

# (0001) 面氧化锌单晶微纳米尺度 划痕特性实验研究

李继军<sup>1,2</sup>, 李源明<sup>1</sup>, 张丽华<sup>3</sup>, 郎风超<sup>1</sup>,  
杨诗婷<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 杨文欣<sup>1</sup>

(1.内蒙古工业大学 理学院, 呼和浩特 010051; 2.上海电子信息职业技术学院  
机械与能源工程学院, 上海 201411; 3.上海海事大学 理学院, 上海 201306)

**摘要:** **目的** 对 (0001) 面 ZnO 单晶微纳米尺度划痕特性进行实验研究, 为 ZnO 单晶器件性能提升及 ZnO 单晶精密加工工艺优化等提供必要的科学依据。**方法** 采用 Berkovich 金刚石压头棱向前和面向前 2 种划痕方式, 在不同划痕速度下对 (0001) 面 ZnO 单晶进行了纳米划痕实验, 分析了划痕速度和划痕方式对其微纳米尺度划痕特性的影响。**结果** 当划痕速度从 2  $\mu\text{m/s}$  增加到 100  $\mu\text{m/s}$  时, 棱向前划痕方式下的深度从 352.9 nm 降到了 326.9 nm, 面向前划痕方式下的深度从 352.7 nm 降到了 289.9 nm; 棱向前划痕方式下的切向力从 4.15 mN 降到了 3.93 mN, 面向前划痕方式下的切向力从 5.12 mN 降到了 4.45 mN; 棱向前划痕方式下的摩擦因数从 0.21 降到了 0.19, 面向前划痕方式下的摩擦因数从 0.25 降到了 0.2; 棱向前划痕方式下的残余划痕深度从 162.2 nm 降到了 138.4 nm, 面向前划痕方式下的残余划痕深度从 148.3 nm 降到了 129.9 nm; 棱向前划痕方式下的残余划痕两侧塑性堆积高度从 23 nm 降到了 17 nm, 面向前划痕方式下的残余划痕两侧塑性堆积高度从 18 nm 降到了 11 nm。**结论** 随划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的划痕深度、切向力、摩擦因数、残余划痕深度及划痕两侧塑性堆积高度均在下降。在相同划痕速度下, 棱向前划痕方式下的划痕深度、残余划痕深度及划痕两侧塑性堆积高度都比面向前划痕方式下的要大, 而棱向前划痕方式下的切向力和摩擦因数都比面向前划痕方式下的要小。

**关键词:** (0001) 面氧化锌单晶; 微纳米尺度; 划痕特性; 纳米划痕; 划痕速度; 划痕方式

**中图分类号:** O469 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)07-0231-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.07.020

收稿日期: 2022-08-08; 修订日期: 2023-01-19

Received: 2022-08-08; Revised: 2023-01-19

基金项目: 内蒙古自然科学基金 (2022MS01009); 国家自然科学基金 (11972221, 12002174, 11562016); 内蒙古自治区高等学校科研项目 (NJZY22383)

Fund: Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2022MS01009); National Natural Science Foundation of China (11972221, 12002174, 11562016); College Science Research Project of Inner Mongolia Autonomous Region (NJZY22383)

作者简介: 李继军 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微纳米力学。

Biography: LI Ji-jun (1977-), Male, Doctor, Professor, Research focus: micro/nano mechanics.

通讯作者: 张丽华 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料力学性能及模拟。

Corresponding author: ZHANG Li-hua (1979-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: mechanical properties and simulation of materials.

引文格式: 李继军, 李源明, 张丽华, 等. (0001) 面氧化锌单晶微纳米尺度划痕特性实验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 231-238.

LI Ji-jun, LI Yuan-ming, ZHANG Li-hua, et al. Experimental Study on Micro-nano Scale Scratch Characteristics of (0001) Plane ZnO Single Crystal[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 231-238.

## Experimental Study on Micro-nano Scale Scratch Characteristics of (0001) Plane ZnO Single Crystal

LI Ji-jun<sup>1,2</sup>, LI Yuan-ming<sup>1</sup>, ZHANG Li-hua<sup>3</sup>, LANG Feng-chao<sup>1</sup>,  
YANG Shi-ting<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, YANG Wen-xin<sup>1</sup>

(1. College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Shanghai Technical Institute of Electronics & Information, Shanghai 201411, China; 3. School of Science, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**ABSTRACT:** As an important group II-VI semiconductor material, zinc oxide (ZnO) single crystal has excellent optical, electrical, pressure-sensitive, and gas-sensitive properties, which makes it suitable for short-wavelength optoelectronic devices, piezoelectric converters, varistors, transparent high-power electronic devices, solar cells and other aspects. Zinc oxide (ZnO) single crystal has broad application prospects. However, during the process of crystal processing and device using, ZnO single crystal will have scratches, pits, micro-cracks and other surface damages under the action of external stressing, which will lead to performance degradation of material and device or even invalidity. Therefore, the work aims to study the micro-nano scale scratch properties of (0001) plane ZnO single crystal experimentally, to provide an important scientific basis for improving the performance of ZnO single crystal devices.

Nanoscratch tests were carried out on (0001) plane ZnO single crystal at different scratch velocities through both edge-forward and face-forward scratch mode. (0001) plane ZnO single crystal sample size was 10 mm×5 mm×1 mm. The nanoscratch test parameters were: the scratch normal load was 20 mN, the scratch velocity was 2, 10, 20, 50 and 100 μm/s, respectively and the scratch distance was 100 μm. To avoid the effect on the experimental accuracy of temperature, all tests were performed at a temperature of about 23 °C. The morphology of the grooves after nanoscratch was observed. Finally, the effects of scratch velocity and scratch mode on the micro-nano scale scratch characteristics were analyzed. When the scratch velocity increased from 2 μm/s to 100 μm/s, the scratch depth corresponding to edge-forward scratch mode decreased from 352.9 nm to 326.9 nm, and that corresponding to face-forward scratch mode decreased from 352.7 nm to 289.9 nm; the lateral force corresponding to edge-forward scratch mode was reduced from 4.15 mN to 3.93 mN, and that corresponding to face-forward scratch mode was reduced from 5.12 mN to 4.45 mN; the friction coefficient corresponding to edge-forward scratch mode dropped from 0.21 to 0.19, and that corresponding to face-forward scratch mode has dropped from 0.25 to 0.2; the residual depth of scratch groove corresponding to edge-forward scratch mode was reduced from 162.2 nm to 138.4 nm, and that corresponding to face-forward scratch mode was reduced from 148.3 nm to 129.9 nm; the plastic upheaval height on both sides of the scratch groove corresponding to edge-forward scratch mode was reduced from 23 nm to 17 nm, and that corresponding to face-forward scratch mode was reduced from 18 nm to 11 nm. It can be concluded that scratch depth, lateral force, friction coefficient, groove residual depth, and plastic upheaval height on both sides of the (0001) plane ZnO single crystal all decrease as the scratch velocity increases. Moreover, at the same scratch velocity, the scratch depth, groove residual depth, and plastic upheaval height on both sides of the groove corresponding to edge-forward scratch mode of the (0001) plane ZnO single crystal are larger than those corresponding to face-forward scratch mode. This is because that the indenter and sample contact area of (0001) plane ZnO single crystal edge-forward scratch mode and face-forward scratch mode are different. However, the lateral force and friction coefficient corresponding to edge-forward scratch mode are smaller than those corresponding to face-forward scratch mode.

**KEY WORDS:** (0001) plane ZnO single crystal; micro-nano scale; scratch characteristics; nanoscratch; scratch velocity; scratch mode

氧化锌 (Zinc Oxide, ZnO) 单晶作为一种重要的Ⅱ—Ⅵ族半导体材料, 其禁带宽度为 3.4 eV, 室温下激子束缚能高达 60 meV, 具有优良的光学、电学、压敏、气敏等性能, 这使其在短波长光电器件、压电

转换器、压敏电阻器、透明大功率电子器件、太阳能电池等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>, ZnO 单晶已成为近年来半导体材料科学研究及产业应用前沿的热点之一。目前, 关于 ZnO 单晶的研究主要集中在晶

体生长及其光电性质方面<sup>[7-12]</sup>, 但有关其力学性能方面的研究还较少。事实上, ZnO 单晶的力学性能会对其光学及电学特性等有较大影响。此外, 在晶体加工及器件使用过程中, ZnO 单晶在外加应力的作用下会产生划痕、凹坑、微裂纹等表面损伤, 这将会导致材料及器件性能下降甚至发生失效<sup>[13-15]</sup>。近年来, 随着纳米科学与技术的快速发展, 在微纳米尺度下表征半导体材料的力学性能变得越来越重要<sup>[16-17]</sup>。纳米划痕技术具有操作方便、制样简单、测量分辨率高等优点<sup>[18-20]</sup>, 已经成为一种在微纳米尺度下表征材料力学性能的重要手段。

Hirakata 等<sup>[21]</sup>通过纳米压痕技术研究了电子束照射对 ZnO 单晶塑性变形的影响, 结果发现, 电子束照射可以降低 ZnO 单晶的弹塑性临界剪切应力。Juday 等<sup>[22]</sup>使用纳米压痕技术对 (0001) 面、(11 $\bar{2}$ 0) 面、(10 $\bar{1}$ 0) 面 ZnO 单晶的力学性能进行了研究, 研究发现, (0001) 面 ZnO 单晶的抗变形能力最强。Lin 等<sup>[23]</sup>通过纳米压痕技术对 (0001) 面、(11 $\bar{2}$ 0) 面和 (10 $\bar{1}$ 0) 面 ZnO 单晶的蠕变行为进行了研究, 研究发现, 3 个晶面的蠕变位移都随着加载速率的增加而增加, 并且其应力指数都随着峰值载荷的增加而增加。Goto 等<sup>[24]</sup>通过纳米划痕技术对 (100)、(002)、(101) 晶向的 ZnO 薄膜的摩擦特性进行了研究, 结果发现, (002) 晶向的 ZnO 薄膜的摩擦因数最低。Bhardwaj 等<sup>[25]</sup>通过纳米划痕技术对在 0.667 Pa 和 1.333 Pa 溅射压强下制备的掺镨 ZnO 薄膜的力学性能进行了研究, 结果发现, 在 1.333 Pa 溅射压强下制备的掺镨 ZnO 薄膜具有更好的耐磨性能。Borylo 等<sup>[26]</sup>在 150、200、350 °C 沉积温度下, 通过纳米划痕技术对制备的 ZnO 薄膜的力学性能进行了研究, 结果发现, ZnO 薄膜的膜基结合力并不随沉积温度而改变, 但 ZnO 薄膜的硬度随着沉积温度的升高而增大。可以看出, 上述研究虽然对 ZnO 单晶及薄膜微纳米尺度力学性能方面的成果进行了总结, 但有关纳米划痕技术对 ZnO 单晶微纳米尺度下力学性能的研究还很少。而 ZnO 单晶微纳米尺度下的划痕特性会对 ZnO 单晶器件性能及 ZnO 单晶精密加工精度等有较大影响。

本文将对 (0001) 面 ZnO 单晶进行纳米划痕实验, 并利用扫描电子显微镜对其残余划痕的形貌进行观察, 分析划痕速度和划痕方式对 (0001) 面 ZnO 单晶微纳米尺度下划痕特性的影响, 以期为 ZnO 单晶器件性能提升及 ZnO 单晶精密和超精密加工工艺优化等提供必要的科学依据。

## 1 实验

### 1.1 样品准备

使用的 (0001) 面 ZnO 单晶由中国科学院上海光机所提供。样品尺寸为 10 mm×5 mm×1 mm。对

(0001) 面 ZnO 单晶进行研磨抛光直到获得光滑的表面(表面粗糙度  $Ra < 10$  nm), 选择抛光面进行实验。在样品抛光完成后用无水酒精超声清洗, 之后将其吹干放入干燥盒中, 用于后续的纳米划痕实验。

### 1.2 方法

(0001) 面 ZnO 单晶纳米划痕实验设备采用美国 Aglient 公司生产的 Nano indenter G200 型纳米压痕仪, 使用的压头为标准 Berkovich 金刚石压头。在本文中, Berkovich 金刚石压头采用棱向前和面向前 2 种划痕方式, 棱向前和面向前划痕方式示意图如图 1 所示。施加的划痕载荷为 20 mN, 划痕速度分别为 2、10、20、50、100  $\mu\text{m/s}$ , 划痕长度为 100  $\mu\text{m}$ 。此外, 为了保证实验数据的可靠性和可重复性, 每组实验至少进行 5 次。所有测试都在大约 23 °C 的室温下进行。在纳米划痕实验完成后, 采用日本 Hitachi 公司生产的 SU8220 型扫描电子显微镜对 (0001) 面 ZnO 单晶的残余划痕形貌进行观察。

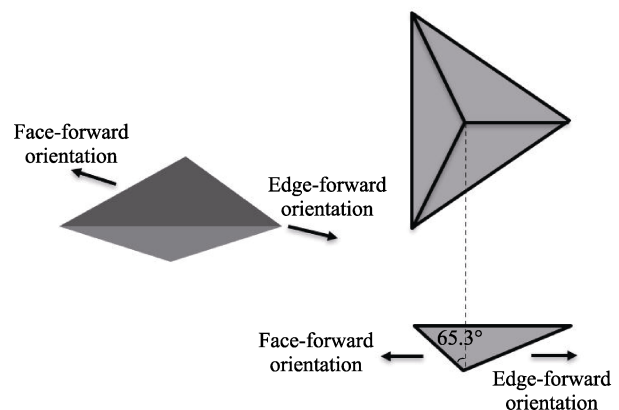


图 1 棱向前和面向前划痕方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of edge-forward and face-forward scratch modes

## 2 结果及讨论

### 2.1 划痕深度

图 2a 和图 2b 给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下 (0001) 面 ZnO 单晶在不同划痕速度下的划痕深度-划痕长度曲线, 图 2c 是根据图 2a 和图 2b 中数据得到的划痕深度-划痕速度曲线。可以看出, 当划痕速度从 2  $\mu\text{m/s}$  增加到 100  $\mu\text{m/s}$  时, 棱向前划痕方式下的划痕深度从 352.9 nm 降到了 326.9 nm, 面向前划痕方式下的划痕深度从 352.7 nm 降到了 289.9 nm。这是因为随着划痕速度的增加, 在压头下方形成的高密度位错会使塑性去除变得更加困难<sup>[27]</sup>, 因此划痕深度会随之下降。这也表明 (0001) 面 ZnO 单晶在较高划痕速度下表现出更好的耐划伤性。此外, 从图 2c 可以看出, 当划痕速度小于 20  $\mu\text{m/s}$  时,

(0001)面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的划痕深度与面向前划痕方式下的划痕深度差别不明显;但当划痕速度大于  $20\ \mu\text{m/s}$  后,棱向前划痕方式下的划痕深度比面向前划痕方式下的划痕深度要深。这是因为当划痕速度较小时,在棱向前划痕方式和面向前划痕方式下,压头与(0001)面 ZnO 单晶的接触面积差别不明显;但当划痕速度较大时,(0001)面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的接触面积要比面向前划痕方式下的接触面积大,从而导致其对应的划痕深度比面向前方式下的划痕深度更深。

## 2.2 切向力

图 3a 和图 3b 给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下(0001)面 ZnO 单晶在不同划痕速度下的切向力-划痕长度曲线,图 3c 是根据图 3a 和图 3b 中数据得到的切向力-划痕速度曲线。可以看出,当划痕速度从  $2\ \mu\text{m/s}$  增加到  $100\ \mu\text{m/s}$  时,棱向前划痕方式下的切向力从  $4.15\ \text{mN}$  降到了  $3.93\ \text{mN}$ ,面向前划痕方式下的切向力从  $5.12\ \text{mN}$  降到了  $4.45\ \text{mN}$ 。这是因为随着划痕速度的增加,压头的移动速度变快,减少了作用在(0001)面 ZnO 单晶表面的时间,导致(0001)

面 ZnO 单晶内部原子、分子的运动加快<sup>[28]</sup>,从而使切向力随着划痕速度的增加而下降。此外,由图 3c 可知,在相同速度下,(0001)面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的切向力要小于面向前划痕方式下的切向力。这是因为与面向前划痕方式相比,棱向前划痕方式下压头前方的堆积量更小<sup>[29]</sup>。

## 2.3 摩擦因数

图 4a 和图 4b 给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下(0001)面 ZnO 单晶在不同划痕速度下的摩擦因数-划痕长度曲线,图 4c 是根据图 4a 和图 4b 中数据得到的摩擦因数-划痕速度曲线。可以看出,当划痕速度从  $2\ \mu\text{m/s}$  增加到  $100\ \mu\text{m/s}$  时,棱向前划痕方式下的摩擦因数从  $0.21$  降到了  $0.19$ ,面向前划痕方式下的摩擦因数从  $0.25$  降到了  $0.2$ 。这是因为随着划痕速度的增加,压头下方的压应力增加,从而导致(0001)面 ZnO 单晶的摩擦因数下降<sup>[27, 30]</sup>。另外,从图 4c 可以看出,在相同速度下,(0001)面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的摩擦因数小于面向前划痕方式下的摩擦因数。这是因为棱向前划痕方式下的切向力比面向前划痕方式下的切向力小<sup>[31]</sup>。

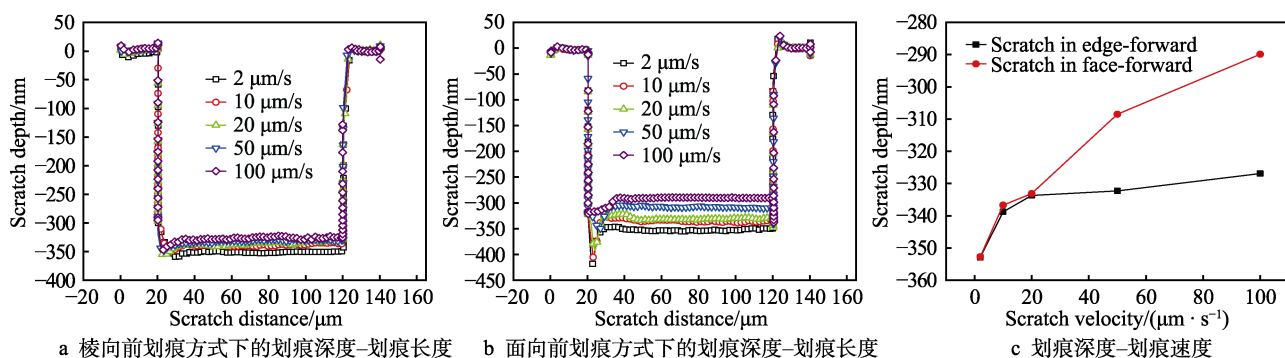


图 2 (0001)面 ZnO 单晶的划痕深度-划痕长度曲线和划痕深度-划痕速度曲线  
Fig.2 Scratch depth-scratch distance and scratch depth-scratch velocity curves of (0001) plane ZnO single crystal: a) scratch depth-scratch distance curve in the edge-forward scratch mode; b) scratch depth-scratch distance curve in the face-forward scratch mode; c) scratch depth-scratch velocity curve

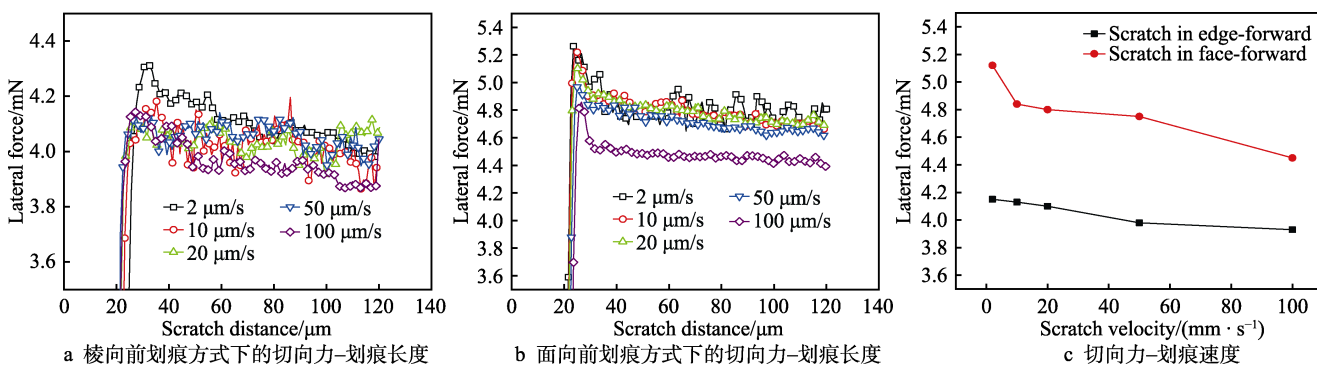


图 3 (0001)面 ZnO 单晶的切向力-划痕长度曲线和切向力-划痕速度曲线  
Fig.3 Lateral force-scratch distance and lateral force-scratch velocity curves of (0001) plane ZnO single crystal: a) lateral force-scratch distance curve in the edge-forward scratch mode; b) lateral force-scratch distance curve in the face-forward scratch mode; c) lateral force-scratch velocity curve



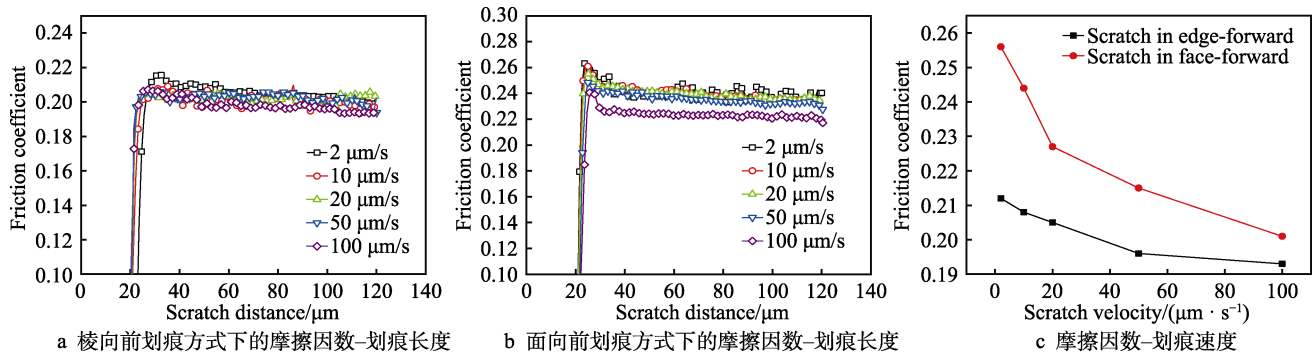


图 4 (0001) 面 ZnO 单晶的摩擦因数-划痕长度曲线和摩擦因数-划痕速度曲线

Fig.4 Friction coefficient-scratch distance and friction coefficient-scratch velocity curves of (0001) plane ZnO single crystal: a) friction coefficient-scratch distance curve in the edge-forward scratch mode; b) friction coefficient-scratch distance curve in the face-forward scratch mode; c) friction coefficient-scratch velocity curve

## 2.4 残余划痕几何参数

图 5 和图 6 分别给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下 (0001) 面 ZnO 单晶在不同划痕速度下残余划痕的 SEM 形貌。可以看出, (0001) 面 ZnO 单晶表面出现了划痕损伤, 划痕两侧有切屑堆积, 而且与棱向前划痕方式相比, 在面向前划痕方式下 (0001) 面 ZnO 单晶表面损伤更严重。此外, 随着划痕速度的增大, 划痕宽度会减小, 这表明划痕速度对 (0001) 面 ZnO 单晶的残余划痕几何尺寸有较大影响。

为了进一步分析不同划痕方式下划痕速度对 (0001) 面 ZnO 单晶残余划痕几何参数的影响, 图 7a 和图 7b 给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下 (0001) 面 ZnO 单晶在不同划痕速度下的残余划痕横截面轮廓。从图 7a 和图 7b 可以看出, (0001) 面 ZnO 单晶在 2 种划痕方式下都发生了塑性变形, 并且堆积物沿着残余划痕的两侧基本呈对称分布。图 7c

和图 7d 给出了棱向前和面向前 2 种划痕方式下 (0001) 面 ZnO 单晶的残余划痕深度-划痕速度曲线和残余划痕两侧塑性堆积高度-划痕速度曲线。可以看出, 当划痕速度从 2  $\mu\text{m/s}$  增加到 100  $\mu\text{m/s}$  时, 棱向前划痕方式下的残余划痕深度从 162.2 nm 降到了 138.4 nm, 面向前划痕方式下的残余划痕深度从 148.3 nm 降到了 129.9 nm; 棱向前划痕方式下的残余划痕两侧塑性堆积高度从 23 nm 降到了 17 nm, 面向前划痕方式下的残余划痕两侧塑性堆积高度从 18 nm 降到了 11 nm。这是因为随着划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的变形阻力也会相应增加, 从而导致残余划痕深度和残余划痕两侧塑性堆积高度均有所下降。此外, 在相同划痕速度下, 与面向前划痕方式相比, 棱向前划痕方式下的残余划痕深度和残余划痕两侧塑性堆积高度均更大, 这是因为 (0001) 面 ZnO 单晶在棱向前划痕方式下的接触面积要比面向前划痕方式下的大。

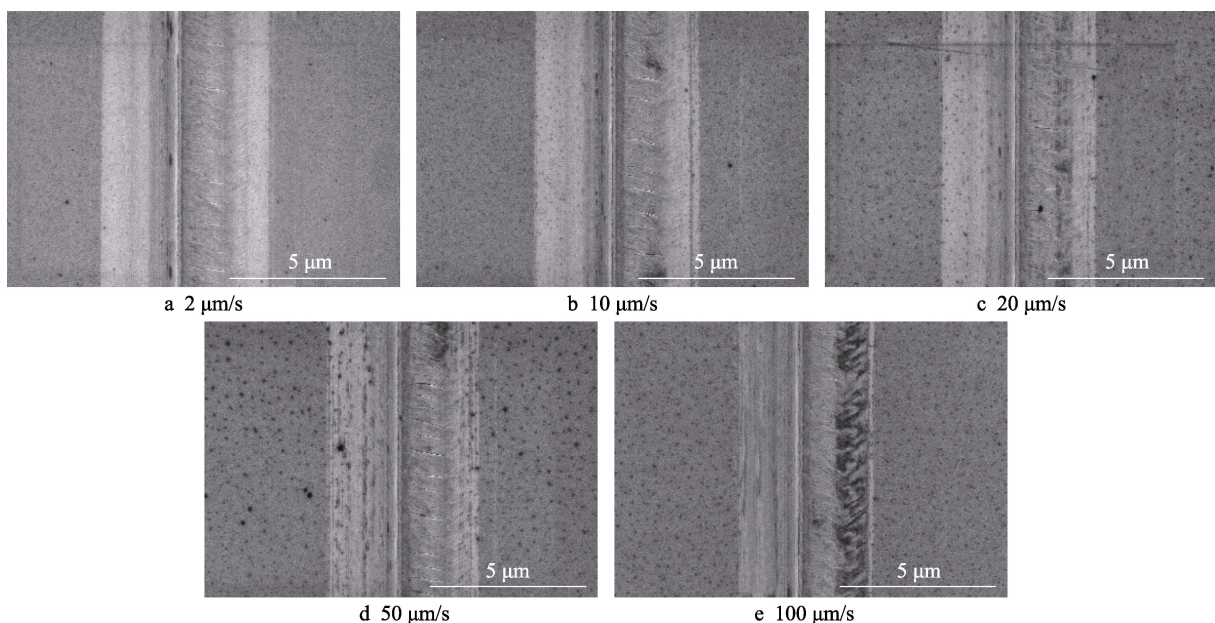


图 5 (0001) 面 ZnO 单晶在棱向前划痕方式下不同划痕速度的残余划痕 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphology of residual scratch of (0001) plane ZnO single crystal in edge-forward scratch mode at different scratch velocities

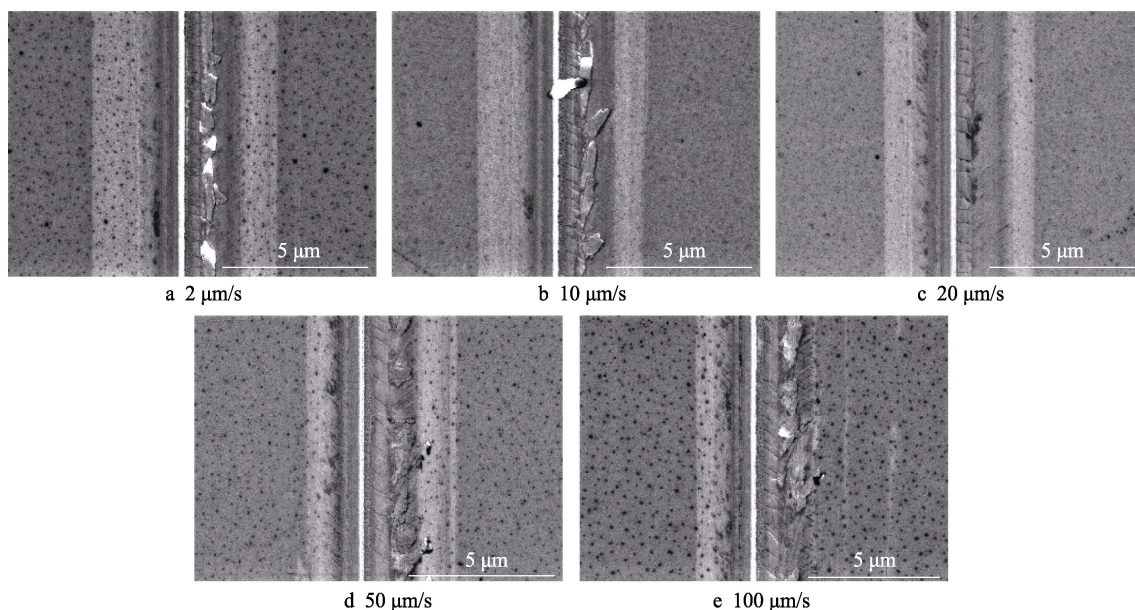


图6 (0001)面ZnO单晶在面向前划痕方式下不同划痕速度的残余划痕SEM形貌  
Fig.6 SEM morphology of residual scratch of (0001) plane ZnO single crystal in face-forward scratch mode at different scratch velocities

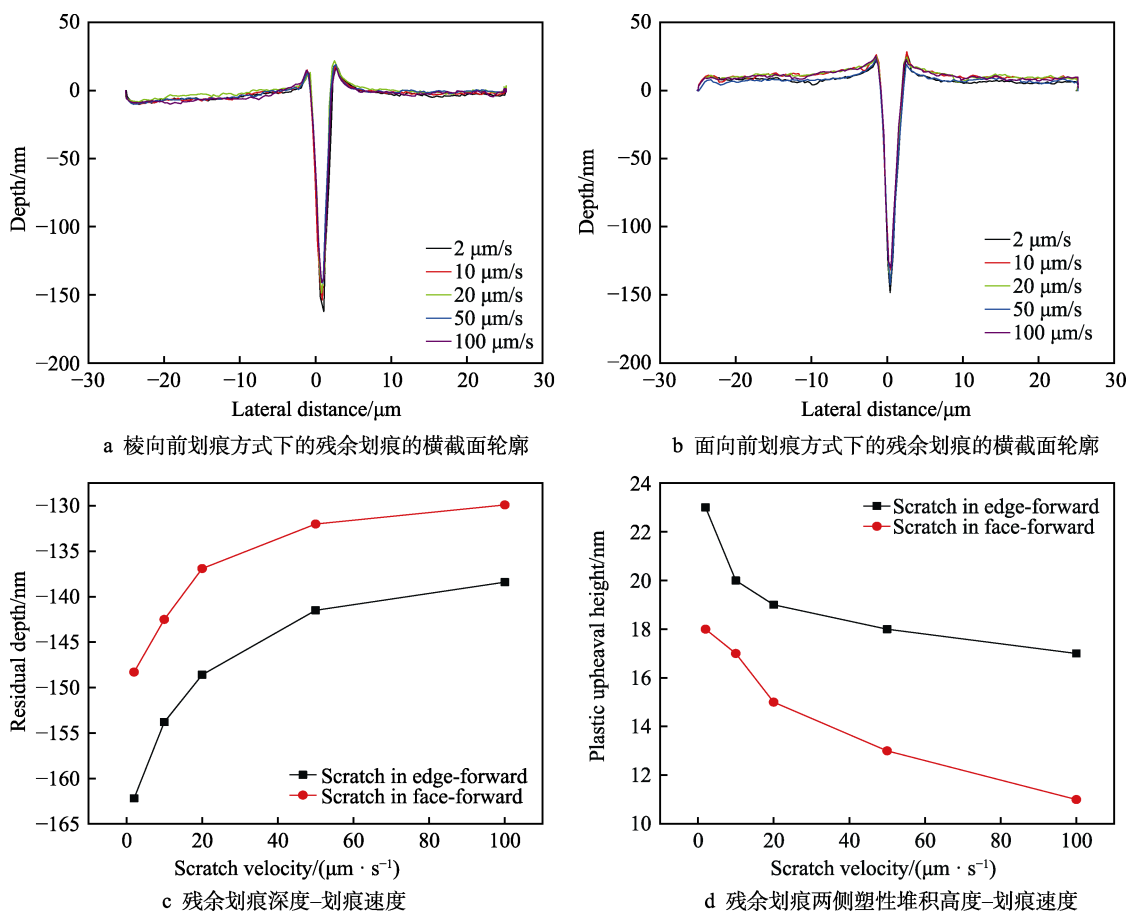


图7 (0001)面ZnO单晶残余划痕几何尺寸及其与划痕速度的变化关系  
Fig.7 Relationship of scratch groove geometry and scratch groove geometry-scratch velocity curves of (0001) plane ZnO single crystal: a) cross sectional profile of the scratch groove in the edge-forward scratch mode; b) cross sectional profile of the scratch groove in the face-forward scratch mode; c) residual depth of scratch groove-scratch distance curves; d) plastic upheaval height of scratch grooves on both sides-scratch distance curves

### 3 结论

采用棱向前和面向前 2 种划痕方式对 (0001) 面 ZnO 单晶进行了划痕速度分别为 2、10、20、50、100  $\mu\text{m/s}$  的纳米划痕实验, 并利用扫描电子显微镜对其残余划痕的形貌进行了观察, 分析了划痕速度和划痕方式对划痕深度、切向力、摩擦因数、残余划痕深度、残余划痕两侧塑性堆积高度等微纳米尺度划痕特性的影响, 得到如下结论。

1) 在 2 种划痕方式下, 随着划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的划痕深度均在下降; 在相同划痕速度下, (0001) 面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的划痕深度要大于面向前划痕方式下的划痕深度。

2) 在 2 种划痕方式下, 随着划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的切向力均在下降; 在相同划痕速度下, (0001) 面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的切向力要小于面向前划痕方式下的切向力。

3) 在 2 种划痕方式下, 随着划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的摩擦因数均在下降; 在相同划痕速度下, (0001) 面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的摩擦因数小于面向前划痕方式下的摩擦因数。

4) 在 2 种划痕方式下, 随着划痕速度的增加, (0001) 面 ZnO 单晶的残余划痕深度和残余划痕两侧塑性堆积高度均在下降; 在相同划痕速度下, (0001) 面 ZnO 单晶棱向前划痕方式下的残余划痕深度及残余划痕两侧塑性堆积高度都比面向前划痕方式下的要大。

#### 参考文献:

- [1] NOWAK E, SZYBOWICZ M, STACHOWIAK A, et al. A Comprehensive Study of Structural and Optical Properties of ZnO Bulk Crystals and Polycrystalline Films Grown by Sol-Gel Method[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(7): 552.
- [2] ZHAO Xiao-long, HUANG Dan-yang, PENG Wen-bo, et al. Annealing Effect on a (0001)-Oriented ZnO Single-Crystal Bulk-Acoustic-Wave X-Ray Detector[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(3): 1349-1352.
- [3] DAS A, BASAK D. Efficacy of Ion Implantation in Zinc Oxide for Optoelectronic Applications: A Review[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(9): 3693-3714.
- [4] 张跃. 宽禁带氧化锌半导体材料的未来与挑战[J]. *科学通报*, 2020, 65(25): 2662-2663.  
ZHANG Yue. The Future and Challenges of Wide Band-gap ZnO Semiconductor Materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(25): 2662-2663.
- [5] ZHANG Yi-chu, LI Zi-heng, SUN Hao-teng, et al. Effect of  $\text{Co}^{2+}$  Doping on Photoelectric Properties of ZnO Crystal Planes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 902: 162497.
- [6] SAHANI R M, DIXIT A. A Comprehensive Review on Zinc Oxide Bulk and Nano-Structured Materials for Ionizing Radiation Detection and Measurement Applications[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 151: 107040.
- [7] FAN Long, ZHANG Ying-juan, PENG Li-ping, et al. Crystal Growth, Finite Element Analysis and Oxygen Annealing of ZnO Bulk Crystal Grown by Low-Temperature-Gradient Chemical Vapor Transport[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(14): 23107-23115.
- [8] 王强. 本征富受主型氧化锌单晶微米管的制备方法 & 光电性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
WANG Qiang. Preparation Method and Photoelectric Properties of Intrinsic Acceptor-Rich Zinc Oxide Single Crystal Microtube[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [9] MANYAM J, TON-THAT C, PHILLIPS M R. Cathodoluminescence Study of Electric Field Induced Migration of Defects in Single Crystal *m*-Plane ZnO[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(8): 085705.
- [10] 吴成玲, 郭俊宏, 姚恒斌, 等. ZnO 单晶的微区光致发光特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(6): 1700-1702.  
WU Cheng-ling, GUO Jun-hong, YAO Heng-bin, et al. Study on the Photoluminescence Properties of ZnO Single Crystal[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1700-1702.
- [11] LIU Zhi-xiang, YAN Gong-qin, LIU Xin-mei, et al. Study on Photoelectric Properties of Al-Eu Codoped ZnO[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 882: 160606.
- [12] LI Ji-tao, ZHU Qiu-xiang, ZHANG Gui-xia, et al. Flower-Like ZnO Nanosheets Grown on  $\text{O}_2$  Plasma Treated Monolayer Graphene and Its Photocatalytic Property[J]. *Optik*, 2022, 251: 168476.
- [13] JAGEROVÁ A, MIKŠOVÁ R, ROMANENKO O, et al. Surface Modification by High-Energy Heavy-Ion Irradiation in Various Crystalline ZnO Facets[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(39): 22673-22684.
- [14] WU Lei, CHEN Peng, DENG Liang, et al. Effects of Crystal Planes on Topography Evolution of Silicon Surface during Nanoscratch-Induced Selective Etching[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 124: 105606.
- [15] SHI Chu-qiao, CAO M C, REHN S M, et al. Uncovering Material Deformations via Machine Learning Combined with Four-Dimensional Scanning Transmission Electron

- Microscopy[J]. Npj Computational Materials, 2022, 8(1): 1-9.
- [16] YIN Zhou-ping, HUANG Yong-an, BU Ning-bin, et al. Inkjet Printing for Flexible Electronics: Materials, Processes and Equipments[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(30): 3383-3407.
- [17] JANG W W, LEE J O, YOON J B, et al. Fabrication and Characterization of a Nanoelectromechanical Switch with 15-nm-Thick Suspension Air Gap[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 103110.
- [18] ZHU Jin-xuan, ZHOU Qing-hua, HUANG Yan-yan, et al. Surface Deformation of Single Crystalline Copper on Different Nano-Scratching Paths[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(17): 10640-10652.
- [19] KIM H H, CHO S H, KANG C G. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties by Using Nano/Micro-Indentation and Nanoscratch during Aging Treatment of Rheo-Forged Al<sub>6061</sub> Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 485(1/2): 272-281.
- [20] MUZYKA N R, SHVETS V P. Studies on the Material Damageability by the Scratching Method[J]. Strength of Materials, 2016, 48(3): 394-400.
- [21] HIRAKATA H, SANO K, SHIMADA T. Electron-Beam Irradiation Alters Bond Strength in Zinc Oxide Single Crystal[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(11): 111902.
- [22] JUDAY R, SILVA E M, HUANG J Y, et al. Strain-Related Optical Properties of ZnO Crystals Due to Nanoindentation on Various Surface Orientations[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(18): 183511.
- [23] LIN P H, DU X H, CHEN Y H, et al. Nano-Scaled Diffusional or Dislocation Creep Analysis of Single-Crystal ZnO[J]. AIP Advances, 2016, 6(9): 095125.
- [24] GOTO M, SASAKI M, KASAHARA A, et al. Frictional Property Depended on Crystal Preferred Orientation Analyzed by a Combinatorial Technique[J]. Tribology Letters, 2014, 55(2): 289-293.
- [25] BHARDWAJ V, KUMAR A, CHOWDHURY R, et al. Nanoindentation and Nanoscratch Behavior of ZnO: Pr Thin Films Deposited by DC Sputtering[J]. Journal of Materials Research, 2018, 33(17): 2533-2544.
- [26] BORYŁO P, MATUS K, LUKASZKOWICZ K, et al. The Influence of Atomic Layer Deposition Process Temperature on ZnO Thin Film Structure[J]. Applied Surface Science, 2019, 474: 177-186.
- [27] LI Zhi-peng, ZHANG Fei-hu, LUO Xi-chun, et al. Fundamental Understanding of the Deformation Mechanism and Corresponding Behavior of RB-SiC Ceramics Subjected to Nano-Scratch in Ambient Temperature[J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 674-683.
- [28] 杨晓京, 刘浩, 罗良, 等. 单晶锗微纳米尺度切削特性实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1457-1465.
- YANG Xiao-jing, LIU Hao, LUO Liang, et al. Experimental Study on Micro-Nano Scale Cutting Characteristics of Single Crystal Germanium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1457-1465.
- [29] YAN Yong-da, LI Zi-han, JIA Jun-shuai, et al. Molecular Dynamics Simulation of the Combination Effect of the Tip Inclination and Scratching Direction on Nanomachining of Single Crystal Silicon[J]. Computational Materials Science, 2021, 186: 110014.
- [30] NOREYAN A, AMAR J G. Molecular Dynamics Simulations of Nanoscratching of 3C SiC[J]. Wear, 2008, 265(7/8): 956-962.
- [31] MENG Bin-bin, ZHANG Fei-hu, LI Zhi-peng. Deformation and Removal Characteristics in Nanoscratching of 6H-SiC with Berkovich Indenter[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 31: 160-165.

责任编辑: 蒋红晨