

文章编号 1004-924X(2012)06-1316-09

单晶蓝宝石的延性研磨加工

戴欣平^{1,2}, 赵萍¹, 文东辉^{1*}

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032;
2. 金华职业技术学院 机电工程学院, 浙江 金华 321017)

摘要:为实现单晶蓝宝石的延性研磨加工,采用纳米压痕和划痕法测试并分析了单晶蓝宝石(0001)面的微纳力学特性,建立了单颗圆锥状磨粒的压入模型并计算了延性研磨加工的受力临界条件,分析了金刚石磨粒嵌入合成锡研磨盘表面的效果。对单晶蓝宝石进行了延性研磨加工试验,采用NT9800白光干涉仪、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等方法分析了单晶蓝宝石的延性研磨表面特征。试验结果表明:采用纳米压痕和划痕法可以为单晶蓝宝石的延性研磨加工提供工艺参数,单晶蓝宝石的延性堆积的极限深度为100 nm,金刚石磨粒的嵌入及在适当载荷下可以实现蓝宝石的延性研磨加工,实验条件下的最佳载荷为21 kPa,延性研磨后单晶蓝宝石表面划痕深度的分布情况较好,分散性小,研磨后的表面发生了位错滑移变形。

关键词:单晶蓝宝石;金刚石磨粒;延性研磨;纳米压痕法;纳米划痕法

中图分类号:O786 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1316

Ductile lapping of single crystal sapphire

DAI Xin-ping^{1,2}, ZHAO Ping¹, WEN Dong-hui^{1*}

(1. *Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China*)
(2. *College of Mechanical & Electrical Engineering, Jinhua College of Vocation and Technology, Jinhua 321017, China*)
* *Corresponding author, E-mail: wendh@zjut.edu.cn*

Abstract: To achieve the ductile lapping of a single crystal sapphire, micro/nano mechanic characteristics of the sapphire (0001) plane were measured by nanoindentation and nanoscratch methods. The indentation model of single cone abrasive grain was proposed and then critical force conditions were deduced during ductile lapping process. Experimental studies were conducted for the single crystal sapphire based on the diamond abrasive grain charging into a synthetic tin plate, and characteristics of ductile lapped surface were measured by a NT9800 white light interferometer, a Scan Emission Microscopy(SEM) and a Transmission Electron Microscopy(TEM). Experimental results show that nanoindentation and nanoscratch methods can provide processing parameters for the ductile lapping of single crystal sapphires, and its critical depth of pile-up is around 100 nm for sapphire nanoindentation.

收稿日期:2012-02-15;修订日期:2012-04-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50705088);教育部科学技术研究重点项目(No. 210088);浙江省新世纪151人才工程资助项目(No. Z18102004)

tion. The ductile lapping of the single crystal sapphire can be implemented by charging into diamond abrasive grains and selecting proper loads and the optimal load for ductile lapping is 21 kPa. After ductile lapping, the surface scratch depth of single crystal sapphire shows a smaller dispersion and the dislocation and slip are formed on the lapped surface.

Key words: single crystal sapphire; diamond abrasive grain; ductile lapping; nanoindentation method; nanoscratch method

1 引言

发光二极管(LED)为典型的异质结构,蓝宝石衬底在研磨、抛光等过程累积的残余应力、位错等损伤形式会影响 AlN、AlGaIn、GaN 薄膜的特性,如表面粗糙度、孔隙率和位错形态等。外延薄膜特性对发光效率有直接影响,因此提高 LED 中蓝宝石衬底的表面完整性,降低氮化镓薄膜的位错密度是制造高发光效率 LED 的重要途径^[1-2]。发光薄膜位错缺陷的产生与蓝宝石衬底表面粗糙度、位错形态、残余应力以及薄膜生长工艺、制备过程等息息相关。目前高质量薄膜生长的技术难度大且成本居高不下。此外,薄膜生长工艺体系的完善、优化过程均建立在蓝宝石衬底表面完整性的基础上,因此,制备高表面完整性的蓝宝石衬底是提升 LED 发光效率的重要课题^[3-5]。

Bashe 实验研究了磨削工艺参数对表面粗糙度、表面应力、亚表面损伤和材料去除速率的作用规律,除了验证常规磨削加工规律外,发现去离子水的种类对表面粗糙度和亚表面损伤有明显作用^[6]。Zarudi 从实验和理论上研究了延性磨削加工模式下氧化铝的表面完整性,指出 RMS 在 30~90 nm 光滑表面上断裂的形态不仅依赖于磨削加工参数,而且与基底材料的气孔密切相关,磨削表面的小麻点是磨粒与气孔共同作用的结果^[7]。SaitoTomohiro 的研究表明,蓝宝石经过加工会造成表面损伤和局部应变,500# 金刚石砂轮、4~8 μm 和 1 μm 的金刚石抛光液导致的位错层深度依次为 1.7 μm 、700 nm 和 250 nm,相对应的残留局部应变深度分别为 1.0 μm 、1.2 μm 和 300 nm^[8]。Weis 认为采用二氧化硅和锡盘直接抛光蓝宝石的主要作用机理是热液磨损作用,500 kPa 的抛光压力下 7 min 的二氧化硅抛光 30 min 以内可获得超光滑蓝宝石表面,抛光速率达到 10 nm/min,相当于每秒去除半个原子的厚度^[9]。

延性加工是目前陶瓷材料低损伤加工的重要方法之一,为在常规研磨机上实现蓝宝石的延性研磨加工,本文采用纳米压痕和划痕方法对单晶蓝宝石的微纳力学特性进行了分析,研究了金刚石磨粒嵌入合成锡盘表面上的方法及工艺,实验研究了单晶蓝宝石的延性研磨加工。

2 单晶蓝宝石的微纳力学特性

2.1 单晶蓝宝石的压痕实验

纳米压痕实验选用 MTS XP[®] 系统,载荷分辨率为 1 nN,其特点是连续刚度测量方法可在单次加/卸载中测定硬度和杨氏模量。采用 Berkovich 金刚石标准压头,如图 1 所示,沿棱边长 50 μm 以内为精磨加工区,其曲率半径为 100 nm。试样为美国爱比斯通公司抛光后的 C 面蓝宝石,设定蓝宝石的泊松比为 0.18,试样表面光滑平坦且表面粗糙度 R_a 为 0.08 nm。图 2(a)、(b)、(c)、(d)分别为 1, 2, 3, 4 μm 的设定压入深度下的硬度测试曲线。

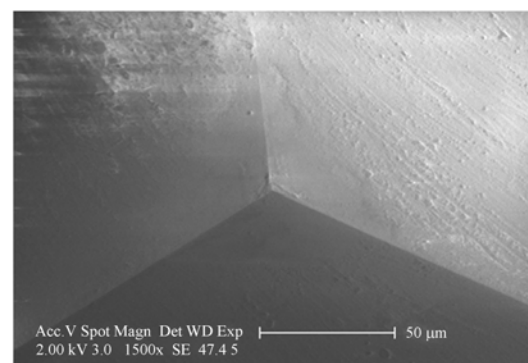


图1 Berkovich 金刚石压头

Fig.1 Berkovich diamond indenter

图 2(a)~(d)的共同点在于:硬度曲线在 200 nm 附近开始跳变,急速下降,然后再趋于稳定。采用原位二次压入,图 2(a)、(b)、(c)表明蓝

宝石压入过程没有发生脆性破裂,首次压入与二次压入的曲线吻合度较好。图 2(d)中的首次压入与二次压入曲线存在明显的差异性,压痕结果表明,设定 $4\ \mu\text{m}$ 的压入深度已经在蓝宝石表面和亚表层产生了脆性裂纹。为进一步揭示蓝宝石衬底在纳米压痕得到的硬度曲线转变机理,用原

子力显微镜(AFM)对蓝宝石衬底的压痕凹坑测试分析,如图 3(a)~(d)。测试结果表明:压痕的三角都存在微细裂纹,凹坑周边存在材料堆积,说明蓝宝石在载荷的作用下首先发生延性堆积。随着加载载荷的增大,蓝宝石表面产生微细裂纹,亦即发生脆性破裂。

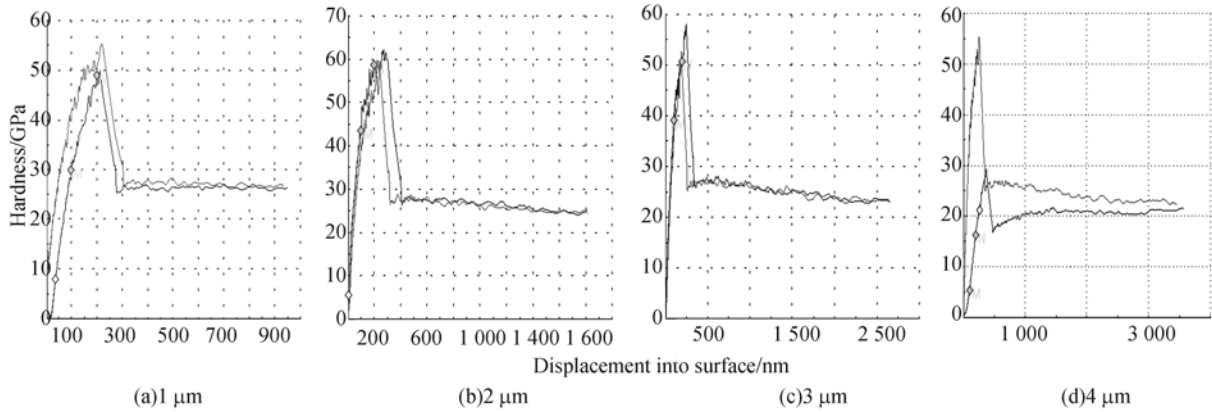


图 2 纳米压痕的硬度曲线

Fig. 2 Hardness curves of nanoindentation

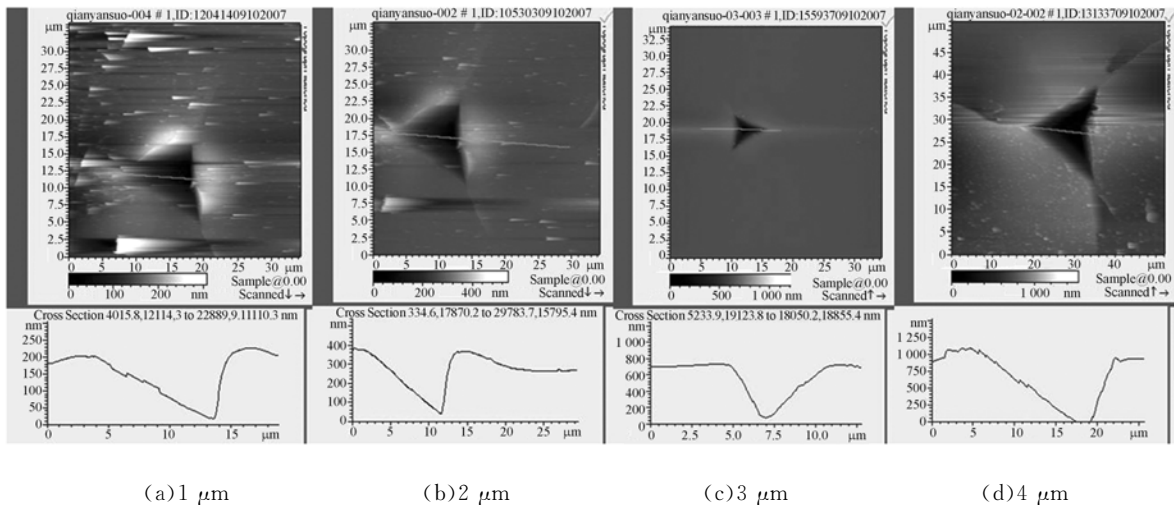


图 3 纳米压痕的 AFM 测试

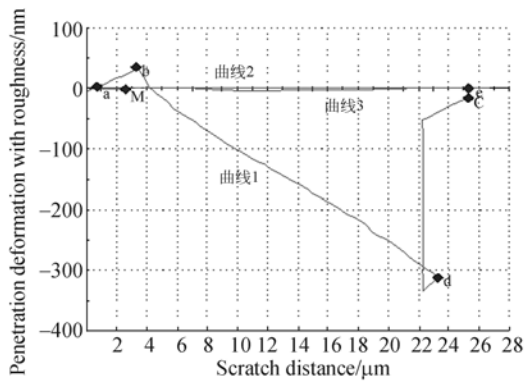
Fig. 3 In-situ-measurement of nanoindentation by AFM

2.2 单晶蓝宝石的划痕实验

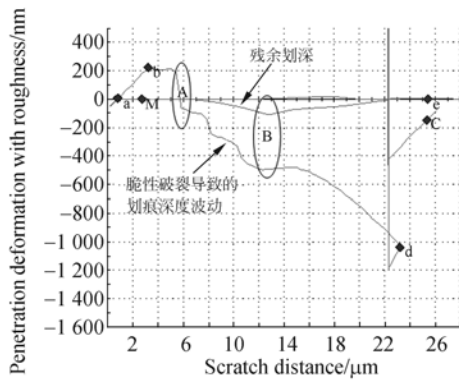
纳米划痕法是采用金刚石标准压头在平整的材料表面上以设定的速度摩擦,同时压头的垂直载荷随摩擦距离的增加而不断增大。纳米压痕法可观察到蓝宝石的延性特征,纳米划痕法则可以间接模拟蓝宝石研磨加工的材料刻划去除方式。纳米划痕测试包括划痕阶段和后续扫描阶段,在划痕阶段,金刚石压头以 $0.5\ \mu\text{m/s}$ 的速度在蓝宝石表面上划过 $26\ \mu\text{m}$ 。划痕结束后,金刚石压

头再以微小力与刻划表面接触,对实际刻划表面进行测试。本文实验中最大载荷设定为 $100\ \text{mN}$ 和 $500\ \text{mN}$ 时,做 2 次划痕试验,分别如图 4(a)、(b)所示。

图 4(a)中曲线 1 为划痕过程中金刚石压头的实际运动曲线,曲线 2 是原始蓝宝石的表面,曲线 3 为划痕结束后二次测试的划痕表面;图 4(b)与此类同。 $100\ \text{mN}$ 载荷的划痕测试中曲线 2 与曲线 3 几乎重合,表明在该力作用下蓝宝石在刻



(a) 100 mN 载荷下的划痕曲线
(a) Nanoscratch curves under 100 mN load



(b) 500 mN 载荷下的划痕曲线
(b) Nanoscratch curves under 500 mN load

图 4 纳米划痕曲线

Fig. 4 Nanoscratch curves

划后的弹性恢复良好,刻划变形主要体现为弹性变形,未见蓝宝石表面开裂,划痕后残余变形小于 10 nm。当最大载荷设定为 500 mN 时,刻划距离小于 6 μm 时蓝宝石表面为以弹性形变为主,如图 4(b) 中的 A 区域,之后划痕曲线在 8 μm 深度后发生较大波动,出现脆性破裂。图 4(b) 中的 B 区域显示二次测试的划痕表面残余变形呈倒三角形形状,深度约为 100 nm。

2.3 延性研磨载荷的初步分析

进一步分析图 3 的实验数据,得到设定压痕深度与实际压入深度如图 5 所示,实际压痕深度只有设定值的 20% 左右。图 5 同时反映了不同压入深度下的延性堆积高度。测试结果表明,虽然设定压入深度从 1 μm 变化到 2 μm,但延性堆积高度稳定在 100 nm 的水平,结合图 1 中硬度曲线同时在 200 nm 附近发生突变的现象,试验过

程中需将单颗金刚石磨粒对单晶蓝宝石的切削深度控制在 200 nm 以下。

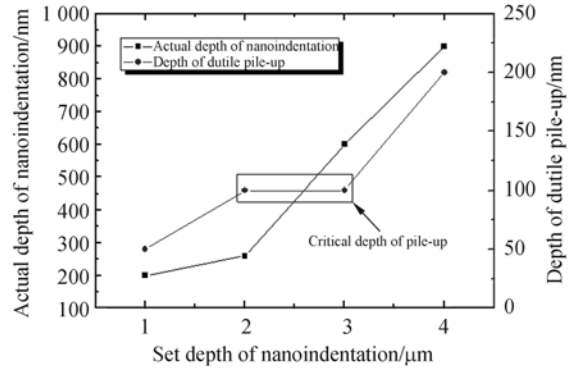
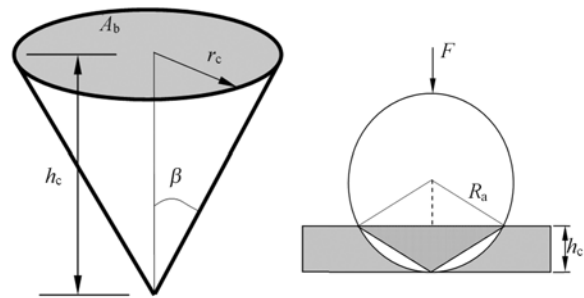


图 5 延性堆积深度与实际压入深度对比

Fig. 5 Comparison between depth of pile-up and actual depth of nanoindentation



(a) 圆锥状压头/磨粒 (b) 单颗圆锥状磨粒的压入模型
(a) Cone indenter/abrasive (b) Indentation model for single cone abrasive grain

图 6 圆锥状压头/磨粒的模型

Fig. 6 Indentation models for cone indenter and abrasive grain

压痕实验采用 Berkovich 压头,其形状为圆锥状,为方便计算并结合磨粒的非规则形状,将 Berkovich 压头与磨粒形状同时简化为圆锥状,如图 6(a)。因此:

$$r_c = h_c \tan \beta, \quad (1)$$

$$A_b = \pi h_c^2 \tan^2 \beta = 24.5 h_c^2, \quad (2)$$

$$H_v = \frac{F}{A_b} = \frac{F}{24.5 h_c^2}, \quad (3)$$

$$F = 24.5 h_c^2 H_v. \quad (4)$$

其中, r_c 为圆锥半径, h_c 为圆锥压痕深度(最大延

性堆积深度取 100 nm), A_b 为压痕面积, β 为角锥的半角 (70.3°), H_v 为硬度 (单晶蓝宝石为 2102), F 为单颗磨粒的载荷或压痕载荷。假设加工过程中最大延性堆积高度为 100 nm, 如图 6 (b) 所示, 通过公式 (4) 计算可得到单颗磨粒的加压载荷为 515 mN, 此数值与纳米压入力 500 mN 值较吻合。研磨加工实验中蓝宝石的表面积为 $1\ 200\ \text{mm}^2$, 实验采用平均尺寸为 $1\ \mu\text{m}$ 的金刚石并通过嵌入技术可使磨粒具有等高性, 通过研磨预实验并用 Veeco NT9800 统计分析单位时间内在蓝宝石表面的划痕数量, 可估算出研磨盘旋转一周后蓝宝石表面与磨粒接触的数量为 900 ~ 1 500, 因此实验条件下的加工载荷为 9.3 ~ 15.5 kg ($15 \sim 25.2\ \text{kPa}$)。

3 嵌入式金刚石研磨盘的研制

金刚石磨粒嵌入合成锡盘后, 能在锡盘表面压嵌无数金刚石颗粒, 与游离磨粒加工的方法相比, 该方法能获得更好的表面粗糙度和几何精度, 由于合成锡盘表面嵌有金刚石磨粒, 大大减少了磨粒在研磨盘表面的滚动和单晶蓝宝石与研磨盘的磨损, 因此研磨盘磨损少、易于保持平面的几何精度。

图 7 为金刚石磨粒的嵌入装置, 嵌入前研磨盘经过修面后采用陶瓷修整环修整 30 min, 去除合成锡盘表面的毛刺。采用 Keyence 超景深三

维显微系统沿着研磨盘半径方向和盘面圆周方向获得研磨盘表面形貌随嵌入时间的变化规律。嵌入前经过金刚石刀具车削和陶瓷修整环修整后的锡盘表面表现为黑白相间的区域, 两者面积大致等同, 合成锡盘表面平坦、均匀, 如图 8(a)。经过对精密研磨机的工作模态分析, 确定嵌入过程中研磨机主轴转速为 10 r/min, 选用 Abrasives Inc. 单晶金刚石磨粒, 其平均粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 。在嵌入过程的起始阶段 (15 ~ 45 min), 锡盘表面纹理逐渐细化, 油性润滑剂在凹坑处团聚, 如图 8(b)。70 min 后, 锡盘表面已趋于平整, 白色区域越来越明显, 表明嵌入到研磨盘表面的金刚石磨粒逐渐增多, 如图 8(c)。随着时间的推移, 120 min 后合成锡盘表面十分均匀且平整, 金刚石磨粒的分布均匀性良好, 如图 8(d)。

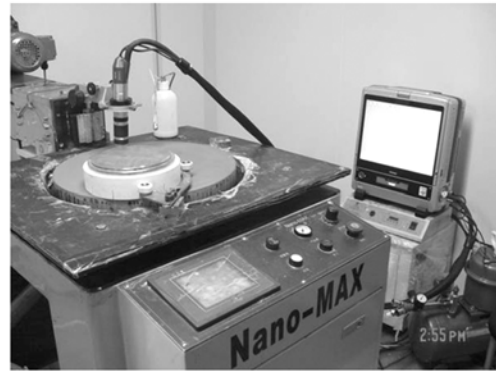
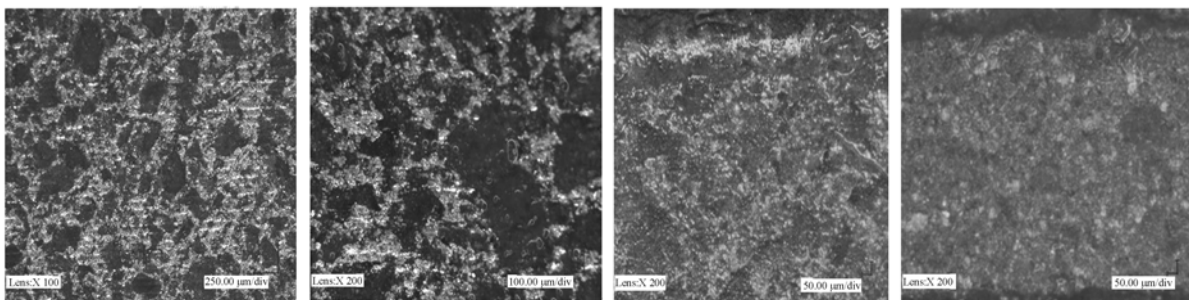


图 7 金刚石磨粒的嵌入试验平台
Fig. 7 Charging process of diamond abrasive grain



(a) 嵌入前 (b) 嵌入 45 min (c) 嵌入 70 min (d) 嵌入 120 min
(a) Before charging (b) Charging for 45 min (c) Charging for 70 min (d) Charging for 120 min

图 8 金刚石磨粒嵌入合成锡盘的过程

Fig. 8 Charging process of diamond abrasive grain into synthetic tin plate

4 实验结果与分析

选用 LED 用的单晶蓝宝石(0001 面)抛光片作为研磨加工的试样,尺寸为 10 mm×10 mm,单次研磨加工 12 片,用石蜡将蓝宝石粘贴于陶瓷基盘上,研磨加工转速为 15 r/min。依据前述分析加工载荷分别为 7,14,21,28 kPa,都历经 45 min 研磨后用 Veeco NT9800 白光干涉仪表征蓝宝石的表面粗糙度、划痕密度,采用 SEM 来分析蓝宝石表面的划痕形状。

图 9 反映了研磨加工载荷对单晶蓝宝石表面形貌的影响,在 7,14 kPa 低载荷下研磨加工的均匀性较差,蓝宝石表面的划痕分布不均匀,低加工载荷条件下合成锡盘表面未被完全嵌入的金刚石磨粒容易松动,使得脱落的金刚石磨粒仍然有机会与蓝宝石表面发生滚压,如图 9(a)、(b)所示,从而导致蓝宝石表面粗糙度值较大。实验结果表明 7 kPa 载荷下蓝宝石表面粗糙度 R_t 在 0.36~6.64 μm (1.3 mm×0.94 mm),14 kPa 载荷下蓝宝石表面粗糙度 R_t 在 0.82~1.23 μm 。

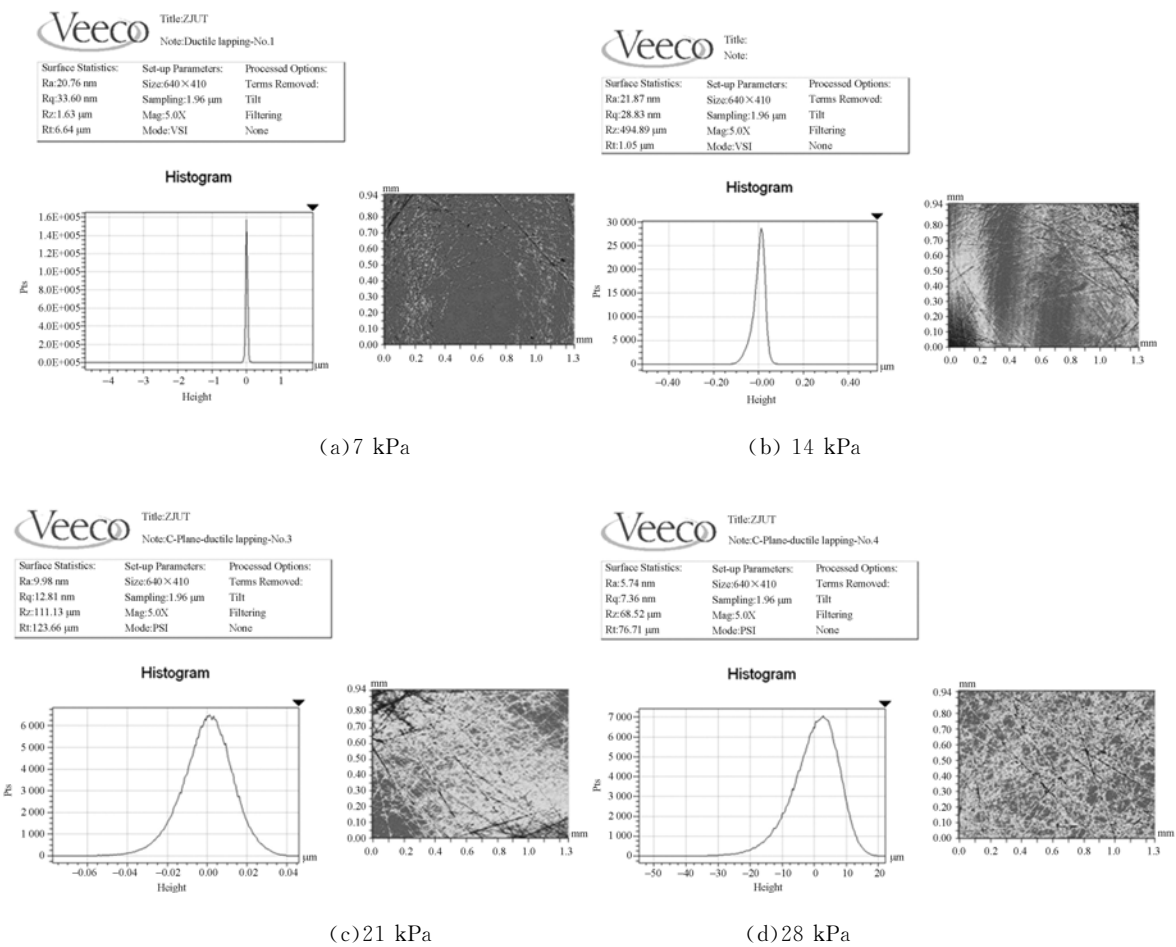


图 9 加载载荷对单晶蓝宝石表面形貌的影响

Fig. 9 Effect of load forces on lapped surface of single crystal sapphire

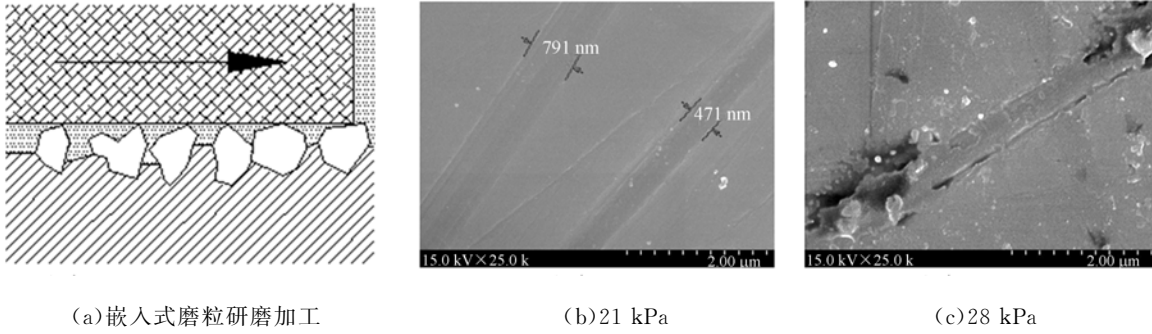
在 21 kPa,28 kPa 载荷下蓝宝石表面的划痕密度得到明显改善,均匀分布,蓝宝石表面材料去除主要体现为刻划作用,如图 9(c)、(d)所示。这是因为增大载荷有利于进一步稳固金刚石磨粒在合成锡盘的嵌入姿态,限制了磨粒的自由滚动,大载荷导致切深的增加使得参与切削的金刚石磨粒

数量也越来越多。与低载荷加工情形相比较,大载荷下蓝宝石表面粗糙度值反而降低,这与游离磨粒加工的规律有所区别。实验结果表明,21 kPa 载荷下蓝宝石表面粗糙度 R_t 在 112.24~123.66 nm(1.3 mm×0.94 mm),28 kPa 载荷下蓝宝石表面粗糙度 R_t 在 76.71~107.88 nm。图

8 中划痕分布的直方图都表明划痕深度的分布情况较好,分散性小,有利于减少后续抛光加工时间。

考虑载荷 21 kPa 和 28 kPa 下的加工状态较好,分别对蓝宝石表面其进行 SEM 测试并期望获得划痕的形状及判定材料的去除方式。由于采

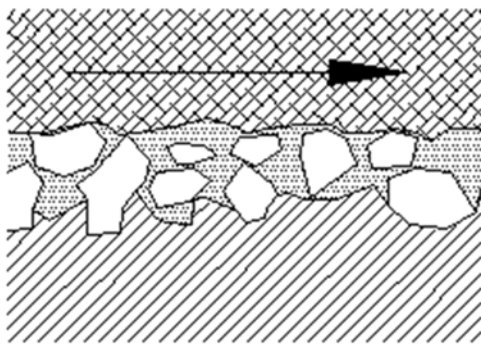
用了嵌入技术,使得金刚石磨粒嵌入在锡盘上,如图 10(a)。图 10(b)显示的蓝宝石表面存在刻划材料去除,几乎观察不到脆性现象的产生,单晶蓝宝石表面材料去除方式体现为延性去除。传统研磨加工方法中磨粒处于游离状态,如图 11(a),刻划和滚压为游离磨粒加工过程中材料去除的两种



(a)Lapping process after charging

图 10 嵌入式磨粒研磨加工及其加工表面

Fig. 10 Lapping process after charging and lapped surfaces



(a) 游离磨粒研磨加工 (a) Loosed abrasive lapping

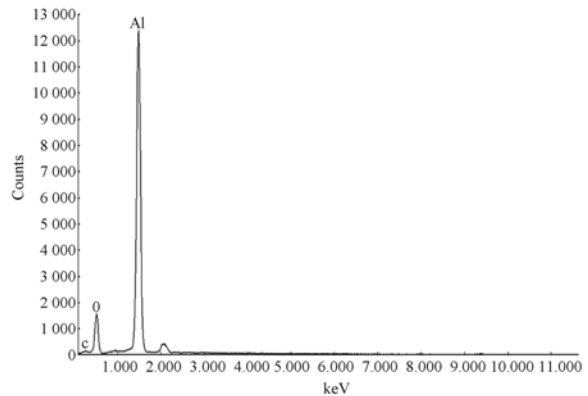
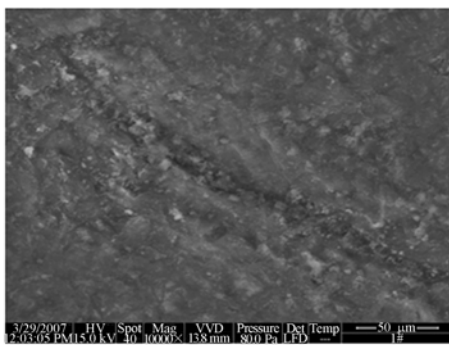


图 12 研磨屑的 EDS 分析

Fig. 12 EDS analysis of lapped chips



(b) 游离磨粒加工的蓝宝石表面 (b) Lapped surface for loosed abrasive lapping

图 11 游离磨粒加工及其蓝宝石表面

Fig. 11 Loosed abrasive lapping process and lapped surface of sapphire

主要方式,容易在蓝宝石表面造成崩裂、脆性裂纹等,如图 11(b)。图 10(c)中显示了 28 kPa 载荷下蓝宝石表面已发生了脆性断裂,后续抛光如果要处理这一损伤,将会大量耗费抛光时间,甚至产生废品。在本次实验条件下,延性研磨的最佳载荷为 21 kPa。图 10(b)中单颗磨粒造成的划痕宽度在 300~800 nm,结合图 6(b)的几何关系,取金刚石磨粒粒径为 1 μm ,通过计算可知,对于 471 nm 的划痕,其对应的值为 118 nm;而对于 800 nm 左右宽度的划痕,其对应的值为 400 nm。该结果表明,纳米压痕的测试、磨粒的简化模型及其计算方法可用于单晶蓝宝石的延性研磨加工工艺中。

图12为EDS测试分析图10(c)研磨屑的结果,测试结果表明,蓝宝石未与合成锡盘发生磨损和黏附现象,同时也表明采用嵌入金刚石磨粒实现延性研磨加工有利于保持研磨盘的面形精度。

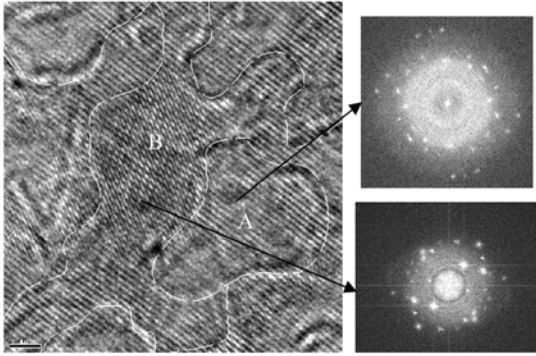
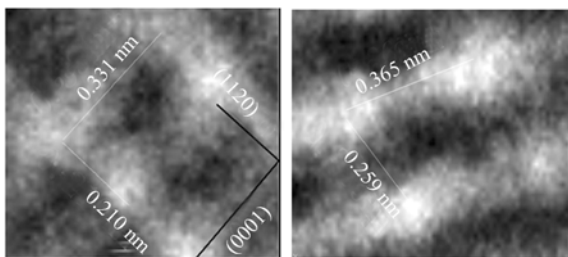


图13 延性研磨蓝宝石表面的透射电镜分析

Fig. 13 Analysis of ductile lapped surface of sapphire by MEM



(a)原始晶格间距

(b)变形的晶格间距

(a)Original lattices

(b)Deformed lattices

图14 研磨后的晶格间距

Fig. 14 Lattices of lapped surface

图13显示了延性研磨后的蓝宝石表面,A区域有明显的非晶态产生,由于该非晶态层不连续,因此为透射电镜制样时离子溅射残留在蓝宝石表面的,B区域存在较大面积的位错形态,B区域的单晶衍射图优于A区域。将测试图像导入CAD绘图中并对晶格放大,可计算到为变形晶格间距为0.331 nm和0.210 nm,查XRD卡片可知其对应的晶面是蓝宝石的基面即(0001)晶面,该

参考文献:

- [1] 张国义,陆敏,陈志忠. 高亮度白光LED用外延片的新进展[J]. 物理, 2007,36(5):377-384.
ZHANG G Y, LU M, CHENG ZH ZH. New progress in wafer epitaxy technologies for high-bright-

晶面上应变变量 ϵ 为:

$$\epsilon = \Delta L / L. \quad (5)$$

式中 ΔL 是沿原始长度 L 方向的变形,将图14(a)和(b)中的0.365和0.331代入并计算,可得 $\epsilon = 0.102$,因此延性研磨过程中蓝宝石表面发生了位错滑移,研磨表面未见磨削蓝宝石导致表面/亚表层的位错塞积和孪晶带。

5 结论

本文对单晶蓝宝石的延性研磨加工进行了理论分析及试验研究,采用纳米压痕和划痕测试并分析了单晶蓝宝石(0001)面的微纳力学特性。蓝宝石在微细载荷的作用下首先发生延性堆积,随着加载载荷的增大,蓝宝石受力面发生脆性破裂,单晶蓝宝石压痕延性堆积的极限深度为100 nm左右。理论分析了单颗圆锥状磨粒的压入模型并计算了延性研磨加工的受力临界条件,计算结果与纳米压入的载荷较吻合。然后,试验研究了金刚石磨粒嵌入合成锡研磨盘表面的效果,研制了嵌入式金刚石研磨盘,试验条件下120 min后合成锡盘表面十分均匀且平整,金刚石磨粒的分布均匀,有利于保持研磨盘的面形精度。最后,考察了不同载荷对单晶蓝宝石的延性研磨加工作用规律,实验条件下延性研磨的最佳载荷为21 kPa。单晶蓝宝石的延性研磨后表面划痕深度的数据分散性小,表面发生了位错滑移,未见表面/亚表层的位错塞积和孪晶带。

6 致谢

感谢清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金的资助,感谢清华大学摩擦学国家重点实验室张晨辉博士、中科院力学所非线性力学国家重点实验室张泰华教授、宝钢研究院王秀芳博士和杨晓萍在纳米压划测试中的指导和帮助。

ness white LEDs[J]. *Physics*, 2007, 36(5):377-384. (in Chinese)

- [2] 王彦松. 单晶 α 相氧化铝晶圆基板平坦化加工研究[D]. 台北:台湾科技大学, 2003. 7.

WANG Y S. *Research on planarization of α -phase*

- single crystal sapphire wafer*[D]. Taipei: National Taiwan University of Science and Technology, 2003, 7. (in Chinese)
- [3] 鲁聪达. 高亮度 LED 蓝宝石晶圆低损伤研磨机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007. 10.
LU C D. *Study on free damage mechanism of precision lapping sapphire wafer for high lighting light-emitting diode*[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007. 10. (in Chinese)
- [4] 卢朝靖, 李金华, 段晓峰. 在 c 面蓝宝石上生长的 InN 外延薄膜中位错与极性的 TEM 研究[J]. 电子显微学报, 2006, 25(增刊): 95-96.
LU CH J, LI J H, DUAN X F. TEM study on dislocations and polarity of InN epitaxial films grown on c-plane sapphire[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2006, 25(Supp.): 95-96. (in Chinese)
- [5] CHERNS D, SAHONTA S L, LIU R, *et al.*. The generation of misfit dislocations in facet-controlled growth of AlGaNGaN films[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(21): 4923-4925.
- [6] BASHE J R, DEMPSEY G, AKWANI I A, *et al.*. Critical parameters for grinding large sapphire window panels[J]. *SPIE*, 2007, 6545: 654517-1-10.
- [7] ZARUDI I, ZHANG L C. On the limit of surface integrity of alumina by ductile model grinding[J]. *Trans ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, 2000, 122: 129-134.
- [8] TOMOHIRO S. Lattice defect in polished sapphire and precise measurement of local strain[J]. *Journal of the Society of Materials Science*, 2002, 51(6): 604-609.
- [9] WEIS O. Direct contact superpolishing of sapphire [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4355-4362.
- [10] 周平. 单晶蓝宝石的延性研磨加工[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010. 5.
ZHOU P. *Study on ductile lapping of crystal sapphire wafer* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010. 5. (in Chinese)

作者简介:



戴欣平(1967—),男,浙江金华人,硕士,副教授,2002年于浙江大学获得硕士学位,主要从事超精密加工、精密仪器设计的研究。E-mail: jhdxp333@163.com



文东辉(1974—),男,江西高安人,教授,博士生导师,2002年于大连理工大学获得博士学位,主要从事超精密加工装备及技术的研究。E-mail: wendh@zjut.edu.cn



赵萍(1963—),女,浙江杭州人,副教授,1987年于浙江大学力学系获学士学位,主要从事超精密加工技术及工艺的研究。E-mail: zhaoping@zjut.edu.cn

(本栏目编辑:马 健)