

# 激光二极管叠阵单侧抽运 Nd:YAG 陶瓷 聚光腔的聚光特性

刘畅<sup>1,2,3</sup>, 余锦<sup>1,2,3,4</sup>, 樊仲维<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>国家半导体泵浦激光工程技术研究中心, 北京 100094;

<sup>4</sup>中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304

**摘要** 针对固体激光增益模块紧凑化、简单化的设计需求,建立了激光二极管(LD)叠阵单侧抽运 Nd:YAG 晶体棒的模型,并利用 TracePro 软件对陶瓷聚光腔内 Nd:YAG 晶体棒抽运光的吸收情况进行了数值模拟。分析了聚光腔形状、晶体棒半径和 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度及其他影响因素对聚光效率和增益分布均匀性的影响。研究表明,聚光效率随聚光腔横截面积近似呈线性变化, Nd<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 0.5%、半径为 2 mm 的 Nd:YAG 晶体棒可以实现光斑半径约为 1.0 mm 的近基模振荡输出;晶体棒均匀抽运区域半径与 U 型聚光腔半径的比值约为 0.5 时,抽运光吸收较为均匀。LD 叠阵单侧抽运 Nd:YAG 晶体的抽运结构可以获得 65% 的聚光效率,增益分布均匀性优于 0.65。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 激光二极管叠阵; 侧面抽运; 聚光腔; 抽运模块

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0301001

## Light Collecting Characteristics of Nd:YAG Ceramic Condenser Chamber Unilaterally Pumped by Laser Stacked Array

Liu Chang<sup>1,2,3</sup>, Yu Jin<sup>1,2,3,4</sup>, Fan Zhongwei<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>National Engineering Research Center for DPSSL, Beijing 10009, China;

<sup>4</sup>HarGlo Applied Laser Technology Institute Company, Ltd., Tianjin 300304, China

**Abstract** For the requirements of compact and simplified solid laser gain module structure design, a model of Nd:YAG crystal rod unilaterally pumped by laser diode (LD) stacked array is built. The absorbed light distribution within the Nd:YAG crystal rod in ceramic condenser chamber is simulated with the TracePro software. The influences of condenser chamber's shape, crystal rod's radius and doping concentration of Nd<sup>3+</sup> on the light collecting efficiency and the gain distribution uniformity are studied. The research shows that the light collecting efficiency changes approximately linearly with the cross-sectional area of the condenser chamber. A Nd:YAG crystal rod with radius of 2 mm and Nd<sup>3+</sup> doping concentration of 0.5% (atom fraction) can obtain near fundamental mode oscillation output with 1.0 mm spot radius. The distribution of absorbed pumping light is more uniform when the ratio of the uniform pumping area radius of crystal rod to the U-shape condenser chamber radius is about 0.5. With the discussed structure, the light collecting efficiency reaches 65%, while the gain distribution uniformity is better than 0.65 in the LD stacked array unilaterally pumped Nd:YAG crystal structure.

**Key words** lasers; all-solid-state laser; laser diode stacked array; side-pumping; condenser chamber; pumped module

**OCIS codes** 140.3580; 140.5560; 140.3290

收稿日期: 2016-09-02; 收到修改稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2014DFR50600)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)

作者简介: 刘畅(1992—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: 1141611698@qq.com

导师简介: 余锦(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: jinyu@aoe.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

为了使固体激光光源满足便携、星载、机载等特点以及可应用于体积、功耗受限的场合的要求,人们对结构简单、易于维护的激光增益模块的需求日益增加<sup>[1]</sup>。激光二极管(LD)阵列抽运的固体激光器(DPSSL)以其高效率、结构紧凑、稳定可靠、长寿命和全固化等优点成为了固体激光器领域的主要发展方向之一<sup>[2-3]</sup>。相对于普通的闪光灯、太阳能等抽运源,LD 出射光束的光谱能与固体工作介质的吸收光谱很好地匹配,可以使抽运效率大幅提高。就抽运模块的设计而言,闪光灯抽运模块的椭圆型聚光腔结构是利用椭圆的共轭焦点来获得相对均匀的抽运分布,光光转换效率一般不大于 20%<sup>[4-5]</sup>;太阳能抽运模块则采用抛物线柱型、尖柱型腔等结构,利用会聚形状的集聚特点来实现对晶体棒的均匀抽运<sup>[6-7]</sup>。通过良好的设计,这两种抽运模块都可以得到比较均匀的增益分布,但是受抽运腔电光转换效率、体积结构的限制,它们在小型化激光器领域方面的应用受到了一定的影响。

功率输出较大的全固态抽运激光器常采用侧面抽运的工作方式。由于 LD 输出具有较强的方向性,在 LD 阵列侧面抽运结构的设计过程中,通常需要增加环绕增益介质的 LD 维数来获得均匀的光场分布。Kashef 等<sup>[8]</sup>采用三维 LD 抽运 Nd:YAG 晶体的抽运结构,获得了斜效率为 35%、光场分布较为均匀的多横模激光输出。杨晓东等<sup>[9]</sup>将紧密环绕的五维 LD 阵列嵌入热沉并直接环绕抽运 Nd:YAG 的侧面抽运结构,使得模块的理论聚光效率约为 87%,增益均匀性值约为 0.78。不同于多维 LD 环绕增益介质的抽运结构, Lee 等<sup>[10]</sup>设计出了一种单侧 LD 阵列抽运结构,光光转换效率为 12%,该研究表明在结构简单的一维单侧 LD 抽运情况下,需要合理设计聚光腔结构及相关参数,才能获得高效、高光束质量的激光输出。

针对一维单侧抽运 Nd:YAG 晶体的抽运结构,本文提出用 LD 叠阵作为抽运源来提高聚光效率,采用传导冷却系统在类热容的模式状态下工作,结合太阳能抽运的聚光腔设计结构、闪光灯抽运漫反射陶瓷腔的优异性能,提高晶体棒内增益分布均匀性。利用光线追迹方法对抽运结构进行计算,通过分析 LD 侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒的抽运规律,考察抽运结构的聚光效率及增益分布均匀性,研究晶体棒直径、Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对聚光效率及增益分布均匀性的影响。

## 2 LD 叠阵单侧抽运 Nd:YAG 陶瓷聚光腔模型

典型叠阵抽运 Nd:YAG 晶体的椭圆型及 U 型聚光腔结构设计如图1(a)、(b)所示。图中 1 为激光增益介质 Nd:YAG;2 为掺锶(Sr)的石英套管,能降低晶体棒向聚光腔辐射的光对 LD 叠阵造成的损伤;3 为 10 条巴条组成的 LD 叠阵;4 为漫反射陶瓷聚光腔。椭圆型聚光腔的长轴为  $a$ ,短轴为  $b$ ;U 型聚光腔中平行于  $y$  轴方向的半径为  $R_1$ ,平行于  $x$  轴方向的半径为  $R_2$ 。

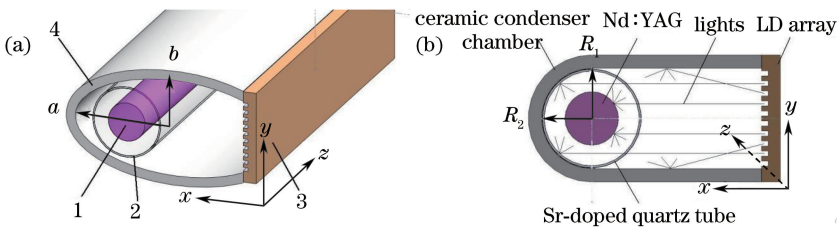


图 1 陶瓷聚光腔结构示意图。(a)椭圆型聚光腔模型;(b)U 型聚光腔模型

Fig. 1 Diagram of ceramic condenser chamber structures. (a) Elliptical condenser chamber model; (b) U-shape condenser chamber model

考虑到均匀散热与叠阵封装需求,计算中设定 10 条 LD 巴条组成的叠阵沿晶体棒轴向等距排布。在最大限度与聚光腔实际情况相符的条件下,为了方便建模计算和大量的数据处理,建模时作了如下假设。

LD 叠阵中众多二极管发光点呈阵列排布,设计叠阵尺寸为  $7.5\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ,定义沿叠阵发光的法线方向为  $x$  轴,叠阵所在平行于纸面的方向为  $y$  轴,垂直纸面向里的方向为  $z$  轴的正向。每个发光点沿  $y \times z$  轴出射发散角为  $36^\circ \times 10^\circ$  的高斯光束,众多发光点等间距均匀分布在叠阵中;当光线从抽运 LD 发出后,仅有少部分能量会由于反射、散射而返回到出射叠阵面,由于这部分能量较少,对叠阵的影响较小,在模型中忽略这部分辐射对 LD 叠阵的影响;对于进入激光晶体的光线,认为其在激光增益介质内的传播遵循比尔定

律<sup>[11]</sup>;椭圆柱型聚光腔设计为陶瓷漫反射聚光腔,光线在聚光腔内的双向反射分布函数值  $f_{\text{BRDF}}$  设计为 0.986<sup>[12]</sup>;Nd:YAG 表面的粗糙程度  $f_{\text{BRDF}}$  设计为 0.700。

将 CAD 软件绘制的示意图导入 TracePro 软件中,进行属性设置,设置参数如表 1 所示。Nd:YAG 晶体的吸收系数为  $0.374 \text{ mm}^{-1}$ ,Nd<sup>3+</sup> 的掺杂原子数分数为 0.5%。

表 1 抽运腔内的主要设置参数

Table 1 Major parameters of pumping chamber

	Absorptance	Reflectance	Transmittance	$f_{\text{BRDF}}$
Inner surface of chamber	0.001	0.013	0.00	0.986
Sr <sup>2+</sup> -doped quartz tube	0.001	0.080	0.91	0.009
Surface of Nd:YAG	0.000	0.000	0.30	0.700

在利用 TracePro 软件模拟 LD 叠阵的过程中,由于 LD 中每个点源的小发光面占整个叠阵总面积的比例比较小(0.1%),每个点源相干体积占比为 0.22%,且相干光在晶体棒漫反射表面的相位随机改变,使得进入晶体棒中的光线可以忽略抽运源的相干性影响。在光线追迹过程中,设置的光线数量越多,结果越接近真实情况。多次仿真结果表明,追迹  $4 \times 10^6$  条光线已足够满足运用需求(仿真结果已经收敛),且在计算机上的运行时间适中,未造成内存溢出。

LD 叠阵发出的辐射传递到晶体棒内部的效率很大程度上决定了激光器的总效率,聚光腔的设计不仅为晶体棒和光源提供了一个良好的耦合媒介,还决定着晶体棒内部的增益分布,影响了最终输出激光的光束质量。通过 TracePro 软件可计算得到棒内光通量与发射光通量之比,即经过聚光腔的漫反射光线进入晶体棒内的光通量与叠阵发射的光通量之比,也就是聚光腔的聚光效率。

类似于闪光灯抽运的情况,定义从抽运源到 Nd:YAG 晶体棒的聚光效率近似为<sup>[13-14]</sup>

$$\eta_c = \eta_{\text{ge}} \times \eta_{\text{op}}, \quad (1)$$

式中  $\eta_{\text{ge}}$  为聚光腔的几何传递系数,是表面无损状态下光源直射和腔壁反射进入晶体棒的百分比; $\eta_{\text{op}}$  为聚光腔的光学效率,可以表示为

$$\eta_{\text{op}} = r_w(1 - r_r)(1 - \beta)(1 - f), \quad (2)$$

式中  $r_w$  为腔壁的反射率; $r_r$  为晶体棒表面用于抑制放大自发辐射(ASE)效应的粗糙表面的反射损耗; $\beta$  为掺锶石英管组件的吸收损耗; $f$  为聚光腔非反射面的面积与总内表面的面积之比,是由非闭合聚光腔的开口引起的损耗。

为了定量分析模块的结构参数对吸收抽运光分布均匀性的影响,引入了定量表征吸收抽运光分布均匀性的参量——吸收抽运光分布偏差均方根相对值  $C_{\text{RAM}}$ <sup>[15]</sup>,其定义为

$$C_{\text{RAM}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=m} \sum_{j=0}^{j=n} (x_{i,j} - \bar{x})^2}{mn}}. \quad (3)$$

对晶体棒横截面进行等面积分割,共获得  $m \times n$  个面元,式中  $(i, j)$  代表晶体棒横截面内  $x$  方向的第  $i$  个、 $y$  方向的第  $j$  个面元, $m \times n$  为激光棒圆形横截面在  $xy$  平面内切分的小面元的总数, $x_{i,j}$  为 Nd:YAG 棒横截面内面元  $(i, j)$  吸收的总光功率, $\bar{x}$  为圆形横截面内吸收功率的平均值。由(3)式可以看出,用来表征吸收抽运光分布均匀性的  $C_{\text{RAM}}$  值具有以下特性:

- 1) 抽运功率一定时, $C_{\text{RAM}}$  值的大小可以定量表征激光棒内吸收抽运光分布的均匀性, $C_{\text{RAM}}$  越小,表示增益分布越均匀;
- 2)  $C_{\text{RAM}}$  值不受抽运功率变化的影响,可以客观表征不同抽运功率条件下激光棒内抽运光分布的均匀性。

### 3 抽运特性的数值模拟与分析

#### 3.1 椭圆型聚光腔的聚光效率分析

由于在聚光效率的设计过程中涉及的参数比较多(椭圆型腔的长短轴比例,激光晶体的位置、尺寸、掺杂浓度等),仅对常用半径为 2 mm、Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5%(原子数分数)的 Nd:YAG 棒状增益介质进行数值模拟。假设模拟过程中叠阵控温良好、叠阵发射的波长恒定、聚光腔不因吸收辐射能量而产生性能和结构变

化。表 2 为计算过程中涉及的几种椭圆型腔的结构参数。其中, E 代表椭圆腔型, E 后跟随的数字分别代表椭圆的短轴  $b$  及长轴  $a$  的值(单位为 mm)。

表 2 椭圆型聚光腔的结构参数

Table 2 Structure parameters of elliptical condenser chamber

$a$ /mm	$b$ /mm	Chamber area /mm <sup>2</sup>	$a/b$	Chamber structure
11	5	150.3169	2.22	E-5-11
9	6	159.2229	1.49	E-6-9
9	7	190.7126	1.29	E-7-9
11	6	194.4959	1.83	E-6-11
10	8	245.4178	1.25	E-8-10
9	9	246.1295	1.00	E-9-9

计算过程中通过对  $4 \times 10^6$  条光线进行追迹, 得到图 2 所示的椭圆型聚光腔中晶体棒到光源的距离对聚光效率的影响曲线。以叠阵发光面为基准, 叠阵所在位置  $x=0$ , 受椭圆型聚光腔几何结构的限制, 晶体棒在椭圆型聚光腔内的运动路径从发光面  $x=0$  算起,  $4 \text{ mm} < d < 18 \text{ mm}$ ,  $d$  为晶体棒到光源的距离。当晶体棒在靠近光源的位置上时, 抽运光源能量能够直接紧密耦合进入晶体棒, 此时聚光效率较高; 当晶体棒远离光源的一端时, 由于椭圆型聚光腔特有的共轭焦点结构, 即椭圆焦点发出的光经椭圆反射后必相交于另一共轭焦点, 在共轭焦点附近亦存在一个聚光效率极大的位置。在椭圆型聚光腔的中心位置处, 由于这个位置距离光源并不近, 且远远偏离共轭焦点, 晶体棒在这个位置附近的聚光效率较低, 此处的聚光效率受聚光腔结构的影响较小。

观察不同横截面积的椭圆型聚光腔, 比较聚光效率最低处的效率数值, 从图 3 可以看到, 聚光效率  $\epsilon$  与聚光腔横截面积  $S$  近似满足

$$\epsilon = -0.001451613S + 1.07225808, \quad 80 \text{ mm}^2 < S < 400 \text{ mm}^2. \quad (4)$$

横截面积较小的椭圆型聚光腔具有较高的抽运能量密度, 因此, 横截面积越小椭圆型聚光腔的聚光效率越高。当聚光腔横截面积  $S$  变小时, 聚光腔的椭圆结构对聚光效率的影响增大, 不受结构影响的效率最低点消失, 此时会使聚光效率偏离近似线性关系[(4)式]。

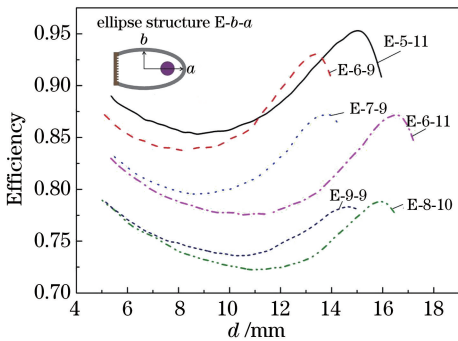


图 2 椭圆型聚光腔中 Nd:YAG 晶体棒到 LD 的距离  $d$  对聚光效率的影响

Fig. 2 Influence of distance from Nd:YAG crystal rod to LD on light collecting efficiency in elliptical condenser chamber

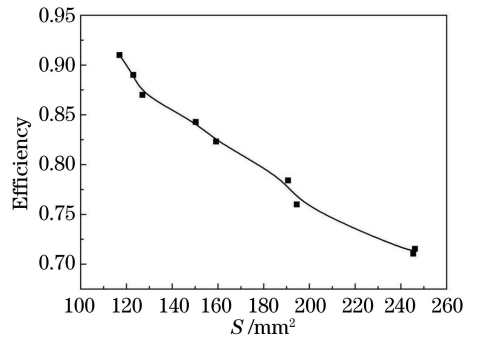


图 3 椭圆型聚光腔横截面积  $S$  对聚光效率的影响

Fig. 3 Influence of cross-sectional area of elliptical condenser chamber on light collecting efficiency

比较横截面积相近的三组椭圆型聚光腔, 即 E-5-11 和 E-6-9; E-7-9 和 E-6-11; E-8-10 和 E-9-9。相近横截面积的椭圆型聚光腔聚光效率的最大值趋近, 长短轴之比  $a/b$  的变化会影响聚光效率的峰值位置, 这是由于不同椭圆度的腔型具有不同的会聚能力, 长短轴之比越大, 椭圆腔的会聚能力越强, 聚光效率的绝对值越大。

此外, 当晶体棒沿  $x$  轴运动时, 在同一聚光腔内, 靠近叠阵光源和靠近椭圆型聚光腔弧形结构处的聚光效率较高。在靠近椭圆型聚光腔弧形结构一端, 受单侧抛物线型会聚特性的影响, 抽运光在弧形结构处存在能量会聚的极大值, 偏离此处的聚光效率逐渐降低。在靠近叠阵光源的一端, LD 叠阵直接耦合进入晶体

棒,聚光效率较高。聚光腔中心位置处的聚光效率较低,聚光效率曲线整体呈 s 型分布。

### 3.2 U 型聚光腔的聚光效率分析

从 3.1 节了解到,对于椭圆型聚光腔,横截面积越小,聚光腔的聚光效率越高,因此,应选取对聚光效率影响更大、横截面积更紧凑的 U 型聚光腔。图 4 为 U 型聚光腔内晶体棒的抽运情况,可见,U 型聚光腔聚光效率的变化分布与椭圆型聚光腔聚光效率的变化分布相似,聚光效率最低处仍近似满足(4)式。在靠近及远离光源的一端聚光效率较高,在聚光腔中心位置处的聚光效率较低,靠近 U 型聚光腔弧形面的一端,限于 U 型聚光腔的几何结构,存在一个类焦点的位置,此处的聚光效率达到了极大值,偏离这个位置时聚光效率降低。图 5 为 U-3.75-3.75 型聚光腔内 LD 与晶体棒的相对位置发生变化时聚光效率的变化情况。图中实线代表晶体棒在 U 型聚光腔内的位置移动对聚光效率的影响,虚线代表 LD 叠阵的相对位置移动对聚光效率的影响。从图 5 可以看出,LD 在腔内的位置变化使晶体棒的聚光效率呈线性变化,晶体棒在腔内的移动受聚光腔结构的影响,聚光效率呈 s 型变化。尽管靠近光源的高聚光效率是由于 LD 输出光能量直接紧密耦合进入晶体棒所致,但是这使得晶体棒的单侧吸收功率过高,导致输出增益分布不均,而 U 型聚光腔的弧形聚光结构使晶体棒一方面吸收来自 LD 的能量,另一方面也吸收来自半圆形腔反射回晶体棒的能量,使晶体棒内部的光场分布均匀性改善,为此需要寻找一个平衡位置,以实现高效均匀的增益抽运。

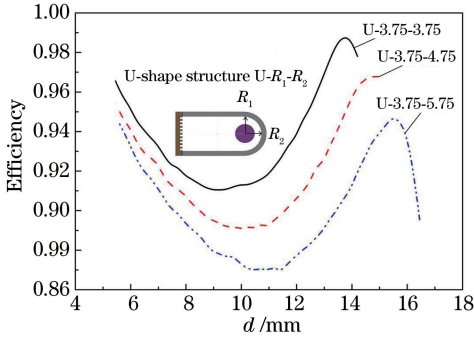


图 4 U 型聚光腔内 Nd:YAG 晶体棒到 LD 的距离  $d$  对聚光效率的影响

Fig. 4 Influence of distance from Nd:YAG crystal rod to LD on light collecting efficiency in U-shape condenser chamber

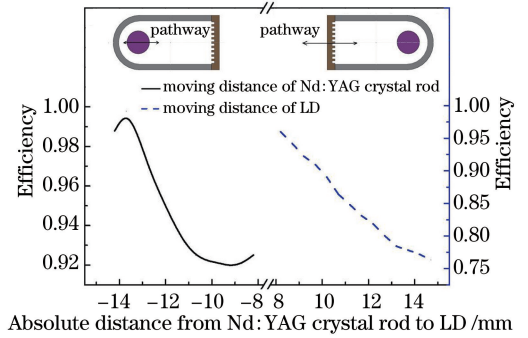


图 5 U 型聚光腔内 Nd:YAG 晶体棒与 LD 的距离对聚光效率影响

Fig. 5 Influence of distance between Nd:YAG crystal rod and LD on light collecting efficiency in U-shape condenser chamber

### 3.3 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对光场均匀性及聚光效率的影响

在常用激光介质的选择上,需要根据实际需求选择合适的掺杂浓度。Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度不同,介质的吸收系数也不相同。表 3 为掺杂浓度(原子数分数,下同)与晶体吸收系数  $\alpha$  之间的关系<sup>[16]</sup>。

表 3 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度与晶体吸收系数的关系

Table 3 Relationship between Nd<sup>3+</sup> doping concentration and crystal absorption coefficient

Doping concentration of Nd <sup>3+</sup> /% (atom fraction)	0.3	0.5	0.7	1.0
$\alpha / \text{mm}^{-1}$	0.227	0.374	0.521	0.742

针对 U-3.75-3.75 单侧 LD 叠阵抽运的聚光腔,选取晶体棒直径为 4 mm, Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度分别为 0.3%、0.5%、0.7%、1.0%,同时考虑晶体棒外掺铈的石英套管对增益分布均匀性造成的影响,利用 TracePro 软件进行光线追迹计算,得到如图 6 所示的二维增益分布和聚光效率变化图。

由图 6 可以看出,当工作物质的吸收系数较小时,以 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度为 0.3% 为例,晶体棒在 U 型端产生一个吸收能量尖峰,增益均匀分布值  $C_{\text{RAM}}=0.87$ ,增益分布很不均匀。当 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5% 和 0.7% 时,晶体棒中心的能量分布高于边缘部分,横截面分布近似呈高斯分布,这种情况有利于基模振荡,但这种非均匀热沉积会引入像差较大的热透镜效应,从而对激光的转换效率和光束质量产生一定的影响。在掺杂浓度较大时,即 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度为 1.0% 时,晶体棒内部增益分布较为均匀。这是由于在晶体棒掺杂浓度较大时,晶体棒的吸收系数较大,进入晶体棒内的光线在晶体棒表面吸收的能量较多,光线在晶体棒内的增益分布趋于均匀;在晶体棒掺杂浓度较低时,光线更易穿透晶体棒而不易被吸收利用;晶体棒掺杂浓度适中时,受

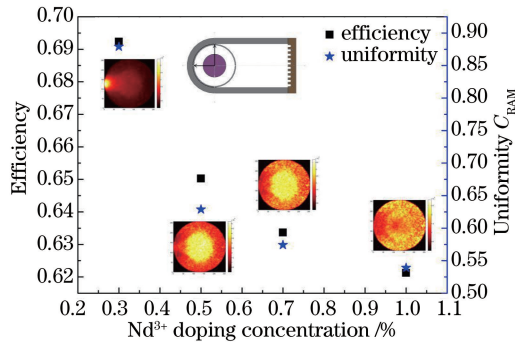


图 6 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对光场分布均匀性及聚光效率的影响

Fig. 6 Variations in light field distribution uniformity and light collecting efficiency with Nd<sup>3+</sup> doping concentration

晶体棒半圆型会聚光线能力的影响,晶体棒中心吸收的能量更为集中,增益呈近高斯分布。因此,可以根据实际需要,选用掺杂浓度适当的晶体来获得基横模或者多横模激光输出。

### 3.4 Nd:YAG 半径对光场均匀性及聚光效率的影响

在相同吸收系数的条件下,选取 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5% 的晶体棒,研究不同晶体棒半径与 U 型聚光腔半径之比对聚光效率和光场均匀性的影响。由于不同半径的晶体棒对光强的吸收不同,晶体棒越粗,表示光线在晶体棒内走过的路程越长,晶体棒对光线的吸收越充分;晶体棒的半径越小,在相同的 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度条件下,光线通过晶体棒时被吸收的能量越少。在设计抽运模块时,需要对聚光效率和增益分布均匀性进行综合考虑,选择适当半径的增益介质可以获得分布较好的增益。图 7 为不同半径晶体棒的增益分布和聚光效率。

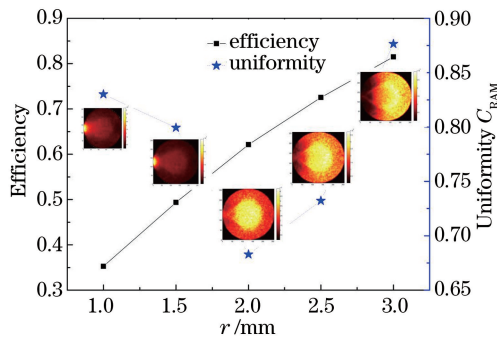


图 7 晶体棒半径  $r$  对光场分布均匀性及聚光效率的影响

Fig. 7 Variations in light field distribution uniformity and light collecting efficiency with crystal rod radius

由图 7 可以看到,随着晶体棒半径的增加,即晶体棒半径与 U 型聚光腔半径的比值增大,横截面内增益分布的均匀性由  $r=1$  mm 时的分布不均匀到  $r=2$  mm 时分布较为均匀,再到  $r=3$  mm 时分布再度不均匀。在 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5% 的条件下, $r=2$  mm 时获得高斯形态的增益分布。这是因为在 0.5% 掺杂浓度条件下,与  $r=1$  mm 和  $r=3$  mm 时的吸收能量相比, $r=2$  mm 时光线既没有因为晶体棒半径过小迅速穿过晶体棒而未被充分吸收,又不会因为晶体棒半径过大而在边沿处就将能量吸收完全,因此, $r=2$  mm 时的吸收能量适中。在激光器抽运模块的设计过程中,不同的横模占据晶体棒的不同增益区域,因此不均匀的抽运使每个横模的增益不同。为获得光束质量较好的基模输出,需要尽量减少振荡模式的数量,增大基横模的体积。通常基横模振荡区的直径为 1.1~1.3 mm<sup>[17]</sup>,因此可以通过合理设计晶体棒的直径以及 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度使晶体棒中心的增益强度略高,近似呈高斯形状,以获得基横模输出的激光光束。

综上所述,聚光腔型、Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度、晶体棒的直径对聚光效率和光场分布均匀性的影响各不相同,在设计抽运模块的过程中需要综合考虑,根据需要选取最佳的参数值。

## 4 结 论

结合太阳能抽运的聚光腔形式、闪光灯抽运陶瓷漫反射聚光腔结构和 LD 阵列的高匹配发射光谱,构建

了LD叠阵单侧抽运模型。运用TracePro软件进行建模,在单侧LD叠阵抽运的条件下,研究聚光腔横截面积、Nd<sup>3+</sup>掺杂浓度、晶体棒半径对增益介质内抽运光场分布均匀性及聚光效率的影响,分析了聚光腔横截面积与聚光效率的关系。对比了多种LD侧面抽运结构,利用LD叠阵单侧抽运结构同样可以获得较高的聚光效率及较好的增益分布均匀性。在U-3.75-3.75腔型的LD叠阵单侧面抽运结构中,选取Nd<sup>3+</sup>掺杂浓度为0.5%、晶体棒半径为2 mm时,聚光效率为65%,增益分布均匀性C<sub>RAM</sub>为0.65,并且该结构的聚光效率高于闪光灯抽运结构的聚光效率。该研究为LD激光单侧抽运模块的优化设计和实验研究提供了理论参考,在实践中可以依据具体的技术需求来合理设计变化参量。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Junyan, Yang Chuncai, Ma Han, *et al.* Bottleneck of high-energy solid-state laser for practical application in the US army[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 381-386.  
陈军燕, 杨春才, 马 寒, 等. 美军高能固体激光武器实战化的技术瓶颈[J]. *激光与红外*, 2016, 46(4): 381-386.
- [2] Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1605-1618.  
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [3] Byer R L. Diode laser pumped solid-state lasers[J]. *Science*, 1988, 239(4841): 742-747.
- [4] Luo Yiming, Liu Jianguo, Chen Lin, *et al.* Study on energy-storage efficiency of xenon flash-lamp pumped Nd:glass amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(S0): 39-45.  
罗亦鸣, 刘建国, 陈 林, 等. 氙灯泵浦玻璃放大器储能效率研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(S0): 39-45.
- [5] Liu Xuesheng, Xia Jiaozhen, Yan Xin, *et al.* High peak power lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser with one cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1313-1317.  
刘学胜, 夏皎贞, 鄢 歆, 等. 单级静态高峰值功率灯抽运脉冲Nd:YAG固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1313-1317.
- [6] Vistas C R, Liang D, Almeida J, *et al.* TEM 00 mode Nd:YAG solar laser by side-pumping a grooved rod[J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 50-56.
- [7] Liang D, Almeida J, Guillot E. Side-pumped continuous-wave Cr:Nd:YAG ceramic solar laser[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(2): 305-311.
- [8] Kashef T, Ghoniemy S, Mokhtar A. Robust modeling and performance analysis of high-power diode side-pumped solid-state laser systems[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(36): 10666-10677.
- [9] Yang Xiaodong, Bo Yong, Peng Qinjun, *et al.* Highly efficient laser diode side-pumped Nd:YAG module[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1337-1340.  
杨晓冬, 薄 勇, 彭钦军, 等. 高效激光二极管侧面抽运Nd:YAG模块[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1337-1340.
- [10] Lee K, Lee H C, Cho J Y, *et al.* Passively Q-switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2053-2057.
- [11] Zhang Hua, Xu Shixiang, Fan Dianyuan. Pumping energy distribution in rod amplifier calculated with the Monte-Carlo method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12): 1601-1608.  
张 华, 徐世祥, 范滇元. 用蒙特卡罗方法计算棒状放大器内的泵浦能量分布[J]. *光学学报*, 1997, 17(12): 1601-1608.
- [12] Zhang Hongbo, Peng Jianzhong, Zheng Yuanshan. Manufacturing ceramic pumping cavity with high diffuse reflectivity [J]. *Vacuum Electronics*, 2004(4): 17-19.  
张洪波, 彭建中, 郑元善. 漫反射陶瓷聚光腔的研制[J]. *真空电子技术*, 2004(4): 17-19.
- [13] Pei Na. The research on multi-flashlamp and multiple laser-rod compact laser pump cavity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.  
裴 娜. 紧凑型多灯多棒激光聚光腔的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [14] Du D, Liu X, Korn G, *et al.* Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(23): 3071-3073.
- [15] Deng Qinghua, Ding Lei, He Shaobo, *et al.* Evaluating specifications on coupled pump distribution in LDA side-pumped rod gain medium[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1176-1181.  
邓青华, 丁 磊, 贺少勃, 等. 激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质抽运储能分布的评价方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1176-1181.
- [16] Mao Y L, Deng P Z, Zhang Y H, *et al.* High efficient laser operation of the high-doped Nd:YAG crystal grown by temperature gradient technology[J]. *Chinese Physics Letters*, 2002, 19(9): 1293-1295.
- [17] Murdough M P, Denman C A. Mode-volume and pump-power limitations in injection-locked TEM (00) Nd:YAG rod lasers[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(30): 5925-5936.