

文章编号: 1001-3806(2010)04-0520-05

用双平凸薄透镜组聚焦高斯激光束

杨秋平, 叶兵*

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 合肥 230009)

摘要: 为了研究高斯激光束经过一种双平凸薄透镜组构成的复合光学系统的聚焦特性,采用矩阵光学方法,得到了高斯激光束经复合光学系统聚焦后光斑半径和像距的计算公式,结合数值计算分析了系统中各参量的变化对复合光学系统的稳定性和束腰处光斑半径的影响,并进一步讨论了高斯激光束经复合光学系统的聚焦特性。结果表明,通过控制各相关参量的取值,复合光学系统会比较稳定,能够获得较小的光斑半径;并通过实验测量,实现了聚焦半径约为 $2\mu\text{m}$ 的突破,证明了理论分析的正确性。该研究为全固态激光器进一步的实验设计提供了依据。

关键词: 激光光学;束腰半径;双平凸薄透镜;聚焦特性

中图分类号: O436 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.024

Focusing properties of Gaussian beams through two thin plano-convex lens optical system

YANG Qiu-ping, YE Bing

(School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the focusing properties of Gaussian beams passing through a compound optical system consisting of two thin plano-convex lens, the formulae of the waist radius and imaging distance of focused Gaussian beams were deduced based on the matrix optical method. Then effect of various parameters in the optical system on its stability property and the waist radius was simulated by means of numerical calculation. Finally, the focusing properties of Gaussian beams passing through the compound optical system was discussed. The results showed that the system was capable of achieving both stability and smaller focused waist radius. The focus radius of about $2\mu\text{m}$ was achieved in the experiments, which proved the correctness of the theoretical analysis. The study built a foundation for the design of a solid state laser.

Key words: laser optics; waist radius; two thin plano-convex lens; focusing properties

引言

随着激光技术在高科技中的应用,研究高斯激光束经复合光学系统的聚焦特性越来越必要。获得小的聚焦光斑是非常有用的,例如,在激光生物医学、激光精密加工、激光信息存储中都要求聚焦光斑很小。

即使在几何光学的限度内,高斯激光束的传输仍与通常的傍轴光束的传输差异明显。对高斯激光束的聚焦不同于几何光学中平行光束的聚焦。采用薄透镜对高斯激光束聚焦时,聚焦所得束腰宽度 w_{02} 与透镜的焦距 f 和透镜距离物方束腰的距离 s_1 有关,要获得好的聚焦效果,须 $s_1 \gg f$ 或者使用短焦距的透镜^[1],不利于具体操作。要获得微小的高斯光束束腰宽度,通常使用多透镜系统。带有空间滤波器的激光聚焦系

统,可获得很小的聚焦光斑,已应用于激光微束装置中,实际上是一个3透镜聚焦系统^[2]。

作者将光纤耦合输出光束近似为高斯光束,利用比较简单双平凸透镜耦合系统,讨论高斯光束的聚焦特性,获得微米级的聚焦光斑半径,同时为全固态激光器进一步的实验设计做依据。

1 光纤输出时的 q_1 参量的确定

使用的抽运源为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所长春新产业光电技术有限公司生产的大功率半导体激光器,输出波长为 808nm ,单根光纤输出,光纤数值孔径 $d_{\text{NA}} = 0.22$,芯径为 $400\mu\text{m}$,最大输出功率为 30W 。

下面用实验说明该种高功率半导体激光器输出光可以用高斯光束描述。

横向偏移法^[3]是一种用于探测光纤出射光束光强分布的方法。假设采用芯径相同的阶跃光纤分别作为探测光纤和被探测光纤,认为输入输出光纤芯上的

作者简介:杨秋平(1984-),女,硕士研究生,主要从事激光技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: yb0430@hfutedu.cn

收稿日期:2009-06-16;收到修改稿日期:2009-08-31

光功率稳定均匀分布。如图 1 所示,轴线横向位移为 d ,光纤纤芯半径为 a 。

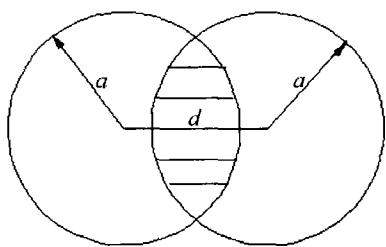


Fig. 1 Horizontal displacement d for the two coupled optical section

耦合损耗由两光纤端面的不重合引起,光纤耦合效率 η 将由输入光纤面积 S_{in} 和输出光纤的有效接收面积 S_r (图 1 中阴影部分) 决定:

$$\eta = \frac{S_r}{S_{in}} = \frac{2 \left[a^2 \arccos \frac{d}{2a} - \frac{da}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]}{\pi a^2} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{d}{2a} - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式中, d 为轴线横向位移, a 为光纤纤芯半径。

把光纤耦合半导体激光器的光纤作为探测光纤,并与其参量相同的被测光纤对接耦合,测量其耦合效率。首先,用光纤拨线钳分别把两光纤 F_1 和 F_2 一侧端面的光纤套管和缓冲涂覆层拨去,用酒精结合擦镜纸将裸光纤表面擦干净,后用光纤切割刀切端面,并用 200 倍的光学显微镜观察,可得到清洁、平整、垂直光纤轴的光纤端面。然后把 F_1 和 F_2 光纤分别绕过扰模器 R,将 F_1 的裸端面一侧固定在 3 维调节架 A_1 ,另一端通过光纤活动接头与光源相联。将 F_2 的裸端面固定在 2 维调节架 A_2 ,另一端接光功率计 P,实验装置如图 2 所示。

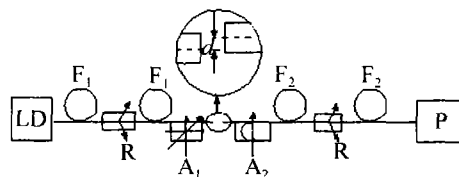


Fig. 2 Measurement installation for light intensity distribution, F_1, F_2 —fiber; A_1 —3-D adjusting frame; A_2 —2-D adjusting frame; R—mode scrambler; P—optical power meter; d —displacement

需要说明的是,根据调节架的 3 维性,这种实验原理和装置既可以测量光纤芯沿截面沿 x 轴(平行于 PN 结方向即慢轴方向)的光强分布,也可以测量沿 y 轴(垂直于 PN 结方向即快轴方向)上的光强分布,测量方法和结果如下。

假定光纤轴向为 z 轴,零点为 F_1 裸端面处, x 轴、 y 轴分别为激光器的慢轴和快轴两个方向。半导体激光器发出的光入射到 F_1 ,调节 F_2 ,使光纤 F_1 和 F_2 在轴向上对准,光束从 F_1 裸端面出射耦合到 F_2 中,最后进入 P。在不同 z 点分别沿 x, y 方向移动 F_1 端面,读取一系列数据,为了排除光功率计读数的不稳定性,取每个测量点多个读数的平均,最后通过记录的光功率数据所作的曲线可确定光纤芯截面沿 x 轴(平行于 PN 结方向即慢轴方向)和 y 轴(垂直于 PN 结方向即快轴方向)的光强分布。

图 3a、图 3c 和图 3e 为探测光纤与被探测光纤端面距离 z 分别为 $300\mu\text{m}, 1000\mu\text{m}, 7000\mu\text{m}$ 所对应的关系图,横坐标 d_x/a 表示沿 x 方向的横向位移与光纤芯半径的比值,纵坐标表示耦合效率 η ;图 3b、图 3d 和图 3f 为相同的距离情况下耦合效率与沿 y 方向的位移和光纤芯的半径的比值 d_y/a 的关系图。

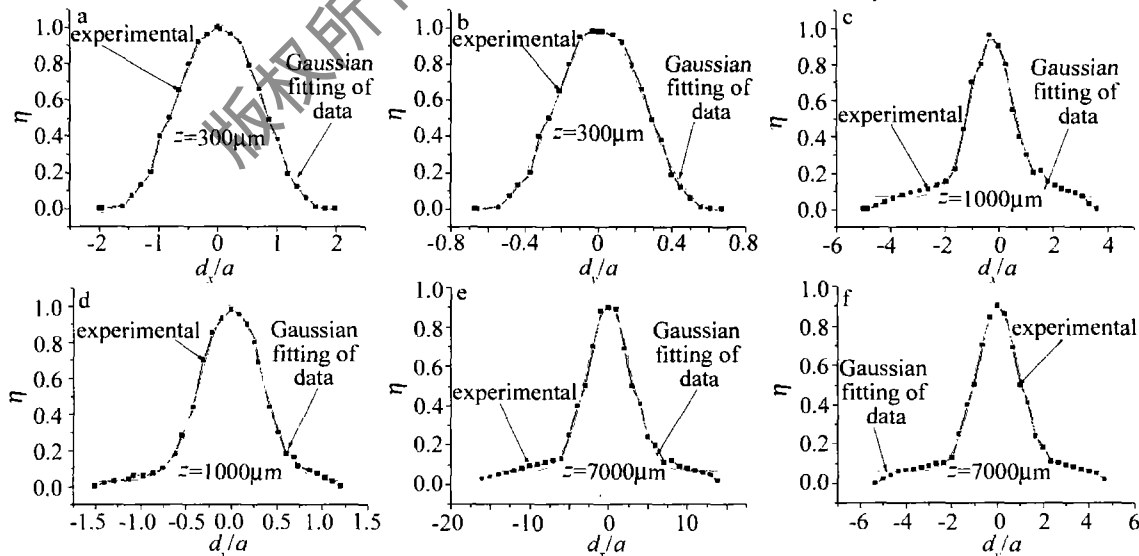


Fig. 3 Measured optical intensity distribution at different points away from the fiber

图中各点代表实验点,曲线是高斯拟合曲线。可以看出,光纤耦合半导体激光器在快轴和慢轴方向上的实

验曲线和高斯曲线拟合得非常好。尤其是在快轴方向上,耦合效率对位置偏差较为明显,高斯曲线比较光滑,

这和理论分析是一致的^[4]。因此,所用的光纤耦合半导体激光器的光纤出射光束的远场光强分布呈高斯分布。

严格来说,大功率 LD 抽运源尾纤输出的是多模类高斯光束,难以解析表达其中的高阶模式经过透镜变换后的束腰光斑半径及束腰位置,必须利用 Collins 公式计算衍射积分方程才能精确描述高阶模高斯光束通过透镜的变换^[5],这就需要分析、计算并实验测出 LD 尾纤输出中的所有模式,分别计算出各阶模激光束经过透镜之后的束腰和束腰位置。使用这种方法的最大问题是,很难得到混合模的组成及各个模式的幅值,设计透镜耦合系统时计算过程也很复杂,而且由于很多非线性约束条件无法解析表达,严重影响系统的优化设计。参考文献[5]中以 Huygens-Fresnel 原理和取样理论为基础,分别数值计算了几个低阶高斯光束经过双透镜聚焦之后,束腰光斑半径和束腰位置的变化,与相同情况下基模高斯光束相比,束腰尺寸大约只有几个微米的差别,与光子晶体光纤内包层尺寸相比很小,因此,可以用尾纤输出端面处的光斑尺寸作为基模高斯光束束腰光斑半径,以基模高斯光束的传输变换规律来简化透镜耦合系统的优化设计^[6]。

为了利用 ABCD 矩阵计算抽运光经过耦合透镜组的光斑大小和发散情况,必须得到抽运光刚从光纤输出时复光束参量。由尾纤芯径知光纤输出端口的光斑半径 $w_{01} = 0.20\text{mm}$, 波长为 808nm 的光斑传播变化见图 4。

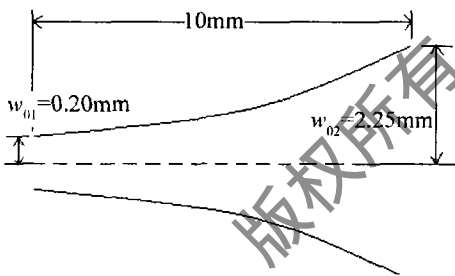


Fig. 4 Waist radius variation for 808nm laser

已知数值孔径 $d_{NA} = 0.22$, 则光纤端面出射光束的最大出射角 $\theta_{\max} = \arcsin d_{NA}$ ^[7], 因此可近似计算出经过 10mm 后的光斑大小 $w_{02} = 2.25\text{mm}$ 。计算图见图 5。

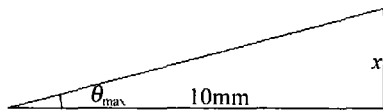


Fig. 5 Waist radius calculation chart for 808nm laser

设光纤经过 10mm 后的光斑半径为 x , 有:

$$\sin\theta_{\max} = d_{NA} = 0.22 \quad (2)$$

则:

$$\tan\theta_{\max} = \frac{\sin\theta_{\max}}{\cos\theta_{\max}} = \frac{0.22}{\sqrt{1 - (0.22)^2}} = \frac{x}{10} \quad (3)$$

计算得 $x = 2.25\text{mm}$, 即光纤经过 10mm 后的光斑半径 $w_{02} = 2.25\text{mm}$ 。

根据高斯光束 ABCD 定律^[8]:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C + \frac{D}{q_1}}{A + \frac{B}{q_1}} \quad (4)$$

其中:

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - i \frac{\lambda}{\pi w_1^2} = X - iY$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R_2} - i \frac{\lambda}{\pi w_2^2} \quad (5)$$

式中, A, B, C, D 为光学系统的光线传播矩阵元, q_1 和 q_2 分别为入射平面和出射平面处的复光束参量, R_1 和 w_1 为入射平面处高斯光束的曲率半径和光斑半径, R_2 和 w_2 为出射平面处高斯光束的曲率半径和光斑半径。

由(4)式和(5)式解得:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{AC + BCX + ADX + BDY^2 + BDY^2 + i(BC - AD)Y}{(A + BX)^2 + B^2Y^2}$$

$$\text{Im} \frac{1}{q_2} = \frac{(BC - AD)Y}{(A + BX)^2 + B^2Y^2} = -\frac{\lambda}{\pi w_2^2} \quad (6)$$

图 4 中光线在自由空间中传播的 ABCD 传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

图 4 中入射处的光斑半径 $w_{01} = 0.20\text{mm}$, 出射处的光斑半径 $w_{02} = 2.25\text{mm}$, 并结合(6)式和(7)式计算得 $R_1 = 2.22\text{mm}$, 进而可得光纤输出时的复参量 q_1 :

$$\frac{1}{q_1} = 451.1\text{m}^{-1} - i6.430\text{m}^{-1} \quad (8)$$

2 高斯光束经双平凸薄透镜系统后的光斑半径和像距公式

耦合系统选择如图 6 所示的两个背靠背的平凸透

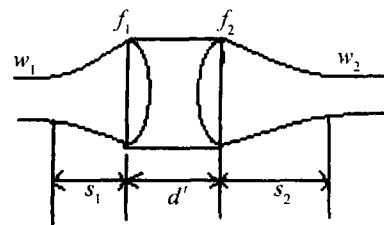


Fig. 6 Compound optical system

镜组, 它的光线传播矩阵为^[9-11]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & d' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

计算得:

$$\begin{cases} A = 1 - \frac{s_2}{f_2} - \frac{\left(1 - \frac{s_2}{f_2}\right) \times d' + s_2}{f_1} \\ B = s_2 + \left(1 - \frac{s_2}{f_2}\right) \times d' + \left[1 - \frac{s_2}{f_2} - \frac{\left(1 - \frac{s_2}{f_2}\right) \times d' + s_2}{f_1}\right] \times s_1 \\ C = -\frac{1 - \frac{d'}{f_2}}{f_1} - \frac{1}{f_2} \\ D = 1 - \frac{d'}{f_2} + \left[-\frac{1 - \frac{d'}{f_2}}{f_1} - \frac{1}{f_2}\right] \times s_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, f_1 和 f_2 分别为两个平凸镜的焦距, s_1 为光纤输出端口与平凸镜 f_1 的距离(物距), s_2 为经过耦合系统变换后的高斯光束的束腰与平凸镜 f_2 的距离(像距), 两个平凸镜之间的距离为 d' 。在光腰处 $R_2 \rightarrow \infty$, 由(6)式得 $AC + BCX + ADX + BDX^2 + BDY^2 = 0$, 根据此式可解得束腰位置。

由(6)式也可以得出经过该透镜组后的光斑半径 w_2 为:

$$w_2 = w_1 \sqrt{\frac{(A + BX)^2 + B^2 Y^2}{AD - BC}} \quad (11)$$

3 光斑半径 w_2 随不同参量的变化规律

(1) 光斑半径 w_2 随 f_1, f_2 的变化

计算中取 $d' = 0.3\text{cm}$, $s_1 = f_1$, $s_2 = 0.9\text{cm}$ 时, w_2 随 f_1, f_2 的变化如图7所示。

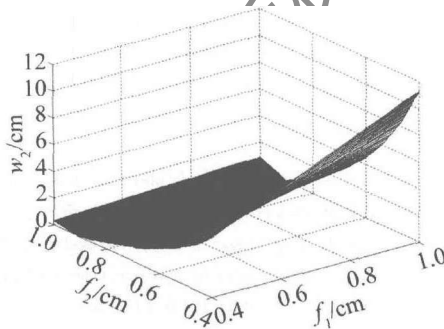


Fig. 7 w_2 as a function of f_1, f_2

由图7可知, f_1, f_2 同时大于 0.6cm 时, w_2 受 f_1, f_2 变化的影响较小, 并且 $f_2 > 0.8\text{cm}$ 时, 不论 f_1 怎么选择, 光斑半径 w_2 总是很小, 这有利于系统的稳定。

(2) 光斑半径 w_2 随 s_1 的变化

取焦距 $f_1 = s_1, f_2 = 1\text{cm}$, $d' = 0.3\text{cm}$, 像距 $s_2 = 0.9\text{cm}$ 时, 光斑半径 w_2 随 s_1 的变化曲线如图8所示。

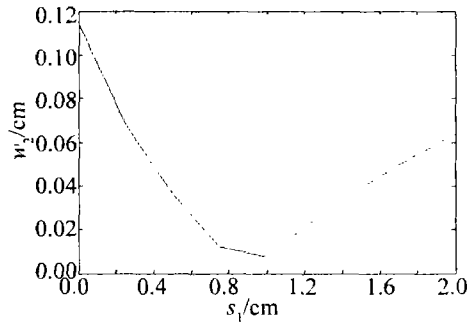


Fig. 8 w_2 as a function of s_1

当物距 $s_1 < 1\text{cm}$ 时, 光斑半径 w_2 与 s_1 成反比关系, s_1 越大, w_2 越小; $s_1 > 1\text{cm}$ 时, w_2 与 s_1 成正比关系, s_1 越大, w_2 越大。

(3) 光斑半径 w_2 随 d' 的变化规律

取 $f_1 = f_2 = s_1 = 1\text{cm}$, $s_2 = 0.9\text{cm}$ 时, w_2 随 d' 的变化如图9所示。

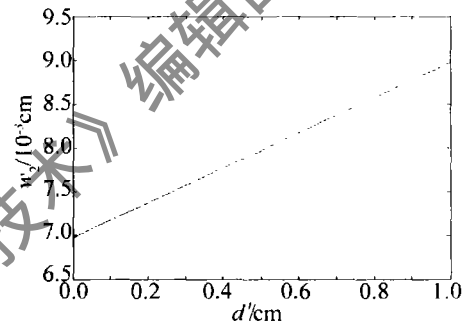


Fig. 9 w_2 as a function of d'

可见, 光斑半径 w_2 与两薄透镜间距 d' 二者之间是线性关系, 并且 w_2 受 d' 变化的影响很小。

(4) 光斑半径 w_2 随 s_2 的变化规律

取 $f_1 = f_2 = 1\text{cm}$, 物距 $s_1 = 1\text{cm}$, $d' = 0.3\text{cm}$ 时, 光斑半径 w_2 随 s_2 的变化曲线如图10所示。

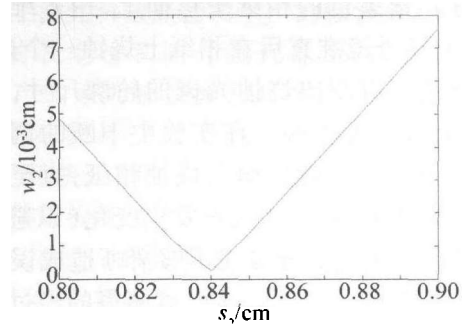


Fig. 10 w_2 as a function of s_2

由图10知, 当像距 s_2 在 $0.8\text{cm} \sim 0.84\text{cm}$ 之间时, 光斑半径 w_2 随 s_2 线性减小; s_2 在 0.84cm 之后, w_2 随 s_2 线性增大; 当 $s_2 = 0.84\text{cm}$ 时, 获得最小光斑半径为 $w_2 = 2\mu\text{m}$ 。

4 最小光斑半径 w_2 的测量

经以上分析知, 当物距 $s_1 = 1\text{cm}$, $f_1 = f_2 = 1\text{cm}$, $d' = 0.3\text{cm}$, 像距 $s_2 = 0.84\text{cm}$ 时, 可以得到最小光斑半径为

2 μm 。由于要测量的光斑半径很小,不易直接测量,实验中采用了焦距为29mm的准直透镜对束腰($s_2 = 0.84\text{cm}$)处的最小光斑半径进行准直,根据高斯光束通过透镜变换后的性质:入射高斯光束的光腰恰好在透镜的前焦面上时,出射高斯光束的光腰则在透镜的后焦面上,通过测量高斯光束经过准直透镜后焦面上的大的光斑半径 w_3 ,利用公式 $w_2 = \lambda f / (\pi w_3)$,就可以计算出要测量的最小光斑半径 w_2 ,其中 $\lambda = 808\text{nm}$, $f = 29\text{mm}$ 。

实验中采用焦斑法^[12]对变换后的光斑半径 w_3 进行测量,它的测量原理图如图11所示。

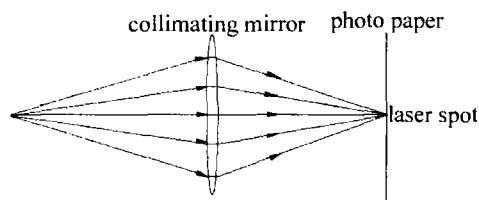


Fig. 11 Measurement principle of spot radius by focal law

整个实验是在带有刻度尺的气垫隔振台上进行的,如图12所示。

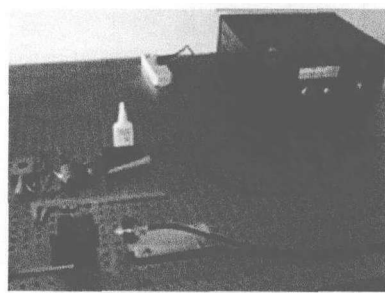


Fig. 12 Measuring experiment of spot radius

由于两个透镜间距比较小,它们就用透镜间距筒固定后与光纤固定架连在一起并用小的光学调整架固定好。置黑色的相纸于焦面上,用2维调整架固定,激光经透镜准直后在相纸上烧蚀一个光斑,用工具显微镜可以测出烧蚀光斑的轮廓尺寸,光斑尺寸越大,测量精度越高。在实验中不断的调整半导体激光器并在准直镜焦面上烧蚀相纸,直至相纸上烧蚀的光斑既清晰,尺寸又不发生变化(以避免由于烧蚀光斑的周边轮廓分界线不够清晰造成误差),然后开始记录数据。用工具显微镜测得的经过准直后的数据及其处理见表1。

Table 1 Data and processing

spot radius w_3/mm	3.55	3.62	3.64	3.51	3.58
spot radius $w_2 (w_2 = \lambda f / (\pi w_3)) / \mu\text{m}$	2.10	2.06	2.05	2.13	2.08
average spot radius $\bar{w}_2 / \mu\text{m}$	2.08				

由表1可以看出,最后得到的光斑半径平均值为2.08 μm ,实验结果基本上与理论分析值2.0 μm 吻合,误差可能的主要来源有实验测量时的误差、光纤的高阶模影响等。

5 结论

利用两个1cm的平凸薄透镜组成的简单耦合系统,分析实现了聚焦光斑半径约为2 μm 的突破,并且此时薄透镜聚焦系统比较稳定,这在简单耦合系统的文献中几乎没有提到过。

本文中像距和光斑半径公式是高斯光束通过近轴复杂光学系统的一般变换公式,可用于复合光学系统中,从而为聚焦光学系统的设计提供一定的依据。但当近轴条件不满足或系统存在像差时,像距和光斑半径公式不再成立,近轴条件限制了用理想的光学系统对高斯光束聚焦所得的光斑半径不可能随意小,使用负球差透镜或二元光学元件,有可能实现超衍射极限的聚焦^[13-15]。

参考文献

- [1] CHEN Y Q, WANG J H. Principle of lasers[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005:200-211(in Chinese).
- [2] ZHU Y B, MA J F. Focusing system of laser microbeam equipment[J]. Chinese Journal of Lasers, 1991, 18(5):337-340(in Chinese).
- [3] TOSHIYOSHI H, FUJITA H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix[J]. Microelectromechanical Systems, 1996, 5(4):231-237.
- [4] ZHANG L, WANG Zh Y, ZHANG H, et al. 808nm high-power fiber-coupled laser diode module system[J]. Optoelectronic Technology, 2007, 27(1):1-3(in Chinese).
- [5] HUANG Y M, LÜ Y H, YANG X Y. Focusing characteristic of higher order mode laser beams propagation through focusing optical system[J]. Optical Technique, 2000, 26(4):331-336(in Chinese).
- [6] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh Ch, et al. Optimum design of lens-coupling system for fiber lasers[J]. Laser Journal, 2005, 26(5):42-43(in Chinese).
- [7] LIU Y Ch, YE X B. Principle and design of sensors[M]. 4th ed. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2004:226-227(in Chinese).
- [8] CHEN Y Q, WANG J H. Principle of lasers[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005:198-199(in Chinese).
- [9] LÜ B D. Laser optics-laser beam propagation and beam quality control[M]. 2th ed. Chengdu: Sichuan University Press, 1997:85-86(in Chinese).
- [10] WANG Y Sh. Laser-diode pumped solid state blue laser[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006:39-40(in Chinese).
- [11] SHI W Q, YANG Y Q. Laser beam's focused properties and its transmission and transformation in selective laser melting[J]. Laser Technology, 2008, 32(3):308-311(in Chinese).
- [12] LI X Y, YAO M Y, LI Zh, et al. The principle of laser technology and its application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004:325(in Chinese).
- [13] DAVIS J A, COTTERELL D M, MALEY C A, et al. Subdiffraction-limited focusing lens[J]. Appl Opt, 1994, 33(19):4128-4131.
- [14] SIMPSON M J, MICHEDTTE A G. Imaging properties of modified Fresnel zone plates[J]. Journal Modern Optics, 1984, 31(4):403-413.
- [15] YOSHIDA A, ASAKURA T. Propagation and focusing of Gaussian laser beams beyond conventional diffraction limit[J]. Opt Commun, 1996, 123(4/6):694-704.