

文章编号: 1001-3806(2011)02-0167-03

热透镜不灵敏长脉冲绿激光腔的设计与分析

张令开^{1,2}, 顾华东³, 郑陈琪³, 高静³, 武晓东³, 唐玉国^{1,3*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 苏州 215163)

摘要: 为了有效缓解闪光灯抽运长脉冲绿激光器中的热透镜效应, 采用矩阵光学理论, 通过高斯光束的矩阵变换, 分析了灯抽运长脉冲激光棒的热透镜效应, 并设计了热透镜不灵敏的 V 型谐振腔, 进行了理论分析和实验验证, 取得了良好的实验结果。结果表明, 通过高斯光束的矩阵变换及模拟分析选择的参量是合适的, 这一结果对于缓解激光器热透镜效应、提高大能量医用激光器的激光性能是有帮助的。

关键词: 激光技术; 长脉冲绿激光; 矩阵光学理论; 热透镜效应

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.007

Analysis and design of the thermal-lens-insensitive cavity in long-pulse green lasers

ZHANG Ling-kai^{1,2}, GU Hua-dong³, ZHENG Chen-qi³, GAO Jing³, WU Xiao-dong³, TANG Yu-guo^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 213165, China)

Abstract: In order to alleviate the thermal lens effect effectively, based on the matrix optics, thermal lens effect in a flash-pumped long-pulse green laser was analyzed with matrix transformation of Gaussian beam and a V-type cavity insensitive to thermal lens was designed. It was analyzed in theory and verified in experiments. The results show that it is reasonable to select parameters according to the matrix transformation of the Gaussian beams and the analytical simulation. This result is helpful for the alleviation of thermal lens effect and the improvement in performance of high energy medical lasers.

Key words: laser technique; long-pulse green laser; matrix optics theory; thermal lens effect

引言

采用与血液吸收峰相匹配的高能长脉冲绿色激光是治疗血管性病变的重要方法。532nm 波长的激光能很好地被血液中的血红蛋白吸收, 实现激光与血液之间的相互作用。采用长脉冲, 即激光的脉宽小于等于血管的弛豫时间, 减少对周围组织的热损伤^[1-2]。其特点是手术创伤轻、伤口小、治疗简单、迅速、无副作用、疗效显著、术后恢复快、治疗费用低、患者痛苦小, 克服了传统治疗血管病变方法所带来的弊端。但是医用的血管内治疗激光器能量比较大, 由于下述原因而产生热: (1) 量子亏损发热^[3-5], 即抽运带与上下激光能级

之间的光子能量差以热的方式散逸到基质晶格中; (2) 激光猝灭而产生热; (3) 弧光灯或者闪光灯的宽光谱分布。基质材料对光能的吸收而产生大量的热, 出现热透镜效应, 从而影响输出激光的光束质量^[6-10]。作者通过矩阵光学变换对 V 型腔进行分析, 设计了热透镜不灵敏的 V 型谐振腔。研究结果对于缓解激光器中的热透镜效应、提高激光性能具有参考意义。

1 理论分析

折叠腔是驻波腔, 因为折叠反射镜一般工作在离轴位置而引入像散。当入射光束轴线与透镜(或者球面反射镜)的轴线 z 成 α 角时, 在 $y-O-z$ 及 $x-O-z$ 平面上透镜的焦距不再是名义上的焦距 f , 而分别等于 $f/\cos\alpha$ 及 $f\cos\alpha$ 。折叠腔可以展开为多元件直腔来分析。在 V 型腔内插入等效热透镜后的结构见图 1。

根据矩阵光学设计理论^[11] 可以计算弧矢面和子午面上的 G 参量。

对于弧矢面 s :

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目资助项目(KGCX2-YW-910-1)

作者简介: 张令开(1984-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光医学和全固态激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

收稿日期: 2010-05-27; 收到修改稿日期: 2010-06-22

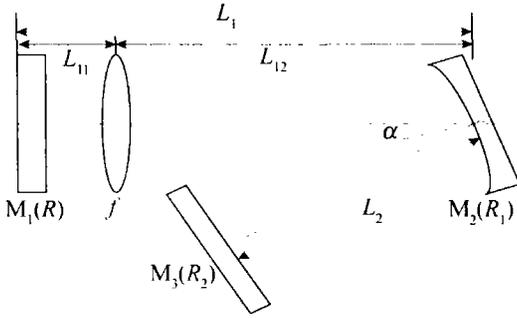


Fig. 1 Sketch map of the V-type cavity with thermal lens

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2\cos\alpha}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & L_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

弧矢面 s 的 G 参量为:

$$\begin{cases} G_1 = 1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1} - \frac{1}{f} [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1})] - \frac{L_{11} (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1}) + (1 - \frac{L_{11}}{f}) [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1})]}{R} \\ G_2 = -\frac{2L_{11}\cos\alpha}{R_1} + (1 - \frac{L_{11}}{f}) (1 - \frac{2L_{12}\cos\alpha}{R_1}) - \frac{L_{11} (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1}) + (1 - \frac{L_{11}}{f}) [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1})]}{R_2} \end{cases} \quad (2)$$

对于子午面 t :

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1\cos\alpha} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{11} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

子午面 t 的 G 参量为:

$$\begin{cases} G_1 = 1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha} - \frac{1}{f} [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha})] - \frac{L_{11} (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha}) + (1 - \frac{L_{11}}{f}) [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha})]}{R} \\ G_2 = -\frac{2L_{11}}{R_1\cos\alpha} + (1 - \frac{L_{11}}{f}) (1 - \frac{2L_{12}}{R_1\cos\alpha}) - \frac{L_{11} (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha}) + (1 - \frac{L_{11}}{f}) [L_2 + L_{12} (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha})]}{R_2} \end{cases} \quad (4)$$

通常前腔镜都为平面镜或者曲率比较大,而热透镜都靠近平面镜(晶体长度相对于 L_1 是小量),令 $L_{11}/f \approx 0, L_{11}/R_2 = 0, L_{11}/R_1 = 0, L_{12} \approx L_1, R_1 = 400\text{mm}$,则上两式可作如下变化。

对弧矢面:

$$\begin{cases} G_1 = 1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1} - \frac{1}{f} [L_2 + L_1 (1 - \frac{2L_2\cos\alpha}{R_1})] \\ G_2 = 1 - \frac{2L_1\cos\alpha}{R_1} \end{cases} \quad (5)$$

对子午面:

$$\begin{cases} G_1 = 1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha} - \frac{1}{f} [L_2 + L_1 (1 - \frac{2L_2}{R_1\cos\alpha})] \\ G_2 = 1 - \frac{2L_1}{R_1\cos\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可见, G_2 与热透镜焦距 f 无关。因此,在谐振腔的设计过程中,为了减小热透镜效应对激光参量的影响,应该尽量使 G_1 的变化不受热透镜效应的影响,即尽量满足:

$$\begin{cases} \frac{dG_1}{df} = 0 \\ \frac{dG_2}{df} = 0 \end{cases} \quad \& \quad \begin{cases} \frac{da}{df} = 0 \\ \frac{db}{df} = 0 \\ \frac{dd}{df} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对弧矢面 s :

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{R_1/(2\cos\alpha)} \quad (8)$$

对子午面 t :

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{R_1\cos\alpha/2} \quad (9)$$

由于对凹面镜弧矢面 $s: R_1/(2\cos\alpha) \leftrightarrow f'$; 子午面 $t: R_1\cos\alpha/2 \leftrightarrow f'$ 。

可以看出,与薄透镜成像关系很类似,在实际的谐振腔设计中的 L_1, L_2 还应该考虑到激活介质和非线性晶体的折射率对等效光程的影响,来合理地选择两臂的长度。另外,由于像散的影响, α 角度不宜过大,否则会严重影响输出光束的光束质量。

与腔镜 M_1 相邻的均匀介质空间内激光的腰斑半

径及位置:

$$w_{01}^2 = \pm \frac{\lambda b \sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{\pi (G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2)} \quad (10)$$

$$z_{01} = \frac{b G_2 (a - G_1)}{G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2} \quad (11)$$

式中, λ 为波长。根据上面讨论, 由(8)式~(10)式, 设计出热效应不灵敏的谐振腔。在 $R_1 = 400\text{mm}$, $R = \infty$, $L_1 = 600\text{mm}$, $L_2 = 200\text{mm}$, $\alpha = 5^\circ$ 时, 得到了两臂中的激光束腰半径 (w_{1s} , w_{1t} 和 w_{2s} , w_{2t}) 随热透镜焦距的变化曲线。如图 2 所示, 当热透镜焦距在 $500\text{mm} \sim$

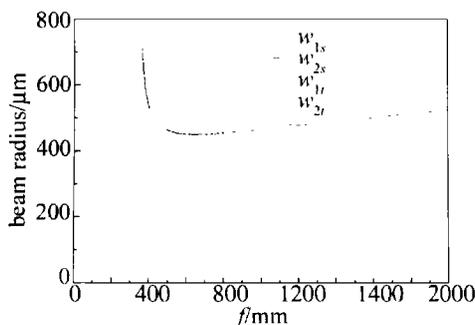


Fig. 2 Tangential and sagittal radii of laser mode in the middle of the laser crystal and KTP crystal versus the focal length of thermal lens

2000mm 区域内变化时, 激光晶体中的光斑半径 (w_{1s} 和 w_{1t}) 在 $450\mu\text{m} \sim 520\mu\text{m}$ 范围内变化, 变化幅度仅为 $\pm 7\%$, 保持了很好的稳定性, 从而有利于保持谐振腔内激光模式的稳定性和实现良好的模式匹配; 另一方面, 倍频晶体内的基频光保持了较小的光斑半径 (w_{2s} 和 w_{2t}), 而且弧矢面和子午面光斑半径之间的差异很小 (像散很小), 从而有利于实现高的倍频效率。

2 实验装置及结果

针对以上模拟和分析, 采用 V 型腔进行氙灯抽运双掺键合螺旋 Nd,Ce:YAG 晶体棒倍频产生长脉冲绿激光的实验, 从而验证 V 型腔设计的优越性。

实验中采用的抽运源是氙闪光灯, ($\varnothing 6 \times 120$) mm^3 , 采用镀金椭圆谐振腔。选用效率高、阈值低、热聚焦现象小、重复频率特性好的双掺键合螺旋 Nd,Ce:YAG 棒作为增益介质, 其尺寸为 ($\varnothing 6 \times 130$) mm^3 , Nd^{3+} 的掺杂原子数分数为 0.01。KTP 倍频晶体的尺寸为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 7\text{mm}$ (通光长度 7mm), 两端 HT@ $1064\text{nm}/532\text{nm}$ 。平面反射镜 M_1 的 $R = \infty$, HR@ 1064nm , 球面输出镜 M_2 的 $R_1 = 400\text{mm}$, HR@ $1064\text{nm}/\text{HT}@532\text{nm}$, 平面反射镜 M_3 的 $R_2 = \infty$, HR@ $1064\text{nm}/\text{HR}@532\text{nm}$ 。基频激光在 $M_1-M_2-M_3$ 之间振荡。在第 2 臂上采用 KTP 倍频晶体进行倍频, 倍频绿激光在 M_3-M_2 之间两次经过 KTP 晶体, 大大提高了光光转换效率。如图 3 所示。

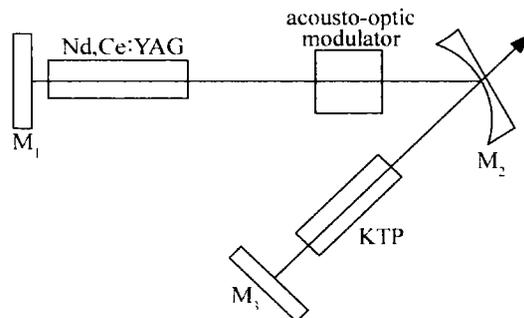


Fig. 3 Schematic diagram of the frequency doubled green laser using V-type cavity

当 $L_1 = 600\text{mm}$, $L_2 = 200\text{mm}$, $\alpha = 5^\circ$ 、脉冲宽度 50ms 、重复频率 3Hz 、自然循环水冷却时, 在额定电功率 520J 下, 获得的 532nm 激光最大输出能量为 1500mJ 。在激光器运行 2h 后测得光束分布如图 4 所示, 可以看出, 在如此高的输出能量下, 532nm 激光

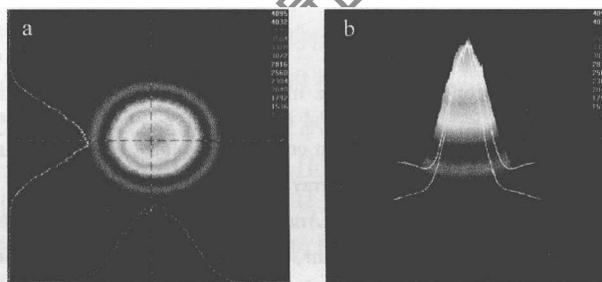


Fig. 4 Spatial beam profile of the 532nm laser in the designed V-type cavity
a—two dimensional b—three dimensional

仍然保持了很好的近高斯分布, 充分证明了 V 型腔在大能量倍频激光器设计中的重要性。

3 结论

在闪光灯抽运 Nd,Ce:YAG 激光器工作时, 激光介质不可避免地会出现热透镜效应, 进而降低光束质量, 减少输出功率, 缩小谐振腔的稳定范围。作者通过高斯光束的矩阵变换及模拟分析, 设计了热透镜不灵敏的 V 型谐振腔, 通过实验验证了所选的参量是合适的, 激光器获得了较高的输出能量, 并且空间强度分布保持了良好的近高斯曲线。作者的研究结果对于缓解激光器热透镜效应、提高大能量医用激光器的激光性能具有指导意义。

参考文献

- [1] LI Zh M, LUO Q M. Physical analysis on tissues heat and heat induced injury for laser irradiation [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2000, 9(2): 81-84 (in Chinese).
- [2] ZHU L L. The reasarch of the mechanism & method of the treatment with laser for vascular diseases [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006:12-15 (in Chinese).

(下转第 181 页)

铜在耐候钢表面锈层中的2次析出以及铜与基体间的阳极接触使基体产生钝化,从而形成保护性的致密锈层,即铜在基体和锈层之间形成以氧化铜为主要成分的隔离层,这种隔离层与基体结合牢固,因而具有较好的保护性能^[12]。

同时,从图5可以看出,由于激光功率高、扫描作用时间短,因此急速冷却时过冷度非常大,使得合金元素能够形成多种化合物而增加非自发形核的数量,使形核率大幅提高,形成了细小均匀的显微组织。组织细密可提高晶界结合力,增强材料强度和韧性。组织细密不但减少了单位晶界上的杂质含量,而且在快速冷却过程中成分偏析程度减少,从而减少了因形成原电池效应而加速腐蚀的影响^[13]。

3 结论

(1)通过均匀设计与优化,研制出了耐候钢Q450NQR1激光直写标志牌专用粉末配方。配方含有元素Ni, Cr, Si, B, Fe等,其质量分数分别为: $w(\text{Ni}) = 0.20 \sim 0.22$, $w(\text{Cr}) = 0.14 \sim 0.155$, $w(\text{Si}) = 0.01 \sim 0.015$, $w(\text{B}) = 0.005 \sim 0.006$,余量为Fe。将该粉末配方命名为CHW-I型专用自熔粉末。

(2)采用CHW-I型专用粉末进行熔覆时,不需采用气体保护,表面无氧化现象,呈银白色,简化了工序,节约了成本,提高了效率。

(3)对熔覆层进行显微硬度测量,硬度均小于240HV,与母材基本一致,具有很好的匹配性,大大降低了出现裂纹的可能性,而熔覆层显微组织为力学性能优异的奥氏体组织。

(4)通过加速条件下耐大气腐蚀试验说明了熔覆层具有比母材更好的耐大气腐蚀性,表明CHW-I型

专用粉末可以作为货车标识牌熔覆粉末。

参 考 文 献

- [1] CHEN J B. Principles and techniques of laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004:165-166(in Chinese).
- [2] LI Sh, HU Q W, ZENG X Y, et al. Research development of Fe-based alloy powder for laser cladding[J]. Laser Technology, 2004, 28(6):591-594(in Chinese).
- [3] HERNANDEZ J, VANNES A. Laser surface cladding and residual stress[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Lasers in Manufacturing. Paris: Springer Verlag, 1986:181-190.
- [4] DURANTON P, DEVAUX J, ROBIN V, et al. 3-D modeling of multi-pass welding of a 316L stainless steel pipe[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154:457-463.
- [5] HU M L, XIE Ch Sh, HUANG K J, et al. Measurement of residual stress in multi-track laser-clad coating[J]. Laser Technology, 2006, 30(3):262-270(in Chinese).
- [6] TANG Y, WANG Y Sh, SHUI R L, et al. Development of Ni-based powder alloy for self melting laser cladding[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2003, 22(5):52-55(in Chinese).
- [7] ZHANG W Y. Welding metallurgy (basic principle)[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2005:57-60(in Chinese).
- [8] ZHU R Sh. Investigation on self fluxing alloy powders[J]. Powder Metallurgy Industry, 2000, 10(2):7-14(in Chinese).
- [9] ZHAO H Y, WU X L, CHEN G L, et al. The design and study on the iron-based wear-resistant laser cladding alloy[J]. Applied Laser, 1999, 19(5):209-213(in Chinese).
- [10] QIAN Y H, LI Z G. Research on corrosion resistance of high strength weathering steel Q450NQR1 in accelerated corrosion environment[J]. Baosteel Technology, 2007(2):5-8(in Chinese).
- [11] ZHANG H Sh, WU Y L. Experimental study of signs producing by laser cladding[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2010, 1(5):6-8(in Chinese).
- [12] XU X L, XU Ch M. Development of weather-resistant steel and its surface treatment technique[J]. Angang Technology, 2007(3):18-21(in Chinese).
- [13] SHI Sh H, FU G Y. Study on corrosion resistance of laser cladding layer on stainless steel surface[J]. Heat Treatment on Metals, 1999(3):14-16(in Chinese).

(上接第169页)

- [3] LIU X Sh, WANG Zh Y, YAN X, et al. 56J high energy lamp-pumped pulsed Nd: YAG solid-state laser[J]. Laser Technology, 2008, 32(3):237-239(in Chinese).
- [4] YUAN X D, JIANG X Y, ZHENG J G, et al. Research on compensation characteristics of thermal insensitive cavity[J]. Laser Technology, 2010, 34(2):145-149(in Chinese).
- [5] SA Y, ZHANG G Zh, CAO Q M, et al. Measurement of thermal effects in a long-pulse-pumped Nd:YAG laser rod[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(2):256-260(in Chinese).
- [6] YI J H, MOON H J, LEE J M. Diode-pumped 100W green Nd:YAG rod laser[J]. Applied Optics, 2004, 43(18):3732-3737.
- [7] McDONAGH L, WALLENSTEIN R. Low-noise 62W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(7):802-804.
- [8] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S, et al. High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 2000, 25(2):105-107.
- [9] ZHANG X, CAI Q, XIANG A P. Analysis of thermal effect and experimental measurement of output wavefront properties with all-solid-state Nd:YAG laser[J]. SPIE, 2009, 7283:72833C/1-72833C/6.
- [10] ETTEMEYER A, JÜTZ J, SPIEGEL M, et al. Investigation of thermal lens effect of a Nd:YAG laser[J]. SPIE, 2009, 7389:738906/1-738906/6.
- [11] LÜ B D. Laser optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003:340-396(in Chinese).