

文章编号 1004-924X(2018)11-2654-08

用于光学相干层析系统的 三反射镜光束整形扫描机构的 optical 设计

王方雨^{1,2}, 孙 强^{1*}, 常 颖³, 戴 明¹, 刘昕晖⁴, 王 成⁵

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

4. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

5. 吉林亚泰中科医疗器械工程技术研究院股份有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了实现高斯圆斑向平顶线斑的转化, 提出了一种用于高斯光束整形的三反射镜光学系统。利用环形面对两个相互垂直方向的光线会聚、发散作用不同, 标准球面具有旋转对称性质, 以及二次曲面系数、非球面系数可以实现高斯分布转化为平顶分布的原理, 采用 ZPL 语言与自动优化结合的方法完成了系统设计。设计得到了一个方向平顶的矩形光斑以及平顶线斑, 整形效果良好, 并结合在光学相干层析(OCT)系统中对样品照明或扫描的实际要求, 通过小角度($\pm 2^\circ$)旋转系统第一个反射镜对所得线斑进行扫描, 在扫描角度内可以实现线性扫描(扫描范围约为 $10\text{ mm} \times 11\text{ mm}$)。结果表明, 该三反射镜系统满足轻量化、结构紧凑、不受工作波长影响的要求, 是一种可行、有效的方案。

关键词: 光学系统设计; 光学相干层析; 激光光束整形; 反射镜系统设计

中图分类号: O439 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182611.2654

Optical design of three-mirror beam shaping scanner for optical coherence tomography

WANG Fang-yu^{1,2}, SUN Qiang^{1*}, CHANG Ying³, DAI Ming¹, LIU Xin-hui⁴, WANG Cheng⁵

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Department of Optical Engineering, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China;*

4. *College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;*

5. *Jilin Yatai Zhongke Medical Device Engineering Technology
Institute Limited by Share Ltd., Changchun 130000, China)*

* *Corresponding author, E-mail: sunq@ciomp.ac.cn*

Abstract: A system of three mirrors was proposed for beam shaping. This assembly of mirrors can

收稿日期: 2018-04-24; 修订日期: 2018-05-23.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20180201013GX)

convert a Gaussian distribution spot into a uniform linear distributed toroidal surface with conic and high order terms. Standard surfaces were utilized to control the beam propagation direction and energy distribution. The default merit function and optical modeling were combined to incorporate operands to optimize the system's efficiency. Rectangular and line fields with uniform energy distribution in one direction were successfully demonstrated. This has direct application to illumination or scanning in optical coherence tomography. In the case of the latter, the line is linear within a specific scanning range of $10\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ of the first mirror. It can be concluded that this system can facilitate a simpler CT setup and is effective over a wide range of wavelengths.

Key words: optical system design; optical coherence tomography; laser beam shaping; mirror system design

1 引言

光学相干层析(Optical Coherence Tomography, OCT)技术基于低相干干涉技术及共聚焦显微镜技术,实现对被测样品的断层扫描,广泛应用于医学等领域^[1]。OCT系统样品臂的构成与共聚焦显微系统类似,原理是使光源处的针孔、待测物品及探测器位置处的针孔处于物像共轭位置。从光源出射的光经物镜照射处于焦平面的被测样本,在针孔的滤波作用下,只有来自样品表面的光才能通过,从而显著提高了系统信噪比和成像清晰度,一定程度上抑制了杂散光。同时,由于焦点处的光会聚,其光强远大于非焦点处,而非焦面光被针孔阻拦,因而,共焦系统成像具有很高的信噪比且景深近似为零。然而,以点聚焦模式对样品进行二维、三维成像时需要引入扫描振镜,从而会对成像质量、系统精度等造成一定影响。

为了实现高速、高品质断层成像,需要通过确定整形方案完成整形扫描机构的光学系统设计,获得能量均匀分布的线光斑,用于光学相干层析系统,完成对待测物的照明或扫描,以达到静态条件下二维成像,增加一个方向扫描完成三维成像。其中,通过光束整形的方法将高斯圆斑整形成能量均匀分布的线光斑是关键。目前,对激光光束整形使它平顶化的光学器件主要有衍射元件^[2]、液晶空间光调制器^[3]、双折射透镜^[4]、非球面透镜组^[5]、微透镜阵列^[6]等。但这些元件的整形效果均随系统选用波长的变化而变化。针对此问题,反射式整形方法被提出,即利用反射镜的组合同时完成能量由高斯分布向平顶分布以及光斑形状从圆形向线型两方面的转化。Malyak^[7]首先提出了无中心遮拦的反射式高斯光束整形系统。Vladimir Oliker^[8]在对两镜光束整形系统的研究

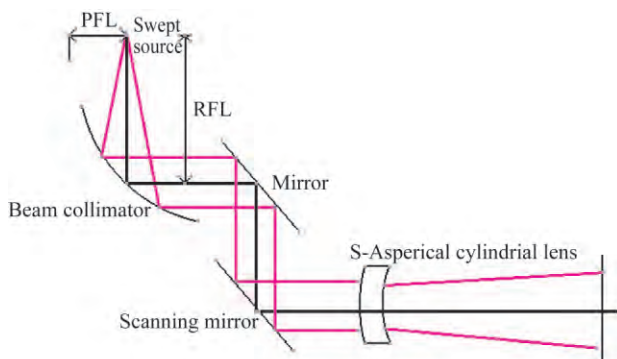
中,提出了一组二阶非线性偏微分方程描述反射镜面形,其优点是不受入射光束和出射光束对称性的影响,在入射面和出射面坐标关系确定的情况下,可以将任意分布的准直入射光束整形为所需分布的准直出射光束,但是对于二阶非线性偏微分方程组的数值求解和编程比较困难。孟祥翔等^[9]设计了一种无中心遮拦离轴两反整形系统,将椭圆高斯光束成功转化为圆形平顶光束,但设计过程过于繁琐。杜猛等^[10]利用微反射镜阵列对光束进行整形,并给出了仿真结果,具有一定可靠性,但由于需要有大量数目的微镜阵列来达到较好的整形效果,成本很高。

本文提出一种基于三反射镜的光束整形系统设计,通过不同的优化方式,可以实现高斯圆斑向不同长宽比的单方向平顶矩形光斑的转化,也可以实现高斯圆斑向平顶线斑的转化,并可以通过一定角度内转动第一个反射镜完成线斑的扫描。系统设计方法简便易操作,且所设计的系统结构简单、紧凑可用于折叠光路中。

2 高斯光束整形理论

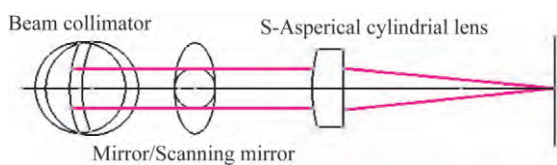
光束整形的最终目的是通过所设计的系统把能量呈高斯分布的圆斑转化成能量均匀分布的线斑。对于这方面,相关研究人员之前有过一些研究^[11],整形原理是将柱透镜成像原理与非球面整形原理两种因素相结合,通过设计一片带有球面的非球面柱透镜来获得能量均匀分布的线斑。在Zemax中选择Toroidal(环形面)及附加的Conic(二次曲面系数)、高次非球面系数等为变量,以ZPL语言及自动优化为方法,最终完成了该非球面柱透镜的设计。图1所示为原柱透镜系统获取线斑的原理,其中RFL(Reflected Focal Length)为光束准直器反射焦距,PFL(Parent Focal

Length)为光束准直器母焦距。本文在此基础上,提出了基于三片反射镜的光学系统来达到整形目的。与圆柱透镜系统相比,该系统具有轻量化、不受使用波段范围变化的影响,且应用于光学相干层析系统中能够对样品进行照明或者小范围扫描。



(a) 子午方向

(a) In meridian direction



(b) 弧矢方向

(b) In sigittal direction

图 1 柱透镜系统设计原理图

Fig. 1 Principle diagram of cylindrical lens system

本文的方案是将原系统中柱透镜的球面以及环形面两因素分离,这是由于环形面上的非球面系数及二次曲面系数决定了光斑的平顶度,而环形面可以在子午或弧矢方向对光线起到会聚或者发散作用,球面则可以通过半径的优化在旋转对称的各个方向进一步调整光束,最终实现一方向会聚一方向小角度发散得到线斑。整个光学相干层析系统原理结构如图 2 所示,所要设计的光束整形扫描系统为方框内结构,光束整形的具体实现方法是:首先实现一个方向平顶矩形光斑的获取^[12],在 ZPL 语言中先设置出射光束口径、样本数和束腰半径等,之后批量添加 REAY 操作数(操作数数量由样本数决定),操作数权重设为 1,取值为以基模高斯光束表达式作为入射光光强分布表达式及以平顶洛伦兹函数作为出射光表达式所推导出的入射光、出射光对应的坐标关系式:

$$r_2 = R_0 \sqrt{1 - \exp\left(-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right)}, \quad (1)$$

其中: r_1, r_2 分别为入射面上任意光线和与之对应的光线在入射面、出射面的坐标, ω_0 为高斯光束束腰, R_0 为平顶光的半径。然后在 Zemax 中选取所设计第二面反射镜的面型(类型为 Toroidal) conic 系数和二阶、四阶非球面系数以及半径为变量。环形面由一个环形非球面形状的矩形面组成,是由 YZ 平面内的曲线绕平行于 Y 轴且与 Y 轴相距 R 的轴旋转而成的曲面,YZ 面内的曲线公式为:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + \alpha_1 y^2 + \alpha_2 y^4 + \alpha_3 y^6 + \alpha_4 y^8 + \alpha_6 y^{12}, \quad (2)$$

其中: c 是 YZ 平面内曲线的曲率半径倒数, $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 为非球面系数, k 为 conic 值。最后写入 OPTIMIZE 实现优化,运行 Macros 可得到在 X, Y 其中一个方向上平顶化的矩形光斑。

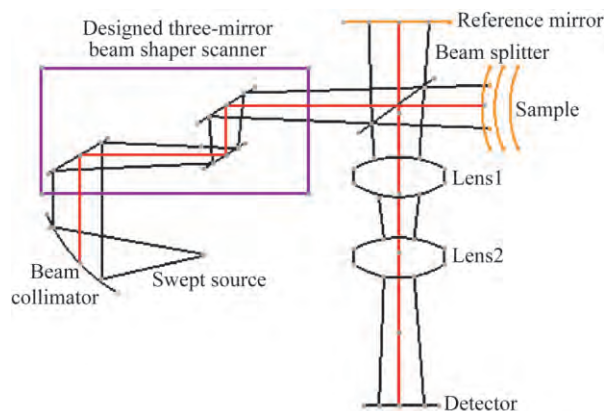


图 2 光学相干层析(OCT)系统原理结构图

Fig. 2 Principle schematic of OCT system

继续添加第一、三面即标准球面反射镜半径及最后一个反射面到像面的距离为变量,在 Merit Function 中添加默认优化函数,以 RMS, Spot X 为标准,自动优化后一圈、两圈逐步得到长宽比变大的矩形。当最后一面距离增大到所需长度时,去掉距离这个变量,自动优化直到优化停止即可获得线斑。

在 Zemax 中对第一个反射镜的旋转角度即扫描角度设置多重组态,实现小范围的线斑扫描,分析其扫描线性及光斑是否变形等。

3 光束整形光学系统设计

光束整形光学系统的设计及优化流程见图 3。

光束准直后,在 Zemax 中设置视场为零,平行光入射。首先搭建三反射镜模型,半径均设为无穷大,适当设置反射镜间的距离。系统要求如下:波长取生物学领域常用的 $1.26 \sim 1.36 \mu\text{m}$,设第一面反射镜为孔径光阑,入瞳直径要求 8.52 mm ,高斯光束的分布因子 G 值设置为 1.2 。最后一面到像面的距离要小于 60 mm ,图 4 为初始结构。

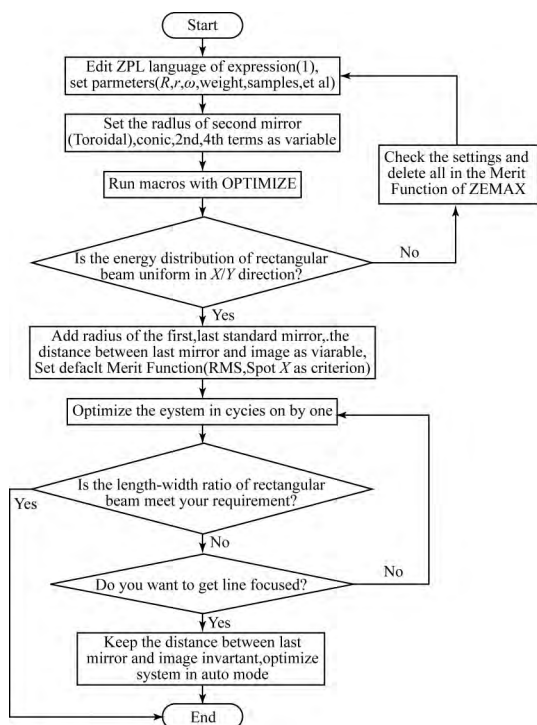
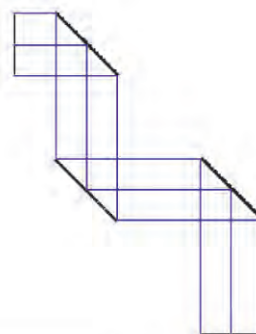


图 3 光束整形光学系统的设计及优化流程

Fig. 3 Flow chart of design and optimization for beam shaping system



3D LAYOUT

图 4 三反系统初始设计图

Fig. 4 Layout of initial three-mirror system

图 5 为 X, Y 两个方向的照度图,可以看出两个方向能量均呈现高斯分布的状态,这与所设置的 G 值基本相符,初始系统最后一个反射镜距离像面 20 mm 。

首先在 ZPL 语言中将相关参数设置好,取样数,高斯光束的束腰直径设为约 3.9 mm ,平顶光束直径设置为 5.3 mm 等,并选择第二个反射镜的环形面半径、二次曲面系数、二次、四次非球面系数作为变量、运行 Macros 完成第一次自动优化。图 6 是经过优化后 X, Y 方向的照度图及光斑形状图,可以看到,能量在 Y 方向已经基本实现均匀化,由于仅使用一个环形面,因此只能完成一个方向的整形,这符合环形面的整形原理。所得到的光斑接近矩形,长度约为 10 mm ,这与所设置的平顶光直径有关,宽度约为 8 mm ,长宽比为 1.25 。

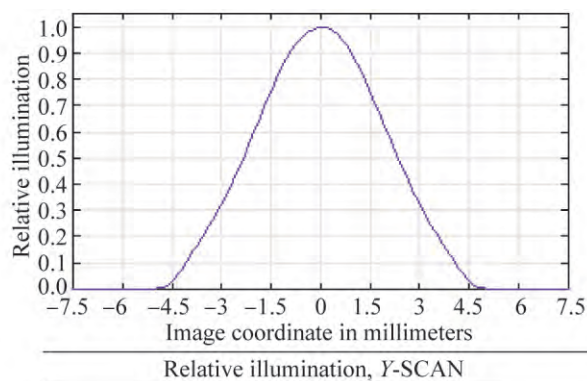
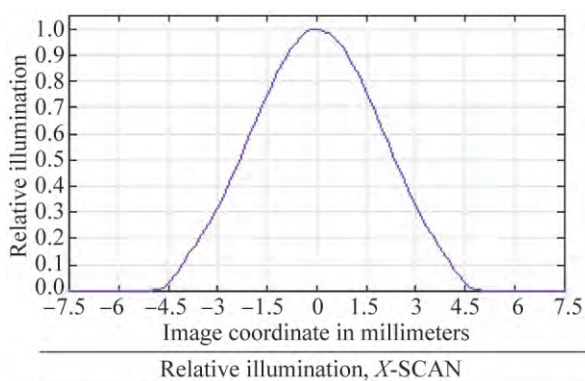


图 5 初始三反射镜系统 X, Y 方向照度图

Fig. 5 Illumination diagrams in X, Y directions of mirrors system

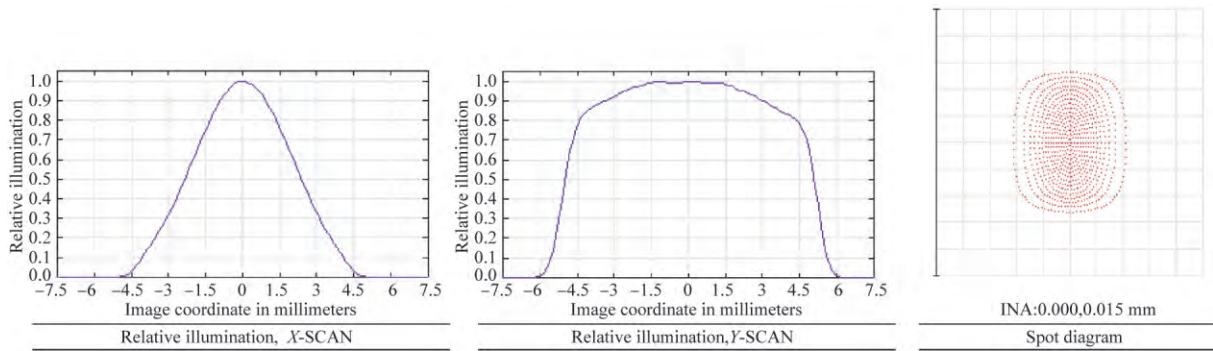


图 6 运行 Macros 后的三反射镜系统 X,Y 方向照度及光斑图

Fig. 6 Illumination diagrams in X, Y directions and spot diagram of mirrors system after running macros

之后添加第一、三反射镜半径、最后一面到像面距离为变量。在 Merit Function 中选择以 RMS, Spot X 为默认优化函数, Spot Diagram 中光线密度设为 16, 逐圈优化。图 7、图 8 分别是优化一圈、三圈的 X, Y 照度图及光斑图, 可以看到, 优化一圈后光斑仍近似为矩形, 最后一个反射镜到像面的距离约为 27 mm, 矩形长约为 10 mm,

宽为 7.5 mm, 长宽比约为 1.3; 当优化三圈时矩形长宽比变化明显, 长度不变, 宽度约为 5 mm, 长宽比为 2, 最后一个反射镜到像面的距离约为 56 mm。两次优化过程中, 光斑始终保持一个方向能量的均匀化, 另一个方向能量呈高斯分布, 这与理论分析中使用一个环形面能达到一个方向整形的效果一致。

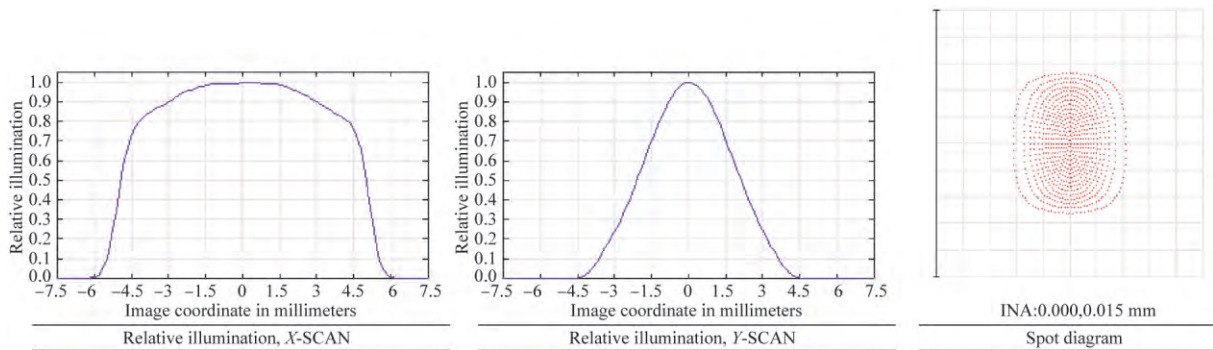


图 7 优化一圈的 X, Y 照度图及光斑图

Fig. 7 Illumination diagrams in X, Y directions and spot diagram after optimizing 1 cycle

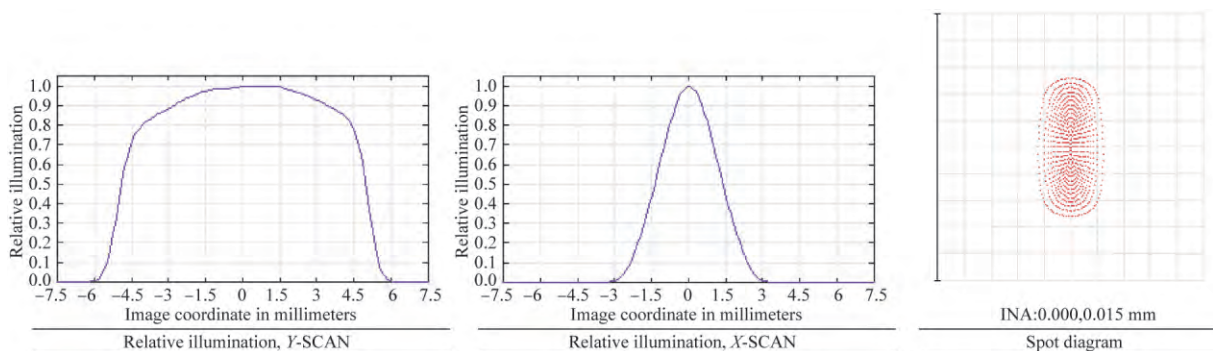


图 8 优化三圈的 X, Y 照度图及光斑图

Fig. 8 Illumination diagrams in X, Y directions and spot diagram after optimizing 3 cycles

4 获取平顶线斑的扫描系统光学设计

在获取一个方向平顶矩形光斑的基础上,完成获取平顶线斑的光学系统设计。经过之前的几圈优化,最后一面到像面的距离已经接近60 mm,因此这一参数不再作为变量,固定其值,系统其它参数要求见表 1。

表 1 整形系统设计指标

Tab. 1 Parameters of beam shaping system

参数	值
Wavelength range/ μm	1.26~1.36
Entrance pupil diameter(D)/mm	8.6
Output beam radius(R_0)/mm	5.3
Beam waist radius(ω_0)/mm	3.9
Line width/ μm	≤ 200
The thickness between last surface and image/mm	≤ 60

选择自动优化,不控制圈数,直到优化自动停止,最后优化所得到的线斑及 X、Y 方向的照度如图 9 所示。图中,线斑长度约为 11 mm,宽度很窄,满足 $\leq 200 \mu\text{m}$ 的要求,可以看出长宽比已经很大,系统最后一个反射镜与像面间的距离为 56 mm,所有参数均符合表 1 中的指标要求。在能量分布方面,虽然没有达到很高的平顶度,但就一个环形面而言,其整形效果已经很好。系统最终结构如图 10 所示。

为了在 OCT 系统样品臂中应用所得到的线斑来完成对样品表面的小范围扫描,将系统内第一个反射镜沿 Y 轴转动 $\pm 2^\circ$ 。扫描系统一般为像方远心光路^[13],以保证像面照度的均匀性,而本文所设计的系统要结构紧凑,且扫描范围小,因此,非像方远心光路对系统照度影响不大。设计后的系统在最大扫描角度下,与像面法线夹角约为 4° ,根据照度公式: $E = E_0 \cos^4 \omega$,其中 E_0 为中心照度, ω 为与像面法线的夹角,计算 E 约为中心照度的 99%。

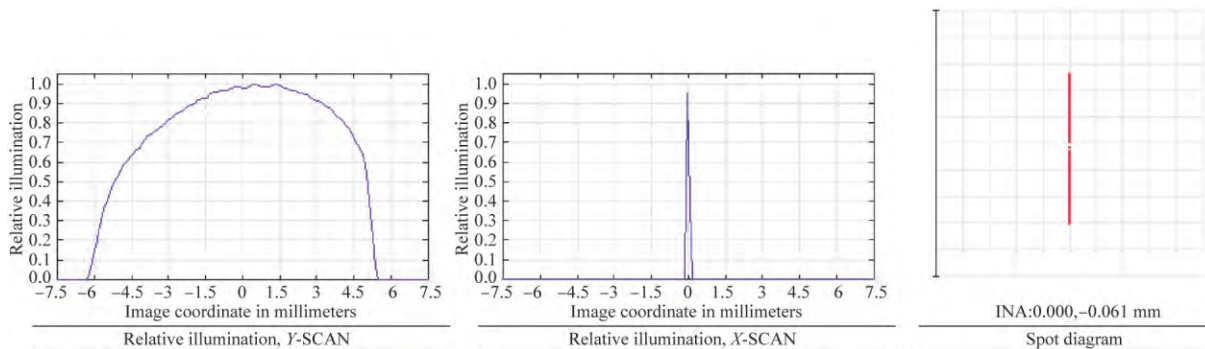


图 9 线斑及 X、Y 方向的照度图

Fig. 9 Illumination diagrams in X, Y directions and spot diagram

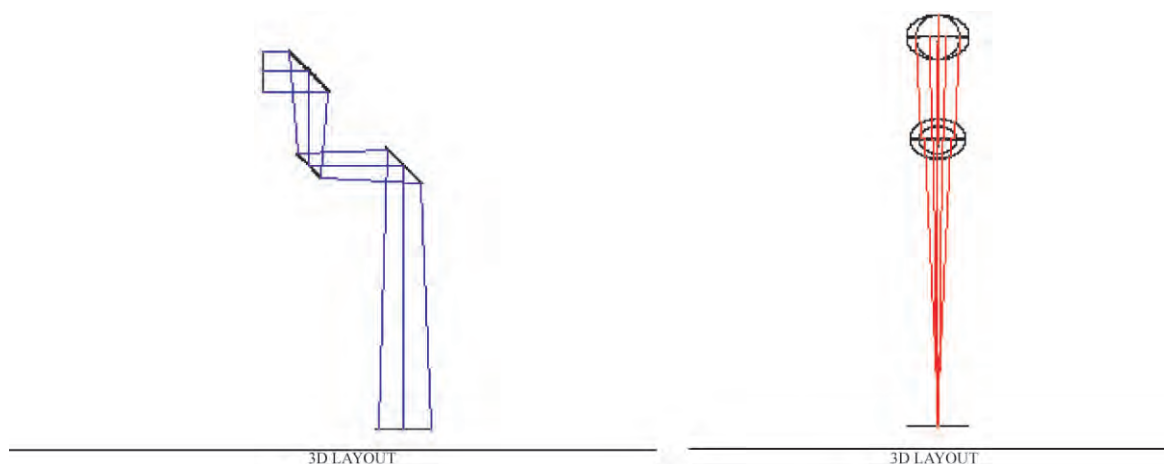


图 10 光束整形光学系统结构图

Fig. 10 Layout of beam shaping system

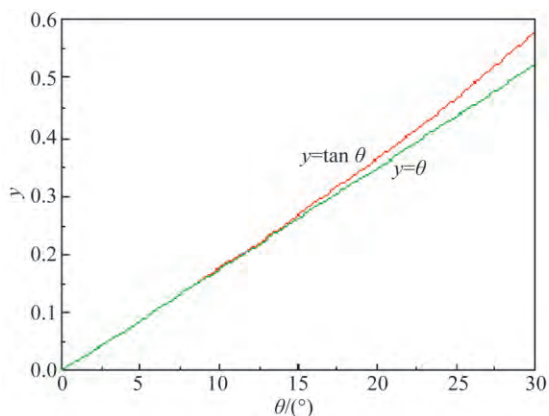


图 11 理想、实际像高与扫描角度的关系曲线

Fig. 11 Relations of scanning angle with ideal, real image heights respectively

另一方面,扫描系统需要保留一定畸变量以保证像高与扫描角的关系为线性,即只要扫描振镜匀速偏转,激光光束在待测样品面上的光斑将

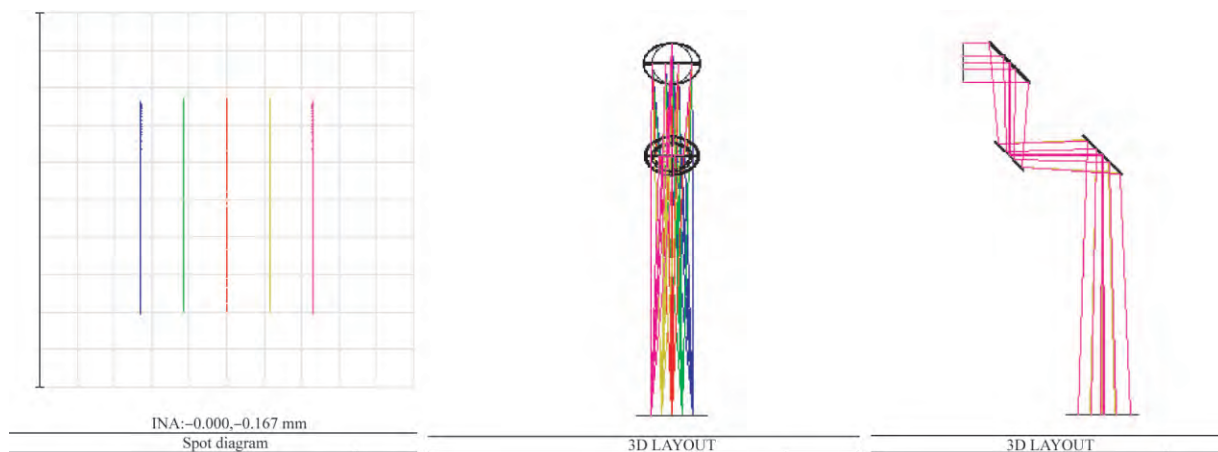


图 12 扫描系统结构及线斑图

Fig. 12 Layout of scanning system and spot diagram

5 结 论

本文设计了一种基于三片反射镜的高斯光束整形系统,实现了光束能量呈高斯分布的圆斑向能量在一个方向均匀分布的矩形光斑以及均匀分布的线斑的转化。设计方案基于环形面对两个相互垂直方向的光线作用不同,标准球面具有旋转对称性质可以对光束在各个方向进行相同程度调整,以及二次曲面系数、非球面系数可以实现高斯

做匀速运动,从而完成匀速线性扫描。由于理想光学系统的像高 $y' = f' \tan \theta$,若要想获得实际像高 ($y' = f' \theta$),通过计算,当扫描角度 θ 小于一定值时,二者呈线性关系^[14],如图 11 所示。图中省略了焦距,直接比较了 θ 及 $\tan \theta$ 的差异,从而导致实际像高与理想像高产生差异。可见,对于所设计的系统,扫描角度小,所以可以不考虑畸变补偿问题,即可以实现线性扫描。

图 12 为所设计的扫描系统结构图及线斑图,可以看到线斑的扫描结果与理论分析相符,由于是小角度扫描,基本保持了线性,线斑图是在扫描角度为 $-2^\circ, -1^\circ, 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 下得到的,而且从结构图中也可以看出,已接近像方远心光路。由此表明,基于三反射镜的光束整形及扫描系统能将能量呈高斯分布的圆斑成功地转化为能量均匀分布的线斑,并可用于小范围扫描。

分布转化为平顶分布的原理,以编写 ZPL 语言与自动优化相结合的方法完成了整个系统的设计,并分析了所得矩形光斑、线斑长宽比、平顶度等特性。在此基础上,一定范围内 ($\pm 2^\circ$) 旋转第一个球面反射镜完成了线斑的匀速扫描(扫描范围约为 $10 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$),该整形系统可以应用在光学相干层析(OCT)样品臂中实现对生物组织待测样品的照明或扫描。所设计的系统较透镜系统轻便、紧凑,且不受波段变化影响,结果具有一定可靠性。

参考文献:

- [1] 秦玉伟. 润滑油膜厚度的光学相干层析成像测量 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1142-1148.
QIN Y W. Thickness measurement of lubricant film by optical coherence tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1142-1148. (in Chinese)
- [2] 刘华. 利用汉克尔变换设计高斯光束整形衍射元件的应用研究 [J]. 中国光学, 2016, 9(2): 277-283.
LIU H. Gaussian beam shaping diffractive optical element designed by Hankel transformation [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 277-283. (in Chinese)
- [3] 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0514001.
YU X CH, HU J SH, WANG L B. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001. (in Chinese)
- [4] 杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形 [J]. 光学学报, 2006(11): 1698-1704.
YANG X T, FAN W. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1698-1704. (in Chinese)
- [5] MA H T, LIU Z J, JIANG P Z. Improvement of Galilean refractive beam shaping system for accurately generating near-diffraction-limited flat-top beam with arbitrary beam size [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13105-13117.
- [6] 高慧芳, 刘钦晓, 刘鹏, 等. 单片式微型滤色膜 LCOS 的照明系统设计 [J]. 光电工程, 2011, 38(3): 100-104.
GAO H F, LIU Q X, LIU P, *et al.*. Illuminating system for single color filter LCOS panel micro-projector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3): 100-104. (in Chinese)
- [7] MALYAK P W. Two-mirror unobscured optical system for reshaping the irradiance distribution of a laser beam [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(22): 4377-4383.
- [8] OLIKER V. Optical design of freeform two-mirror beam-shaping systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 24(12): 3741-3752.
- [9] 孟祥瑞, 刘伟奇, 柳华, 等. 反射式椭圆高斯光束平顶整形系统 [J]. 发光学报, 2013, 34(7): 940-947.
MENG X X, LIU W Q, LIU H, *et al.*. A reflective optical system for converting elliptical Gaussian laser beam to flat-top beam [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(7): 940-947. (in Chinese)
- [10] 杜猛, 邢廷文, 袁家虎. 微反射镜阵列在光束整形中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1210-1214.
DU M, XING T W, YUAN J H. Application of micromirror array in beam shaping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1210-1214. (in Chinese)
- [11] 常颖, 王狮凌. 基于球面-非球面柱透镜的圆光斑高斯光束整形 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 060801.
CHANG Y, WANG SH L. Spot Gaussian beam shaping based on spheric-aspheric cylindrical lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060801. (in Chinese)
- [12] 高瑀含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统的光学设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1464-1471.
GAO Y H, AN ZH Y, LI N N, *et al.*. Optical design of Gaussian beam shaping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1464-1471. (in Chinese)
- [13] 郁道银. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
YU D Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 季轶群. 大工作面 F-Theta 镜头的设计研制 [D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
JI Y Q. *Study on Optical Design of Large Working Area F-Theta Lens* [D]. Suzhou: Suzhou University, 2006. (in Chinese)

作者简介:



王方雨(1985—),男,山东郓城人,助理研究员,博士研究生,2008年于东北师范大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事医用光电仪器的研究。E-mail: 270305453@qq.com



孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,主要从事光学仪器的研制。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn