

# 基于功率谱密度分析真空吸盘对加工 KDP 晶体表面的影响

陈珊珊 徐敏

(复旦大学光科学与工程系, 上海 200433)

**摘要** 由于 KDP( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )晶体硬度低的特性,在利用单点金刚石切削技术对其进行加工的过程中,所使用的真空吸盘夹具会在其加工表面产生周期性波纹。周期性波纹在强激光非线性效应的作用下,不但会严重影响输出光束的质量,甚至还会破坏光学元件。因此,利用功率谱密度检测 KDP 晶体的加工表面,分析误差源,并指导加工工艺的改进。最后得出结论:在利用单点金刚石切削技术加工 KDP 晶体时,应根据不同的加工方式选择不同形状的真空吸槽作为夹具,尽量避免在垂直切削方向上使用真空吸槽吸附晶体,以减小吸槽的吸附力对晶体加工表面的影响。

**关键词** 光学制造;KDP 晶体;真空吸盘;功率谱密度;表面波纹度

**中图分类号** TG756 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.092201

## Analysis on Influence of Vacuum Chuck on Machined Surface of KDP Crystal Using Power Spectral Density

Chen Shanshan Xu Min

(Department of Optics Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** Because KDP crystal is a soft material, when it is machined by single point diamond turning, vacuum chuck will result in surface waviness on crystal's surface. Surface waviness will seriously affect the quality of high power laser beam, or even destroy optical elements, due to the nonlinear effect of high power laser. In order to improve the ultra-precision machining of KDP crystal, power spectral density is used to detect the machined surface of KDP crystal, and to analyze error sources. It is discovered that processing methods should be chosen according to the shape of vacuum chuck, and the use of vacuum chuck should be avoid in the vertical direction.

**Key words** optical fabrication; KDP crystal; vacuum chuck; power spectral density; surface waviness

**OCIS codes** 220.4840; 190.4400; 220.4610

## 1 引言

KDP 晶体不仅具有较大的光电系数和非线性光学系数、较高的激光损伤阈值,而且其光学吸收系数低、光学均匀性高。自 20 世纪 40 年代发展以来,被广泛应用于激光变频、电光调制、光开关以及惯性约束聚变等先进领域。但 KDP 晶体易潮解、硬度低、温度急剧变化时容易破裂的特点,给其加工带来一定的难度<sup>[1]</sup>。目前,KDP 晶体主要的加工方法有研磨、抛光以及切削。与研磨和抛光相比,单点金刚石切削技术(SPDT)能高精度、高效率地加工光学表面,不会带来亚表面损伤,而且加工后的表面没有塌边,也不会残留加工物<sup>[2,3]</sup>。然而,利用单点金刚石切削技术加工 KDP 晶体光学表面时,由于机床精度、刀具前角、刀具半径、进给量、晶体晶向、夹具等因素,使 KDP 晶体的表面粗糙度、表面波纹度以及透射波前相应地受到不同程度的影响。刀具前角对表面粗糙度的影响非常大,但在某一刀具圆弧半径下,存在一个最佳刀具前角,一般为

**收稿日期**: 2011-02-14; **收到修改稿日期**: 2011-04-13; **网络出版日期**: 2011-07-29

**基金项目**: 上海市引进技术的吸收与创新项目(2010CH-007)资助课题。

**作者简介**: 陈珊珊(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 082021011@fudan.edu.cn

**导师简介**: 徐敏(1959—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、先进光学制造与现代光电检测等方面的研究。E-mail: minx@fudan.edu.cn

—30°~—45°。而进给量和刀具圆弧半径对表面粗糙度的影响的理论公式为  $R_{pv} = f^2/8R$ ,  $R_{pv}$  是表面粗糙度的峰谷值(PV),  $f$  是刀具进给量,  $R$  是刀具圆弧半径<sup>[2]</sup>。另外,加工机床精度、环境以及夹具的影响,会在加工表面产生周期性波纹,使得表面波纹度难以减小。周期性波纹在强激光非线性效应的作用下,不但导致光强损伤,严重影响输出光束的质量,而且降低 KDP 晶体表面损伤阈值,甚至损坏光学元件<sup>[1]</sup>。因此,评价和抑制周期性波纹在 KDP 晶体加工过程当中十分重要。

## 2 利用功率谱密度评价 KDP 晶体光学表面质量

评价 KDP 晶体光学表面质量的方法有很多种,传统的方法有峰谷值、均方根值(RMS)、泽尼克多项式等。但这些传统的评价方法在描述表面轮廓上并不直观,甚至在一定的条件下作用会十分有限。这不仅不利于光学表面的质量评定,还使加工工艺的分析和改进受到阻碍<sup>[4,5]</sup>。尽管对超精密光学表面的表面轮廓很难进行定量描述,但可以把表面轮廓看成是由不同频率、不同振幅、不同相位的波面叠加而成<sup>[4]</sup>。而功率谱密度(PSD)是一种基于傅里叶频谱分析的评论方法,其值为表面轮廓某个空间频率振幅平方,能直观、分立地给出表面轮廓信息,能为 KDP 晶体表面加工工艺提供有效的评价和分析依据,进而抑制加工过程中产生的误差,改善加工工艺。

光学表面在一维方向某一条采样线上的采样数值  $\phi(n)$  经过傅里叶变换后为<sup>[6]</sup>

$$\phi(\nu) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n) \exp(-2\pi j\nu x/N), \quad (1)$$

式中  $N$  为采样总数。若空间频率表示为

$$\nu(n) = n/l, \quad [-(N/2 - 1) < n < N/2 + 1] \quad (2)$$

式中  $l$  为采样长度。根据功率谱密度的定义,一维功率谱密度为

$$f_{\text{PSD}}(\nu) = \phi^*(\nu) \cdot \phi(\nu) \cdot l, \quad (3)$$

由(3)式可以看出,晶体表面的功率谱密度  $f_{\text{PSD}}(\nu)$  为各频率分量振幅的平方。因此,通过对表面 PSD 的测量,就能清晰地了解各频率波段面对晶体表面的贡献,进而指导分析加工过程中各误差源对表面误差的贡献。

另外,通过 PSD 还可以与传统的评价方式进行转换,例如计算某一波段( $\nu_1 \sim \nu_2$ )的表面粗糙度

$$f_{\text{RMS}}(\nu_1 \sim \nu_2) = \sqrt{\sum_{\nu=\nu_1}^{\nu_2} f_{\text{PSD}}(\nu) \cdot \Delta\nu}. \quad (4)$$

根据波前空间频率的不同,表面轮廓可以分为表面面型、表面波纹度、表面粗糙度。在频域中,与之对应的频段分别为低频段(频率  $\nu < 0.03 \text{ mm}^{-1}$ , 周期  $T > 33 \text{ mm}$ )、中频段(频率  $0.03 \text{ mm}^{-1} < \nu < 8.3 \text{ mm}^{-1}$ , 周期  $0.12 \text{ mm} < T < 33 \text{ mm}$ )和高频段(频率  $\nu > 8.3 \text{ mm}^{-1}$ , 周期  $T < 0.12 \text{ mm}$ )。对于 KDP 晶体而言,低频段和高频段的表面轮廓可以用传统激光干涉仪和白光干涉仪进行准确的测量,而中频段的表面轮廓通过高分辨率干涉条纹测量更为有效。由于 KDP 晶体的中频段表面轮廓在强激光系统中会引起非线性自聚焦效应,造成光学元件的丝状破坏和降低光束的可聚焦功率,甚至对激光安全运行产生威胁<sup>[1,7,8]</sup>,因此,有效地测量和抑制表面轮廓的中频段,对强激光中的非线性材料具有重要作用。

在美国 NIF 激光器中,要求

$$f_{\text{PSD}}(\nu) \leq A\nu^{-b}, \quad (0.03 \text{ mm}^{-1} \leq \nu \leq 8.3 \text{ mm}^{-1}) \quad (5)$$

式中  $A=1.05$ ,  $b=1.55$ 。等价于在  $0.12 \sim 33 \text{ mm}$  空间周期上的均方根波前误差为  $2.9 \text{ nm}$ <sup>[6]</sup>。

## 3 实验条件及检测分析

实验中采用的切削设备为 Nanotech350 单点金刚钻车床。利用 SPDT 的飞刀加工技术对尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的 KDP 晶体样品进行加工。图 1 为 KDP 晶体的加工原理示意图。加工中所使用的金刚石车刀刀具前角为  $-25^\circ$ , 刀具圆角直径为  $2.5 \text{ mm}$ 。车刀安装在空气主轴上,以  $2000 \text{ r/min}$  的转速绕主轴旋转,进刀率为  $0.5 \text{ mm/min}$ ,精切深度为  $2 \mu\text{m}$ 。加工时,KDP 晶体安装在以真空吸盘作为夹具的工作平台上,晶体中心距离飞刀转轴中心  $100 \text{ mm}$ 。真空吸盘如图 2 所示,该夹具采用的是回字形吸槽,槽间

周期为 3 mm。

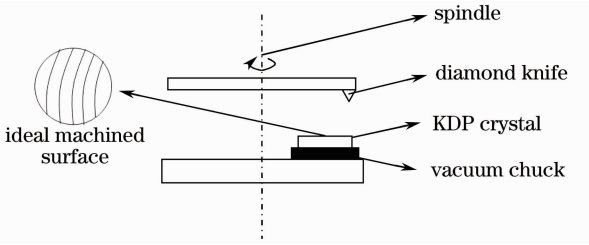


图 1 KDP 晶体加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of KDP crystal machining

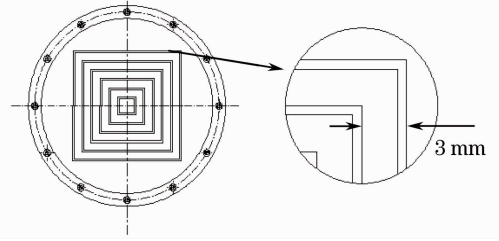


图 2 回字形吸槽夹具

Fig.2 Schematic top view of quadrate vacuum chuck

用 Zygo 公司生产的数字波面干涉仪通过高分辨率干涉条纹对加工后的 KDP 晶体光学表面进行测量。图 3 为加工后样品表面在中频段的检测结果。图 3(a) 为样品在中频段的三维形貌,  $x$  向为车刀切削方向, 图 3(b) 为样品中频段切割方向上的 PSD, 图 3(c) 为样品中频段切割方向上的 RMS, 图 3(d) 为样品中频段垂直切割方向上的 PSD。通过测量可知, 加工后的 KDP 晶体中频段切割方向上的 RMS 值为 5.626 nm, 高于 2.9 nm。通过对该方向上的 PSD 进行测量, 发现样品表面切割方向, 即  $x$  方向有明显的周期性结构现象, 但垂直切割方向, 即  $y$  方向却没有。该异常周期性结构的频率为  $0.333 \text{ mm}^{-1}$ , 对应该频率的周期为 3.000 mm。该周期与加工该样品时所用夹具的周期相同。经过多次变换加工参数的实验, 该异常频率依然存在。由于 KDP 晶体硬度低的特点, 真空吸槽对其的吸附作用会使 KDP 晶体的面型产生误差, 并将误差传递到加工表面<sup>[1]</sup>。因此判断该异常周期性结构的现象是由加工时所用夹具产生。当回字形真空吸槽对 KDP 晶体进行吸附时, 晶体加工表面由于吸附作用而产生误差。但由于车刀仅对晶体  $x$  方向进行切削,  $x$  方向上的表面误差在加工当中被破坏, 而  $y$  方向的误差在加工过程中未遭到破坏, 该误差在  $x$  方向上表现为周期性波纹, 并反映在  $x$  方向的 PSD 上。

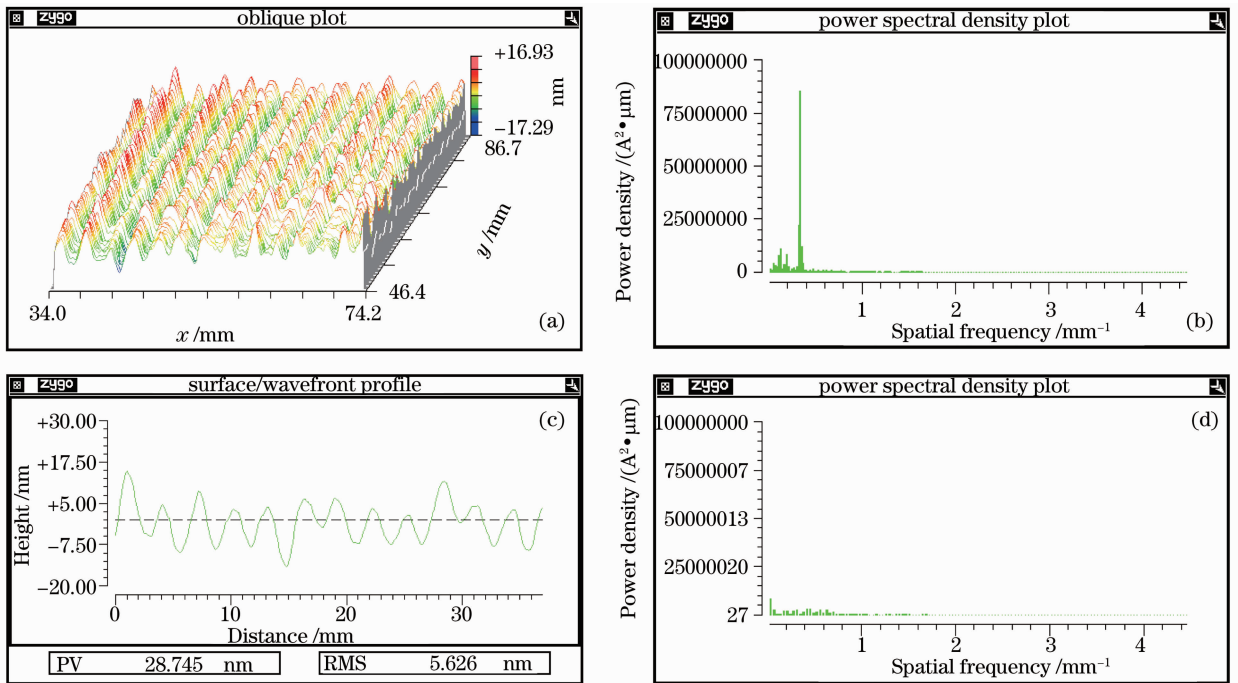


图 3 回字形吸槽离轴加工 KDP 晶体的检测结果。(a) 样品在中频段的三维形貌; (b) 样品在中频段  $x$  方向的 PSD; (c) 样品在中频段  $x$  方向的 RMS; (d) 样品在中频段  $y$  方向的 PSD

Fig.3 Testing results of KDP crystal using quadrate vacuum chuck. (a) KDP crystal surface at mid-frequency band; (b) KDP crystal's PSD of mid-frequency band at  $x$  direction; (c) KDP crystal's RMS of mid-frequency band at  $x$  direction; (d) KDP crystal's PSD of mid-frequency band at  $y$  direction

在加工过程中,为避免夹具对 KDP 晶体加工表面带来严重影响,进行了相应的工艺改进。由于飞刀在加工过程中绕着空气转轴旋转进行 KDP 表面的加工,飞刀在加工表面的加工路径为圆环状。因此,在设计真空吸槽时,吸槽形状应尽量与飞刀的加工路径相符,避免真空吸槽在垂直于加工路径的方向上对加工晶体表面有作用力。所以,在对 KDP 晶体进行加工时,所用夹具改为环形吸槽,如图 4 所示,槽间周期为  $3.7\text{ mm}$  (频率为  $0.270\text{ mm}^{-1}$ )。加工时,晶体中心与转轴中心重合,使飞刀加工路径与夹具真空吸槽对加工表面的作用相符,其他加工参数不变。图 5 为采用环形吸槽夹具加工样品后的检测结果。图 5(a)为样品在中频段的三维形貌,图 5(b)为样品在中频段垂直于切割方向上的 PSD,图 5(c)为样品在中频段垂直于切割方向上的 RMS,图 5(d)为样品在中频段切割方向上的 PSD,图 5(e)为样品在中频段切割方向上的 RMS。通过测量可知,加工后的 KDP 晶体中频段垂直于切割方向上的 RMS 值为  $2.780\text{ nm}$ ,切割方向上的 RMS 值为  $0.999\text{ nm}$ ,均低于  $2.9\text{ nm}$ ;而且晶体表面的 PSD 也未出现明显异常。由实

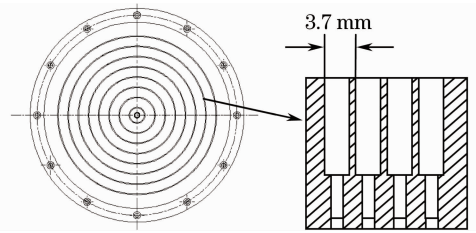


图 4 环形吸槽夹具

Fig. 4 Schematic top view of circular vacuum chuck

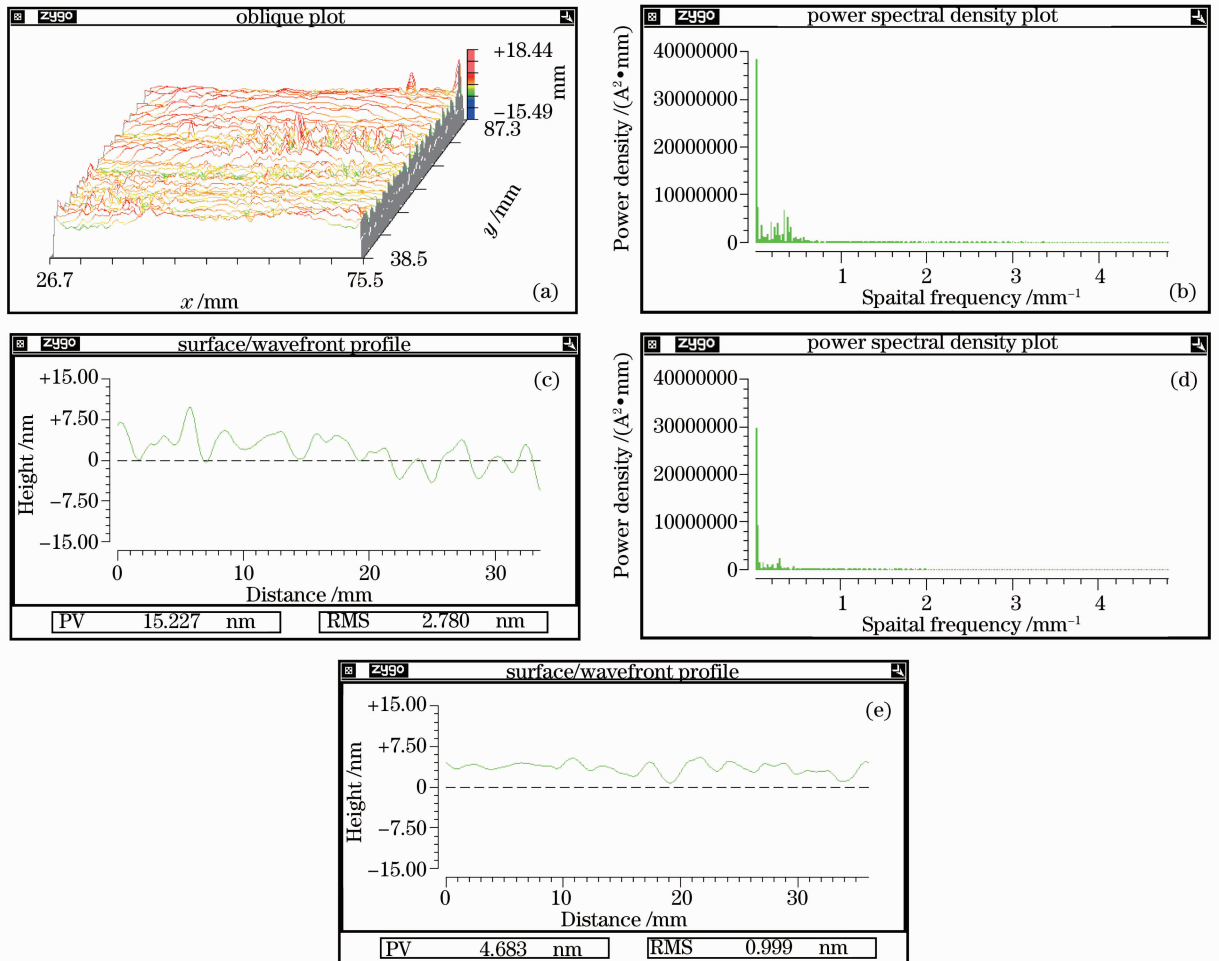


图 5 环形吸槽加工的 KDP 晶体检测结果。(a)样品在中频段的三维形貌;(b)样品在中频段垂直于切割方向上的 PSD;(c)样品在中频段垂直于切割方向上的 RMS;(d)样品在中频段切割方向上的 PSD;(e)样品在中频段切割方向上的 RMS  
Fig. 5 Testing results of KDP crystal using circular vacuum chuck. (a) KDP crystal surface at mid-frequency band; (b) KDP crystal's PSD of mid-frequency band at vertical direction of machining; (c) KDP crystal's RMS of mid-frequency band at vertical direction of machining; (d) KDP crystal's PSD of mid-frequency band at direction of machining; (e) KDP crystal's RMS of mid-frequency band at direction of machining

验结果可知,由于飞刀切削路径与环形吸槽形状相符,飞刀加工时的切削作用能够减小吸槽对晶体表面沿飞刀切削路径方向的影响,使夹具对 KDP 晶体表面的影响大幅度减小。

## 4 结 论

在加工 KDP 晶体时,应根据不同的加工方式,主要是根据飞刀切削路径,选择不同形状的真空吸槽作为夹具,尽量使切削路径与真空吸槽的形状相符,避免在垂直于切削路径方向上使用真空吸槽吸附晶体,利用飞刀的切削作用减小吸槽的吸附力对晶体加工表面产生的误差,从而达到减小 KDP 晶体加工表面的表面波纹度的目的。

## 参 考 文 献

- 1 Yang LI. Advanced Optical Manufacturing Technology[M]. Beijing: Science Press, 2001. 235~324  
杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 235~324
- 2 Yang Fuxing. Study on the ultra-precision machining technology for KDP crystals[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003, (9): 63~65  
杨福兴. KDP 晶体超精密加工技术的研究[J]. 制造技术与机床, 2003, (9): 63~65
- 3 Wang Ben. Damage Detection of Different Machined Surface and Damage Mechanism Analysis of KDP Crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. 9~12  
王 奔. KDP 晶体不同加工表面损伤检测与损伤机理分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. 9~12
- 4 Liu Yaohong, Teng Lin, Li Daqi *et al.*. Application of power spectral density to specify optical super-precision surface[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2006, **42**(2): 1~3  
刘耀红, 滕 霖, 李大琪 等. 功率谱密度(PSD)在评价超精密光学表面中的应用研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, **42**(2): 1~3
- 5 Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin *et al.*. Numerical method of the power spectral density[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6): 661~664  
张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林 等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(6): 661~664
- 6 J. K. Lawson, C. R. Wolfe, K. R. Manes *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function[C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 38~50
- 7 Dai Binfei. Study on Methods for Assessing Precision of Optical Surface[D]. Suzhou: Soochow University, 2005. 31~50  
戴斌飞. 面形精度评价方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2005. 31~50
- 8 W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Hennesian *et al.*. Modeling characterization of the National Ignition Facility focal spot[C]. *SPIE*, 1999, **3264**: 93~104