

文章编号 1004-924X(2008)01-0048-07

# 飞秒激光多次聚焦在并行加工中的应用

龚小竞<sup>1</sup>, 褚家如<sup>1</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 黄文浩<sup>1</sup>, 杨建军<sup>2</sup>, 张铁群<sup>2</sup>, 朱晓农<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;

2. 南开大学 现代光学所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要:**提出了利用飞秒激光的多次聚焦现象进行微光学器件并行加工的方法。通过实验总结了光强和聚焦深度对该方法的影响规律,并实现了用该方法并行加工多个微光波导。对多个微光波导的间距实现了控制,其间距范围为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 。将并行加工出的光波导与单个焦点加工出的光波导做了对比,并行加工出的光波导形貌上比较接近单个焦点加工出的光波导,但其传输性能还有一定的差距。用超强光引起的自聚焦对这种多次聚焦做了理论解释,并且针对光强和聚焦深度对多次聚焦的影响做了进一步的理论分析。结果表明,这种方法相对以往的并行加工,实现简单,对加工结果的控制相对灵活。该方法利用的是超强激光特有的非线性现象,为飞秒激光的高效率加工开拓了方向。

**关键词:**飞秒激光;多次聚焦;并行加工;光波导

**中图分类号:**TN249;TN252 **文献标识码:**A

## Application of femtosecond laser multi-focusing to parallel fabrication

GONG Xiao-jing<sup>1</sup>, CHU Jia-ru<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, HUANG Wen-hao<sup>1</sup>,  
YANG Jian-jun<sup>2</sup>, ZHANG Tie-qun<sup>2</sup>, ZHU Xiao-nong<sup>2</sup>

(1. *Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*; 2. *Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of the Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract:** A parallel fabrication method of micro-optic devices by multi-focusing fs laser was presented. The influence of laser intensity and focusing depth on the experiments was studied. Multiple micro-waveguides were fabricated by the parallel method and the space between parallel micro-waveguides was controlled in  $2\sim 5\ \mu\text{m}$ . The waveguides fabricated by parallel method were compared with that by single fusing method, the results show that both kinds of waveguides have the same shape, but the waveguides fabricated by parallel method are inferior to the latter in transmission performance. The multi-focusing was interpreted with the phenomena of self-focusing induced by ultra powerful laser, and the effects of laser intensity and focus depth on the multi-focusing were theoretically analyzed. Experimental results show that this method has advantage in flexible control and easy operation compared with other parallel methods.

**收稿日期:**2007-04-22; **修订日期:**2007-07-31.

**基金项目:**国家 863 高技术计划资助项目(No. 2006AA04Z311);南开大学光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题资助项目(No. 2003-25)

**Key words:** femtosecond laser; multi-focusing; parallel fabrication; optical waveguide

## 1 引言

由于飞秒激光加工精度高,热影响区小,所以在一些需要超高精度的微加工方面引起了大家的关注<sup>[1]</sup>。1996年,Hirao等人报道了聚焦飞秒激光可诱导透明介质内折射率的增加,并且利用飞秒激光的这种特性加工出微光波导的实验<sup>[2]</sup>。自此,利用飞秒激光直写工艺的微光学器件加工方法引起了大家的关注。目前,已经利用该方法实现了在多种光学材料中加工微光波导<sup>[3-4]</sup>、微光栅<sup>[5]</sup>、光纤光栅<sup>[6]</sup>等一系列微光学器件。

在追求微光学器件的高加工精度的同时,还需要追求加工的高效率。S. Nolte等人利用光栅实现了并行加工<sup>[7]</sup>。在该方法中,他们可以同时加工出若干个平行的波导。但是由于光栅各级衍射光的能量差异巨大,在他们的实验中,仅1级衍射光的能量可以加工出波导,其他各级的能量不足以引起折射率的变化。用该方法并行加工出的波导,其间距由激光波长、加工用透镜的焦距以及光栅周期共同决定。

对于更复杂的2D或者3D周期性结构的加工,T. Kondo等人是通过衍射光分束器(DBS)来实现的<sup>[8-9]</sup>。光束经过DBS分光,并通过透镜组的调整和聚焦以后,可以在目标面上形成干涉图样,经过曝光和后处理即可形成所需的周期性结构。在该方法中,通过插入透镜组的衰减片阵列可以分别调整各分束光的光强,从而控制加工出的光学器件的均匀性。但是加工用的干涉图案的周期同样被DBS的参数所限制。

上述两种方法都可以实现微光学器件的并行加工,但是二者的共同缺陷是受分光元件的限制,无法方便地控制并行加工出的元件的间距或周期。

超强光束的自发多次聚焦(即自发产生多焦点)作为一种特殊的光学现象,自发现以来一直为人们所关注,关注点多集中在如何解释这种现象以及如何很多场合避免这种现象的出现。但是如果利用好自发多次聚焦,该现象也可以成为一种并行加工的手段为人们所用。

基于以上考虑,本文利用飞秒激光的多焦点

现象实现了光波导的并行加工,并且通过对激光光强和聚焦深度的调整实现对多焦点加工间距的控制,总结出这两种因素对加工间距的影响。该方法加工出的光波导尚未达到单焦点的加工效果,但是相对以往的并行加工,加工结果的间距不依赖于分光元件,对其控制更加灵活,为飞秒激光的并行加工开拓了一个具有发展前景的研究方向。

## 2 多焦点加工的实验研究

将激光聚焦在样品内部时,控制焦点处的光强使其满足一定的域值条件,可引起作用区域的折射率变化。此时通过移动样品,即可加工出波导。通常聚焦产生的是单个焦点,因此每次仅能加工出单个波导。而飞秒激光聚焦达到特定条件时,光束的前进方向上会出现多个焦点,此时则可以利用多个焦点同时加工出多个波导,如图1所示。

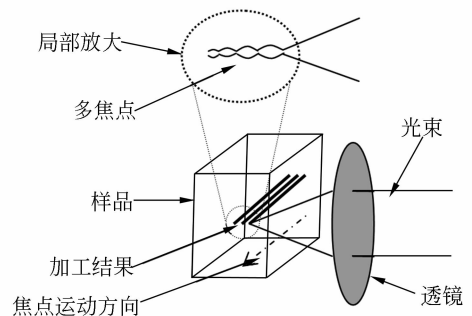


图 1 多焦点加工示意图

Fig. 1 Sketch of multi-focus fabrication

本实验加工使用的飞秒激光器是美国光谱物理(Spectra Physics)公司生产的掺钛蓝宝石固体飞秒激光放大器 Spitfire,该激光器最大平均输出功率为2 W,中心波长为800 nm,最小脉宽为55 fs,重复频率为1 kHz。三维精密调整台是New Port公司的ESP300,其最小分辨率为0.1  $\mu\text{m}$ 。实验中注入的能量通过对激光器的功率调节和一个插入光路的线性衰减片来控制,其实际大小通过在物镜之前放入的功率计来测量。加工材料选取的是光学玻璃K9。

## 2.1 多焦点影响因素的研究

在脉宽不变的情况下,激光单脉冲能量从  $0.6 \mu\text{J}$  增加到  $0.9 \mu\text{J}$  (每次增加  $0.1 \mu\text{J}$ , 共有

4 组); 每种能量条件下, 在 5 个不同的聚焦深度 (间隔  $500 \mu\text{m}$ ) 进行加工。加工出的波导横截面分布情况如图 2 所示。

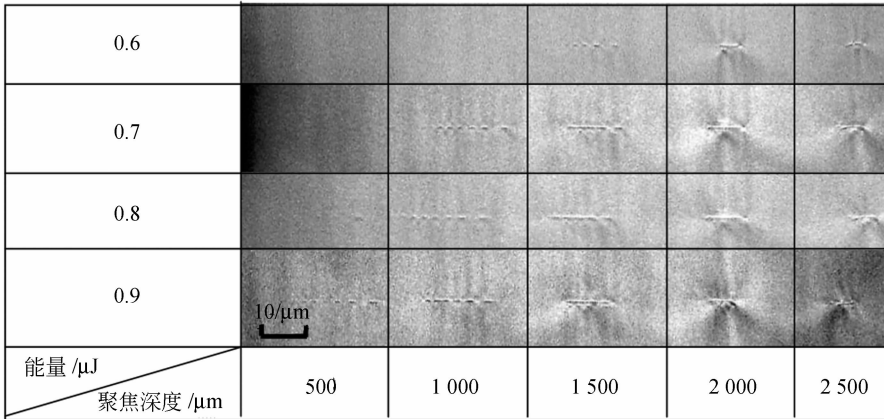
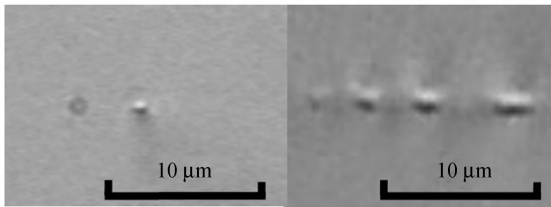


图 2 多焦点加工实验结果: 并行加工出的光波导横截面照片

Fig. 2 Multi-focus fabrication results; photos of cross-section of waveguide fabricated by parallel method



(a) 单焦点结果

(b) 多焦点结果

(a) Single-focus results

(b) Multi-focus results

图 3 单焦点与多焦点加工出的波导横截面对比

Fig. 3 Comparison of cross-section of waveguides fabricated by single-focus and multi-focus

首先考察能量对加工结果的影响。从图 2 可以看出, 在相同聚焦深度下, 能量越大加工出的波导越密集, 反之则越分散。这在深度  $1500 \mu\text{m}$  最明显, 能量最大的两组 ( $0.8 \mu\text{J}$  和  $0.9 \mu\text{J}$  两组), 多个光波导非常密集, 基本连贯成一体; 而在能量变小时 ( $0.7 \mu\text{J}$ ), 波导开始分开; 能量最小时 ( $0.6 \mu\text{J}$ ), 则可以看见分离间距较大的多个波导。在其他深度上也同样可以看到, 随着能量的增大, 波导变得密集, 而随着能量的减小, 波导变得稀疏。

接着考察聚焦深度对加工结果的影响。从图 2 中可以看出, 在相同能量条件下, 聚焦深度越深, 加工出的波导越密集, 反之则越分散。在能量最大的  $0.9 \mu\text{J}$  组表现得最明显, 在聚焦深度最浅的地方 ( $500 \mu\text{m}$ ), 各个波导间隔较大, 但是随着

聚焦深度增加 ( $1000 \mu\text{m}$ ), 波导的间距开始变小, 当深度继续增加 ( $1500 \sim 2500 \mu\text{m}$ ), 波导的间隔已经不明显, 基本连贯起来。上述这种聚焦深度对加工结果的影响, 在能量较小时有同样的变化趋势, 但是其变化的深度范围变小, 即在深度最浅的地方, 并没有加工出波导, 深度继续增加, 开始出现分散的波导, 继续增加聚焦深度, 波导的间距迅速变小, 直至连贯。所以在能量最小的  $0.6 \mu\text{J}$  组只有 3 个深度上 ( $1500 \sim 2500 \mu\text{m}$ ) 有加工结果;  $0.7 \mu\text{J}$ 、 $0.8 \mu\text{J}$  两组有 4 个深度上 ( $1000 \sim 2500 \mu\text{m}$ ) 有加工结果; 只有在  $0.9 \mu\text{J}$  组所有 5 个深度 ( $500 \sim 2500 \mu\text{m}$ ) 都有加工结果。

随后, 进行改变脉宽的实验, 发现在相同聚焦深度上, 随着脉宽的缩短, 加工出的波导变密集, 反之则变分散。

综合考虑上述实验结果, 可以得出如下结论: 相同瞬时功率条件下, 聚焦深度越深, 加工出的波导越密集, 反之则越分散; 相同聚焦深度条件下, 瞬时功率越大, 加工出的波导越密集, 反之则越分散。

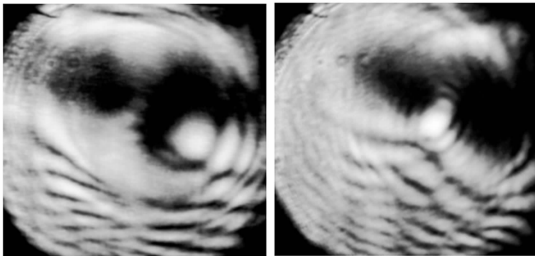
通过上述对比实验可知, 通过选择合适的瞬时功率与深度组合, 可以在一定范围内控制并行加工出的波导的分布情况。图 3(b) 中的多个波导就是并行加工出的结果。

## 2.2 单焦点和多焦点加工结果对比

单焦点使用的是常规平行式加工方法<sup>[10]</sup>, 为

了对加工结果的尺寸和形貌进行比较,选用和多焦点加工一样的显微透镜来加工,同时导入透镜的光束径向尺寸也一样。

(1) 单焦点与多焦点的加工结果如图 3 所示。从形貌上来看,多焦点并行加工出的 4 个波导,各个波导的横截面与单焦点加工出的单个波导的横截面尺寸接近,中间部分的两个波导形状基本一致,最右边的波导横截面略微狭长。这说明多焦点的各个焦点一致性不够好,实际使用时,需要对其进一步改进,或者从中选取合适的来使用。

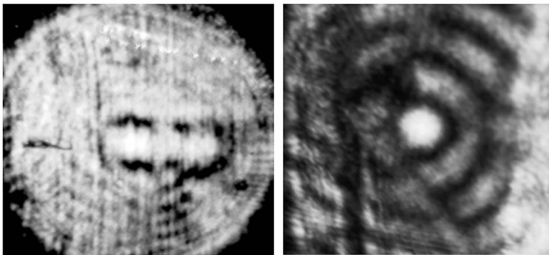


(a)

(b)

(a)、(b)多焦点加工出的两个波导分别导出的光的远场分布;

(a), (b) Far filed distribution of beam guided separately from two waveguides fabricated by multi-focus;



(c)

(d)

(c)两个波导同时导出的光的远场分布;(d)单焦点加工出的波导管导出光的远场分布

(c) Far filed distribution of beam guided simultaneously from the two waveguides; (d) Far filed distribution of beam guided from the waveguide fabricated by single-focus

图 4 单焦点与多焦点导出光的远场分布对比

Fig. 4 Comparison of far field distribution of waveguides fabricated by single-focus and multi-focus

(2) 对两种方式加工出来的波导分别进行耦合实验,其导出光的远场分布结果如图 4 所示。从耦合结果可以看出来,虽然多焦点加工出的波导也可以把光耦合进加工出的波导,并通过波导传输,但是其导出光的远场分布不如单焦点的结果对称性和均匀性好。这说明多焦点诱导的折射率变化,其均匀性和对称性相对单焦点要差。通过上述对比实验可知,利用多焦点进行光波导的并行加工具有可行性,只是目前加工出的波导相对单焦点的加工结果还有差距,在实际使用时还需要进一步改善。

### 3 多次聚焦现象的理论解释

对某种光学介质,其折射率为  $n = n_0 + \Delta n$ ,其中  $n_0$  为基本折射率,  $\Delta n = n_2 (|E|^2)$  为非线性折射率,  $|E|^2$  为光强,  $n_2$  为非线性折射率系数。由此可知,当光强变化时,介质会感应出相应的折射率变化,这种现象被称为介质的克尔效应。对形如高斯型等光强在空间呈现中心强边缘弱分布的光束,在  $n_2 > 0$  的情况下,因光强感应出的折射率增量也会产生相应的中心大边缘小的分布。这种形状的折射率空间分布,会使光束在其中传播时中心部分相对边缘部分速度变慢,引起波前的畸变。这种畸变与正透镜对光束的作用类似,会对光束产生会聚作用。此类因光强感应产生的对光束自身的聚焦现象被称为自聚焦。

这种自聚焦会使得光强增强,从而引起折射率继续增加,同时又会进一步聚焦光束,再次增强光强。如果仅考虑这种不断自我增强的循环,非线性效应的迭代累加作用会使光束束腰半径趋向于无限小的一个点,光强也会趋向无限大。但实际上因为非线性折射率系数  $n_2$  很小,对光学玻璃该值大部分在  $10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$  量级,所以其对折射率的影响只有在光强很强的时候才会表现出来,光强达到  $10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$  量级才能引起折射率  $10^{-1}$  量级变化。而这种强度的光强又会引起其他的非线性现象,这些现象往往可以削弱或破坏自聚焦。

削弱或破坏自聚焦的因素有多种,在样品内部产生的等离子体会对光能吸收,同时对光束有散焦作用;超高光强引起的多光子吸收会消耗大量的能量,从而降低光强,使光束脱离自我增加的循环;非线性折射率的饱和会使自聚焦作用停在

某一个强度,不会进一步增加光强;还有其他一些非线性现象诸如受激拉曼散射、受激布里渊散射、光击穿等也会有散焦或者降低光强的作用。

自聚焦与这些对它削弱或破坏的因素会在光束传输过程中相互竞争,相互影响。当自聚焦占优势时,光束收缩,光强进一步增强,而增强的光强引起的其他非线性现象又会对光束散焦或者直接吸收能量降低光强。在这两方面因素共同的作用下,光束在满足某种特定条件时会在聚焦和散焦之间振荡,形成动态的平衡,表现为光强和光束径向尺寸的波动,这就是多次聚焦。

## 4 多次聚焦影响因素的分析

### 4.1 光强的影响

图 5 是光强波动对并行加工的影响。可以看出,光强越强,在其波动范围内,满足加工波导域值的部分也越大,所以加工波导时,表现为多个波导横截面范围变大,间距变小;光强越低,满足加工波导域值的部分也越小,则加工出的多个波导横截面越小,间距更大。

这种光强对光束多次聚焦波动的影响在其他的实验中已被观测到,如图 6 所示<sup>[11]</sup>。从图中可以看出,随着激光能量的增大,被激发的等离子体的强度波动,也从单峰向逐渐连贯的多峰过渡,反映了激发其激光光强的波动也是同样的变化规律。

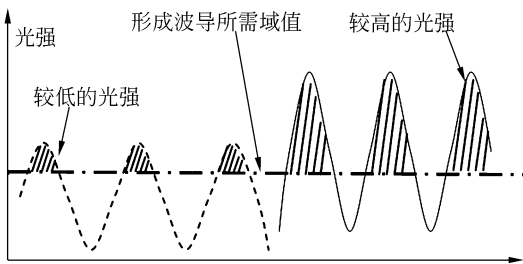


图 5 光强大小(虚线为较低的光强,实线为较高的光强)对并行加工的影响。阴影部分为满足加工域值的部分,点划线为形成波导的光强域值。

Fig. 5 Influence of power level(dashed line is lower power, real line is higher power) on parallel fabrication. The shadow part means power is higher than threshold. The dashdotted line is the threshold of fabricating waveguides power

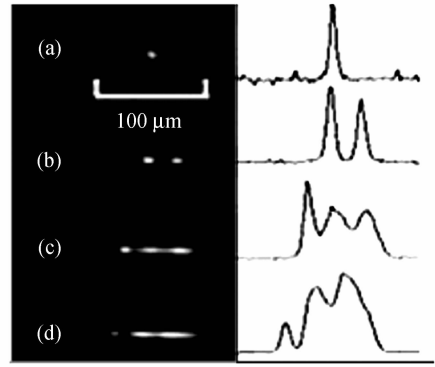


图 6 不同的光强下自聚焦产生的等离子体照片(左图)及强度拟合曲线(右图)<sup>[9]</sup>,激发能量( $\mu\text{J}$ )为:(a)0.27,(b)0.35,(c)0.55,(d)0.95

Fig. 6 Photomicrographs(left) and on-axis relative intensities(right) of the plasma luminescence at different pulse energies( $\mu\text{J}$ ): (a)0.27, (b)0.35, (c)0.55, (d)0.95

### 4.2 聚焦深度的影响

当高斯光束聚焦后,通过了两种不同的介质(折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ),其通过的光程  $s = s_1/n_1 + s_2/n_2$  ( $s_1, s_2$  分别为在两种介质中传播的距离)。考虑到高斯光束通过折射率突变界面时,会因为折射率差发生偏折,则光束的焦斑会相对原来未通过第二种介质而发生变化。而随着折射率突变界面与透镜的间距,也就是  $s_1$  的变化,  $s_2$  (也就是聚焦深度)和焦斑半径也会相应发生变化。

假设  $n_1 = 1$ ,  $n_2$  为光学玻璃 K9 的折射率 1.51,则可以根据高斯光束的 **ABCD** 定律计算出焦斑半径  $\omega$  随着  $s_2$  的变化。

高斯光束可以用复参数  $q$  表示:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2}, \quad (1)$$

式中,  $R$  为光束等相面曲率半径,  $\omega$  为光束半径。由式(1)可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{R} = \text{Re} \left( \frac{1}{q} \right) \\ \frac{1}{\omega^2} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left( \frac{1}{q} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $\text{Re}$ 、 $\text{Im}$  分别表示取复数的实部和虚部运算。

当高斯光束通过一个变换矩阵为  $M = \begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix}$  的光学系统时,则由 **ABCD** 定律可知,光束变换为:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C + \frac{D}{q_1}}{A + \frac{B}{q_1}} \quad (3)$$

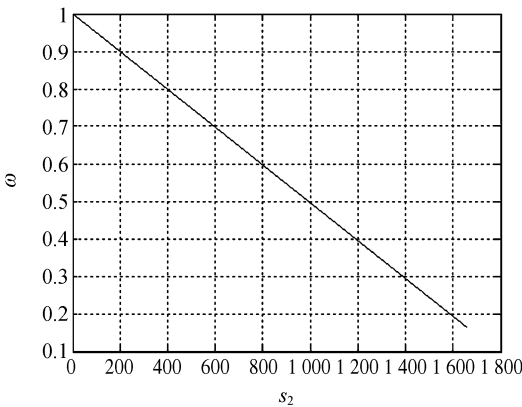
光束在折射率为 1 的介质中传播了  $s_1$ , 然后通过一个折射率突变界面, 再在折射率为  $n$  的介质中传播了  $s_2$ 。整个光学系统可以用如下的变换矩阵来描述:

$$M = M_3 M_2 M_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{s_2}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_1 + \frac{s_2}{n^2} \\ 0 & 1/n \end{bmatrix} \quad (4)$$

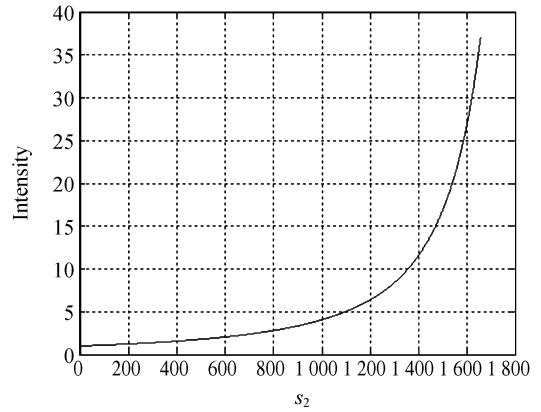
由式(4)可以得到光束在通过  $s_1 + s_2/n$  后的光束情况, 从中可以计算出  $\omega$  随着  $s_2$  的变化。

图 7 所示为计算结果。可以看出, 随着  $s_2$  的增加, 也就是聚焦深度增大, 焦斑  $\omega$  变小, 光强  $I$  增大。当透镜完全靠近玻璃时, 即光束完全在玻璃内聚集时, 此时的光强相对完全在空气中聚焦时增大了 37.1 倍。

由此可知, 随着聚焦深度增加, 光强也增大。这也就解释了聚焦深度增大和光强增大对多次聚焦具有相同影响的原因。



(a) 焦斑半径随着  $s_2$  的变化  
(a) Focus radius vs.  $s_2$



(b) 光强随着  $s_2$  的变化  
(b) Intensity vs.  $s_2$

图 7 聚焦深度对焦斑半径和光强的影响(焦斑半径与光强均为相对值)

Fig. 7 Influence of focus depth on focus radius and beam intensity (Both of focus radius and beam intensity are relative)

## 5 结 论

本文提出利用飞秒激光的多次聚焦现象进行微光学器件的并行加工。通过实验总结了光强和聚焦深度对该方法的影响规律, 并实现了用该方法并行加工多个微光波导, 对多个微光波导的间距实现了控制, 其间距范围在  $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 。将并行加工出的光波导与单个焦点加工出的光波导做了对比, 并行加工出的光波导形貌上比较接近单个焦点加工出的光波导, 但是传输性能还有一定的差距。

对这种多次聚焦, 本文用超强光引起的自聚焦做了理论解释, 并且针对光强和聚焦深度对多次聚焦的影响做了进一步的理论分析。

本文提出的这种方法相对以往的并行加工, 实现简单, 对加工结果的控制相对灵活。该方法利用了超强光特有的非线性现象, 为飞秒激光的高效率加工开拓了一个具有发展前景的研究方向。

## 参考文献:

[1] 蒋中伟, 袁大军, 祝安定, 等. 双光子三维微细加工技术及实验系统的开发[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 234-238.

- tem [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3):234-238. (in Chinese)
- [2] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21: 1729-1731.
- [3] NOLTE S, WILL M, BURGHOFF J, *et al.*. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three dimensional integrated optics [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, 77: 109-111.
- [4] RICHARDSON M, ZOUBIR A, RIVERO C, *et al.*. Femtosecond laser micro-structuring and refractive index modification applied to laser and photonic devices [J]. *SPIE*, 2004, 5347: 18-26.
- [5] LI Y, WATANABE W, YAMADA K, *et al.*. Holographic fabrication of multiple layers of grating inside soda-lime glass with femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80: 1508-1510.
- [6] KONDO Y, NOUCHI K, MITSUYU T. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24: 646-648.
- [7] NOLTE S, BURGHOFF J, WILL M, *et al.*. A femtosecond writing of high quality waveguides inside phosphate glasses and crystalline media using a bifocal approach [J]. *SPIE*, 2004, 5340:164-171.
- [8] KONDO T, MATSUO S, JUODKAZIS S, *et al.*. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals [J]. *App. Phys. Lett.*, 2001, 79: 725-727.
- [9] MATSUO S, KONDO T, JUODKAZIS S, *et al.*. Fabrication of three-dimensional photonic crystals by femtosecond laser interference [J]. *SPIE*, 2002, 4655:327-334.
- [10] 龚小竞, 褚家如, 杨建军, 等. 改进的飞秒激光加工微型光波导方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 27-32.  
GONG X J, CHU J R, YANG J J, *et al.*. An improved way for fabricating micro-waveguide by femtosecond laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 27-32. (in Chinese)
- [11] WU Z, JIANG H, LUO L, *et al.*. Multiple foci and a long filament observed with focused femtosecond pulse propagation in fused silica [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27:448.

作者简介: 龚小竞 (1978—) 男, 安徽合肥人, 在读博士研究生, 主要研究方向为飞秒激光在微光学器件加工上的应用。

E-mail: nickle@ustc.edu

褚家如 (1963—) 男, 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为纳米加工与计量用智能微系统的设计与制造技术。E-mail: jrchu@ustc.edu.cn

## 下期预告

# 激光分布对抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热效应的影响

史 彭, 陈 文, 李 隆, 甘安生

(西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**以解析各向异性分析理论为基础,研究了在矩形横截面 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体受到超高斯分布 LD 端面抽运时,激光晶体温度场分布和晶体抽运面热形变分布。通过激光晶体工作特点分析,考虑了激光分布和激光光束半径变化,建立了符合激光晶体工作状态的热模型。利用各向异性介质热传导方程的一种新求解方法,得出了矩形截面 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的温度场、端面热形变场的通解表达式。研究结果表明:当使用输出功率为 15 W 半导体激光器(超高斯阶次为 1)从端面中心入射 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体(晶体掺钕离子质量分数为 0.5%)时,在抽运端面中心获得 243.8 °C 最高温升和 1.99 μm 最大热形变量,与实验结果一致。这种方法可以应用到其它激光晶体热问题研究中,为有效解决激光系统热问题提供了理论依据。

**关键词:**激光物理; Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器热分析; 超高斯分布; 矩形截面; 各向异性