

基于透镜阵列的眼科准分子激光光束整形与匀光系统

厉以宇 王伟 陈娇洁 戴志岳 林铎儒 郑聪

(温州医学院眼视光学院, 浙江 温州 325027)

摘要 为提高屈光手术中准分子激光的能量利用率和光斑均匀性,设计了一套由双排透镜阵列和会聚透镜组成的准分子激光光束整形与匀光系统。借助近轴光学计算发现,通过调节双排透镜阵列的间距可以改变聚焦光斑的尺寸,通过调节透镜阵列与会聚透镜之间的距离可以改变光学系统的整体长度而不影响聚焦光斑的形态。利用光线追迹方法对该系统进行了模拟分析,在会聚透镜像方焦平面上获得了呈均匀分布的方形聚焦光斑,并给出了聚焦光斑尺寸随双排阵列透镜间距的变化过程。分析了接收面离焦对光斑尺寸和能量分布产生的影响,指出所设计的光束整形与匀光系统可以满足准分子激光屈光手术对激光光斑质量的要求。

关键词 激光光学;光束整形;匀光;准分子激光;透镜阵列

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.081403

Beam Shaping and Homogenization System with Lens Array for Ophthalmic Excimer Laser Refractive Surgery

Li Yiyu Wang Wei Chen Jiaojie Dai Zhiyue Lin Duoru Zheng Cong

(School of Optometry and Ophthalmology, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325027, China)

Abstract In order to improve the laser energy efficiency and beam uniformity in excimer laser refractive surgery, a novel laser beam shaping and homogenization system based on double lens array and a converging lens is designed. The prototype is evaluated by paraxial optics over a range of system parameters. A linear relationship is observed between the size of focusing laser spot and the spacing of double lens array. The overall length of the component can be changed by adjusting the distance between the lens array and the converging lens without affecting the final form of focusing spot. Ray tracing simulation method demonstrates the uniform square focusing spot on the back focal plane of the converging lens, and the change process of the focusing spot size depending on the spacing of double lens array. The impact of defocus on spot size and energy distribution is also analyzed. This beam shaping and homogenization system can meet with the quality requirements of focusing laser spot for excimer laser refractive surgery.

Key words laser optics; beam shaping; beam homogenization; excimer lasers; lens array

OCIS codes 140.0140; 140.2180; 140.3300

1 引言

屈光手术一般使用 193 nm 氟化氩(ArF)准分子激光来切削角膜组织,它的切削机制是光化学切削,即利用高能量的紫外激光直接打断分子键,从而达到切削组织的目的^[1~4]。由于对周围组织热损伤极小,且切削准确,准分子激光治疗屈光不正得到迅速普及和发展。准分子激光的能量密度一般在 100~200 mJ/cm²,激光光束尺寸约为 6 mm×3 mm。屈光手术中,为得到圆形或方形的聚焦光斑以利于组织切削,通常要在激光光路中设置圆形或方形的小孔光阑来控制激光光束的形状,造成约 50%的激光能量将被光阑拦截而损失。屈光手术中使用的准分子激光主要有两种输出方式:可变光斑式和扫描式,扫描式又分为飞点扫描和裂

收稿日期: 2011-02-21; 收到修改稿日期: 2011-03-09

基金项目: 浙江省重大科技专项(2010C03002,2008C13001)、浙江省公益性技术应用研究计划(2010C31060)和科技部国际合作重点项目(2008DFA307050)资助课题。

作者简介: 厉以宇(1980—),男,博士,讲师,主要从事医用光学仪器和光学薄膜等方面的研究。

E-mail: liyiyu2008@gmail.com

隙扫描。飞点扫描的频率在 200~400 Hz 之间,聚焦光斑的直径在 0.6~1.0 mm 之间。聚焦光斑的均匀性对屈光手术的结果影响较大。聚焦光斑能量不均匀有两种表现方式,1)局部微小的不均匀,即光斑中心出现热点或冷点,导致角膜局部混浊和杂散光。2)聚焦光斑总体不均匀或对称性不良,例如呈高斯分布的对称光斑,其中心能量强于周边,容易引起中心过矫。

提高准分子激光的能量利用率和聚焦光斑的均匀性^[5~8]对于激光角膜屈光手术具有重要意义。本文基于双排透镜阵列^[9~12]结构为眼科准分子激光设计出一套专用的光斑整形与匀光系统,对系统的结构参数进行了分析,并利用光线追迹方法对该系统进行了模拟^[13~15]。

2 系统结构设计

准分子激光的光束整形与匀光系统由双排透镜阵列和一个会聚透镜组成,如图 1 所示。

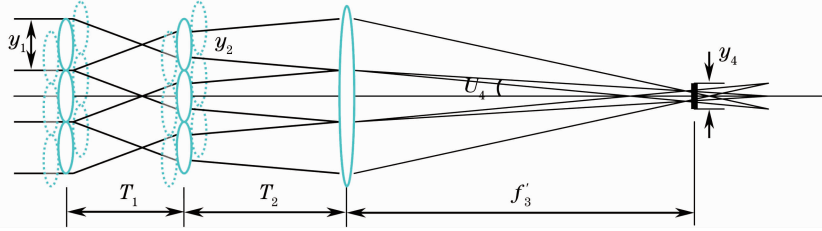


图 1 光束整形与匀光系统结构

Fig. 1 Optical system for beam shaping and homogenization

透镜阵列中微透镜呈方形,边长为 y_1 ,双排透镜阵列间距为 T_1 ,透镜阵列与会聚透镜的距离为 T_2 ,激光平行于光轴入射,聚焦光斑位于会聚透镜的像方焦平面上,聚焦光斑成方形,光斑边长为 y_4 ,定义系统放大倍率为 $\beta = y_4/y_1$,经过推导有

$$\beta = \frac{y_4}{y_1} = -f'_3 \left(\frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{T_1}{f'_1 f'_2} \right), \quad (1)$$

式中 f'_1 和 f'_2 分别为前后透镜阵列的焦距,这里设前后透镜阵列的结构完全相同,即 $f'_1 = f'_2 = f'_{LA}$ 。 f'_3 为会聚透镜的焦距。激光光束通过第一块透镜阵列后,离散成多路子光束,每个子光束在第二块透镜阵列的微透镜表面形成边长为 y_2 的方形照明区域,为避免相邻微透镜间的子光束出现串扰,要求 $y_2 < y_1$,由此可推得结构约束条件

$$T_1 < 2f'_{LA}. \quad (2)$$

子光束经过第二块透镜阵列后,光束发散角缩小,可以减小会聚透镜的通光孔径,所以第二块透镜阵列具有场镜的作用。由(1)式可知, T_2 对系统放大倍率 β 没有影响,当 T_2 改变时,聚焦光斑尺寸保持不变,子光束的像方孔径角 U_4 则会改变,有

$$\frac{dU_4}{dT_2} = -\frac{y_1}{f'_3} \left(\frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{T_1}{f'_1 f'_2} \right), \quad (3)$$

可见,当双排透镜阵列的结构参数固定且会聚透镜的焦距也固定时,子光束的像方孔径角 U_4 与 T_2 成线性关系。(3)式计算结果的数量级一般在 10^{-6} ,说明 T_2 对 U_4 的影响非常小,几乎可以忽略。因此, T_2 能够用来调节光学系统的整体长度,而不会影响聚焦光斑的最终形态。

3 模拟分析

双排透镜阵列的结构如图 2 所示,透镜阵列的有效工作面积为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,阵列数为 20×10 个,因此每个微透镜的尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$,微透镜的面型表达式选用

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}}, \quad (4)$$

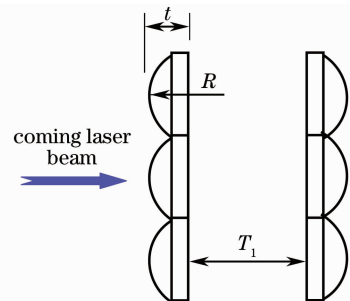


图 2 双排透镜阵列结构

Fig. 2 Structure of double lens array

式中 $c = 1/R$, R 是微透镜的曲率半径, k 是二次曲面系数, 取 $R = 16.823 \text{ mm}$, $k = -0.574975$, 整体厚度 $t = 1.60 \text{ mm}$, 玻璃材料选用熔融石英, 可得微透镜焦距为 $f'_{LA} = 30 \text{ mm}$. 两个透镜阵列的平面一侧朝内相对排列, 前后微透镜的中心保持同轴. 193 nm 的准分子激光由第一块透镜阵列的微透镜一侧入射, 双排透镜阵列间距为 $T_1 = 55.57 \text{ mm}$, 透镜阵列与会聚透镜的距离为 $T_2 = 50 \text{ mm}$. 会聚透镜的焦距为 $f'_3 = 550 \text{ mm}$, 采用平凸结构. 利用光线追迹方法对该系统进行模拟计算, 如图 3 所示.

入射激光的光斑呈长方形, 尺寸为 $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 能量分布均匀. 前排透镜阵列将入射的激光光束分割成多个子光束, 在其后焦面上形成与微透镜阵列数目相同的点光源阵列. 后排透镜阵列和会聚透镜一起构成物方远心光学系统, 将点光源阵列发出的子光束会聚, 并在会聚透镜像方焦平面上的有限区域内叠加. 图 4 是模拟得到的会聚透镜像方焦平面上的光线分布情况. 图 5 是聚焦光斑的能量在焦平面内沿 x 轴和 y 轴方向的线积分情况, 积分数值经过归一化, 可见, 在这两个方向上, 光斑能量都呈均匀分布.

由(1)式可知, 在透镜焦距确定的情况下, 聚焦光斑尺寸只和 T_1 有关, 有

$$\frac{dy_4}{dT_1} = \frac{y_1 f'_3}{f'_1 f'_2}, \quad (5)$$

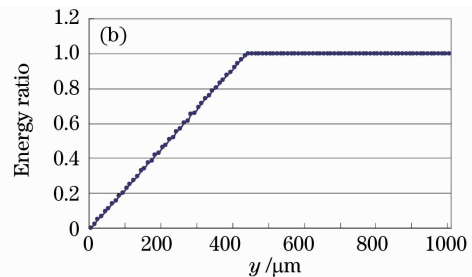
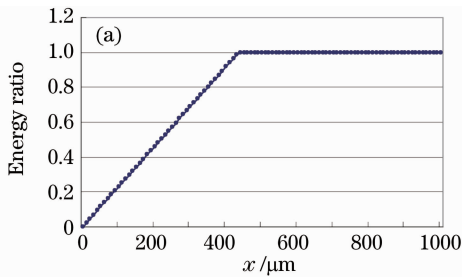


图 5 聚焦光斑能量在焦平面内沿(a) x 轴和(b) y 轴方向的线积分

Fig. 5 Linear integral of energy distribution of the focusing spot along (a) the x axis and (b) y axis on the focal plane

当 $y_1 = 0.6 \text{ mm}$, $f'_1 = f'_2 = f'_{LA} = 30 \text{ mm}$, $f'_3 = 550 \text{ mm}$ 时, 聚焦光斑尺寸 y_4 随双排阵列透镜间距 T_1 的变化过程如图 6 所示. 在利用 T_1 来控制聚焦光斑尺寸的过程中, 聚焦光斑的均匀性保持良好.

当 $T_1 = 55.57 \text{ mm}$ 时, 由(3)式计算可得

$$\frac{dU_4}{dT_2} = -5.37 \times 10^{-6}.$$

说明可以用 T_2 来调节光学系统的整体长度, 而不会对聚焦光斑产生影响.

另一方面, 在屈光手术中, 角膜面型为球面, 不可能与聚焦透镜像方焦平面完全重合, 所以, 当会聚光束到达角膜表面不同区域时会产生一定的离焦. 设会聚透镜

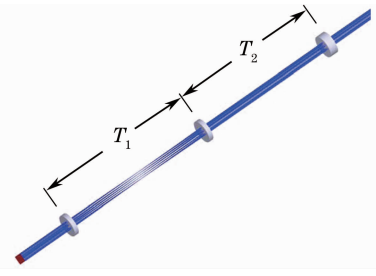


图 3 光线追迹模拟光束整形与匀光系统

Fig. 3 Ray tracing simulation of beam shaping and homogenization system

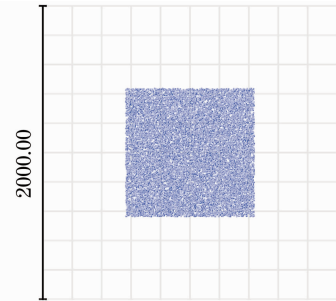


图 4 会聚透镜像方焦平面上的聚焦光斑能量分布, 显示区域 $2000 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$

Fig. 4 Energy distribution of the focusing spot on the focal plane in image space with displayed area of $2000 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$

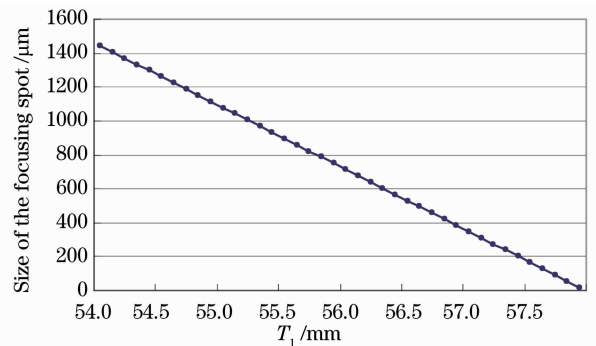


图 6 聚焦光斑的尺寸随双排阵列透镜间距 T_1 的变化关系

Fig. 6 Size of the focusing spot changes with the spacing T_1 of the double lens array

到角膜的距离为 T_3 , 对于近轴的子光束, 经过推算可得

$$\frac{dy_4}{dT_3} = y_1 \left\{ -\frac{1}{f'_1} - \frac{1}{f'_2} + \frac{T_1}{f'_1 f'_2} - \frac{1}{f'_3} \left[1 - \frac{T_1}{f'_1} + T_2 \left(-\frac{1}{f'_1} - \frac{1}{f'_2} + \frac{T_1}{f'_1 f'_2} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

当 $T_2 = 50$ mm, 其余参数值同上时, 有

$$\frac{dy_4}{dT_3} = -1.8 \times 10^{-3}.$$

说明对于近轴子光束, 接收面的离焦对光斑尺寸的影响较小, 这是因为近轴子光束的像方孔径角 U_4 很小。但是远轴子光束由于像方孔径角相对较大, 接收面上的光斑尺寸容易受离焦影响。图 7 利用光线追迹方法计算了离焦量 ΔT_3 与相应接收面上光斑整体尺寸之间的关系, 假设所允许的方形光斑尺寸变化范围在 0.86~0.88 mm 之间, 则相应的离焦量必须控制在 $-3.5 \sim 8$ mm, 这一离焦量已经大于角膜从顶点到 6 mm 孔径带的面型高度落差, 完全能够满足屈光手术的要求。由离焦引起的光斑能量的非均匀分布是不能避免的, 尤其是在光斑边缘, 能量将会出现下降, 光斑边界变得模糊(如图 8 所示)。

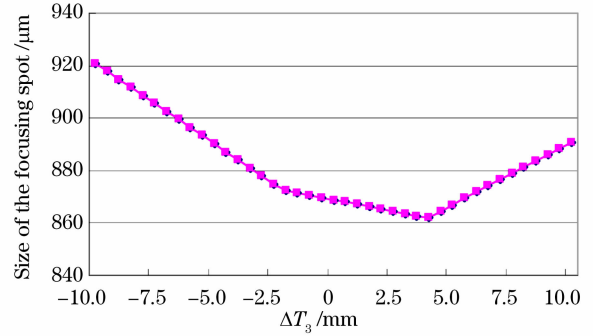


图 7 接收面上光斑尺寸随离焦量 ΔT_3 的变化关系
Fig. 7 Size of the light spot on the receiving surface changes with defocus ΔT_3

假设所允许的方形光斑尺寸变化范围在 0.86~0.88 mm 之间, 则相应的离焦量必须控制在 $-3.5 \sim 8$ mm, 这一离焦量已经大于角膜从顶点到 6 mm 孔径带的面型高度落差, 完全能够满足屈光手术的要求。由离焦引起的光斑能量的非均匀分布是不能避免的, 尤其是在光斑边缘, 能量将会出现下降, 光斑边界变得模糊(如图 8 所示)。

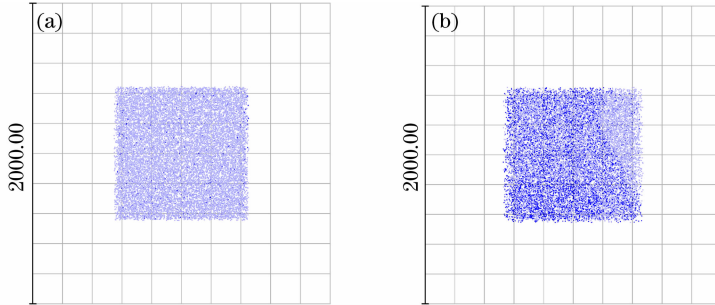


图 8 离焦对聚焦光斑能量分布的影响。(a) $\Delta T_3 = -3.5$ mm; (b) $\Delta T_3 = 8$ mm

Fig. 8 Energy distribution of the light spot on the receiving surface with defocus. (a) $\Delta T_3 = -3.5$ mm; (b) $\Delta T_3 = 8$ mm

4 结 论

双排透镜阵列和会聚透镜的组合系统可以实现准分子激光的光束整形和匀光的双重目的。该系统在任意的激光能量分布和光束形状情况下, 都能充分利用入射激光的能量, 得到方形的分布均匀的聚焦光斑, 能够在屈光手术中提高准分子激光的利用率和手术的稳定性。在该系统中, 通过调节双排透镜阵列的间距可以改变聚焦光斑的尺寸, 光学系统的整体长度则由透镜阵列与会聚透镜间的距离来控制, 系统结构具有较大的调节自由度, 适用性强。

参 考 文 献

- 1 D. Carlos, R. Laura, M. L. Jesús *et al.*. Experimental evaluation of optimized ablation patterns for laser refractive surgery [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15292~15307
- 2 Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu *et al.*. Progress of excimer lasers technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2253~2270
余吟山, 游利兵, 梁 勳 等. 准分子激光技术发展 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2253~2270
- 3 D. Basting, G. Marowsky. *Excimer Laser Technology* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 361~372
- 4 D. Friedrich, L. Friedemann, L. Holger. *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 187~202
- 5 Zhou Chongxi, Du Chunlei, Xie Weimin *et al.*. Beam shaping and fiber coupling for LD stacks with micro-optical elements array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 452~455

- 周崇喜, 杜春雷, 谢伟民 等. 微光学元件阵列面阵 LD 光束整形及光纤耦合[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 452~455
- 6 Gao Hongyi, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1379~1382
- 高鸿奕, 楼祺洪, 董景星 等. XeCl 准分子激光光束均匀器及其应用[J]. 光学学报, 1996, **16**(10): 1379~1382
- 7 Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. A novel homogenizer to improve the excimer laser beam uniformity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 785~788
- 李红霞, 楼祺洪, 董景星 等. 一种改善准分子激光光束均匀性的新型均匀器[J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 785~788
- 8 Fan Guihua, Wu Jianhua, Sun Huayan *et al.*. Laser diode linear array collimated by lens combination array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(11): 32~36
- 樊桂花, 吴健华, 孙华燕 等. 采用组合透镜阵列准直半导体激光器线阵[J]. 光电工程, 2010, **37**(11): 32~36
- 9 M. T. Wayne, E. S. Robert, N. C. Jaime *et al.*. Evaluation of a diffractive, microlens-array beam shaper for use in acceleration of laser-driven flyers[C]. *SPIE*, 2001, **4443**: 166~177
- 10 A. Büttner, U. Zeitner. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using microlens arrays[J]. *Optical Engng*, 2002, **41**(10): 2393~2401
- 11 Y. Miklyaev, D. Hauschild, A. Mikhailov *et al.*. Beam shaping on the base of micro lenslet arrays with the help of diffraction and interference effects[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666308
- 12 N. Lindlein, A. Bich, M. Eisner *et al.*. Flexible beam shaping system using fly's eye condenser[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(12): 2382~2390
- 13 Z. Maik, L. Norbert, V. Reinhard *et al.*. Microlens laser beam homogenizer-from theory to application[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666302
- 14 C. H. Scott, M. D. Fred. Laser beam shaping via conventional design software[C]. *SPIE*, 2001, **4443**: 36~46
- 15 Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng *et al.*. Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(1): 44~47
- 黄峰, 贾文武, 汪岳峰 等. 多孔径光束积分激光匀束器理论与设计[J]. 激光与红外, 2010, **40**(1): 44~47