

# 激光微孔加工中调节孔锥度的算法研究

于 洵<sup>1</sup>, 张 晓<sup>1</sup>, 程光华<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学光电学院, 陕西 西安 710032;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘 要:**基于超快激光倒锥孔微加工技术需要,提出了一种利用电光晶体的电光偏转原理调节光束产生动态精密微位移的方法。通过四块楔形电光晶体的特定方式组合,调节施加在电光晶体上的电压大小,可使出射光束产生动态的横向位移。在此方法的基础上施加旋转运动,可实现激光加工锥度可控的倒锥孔。本文介绍了横向位移的产生方法,分析了产生最大横向位移的影响参数,举例使用 KDP, D-KDP, RTP 等电光晶体,讨论了不同长度下,所产生的动态横向微位移范围。入射光束直径 3 mm, 电光晶体厚度 3 mm, 宽度 30 mm, 总长为 210 mm, 楔角  $\alpha$  为 0.3 rad, 调节电压从 0 ~ 90000 V 时, RTP 电光晶体可产生 0 ~ 700  $\mu\text{m}$  的动态横向位移。

**关键词:**激光微加工;电光效应;倒锥孔;光楔

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.005

## Study on algorithms of adjusting the taper in laser micro-processing

YU Xun<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>, CHENG Guang-hua<sup>2</sup>

(1. School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 2. State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** According to the need of ultrafast laser micro-processing technology, we propose a method utilizing electro-optic crystal's beam deflection principle to generate dynamic precision micro-displacement. Four wedge-shaped electro-optic crystals make a special structure. Adjusting the voltages on the electro-optic crystals, the beam can produce a dynamic horizontal displacement. Adding rotation to this, the beam can be controlled to process inverse taper holes. This paper describes the method of generating lateral displacement, and analyzes the parameters that impact the greatest horizontal displacement. Taking KDP, D-KDP, RTP and other electro-optic crystals as examples, it is discussed the relationship between crystal lengths and the dynamic range of horizontal micro-displacement. With incident beam diameter of 3 mm, electro-optic crystal thickness of 3 mm, width of 30 mm, overall length of 210 mm, wedge angle  $\alpha$  of 0.3 rad, RTP electro-optic crystal can produce 0 ~ 700  $\mu\text{m}$  dynamic lateral displacement by adjusting the voltage from 0 to 90000 volt.

**Key words:** laser micro-machining; inverse taper holes; electro-optic effect; wedge

### 1 引 言

激光微孔加工在汽车、微电子, 航天航空, 生物医学, 太阳能及燃料电池新能源等高新技术产业领域有着广泛应用。其加工切面整齐, 热效应小, 无微

作者简介: 于 洵(1964 -), 男, 副教授, 主要研究光电测试与计量技术, 光电信息系统设计, 目标特性与仿真技术。E-mail: genxun@163.com

收稿日期: 2011-08-06

裂纹和冶金缺陷,加工速度快,效率高,对材料无选择性,有着传统的机械加工以及电火花加工所无法比拟的优越性。在汽车领域中,喷油嘴有着非常精密的指标要求,其形状一般为上端面孔径小下端面孔径大的倒锥孔。喷油嘴的加工质量直接影响喷油嘴的雾化特性,油线贯穿度及流量系数,最终影响柴油机的动力特性。由于激光束的聚焦是一个光束直径由大变小的过程,因此加工上端面大,下端面小的微孔相对比较容易,而加工倒锥孔则比较困难,必须要横向位移模块来实现倒锥孔的加工。目前国内在超快激光倒锥孔微加工方面的技术应用还相对匮乏。

现有的改变光束横向位移的方法有两种,一种是使用平行平板,将平行平板按照一个固定角度倾斜放置,光束垂直入射,便可以产生一个固定的横向位移;若使平行平板俯仰摆动,改变倾角,则可产生动态的横向位移,美国 HAAS 公司的 inverse taper module 模块<sup>[1]</sup>,就是基于该方法施加旋转运动,实现倒锥孔的加工(如图 1 所示),这种方法的缺点是加工不同锥度的锥孔时,需要调节平行平板的倾角,必须将平行平板重新安装,而且由于加工时震动的存在,横向位移的精度不易保证。



图 1 Haas 公司的平行平板摆动产生横向位移实现锥孔原理

另一种方法是使用一对楔角相等的光楔,调节两个光楔中间的空隙,依据光的折射定律,入射光束通过双光楔后可产生横向位移(如图 2 所示)<sup>[2-4]</sup>,调节两光楔的空气间隔,可产生不同的横向位移。因此,该方法既要在垂直方向上机械控制匀速运动,以改变间隔大小,还需要旋转运动,在控

制上较难实现,精度亦无法保证。

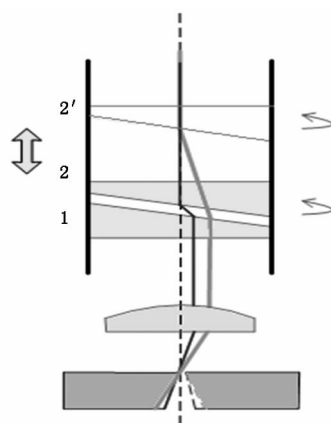


图 2 双光楔改变间隔产生横向位移实现锥孔原理

本文提出了一种利用电光晶体的电光效应调节光束产生动态横向位移的方法。通过四块楔形电光晶体的特定组合方式,调节施加在电光晶体上的电压大小,可使出射光束产生动态的横向微位移,只需要对旋转运动进行控制,即可实现锥度可控的锥孔加工,完善了现有方法的不足,精度也能得到保证。

## 2 电光偏转原理<sup>[5]</sup>

电光偏转的原理与光束通过玻璃光楔的偏转原理相关,如图 3 所示,光束通过光楔后入射波前从水平变为偏转  $\theta$  角的透射波前,透射波波阵面的偏角  $\theta$  由下式决定:

$$\theta \approx (n-1) \frac{l}{D} = \frac{l}{D} \Delta n \quad (n > 1, \text{为光楔楔角}) \quad (1)$$

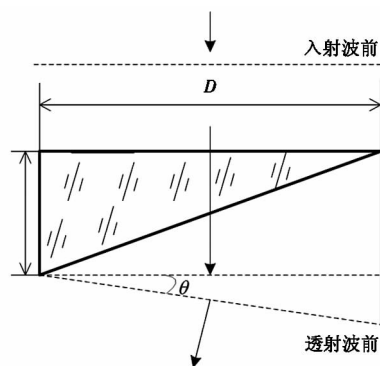


图 3 光楔偏转原理

电光偏转就是来源于光束通过光楔的偏转原理。图 4 是由两块楔形棱镜组成的双楔形棱镜偏转器,棱镜沿  $z$  轴方向外加电压,两块棱镜的光轴方向相反,左侧棱镜光轴方向与  $z$  轴同向,右侧棱镜光轴与  $z$  轴反向。光线沿  $y'$  方向入射,光波振动方向为  $x'$  轴方向,则光在左侧棱镜中的折射率为:  $n'_1 = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z$ ; 在右侧棱镜中,由于电场与该棱镜的

光轴方向相反,所以折射率为  $n'_1 = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3 r_{63} E_z$ 。

因此上下光的折射率之差为:

$$\Delta n' = n'_1 - n'_2 = n_0^3 r_{63} E_z \quad (2)$$

光束穿过偏振器后的偏角:

$$\theta = \frac{l}{D} \Delta n = \frac{l}{D} n_0^3 r_{63} E_z = \frac{l}{Dh} n_0^3 r_{63} V \quad (3)$$

式中,  $h$  为晶体的厚度。由此可见,当外加电压变化时,偏转角就成比例地随着变化,从而控制光线的传播方向。

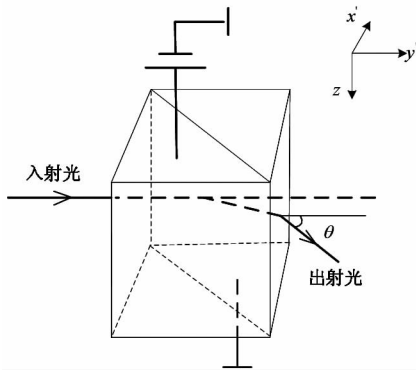


图4 双楔形电光偏转器

### 3 产生动态横向位移的结构设计

基于电光效应的电光偏转原理,采用由四块楔形电光棱镜按照图5的组合方式从左到右,依次为1号2号3号4号楔形电光棱镜,总长为  $l'' (l'' = l + l_1 + l_2)$ , 宽为  $D$ , 厚度为  $h$ 。棱镜外加电压沿着图5的  $z$  轴方向,四块棱镜的光轴方向,从左至右,1号和4号楔形棱镜的光轴方向与  $z$  轴方向相同,2号和3号楔形棱镜的光轴方向与  $z$  轴方向相反。 $x', y'$  为感应主轴方向<sup>[6]</sup>。

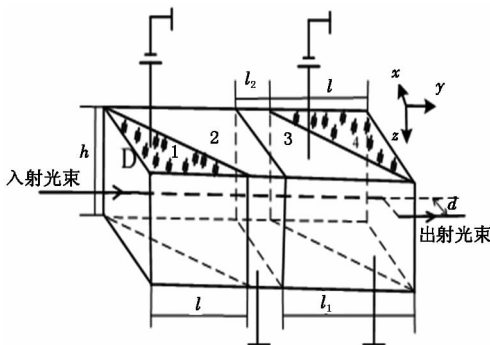


图5 四块楔形电光晶体组成的产生动态横向位移示意图

若光束沿  $y'$  方向射入,光波振动方向为  $x'$  轴方向,棱镜外加电压与  $z$  轴方向相同,则光在1号棱镜和4号棱镜中的折射率均为  $n'_1 = n_0 + \frac{1}{2}n_0^3 \gamma E_z$ ; 由于2号棱镜和3号棱镜的光轴方向与外加电压方向

相反,所以光在2号和3号棱镜中的折射率均为:

$$n'_2 = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3 \gamma E_z$$

因此,1号棱镜和2号棱镜的折射率差为:

$$\Delta n' = n'_1 - n'_2 = n_0^3 \gamma E_z$$

光束通过1号棱镜射入2号棱镜后,由于折射率差的存在,产生了光束偏转,偏转角度为:

$$\theta = \frac{l}{D} \Delta n = \frac{l}{D} n_0^3 \gamma E_z = \frac{l}{Dh} n_0^3 \gamma V$$

由上述所知,1号和4号棱镜的折射率相同,2号和3号棱镜的折射率相同,光束通过2号棱镜射入3号棱镜不存在折射率差,因此光束方向不变,直到入射到4号棱镜时,光束再次偏转,由于3号与4号棱镜的折射率差与1号和2号的折射率差相同,因此出射光束偏转回原来的  $y'$  方向,但在  $x'$  方向上产生了横向位移,改变棱镜外加电压的大小,可产生动态的横向位移。光束传播原理如图6所示。

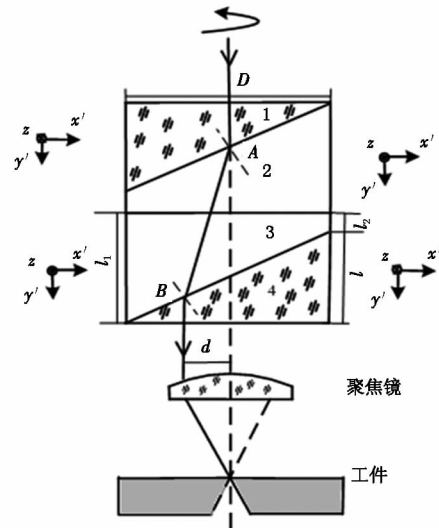


图6 光路原理

$x$  为A点到B点的长度,如图6、图7所示。图7为横向位移的计算原理图,由图可知:

$$x = \frac{l' \cos \alpha}{\cos(\theta + \alpha)} \quad (4)$$

$$l' = l_1 + l_2 \quad (5)$$

$d$  为产生的横向位移,有:

$$d = x \sin \theta = \frac{l' \cos \alpha \sin \theta}{\cos(\theta + \alpha)} = \frac{l' \cos \alpha \sin(\frac{l}{Dh} n_0^3 \gamma V)}{\cos(\frac{l}{Dh} n_0^3 \gamma V + \alpha)} \quad (6)$$

其中,  $\theta$  为偏转角;  $\alpha$  为单个楔形棱镜的楔角;  $l'$  为第二块与第三块电光棱镜的长度和 ( $l' = l_1 + l_2$ )。根据输入电压的大小,由式(6)可计算出横向位移。

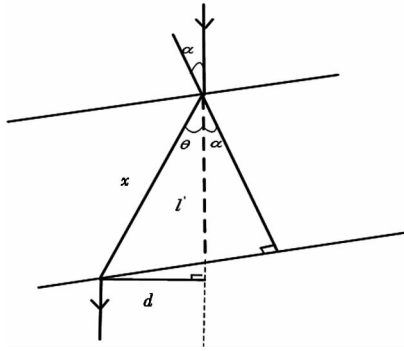


图7 横向位移计算原理图

图8为锥角与横向位移关系。由图可知： $\varphi = \arctan \frac{f}{d}$ ，聚焦镜焦距不变的情况下，改变横向位移大小可以控制锥孔的锥度。

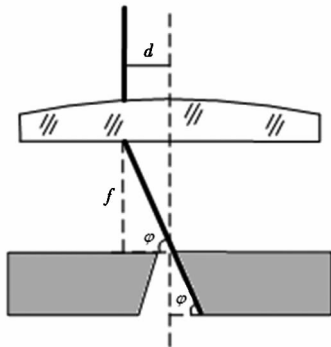


图8 锥角与横向位移关系

#### 4 设计实例

举例使用 KDP 电光晶体，其电光系数为  $\gamma = 10.6 \text{ pm/V}$ ，折射率为  $n_0 = 1.512$ ，令入射光束直径为  $3 \text{ mm}$ ， $l = 10 \text{ mm}$ ， $l' = 100 \text{ mm}$ ， $h = 3 \text{ mm}$ ， $D = 30 \text{ mm}$ ， $\alpha \approx \frac{l}{D} = 0.3 \text{ rad}$ ，得电压与横向位移曲线如图9所示。

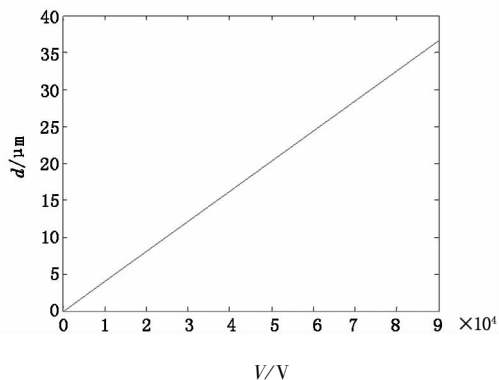


图9 KDP 电光晶体的电压与横向位移的曲线

举例使用 D-KDP 电光晶体，其电光系数  $\gamma = 20.8 \text{ pm/V}$ ，折射率  $n_0 = 1.508$ ，令入射光束直径为  $3 \text{ mm}$ ， $l = 10 \text{ mm}$ ， $l' = 100 \text{ mm}$ ， $h = 3 \text{ mm}$ ， $D = 30 \text{ mm}$ ，

$\alpha \approx \frac{l}{D} = 0.3 \text{ rad}$ ，得电压与横向位移曲线如图10所示。

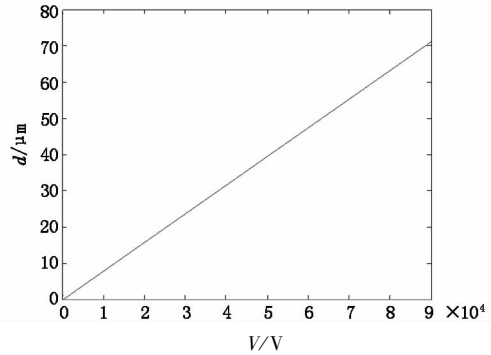


图10 D-KDP 电光晶体的电压与横向位移的曲线

举例使用 RTP 电光晶体，其电光系数为  $\gamma = 35 \text{ pm/V}$ ，折射率为  $n_0 = 2.15$ ，令入射光束直径为  $3 \text{ mm}$ ， $l = 10 \text{ mm}$ ， $l' = 100 \text{ mm}$ ， $h = 3 \text{ mm}$ ， $D = 30 \text{ mm}$ ， $\alpha \approx \frac{l}{D} = 0.3 \text{ rad}$ ，得电压与横向位移曲线如图11所示。

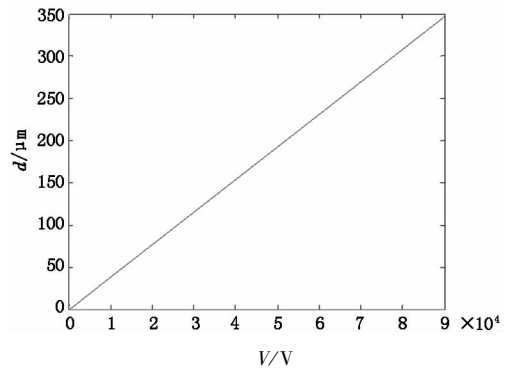


图11 RTP 电光晶体的电压与横向位移的曲线

#### 5 优化分析

由上面的例子可以看出，不同的电光晶体，在电压最大值为  $90000 \text{ V}$  时所产生的最大横向位移是不同的，电光晶体的电光系数，折射率越大，施加相同的电压后所产生的横向位移也越大。除此因素之外，第二块与第三块电光棱镜的长度之和  $l'$  ( $l' = l_1 + l_2$ ) 也会对产生的最大横向位移有很大的影响。

举例使用 RTP 电光晶体，改变 2 号和 3 号楔形电光棱镜的总长  $l'$ ， $l'$  越大则产生的横向位移范围越大。令入射光束直径为  $3 \text{ mm}$ ， $l = 10 \text{ mm}$ ， $l' = 150 \text{ mm}$ ， $h = 3 \text{ mm}$ ， $D = 30 \text{ mm}$ ， $\alpha \approx \frac{l}{D} = 0.3 \text{ rad}$ ，得到如图11所示的电压与横向位移曲线，可产生  $0 \sim 500 \mu\text{m}$  的横向位移。令  $l' = 200 \text{ mm}$  时，得到如图12所示的电压与横向位移曲线，可产生  $0 \sim 700 \mu\text{m}$

的横向位移。

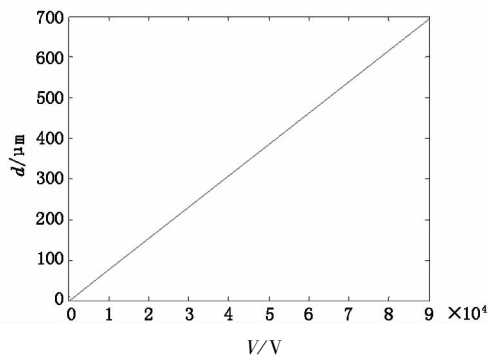


图 12  $l'$  为 200 mm 时的电压与横向位移曲线

## 6 结 论

(1) 本文提出了一种调节光束产生动态横向位移的方法,基于此方法可实现激光加工锥度可控的倒锥孔。

(2) 采用四块楔形电光晶体,按照特定的方式组合,其中第 1 号与 4 号楔形电光棱镜大小相等,结构相同,光轴方向一致;第 2 号与 3 号楔形电光棱镜大小相等,结构相同,光轴方向一致,且与 1 号和 4 号的光轴方向相反,四块楔形棱镜组合成长方体结构。给四块楔形棱镜施加电压,电压方向与 1 号和 3 号电光棱镜的光轴方向相同,与 2 号和 4 号棱镜的光轴方向相反,此时 2 号与 3 号电光棱镜的折射率相同,1 号和 2 号,3 号和 4 号电光棱镜产生相同的折射率差,光束垂直入射分别在 1 号和 2 号的连接面,3 号和 4 号的连接面发生两次偏转,产生横向位移。调节电压的大小,产生动态的横向位移,可实现孔锥度的实时调控。

(3) 根据具体的锥度要求,推算产生横向位移范围,为了避免施加电压过大,可使用电光系数与折射率较大的电光晶体,或者改变 2 号 3 号电光棱镜的长度之和  $l'$ ,来产生范围更大的动态横向位移。

(4) 本方法原理简单,结构简易,精度可控性强,在激光微细加工领域具有非常广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Inverse-Taper-Mould[EB/OL]. <http://www.haaslti.com/pdf/inverse-taper-module.pdf>.
- [2] Ptof Dr T thomas“Beam Shaping for industrial LaserSources”[EB/OL]. [http://www.swisslaser.net/libraries.files/Beam\\_Sahping\\_for\\_Industrial\\_Laser\\_Sources\\_GRAF.pdf](http://www.swisslaser.net/libraries.files/Beam_Sahping_for_Industrial_Laser_Sources_GRAF.pdf).
- [3] Ye Yutang, Rao Jianzhen, Xiao Jun. Optical tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)  
叶玉堂, 饶建珍, 肖峻. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] R Poprawe, A Gillner, D Hoffmann. High speed high precision ablation from ms to fs [C]. SPIE, 2008, 7005: 700502.
- [5] Ludolf Herbst, John P Quitterb, Gregory M Ray, et al. High peak power solid state laser for micromachining of hard materials [C]. SPIE, V. 2, 4968 - 14 (p. 1 of 9).
- [6] Wan Lingyu, Lu Zhiyong, Wang Rongcheng. Electro-optic laser scanner for arbitrary scanning in 8 rows [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 323 - 327. (in Chinese)  
万玲玉, 卢智勇, 王戎承. 一种 8 行任意扫描的电光扫描器[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 323 - 327.