

特约专栏

# 聚焦离子束技术制造金刚石切削刀具的研究

徐宗伟, 兀 伟, 张少婧, 赵 兵

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072)

**摘 要:** 概述了基于聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)加工技术制备金刚石切削刀具的相关研究进展, 并介绍了金刚石刀具在超精密加工领域的研究背景及其制造现状。作为一种先进的微纳制造技术, 聚焦离子束已在微尺度金刚石刀具制造研究中发挥了重要作用。针对金刚石刀具的刃口半径、刃形精度等核心参数, 国内外相关研究者开展了聚焦离子束制造方法与工艺优化研究, 实现了高质量刀具的制造, 聚焦离子束加工可获得刃口半径为 15 ~ 22 nm 的金刚石刀具制造。从微观切削基础和微纳光学元件制造两个角度, 论述了聚焦离子束制造金刚石刀具的应用研究进展, 介绍了其在纳米切削机理、微纳尺度光学元件制造中的应用。最后从提高 FIB 制造效率、应用研究拓展等角度, 对该领域未来的发展进行了展望。

**关键词:** 聚焦离子束; 先进制造; 超精密加工; 金刚石刀具

**中图分类号:** TG711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674 - 3962(2013)12 - 0746 - 05

## Research Progress of Manufacture of Diamond Cutting Tools Based on Focused Ion Beam (FIB)

XU Zongwei, WU Wei, ZHANG Shaojing, ZHAO Bing

(Centre of MicroNano Manufacturing Technology, State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The research progress of manufacture of diamond cutting tools based on Focused Ion Beam (FIB) processing technology is outlined. Firstly, the research background and manufacturing progress of diamond cutting tool applied in the ultraprecision machining field is introduced. As an advanced micro-nano manufacturing technology, focused ion beam has played an important role in the micro scale diamond tools manufacturing. Aiming at the diamond tool core parameters of cutting edge radius, edge shape accuracy, the researchers carried out the FIB method and process optimization to achieve high quality diamond tool. Research found that FIB can manufacture diamond tool with edge radius as small as 15 - 22 nm. Then, the applications of FIB diamond tools are presented from the two aspects of micro cutting mechanism and micro-nano optical component manufacturing. Finally, future developments in this field are discussed, including, how to improve the FIB manufacturing efficiency and broaden the application field.

**Key words:** focused ion beam; advanced manufacturing; ultraprecision machining; diamond cutting tool

## 1 前 言

微光学元件能实现普通光学元件难以实现的阵列和集成等新功能, 近年来在众多领域得到了长足发展和广泛应用。对于微光学元件的加工制造, 相对于 MEMS 技术和激光直写技术而言, 金刚石刀具超精密微细加工技术具有适用范围广且成型精度高的特点(其面型精度可

实现亚微米量级), 已引起广泛重视。

金刚石刀具在超精密加工技术中有非常重要的作用, 高精度金刚石刀具是获得纳米级加工精度的关键<sup>[1]</sup>。圆弧刃金刚石刀具具有 3 个关键参数, 刃口半径(前刀面和后刀面相交的切削刃锋利度, 如图 1 所示)、刀尖圆弧的波纹度和前刀面粗糙度值。刀具刃口半径值决定了切削加工的最小切削厚度, 很大程度上决定了被加工表面的粗糙度。而刀尖圆弧误差将会被直接复印到被加工工件的表面, 刀尖圆弧半径值的变化会显著影响被加工表面的波纹度值。前刀面粗糙度值会影响切屑的流动状态, 从而影响加工表面的质量。金刚石刀具制备的精度指标将直接影响超精密切

收稿日期: 2013 - 09 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275559; 50935001);  
工信部科技重大专项资助项目(2011ZX04014 - 071)

第一作者及通讯作者: 徐宗伟, 男, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师

DOI: 10. 7502/j. issn. 1674 - 3962. 2013. 12. 06

削的性能<sup>[1-2]</sup>。

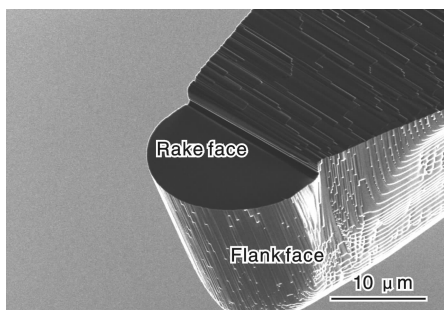


图 1 微尺度金刚石刀具的 SEM 照片<sup>[2]</sup>

Fig. 1 The SEM image of micro scale diamond tool

研磨法是制备宏观金刚石刀具最常用的方法。英国 Contour 公司是专业制备金刚石刀具的优秀企业，应用客户遍布全球。国内对金刚石刀具研磨技术的研究起步较晚，303 所、上海仪表厂、230 厂和上海舒伯哈特工具有限公司等科研院所或单位对直线刃金刚石刀具的研磨工艺做了较多的研究工作，可将直线刃金刚石刀具刃口半径研磨到 100 nm 左右。国内高校如中国科技大学<sup>[3]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[4]</sup>和长春光学精密机械学院等单位，在圆弧刃金刚石刀具研磨和金刚石晶体理论方面做了大量工作，受到国家自然科学基金等的支持，取得了较大发展。哈尔滨工业大学精密工程研究所的宗文俊、李增强等老师从材料属性和去除机理入手<sup>[4]</sup>，研究了金刚石刀具制造过程中的材料晶面选择、刃磨工艺优化等核心工艺及基础科学问题，该所成功研制了圆弧刃金刚石刀具的刀具刃磨机，可以稳定获得刃口半径 50 nm 以内的金刚石刀具。

## 2 聚焦离子束的金刚石刀具制造

聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术是近年来迅速发展的微纳制造技术，如图 2 所示。它具有精度高、灵活性好和一次成型等技术优势，其最小聚焦束斑直径可以控制在 10 nm 左右，可以实现在指定位置进行

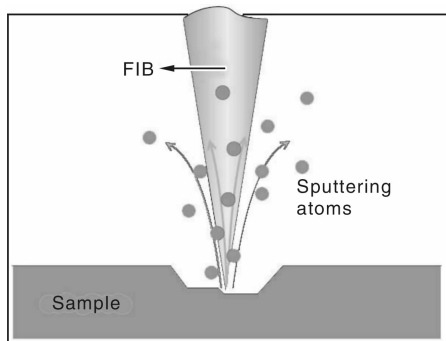


图 2 聚焦离子束的溅射加工原理图<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Illustration of focused ion beam milling process

高精度刻蚀加工，在 IC 芯片失效分析、纳米器件制造、TEM 样品制备、高精度特型结构制造等领域已经得到了广泛应用。随着 FIB 技术研究的不断深入，它已成为具有广泛发展前景的微纳加工技术之一。

2000 年美国 Sandia 国家实验室首次提出利用聚焦离子束技术实现微型刀具的制备研究<sup>[6]</sup>。他们利用聚焦离子束铣削加工出切微槽车刀，尺寸范围为 15 ~ 100 μm，刀具的材料包括单晶金刚石、硬质合金和高速钢，刀面形状呈矩形、三角形和梯形等，如图 3 所示。

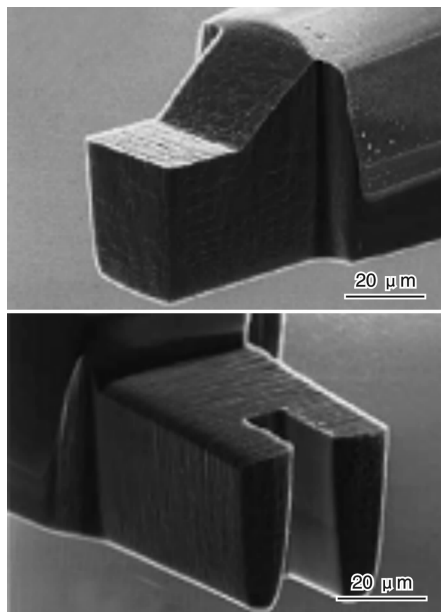


图 3 矩形微型刀<sup>[6]</sup>

Fig. 3 Rectangular micro cutting tool

近年来，新加坡制造技术研究院、天津大学微纳制造研究室和英国赫尔瓦特大学，先后对聚焦离子束的刀具制造技术进行了发展和提升。相关研究表明，FIB 制备超精密加工用刀具有以下几个优点：①可形成尖锐的切削边缘，获得极其锋利的刀具刃口半径；②刀具的几何形状限制小，可形成多种异形结构；③由于材料去除是通常在原子量级，加工应力-应变较传统研磨法显著减小，有效提高了刀具制造的完整性。

### 2.1 刀具质量控制

#### 2.1.1 刃口半径

金刚石刀具刃口半径是其应用和基础研究的核心参数之一，如图 4 所示。在微纳尺度切削基础研究中，刀具刃口半径  $r$  决定了可实现的极限切削厚度 (Minimum Cutting Thickness,  $t_0$ )，如公式 1 所示<sup>[7-8]</sup>。

$$t_0 = r(1 - \cos(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2})) \quad (1)$$

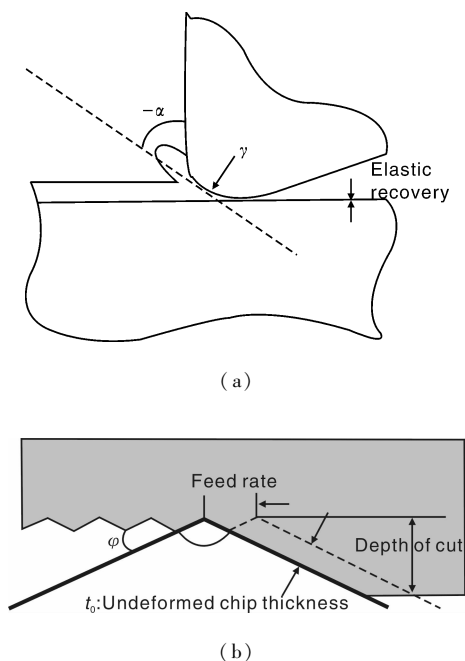


图 4 刀具刃口与切削参数关系<sup>[8]</sup>: (a) 纳米切削推挤模型, (b) 最薄切屑模型

Fig. 4 The relationship between the edge radius and cutting parameters: (a) model for nanocutting and (b) model for thinnest chip

目前纳米切削基础研究中广泛采用的是分子动力学 (Molecular Dynamics, MD) 仿真, 由于受到计算模拟的规模 and 能力的限制, 在 MD 仿真中采用刀具的刃口半径通常在几纳米量级。而采用传统研磨制造法获得的金刚石刀具, 其刃口半径通常在几十纳米量级甚至更大 ( $>50 \text{ nm}$ )。因此, 包括推挤理论模型等许多 MD 模拟的纳米切削机理结论尚无法得到有效的验证。

相对于传统研磨法, 聚焦离子束技术可以稳定获得纳米尺度锋利刃口。针对聚焦离子束能量高斯分布的特点, 在远离离子束入射方向的一侧可以获得更加锋利的刀具刃口, 这是聚焦离子束形成锋利刃口的基本准则。最初 Sandia 实验室研究通过结合 Pt 沉积保护 - FIB 切截面 - SEM 高分辨率观测, 获得了刃口半径约为  $40 \text{ nm}$  的金刚石刀具<sup>[9]</sup>。天津大学微纳制造实验室通过技术积累, 考虑聚焦离子束离子注入损伤影响, 优化聚焦离子束制造工艺, 同时利用扫描电镜在位高分辨率刃口观测, 实现了刃口半径为  $15 \sim 22 \text{ nm}$  的金刚石刀具可重复制造。并基于获得的  $22 \text{ nm}$  锋利金刚石刀具, 获得了对单晶铜样品的  $8 \pm 2 \text{ nm}$  的极限厚度切削, 通过增加冷却液改善润滑条件 (公式 (1) 中的  $\beta$  参数), 进一步减小极限切削厚度至  $6 \pm 2 \text{ nm}$ 。研究表明, 在小于  $10 \text{ nm}$  的切削厚度条件下, 极限切削厚度与金刚石刀具刃口半径的比率仍可达到  $0.3 \sim 0.4$ 。

## 2.1.2 切削刃形状精度

刀具的切削刃形状精度将直接影响到加工自由曲面的形状精度, 如图 5 所示。例如, 应用在惯性约束、激光核聚变装置中的各类反射镜等光学零件表面的加工精度将直接影响到各路高能激光的散射和透射程度, 如 KDP 晶体倍频转换器等零件, 其面形精度小于  $\lambda/6$ 、表面粗糙度 RMS 小于  $5 \text{ nm}$  时, 透射率才能达到使用要求<sup>[10]</sup>。在聚焦离子束加工晶体材料时, 若入射离子方向与主晶轴方向夹角很小时, 大部分入射离子会沿晶轴方向注入材料内部, 产生的反冲原子减少, 此种现象成为沟道效应, 如图 6 所示<sup>[11]</sup>。由于沟道效应的存在, 导致晶体材料刀具表面 FIB 加工效率不同进而使得刀具表面粗糙度增加。当形成切削刃的两个刀面都不够平滑时, 会严重影响微刀具的刃形精度, 如图 7 所示。

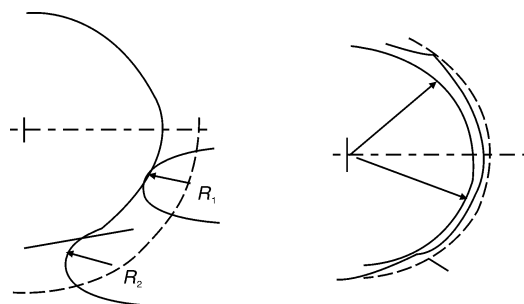


图 5 刀尖圆弧半径对加工的影响<sup>[1]</sup>

Fig. 5 Influence of nose radius on the processing

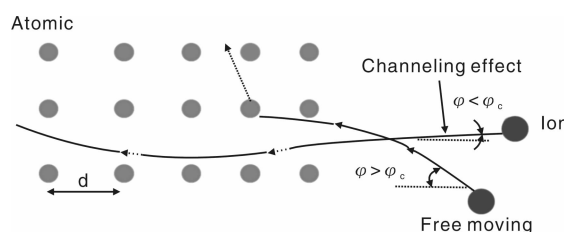


图 6 沟道效应示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 6 The illustration of channeling effect

针对聚焦离子束制造单晶金刚石刀具, 通过对束流搭接比及束流等核心加工参数的优化设置、再沉积现象控制<sup>[12]</sup>, 可以有效弱化聚焦离子束加工沟道效应对其刃形精度影响, 获得高精度刃形。

由于金刚石刀具需要制备出  $7^\circ$  左右的刀具后角, 在利用 FIB 制造复杂刃形刀具过程中, 存在离子束展宽不均匀现象, 严重影响不同位置的刃形精度。英国赫尔瓦特大学提出了灰度修正补偿技术<sup>[13]</sup>, 有效实现了亚微米尺度三维金刚石刀具的制造。

## 2.2 典型微纳制造应用

基于聚焦离子束的金刚石刀具应用研究主要包括两

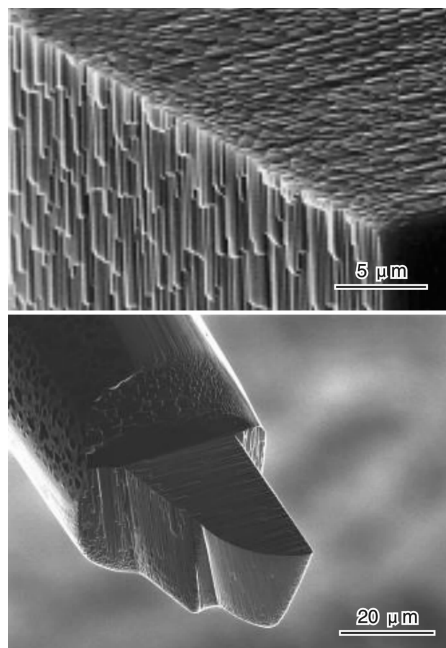
图 7 FIB 加工金刚石刀具存在沟道效应<sup>[9, 19]</sup>

Fig. 7 The channeling effect in diamond tool fabricated by FIB

个领域：一是微观切削基础研究，二是微纳光学元件的制造研究。

Sandia 实验室通过大量的实验工艺研究，证实了 FIB 制造微型车刀的切削可靠性，典型的切削实验表明，一把宽度为 13  $\mu\text{m}$  的微型车刀能够在全长 200 mm 的铝件上切出深度为 4  $\mu\text{m}$  的螺旋槽<sup>[9, 14]</sup>。新加坡制造技术研究院利用 FIB 制备出刃口长 25  $\mu\text{m}$  的直线刃微切削刀具，用其切削研究了多晶铝、无氧铜等材料中的不均匀硬质点、晶界等对切削表面质量的影响规律<sup>[15-16]</sup>。天津大学利用 FIB 修锐的金刚石刀具对 H62 黄铜基底进行了微尺度光栅刻划基础研究，分析了微尺度刻划中材料的金相、微尺度毛刺等尺寸效应影响及有效抑制办法<sup>[17]</sup>。

随着科技的进步，微光学器件特别是微衍射光学器件越来越显示出其重要的地位。而宏观的超精密车刀由于研磨制造法无法实现复杂轮廓刀具制造，导致其在加工大深宽比微结构时，会有部分区域加工不到，残留部分将直接影响微光学器件的衍射效率等光学性能。刃形复杂且刃口锋利的微刀具制备技术已经成为微器件超精密加工的关键。天津大学微纳制造实验室利用 FIBDW 灰度加工法，研究了三角形、梯形、半圆形及复杂 DOE 形微车刀的 FIB 铣削制备的关键工艺<sup>[18]</sup>，并成功应用于菲涅尔微光学元件的制备中<sup>[19]</sup>，如图 8 所示。通过聚焦离子束对金刚石刀具的修锐和修形，开展了微尺度刀具的滚压印母光栅制造及工艺优化研究，实现了微尺

度栅距圆柱母光栅的高精度制造<sup>[17]</sup>。

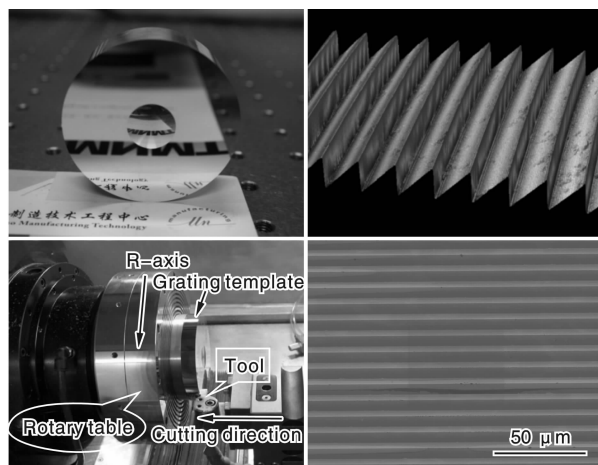
图 8 刀具加工的非涅尔反射镜和圆柱母光<sup>[15-17]</sup>

Fig. 8 Fresnel lens fabricated by diamond tool and roller grating template

英国赫尔瓦特大学研究了利用聚焦离子束加工技术在金刚石刀具上制备微细结构的方法，制备出单齿高 594 nm、末端宽 153 nm 的多齿微型金刚石刀具，并成功在无电解镀镍基底上 5 mm × 2 mm 范围内实现纳米光栅的加工制造，如图 9 所示。其中还详细阐述了加工过程中需要克服的诸如样品漂移、再沉积等诸多问题<sup>[13]</sup>。

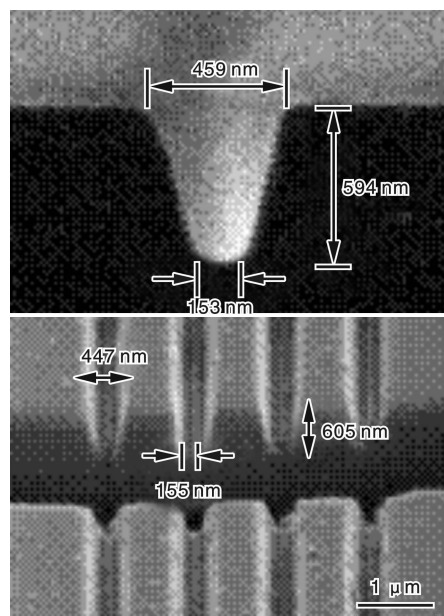
图 9 纳米尺度光栅金刚石刀具<sup>[13]</sup>

Fig. 9 Diamond tool for nano grating

### 3 结 语

随着相关应用需求的不断增加和发展，对聚焦离子

束刀具制备技术提出了更高的要求。该领域未来重点的发展趋势如下。

**微细金刚石刀具 FIB 制造效率和精度的协同作用** 相对于机械研磨、激光束等其他方法, 聚焦离子束方法存在加工效率低的不足。如何有效提高 FIB 加工效率, 对于刀具制造而言具有重要意义。近年来, FIB 生产厂家开展了设备功能的升级和革新。FEI 公司在新型号的 Helios 设备中, 将聚焦离子束的最大束流从之前的 20 nA 提高到了 65 nA, 有效的提高了 FIB 粗加工效率。而 Zeiss 公司在其最新推出的 FIB 设备中, 创新性的将激光束、电子束和离子束 3 束集成在了一起, 激光束的引入将显著提高整个系统的加工效率和应用范围。聚焦离子束装备的革新将有效提升 FIB 在超精密加工刀具中的应用研究。

**应用的深入与拓展** 进一步深入和拓展基于 FIB 制造金刚石刀具的应用研究是另外一个重点发展方向。包括, 进一步优化制造工艺和方法, 实现刃口半径小于 10 nm 的锋利刃口金刚石刀具制造; 刀具纳米级刃口半径的高精度无损检测方法; 在微纳光学元件制造应用中的拓展和推广等。

## 参考文献 References

- [1] Li Zengqiang (李增强). *Mechanical Lapping and Measurement Techniques of Nose Arc of Diamond Cutting Tools* (圆弧刃金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术) [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2008.
- [2] Zhang Shaojing (张少婧). *Study on Micro Tools Fabrication Methods and Key Technology Based on Focused Ion Beam Technology* (基于聚焦离子束技术的微刀具制造方法及关键技术的研究) [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [3] Zhang Jingmin (张竞敏). 单晶金刚石刀具的选料与定向 [J]. *Tool Technology* (工具技术), 1999, 33(7): 11–13.
- [4] Zong W J, Li Z Q, Sun T, et al. The Basic Issues in Design and Fabrication of Diamond-Cutting Tools for Ultra-Precision and Nanometric Machining [J]. *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(4): 411–419.
- [5] Xu Zongwei (徐宗伟), Fang Fengzhou (房丰洲), Zhang Shaojing (张少婧), et al. 基于聚焦离子束铣削的复杂微纳结构制备研究 [J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(1): 91–94.
- [6] Adams D P, Vasile M J, Krishnan A S M. Microgrooving and Microthreading Tools for Fabricating Curvilinear Features [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(4): 347–356.
- [7] Son S M, Lim H S, Ahn J H. Effects of the Friction on the Minimum Cutting Thickness in Micro Cutting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45: 529–535.
- [8] Ikawa N, Shimada S, Tanaka H. Minimum Thickness of Cut in Micromachining [J]. *Nanotechnology*, 1992, 3(1): 6–9.
- [9] Picard Y, Adams D P, Vasile M J, et al. Focused Ion Beam-Shaped Microtools for Ultra-Precision Machining of Cylindrical Components [J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 59–69.
- [10] Yuan Zhejun (袁哲俊), Wang Xiankui (王先逵). *Precision and Ultra Precision Machining Technology* (精密和超精密加工技术 第二版) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007: 1–106.
- [11] Kempshall B W, Schwarz S M, Prenitzer B I, et al. Ion Channeling Effects on the Focused Ion Beam Milling of Cu [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2001, 19: 749–754.
- [12] Ding X, Butler D L, Lim G C, et al. Machining with Micro-Size Single Crystalline Diamond Tools Fabricated by a Focused Ion Beam [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(2): 025 005.
- [13] Sun J, Luo X, Chang W, et al. Fabrication of Periodic Nanostructures by Single-Point Diamond Turning with Focused Ion Beam Built Tool Tips [J]. *J Micromech Microeng*, 2012, 22: 115 014 (11pp).
- [14] Adams D P, Vasile M J, Benavides G. Micromilling of Metal Alloys with Focused Ion Beam-Fabricated Tools [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25(2): 107–113.
- [15] Ding X, Jarfors A E W, Lim G C, et al. A Study of the Cutting Performance of Poly-Crystalline Oxygen Free Copper with Single Crystalline Diamond Micro-Tools [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36: 141–152.
- [16] Ding X, Rahman M A. Study of the Performance of Cutting Polycrystalline Al 6061 T6 with Single Crystalline Diamond Micro-Tools [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36: 593–603.
- [17] Li G H, Xu Z W, Fang F Z, et al. Micro Cutting of V-Shaped Cylindrical Grating Template for Roller Nano-Imprint [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 895–904.
- [18] Zhang S J, Fang F Z, Xu Z W, et al. Controlled Morphology of Microtools Shaped Using Focused Ion Beam Milling Technique [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2009, 27(3): 1 304–1 309.
- [19] Xu Z, Fang F Z, Zhang S J, et al. Fabrication of Micro DOE Using Micro Tools Shaped with Focused Ion Beam [J]. *Optics Express*, 2010, 18: 8 025–8 032.