

# 飞秒激光微细加工中光耦合器参数的数值模拟<sup>\*</sup>

倪晓昌 王清月 胡明列

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要** 用有限差分迭代求解光束传输方程,对 1×2(Y型)耦合器和 2×2(X型)耦合器分路的夹角大小对分路中光束分配比例的影响进行了模拟研究. 模拟结果显示:耦合器夹角控制在一定的范围内,对分路中光束能量分配影响不大;2×2耦合器对分路夹角以及波导宽度的变化敏感. 为飞秒激光加工光纤无源器件的可行性做了理论上的分析.

**关键词** 飞秒激光加工;光纤通信;光束耦合器;光束传输法

**中图分类号** TN386.5 **文献标识码** A

## 0 引言

最近几年,飞秒激光加工应用于光纤无源器件的研究已经引起越来越多研究学者的重视<sup>[1~4]</sup>. 1996年, K. M. Davis以飞秒激光加工应用于电信行业为目的,对飞秒激光在各种透明材料内所引起的折射率变化进行了系统研究,得出:受飞秒激光辐射区域均引起材料折射率的变化,折射率的改变量依赖于吸收激光能量剂量的多少,并指出在聚焦区域存在多光子作用以及在透明材料内部实现光学器件三维加工的可能<sup>[5]</sup>. 之后, D. Homoele在熔融硅内实现了 1×2(Y型)耦合器的刻画<sup>[6]</sup>; Kaoru Minoshima直接采用振荡器产生的飞秒激光成功加工出 2×2(X型)耦合器<sup>[7]</sup>; 2002年, Matthias Will等人更是在玻璃内实现了三维 1×3耦合器的加工<sup>[8]</sup>. 因此,针对飞秒激光加工的特性以及加工材料的属性,对耦合器事先进行模型设计成为亟待解决的问题.

本文采用光通讯领域常用的光束传播法(Rsoft, BeamPROP),用有限差分迭代求解,对 1×2(Y型)耦合器和 2×2(X型)耦合器参数的改变对分路中传输能量比例大小以及光束质量的影响进行了模拟研究.

## 1 模拟方法

光束传播法就是求解亥姆霍兹方程的一种数值方法<sup>[9]</sup>. 如果标量电场写为  $E(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) \cdot \exp(-i\omega t)$ , 那么,波动方程可以写为标准的单色波亥姆霍兹方程<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (1)$$

其中,波数  $k(x, y, z) = k_0 \cdot n(x, y, z)$  是一个空间变量,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $n(x, y, z)$  代表折射率的空间分布.

式(1)经慢变近似后,其振幅可写为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \vec{k}^2) u \right] \quad (2)$$

用  $u_{ij}^n$  代表横向位置为  $(i, j)$ , 纵向位置为  $n$  处的场,采用中心差分格式,与二维情形类似<sup>[11]</sup>,式(2)差分后转化为

$$\frac{u_{ij}^{n+1} - u_{ij}^n}{\Delta z} = \frac{i}{2k} \left[ \frac{\delta^2}{\Delta x^2} + \frac{\delta^2}{\Delta y^2} + (k(x_i, y_j, z_{n+1/2}) - \vec{k}^2) \right] \frac{u_{ij}^{n+1} + u_{ij}^n}{2} \quad (3)$$

其中,  $\delta^2$  代表差分算子,  $\delta^2 u_{ij} = (u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 4u_{ij})$ ;  $z_{n+1/2} = z_n + \Delta z/2$ .

为节省吸收边界条件时变换参数所带来的麻烦<sup>[9]</sup>,边界条件选取常用的穿透模式,其基本思想就是假定边界处网格  $(m)$  场变化遵循线性边界条件<sup>[11]</sup>

$$u_m^{n+1} = u_{m-1}^{n+1} e^{ik_x \Delta x} \quad (4)$$

$k_x$  是根据临近边界处的网格经过一系列相关计算得到的边界参数<sup>[11]</sup>.

因此,只要知道折射率的分布  $n(x, y, z)$  以及入射波的场分布  $u(x, y, z=0)$ , 利用上述模型就可以计算出场在任意位置的分布图.

## 2 模型设计

依照飞秒激光高峰值功率密度的特性,多光子效应的出现,使得飞秒激光加工尺度理论上可以达到光波长的  $1/20$ <sup>[11]</sup>. 实验上,飞秒激光在透明材料内加工光学器件所达到的尺度为  $\sim 2 \mu\text{m}$ , 纵向可达毫米量级<sup>[3]</sup>. 因此,模型中耦合器的线宽采用  $2 \mu\text{m}$ , 长度选取  $1 \text{ cm}$ , 分支位置选在耦合器中部 ( $5 \text{ mm}$ ). 材料选用加工常用的透明材料:熔石英,

<sup>\*</sup>教育部科学技术研究重大项目(G10410),国家重点基础研究专项基金(2003CB314904)、国家自然科学基金(60278003)以及中国博士后科学基金资助

Tel: 022-27404673 Email: ull@tju.edu.cn

收稿日期: 2003-12-01

其折射率为 1.46. 飞秒激光加工后材料折射率变化率与脉冲能量以及加工速度有关, 一般为  $10^{-3}$  量级<sup>[6]</sup>, 模型选取脉冲宽度 60 fs, 单脉冲能量为  $1 \mu\text{J}$ , 加工速度为  $20 \mu\text{m}/\text{s}$  时熔石英折射率的变化值: 0.004, 因此, 模型中只要是耦合器内部, 折射率为 1.464, 周围部位均为 1.46. 入射光波长选取  $1.55 \mu\text{m}$ , 入射场分布为高斯型分布, 入射方向平行于  $z$  轴. 耦合器分路夹角的大小可以使分路中光强度分配比例不一. 当然, 耦合器的形状也可能影响分路中强度分配的比例. 模型分别对  $1 \times 2$  (Y型) 耦合器和  $2 \times 2$  (X型) 耦合器分路夹角以及耦合器形状进行了模拟比较.

### 3 模拟结果与讨论

图 1~4 给出了分路夹角分别为  $0.401^\circ$ ,  $1.031^\circ$ ,  $2.005^\circ$ ,  $6.05^\circ$  度,  $z$  轴坐标相对调整后  $1 \times 2$  (Y型) 耦合器光场强度等高分布图.

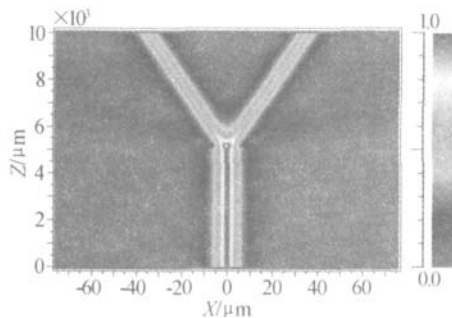


图 1 Y型耦合器分路夹角为  $0.401^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 1 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $0.401^\circ$

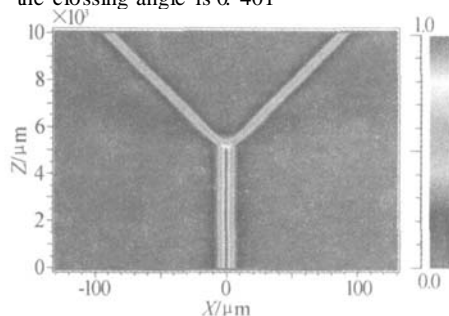


图 2 Y型耦合器分路夹角为  $1.031^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 2 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $1.031^\circ$

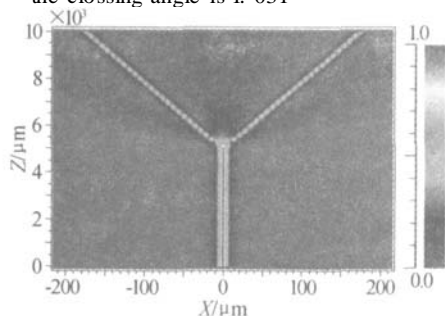


图 3 Y型耦合器分路夹角为  $2.005^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 3 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $2.005^\circ$

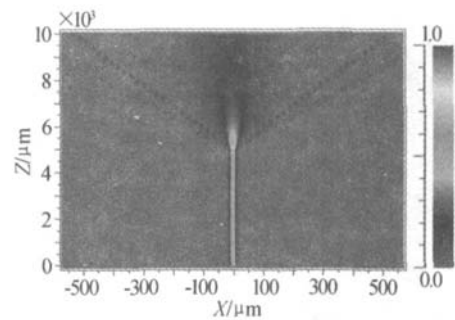


图 4 Y型耦合器分路夹角为  $6.05^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 4 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $6.05^\circ$

可以看出, 分路夹角度数为  $0.401 \sim 1.031$  范围时, Y型耦合器两分路中光强分布比较均匀, 基本维持在 1:1 范围. 但是, 夹角大于  $2^\circ$  时, 虽然两分路中光强比接近, 但能量损失增加. 图 4 表明, 分路夹角为  $6.05^\circ$  度时, 耦合到分路中的光场强度非常小, 光强基本上从分路中间部分漏掉了. 如果分路夹角再减小 (图 5、6), 要想充分将分路中光场分开而避免相互影响, 就需要将耦合器做的足够长, 相应的, 也就增加了激光加工的工作量以及加工难度. 图 6 说明了分路夹角为  $0.229^\circ$  时, 相对  $1 \text{ cm}$  长的 Y型耦合器, 在输出端, 分路中光场仍然没有完全分离.

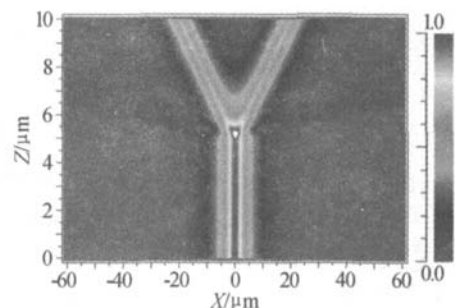


图 5 Y型耦合器分路夹角为  $0.229^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 5 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $0.229^\circ$

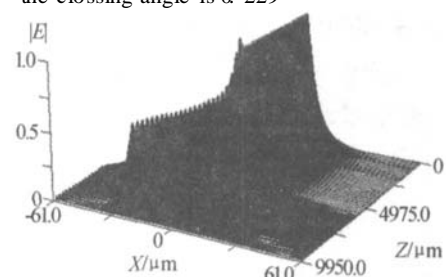


图 6 Y型耦合器分路夹角为  $0.229^\circ$  时振幅三维切片分布图

Fig 6 The 3-D slice map of the amplitude in Y-coupler when the crossing angle is  $0.229^\circ$

图 7~9 为  $2 \times 2$  (X型) 耦合器, 分路夹角分别为  $0.917^\circ$ ,  $0.803^\circ$ ,  $1.031^\circ$  度时光场强度的等高分布图. 夹角为  $0.917^\circ$  度时, 分路中光强分配比例接近 1:1, 但稍稍改变分路夹角时 (图 8、9), 分配比例迅速改变. 由于模拟时入射光场方向与  $z$  轴平行, 从几何

学分析易得:入射光场与耦合器某一支轴夹角为分路夹角的一半.所以图 7~9说明了  $2 \times 2$  耦合器两分路中光场分配比例受入射光场的方向与耦合器分路夹角大小影响明显.但是,为了确定哪一个因素起支配性地位.实验采取固定光场入射角.为模拟方便,光场入射角选取零度,即与耦合器支路轴向平行.因此,该问题就转化成图 10 形状的耦合器分路中光场强度的分布与分路夹角的关系.模拟结果显示:此时分路中光场分配比例接近 1:1 的范围为  $0.4 \sim 1.6$  度.也就是说,入射光场与耦合器轴向的夹角对耦合器分路中光场的分配比例起着决定性作用.光场入射方向与耦合器轴向重合时,分路夹角在较大范围内使得光场在  $1 \times 2$  (Y型) 耦合器和  $2 \times 2$  (X型) 耦合器分路中平均分配.

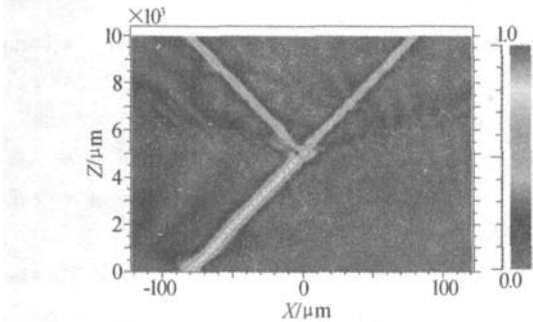


图 7 X型耦合器分路夹角为  $0.917^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 7 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $0.917^\circ$

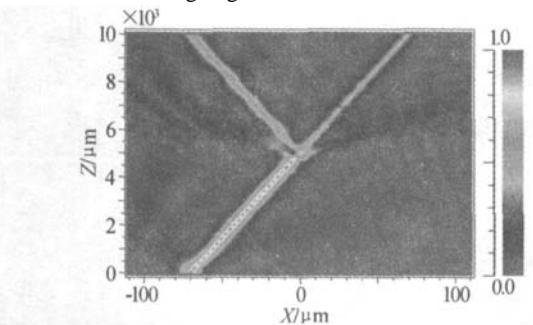


图 8 X型耦合器分路夹角为  $0.803^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 8 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $0.803^\circ$

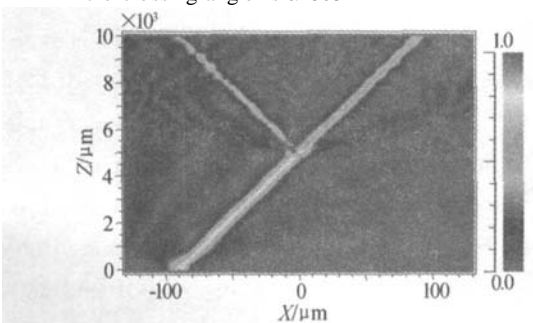


图 9 X型耦合器分路夹角为  $1.031^\circ$  时光强等高分布图  
Fig 9 The contour map of the intensity in Y-coupler when the crossing angle is  $1.031^\circ$

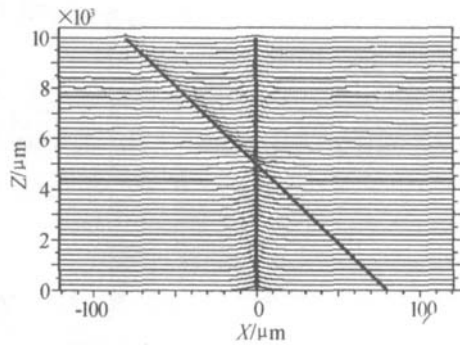


图 10 X型耦合器分路夹角为  $0.917^\circ$ 、光场沿轴向入射时光强切面分布图

Fig 10 The slice map of the intensity in X-coupler when the crossing angle is  $0.917^\circ$  and the light propagates in the axial direction of coupler

为了说明耦合器宽度对光强在 Y型和 X型耦合器中分布的影响.实验模拟了耦合器线宽为 5 微米的光强等高分布情况 (图 11、12). 由图中可以看出, X型耦合器光场分布受线宽影响也较大 (与图 7 比较).

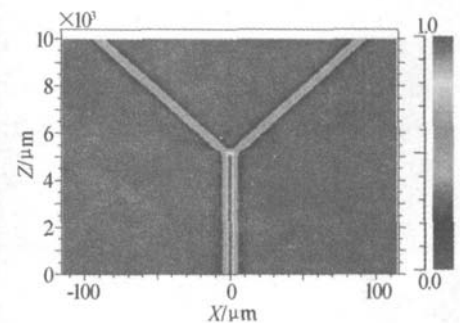


图 11 Y型耦合器分路夹角为  $1.031^\circ$ 、线宽  $5 \mu\text{m}$  时光强等高分布图

Fig 11 The contour map of the intensity in Y-coupler with  $5 \mu\text{m}$  when the crossing angle is  $1.031^\circ$

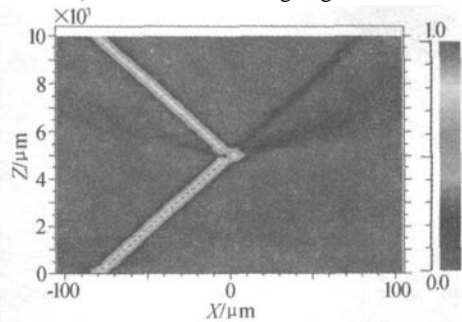


图 12 X型耦合器分路夹角为  $0.917^\circ$ 、线宽  $5 \mu\text{m}$  时光强等高分布图

Fig 12 The contour map of the intensity in Y-coupler with  $5 \mu\text{m}$  when the crossing angle is  $0.917^\circ$

### 4 结论

用光传输法模拟了 X、Y型耦合器中影响分路中光场均匀分布的因素.模拟结果显示:入射光场沿耦合器轴向传输时,使得光场能够在分路中均匀分布的支路夹角变化范围较大 ( $0.4 \sim 1.6$ ). X型耦合

器对光场入射角以及耦合器线宽的改变非常敏感. 相关实验正在进行中<sup>[12,13]</sup>.

### 参考文献

- 1 Pronko P, Dutta S, Squier J, *et al* Machining of submicron holes using a femtosecond laser at 800 nm. *Opt Commun*, 1995, **114**: 106~110
- 2 刘青,程光华,王屹山,等. 飞秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理. 光子学报, 2003, **32**(3): 276~279  
Liu Q, Cheng G H, Wang Y S, *et al* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 276~279
- 3 程光华,刘青,杨玲珍,等. 飞秒激光脉冲诱导透明介质的非线性吸收和折射率改变轮廓研究. 光子学报, 2003, **32**(11): 1281~1285  
Cheng G H, Liu Q, Yang L Z, *et al* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1281~1285
- 4 倪晓昌,王清月. 时空分布的超短激光脉冲烧蚀电介质材料时等离子体的产生. 光子学报, 2004, **33**(9): 1035~1039  
Ni X C, Wang Q Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1035~1039
- 5 Davis KM, Miura K, Sugimoto N, *et al* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser *Opt Lett*, 1996, **21**(21): 1729~1731
- 6 Hmpelle D, Wielandy S, Alexander L. Gaeta, *et al* Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses *Opt Lett*, 1999, **24**(18): 1311~1313
- 7 Kaoru Minoshima, Andrew M. Kowalevicz, Ingmar Hartl, *et al* Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator *Opt Lett*, 1999, **26**(19): 1516~1518
- 8 Matthias Will, Stefan Nolte, Andreas Tuenemann. Three-dimensional integrated optical device fabrication in glass by femtosecond laser processing *CLEO Technical Digest*, 2002, **127**: 127~128
- 9 Scamozzino R, Gopinath A, Pregla R, *et al* Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices *IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(1): 150~162
- 10 Scamozzino R, Osgood R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications *J Opt Soc Amer A*, 1991, **8**(5): 724~731
- 11 Hadley G R. Transparent boundary condition for the beam propagation method *J Quantum Electron*, 1992, **28**(1): 363~370
- 12 Ni Xiaochang, Wang Chingyue, Wang Zhuan, *et al* The study of nanojoule femtosecond laser ablation on organic glass *Chinese Optics Letter*, 2003, **1**(7): 429~431
- 13 Ni Xiaochang, Wang Chingyue, Li Yanfeng, *et al* Thermal Character in Organic Polymers with Nanojoule femtosecond Laser Ablation *Chinese Optics Letter*, 2003, **1**(9): 547~549

## The Numerical Simulation on Parameters of Opto-coupler in Femtosecond Laser Micromachining

Ni Xiaochang, Wang Chingyue, Hu Minglie

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC; Ultrafast Laser Laboratory,  
School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin 300072

Received date: 2003-12-01

**Abstract** The optical beam propagation equation is solved by finite difference iterative method. The effect of the cross angle on the ratio of field intensity in the branch is studied about the  $1 \times 2$  (Y type) and  $2 \times 2$  (X type) couplers. The simulation results show that only the cross angle was controlled in a scale, the intensity ratio (1:1) can not be effected in the branch of coupler. And the  $2 \times 2$  coupler is sensitive to the cross angle and coupler width. It is a basic theoretic analysis for machining the passive fiber components with femtosecond laser.

**Keywords** Femtosecond laser machining; Fiber communication; Beam coupler; Optical beam propagation method



**Ni Xiaochang** was born on November 4, 1974. He received his B. S. degree from Hebei University in 1998 and his M. S. and Doctor degrees from Tianjin University in 2001 and 2004 respectively. Now he is a Post Doctor in School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering in Tianjin University. He is working in the field of femtosecond laser and its application in micromachining.