L 1993 *Thermal Stress* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [严宗达, 王洪礼 1993 热应力(北京: 高等教育出版社)]

# Theoretical and experimental research on district cooling for thin disk-type laser medium\*

Mu Jian<sup>1)</sup> Feng Guo-Ying<sup>1)†</sup> Yang Huo-Mu<sup>1)</sup> Tang Chun<sup>2)</sup> Zhou Shou-Huan<sup>1)3)</sup>

1) (*College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*Institute of Applied Electronics of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

3) (*North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China*)

(Received 22 January 2013; revised manuscript received 4 March 2013)

## Abstract

For the non-uniform pumping and cooling to the thin disk-type laser medium, the district cooling method for thin disk-type laser medium is proposed and examined both experimentally and theoretically. Based on heat conduction equation, the distributions of temperature and stress in end pumping thin disk-type laser medium with evenly cooling and district cooling are calculated. The results show that the tensile stresses on the edge of gain medium with evenly cooling are changed into the low values of compressive stresses for the case of district cooling, and the distribution of temperature in medium with district cooling is much more uniform than with evenly cooling, the ranges of temperature reduces about 86%, and this result is consistent well with the experimental result. The district cooling method could provide a new way of thermal management for thin disk-type laser.

**Keywords:** thin disk-type laser, end pumping, district cooling, numerical modeling

**PACS:** 42.55.Rz, 42.60.By, 42.60.Lh, 44.05.+e

**DOI:** 10.7498/aps.62.124204

---

\* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60890200) and the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. 10976017).

† Corresponding author. E-mail: guoing\_feng@scu.edu.cn