

LD 端面泵浦全固态绿光激光器耦合系统研究

赵致民¹, 陈浩伟¹, 解慧明^{1,2}, 田 丰³, 田来科¹, 白晋涛¹

(1. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069; 2. 陕西省西安中学, 陕西 西安 710003;
3. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

摘要:目的 为了研究泵浦光与基模光的模式匹配问题。方法 利用矩阵光学方法, 推导了高斯光束经耦合系统聚焦后束腰宽度和像距的计算公式。结果 计算出了焦点位置与晶体端面的距离。

结论 以此计算结果为依据, 实现了 810 W 的 532 nm 绿光激光输出。

关键词: 耦合系统; 模式匹配; 全固态; 绿光激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 10002274 X(2004) 0620669204

LD 纵向双端抽运全固态激光器的耦合系统, 对固体激光器输出功率、模式、阈值等特性有着重要影响^[1,2]。本文研究了半导体激光器光纤耦合输出光束通过双平凸镜耦合系统的传输特性。利用矩阵光学方法, 将光纤耦合输出光束近似为高斯光束, 推导了高斯光束经耦合系统聚焦后束腰宽度和像距的计算公式^[3]。根据我们实验所采用的一组腔参数, 考虑到泵浦光与振荡光的模式匹配, 计算出了焦点位置与晶体端面的距离, 以此计算结果为依据, 实现了 810 W 的 532 nm 绿光激光输出^[4]。

定

1 光纤输出端口高斯光束 q 参数的确定

我们使用的泵浦源为中国科学院半导体研究所生产的波长 808 nm 半导体激光器, 其输出光纤由 19 根细光纤耦合组成, 光线束直径 1.0 mm, 输出光束数值孔径 $N_A = 0.11$ 。由此可以得到: 经传播 $L = 85.8$ mm, 光斑半径由输出端口的 015 mm 变为 10 mm (与实验测量结果相符)。

假定光纤输出端口高斯光束光斑半径 $\omega_1 = 015$ mm, 为了确定光纤输出端口高斯光束 q_1 参数, 还必须知道光纤输出端口高斯光束等像位面曲率半径的倒数 M 。根据高斯光束 ABCD 定律^[5],

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (1)$$

其中

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} = M - iN, \quad (2)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R_2} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_2^2} \quad (3)$$

q_2 为距离光纤输出端口 $L = 8518$ mm 处的 q 参数。

将式(2), (3) 代入式(1), 得到

$$\text{Im} \left(\frac{1}{q_2} \right) = \frac{BCN - ADN}{(A + BM)^2 + B^2 N^2} = - \frac{\lambda}{\pi \omega_2^2} \quad (4)$$

解得 $M = 221134 \text{ m}^{-1}$ 。这样, 得到光纤输出端口光束 q 参数

$$q_1 = M - iN = 221134 - 1.02878i \quad (5)$$

由式(5) 可解得泵浦光束经耦合系统变换后的参数。

2 高斯光束经准直系统聚焦后的束腰半径和像距公式

如图 1 所示的准直系统, 它由两个直径为 20 mm 的平凸镜构成, 并且可以认为耦合系统处于同一介质中。高斯光束 q 参数通过近轴 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 光学系统的传输由 ABCD 定律描述

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (6)$$

收稿日期: 2003204209

基金项目: 陕西省教育厅产业化培育项目 (04JC30)

作者简介: 赵致民 (19772), 男, 陕西长安人, 西北大学硕士生, 从事激光器件研究。

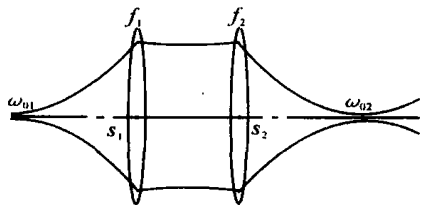


图 1 耦合系统示意图

Fig. 1 Coupling system

其中 q_1 为光纤输出端口 q 参数, q_2 为高斯光束经过耦合系统后束腰处的 q 参数。耦合系统的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

f_1, f_2 分别为两个平凸镜的焦距, s_1 为平凸镜 f_1 与光纤输出端口的距离, s_2 为经过耦合系统变换后高斯光束束腰与平凸镜 f_2 的距离, 两个平凸镜之间的距离为 L 。设经过聚焦系统变换后的高斯光束的束腰处的复参数为 q_2 , 则由式(5~7)可得

$$\frac{1}{q_2} = \frac{AC + BCM + ADM + BDM^2 + BDN^2 + i(BCN - ADN)}{(A + BM)^2 + B^2 N^2}. \quad (8)$$

在束腰处有 $R_2 \rightarrow \infty$, 即 $\text{Re}(1/q_2) = 0$, 所以 $AC + (BC + AD)M + BD(M^2 + N^2) = 0$ 。 (9) 由此可得 s_2 经耦合系统变换后的束腰与第二个平凸镜的距离 s_2 的表达式, 由经耦合系统变换后的束腰宽度

$$\frac{1}{\omega_{b2}^2} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im}\left(\frac{1}{q_2}\right), \quad (10)$$

可得经耦合系统变换后的束腰半径 ω_{b2} 的表达式。

3 束腰半径和像距随不同参数的变化规律

3.1 像距 s_2 随 L 的变化规律

计算中取 $f_1 = 0.105 \text{ m}$, $f_2 = 0.105 \text{ m}$, $s_1 = 0.105 \text{ m}$ 。 s_2 随 L 变化的曲线如图 2 所示。由此可见, s_2 受 L 的影响不大

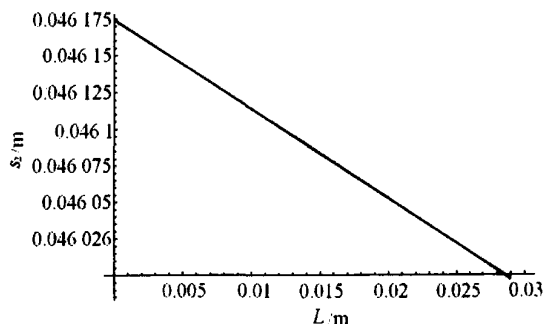
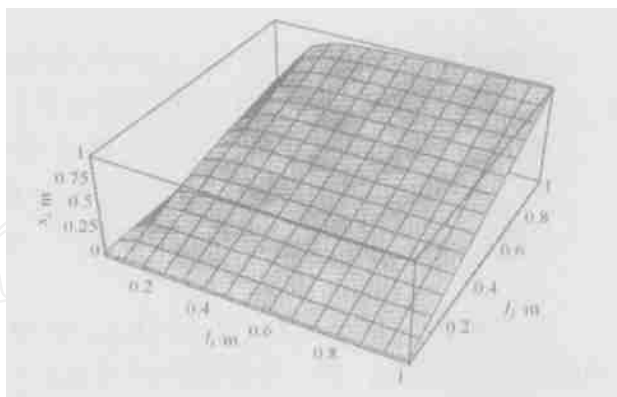
3.2 像距 s_2 随 f_1, f_2 的变化规律

计算中取 $s_1 = f_1$, s_2 随 f_1, f_2 变化的曲线如图 3, 可见当 f_1 大于 0.125 m 时, s_2 与 f_1, f_2 之间为线性关系, 并且不论 f_1 取多大值, 只要 f_2 取一合适值, s_2 仍可取小值。

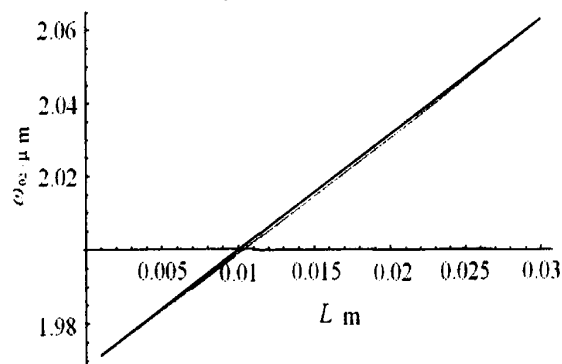
线性关系, 当 $s_2 = 0.10461 \text{ m}$ 时, ω_{b2} 取最小值 $11998.85 \mu\text{m}$ 。

3.3 束腰半径 ω_{b2} 随 L 的变化规律

计算中取 $f_1 = 0.105 \text{ m}$, $f_2 = 0.105$

图 2 s_2 随 L 的变化曲线Fig. 2 s_2 as a function of L 图 3 s_2 随 f_1, f_2 的变化曲线Fig. 3 s_2 as a function of f_1, f_2

$m, s_1 = 0.105 \text{ m}$ 。 ω_{b2} 随 L 变化的规律如图 4 所示。

图 4 ω_{b2} 随 L 的变化曲线Fig. 4 ω_{b2} as a function of L

由此可见, ω_{b2} 与 L 之间是线性关系, 并且 ω_{b2} 受 L 变化的影响很小。

4 泵浦光与谐振腔振荡光的模式匹配

将泵浦光与振荡光在增益介质中的重叠程度最大化是最优化固体激光器的效率的关键因素, 模式匹配就是这种重叠程度的最大化, 提高泵浦光与振荡光的重叠程度对减少泵浦光阈值功率、增大输出功率和提高斜效率有很重要作用。

考虑到谐振腔基模运转是实际应用中人们最希望的,因此可认为振荡光即是基模光。定义表征振荡光与泵浦光平均截面积之比的参数 α 为

$$\alpha = \frac{\overline{\omega_1}}{\overline{\omega_p}} \quad (11)$$

$\overline{\omega_1}$, $\overline{\omega_p}$ 分别为基模光和泵浦光的平均光斑。

我们采用 Z 形折叠腔结构,以等效热透镜 f_t 右表面为起点,根据标准的 ABCD 传输矩阵理论,则谐振腔往返矩阵为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & L_2 + L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_4} & 1 \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 + L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} 1 & 2L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

在这里,我们忽略了子午光线和弧氏光线的差别。改变往返矩阵的起点位置,我们可以得出腔内各处的束参数,从而知道激光晶体内部光束分布情况。根据数值计算结果,我们筛选出了一组理想的腔参数: $L_1 = 0101 \text{ m}$, $L_2 + L_3 = 0126 \text{ m}$, $L_4 = 01105 \text{ m}$, $R_3 = 0115 \text{ m}$, $R_4 = 0105 \text{ m}$, $f_t = 01166 \text{ m}$, M_3 经处的折叠半角小于 8° 。其腔的特点是热聚焦 f_t 的允许变化范围为 $\infty \sim 140 \text{ mm}$,因而实现了低阈值和激活介质内基模体积对热聚焦的扰动不灵敏的稳定运转条件。在试验中,我们使用山东大学晶体研究所生长的 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 Nd:YVO₄ 晶体,根据这一组参数可得到基模光在 Nd:YVO₄ 晶体中传输的规律,如图 5 所示。

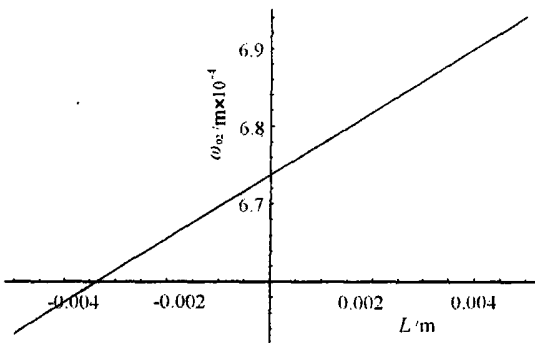


图 5 ω_1 随 z 的变化曲线

Fig. 5 ω_1 as a function of z

由此可见,在 Nd:YVO₄ 晶体中基模光斑大小的变化可以很好地近似为一线性关系,可很方便地计算出平均基模光斑的大小为 67317 nm 。根据前面的计算结果,选定一组泵浦系统参数: $f_1 = 0105 \text{ m}$, $f_2 = 0105 \text{ m}$, $s_1 = 0105 \text{ m}$, $L = 0101 \text{ m}$,计算得到泵浦光斑经准直系统聚焦后的传输规律,如图 6 所示。

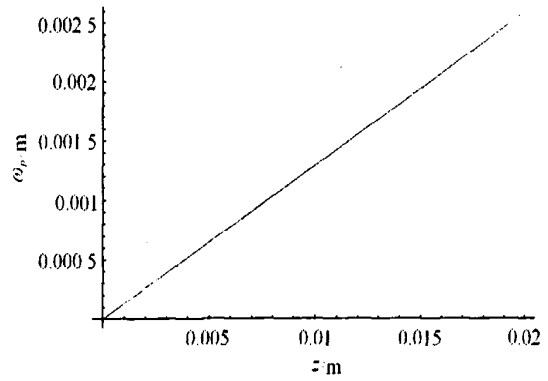


图 6 ω_p 随 z 的变化曲线

Fig. 6 ω_p as a function of z

由图 6 可见泵浦光斑通过晶体时,光斑大小变化仍可近似为直线,文献[6~9]表明高功率端面泵浦激光器的模半径应小于泵浦光斑半径,即 α 小于 1。从上面的计算中可得当泵浦光斑焦点距激光晶体端面 216 mm 时,在激光晶体端面上的泵浦光斑半径大于平均基模光斑半径,实际上由于双平凸镜引入的像差等一系列影响,光斑并不能聚焦到理论计算的水平,根据试验观察,只需要光斑焦点在晶体端面附近即可。至此,我们得到了在考虑模式匹配条件下的最佳泵浦光斑焦点位置。以此为指导,实现了 810 W 的 532 nm 的绿色激光输出,功率波动小于 2% ,证明了将光纤耦合束出光束近似为高斯光束的可靠性。

5 结论

本文研究了双平凸镜组合成的耦合系统对泵浦光的变换问题,得到了一些有关泵浦光经过耦合系统后焦斑大小和焦点位置有意义的结论,从而进一步讨论了泵浦光与谐振腔基模光模式匹配问题,对实验工作具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] BAI Jin2tao, CHEN Guo2fu. Continuous2wave diode2laser end2pumped Nd:YVO₄/KTP high2power solid2state green lasser[J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34(4): 3332-3336.
- [2] 张 伟,李 隆,陈浩伟,等. LD 泵浦双棒串接 Nd:YVO₄ 激光器的研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 5492551.
- [3] 周南润,陶向阳,吕百达. 高斯光束经复合系统的聚焦特性[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(4): 4972499.
- [4] 白晋涛,赵致民,李 隆,等. 8W 高功率全固态 LD 双端抽运连续波绿光激光器[J]. 中国激光, 2003, 30: 426.
- [5] 吕百达. 激光光学[M]. 成都:四川大学出版社, 1986164270.

- [6] CHEN Y F, HANG T M, KAO C F, *et al.* Optimization in scaling fiber coupled laser diode end pumped lasers to higher power: influence of thermal effect [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33: 1 424.
- [7] KANEDA O, KAWA Y M, MASUDA H, *et al.* 516W of continuous wave radiation in a TEM₀₀ mode from a laser diode end pumped Nd: YAG lasers [J]. Opt Lett, 1992, 17: 1 003.
- [8] NIGHAN W L, PARK J M, KEHSTEAD M S, *et al.* Diode pumped laser with strong thermal lens crystals [P]. US Patent: 1995209225.
- [9] 周炳琨. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 74288.

(编辑 亢小玉)

The research of the coupling system and mode matching of LD end pumped all solid state green lasers

ZHAO Zhi min¹, CHEN Hao wei¹, XIE Hui ming^{1,2},
TIAN Feng³, TIAN Lai ke¹, BAI Jin tao¹

(1. Institute of Photonics and Photo technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Xi'an Middle School, Xi'an 710003, China; 3. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: **Aim** To study the mode matching between pumping beam and TEM₀₀ beam. **Methods** By the matrix optical method, formulae of waist width and imaging distance of focused Gaussian beams through the coupling system are derived. **Results** The distance between focus point and end face of crystal is calculated. **Conclusion** 516W continuous wave green laser is obtained by the result.

Key words: coupling system; mode matching; all solid state; green lasers

学术动态 ·

刘池阳被评为“全国模范教师”

9月10日,为深入贯彻党的十六大和全国人才工作会议精神,大力实施科教兴国战略和人才强国战略,大力倡导尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造的社会风气,进一步激励教育系统广大教师和教育工作者献身教育事业,不断推进教育事业的改革和发展,教育部组织进行2004年教师节“全国优秀教师”和“全国优秀教育工作者”评选表彰活动,我校刘池阳教授被评为“全国模范教师”。

刘池阳生于1953年4月,陕西临潼人,1976年毕业于我校地质学系并留校任教,1982年获我校理学硕士学位,1992年晋升为教授,现为博士生导师,任我校地质系石油地质教研室主任、含油气盆地研究所副所长、地质学系副主任、地质学学位委员会主任、校学术委员会委员、大陆动力学教育部重点实验室学术委员会委员,兼任石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室学术委员会委员、中国石油学会石油地质专业委员会委员、陕西省石油学会常务理事、西安市地质学会常务理事;《断块油气田》、《西北油气勘探》科技学术期刊编委等职。刘池阳教授于1993年起享受国务院政府特殊津贴,1995年被遴选为首批陕西省“科技新星”,1996年入选首批国家“百千万人才工程”第一、二层次,1997年遴选为首批陕西省“三五人才工程”第一层次。出版的专著和发表的论文多部(篇),现主持国家“973”重大项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”的研究。

(薛 鲍)