

## 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器 热效应的有限元法分析

刘全喜,任 钢,李轶国,岳 通,王 莉,肖 星,邓 翠,李佳玲

(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

**摘 要:** 基于能量均分方法,根据经典热传导和热弹性理论,建立了激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光介质的数值模型,考虑到梯度浓度掺杂激光介质端面与空气的对流换热和激光介质材料的热力学参数的温度相关性,运用有限元法,得出了单一浓度掺杂、2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂四种掺杂结构激光介质内吸收系数、抽运光吸收功率、温度、热应力和应变的空间分布。结果表明,采用梯度浓度掺杂结构可以大大提高激光介质内抽运光吸收分布的均匀性,5 阶阶变梯度浓度掺杂激光介质的最高温度、最大主拉应力和最大主应变分别为单一浓度掺杂激光介质的 42.6%、31.9% 和 28.1%,可见明显减小了热效应的影响。理论分析结果可为激光二极管抽运梯度浓度掺杂激光器的合理优化设计提供数据理论支撑。

**关键词:** 激光二极管端面抽运固体激光器; 热效应; 有限元法; 梯度浓度掺杂

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1105004

## Finite element method analysis of thermal effect in gradient dopant concentration medium laser end-pumped by laser diode

Liu Quanxi, Ren Gang, Li Yiguo, Yue Tong, Wang Li, Xiao Xing, Deng Cui, Li Jialing

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the method of energy equipartition and thermal conduction equations and the thermal-elastic equations, a numerical model of the gradient dopant concentrations rod laser medium end-pumped by laser diode was set up. Considering the temperature correlation of the thermodynamic parameters of the material and heat transfer coefficient between air and medium, the distributions of absorption coefficient, absorption pump power, temperature, thermal stress and strain in the laser medium of constant doping, two stepwise gradient doping, five stepwise gradient doping and ideal gradient doping structures were calculated by a finite element analysis method. The results indicate that by using the gradient dopant concentrations laser medium, absorption pump power uniformity in laser medium can be improved greatly. And the maximum temperature and principal tensile stress and principal strain of the five stepwise gradient doping laser medium were respectively 42.6% and 31.9% and 28.1% of the constant doping laser medium. It is obvious that the thermal effects of the gradient dopant concentrations

收稿日期:2019-08-22; 修订日期:2019-09-21

基金项目:总装十三五预先研究资助项目

作者简介:刘全喜(1977-),男,高级工程师,博士,主要从事强激光技术及激光与物质相互作用方面的研究。

Email: liuquanxi234@sohu.com

laser medium are greatly reduced. The theoretical results provide theoretical reference and experimental study for the design of solid laser pumped by laser diode.

**Key words:** laser diode end-pumped solid-state laser; thermal effect; finite element method; gradient concentration doping

## 0 引言

激光二极管(Laser Diode, LD)抽运的固体激光器因具有结构紧凑、转换效率高、可靠性好、寿命长等优点,在工业、国防、能源、医疗等领域有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。端面抽运是目前激光二极管抽运固体激光器常用的抽运方式之一,具有抽运面积大、模式匹配好、频率稳定以及输出光束质量高等优点<sup>[4-10]</sup>。但当高功率激光端面抽运单一浓度掺杂的激光介质时,由于激光介质中任意位置的吸收系数都相同,随着抽运光的传播,抽运光光强将逐渐按指数减小,抽运光吸收分布极不均匀,将导致激光器介质产生明显的温度梯度、应力和应变等热效应现象,进而使高功率固体激光器的输出功率降低、光-电转换效率减小,稳定性和激光光束质量变差等<sup>[4-10]</sup>。因此,如何提高激光介质中抽运光分布的均匀性,降低温度梯度及改善热效应已成为激光器研究的重要内容之一。采用梯度浓度掺杂的复合激光介质可有效改善介质中的抽运光分布和温度梯度,减小热效应,有利于激光器稳定和高功率的输出<sup>[5-10]</sup>。因此,研究激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器热效应具有重要的意义。

2010年尹晓雪等<sup>[5]</sup>研究了激光二极管端面抽运分段阶变梯度浓度掺杂Nd:YAG介质的温度场分布。2011年单小童等<sup>[8]</sup>分析了基于非均匀掺杂的薄片激光放大介质的热效应特性。2012年,雷呈强等<sup>[6]</sup>分析了激光二极管双端抽运梯度浓度掺杂复合Nd:YAG陶瓷板条的抽运光分布均匀性。文中基于能量均分方法,根据热传导和热弹性理论,建立了激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光介质的三维数学物理模型,考虑到梯度浓度掺杂激光介质热力学参数的温度相关性和介质两个端面与空气的对流换热,采用有限元分析算法,对单一浓度掺杂激

光介质和梯度浓度掺杂激光介质中的吸收系数、抽运光吸收功率、瞬态温度、热应力和应变进行了详细的数值模拟计算和比较分析,计算结果可以为激光二极管抽运固体激光器的合理优化设计提供理论数据支撑。

## 1 理论模型

### 1.1 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光器的抽运结构

图1为激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光器的结构示意图。图2为数值分析几何模型示意图。激光二极管发出的抽运激光束首先经过整形耦合装置整形聚焦后,从激光介质前端面沿轴向进入,逐渐被激光介质吸收。介质前表面 $\Sigma_1$ 和后表面 $\Sigma_2$ 与空气对流换热,激光介质圆棒侧面 $\Sigma_3$ 涂抹导热硅脂后,用薄钢箔包裹置于紫铜热沉夹具中进行传导冷却。由于激光介质具有轴对称性,在柱坐标系中,数学物理模型数值分析只需分析轴向截面的一半。

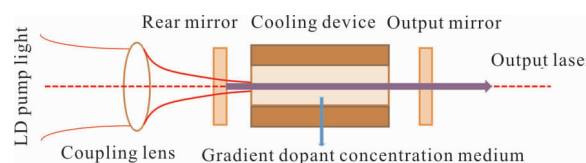


图1 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光器的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of LD end-pump for gradient dopant concentration rod medium laser

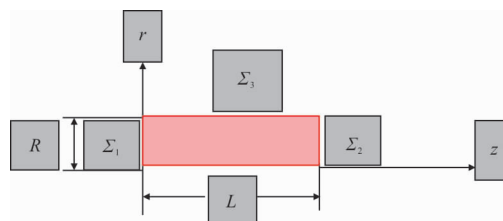


图2 数值分析几何模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of geometric model for numerical analysis

## 1.2 激光介质抽运光分布

### 1.2.1 单一浓度掺杂分析

若采用单一浓度掺杂, 经过整形耦合装置进入长度为  $L$  的激光介质内沿  $z$  向传播的抽运激光可近似认为是高斯分布, 其光场分布可表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$I(r, z) = \frac{2P\eta_1}{\pi w(z)^2} \exp\left[-2\left(\frac{r^2}{w(z)^2}\right) - \alpha z\right] \quad (1)$$

式中:  $P$  为抽运激光总功率;  $\eta_1$  为光束整形耦合装置耦合效率;  $w(z)$  为经光束整形耦合装置聚焦后的抽运光光斑半径;  $\alpha = n_d \delta_{abs}$  为激光介质的吸收系数,  $n_d$  为激光介质掺杂浓度,  $\delta_{abs}$  为激光介质掺杂离子的有效吸收截面。

介质中抽运光光斑半径  $w(z)$  可表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$w(z) = w_0 + \theta |z - z_0| \quad (2)$$

式中:  $w_0$  为介质中聚焦抽运光束腰半径;  $\theta$  为介质中聚焦抽运光发散角;  $z_0$  为介质中聚焦抽运光束腰位置。

则激光介质抽运光吸收功率  $z$  方向分布为:

$$P_{abs} = P\eta_1 \exp[-\alpha z] \quad (3)$$

激光介质抽运光吸收效率  $\eta_2$  可表示为:

$$\eta_2 = 1 - \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

### 1.2.2 梯度浓度掺杂分析

抽运光在单一浓度掺杂激光介质中按指数衰减传播, 吸收抽运光沿  $z$  向分布极不均匀, 产生了抽运光吸收效率与抽运光吸收均匀性的矛盾, 梯度浓度掺杂棒状激光介质可有效解决这个矛盾问题。

#### 1.2.2.1 理想梯度浓度掺杂

理想情况下, 对于端面抽运梯度浓度掺杂棒状激光介质, 沿抽运  $z$  方向吸收系数  $\alpha(z)$  和掺杂浓度不再是恒定常量, 而是关于  $z$  的连续变化函数。若要求激光介质对抽运光的吸收效率为  $\eta_2$ , 则理想梯度浓度掺杂激光介质抽运光吸收功率沿  $z$  向分布为恒定值  $P\eta_1\eta_2/L$ , 即抽运光均匀吸收。

可得理想梯度浓度掺杂激光介质中抽运光功率沿  $z$  方向的分布为:

$$P_p = P\eta_1 \left(1 - \frac{\eta_2 z}{L}\right) \quad (5)$$

进而可求得理想梯度浓度掺杂激光介质吸收系数  $\alpha(z)$  满足如下表达式:

$$\alpha(z) = \frac{\eta_2}{L - \eta_2 z} \quad (6)$$

#### 1.2.2.2 分段阶变梯度浓度掺杂

理想梯度浓度掺杂可以确保激光介质吸收的抽运光功率均匀分布, 但目前为止还没有理想梯度浓度掺杂激光介质的实际应用报道。这是由于实际工艺条件的限制, 掺杂浓度达不到理想渐变的要求。一种近似理想梯度浓度掺杂的方法为把棒状激光介质沿  $z$  方向按  $N$  阶阶变梯度浓度掺杂等分成长度为  $L/N$  的  $N$  段, 每段内掺杂浓度和吸收系数相同, 然后将不同浓度掺杂的  $N$  段激光介质键合在一起, 使得每段的抽运光吸收功率相同均为  $P\eta_1\eta_2/N$ 。若  $N$  足够大, 则可近似看作是理想梯度浓度掺杂, 相应抽运光吸收功率分布就趋近于理想梯度浓度掺杂情况的均匀分布<sup>[5-9]</sup>。

若要求激光介质对抽运光的吸收效率为  $\eta_2$ , 可得  $N$  阶阶变梯度浓度掺杂激光介质第  $i$  段 ( $i$  取 1, 2, 3, ...,  $N$ ) 吸收系数  $\alpha_i$  满足如下表达式<sup>[5-9]</sup>:

$$\alpha_i = -\left[\ln\left(\frac{N - i\eta_2}{N - i\eta_2 + \eta_2}\right)\right] \cdot \frac{N}{L} \quad (7)$$

则  $N$  阶阶变梯度浓度掺杂激光介质第  $i$  段抽运光功率沿  $z$  方向的分布为:

$$P_{p1} = P\eta_1 \exp(-\alpha_i z) \quad i=1 \quad 0 \leq z \leq \frac{L}{N}$$

$$P_{pi} = P\eta_1 \exp\left[-\sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j \frac{L}{N}\right] \exp\left[-\alpha_i \left(z - \frac{(i-1)L}{N}\right)\right]$$

$$2 \leq i \leq N \quad \frac{(i-1)L}{N} \leq z \leq \frac{iL}{N} \quad (8)$$

## 1.3 温度场分析

激光介质吸收抽运激光, 会产生温度梯度, 其温度时空分布满足的热传导方程表示为<sup>[5,10-13]</sup>:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = q \quad (9)$$

式中:  $T$  为激光介质温度;  $k(T)$  为激光介质热导率;  $\rho$  为激光介质材料密度;  $c_p$  为激光介质定压比热容;  $t$  为时间;  $q$  为激光介质内热源强度,  $q$  可用下式表示<sup>[5,10-13]</sup>:

$$q = \gamma \alpha I(r, z) \quad (10)$$

式中:  $\gamma$  为由激光介质荧光量子效应和内损耗共同决定的热转换系数, 表示吸收的抽运光中转化为热能的份额。

满足的初始条件和边界条件分别可表示为:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_1, z_2} = h_1 (T - T_a)$$

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r=R} = h_2(T - T_e) \quad (11)$$

式中： $T_0$ 为激光介质初始时刻温度； $h_1$ 为激光介质的前表面  $\Sigma_1$  及后表面  $\Sigma_2$  与空气的对流换热系数； $T_a$ 为空气介质端面接触空气的温度； $R$ 为介质半径； $h_2$ 为介质侧面  $\Sigma_3$  和冷却装置的对流换热系数； $T_e$ 为制冷剂的温度。

将激光介质空间域离散，时间域上采用后向差分格式，用单元结点温度插值近似得到单元体内温度，运用有限元法，可得激光介质内温度分布情况<sup>[10-13]</sup>。

### 1.4 热应力、应变分析

激光介质材料具有热胀冷缩的特性，介质内产生的温度梯度，导致出现热应变和热应力。满足的热弹性方程为<sup>[5,10-12]</sup>：

$$\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

式中： $u_r, u_z$ 分别为激光介质内 $(r, z)$ 点 $r, z$ 方向上的位移分量； $e$ 为激光介质体应变； $\nu$ 为激光介质泊松比； $\alpha_T$ 为激光介质热膨胀系数。

在介质内温度场分布已知的条件下，根据应

变、位移关系的几何方程和应力、应变关系的虎克定律，运用有限元法可以求得激光介质内的热应力和应变<sup>[10-12]</sup>。

## 2 模拟仿真计算与结果分析

运用上述理论分析，对 LD 端面抽运单一浓度掺杂、2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂四种情况的棒状介质 Nd:YAG 晶体的吸收系数、抽运光吸收功率、温度、热应力和应变分布进行了数值模拟仿真和比较分析。激光介质的尺寸相同均为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，耦合效率  $\eta_1 = 90\%$ ，介质抽运光吸收效率  $\eta_2 = 96\%$ ，热转换系数  $\gamma = 32\%$ ， $T_0 = T_a = 293 \text{ K}$ ， $h_1 = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ， $h_2 = 10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ， $P = 150 \text{ W}$ ，抽运光束腰  $\omega_0 = 0.8 \text{ mm}$ ，抽运光发散角  $\theta = 0.02 \text{ rad}$ ，抽运光束腰位置  $z_0 = 10 \text{ mm}$ 。抽运光连续工作时间为 6 s。激光介质 Nd:YAG 的热力学参数见表 1<sup>[10-11,14]</sup>，激光介质杨氏模量  $E = 300 \text{ GPa}$ ，介质材料的热导率随温度增加而减小，介质材料的热膨胀系数随温度增加而增大。

四种掺杂情况激光介质的吸收系数沿  $z$  方向分布见图 3。其中单一浓度掺杂激光介质吸收系数为

表 1 激光介质 Nd:YAG 的热力学参数

Tab.1 Thermodynamic parameters of Nd:YAG

$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$k(T)/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_p/\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$E/\text{GPa}$	$\alpha_T/\text{K}^{-1}$	$\nu$
4.56	$1.9 \times 10^8 [\ln(5.33 \times T)^{-7.14}] - 33\,100/T$	0.59	300	$3.3 \times 10^{-8} T - 1.78 \times 10^{-6}$	0.3

$\alpha = 0.161 \text{ mm}^{-1}$ ；2 阶阶变梯度浓度掺杂激光介质各段吸收系数分别为： $\alpha_1 = 0.065\,4 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_2 = 0.256\,5 \text{ mm}^{-1}$ ；

5 阶阶变梯度浓度掺杂介质吸收系数分别为： $\alpha_1 = 0.053\,3 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_2 = 0.067\,8 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_3 = 0.093\,4 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_4 = 0.150\,7 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_5 = 0.439\,5 \text{ mm}^{-1}$ ；由图 3 可得梯度浓度掺杂激光介质吸收系数沿  $z$  方向增加。

### 2.1 抽运光吸收功率分布模拟

图 4 为四种掺杂情况激光介质抽运光吸收功率沿  $z$  方向分布。由图可得，单一浓度掺杂介质抽运光吸收功率沿  $z$  方向指数减小，分布极不均匀；阶变梯度浓度掺杂介质抽运光吸收功率在每一个分段内沿  $z$  方向指数减小，但每分段抽运光总吸收功率是相等的，最大吸收功率出现在最后一分段的复合界面处，且随着分段阶数的增加，抽运光吸收功率趋近于理想梯度浓度掺杂的均匀  $z$  向分布。

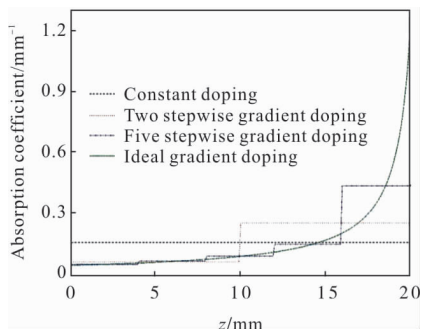


图 3 四种掺杂情况激光介质的吸收系数沿  $z$  方向分布

Fig.3 Laser medium absorption coefficient distribution along  $z$  direction of four different doping structures

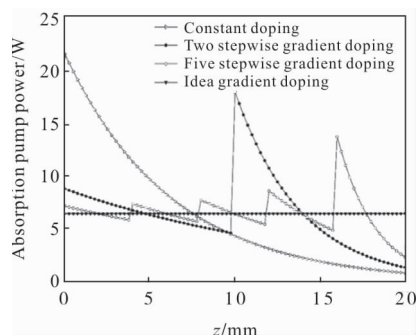
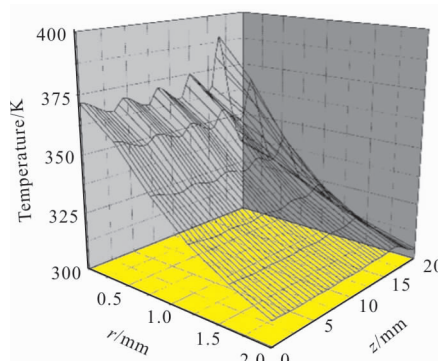


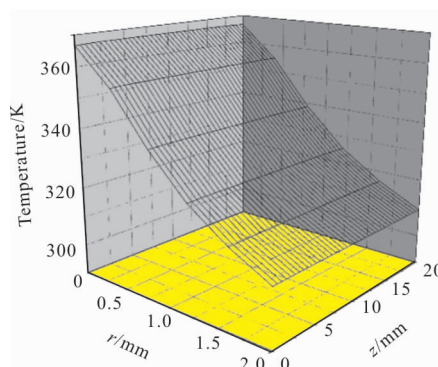
图 4 四种掺杂情况激光介质抽运光吸收功率沿 z 方向分布

Fig.4 Laser medium absorption pump power distribution along z direction of four different doping structures



(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂

(c) Five stepwise gradient doping

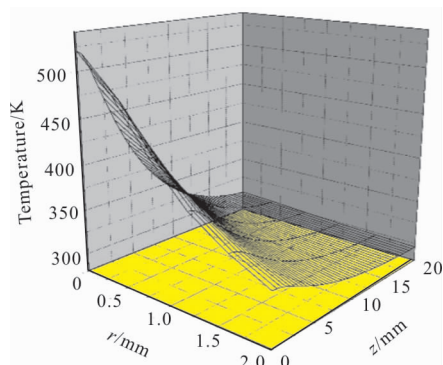


(d) 理想梯度浓度掺杂

(d) Ideal gradient doping

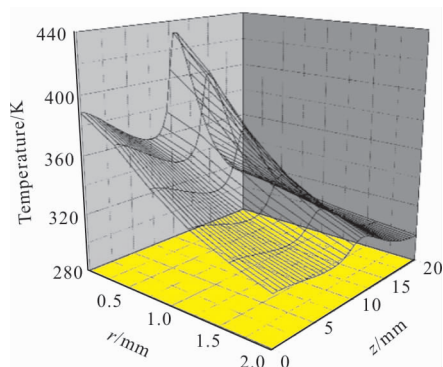
## 2.2 温度场分布模拟

图 5 为  $t=6\text{ s}$  时四种掺杂情况激光介质轴向截面内温度场的三维分布图。由图中可以看出,单一浓度掺杂介质轴向温度梯度最大,最高温升为  $228.12\text{ K}$ , 位置在抽运前端面中心;2 阶阶变和 5 阶阶变梯度浓度掺杂介质最高温升分别为  $138.8$ 、 $97.1\text{ K}$ , 位置在最后一分段的复合界面附近;理想梯度浓度掺杂介质轴向温度梯度最小,最高温升为  $73.9\text{ K}$ 。2 阶阶



(a) 单一浓度掺杂

(a) Constant doping



(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂

(b) Two stepwise gradient doping

图 5  $t=6\text{ s}$  四种掺杂情况激光介质轴向截面内温度场的三维分布图

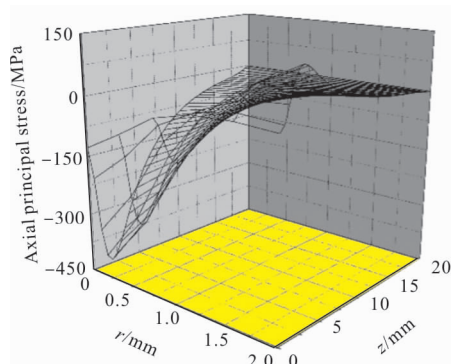
Fig.5 Temperature 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6\text{ s}$

变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最高温升分别是单一浓度掺杂的  $60.8\%$ 、 $42.6\%$ 、 $33.4\%$ , 温度降低明显。且随着分段阶数的增加, 阶变梯度浓度掺杂介质温度分布趋近于理想梯度浓度掺杂。

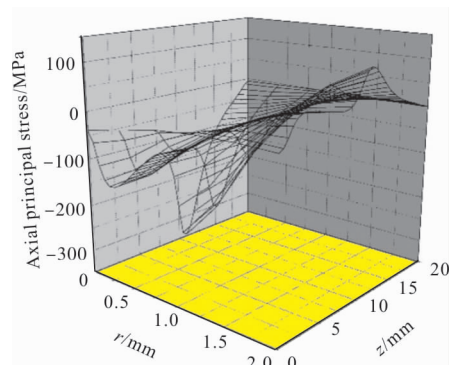
## 2.3 热应力分布模拟

图 6 为  $t=6\text{ s}$  时四种掺杂情况激光介质轴向截面内轴向主应力场的三维分布图。由图中可以看出, 介质内部多表现为压应力, 外表面多表现为拉应力。根据第一强度理论又称最大拉应力理论, 一般脆性材料的抗压强度均远大于其抗拉强度, 不管激光介质这种脆性材料处于什么样的应力状态, 只要所受的最大拉应力达到了一定的极限值, 材料就会被破坏<sup>[10,15]</sup>。因此若是应力损伤, 则应是拉应力引起的拉伸破裂。单一浓度掺杂介质最大轴向主拉应力为

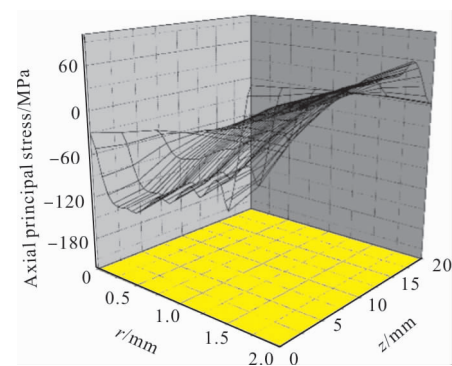
133.4 MPa, 位置在激光介质外侧面;2 阶阶变和 5 阶阶变梯度浓度掺杂介质最大轴向主拉应力分别为 110.23、67.5 MPa, 位置在最后一分段的复合界面外侧附近; 理想梯度浓度掺杂介质最大轴向主拉应力为 53 MPa。2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大轴向主拉应力分别是单一浓度掺杂的 82.6%、50.1%、39.7%, 轴向热应力明显改善。



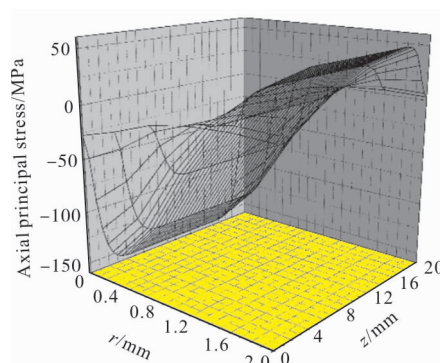
(a) 单一浓度掺杂  
(a) Constant doping



(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂  
(b) Two stepwise gradient doping



(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂  
(c) Five stepwise gradient doping



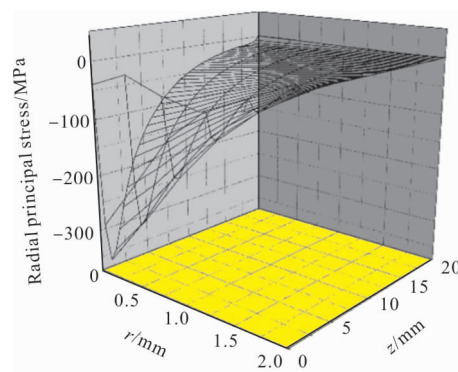
(d) 理想梯度浓度掺杂  
(d) Ideal gradient doping

图 6  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内轴向主应力场的三维分布图

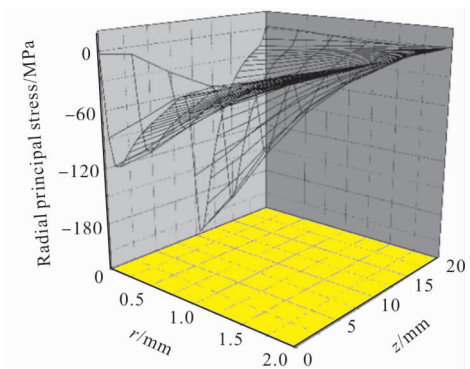
Fig.6 Axial principal stress 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s

图 7 为  $t=6$  s 时四种掺杂情况激光介质轴向截面内径向主应力场的三维分布图。由图中可以看出, 介质内部多表现为压应力, 外表面多表现为拉应力, 最大径向主拉应力都较小。单一浓度掺杂介质最大径向主拉应力为 13.68 MPa, 位置在激光介质前端面外侧面附近; 2 阶阶变和 5 阶阶变梯度浓度掺杂介质最大径向主拉应力分别为 9.8、5.72 MPa; 理想梯度浓度掺杂介质最大径向主拉应力为 4.6 MPa。2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大径向主拉应力分别是单一浓度掺杂的 71.6%、34.3%、33.6%, 径向热应力也有明显改善。

图 8 为  $t=6$  s 时四种掺杂情况激光介质轴向截面内环向主应力场的三维分布图。由图中可以看出,

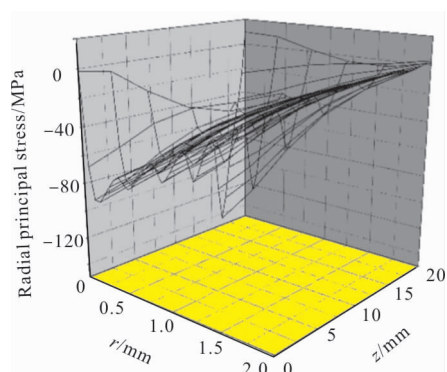


(a) 单一浓度掺杂  
(a) Constant doping



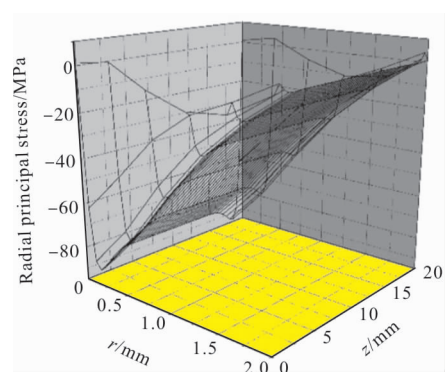
(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂

(b) Two stepwise gradient doping



(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂

(c) Five stepwise gradient doping



(d) 理想梯度浓度掺杂

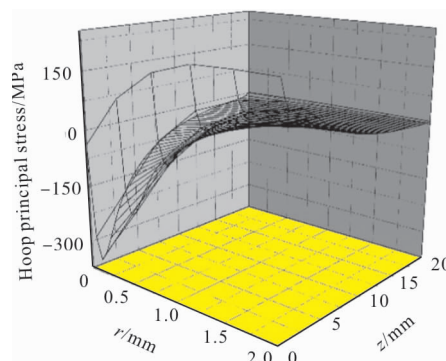
(d) Ideal gradient doping

图 7  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内径向主应力场的三维分布图

Fig.7 Radial principal stress 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s

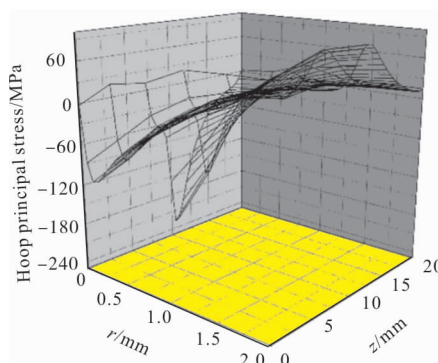
激光介质前表面环向应力表现为较大的拉应力,在光斑外侧附近达到最大值,这样会使前表面膨胀向外凸起,产生热透镜效应。单一浓度掺杂介质最大环向主拉应力为 211.95 MPa,位置在激光介质前端面

外侧面附近;2 阶阶变和 5 阶阶变梯度浓度掺杂介质最大环向主拉应力分别为 95.4、60.67 MPa,位置在最后一分段的复合界面外侧附近;理想梯度浓度掺杂介质最大环向主拉应力为 57.27 MPa。2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大环向主拉应力分别是单一浓度掺杂的 45%、28.6%、27%,环向热应力改善更加明显。



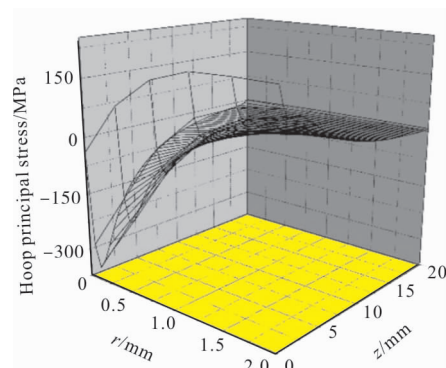
(a) 单一浓度掺杂

(a) Constant doping



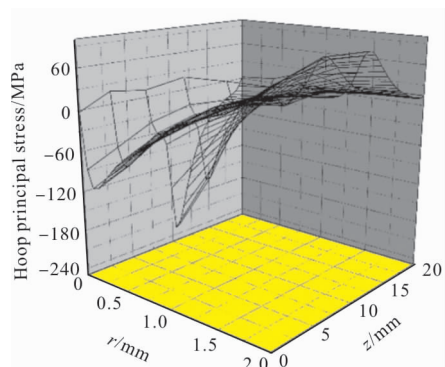
(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂

(b) Two stepwise gradient doping



(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂

(c) Five stepwise gradient doping



(d) 理想梯度浓度掺杂

(d) Ideal gradient doping

图 8  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内环向主应力场的三维分布图

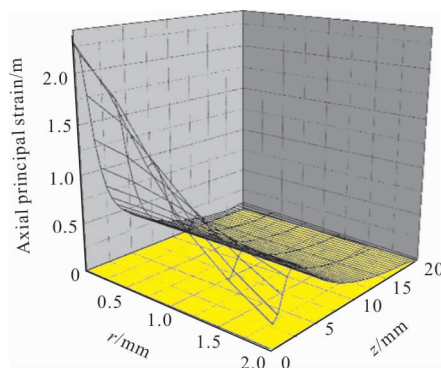
Fig.8 Hoop principal stress 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s

由上述热应力仿真分析可得,单一浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂激光介质最大主拉应力为环向主应力,表现为环向主应力引起的外表面拉伸破裂;2阶阶变和5阶阶变梯度浓度掺杂激光介质最大主拉应力为轴向主应力,表现为轴向主应力引起的外表面拉伸破裂;但最大轴向主应力和环向主应力都远大于径向主应力。Nd: YAG 的抗张强度为 180~210 MPa<sup>[10]</sup>,此时单一浓度掺杂介质的最大主拉应力为 211.95 MPa,已经超过最大抗张强度的上限 210 MPa,2阶阶变梯度浓度掺杂、5阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大主应力分别是单一浓度掺杂的 52%、31.9%、27%,均远未达到最大抗张强度的下限 180 MPa,说明梯度浓度掺杂介质适用于更高功率的激光输出。

### 2.4 应变分布模拟

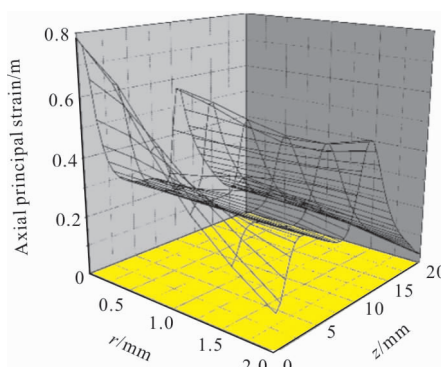
图 9 为  $t=6$  s 时四种掺杂情况激光介质轴向截面内轴向主应变的三维分布图。由图中可以看出,激光介质内前表面轴向主应变较大,最大轴向主应变均位于前表面中心。四种掺杂情况激光介质最大轴向主应变分别为 2.3、0.78、0.63、0.58  $\mu\text{m}$ 。2阶阶变梯度浓度掺杂、5阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大轴向主应变分别是单一浓度掺杂的 33.9%、27.4%、25.2%,轴向主应变明显减小,这样就大大减小了热透镜效应的影响。

图 10 为  $t=6$  s 时刻四种掺杂情况激光介质轴向截面内径向主应变的三维分布图。由图中可以看出,激光介质内前表面径向主应变较大,2阶阶变梯度浓度掺杂介质最大径向主应变位于两段复合界面中心附近,其余三种掺杂情况最大径向主应变位于前表面中心。四种掺杂情况激光介质最大径向主应变分别为 2.67、1.1、0.75、0.7  $\mu\text{m}$ 。2阶阶变梯度



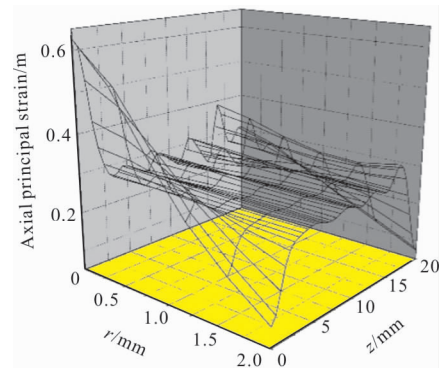
(a) 单一浓度掺杂

(a) Constant doping



(b) 2阶阶变梯度浓度掺杂

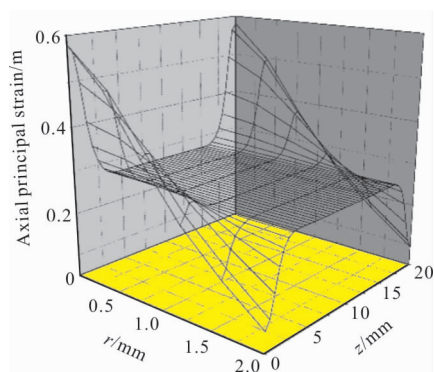
(b) Two stepwise gradient doping



(c) 5阶阶变梯度浓度掺杂

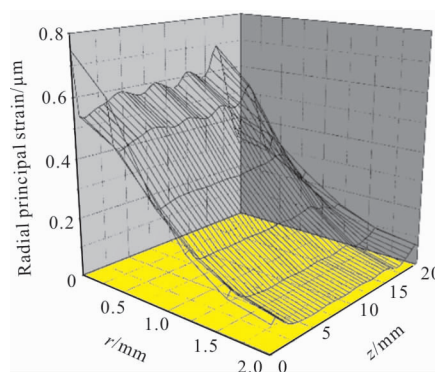
(c) Five stepwise gradient doping





(d) 理想梯度浓度掺杂

(d) Ideal gradient doping



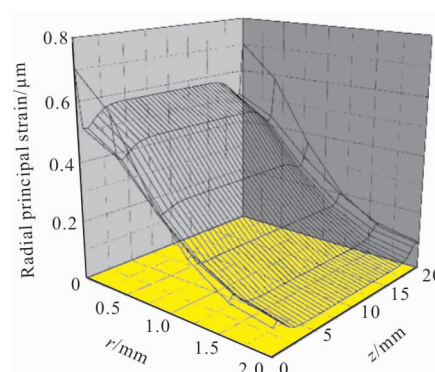
(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂

(c) Five stepwise gradient doping

图 9  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内轴向主应变场的三维分布图

Fig.9 Axial principal strain 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s

浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大径向主应变分别是单一浓度掺杂的 41.2%、28.1%、26.2%，径向主应变显著减小。

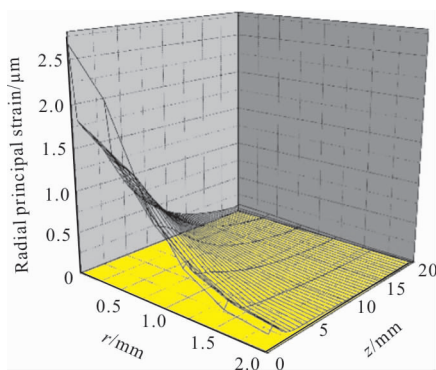


(d) 理想梯度浓度掺杂

(d) Ideal gradient doping

图 10  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内径向主应变场的三维分布图

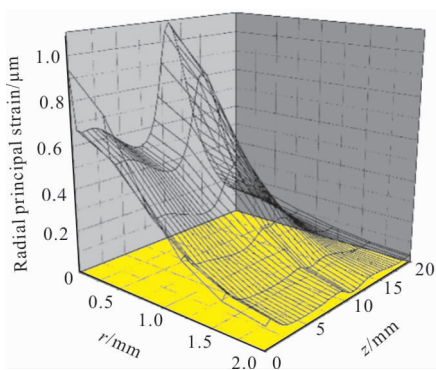
Fig.10 Radial principal strain 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s



(a) 单一浓度掺杂

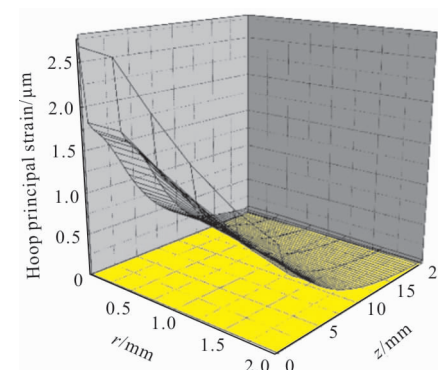
(a) Constant doping

图 11 为  $t=6$  s 时刻四种掺杂情况激光介质轴向截面内环向主应变的三维分布图。由图可以看出,激光介质内环向主应变分布及最大应变值与径向主应



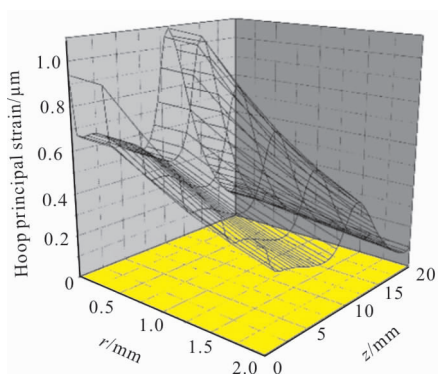
(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂

(b) Two stepwise gradient doping

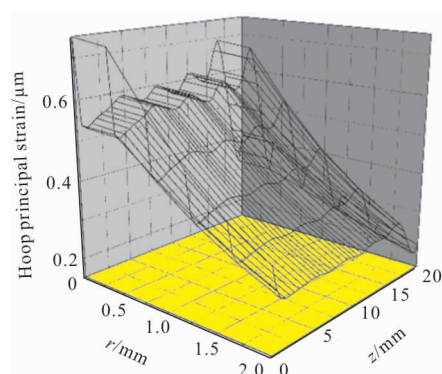


(a) 单一浓度掺杂

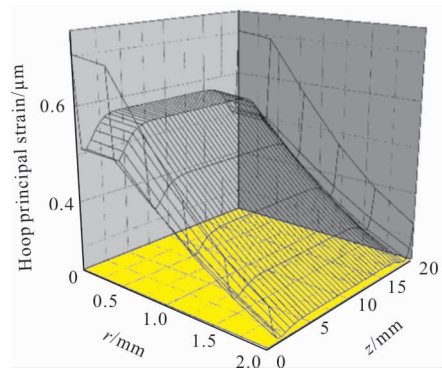
(a) Constant doping



(b) 2 阶阶变梯度浓度掺杂  
(b) Two stepwise gradient doping



(c) 5 阶阶变梯度浓度掺杂  
(c) Five stepwise gradient doping



(d) 理想梯度浓度掺杂  
(d) Ideal gradient doping

图 11  $t=6$  s 四种掺杂情况激光介质轴向截面内径环向主应变场的三维分布图

Fig.11 Hoop principal strain 3D distribution on laser medium axial cross section of four different doping structures at  $t=6$  s

变基本相同。

由上述热应变仿真分析可得，四种掺杂情况激光介质前表面主应变较大，最大主应变为环向主应

变和径向主应变，2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂介质的最大主应变分别是单一浓度掺杂的 41.2%、28.1%、26.2%，说明梯度浓度掺杂介质大大降低了应变对热透镜效应的影响。

### 3 结论

基于能量均分方法，根据热传导和热弹性理论，建立了 LD 端面抽运梯度浓度掺杂棒状固体激光介质的数学物理模型，考虑材料热力学参数的温度相关性，运用有限元法，在抽运效率相同的情况下获得了单一浓度掺杂、2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂四种掺杂情况激光介质内吸收系数、抽运光吸收功率、温度、热应力和应变的空间分布，并进行了比较分析。结果表明，2 阶阶变梯度浓度掺杂、5 阶阶变梯度浓度掺杂和理想梯度浓度掺杂激光介质的最高温升、最大主拉应力和最大主应变分别为单一浓度掺杂介质的 60.8%、42.6% 和 33.4%，52%、31.9% 和 27%，41.2%、28.1% 和 26.2%，并且随着分段阶数的增加，阶变梯度浓度掺杂介质热效应趋近于理想梯度浓度掺杂。可见利用梯度浓度掺杂激光介质使抽运光吸收分布更加均匀，明显改善了激光介质热效应的影响，进而提高激光的光光转换效率和输出功率，参考文献[16]中的实验结果相符。参考文献[16]运用 6.52 W 连续 808 nm 抽运光端面抽运三类总长度 10 mm 激光晶体 Nd:YVO<sub>4</sub>(第一类：单一掺杂浓度 1%；第二类：三阶阶变梯度掺杂，长度分别为 4、3、3 mm，掺杂浓度分别为 0.1%、0.3%、0.8%；第三类：三阶阶变梯度掺杂，长度分别为 4、3、3 mm，掺杂浓度分别为 0.1%、0.5%、1%)，输出镜透过率为 15% 时，获得输出功率分别为 1.99、3.19、3.35 W，对应的斜效率分别为 32.2%、52.6%、54.6%。由于第一类单一掺杂晶体严重的热透镜效应，当抽运功率超过 5.31 W 时，就呈现出功率饱和现象，而第二类和第三类梯度掺杂晶体没有明显的功率饱和现象<sup>[16]</sup>。因此梯度浓度掺杂激光器在高功率、高光束质量激光器上有很大的应用潜力，选择合适阶数的阶变梯度浓度掺杂介质在实际的工程应用中具有重要的意义，对于文中的模型选择 5 阶阶变梯度浓度掺杂介质即可有效

减小热效应的影响。文章中的计算结果可为 LD 抽运固体激光器的合理优化设计提供数据理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] Qu Pengfei, Wang Shiyu, Guo Zhen, et al. Adaptive adjusting technique of thermal effect to laser beam quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (5): 0514001. (in Chinese)
- [2] Hu Xing, Cheng Dejiang, Guo Zhiyan, et al. Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub> laser by end-pumping at 914 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105001. (in Chinese)
- [3] Zhu Junchao, Dou Ziwen, Li Jiaqiang, et al. High-precision and wide-range optical crystal temperature control system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1604-1611. (in Chinese)
- [4] Li Yao, Li Yang, Wang Chao. Absorption light field of side-pumped Nd:YAG crystal in LD planar arrays [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 206-211. (in Chinese)
- [5] Yin Xiaoxue, Guo Zhen, Li Bingbin, et al. Laser crystal thermal effect and ladder pump technology [J]. *Electronic Sci & Tech*, 2010, 23(2): 39-41. (in Chinese)
- [6] Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, et al. Theoretical analysis of pumping homogeneity in gradient dopant concentration composite slab [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 428-432. (in Chinese)
- [7] Wang Jianlei, Li Lei, Qiao Liang, et al. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1777-1783. (in Chinese)
- [8] Shan Xiaotong, Yan Xiongwei, Zhang Xiongjun, et al. Analysis of thermal characteristics in laser diode pump solid-state laser with variable doping amplifying medium [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 0102009. (in Chinese)
- [9] Zhang Jian, Yu Yongji, Jiang Chengyao, et al. Experiment comparison of acousto-optical Q-switching and RTP electro-optical Q-switching of high repetition frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205002. (in Chinese)
- [10] Liu Quanxi, Zhong Ming. Analysis on thermal effect of laser-diode array end-pumped composite rod laser by finite element method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8535-8541. (in Chinese)
- [11] Dascalu T, Pavel N, Tair T. 90 W continuous-wave diode edge-pumped microchip composite Yb:Y<sub>3</sub>A<sub>15</sub>O<sub>12</sub> laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(20): 4086-4088.
- [12] Zhang Kuo, Chen Fei, Li Ruolan, et al. Analysis on thermal performance of output window in high power CO<sub>2</sub> laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205005.
- [13] Lan Shuo, Li Xinnan, Wu Chunfeng, et al. Analysis on thermal performance of fast steering mirror irradiated by high power CW laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1020003. (in Chinese)
- [14] Brown D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(12): 2383-2392.
- [15] Sun Ziwen. Establishment and application of multi-parameter strength theory for brittle materials [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017: 1-2. (in Chinese)
- [16] Li Shixia. Investigation on the thermal effect and (ultra) short pulse laser performance of concentration gradient composite [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 47-48. (in Chinese)