

## 高功率棒状固体激光放大器输入激光光束变换研究

杨晓冬<sup>1</sup> 林进彬<sup>1</sup> 侯新华<sup>2</sup><sup>1</sup>嘉应学院物理与光信息科技学院, 广东 梅州 514015<sup>2</sup>嘉应学院数学学院, 广东 梅州 514015

**摘要** 提出了研究入射高斯光束在固体激光放大器激光棒内光斑半径分布及准确计算棒内模体积的新方法。利用该方法研究了热透镜效应、入射高斯光束束腰半径及衍射倍率因子3个因素对入射光束沿放大器激光棒的光斑半径分布及模体积的影响。研究表明,对于高功率固体激光放大器,当输入激光棒发散角较小的准直光束时,由于棒内强烈的热透镜效应,光束向激光棒中轴线产生较大的偏折,从而使入射光束在激光棒内模体积减小,入射光束与抽运能量的重叠效率下降。而采用发散角较大的入射光束,由于光束自身的发散可抵消较强的热透镜效应对光束的偏折,从而在激光棒内可获得较大的入射光束模体积及重叠效率。另外对于多模入射激光束,由于其发散角较大,应采用较大束腰半径的光束入射。

**关键词** 激光器;固体激光放大器;热透镜效应;模体积

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP50.031404

## Investigations on Transform of Laser Beam Inputting to the Laser Rod of High-Power Solid-State Laser Amplifier

Yang Xiaodong<sup>1</sup> Lin Jinbin<sup>1</sup> Hou Xinhua<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Physics and Optical Information Sciences, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China<sup>2</sup> School of Mathematics, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China

**Abstract** A new method for calculating the beam radius distribution of the input Gaussian beam and the laser mode volume in the laser rod of a solid-state laser amplifier is reported. By this method, we investigate how the strong thermal lens effects in the rod of amplifier and the waist radius and mode of the laser beam inputting to the rod of amplifier influence the input laser beam distributions and input beam mode volume in the rod of amplifier. It is shows that the expanded and collimated laser beam inputting to the rod of amplifier will be strongly reflected to the axis of the rod by the strong thermal lens effects in the rod, because the small far-field divergence angle of the collimated input laser beam results in the significant decrease of the mode volume of input laser beam and the overlap efficiency of amplifier drops. It can obviously increase the mode volume of input laser beam in the rod of the amplifier to input the laser beam with larger angle, which can counteract the reflecting effects on the input laser beam. Moreover, the beam waist radius of the multi-mode laser beam inputting to the amplifier should be larger than that of the fundamental-mode input laser beam, since its far-field divergence angle is larger than that of the fundamental-mode laser beam with the same beam waist radius.

**Key words** lasers; solid-state laser amplifier; thermal lens effect; mode volume

**OCIS codes** 140.3280; 140.3580; 140.3300

## 1 引言

固体激光放大器是获得高功率、高光束质量激光输出的有效途径<sup>[1~3]</sup>。目前固体激光放大器中常用激光介质形状为板条状与棒状,其中棒状激光介质具有价格低廉、结构简单以及可实现高功率激光输出等特性,被广泛使用在工业、科研等领域。为了从高功率固体放大器的激光棒内提取更多的能量,输入激光棒的

**收稿日期:** 2012-12-13; **收到修改稿日期:** 2013-12-18; **网络出版日期:** 2013-01-31

**基金项目:** 广东省自然科学基金(8451401501000668)资助课题。

**作者简介:** 杨晓冬(1968—)男,博士,教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: xjyxd@126.com

激光束在激光棒内应具有较大的模体积,从而使得输入激光束与激光棒内的抽运能量有较好的重叠<sup>[4]</sup>。为达到这一要求,通常做法是对输入放大器的激光束进行扩束与准直,以使输入光束光斑半径与激光棒口径相匹配。由于高功率固体激光放大器的激光棒直径相对较大,所以准直后的入射光束腰半径通常也较大,光束发散角较小。当这种光束输入抽运功率较低的放大器中时,由于激光棒热效应较弱,热透镜效应对棒内光束偏折较弱,激光束能够在激光棒内较为平直地传播,在激光棒内具有较大的模体积;但当激光棒内抽运功率较高时,激光棒内较强的热透镜效应对入射光束具有连续的偏折作用<sup>[5]</sup>,使沿激光棒纵向传播的激光束向激光棒轴线发生较大偏折,将可能使激光棒内激光束模体积显著降低。因此,有必要对如何变换入射光束以提高激光棒内入射激光束的模体积及重叠效率这一问题进行研究。由于目前所使用的厚透镜模型无法详细研究放大器激光棒内的入射激光束的分布,因此无法对上述问题进行研究。

本文提出了研究高功率棒状固体激光放大器内光束分布及光束模体积的新方法,在此基础上,对高功率棒状固体激光放大器入射激光束的变换问题进行了研究。

## 2 棒状固体激光放大器内光束分布研究方法

图 1(a)为激光束入射进入放大器激光棒示意图。设抽运能量均匀分布于激光棒内,激光棒长度为  $L$ 。设入射单模高斯激光束的束腰半径为  $w_0$ ,束腰与激光棒间距离为  $R$ 。将激光棒等效为单一厚透镜,被抽运的激光棒的热焦距为<sup>[6,7]</sup>

$$f = \frac{KA}{P_h} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,g} n_0^3 + \alpha r (n_0 - 1) \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中  $P_h$  为激光棒内产生的总热量。从(1)式可以看出,激光棒的热焦距与激光棒总抽运功率成反比,与激光棒长度无关。为研究激光棒内入射激光束的分布,如图 1(b)所示,将激光棒沿轴向向细密、均匀地分成  $N$  等份,

$N$  等份中的每一小段激光棒均可看作小热透镜,相邻两小热透镜间距为  $l = \frac{L}{N}$ 。设每一小热透镜热焦距为  $f$ ,整个激光棒的热焦距为  $f/N$ 。从束腰传至第  $i$  个小热透镜的传输矩阵为

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \right\}^{i-1} \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

入射高斯激光束束腰处  $q$  参数为<sup>[8]</sup>

$$q_0 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (3)$$

第  $i$  个小热透镜处入射光束的  $q$  参数可表示为

$$q_i = \frac{A_i q + B_i}{C_i q + D_i}, \quad (4)$$

第  $i$  个小热透镜处入射光束的光斑半径可表示为

$$w_i = \left[ \frac{-\pi}{\lambda} \text{Im} \left( \frac{1}{q_i} \right) \right]^{-0.5}. \quad (5)$$

由(2)~(5)式可计算沿激光棒各小透镜上的光斑半径,进而可获得入射光束沿激光棒光斑半径分布。基于以上计算结果,入射单模高斯激光束在放大器激光棒内的模体积可表示为

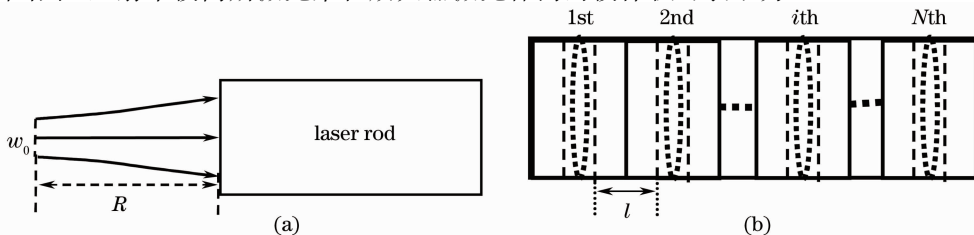


图 1 (a) 光束入射固体激光放大器激光棒示意图;(b)  $N$  等份激光棒示意图

Fig. 1 (a) Schematic of the laser beam inputting to laser rod of solid state laser amplifier;

(b) dividing laser rod into  $N$  segments along the laser rod axis

$$V_{\text{rod}} = \sum_{i=1}^N \pi \omega_i^2 \cdot \frac{L}{N}. \quad (6)$$

根据(2)~(6)式,多模高斯入射激光束在激光棒内的分布及模体积可以计算出来。假设入射多模高斯激光束衍射倍率因子为  $M^2 > 1$ ,该光束束腰半径为  $\omega'_0$ ,则与该多模高斯光束相对应的单模高斯光束(可认为是与多模高斯光束从同一激光器中发射,并经过相同光学变换)束腰半径为  $\omega'_0/\sqrt{M^2}$ ,根据(2)~(6)计算该单模高斯光束沿放大器激光棒的光斑半径分布及模体积。上述多模高斯光束在放大器激光棒中的光斑半径应为与之对应的单模光束光斑半径的  $\sqrt{M^2}$  倍,模体积为单模高斯光束模体积的  $M^2$  倍<sup>[9]</sup>。

### 3 计算结果与讨论

假设放大器中的 Nd:YAG 激光棒长度为 7 cm,直径为 4 mm。入射单模高斯光束经扩束准直变换后,束腰半径为 1.8 mm,束腰距激光棒入射面距离约为 1.5 m,光束在激光棒入射面光斑半径为 1.82 mm。根据(2)~(6)式分别计算了单根激光棒热焦距为 1、0.5、2.0 m(假设激光棒抽运耦合效率为 0.8,生热率为 33%时,上述 3 种热焦距对应抽运功率分别约为 160、320、800 W)时,激光棒内光斑半径沿激光棒轴向分布,计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,由于激光棒内热透镜的作用,略微发散的单模高斯光束在放大器激光棒内传播时都会向激光棒的轴线偏折,而且热透镜效应越强(热焦距越小),光束的偏折越强,入射高斯光束在放大器激光棒中的模体积也越小,在放大器激光棒热焦距分别为 1、0.5、2.0 m 时,入射高斯光束在放大器激光棒中的模体积分别为 714、696、649 mm<sup>3</sup>。如果无热透镜效应的影响,激光束在激光棒内的模体积约为 730 mm<sup>3</sup>。激光棒热焦距为 0.2 m 时模体积比该值下降 11.1%。

减小入射光束束腰半径,增大入射光束的远场发散角,光束自身的发散可以抵消热透镜效应对入射光束的偏折作用,从而保证入射光束在放大器激光棒内有较大的模体积。为说明这一观点,根据(2)~(6)式,计算了激光棒热焦距为 0.2 m,入射光束束腰分别为 0.5、0.2、0.1、0.08 mm 时,入射高斯激光束在激光棒内的光斑半径分布,计算结果如图 3 所示。计算时,4 种光束入射到激光棒入射面的光斑半径都为 1.82 mm,此时光束束腰到激光棒入射端面的距离分别为: $\omega_0 = 0.5$  mm 时, $R = 2.58$  m; $\omega_0 = 0.2$  mm 时, $R = 1.07$  m; $\omega_0 = 0.1$  mm 时, $R = 0.69$  m; $\omega_0 = 0.08$  mm 时, $R = 0.43$  m。当束腰半径分别为  $\omega_0 = 1.8、0.5、0.2、0.1、0.08$  mm 时,入射光束模体积分别为 649、664、690、737、760 mm<sup>3</sup>。从图 3 及模体积的计算结果可以看出,随着入射光束束腰半径的减小,远场发散角增大,在激光棒内,热透镜效应对光束的偏折将会被光束自身的发散所抵消,入射光束在激光棒内的模体积也将逐步增大;当入射光束束腰分别为 0.1 mm 和 0.08 mm 时,光束半径在激光棒内会较明显地先增大、再减小,但光束在激光棒内的半径都不超过 1.9 mm。

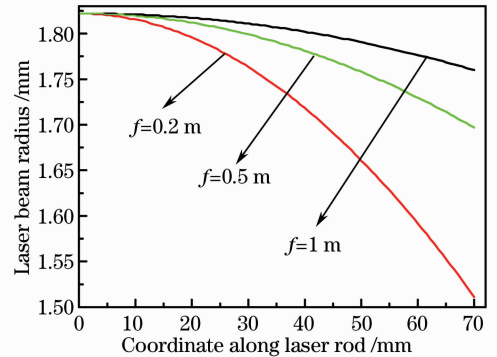


图 2 热焦距为 0.2、0.5、1 m 时,放大器激光棒内光斑半径分布

Fig. 2 Beam radius distributions in the laser rod of amplifier for thermal focusing length of 0.2, 0.5, 1 m in the rod

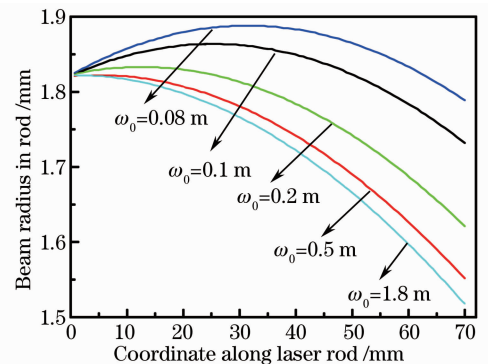


图 3 入射激光束腰半径为 1.8、0.5、0.2、0.1、0.08 mm,入射激光光斑半径在激光棒内的分布。激光棒热焦距为 0.2 m

Fig. 3 Inputting laser beam radius distributions in the laser rod of amplifier for input beam waist radius of 1.8, 0.5, 0.2, 0.1, 0.08 mm. The thermal focusing length of the laser rod 0.2 m

如果入射光束为多模高斯光束,由于在相同束腰半径下多模光束发散较大,因此输入放大器激光棒内多模光束的束腰半径应较单模光束束腰半径大。为说明以上观点,分别计算了入射光束束腰半径为  $\omega_0 = 0.2$  mm 的单模及  $M^2 = 2$  的多模入射光束在放大器激光棒内的分布,计算结果如图 4 所示。计算时,两种光束入射到激光棒端面的光斑半径都为 1.82 mm,此时所对应的  $M^2 = 2$  的多模激光束的束腰距激光棒入射面的距离为 1.29 m。计算所得单模及  $M^2 = 2$  的多模入射光束在激光棒内的模体积分别为  $690 \text{ mm}^3$  和  $736 \text{ mm}^3$ 。从以上结果可以看出,由于多模激光具有较大发散角,所以光束偏折状况较轻,光束的模体积也较大。对于束腰半径为  $\omega_0 = 0.2$  mm,  $M^2 = 2$  的多模入射光束,在激光棒内所能获得的模体积与  $\omega_0 = 0.1$  mm 的单模入射光束相当,这也说明,变换后的多模入射激光光束的束腰半径应当比单模入射激光束腰半径大。

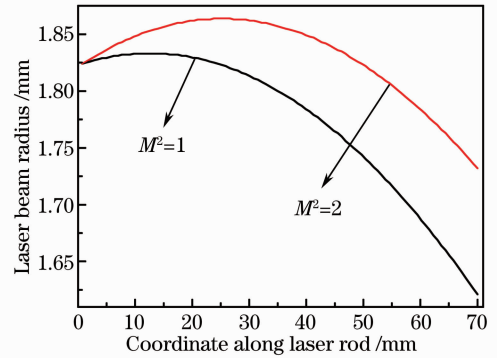


图 4 基模与  $M^2 = 2$  多模光束光斑半径在激光棒内分布  
Fig. 4 Laser beam radius distributions for fundamental mode and  $M^2 = 2$  multi-mode laser beams

## 4 结 论

研究表明,在热透镜效应的影响下,通常所采用的扩束准直变换光束,由于发散角较小,在高功率激光放大器的激光棒光束将向激光棒的轴线产生较大的偏折,在光束自身的发散和热透镜偏折的共同作用下,光束在激光棒内可较为平直地传播,从而获得较大的模体积及较高的提取效率。对于多模高斯激光束,由于其发散角较大,变换后输入光束的束腰半径应大于基模入射光束。

## 参 考 文 献

- Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong *et al.*. A pulsed master-oscillator power-amplifier Nd:YAG laser with average power of 3000 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102006  
姜梦华, 李强, 雷旬等. 平均功率 3000 W 的 MOPA 脉冲 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102006
- Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengpin *et al.*. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202001  
高清松, 胡浩, 裴正平等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202001
- Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2807~2809  
王超, 唐晓军, 徐鑫婧等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807~2809
- Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 154~155  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 154~155
- Xiaodong Yang, Aicong Geng, Jian Tan *et al.*. Investigation of the beam propagation in a pumped laser rod[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(14): 2896~2899
- W. Koechner. Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2548~2553
- X. B. Wang, X. J. Xu, X. Li *et al.*. Revising the formula of thermal focal length in a side-pumped laser rod by experiments[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5237~5240
- A. E. Siegman. *Lasers*[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986. 626~697
- Thomas F. Johnston. Beam propagation ( $M^2$ ) measurement made as easy as it gets; the four-cuts method[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4840~4850