

文章编号: 1006-4710(2015)02-0127-05

# 自聚焦透镜在全固态激光器中的应用

邢俊红, 焦明星, 刘芸

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 全固态激光器被广泛应用于光学传感、干涉测量、微波光电子等重要领域。为了分析自聚焦透镜在全固态激光器中的应用, 本文介绍了 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统组成, 利用自聚焦透镜的传输矩阵, 根据 ABCD 公式, 采用  $q$  参数, 理论分析了自聚焦透镜对 LD 泵浦光束的传输特性。建立了 LD 端面泵浦固体激光系统, 研究了泵浦光与振荡激光的模式匹配程度对激光器输出特性的影响。研究表明, 自聚焦透镜用作全固态激光器泵浦光的耦合镜, 可简化泵浦系统, 提高泵浦光的耦合效率。

**关键词:** 自聚焦透镜; LD 泵浦固体激光器; 耦合系统; 模式匹配

**中图分类号:** TN242      **文献标志码:** A

## Application of graded-index lens in all solid state lasers

XING Junhong, JIAO Mingxing, LIU Yun

(Faculty of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to analyse the application of self-focusing lens in all solid state lasers, this paper introduces LD fiber coupling end-pumped Nd:YAG laser system components. Based on ABCD formula and adopting  $q$  parameter, the transfer matrix of self-focusing lens is used to make a theoretical analysis of the impact of self-focusing lens upon the transmission behaviors of LD pumped beam of light. LD end-pumped solid laser system is established, and the effect of the pattern matching degree between the pumping laser and oscillation laser upon the behaviors of laser output is studied. The research results indicate that self-focusing lens used as the coupling lens in all solid-state lasers can not only simplify the pumping system but also improve the coupling efficiency of pumping system.

**Key words:** self-focusing lens; LD pumped solid state laser; coupling system; pattern matching

LD 泵浦固体激光器(全固态激光器)具有体积小、结构简单、转换效率高、光束质量好等优点, 被广泛应用于光学传感、绝对距离干涉测量、微波光电子和激光雷达等重要领域<sup>[1-4]</sup>, 已成为目前激光科技前沿中的重要研究方向之一。

由于 LD 输出的泵浦光与振荡激光的模式匹配程度对全固态激光器的输出功率、阈值泵浦功率和模式等均有重要影响, 因此必须引入泵浦光耦合光学系统, 使泵浦光与振荡激光的空间分布最大限度

地重叠。

常用的 LD 端面泵浦固体激光器的耦合方式有组合透镜法和自聚焦透镜法。组合透镜的装配调试复杂, 并且对透镜组的加工要求高, 成本昂贵。自聚焦透镜 GL(Graded-Index Lens)具有诸多独特的优点<sup>[5]</sup>, 如直径很小, 可使光学系统微型化; 端面通常是平面, 加工简单; 长度的改变可使其焦距和特性发生变化; 作为成像元件时, 共轭距离可以做到很短; 其像差可以通过改变材料组分及工艺来控制, 另外

收稿日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175421, 61205135); 陕西省教育厅产业化培育资助项目(2010JC12)。

作者简介: 邢俊红, 女, 博士生, 讲师, 研究方向为激光技术及器件。E-mail: xjh3729@xaut.edu.cn。

通讯作者: 焦明星, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术。

E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn。

还可弯曲传像等。

因此 GL 作为一种重要的微型光学基础元件,被广泛应用于成像、信息传感、光纤通信和医用内窥镜等领域<sup>[6-9]</sup>。GL 用在全固态激光器的泵浦光学系统中,不仅使得泵浦系统结构简单,体积小,而且提高了泵浦光耦合效率,降低了成本<sup>[10-12]</sup>。

本文介绍了 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统的组成,利用 GL 的传输矩阵,根据 ABCD 公式,理论计算了泵浦光在其传输方向上各点的  $q$  参数值,分析了 GL 对 LD 光束的传输特性。建立了 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统,实验研究了 GL 对激光器输出特性的影响。

## 1 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统组成

LD 端面泵浦固体激光器主要有直接端面泵浦固体激光器和光纤耦合端面泵浦固体激光器。后者采用带尾纤的 LD 作为泵浦,LD 泵浦光经光纤耦合后,发散角变小,光斑呈圆对称,主要能量聚集在中心部分,易于实现与振荡激光的模式匹配,尾纤比较柔韧,长度可以自由变更,易于将 LD 和 Nd:YAG 激光器分离,以降低热效应。因此光纤耦合端面泵浦固体激光器得到了广泛研究。

LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光器系统主要由 LD、泵浦光耦合系统(CO: Coupling Optics)、Nd:YAG 激光晶体以及光学谐振腔等部分组成,如图 1 所示。

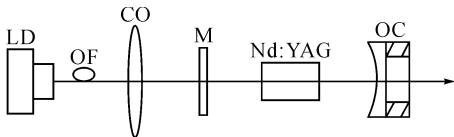


图 1 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统

Fig.1 LD fiber coupled end-pumped Nd:YAG laser

全反射镜 M 和输出耦合镜 OC(OC: Output Coupler)形成激光谐振腔。LD 尾纤 OF 出射的  $\lambda = 808 \text{ nm}$  泵浦光经耦合光学系统 CO 进入 Nd:YAG 激光晶体,将低能级粒子抽运到高能级,实现粒子的集居数反转分布,在微弱的自发辐射光诱发下,产生  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  受激辐射相干光,通过 Nd:YAG 激光晶体,实现雪崩式受激辐射光放大;受激辐射光在 M 和 OC 组成的谐振腔内往返传播,反复受到 Nd:YAG 激光晶体雪崩式放大,直到增益饱和。当大信号增益与腔内损耗相等时,腔内形成稳定激光场分布,部分  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  振荡激光从 OC 输出。

GL 作为泵浦光耦合系统,可应用于图 1 所示 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光器中。

GL 是一种折射率分布沿径向渐变的柱状光学透镜,又称为梯度折射率透镜 GRIN(Graded-Index Lenses)。普通透镜是通过控制透镜表面的曲率,利用光程差使光线汇聚在一点。

而 GL 材料的折射率沿径向逐渐减小,能够使沿轴向传输的光连续折射,从而使光线平滑且连续地汇聚在一点。GL 的折射率分布一般遵从平方律分布<sup>[13]</sup>:

$$n^2(r) = n_0^2(1 - \alpha r^2) \quad (1)$$

GL 对近轴子午光线的变换公式为:

$$\begin{bmatrix} \cos(\sqrt{\alpha}z) & \frac{1}{n_0\sqrt{\alpha}}\sin(\sqrt{\alpha}z) \\ -n_0\sqrt{\alpha}\sin(\sqrt{\alpha}z) & \cos(\sqrt{\alpha}z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $n_0$  是 GL 轴线上的折射率,  $z$  为自聚焦透镜的长度,  $\sqrt{\alpha}$  被称为折射率分布常数或聚焦常数。

## 2 用 $q$ 参数分析泵浦光的传输特性

由激光原理可知,参数  $q(z)$  的定义为:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)} \quad (3)$$

则:

$$\frac{1}{R(z)} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{q(z)} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\omega^2(z)} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{1}{q(z)} \right\} \quad (5)$$

式中,  $\omega(z)$  是与传播轴线相交于  $z$  点的高斯光束等相位面上的光斑半径,  $R(z)$  为与传播轴线相交于  $z$  点的高斯光束等相位面的曲率半径。

可见,一旦知道了高斯光束在某位置  $z$  处的  $q$  参数值,则由公式(4)和(5)分别求出该位置处  $\omega(z)$  和  $R(z)$  的数值。

$z=0$  处的  $q$  参数值为:

$$q_0 = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (6)$$

当高斯光束在自由空间中传输时,有:

$$q(z) = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} + z \quad (7)$$

当高斯光束经过光学系统变换时,服从所谓的 ABCD 公式,即:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (8)$$

式中,  $q_1$  为入射高斯光束在光学系统表面上的  $q$  参数值,  $q_2$  为出射高斯光束在光学系统表面上的  $q$  参数值。

利用 GL 的传输矩阵,根据 ABCD 公式可求出沿

泵浦光传输方向上各点的  $q$  参数值。如图 2 所示,设 GL 位于 LD 泵浦尾纤出射端面距离  $l$  处,并且其轴线与泵浦光共轴, GL 长度为  $z$ 。

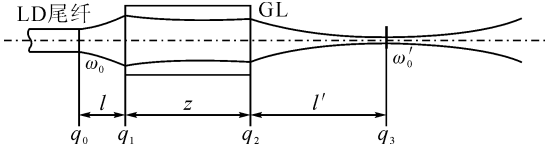


图 2 高斯光束的传输

Fig. 2 Transmission of Gaussian beam

LD 泵浦光经 GL 汇聚后,束腰  $\omega'_0$  位于 GL 输出端  $l'$  处。设 LD 尾纤出射端面处的  $q$  参数为  $q_0$ , GL 左右端面的  $q$  参数分别为  $q_1$  和  $q_2$ , 物方高斯光束束腰  $\omega'_0$  处的  $q$  参数为  $q_3$ 。

由图 2 可知,从 LD 尾纤出射端面到 GL 左端面为自由空间。则 GL 左端面处的  $q$  参数为:

$$q_1 = q_0 + l = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} + l \quad (9)$$

经 GL 后,即 GL 右端面处的  $q$  参数为  $q_2$  (见式(8))。其中:

$$\begin{cases} A = \cos(\sqrt{\alpha}z) \\ B = \frac{1}{n_0 \sqrt{\alpha}} \sin(\sqrt{\alpha}z) \\ C = -n_0 \sqrt{\alpha} \sin(\sqrt{\alpha}z) \\ D = \cos(\sqrt{\alpha}z) \end{cases} \quad (10)$$

高斯光束经过 GL,继续在自由空间传播,在  $\omega'_0$  处的  $q$  参数为:

$$q_3 = q_2 + l' = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} + l' \quad (11)$$

将公式(8)和(9)代入公式(11),并化简,得:

$$\frac{1}{q_3} = \frac{(Al + B + Cl' + Dl')(Cl + D) + C(A + Cl') \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{(Al + B + Cl' + Dl')^2 + (A + Cl')^2 \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} + i \frac{[(Al + B + Cl' + Dl')C - (Cl + D)(A + Cl')] \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}}{(Al + B + Cl' + Dl')^2 + (A + Cl')^2 \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (12)$$

由于高斯光束在  $\omega'_0$  处为平面光波,即

$$\operatorname{Re}\left\{\frac{1}{q_3}\right\} = 0, \text{ 所以:} \\ (Al + B + Cl' + Dl')(Cl + D) + C(A + Cl') \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2 = 0 \quad (13)$$

由公式(13)可以推导出:

$$l' = \frac{-(Cl + D)(Al + B) - AC \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{(Cl + D)^2 + C^2 \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (14)$$

并由式(5)和式(12)可得:

$$\omega'_0{}^2 = \frac{(Al + B + Cl' + Dl')^2 + (A + Cl')^2 \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{[(Al + B + Cl' + Dl')C - (Cl + D)(A + Cl')] \frac{\pi^2 \omega_0^2}{\lambda^2}} \quad (15)$$

由式(14)和(15)可知,当 GL 确定时,如果改变  $l$ ,即改变泵浦光斑的物距,将引起像距  $l'$  和像方光斑  $\omega'_0$  大小的变化。

### 3 实验研究

建立如图 3 所示的 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光系统,研究 GL 对全固态激光器输出特性的影响。

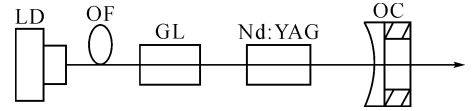


图 3 LD 泵浦 Nd:YAG 激光系统

Fig. 3 LD pumped Nd:YAG laser

LD 采用西安炬光科技有限公司生产的 FCSE01 型光纤耦合激光器,其出射波长  $\lambda = 808$  nm,尾纤芯径为  $100 \mu\text{m}$ ,则可得  $\omega_0 = 100 \mu\text{m}$ 。GL 由西安光学精密机械研究所生产,尺寸为  $\Phi 2.6 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ ,通光长度  $z = 6.5 \text{ mm}$ ,中心折射率  $n_0 = 1.65$ ,分布常数  $\sqrt{\alpha} = 0.125 \text{ mm}^{-1}$ ,数值孔径为 0.6。

激光谐振腔为平凹腔,由激光晶体 Nd:YAG 棒的左端面和输出耦合镜 OC 组成,光学腔长  $l$  约为 30 mm。

由激光原理知,振荡激光的束腰在 Nd:YAG 棒的左端面上,腰斑半径为  $\sqrt{\frac{\lambda l}{\pi}}$ ,其中  $\lambda = 1.064 \text{ nm}$ ,因此,振荡激光的腰斑半径约为  $100 \mu\text{m}$ 。

Nd:YAG 晶体为中国科学院福建物质结构研究所生产,通光长度为 5.5 mm,左端面镀有对 808 nm 高透 ( $T > 95\%$ ) 和对 1 064 nm 全反 ( $R > 99.8\%$ ) 的双色介质膜,右端面镀有对 1 064 nm 增透的介质膜。

OC 为 K9 玻璃制成的平凹镜,曲率半径 100 mm,镜面直径 10 mm,凹面镀有对 1 064 nm 透过率为 3.6% 的介质膜。

将 GL 参数代入式(14)和(15),可获得物距  $l$  与像距  $l'$  及像方腰斑半径  $\omega'_0$  之间的关系曲线(见

图4)。

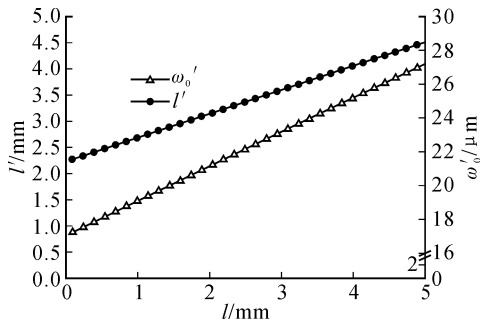


图4 物距  $l$  与像距  $l'$  及像方腰斑半径  $\omega_0'$  之间的关系  
Fig. 4 Relationship between  $l$  and  $l'$ ,  $\omega_0'$

可见,随  $l$  增大,  $l'$  和  $\omega_0'$  均变大。而  $\omega_0'$  越小, 泵浦效果越好, 因此, 应该使 LD 尾纤尽量靠近 GL。当  $l \approx 0$  时, 高斯光束像方腰斑距离  $l' \approx 2.5$  mm, 像方腰斑半径  $\omega_0' \approx 17 \mu\text{m}$ 。可见  $\omega_0' \ll \omega_0$ , GL 具有良好的聚焦效果。

将 GL、Nd:YAG 及 OC 的光轴与 LD 的光轴重合。使 LD 的尾纤尽量靠近 GL, 将它们固定在光学调节架上, 轴向改变 GL 右端面与 Nd:YAG 棒的左端面间的轴向距离  $x$ , 可得  $x$  与激光器输出功率和阈值泵浦功率之间的关系(见图 5)。

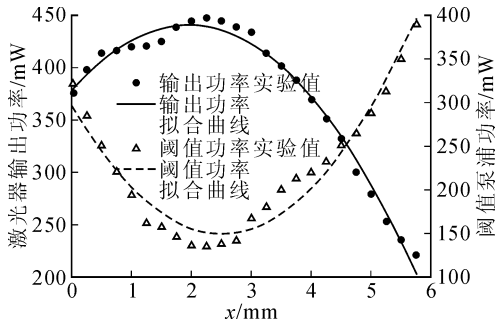


图5  $x$  与激光器输出功率、阈值泵浦功率的关系  
Fig. 5 Relationship between  $x$  and output power, threshold pump power

由图 5 可知, 随  $x$  的增大, 阈值泵浦功率先变小再变大, 当  $x = 2.25$  mm 时, 阈值泵浦功率最小。当保持泵浦功率为 800 mW 不变时, 随  $x$  的增大, Nd:YAG 激光器输出功率先变大再变小, 当  $x = 2.25$  mm 时, 激光器输出功率最大, 光-光转换效率为 31.1%。

这是因为 Nd:YAG 激光器为平凹腔, 它的振荡激光腰斑在平面镜上, 即在图 3 所示的 Nd:YAG 晶体左端面上, 当  $x = 2.25$  mm 时, 泵浦光的像方腰斑也在 Nd:YAG 晶体左端面上。也就是说此时泵浦光像方腰斑与振荡激光腰斑重合, 泵浦光和振荡激光的模式匹配达到最佳, 因此 Nd:YAG 阈值泵浦功率最小, 激光输出功率最大。这与公式 (14) 和

(15) 的计算结果一致。

沿轴向改变 GL 右端面与 Nd:YAG 棒的左端面间的轴向距离  $x$ , 激光器输出的光斑均为规则的圆形。

在距离输出镜 OC 右边 0.5 m 处放置近红外 CCD 相机采集激光光斑图像, 为了反映光斑不同区域能量分布的相对大小和位置, 经数字图像处理获得激光光斑三维能量分布。

图 6 为  $x = 2.25$  mm 时激光器输出光斑的激光振幅分布图。

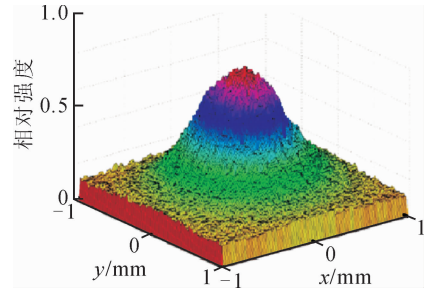


图6 激光横模光斑能量分布 3D 图  
Fig. 6 3D energy distribution of laser transverse mode pattern

可见, 在横截面内激光的振幅分布为高斯分布, 因此可以认为激光谐振腔以基横模输出。这是因为 LD 尾纤发出的光近似为基模高斯光束, 经 GL 汇聚后, 泵浦光斑半径远远小于激光介质内的基模半径, 在空间上实现了模式匹配。

由以上实验分析可知, 以 GL 作为泵浦光耦合系统对泵浦光具有良好的聚焦效果, 能够满足泵浦光和振荡激光的匹配, 使 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器输出基横模, 具有较高的光-光转换效率。当泵浦光和振荡激光的模式匹配达到最佳时具有良好的输入输出特性。

## 4 结 论

本文根据 ABCD 公式, 通过追踪 LD 光束经过耦合光学系统 GL 的  $q$  参数值, 分析了 LD 光束经 GL 后的传输规律。建立了以 GL 作为泵浦耦合系统的 LD 光纤耦合端面泵浦 Nd:YAG 激光系统, 实验研究了物距  $l$  与像距  $l'$  及像方腰斑半径  $\omega_0'$  之间的关系。

结果表明, GL 泵浦光具有良好的聚焦效果, 能够实现泵浦光与振荡激光的模式匹配。

### 参考文献:

- [1] Zhang S L, Tan Y D, Li Y. Orthogonally polarized dual frequency lasers and applications in metrology[J]. Meas-

- urement Science and Technology, 2010, 21(5): 054016.
- [2] Brunel M, Emilf O, Bretenaker F, et al. Tunable two frequency lasers for lifetime measurements [J]. Optical Review, 1997, 4(5): 550-552.
- [3] Takahashi Y, Yoshino T. Fiber ring laser with flint glass fiber and its sensor applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17: 591-597.
- [4] Pan S L, Yao J P. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation [J]. Optical Express, 2009, 17(7): 5414-5419.
- [5] Kenichi I. Comment on the expression of a distributed index [J]. Applied Optics, 1982, 21(6): 988-989.
- [6] 丁琴, 王惠南. 采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥成像技术 [J]. 光子学报, 2004, 33(7): 889-892.  
Ding Qin, Wang Huinan. An imaging technique of microcapsule endoscope using a GRIN lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 889-892.
- [7] Murphy P J, Coursolle T P. Fiber optic displacement sensor employing a graded index lens [J]. Applied Optics, 1990, 29(4): 544-547.
- [8] Tomlinson W J. Applications of GRIN-rod lenses in optical fiber communication systems [J]. Applied Optics, 1980, 19(7): 1127-1138.
- [9] Sandoz P, Giust R, Tribillon G. Multi-aperture optical head for parallel scanning near field optical microscopy [J]. Optics Communications, 1999, 161(4): 197-202.
- [10] 郑朝思, 胡企铨, 屠玉珍, 等. 半导体激光器的组合式光束耦合研究 [J]. 中国激光, 1996, 23(11): 975-980.  
Zheng Chaosi, Hu Qiquan, Tu Yuzhen, et al. Study of coupling of multiple diode laser with self-focusing lenses [J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, 23(11): 975-980.
- [11] 张丙元, 王国菊, 何京良, 等. 自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 锁模激光器的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714001.  
Zhang Bingyuan, Wang Guoju, He Jingliang, et al. Passively mode locking of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with grin lense as optical coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714001.
- [12] 姜耀亮, 郑权. 自聚焦透镜与倍频晶体构成的激光谐振腔 [J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 25-26.  
Jiang Yaoling, Zheng Quan. Selfoc lens constructs laser cavity with double frequency crystal [J]. Laser and Infrared, 2002, 32(1): 25-26.
- [13] 张大勇, 周寿桓, 梁峰, 等. LD 光束经自聚焦透镜变换后的特性研究 [J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 171-176.  
Zhang Dayong, Zhou Shouhuan, Liang Feng, et al. Study on the characteristic of LD output beam transformed by GRIN [J]. Laser and Infrared, 2002, 32(3): 171-176.

(责任编辑 王卫勋)