

单晶硅纳米磨削亚表面损伤形成机制及其抑制研究*

田海兰^① 韩涛^① 闫少华^① 易红星^① 闫海鹏^②

(①郑州财经学院智能工程学院, 河南 郑州 450000;

②河北科技大学机械工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: 硅晶圆纳米磨削过程中产生的亚表面损伤限制了其使用寿命, 亟需研究纳米磨削过程中单晶硅的亚表面损伤形成机制和抑制方法。文章首先建立了单晶硅纳米磨削的分子动力学仿真模型, 研究其亚表面损伤形成机制。随后研究了磨削参数对磨削过程中磨削力、磨削温度以及亚表面损伤形成的影响机制。最后提出了单晶硅纳米磨削的损伤抑制策略。结果表明: 单晶硅纳米磨削过程中结构相变和非晶化是其主要亚表面损伤形成机制。原始的 Si-I 相在挤压和剪切作用下形成了 Si-II 相、Si-III 相、Si-IV 相、bct5-Si 相以及非晶。磨削深度增加导致了磨削力和磨削温度升高, 而磨削速度的增加导致磨削力减小, 磨削温度升高。磨削力增大是导致亚表面损伤严重的主要原因, 而一定程度的高温有利于抑制单晶硅的亚表面损伤。在纳米磨削单晶硅时, 可通过减小磨削深度和提升磨削速度来实现亚表面损伤的抑制。

关键词: 分子动力学; 单晶硅; 纳米磨削; 亚表面损伤; 磨削参数

中图分类号: TN305, TB321

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.03.003

Study on formation mechanism and suppression of subsurface damage during nano-grinding of monocrystalline silicon

TIAN Hailan^①, HAN Tao^①, YAN Shaohua^①, YI Hongxing^①, YAN Haipeng^②

(①School of Intelligent Engineering, Zhengzhou College of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, CHN;

②School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, CHN)

Abstract: The subsurface damage generated during nano-grinding of silicon wafers limits its service life. It is urgent to study the formation mechanism and suppression methods of subsurface damage during nano-grinding of monocrystalline silicon. In this study, a molecular dynamics simulation model of nano-grinding monocrystalline silicon was established to study the formation mechanism of subsurface damage. Then, the influence mechanism of grinding parameters on grinding force, grinding temperature and subsurface damage formation during grinding was studied. Finally, the damage suppression strategy of nano-grinding monocrystalline silicon was proposed. The results showed that the main subsurface damage formation mechanism was structural phase transformation and amorphousness during nano-grinding monocrystalline silicon. The original Si-I phase formed Si-II phase, Si-III phase, Si-IV phase, bct5-Si phase and amorphous phase under extrusion and shear. The increase of grinding depth led to the increase of grinding force and grinding temperature, while the increase of grinding speed led to the decrease of grinding force and the increase of grinding temperature. The increased grinding force was the main reason for the serious subsurface damage, and a certain degree of high temperature was beneficial to inhibit the subsurface damage of monocrystalline silicon. In nano-grinding of monocrystalline silicon, subsurface damage can be suppressed by reducing grinding depth and increasing grinding speed.

Keywords: molecular dynamics; monocrystalline silicon; nano-grinding; subsurface damage; grinding parameters

* 河南省高等学校重点科研项目(22B460024); 河北省自然科学基金项目(E2021208004); 河北省教育厅青年基金项目(QN2021061)

作为半导体材料的单晶硅因为具有高强度、耐高温、抗氧化以及耐磨损等优异特性被广泛应用于集成电路的制造中,并且在手机、电脑、电器、国防建设以及航天等领域都扮演了重要角色^[1]。随着集成电路制造技术中对产品高性能、多功能、小型化和低功耗的需求,对硅晶圆减薄技术提出了越来越高的要求^[2],同时也对减薄的厚度以及表面质量提出了更高的要求。而单晶硅属于典型的硬脆难加工材料,减薄过程中极易出现表面裂纹和亚表面损伤,严重限制其服役寿命和使用要求^[3-4]。

纳米磨削技术由于可以实现纳米或十纳米级的材料去除和纳米或亚纳米级的表面粗糙度被逐渐应用于光学硬脆材料的加工中,尤其是单晶硅的减薄,并且取得不错的加工效果^[1-5]。但纳米磨削技术由于磨粒(固结磨料)与工件的作用路径为纳米甚至原子级,传统的磨削理论无法更好的解释目前出现的情况,同时,常规的实验手段也无法观测磨削加工中的材料的动态去除情况。分子动力学(MD)仿真由于可以揭示材料在原子或纳米尺度下的微观变形机理和获得材料加工时的动态加工情况被广泛应用于纳米加工的研究当中,并且取得了不错的效果^[6]。硅晶圆的纳米磨削减薄过程中,亚表面损伤的出现极大地影响其在后续的工序和使用寿命,因此对纳米磨削过程中的亚表面损伤抑制是目前所需解决的首要问题。目前,单晶硅纳米磨削条件下的亚表面损伤形成机制不清楚,这就无法实现其损伤情况的精确控制,因此目前国内外众多学者对单晶硅纳米加工下的亚表面损伤形成机制进行了部分研究。

崔俊峰等人^[7]通过原位观测法和MD仿真研究了单晶硅纳米压痕过程中塑性变形机理,发现在压应力的作用下单晶硅先从Si-I相演化为八面体结构,后又在剪切应力的作用下旋转形成Si-IV相。Gassilloud R等人^[8]通过改变划擦速度研究纳米划擦过程中单晶硅的相变机理,结合MD仿真结果得出划擦速度较低时亚表面损伤层主要由非晶硅和Si-XII相组成,而较高划擦速度划擦下亚表面损伤层主要由非晶硅组成。Yan J等人^[9]通过MD仿真研究了纳米切削过程中刀具几何形状与切削速度对单晶硅亚表面损伤形成的影响机制,结果表明单晶硅的亚表面损伤形成机制主要是相变,并且大的刀具负前角和较小的划擦速度会导致亚表面损伤层厚度增大。Chavoshi S Z等人^[10]通过MD仿真分析了单

晶硅纳米切削过程中不同初始温度和切削方向对材料去除行为的影响规律,表明加工温度对单晶硅的各向异性具有很强的相关性,同时改变原子所受初始温度会导致切削过程中的切削力、屈服应力变小,加工表面质量提升。Li J等人^[11]通过MD仿真研究了单晶硅纳米磨削下的亚表面损伤形成和材料去除机理,得出了单晶硅纳米磨削下会产生相变,并且提高磨削速度会产生更多的切屑和更高的切削温度,但是亚表面损伤层厚度会减小。Zhang L等人^[12]基于MD仿真研究了纳米切削过程中刀具重复切削下单晶硅的相变以及划擦力的变化。结果表明第二次切削会增加配位数为6的原子以及减小切削过程中的切削力。

以上研究表明研究单晶硅纳米加工下的亚表面损伤形成机制对于实现单晶硅的超光滑低损伤加工具有重要的意义。而先前的研究只是揭示了单晶硅纳米加工下会产生相变,而相变的演化机制目前还不清楚。此外,针对单晶硅亚表面损伤抑制的研究仅有改变磨削速度,而磨削速度的改变对亚表面损伤形成的影响机制也不明确。目前,针对单晶硅或工程陶瓷等材料的加工损伤抑制方法主要有能场辅助加工和加工参数调控,而加工参数调控是无需引入其他外在条件并且最有效的方法^[3,13]。因此本文首先通过建立单晶硅纳米磨削的分子动力学仿真模型来研究其加工过程中的亚表面损伤形成机制,其次分析磨削参数对磨削过程中的磨削力和磨削温度以及亚表面损伤形成的影响机制,最后形成单晶硅纳米磨削亚表面损伤抑制策略。本研究对理解纳米或原子尺度下单晶硅的变形与去除机理具有重要意义,同时也对硅晶圆减薄过程中的损伤抑制提供技术指导。

1 分子动力学建模

图1为单晶硅纳米磨削的分子动力学模型,其中工件为立方金刚石结构的单晶硅,晶格常数为5.43 Å。磨粒是晶格常数为3.57 Å的金刚石,并且被设置为刚体。工件有3部分组成,分别为牛顿层、恒温层和边界层。牛顿层中的原子直接与金刚石磨粒相互作用并且遵循牛顿第二定律,该定律采用Velocity-Verlet算法计算^[5]。恒温层中的原子遵循Berendsen恒温动力学^[6],为了可以模拟实际加工中热量可以通过磨屑、金刚石磨粒、空气和冷却液进行消散。边界层中的原子用来实现模型的固定以免

在仿真过程中受金刚石磨粒的推挤而发生偏移。模型的 X、Y 方向采用非周期性边界条件，Z 方向采用周期性边界条件用来减小边界尺寸效应。

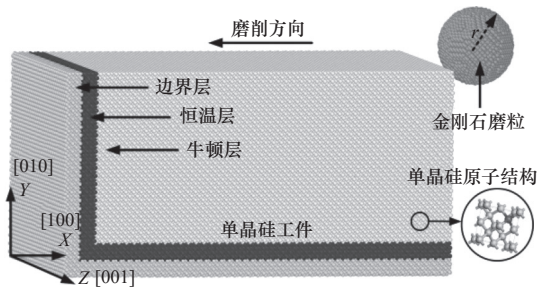


图 1 单晶硅纳米磨削的分子动力学模型

在仿真前，采用 NVT 系综对模型进行弛豫将初始温度调节到 297 K。在加工过程中牛顿层原子因为有温度的变化所以采用 NVE 系综^[14]。仿真中存在 3 种不同原子之间的相互作用，分别是工件中 Si-Si、金刚石磨粒和工件中 Si-C 以及金刚石颗粒中 C-C。Si-Si、Si-C 以及 C-C 均采用 Tersoff 势函数^[1]。本文使用的分子动力学模拟软件为 LAMMPS，后期数据的可视化和分析处理采用开源软件 OVITO，具体仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 单晶硅纳米磨削 MD 仿真参数

参数名称	参数设置
总计原子数	356 298
单晶硅工件尺寸/(nm×nm×nm)	27×14×13
金刚石磨粒半径/nm	2.5
磨削深度 a_p /nm	0.5、1.0、1.5、2.0
磨削速度 v_s /(m/s)	50、100、150、200
磨削方向	[-100] (001)
有效磨削距离 l /nm	0-24
时间步/fs	1

2 结果与讨论

2.1 亚表面损伤形成机制

图 2 为单晶硅纳米磨削下的亚表面损伤分布图，图中的原子通过可视化中的识别金刚石结构（identify diamond structure）进行着色，为了方便分析，单晶硅原始的完美立方金刚石结构和金刚石磨粒被隐去。由图可知，在磨粒的加工过程中，原始的单晶硅（Si-I 相）在挤压和剪切作用下形成了非原始状态的立方金刚石结构、六方金刚石结构和

非晶结构。非晶结构出现在已加工表面和磨屑，亚表面为非原始状态的立方金刚石结构和少量的六方金刚石结构（Si-IV 相），这表明单晶硅纳米磨削过程中相变和非晶化是其主要塑性变形机制。而 Si-IV 相的形成是 Si-I 相在受到金刚石磨粒的挤压作用后，首先形成八面体结构后再经过旋转形成的^[7]。此外，亚表面损伤层内部主要是由 Si-Si 重组后形成的晶体结构，虽然均为立方金刚石结构（第一近邻和第二近邻），但并不是原始的单晶硅的结构，这表明其中可能还包含了多种相。为了研究其中相变的产生机制，进行了磨削过程可视化中的径向函数分析（radial distribution function），来表征原子之间距离（键长）的变化。

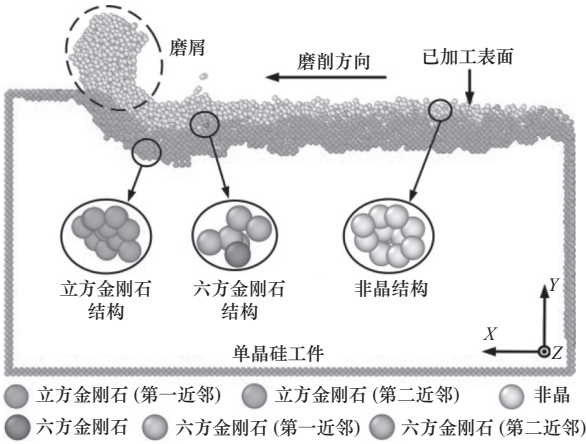


图 2 单晶硅纳米磨削亚表面损伤分布 ($l=22$ nm, $a_p=1.5$ nm, $v_s=100$ m/s)

图 3 为磨削过程中的径向函数分析，分别取磨削前、磨削过程中和磨削后的数据进行分析。由图可知，磨削前后的最高峰值均为 0.235 nm，这就表面 0.235 nm 是完美单晶硅的原子间距（键长）。随着磨削过程的进行，0.235 nm 处的峰值逐渐下降，表明原始的单晶硅结构被逐渐破坏。而随着磨削过程的进行，发现在原子间距为 0.24~0.26 nm 处存在峰值逐渐增加（局部放大图），这就表明除了原始的单晶硅结构被破坏外，出现了新的硅相结构，并且原子间距在 0.24~0.26 nm。为了进一步确定新生成的硅相结构，采用可视化软件中的配位数分析。

图 4 为单晶硅纳米磨削下的配位数（CN）分析，其中用原子间的配位数值对原子进行着色，为了方便分析，完美晶格的单晶硅被隐去。由图可知，配位数为 3 的原子数量最多，分布在整个已加工区域。配位数为 4 的原子存在磨屑，配位数为 5 的原

子存在工件的亚表面。而配位数为 6 和 7 原子数量较少,基本存在磨削接触区域。其中,配位数为 3 的原子基本为表面原子,由一个中心硅原子和另外 3 个硅原子组成,属于非晶结构。配位数为 4 的原子为一个中心硅原子和另外 4 个硅原子组成,虽然完美晶格的单晶硅配位数也为 4,但是原子间距的不同也会导致其结构的不同。同时,在分析前,完美晶格结构的单晶硅已经被隐去,因此图 4 中配位数为 4 的原子为 Si-III 相^[15]。配位数为 5 的原子由一个中心硅原子和另外 5 个硅原子组成,为 bct5-Si 相,同理,配位数为 6 的原子为 Si-II 相^[16]。而配位数为 5 的原子拥有一个长度为 0.231 nm 的键和 4 个长度为 0.244 nm 的键,配位数为 6 的原子键长由 5 个 0.244 nm 和 1 个 0.258 nm 组成^[17],这也与图 3 中的相变原子的原子间距可能在 0.24~0.26 nm 的结果相吻合。配位数为 7 硅原子目前还未发现属于何种相。因此,单晶硅纳米磨削过程中亚表面损伤形成机制是结构相变和非晶化。

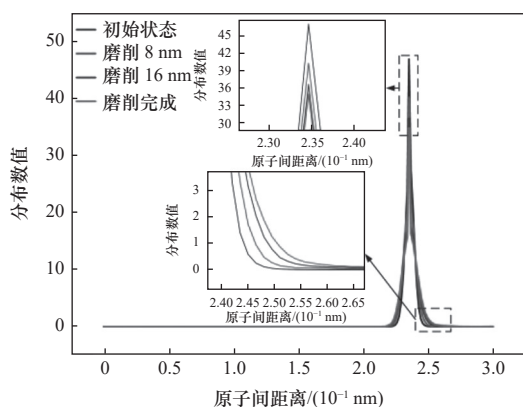


图 3 单晶硅纳米磨削过程中的径向函数分析 ($a_p=1.5$ nm, $v_s=100$ m/s)

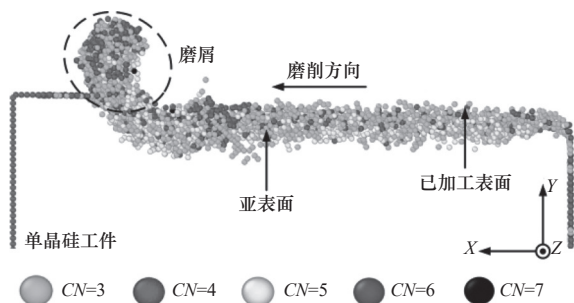


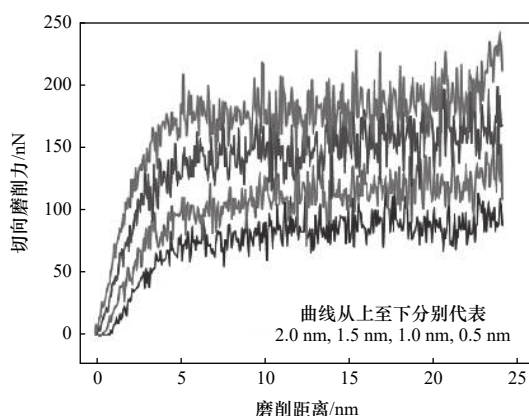
图 4 纳米磨削单晶硅亚表面配位数分析 ($l=22$ nm, $a_p=1.5$ nm, $v_s=100$ m/s)

2.2 磨削参数对磨削力与温度的影响

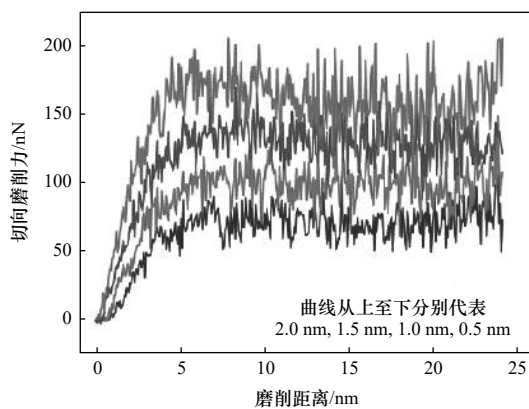
磨削过程中磨削力和温度的变化对亚表面损伤形成有着至关重要的影响,而磨削参数的变化可改

变磨削过程中的磨削力和温度。

图 5 为纳米磨削单晶硅时不同磨削参数下磨削力的变化曲线,由图可知,当磨粒刚接触工件时,磨削力先呈增大趋势上升,当磨削距离达到 5 nm 后进入稳定磨削阶段,并且磨削力在一定程度上波动。同时,由图 5 可知,随着磨削深度由 0.5 nm 增加到 2.0 nm,切向和法向磨削均呈增大趋势,这是因为磨削深度的增加加大了磨削过程中磨粒与工件的实际接触面积,作用面积的增加使得磨削力增加。



(a) 磨削深度与切向磨削力



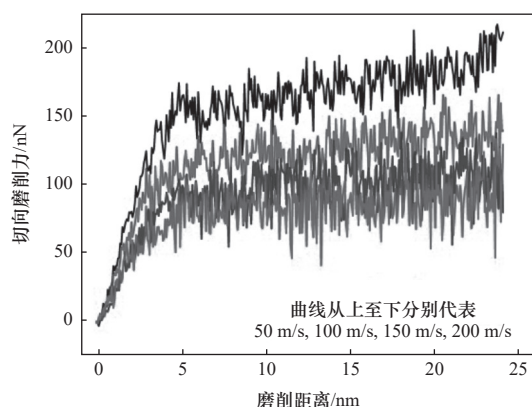
(b) 磨削深度与法向磨削力

图 5 纳米磨削单晶硅时不同磨削深度下磨削力的变化 ($v_s=100$ m/s)

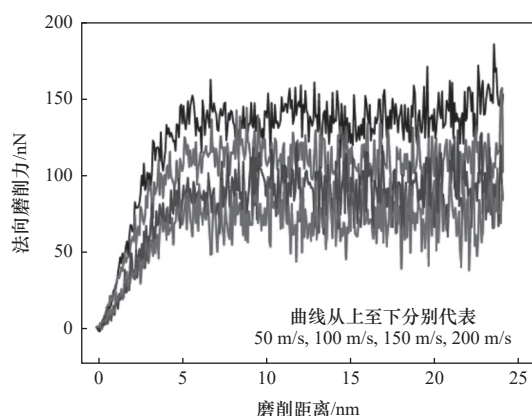
图 6 为纳米磨削单晶硅时不同磨削速度下磨削力的变化曲线,与图 5 类似,磨削力同样先快速增加,当磨削距离达到 5 nm 时进入稳定磨削阶段,并且力在一定程度内波动。由图 6 可知,随着磨削速度由 50 m/s 增加到 200 m/s,切向和法向磨削力均呈减小趋势,这是因为磨削速度的增加使得单位时间内磨粒的实际切削厚度减小,因此磨削力降低^[18]。

图 7 为纳米磨削单晶硅时不同磨削参数下磨削温度的变化曲线,由图 7a 可知,随着磨削深度由

0.5 nm 增加到 2.0 nm, 磨削过程中的磨削温度呈增大趋势, 这是因为磨削深度的增加, 导致磨粒与工件间的接触弧长增大, 大量的热量被传入工件, 因此磨削温度升高。由图 7b 可知, 随着磨削速度由 50 m/s 增加到 200 m/s, 磨削温度随之升高, 虽然温度升高的速率有所不同, 但温度的最大值呈线性增大。这是因为磨削速度的提高导致磨削过程中热量来不及消散, 累积在磨削加工区, 因此磨削温度升高^[19]。



(a) 磨削速度与切向磨削力



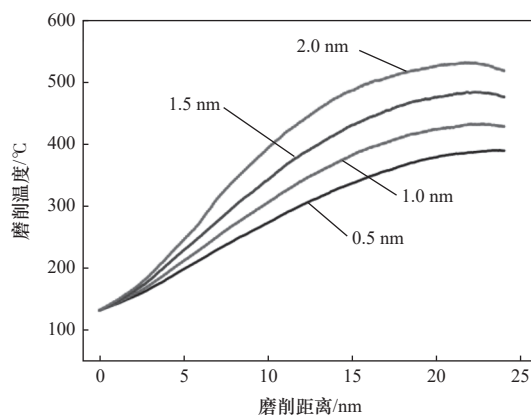
(b) 磨削速度与法向磨削力

图 6 纳米磨削单晶硅时不同磨削速度下磨削力的变化 ($a_p=1.5$ nm)

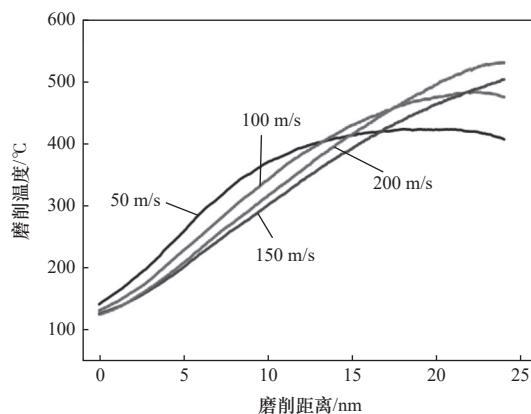
2.3 磨削参数对亚表面损伤形成的影响

磨削参数的变化会对单晶硅磨削过程中的亚表面损伤形成造成影响。图 8 为单晶硅纳米磨削时不同磨削参数下亚表面损伤原子数的变化曲线。由图可知, 磨削深度增加或磨削速度减小会导致单晶硅纳米磨削过程中亚表面损伤原子数的增加。根据图 5~7 可知, 当磨削深度增加时, 磨削力和磨削温度会上升。因此, 出现此现象的可能原因是磨削力的增加使磨削变形区的内部温度升高, 导致原子运动增强, 从而降低了单晶硅原子相变所需的能量,

致使损伤原子数增加。而磨削速度增加时, 虽然磨削温度升高, 但是磨削过程中的磨削力是减小, 这就使得更少的硅原子被破坏。同时, 一定磨削温度的升高还有利于提高硅的塑形去除比例^[20], 因此亚表面损伤原子数减小。从此也可看出, 磨削过程中起主要作用的是磨削力。



(a) 磨削深度与磨削温度 ($v_s=100$ m/s)



(b) 磨削速度与磨削温度 ($a_p=1.5$ nm)

图 7 纳米磨削单晶硅时不同磨削参数下磨削温度的变化

图 9 为单晶硅纳米磨削时不同磨削深度下亚表面损伤层厚度的变化情况。由图 9 可知, 随着磨削深度由 0.5 nm 增加到 2.0 nm, 亚表面损伤层厚度由 1.39 nm 增加到 1.76 nm。同时, 图 10 为不同磨削速度下亚表面损伤层厚度的变化情况, 由图 10 可知随着磨削速度由 50 m/s 增加到 200 m/s, 亚表面损伤层厚度由 1.63 nm 减小到 1.46 nm。亚表面损伤层厚度的变化趋势与亚表面损伤原子数的变化趋势一致。磨削过程中磨削力的增大会导致磨削温度的升高, 导致更多的硅原子被破坏并且有能量发生相变, 而磨削过程完成后, 一些产生畸变的硅原子 (在较小磨削力的作用下) 若还有足够的能量 (温度导致能量上升) 可能恢复到原始的晶格结构, 因

此磨削深度增加和磨削速度减小会导致单晶硅纳米磨削过程中亚表面损伤层厚度的增加^[1,20]。由于纳米磨削时磨粒与工件间的作用尺度仅为几纳米甚至几个晶格,因此这与宏观以脆性断裂为主的磨削机理有所不同。由此还可说明,磨削过程中磨削温度并不是完全对加工过程有害,某些时刻反而会有利于高质量、低损伤表面/亚表面的形成。但高磨削速度时的高温作用容易造成磨粒寿命的降低。因此,为了抑制单晶硅纳米磨削过程中的亚表面损伤的形成,在磨削过程中适当减小磨削深度和提高磨削速度来实现单晶硅的低损伤和高效率加工。

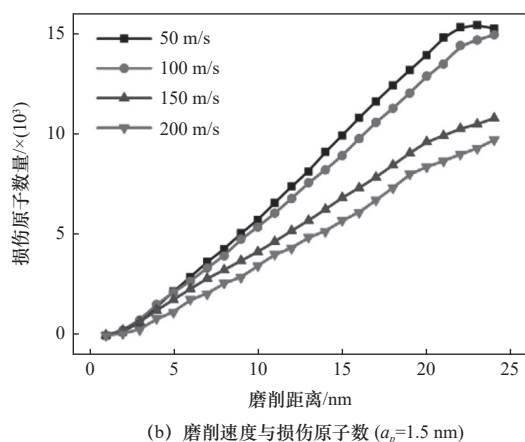
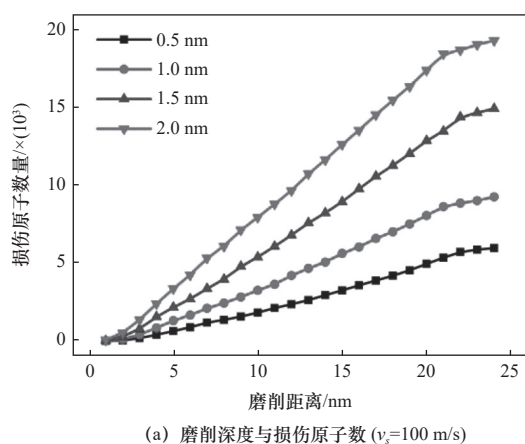


图8 纳米磨削单晶硅时不同磨削参数下亚表面损伤原子数的变化

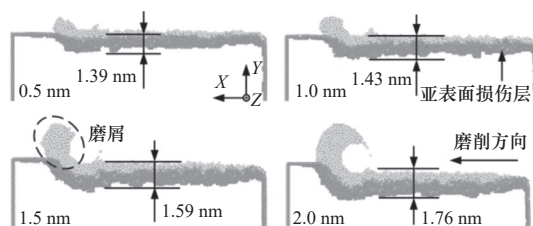


图9 单晶硅纳米磨削时不同磨削深度下亚表面损伤层厚度的变化
($l=22$ nm, $v_s=100$ m/s)

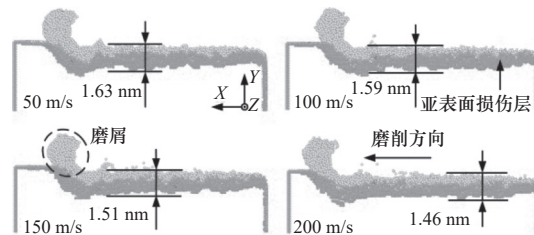


图10 单晶硅纳米磨削时不同磨削速度下亚表面损伤层厚度的变化
($l=22$ nm, $a_p=1.5$ nm)

3 结语

本文通过分子动力学仿真研究了单晶硅纳米磨削时亚表面损伤形成机制以及磨削参数对亚表面损伤形成的影响机制,并提出了损伤抑制方法,得出具体结论如下:

(1) 单晶硅纳米磨削过程中结构相变和非晶化是其主要的塑形变形机制和亚表面损伤形成机制。原始的 Si-I 相在磨粒和工件间的挤压和剪切作用下形成了 Si-II 相、Si-III 相、Si-IV 相、bct5-Si 相以及非晶。

(2) 由于磨削接触弧长的增大,磨削过程中磨削力和磨削温度随磨削深度的增大而升高。磨削速度的增加导致磨削力减小、磨削温度升高。磨削过程中一定程度的高温有利于抑制单晶硅的亚表面机械损伤。

(3) 较大的磨削深度或较小的磨削速度会导致单晶硅亚表面损伤原子数和亚表面损伤层厚度增加。磨削过程中磨削力增大是导致亚表面机械损伤严重的主要原因。在纳米磨削单晶硅时,可通过减小磨削深度和提升磨削速度来实现亚表面损伤的抑制。

参 考 文 献

- [1] Li P H, Guo X G, Yuan S, et al. Effects of grinding speeds on the subsurface damage of single crystal silicon based on molecular dynamics simulations[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 554: 149668-149675.
- [2] 葛梦然,王全景,张振中.单晶硅压痕接触变形的简化计算[J].*光学精密工程*, 2022, 30(11): 1317-1324.
- [3] 许剑锋,黄凯,郑正鼎,等.难加工材料场辅助超精密加工研究[J].*中国科学技术科学*, 2022, 52(6): 829-853.
- [4] 程钢,郝兆朋,张卓.单晶硅超声振动辅助切削亚表面裂纹损伤检测算法[J].*吉林大学学报:工学版*, 2022, 52(5): 1016-1021.
- [5] 伍丰,李蓓智,杨建国.纳米磨削单晶和多晶3J33的分子动力学仿真[J].*东华大学学报:自然科学版*, 2019, 45(6): 892-898.
- [6] 庞飞,雷大江,王伟.基于控制磨削前角的金刚石研磨损伤分析[J].*制造技术与机床*, 2022(8): 104-108.
- [7] 崔俊峰.硬脆半导体应力诱导损伤演变的原位力学实验研究及理论

- 分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [8] Gassilloud R, Ballif C, Gasser P, et al. Deformation mechanisms of silicon during nano-scratching[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2005, 202(15): 2858-2869.
- [9] Yan J, Asami T, Harada H, et al. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining[J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 378-386.
- [10] Chavoshi S Z, Goel S, Luo X. Influence of temperature on the anisotropic cutting behaviour of single crystal silicon: A molecular dynamics simulation investigation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 23: 201-210.
- [11] Li J, Fang Q H, Zhang L C, et al. Subsurface damage mechanism of high speed grinding process in single crystal silicon revealed by atomistic simulations[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 324: 464-474.
- [12] Zhang L, Zhao H W, Yang Y H, et al. Evaluation of repeated single-point diamond turning on the deformation behavior of monocrystalline silicon via molecular dynamic simulations[J]. *Applied Physics A*, 2014, 116(1): 141-150.
- [13] 吴玉厚, 王浩, 孙健, 等. 氮化硅陶瓷磨削表面质量的建模与预测[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 281-289.
- [14] 钱磊, 李蓓智, 吕志军. 基于分子动力学的滚动轴承超精加工仿真研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(7): 102-105.
- [15] 戴厚富. 基于分子动力学的单晶硅超精密加工机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [16] Dai H F, Chen G Y, Zhou C, et al. A numerical study of ultraprecision machining of monocrystalline silicon with laser nano-structured diamond tools by atomistic simulation[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 393: 405-416.
- [17] Zhang Z Y, Cui J F, Chang K K, et al. Deformation induced new pathways in silicon[J]. *Nanocale*, 2019, 11(20): 9862-9868.
- [18] 王浩. 氮化硅陶瓷磨削热特性与表面质量研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [19] 吴玉厚, 王浩, 李颂华, 等. 氮化硅陶瓷磨削热特性与表面成形机制[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 360-368.
- [20] Yuan S, Guo X G, Liu, S T, et al. Atomistic understanding of the subsurface damage mechanism of silicon (100) during the secondary nano-scratching processing[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 144: 106624-106631.
- 第一作者: 田海兰, 女, 1978 年生, 硕士, 副教授, 研究方向为超精密加工技术与智能车辆控制理论。E-mail: 112252559@qq.com
- 通信作者: 闫海鹏, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 研究方向为超精密加工技术与轴承振动噪声特性及故障诊断。E-mail: lnyanhp@126.com
- (编辑 李 静)
- (收修改稿日期: 2022-11-02)
- 文章编号: 20230305
如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。