

文章编号: 0258-7025(2009)07-1777-07

端面抽运复合 Nd : YAG 陶瓷板条激光介质温度和应力分布的理论分析

王建磊 李 磊 乔 亮 施翔春 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 基于提出的能量均分方法,理论分析和系统模拟了大功率激光二极管(LD)端面抽运 Nd : YAG 激光陶瓷板条阶变梯度浓度掺杂情况下板条温度分布及应力分布情况。采用板条阶变梯度浓度掺杂结构,在抽运效率很高的情况下,抽运吸收光功率分布更加均匀,产生更小的热应力,从而解决抽运效率和抽运吸收功率均匀性之间的矛盾。

关键词 激光器; 复合陶瓷板条激光器; 能量均分; 阶变梯度掺杂; 温度分布; 应力分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1777

Theoretical Analysis of Temperature and Stress Distribution in End-Pumped Composite Ceramic Nd : YAG Laser Slab

Wang Jianlei Li Lei Qiao Liang Shi Xiangchun Zhu Xiaolei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the method of energy equipartition the temperature and stress distribution of the composite ceramic Nd : YAG laser slab with stepwise gradient dopant concentrations for high power laser diode (LD) end-pumping is proposed by theoretical analysis and simulation. Using the composite slab with stepwise gradient dopant concentrations, high pump absorption efficiency and intensity uniformity in slab lasers can be separately achieved, which would lead to smaller thermal induced stress. It resolves the contradiction between the pumping efficiency and the homogeneity of pumping absorbed power.

Key words lasers; composite ceramic slab lasers; equipartition of energy; stepwise gradient doping; temperature distribution; stress distribution

1 引 言

板条激光器由于冷却面大等结构上的优势,理论上可以作为高平均功率、高光束质量激光器的理想设计方案之一^[1~3]。采用端面或侧面抽运结构使抽运面与冷却面分离可以降低对冷却面的要求,在工程中更容易实现高平均功率输出^[4,5]。采用激光束沿 Z 形光路传输放大,可进一步降低激光器工作介质的热畸变问题,提高激光光束质量。^[3,6,7]

传统的侧面或端面抽运板条激光器由于采用单一掺杂浓度的晶体结构,在提高抽运光吸收效率的同时,又产生了激光介质内抽运密度不均匀的问题,从

而在抽运方向上产生大的温度梯度,导致大的热应力,这一矛盾极大制约激光器功率的进一步提高。而抽运方向上激光介质采用 Nd 离子梯度浓度掺杂分布结构^[8,9],理论上可以解决这一矛盾。

本文基于传导冷却端面抽运 Nd : YAG 激光放大器设计方案,根据梯度浓度掺杂激光介质思想^[8],理论分析了一般情况下阶变梯度掺杂激光介质工作状态下的功率分布情况,根据极限算法,提出能量均分方法,即把抽运能量均分到阶变梯度掺杂激光板条的各阶子板条中,并由该方法推导出各阶子板条的掺杂浓度,得到各阶子板条的抽运功率密度分布,进一步

收稿日期: 2008-11-12; 收到修改稿日期: 2008-11-25

作者简介: 王建磊(1983—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: wangjl@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器技术及激光器应用系统方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

采用有限元(FEM)方法,对几种阶变掺杂结构稳态工作下温度和热致应力进行模拟计算和分析,并与单一掺杂情况进行了对比。理论研究表明,基于能量均分方法,板条抽运光方向采用阶变梯度掺杂结构,可很好地提高板条介质抽运光分布的均匀性,改善温度梯度变化和降低热应力,在高平均功率、高光束质量激光器上有很好的应用潜力。目前由于光学陶瓷的极大发展^[10],使得激光介质阶变梯度浓度掺杂分布结构能够实现并用于高平均功率激光器中。

2 理论分析

2.1 激光介质结构设计及抽运吸收功率密度分布

激光板条增益介质如图 1 所示。采用 Nd:YAG 陶瓷板条,中间掺杂,两端为未掺杂 YAG 陶瓷,掺杂部分长宽分别为 l, w 和 t ,两端未掺杂部分长度 l_0 稍长于宽度以消除端面效应。如图 1 所示,以板条中心为原点建立坐标系。抽运光为 LD 阵列经光束整形后经由板条两尾端面反射沿 z 轴进入掺杂区域,四面全反减少抽运光的损耗,由实际情况和方便计算,可认为抽运光在掺杂区垂直于 z 轴方向上均匀分布。

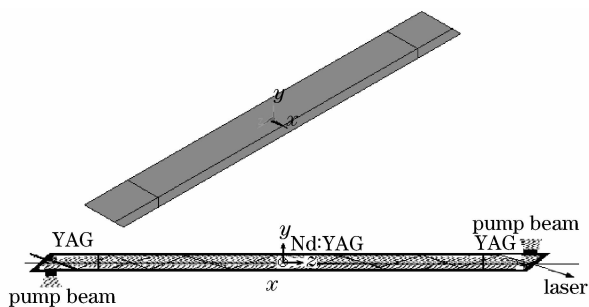


图 1 Nd:YAG 陶瓷板条激光介质及其抽运结构图

Fig. 1 Orthographic drawing of an end-pumped ceramic

Nd:YAG laser slab

若采用单一掺杂,则可得抽运光在板条掺杂区的抽运吸收功率密度分布关系式为^[11]

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{\alpha l P_0}{V} \exp\left(-\frac{\alpha l}{2}\right) \cosh(\alpha z) \quad (-l/2 \leq z \leq l/2), \quad (1)$$

式中 P_0 为耦合进板条总抽运功率, $\alpha = n_d \sigma_a$ 为吸收系数, n_d 为工作介质掺杂浓度, σ_a 为掺杂 Nd 离子有效抽运吸收截面, l 为板条长度, V 为掺杂部分体积。工作介质对抽运光的吸收效率为

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha l). \quad (2)$$

定义抽运吸收功率分布均匀度^[6]

$$U = \frac{\rho_{\text{abs}}(0)}{\rho_{\text{abs}}(l/2)} = \text{sech}(\alpha l/2), \quad (3)$$

及最优因子^[5]

$$M = U\eta = [1 - \exp(-\alpha l)] \text{sech}(\alpha l/2), \quad (4)$$

则可得出三者都与工作介质掺杂浓度及板条长度有关,得出关系曲线如图 2 所示。

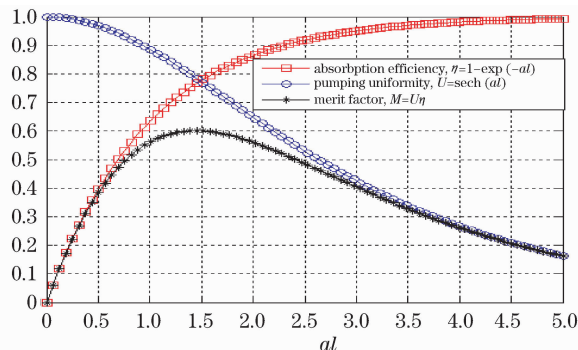


图 2 吸收效率、吸收功率均匀性和最优值与 al 的关系曲线

Fig. 2 Pump absorption efficiency, pump absorption uniformity and merit factor as a function of absorption length

由图 2 知,抽运效率和抽运吸收功率均匀度存在制约关系,并在 $al = 1.5$ 附近有最优结果^[9~11]。如果要提高吸收效率,则必须以降低抽运吸收功率分布均匀性为代价,这在大功率激光放大器中,将会导致大的温度梯度,进而产生大的热应力,甚至于高出板条的应力极限,导致板条断裂。

若采用板条介质沿 z 方向掺杂梯度分布则可以解决这一矛盾,即吸收系数沿 z 方向呈一定规律分布,为 z 的函数,则抽运吸收功率密度为^[9]

$$\rho_{\text{abs}}(z) = \frac{\alpha(z) l P_0}{V} \exp\left[-\frac{1}{2} \int_{-z/2}^{z/2} \alpha(z) dz\right] \times \cosh\left[\int_0^z \alpha(t) dt\right], \quad (-l/2 \leq z \leq l/2), \quad (5)$$

式中 $\alpha(z) = n_d(z) \sigma_a$ 为工作介质在 z 处的吸收系数, $n_d(z)$ 为工作介质在 z 处掺杂浓度,使板条内抽运吸收功率相同,即

$$\rho_{\text{abs}}(z) = \rho_{\text{abs}}(0). \quad (6)$$

板条介质吸收效率为^[9]

$$\eta = \frac{V \rho_{\text{abs}}(0)}{P_0} = \alpha(0) l \times \{\sqrt{[\alpha(0) l/2]^2 + 1} - \alpha(0) l/2\}. \quad (7)$$

吸收效率与中心吸收系数即中心掺杂浓度有关,中心处掺杂浓度越高,则总的吸收效率就越高,并趋于理想值,从而解决抽运效率和抽运功率分布均匀性的矛盾,如图 3 所示。

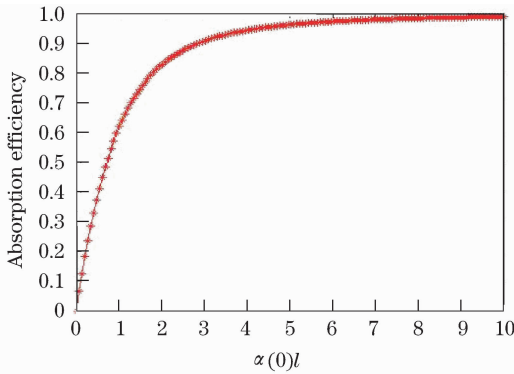
图3 吸收效率与中心吸收系数 $\alpha(0)$ 的关系曲线

Fig. 3 Pump absorption efficiency as a function of absorption coefficient in the center $\alpha(0)$

板条的掺杂浓度沿 z 方向的解析解^[9]为

$$\alpha(z) = \frac{\alpha(0)}{\sqrt{[\alpha(0)z]^2 + 1}}, \quad (8)$$

式中 $\alpha(0)$ 为为板条中心处吸收系数。对于给定的 $\alpha(0)$ ，则由(8)式得 $\alpha(z)$ 随 z 的变化曲线，如图4所示。

上述方法是一种理想情况，目前在工程中无法实现，但可以从该推导计算中归纳出一种基本思想：把总抽运能量沿 z 方向上进行均分，即使工作介质沿板条长度方向的抽运吸收功率相等，即能量等分思想。基于该思想，考虑实际情况，得到能量等分方法，即可以把陶瓷板条沿 z 方向按阶变梯度掺杂浓度等分成 $(2N+1)$ 段，然后压接在一起，使得每段的抽运光吸收功率相同，这样就可以降低温度梯度和

减少热应力，若 N 足够大，则抽运吸收功率密度分布就可以趋近于理想情况。

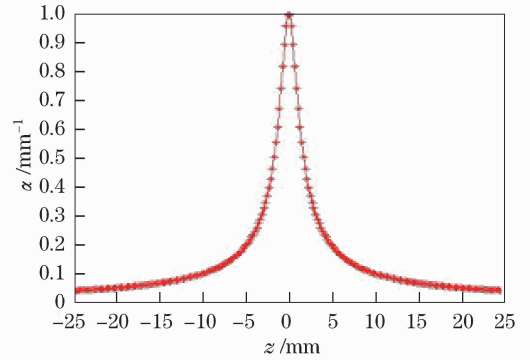
图4 均匀抽运吸收功率情况下吸收系数 $\alpha(z)$ 沿 z 方向的变化曲线

Fig. 4 Absorption coefficient profile for uniform distribution of absorbed pump power density in an end-pumped slab

2.2 陶瓷板条中抽运功率密度分布

对于原来的模型，假设把工作介质 Nd:YAG 分成 $(2N+1)$ 等份， N 取自然数，则每段子板条尺寸为 $\frac{l}{2N+1}\omega t$ ，由对称抽运结构及实际情况，若满足能量等分方法，须中心处板条掺杂浓度最高，对应吸收系数取为 α_0 ，沿 z 轴向正反方向等值阶变降低掺杂浓度，即 $\pm i$ 段掺杂浓度相同，对应吸收系数取为 α_i ，由公式(5)可得第 $\pm i$ 段分段板条的抽运功率密度分布为

$$\rho_{\text{abs}}^0(z) = \frac{\alpha_0 l P_0}{V} \exp\left[-\frac{l(\alpha_0 + 2\sum_{i=1}^N \alpha_i)}{2(2N+1)}\right] \cosh(\alpha_0 z), \quad -l/[2(2N+1)] \leq z \leq l/[2(2N+1)] \quad (i=0)$$

$$\rho_{\text{abs}}^{\pm i}(z) = \frac{\alpha_i l P_0}{V} \exp\left[-\frac{l(\alpha_0 + 2\sum_{i=1}^N \alpha_i)}{2(2N+1)}\right] \cosh\left\{\pm \frac{l[\alpha_0 + 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + \dots + 2\alpha_{i-1} - (2i-1)\alpha_i]}{2(2N+1)} + \alpha_i z\right\},$$

$$(2i-1)l/[2(2N+1)] \leq \pm z \leq (2i+1)l/[2(2N+1)], \quad (i=1, 2, 3 \dots N). \quad (9)$$

对应第 $\pm i$ 段总的吸收功率为

$$\begin{cases} P^0 = \omega t \int_{-l/[2(2N+1)]}^{l/[2(2N+1)]} \rho_{\text{abs}}^0(z) dz, \quad i=0 \\ P^{\pm i} = \omega t \int_{(2i-1)l/[2(2N+1)]}^{(2i+1)l/[2(2N+1)]} \rho_{\text{abs}}^{\pm i}(z) dz, \quad (i=1, 2, 3 \dots N). \end{cases} \quad (10)$$

由能量等分方法，令

$$P^{\pm i} = \frac{P}{2N+1} = \frac{\eta P_0}{2N+1}, \quad (i=1, 2, 3 \dots N) \quad (11)$$

可得到 $N+1$ 个方程，联立方程，得出每块分段板条的吸收系数，进而得出其掺杂浓度。由功率密度分布关系式知，当 $N \rightarrow \infty$ 时即为理想掺杂浓度梯度情况。

2.3 板条中温度场分布及热传导方程

板条的温度场分布可由热传导方程得出^[1~3]，连续抽运激光放大器稳态工作条件下，热传导方程可简化为

$$\nabla [k(T) \nabla T(x, y, z)] = -q(x, y, z), \quad (12a)$$

进一步简化，假设 $k(T)$ 随温度变化不大，为常数 k ，

则方程简化为

$$\Delta T(x, y, z) = -q(x, y, z)/k, \quad (12b)$$

式中 $q(x, y, z)$ 为工作介质热流密度。

对于第 i 块板块

$$\Delta T(x, y, z) = -q_i(x, y, z)/k, \quad (12c)$$

式中

$$q_i(x, y, z) = \mu \rho_{\text{abs}}^i.$$

2.4 板条晶体中的热应力分析

由于激光工作介质温度分布的不均匀性,必然产生热致应力。由 Hook 定律,可得出反映板条介质内部的热应力关系式^[12~14]为

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \right] \times$$

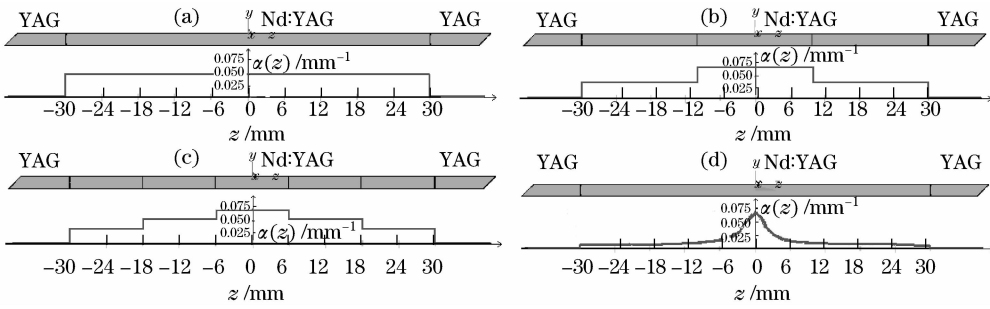


图 5 4 种掺杂结构。(a)单一掺杂;(b)二阶阶变梯度掺杂;(c)三阶阶变梯度掺杂;(d)理想梯度掺杂

Fig. 5 Schematic diagram of four doping geometry. (a) Constant doping; (b) two stepwise gradient doping; (c) three stepwise gradient doping; (d) ideal gradient doping

3.2 数值计算

为简化计算,假设陶瓷板条物理属性不随温度改变,计算中用到的主要参数列于表 1 中。

表 1 计算用到的参数列表

Table 1 List of parameters for computing

Constants	
Thermal conductivity κ / [W/(m·K)]	14
Specific heat c / [J/(kg·K)]	590
Mass density ρ / (kg/m ³)	4560
Young modulus E / Pa	3.0×10^{10}
Poisson ratio ν	0.25
Thermal expansion coefficient α_e	7.5×10^{-6}
Heat load ratio	0.4

对于单一掺杂板条,由(2)式,取 $\eta = 0.95$,可得 $\alpha_0 = 0.05 \text{ mm}^{-1}$,吸收功率密度为

$$\rho_{\text{abs}}(z) = 2.3907 \times 10^9 \cosh(50z) \quad (-0.03 \text{ m} \leq z \leq 0.03 \text{ m}), \quad (14)$$

对于二阶阶变梯度掺杂浓度板条,由(9),(10)和(11)式,取 $N = 2$,联立方程,可解得 $\alpha_0 =$

$$\delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \sigma_e T \delta_{ij} \Big]. \quad (13)$$

3 数值模拟

3.1 模型结构

模型采用 Nd:YAG 陶瓷板条,掺杂部分尺寸为 $60 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,两端为非掺杂 YAG,长度各为 10 mm ,即整个板条尺寸为 $80 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。考虑 4 种情况:1) 单一掺杂浓度;2) 二阶阶变梯度掺杂浓度;3) 三阶阶变梯度掺杂浓度;4) 理想梯度掺杂浓度分布。模型如图 5 所示。

假设 4 种结构都采用同种抽运源进行抽运,抽运结构如图 1 所示,总抽运功率为 3 kW ,通过增益介质后,有 $0.95P_0$ 的能量被吸收。

0.0659 mm^{-1} , $\alpha_1 = 0.0419 \text{ mm}^{-1}$,吸收功率密度为

$$\rho_{\text{abs}}^0(z) = 3.1604 \times 10^9 \cosh(65.9z) \quad (-0.01 \text{ m} \leq z \leq 0.01 \text{ m}), \quad (15)$$

$$\rho_{\text{abs}}^{\pm 1}(z) = 2.0094 \times 10^9 \cosh(\pm 0.24 + 41.9z) \quad (0.01 \text{ m} \leq \pm z \leq 0.03 \text{ m}), \quad (16)$$

同理得三阶阶变梯度掺杂浓度板条吸收功率密度分布为

$$\rho_{\text{abs}}^0(z) = 3.2935 \times 10^9 \cosh(68.8z) \quad (-0.006 \text{ m} \leq z \leq 0.006 \text{ m}), \quad (17)$$

$$\rho_{\text{abs}}^{\pm 1}(z) = 2.5946 \times 10^9 \cosh(\pm 0.0876 + 54.2z) \quad (0.006 \text{ m} \leq \pm z \leq 0.018 \text{ m}), \quad (18)$$

$$\rho_{\text{abs}}^{\pm 2}(z) = 1.7377 \times 10^9 \cosh(\pm 0.4098 + 36.3z) \quad (0.018 \text{ m} \leq \pm z \leq 0.03 \text{ m}). \quad (19)$$

理想梯度掺杂情况下,由(5),(6)和(7)式,得吸收功率密度为

$$\rho_{\text{abs}}^{\text{ideal}}(z) = \rho_{\text{abs}}^{\text{ideal}}(0) = \frac{0.95P_0}{V} \quad (-0.03 \text{ m} \leq z \leq 0.03 \text{ m}), \quad (20)$$

可得 4 种情况沿 z 方向的功率密度分布曲线如图 6 所示。

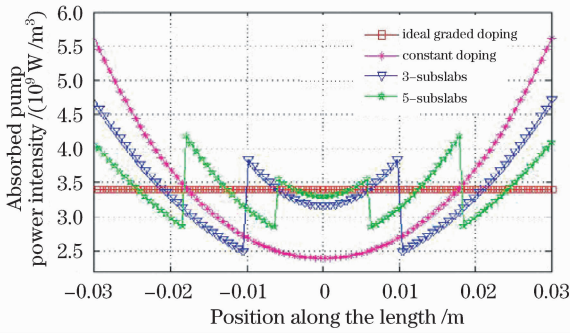


图 6 4 种掺杂结构沿长度(60 mm)方向的吸收功率密度分布比较

Fig. 6 Comparison of absorbed pump power density distribution in the length of a 60-mm-length end-pumped slab

由图 6 知,当总吸收效率相同时,基于能量等分方法,采用阶变梯度掺杂结构,抽运吸收功率密度分布比采用单一掺杂结构时更加均匀,并随着分段数目(2N+1)的增加,吸收功率密度分布趋近于理想梯度掺杂结构情况。

利用 ANSYS 有限元软件,采用有限元方法,对板条模型进行温度和热应力计算和模拟仿真,根据实验经验和仿真结果,在计算模拟中采用冷却面与热沉间换热系数为 40 kW/(m² · K),热沉冷却面温度为 20 °C,周围环境温度 20 °C,与板条自然对流,通过计算得出温度分布如图 7 所示。

选取 x=3.5 mm,y=0 mm,得温度沿 z 方向的变化曲线如图 8 所示。对应的热应力分布如图 9 所示。

选取 x=3.5 mm,y=0 mm,得温度沿 z 方向的变化曲线如图 10 所示。

由图 7 至图 10 可以看出采用阶变掺杂结构时温度分布明显改善,整个温度场分布更加均匀且整体减小,采用单一掺杂和二阶阶变梯度掺杂结构时,最大应力值分别为 0.154 × 10⁸ Pa(图 9(a))和 0.129 × 10⁸ Pa(图 9(b)),均超过板条受到的应力极限值 0.126 × 10⁸ Pa^[1],采用三阶阶变梯度掺杂和理想梯度掺杂结构得到的最大应力则小于该极限值,理想梯度掺杂情况下,最大应力最小,更适合激光器大功率输出。

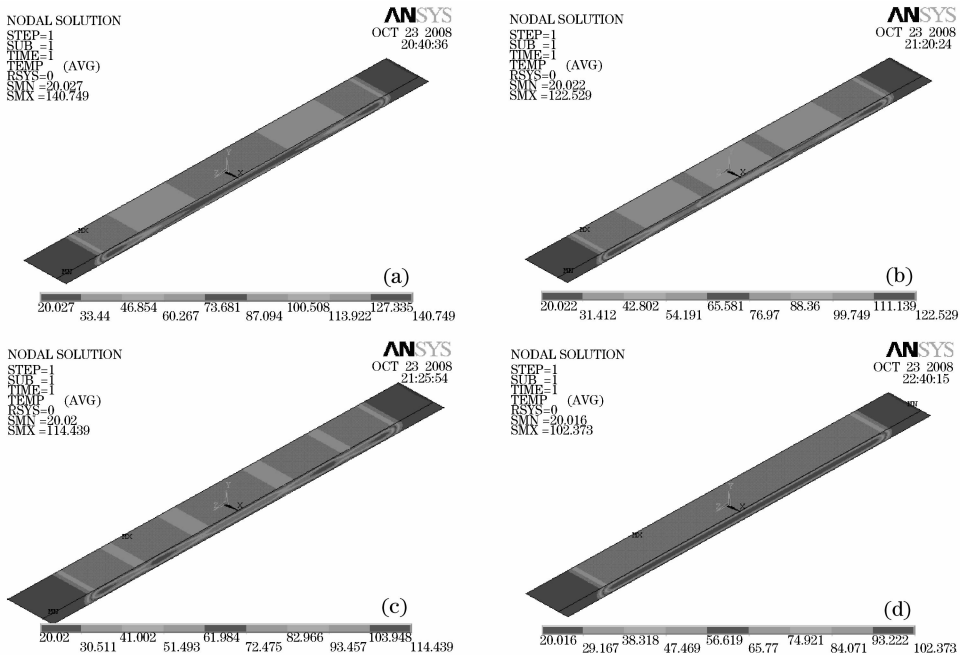


图 7 激光板条的温度分布图。(a)单一掺杂;(b)二阶阶变梯度掺杂;(c)三阶阶变梯度掺杂;(d)理想梯度掺杂

Fig. 7 Temperature distribution of laser slab media. (a) Constant doping; (b) two stepwise gradient doping; (c) three stepwise gradient doping; (d) ideal gradient doping

4 结 论

基于能量等分方法,通过计算和模拟比较单一掺杂、二阶阶变梯度掺杂、三阶阶变梯度掺杂及理想梯度掺杂 4 种情况在同种设计结构、相同抽运功率、相同吸收效率情况下 Nd : YAG 陶瓷板条的温度分

布和应力分布情况,得到采用阶变掺杂浓度结构抽运吸收功率密度分布更加均匀,可以明显改善板条温度和应力大小,并随着阶变梯度掺杂阶数的增高,效果会更好,并逐渐趋近于理想梯度掺杂浓度分布情况。从而在理论上验证基于能量等分方法采用阶变梯度掺杂浓度激光介质,可以有效解决抽运效率

与抽运功率均匀性之间的制约关系,在实际工程应

用中有很好的指导意义。

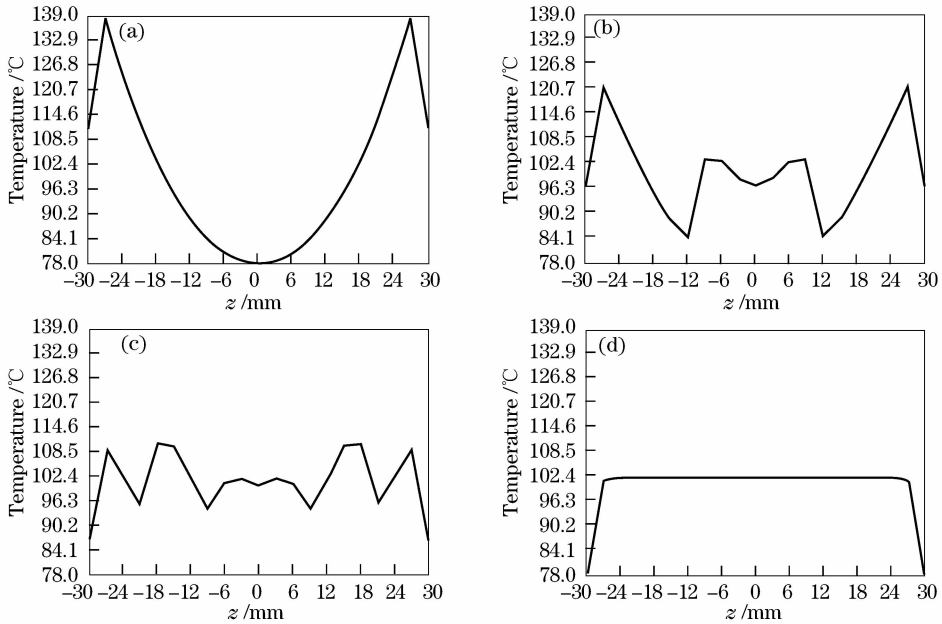


图 8 激光板条沿 $z(60\text{ mm})$ 方向的温度分布曲线。(a)单一掺杂;(b)二阶阶变梯度掺杂;(c)三阶阶变梯度掺杂;(d)理想梯度掺杂

Fig. 8 Temperature distribution in the length of the 60-mm-length end-pumped slab with. (a) Constant doping; (b) two stepwise gradient doping; (c) three stepwise gradient doping; (d) ideal gradient doping

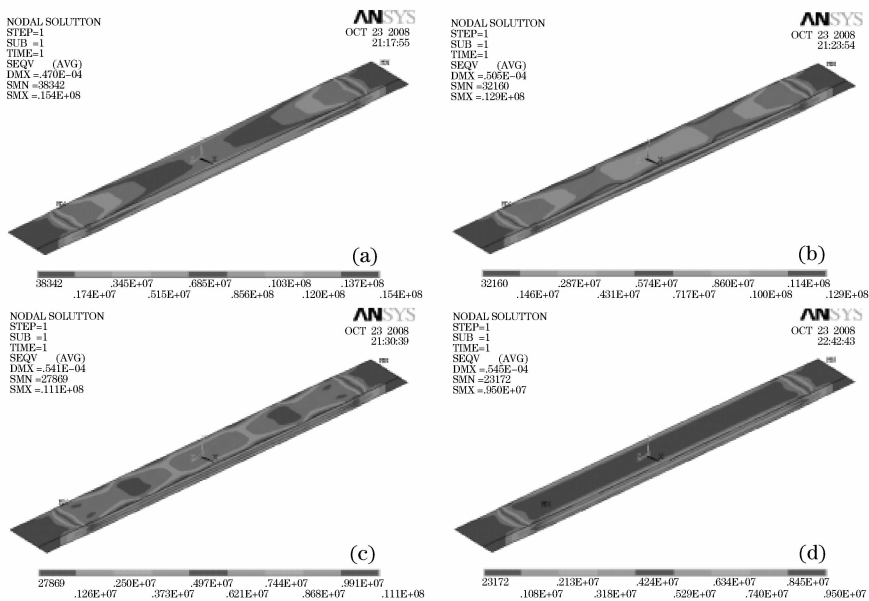


图 9 激光板条的等效主应力分布图。(a)单一掺杂;(b)二阶阶变梯度掺杂;(c)三阶阶变梯度掺杂;(d)理想梯度掺杂
Fig. 9 Von mises stress distribution of laser slab media. (a) Constant doping; (b) two stepwise gradient doping; (c) three stepwise gradient doping; (d) ideal gradient doping

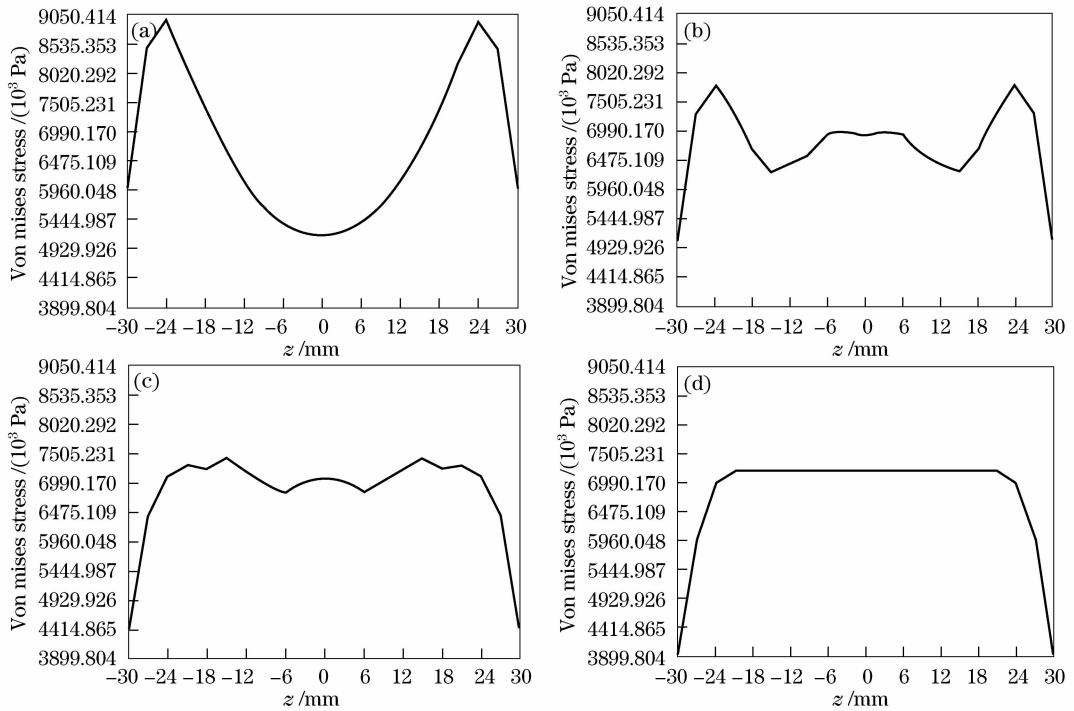


图 10 激光板条沿 z 方向的等效主应力分布曲线。(a)单一掺杂;(b)二阶阶变梯度掺杂;(c)三阶阶变梯度掺杂;
(d)理想梯度掺杂

Fig. 10 Von mises stress distribution in the length of the 60-mm-length end-pumped slab with. (a) Constant doping;
(b) two stepwise gradient doping; (c) three stepwise gradient doping; (d) ideal gradient doping

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999. 391~405
- 2 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry-Part I; Theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**: 289~301
- 3 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry-Part II; Thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**: 1195~1210
- 4 S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd : YAG lasers to high average powers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 997~1009
- 5 Cheng Xiaojin, Xu Jianqiu. Research on parasitic oscillation slab amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1827~1830
程小劲, 徐剑秋. 板条激光放大器中寄生振荡的研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1827~1830
- 6 Jindong Li, Mingxiu Guo, Wenqiang Fu *et al.*. Heat distribution influence on laser output with different cooling conditions [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 64~66
- 7 G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider *et al.*. Yb : YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- 8 D. Kracht, R. Wilhelm, M. Frede. 407 W end-pumped multi-segmented Nd : YAG laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10140~10144
- 9 Bin Chen, Ying Chen, M. Bass. Edge-and end-pumped slab lasers with both efficient and uniform pumping [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **45**(5): 483~489
- 10 D. Kracht, M. Frede, R. Wilhelm *et al.*. Comparison of crystalline and ceramic composite Nd : YAG for high power diode end-pumping [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6212~6216
- 11 T. Rutherford, W. M. Tulloch, E. K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers; design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2): 205~219
- 12 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858
程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器热效应分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858
- 13 Ma Xiuhua, Bin Jinzi, Hou Xia *et al.*. Numerical comparison of thermal effect among zigzag slab pump geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2209~2214
马秀华, 毕进子, 侯霞等. 锯齿形板条抽运结构的热效应数值比较 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2209~2214
- 14 Wang Junrong, Min Jingchun, Song Yaozu. Cooling of a side-pumped laser slab by heat sink [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 829~834
王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 侧面抽运板状激光介质的热汇冷却 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 829~834