

文章编号 1674-2915(2009)06-0557-04

# 工作距离可调的激光显微操纵器光学系统设计

李 宁,唐 勇,李玉瑶,耿似玉

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:**考虑传统激光显微操纵器的缺点,采用反射式结构设计了新的激光显微操纵器,以提高激光显微操纵器输出光斑的质量。用 He-Ne 激光作为指示光束,CO<sub>2</sub> 激光作为工作光束,对两种光斑的重合性、光斑大小进行了优化设计;利用 ZEMAX 软件中多重结构的功能使系统设计满足 200 ~ 400 mm 工作距离可调的要求。对设计的系统进行了实验,给出了光学系统图、能量图及点列图表。实验结果表明,在规定的工作距离内,系统的光斑重合性,光束均匀性、稳定性及可靠性等方面均有了很大提高。该激光显微操纵器与手术显微镜结合,有术野清晰,操作安全的特点,可满足医疗的长期使用要求。

**关 键 词:**光学设计;激光显微操纵器;光斑重合性;多重结构

**中图分类号:**TH742.64 **文献标识码:**A

## Design of optical system for laser micro-manipulator with adjustable working distance

LI Ning, TANG Yong, LI Yu-yao, GENG Si-yu

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In consideration of the shortcomings of traditional laser micro-manipulators, a laser micro-manipulator with the reflection structure was designed to improve the quality and reliability of spots. By taking a He-Ne laser as its indication light beam and a CO<sub>2</sub> laser as its working light beam, the repeatability and sizes of the two spots were optimized. Furthermore, using the multi-configuration of a ZEMAX, the adjustable performance of working distance was realized from 200 mm to 400 mm. By carrying out the corresponding experiment, then the optical system chart, diffraction encircled energy diagram and the spot diagram were given. The experimental results show that the repeatability of spots and the uniformity, stability and reliability of beams are improved a lot. With the characteristics of its clear operational visual field and treated safety, the laser micromanipulator can be combined with the operation microscopy to meet the long-term use need of the treatment.

**Key words:** optical design; laser micro-manipulator; spot repeatability; multi-configuration

## 1 引言

我国激光医疗仪器发展较早,但早期开拓市场的 He-Ne 激光诊断治疗仪、CO<sub>2</sub>激光美容机相对来说制造技术比较简单<sup>[1]</sup>,仅限于对表面皮肤进行治疗,而对耳、鼻、喉等深部手术却无能为力,医疗对激光器性能指标要求也较低。随着激光技术的发展成熟,以及新技术在临床领域的不断应用,激光医疗仪器的要求也越来越高,比如要求激光瞬间爆破、作用时间短、指示光束与工作光束完全重合、光斑小、不损伤正常皮肤、无疤痕等等。人们在了解其优点的同时,对医疗的安全性也极为关注。

本文针对激光显微操纵器的市场需求、质量及可靠性不断提高的现状,根据医学临床的需要,设计了一种新型的医用激光显微操纵系统,该系统可与各种手术显微镜耦联,进行各种精细的显微手术<sup>[2]</sup>。该设备经临床使用效果良好,是一种理想的多功能医用激光显微操纵系统。

## 2 设计思路

生物组织大多数都含有水份,激光与生物组织的相互作用在很大程度上是通过激光束与水的相互作用来确定的<sup>[3]</sup>。CO<sub>2</sub>激光的波长为 10.6 μm,该波长的能量很容易被含大量水份的人体组织吸收。同时 CO<sub>2</sub>激光器结构简单、价格低廉、稳定性能好、易于保养,因此 CO<sub>2</sub>激光器在医疗方面应用得很广泛。He-Ne 激光方向性好、单色性好、输出功率可控制得很稳定,且具有结构简单、体积小、质量轻、使用方便等优点,被广泛用于精密测量、检测、准直、导向等方面。基于上述特点,本设计采用 CO<sub>2</sub>激光作为工作光束,He-Ne 激光作为指示光束。

## 3 设计方案

### 3.1 技术要求

- (1)工作距离:200~400 mm 可调;
- (2)工作距离与光斑尺寸之间的关系如表 1

所示。

- (3)工作光束与指示光束完全重合。

表 1 工作距离与光斑尺寸之间的关系  
Tab. 1 Relation between working distance and spots size

工作距离/mm	光斑尺寸/mm
200	0.3
250	0.32
300	0.37
350	0.41
400	0.6

### 3.2 设计中重点考虑的问题

目前市场上的激光显微操纵器的光学系统都是折射式的,由于工作光束与指示光束波长相差太大,两种波长的激光通过光学系统后将产生很大的色差。通常校正色差会使系统结构变得很复杂,而校正后也很难使工作光束与指示光束完全重合,因此治疗精度将受到影响。本文研究、设计了一种反射式激光显微操纵器光学系统,实现了两种光束完全重合,提高了医学治疗精度。

### 3.3 反射系统结构的选择

反射式光学系统具有无色差、质量轻、结构紧凑等特点。反射面镀膜以后,反射率高,适用于从紫外到红外很宽的光谱范围。反射系统由于受到中心遮拦的限制会影响光能利用率,影响治疗效果,因此设计时要考虑减小中心遮拦比。为降低系统研制的难度和成本,本设计使用了球面镜,并尽量减小中心遮拦比。接下来对两球面镜系统的初级像差校正进行讨论。

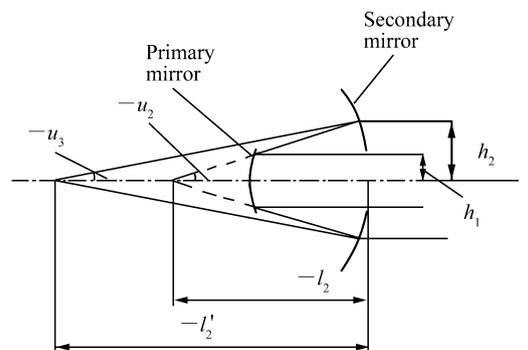


图 1 两镜系统光路图

Fig. 1 Optical path diagram of two mirrors

如图1所示,设光阑在主镜上,取归一化条件:入射光线高度  $h_1 = 1$ , 入射光线孔径角  $u_1 = 0$ , 焦距  $f' = 1$ , 出射光线孔径角  $u_3 = 1$ , 主光线在主镜上的入射高度  $h_{1z} = 0$ , 入射角  $u_2 = -1$ 、拉赫不变量  $J = 1$ 。引用两个变量

$$A = \frac{h_2}{h_1}, B = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u_3}, \quad (1)$$

式中,  $l_2$  是物点到次镜的距离,  $l'_2$  是像点到次镜的距离,  $A$  是两个反射镜的口径比,  $B$  是次镜的放大倍数。由高斯光学以及各个量间的几何关系,得到各个参量和  $A$ 、 $B$  的关系式。折射率  $n_1 = 1$ 、 $n_2 = -1$ 、 $n_3 = 1$ , 第一近轴光线在次镜上的入射角  $u_2 = B$ , 入射高度  $h_2 = A$ , 主光线在次镜上的入射高度  $h_{2z} = \frac{A-1}{B}$ , 两块反射镜曲率半径分别为

$$r_1 = \frac{2}{B}, r_2 = \frac{2A}{1+B}, \quad (2)$$

其中两反射镜间隔  $d = \frac{1-A}{B}$ 。将上述变量带入初级像差系数,可得到初级像差系数与  $A$ 、 $B$  的关系式,通过对初级像差的计算可知当  $-1 < A < 0$ ,

$B < 0$ 时,所成的像为虚像,系统是发散的,不适合用于激光显微操纵器光学系统。另外当  $A = 1$  时,两个反射镜的间隔为 0,应去除  $A = 1$  的解的情形。从而只余  $A > 1$ 、 $B > 1$  的情况,而  $A > 1$ 、 $B > 1$  的系统属于 Schwarzschild 系统。在像差校正方面, Schwarzschild 系统有较大的优势,它最多可以校正 3 种像差。  $A > 1$ 、 $1 > B > 0$  时的 Schwarzschild 系统,其主镜、次镜都需要开孔,遮拦和杂光的影响也比较显著,所以设计时采用  $A > 1$ 、 $B > 1$  的结构。经计算发现,将孔径光阑放在主镜上时,中心遮拦比最小,计算表明其最小中心遮拦比能达到 0.37。

### 3.4 200 ~ 400 mm 工作距离的实现

由于手术部位深浅的不同,要求激光显微操纵器有不同的工作距离。如何保证在规定的工作距离内,出射的两种激光的光斑大小和重合性满足要求是设计的难点。本文在设计中采用了实用性很强的多重结构设计法 (Multi-Configuration)。表 2 所示为通过调节主、次两反射镜之间的距离实现的不同工作距离。

表 2 激光显微操纵器光学系统的多重结构

Tab. 2 Multi-configuration of optical system for laser micromanipulator

	工作距离 (mm)				
	200	250	300	350	400
主镜到次镜的距离	-15.987 692	-14.678 772	-13.895 566	-13.343 202	-12.933 376
主镜到像面的距离	215.987 692	264.678 769	313.895 565	363.343 201	412.933 374

## 4 运行结果

为了更加清晰地再现激光经过该显微操纵系统时的光路走向,图 2 给出了工作距离较小的物镜光学系统图。

应用 ZEMAX 软件进行光路优化设计及像差平衡后的光学系统如图 3 所示,图中结果表明,工作距离 200 ~ 400 mm 可调。

图 4 为  $\text{CO}_2$  激光在工作距离为 300 mm 时通过光学系统之后的能量图,从图中可以看出能量曲线与衍射极限重合,满足要求。计算还发现,  $\text{CO}_2$  激光在工作距离为 200 和 400 mm 时,能量同样满足要求。

两种激光在工作距离为 200 ~ 400 mm 时,经

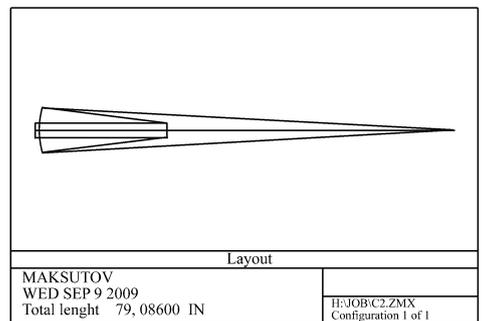


图 2 工作距离较小的物镜光学系统图

Fig. 2 Optical system of object lens with small working distance

过光学系统后的光斑尺寸大小如表 3 所示,从表中可以看出两种激光完全重合且光斑尺寸均小于要求值,满足设计要求。

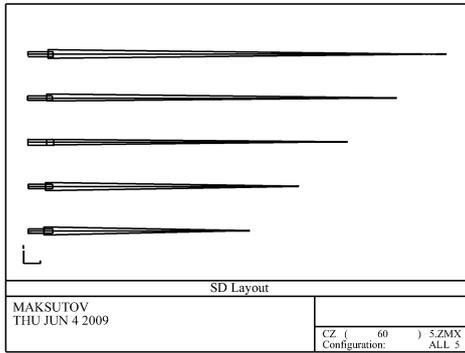


图3 物镜光学系统图

Fig. 3 Optical system of object lens

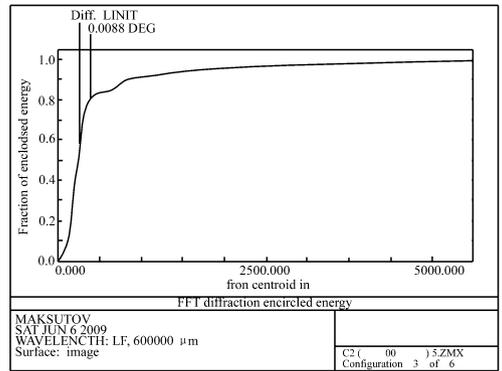
图4 CO<sub>2</sub>激光能量图Fig. 4 Diffraction encircled energy of CO<sub>2</sub> laser

表3 200~400 mm工作距离的点列图表

Tab. 3 Spot diagram of 200~400 mm work distance

	工作距离(mm)				
	200	250	300	350	400
要求值(mm)	0.3	0.32	0.37	0.41	0.6
几何半径值(mm)	$0.595 \times 10^{-3}$	$9.495 \times 10^{-3}$	$17.166 \times 10^{-3}$	$24.131 \times 10^{-3}$	$30.659 \times 10^{-3}$

## 5 结论

本文应用 Schwarzschild 反射系统,结合激光显微操纵器的特性,设计了指示光束与工作光束完全重合、光斑尺寸小的激光显微操纵器的光学

系统。实验结果表明,该系统满足设计要求,同时与手术显微镜耦联,提高了治疗精度。该操作系统属于非接触式治疗,有红色光点指示、准确率高、术野清晰、操作简单安全;而且有伤口愈合快、瘢痕小、感染少等优点。

## 参考文献:

- [1] 蔡松梅,杨建峰,陈玉玺,等. 双波长激光美容机的优化设计[J]. 激光与红外,2003,4(2):104-105.  
CAI S M, YANG J F, CHEN Y X, et al. . Optimal-design of two wavelength laser therapy system[J]. *Laser and Infrared*, 2003,4(2):104-105. (in Chinese)
- [2] 李迎新. 激光治疗设备的进展与发展趋势[J]. 医疗设备信息,2004,19(11):1-4.  
LI Y X. The progress and development trend of laser medical devices[J]. *Medical Device Information*, 2004, 19(11): 0001-04. (in Chinese)
- [3] 李亚华,李正佳,朱长虹,等. 小型双波长 YAG 激光医疗仪特性研究[J]. 光电子·激光,1996,7(5):317-319.  
LI Y H, LI ZH J, ZHU CH H, et al. . The Characteristic research for small-size double-wavelength YAG medical laser[J]. *Optronics · Laser*, 1996,7(5):317-319. (in Chinese)
- [4] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:科学出版社,1983.  
YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing:Science Press,1983. (in Chinese)

作者简介:李 宁(1984—),女,吉林通化人,硕士研究生,主要从事光学设计与光学仪器方面研究。

E-mail:lxn1984521@163.com

唐 勇(1956—),男,湖北人,硕士生导师,主要从事光学仪器设计和光电检测方面研究。