



气体团簇离子束两步能量修形法的平坦化效应

Vasily Pelenovich 曾晓梅 罗进宝 Rakhim Rakhimov 左文彬 张翔宇 田灿鑫 邹长伟 付德君 杨兵

Double-step gas cluster ion beam smoothing

Vasily Pelenovich Zeng Xiao-Mei Luo Jin-Bao Rakhim Rakhimov Zuo Wen-Bin Zhang Xiang-Yu
Tian Can-Xin Zou Chang-Wei Fu De-Jun Yang Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 053601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201454

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201454>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气体团簇离子束装置的设计及其在表面平坦化、自组装纳米结构中的应用

Design and application of gas cluster accelerator for surface smoothing and nanostructures formation

物理学报. 2020, 69(9): 093601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191990>

基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究

Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements

物理学报. 2017, 66(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194201>

样品表面银膜的粗糙度对钛酸钡微球成像性能的影响

Effect of silver film roughness on imaging property of BaTiO₃ microsphere

物理学报. 2018, 67(21): 214209 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180823>

石墨表面熔融硅的润湿行为研究

Wetting behaviors of the molten silicon on graphite surface

物理学报. 2017, 66(3): 036801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.036801>

气体-表面相互作用的分子动力学模拟研究

Molecular dynamics simulations on scattering of Ar molecules on smooth and rough surfaces

物理学报. 2018, 67(22): 223401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181608>

烧蚀对强脉冲离子束在聚合物材料中能量沉积的影响

Influence of ablation on energy deposition in polymer material under irradiation of intense pulsed ion beam

物理学报. 2020, 69(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200212>

气体团簇离子束两步能量修形法的平坦化效应*

Vasily Pelenovich¹⁾²⁾³⁾ 曾晓梅^{1)2)†} 罗进宝¹⁾ Rakhim Rakhimov¹⁾
左文彬¹⁾ 张翔宇¹⁾ 田灿鑫²⁾ 邹长伟²⁾ 付德君¹⁾ 杨兵³⁾

1) (武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

2) (岭南师范学院物理科学与技术学院, 湛江 524048)

3) (武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072)

(2020年9月2日收到; 2020年11月2日收到修改稿)

本文提出采用气体团簇离子束的两步能量修形法来改善 4H-SiC(1000) 晶片表面形貌. 先用 15 keV 的高能 Ar 团簇离子进行整体修形, 再用 5 keV 的低能团簇离子优化表面. 结果表明, 在相同的团簇离子剂量下, 与单一 15 keV 的高能团簇处理相比, 两步法修形后的表面具有更低的均方根粗糙度, 两者分别为 1.05 nm 和 0.78 nm. 本文还以原子级平坦表面为研究对象, 揭示了载能团簇引起的半球形离子损伤(弧坑)与团簇能量的关系, 及两步能量修形法在弧坑修复中的优势. 在原子力显微镜表征的基础上, 引入了二维功率谱密度函数, 以直观全面地给出材料的表面形貌特征及其随波长(频率)的分布. 结果表明, 经任何能量的团簇离子轰击的表面, 在 0.05—0.20 μm 波长范围内, 团簇轰击都能有效地降低粗糙度, 而在 0.02—0.05 μm 范围内, 则出现了粗化效应, 这是由于形成了半球形离子损伤, 但第二步更低能量的团簇离子处理可以削弱这种粗化效应.

关键词: 气体团簇离子束, 表面平坦化, 两步能量修形法, 表面粗糙度

PACS: 36.40.-c, 36.40.Wa, 52.77.Bn, 78.67.Qa

DOI: 10.7498/aps.70.20201454

1 引言

气体团簇离子 (gas cluster ion, GCI) 是多个原子或分子的介观聚集体, 尺寸范围很广, 从几个原子到数千个甚至上万个原子不等, 直径介于 0.1 至 10.0 nm. 而每个团簇离子的电荷数仅为几个电子电量, 因而经高压加速后, 大尺寸团簇中平均每个原子的能量仍然很小. 这种高质荷比 (m/q) 特点, 使得重团簇离子束与固体表面相互作用时, 会产生不同于单原子离子束的特征——高能量密度、高温冲击区、横向溅射效应、多重散射等, 以及在相同束流条件下可输运更多材料^[1], 这

些效应通常都发生在非常浅的表面区域, 所以气体团簇离子束 (gas cluster ion beam, GCIB) 在材料表面改性方面具有广泛应用, 尤其是表面平坦化处理.

GCIB 技术和应用在过去的几十年里取得了很大的发展, 包括离子束刻蚀加工^[2]、半导体材料掺杂、离子束辅助沉积、材料表面平坦化^[3]、高真空二次离子质谱检测^[4]和纳米结构自组装^[5,6]等. GCIB 最成熟的应用是团簇离子垂直轰击材料表面时, 因其横向溅射效应^[1], 对中等粗糙的表面可产生平坦化修形效应, 可将表面粗糙度降低至 0.1 nm. GCIB 中的单体离子与靶原子之间的相互作用呈高度的非线性关系, 不能简单地用 Sigmund 溅射理论来

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875210, U1832127) 和广东省自然科学基金 (批准号: 2018A050506082, 2020A1515011531, 2020A1515011451) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 1714399588@qq.com

描述, 这种差异使得团簇离子与非光滑表面相互作用时促进产生了平坦化效应——团簇离子轰击材料表面时, 材料凸起处溅射率远高于下凹处, 使得凸起处被侵蚀, 从凸起处溅射出的靶材料遵循次余弦定律, 几乎平行靶材表面飞溅出去, 最后回落至下凹处, 使得凸起与下凹处高度差逐渐减小, 达到平坦化效果.

但团簇离子轰击靶材时, 也会不可避免地遗留辐照损伤. 能量较高的团簇离子, 在靶材碰撞区淀积的能量密度更高, 温度急剧上升, 促进靶表面原子的溅射, 加快表面平坦化速率. 但与此同时, 也容易造成半球形离子损伤, 表现为环形弧坑^[7], 因为撞击区温度和压力的急剧升高, 使得样品表面溅射出大量物质后留下弧坑, 弧坑中间低于靶材的平均表面, 但边缘会垒起高于靶材表面的环状土堆, 这种中间低、边缘高的不平整形貌, 在很大程度上破坏了平坦表面, 使得表面粗糙度限制在 1.0 nm, 难以突破. 团簇辐照形成的弧坑的内直径遵循以下公式:

$$r = 1.45 \left(\frac{E}{B} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

其中 E 为团簇能量, 单位 eV; B 为样品的布氏硬度^[8]. 因而, 对于硬度一致的靶材, 团簇能量越高, 遗留的弧坑直径越大^[9].

Matsuo 等^[10]进行了分子动力学 (molecular dynamics, MD) 模拟, 研究了 Ar_{2000} 对 Si(100) 的损伤形态, 模拟结果表明, 低能团簇 (2—4 keV) 不会对靶材造成离子损伤; 能量为 6 keV 时, 撞击区开始形成中心处下陷、外边缘由土堆环绕的不平整弧坑 (crater), 且损伤区域的深度、宽度随着冲击能量的增大逐渐变大. MD 模拟结果为低能团簇更利于实现低损平坦化改性奠定了理论基础. 之后, Houzumi 等^[11]对高取向热解石墨 (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) 靶进行了 Ar 团簇的溅射研究, 从实验上证实了高能团簇更容易形成大弧坑, 破坏靶材表面. Greer 等^[12]以 Ta 薄膜为实验对象, 研究了 10, 20 和 28 keV 的 Ar_{1000} 团簇的平坦化效应, 表明 28 keV 的团簇离子最快地降低了表面粗糙度, 而 14 keV 的团簇离子束辐照的表面最为平坦. 之后, Isogai 等^[13]和 Seki^[14]分别研究了 Ar 和 SF_6 等团簇离子束对 Si 晶片和 Au 薄膜的辐照, 表面粗糙度随加速能量的增加而变差.

Toyoda 等^[15]用不同能量的 Ar^+ 和 Ar-GCIB 辐照 Co_3Fe_7 表面, 证实了较低电离电压下多电荷 GCIB 的形成受到限制, 低能 GCIB 有助于表面平滑.

因此, 为了获得更好的平坦化效果, 有必要降低团簇能量. 倘若一味地降低团簇能量以获得平坦表面, 也会因为束流过低而不得不延长抛光时间, 而且低能团簇溅射率低于高能团簇^[16], 很难除去表面凸起, 最终在靶材表面会留下很多无法除去的机械损伤, 表面粗糙度难以达到预期.

在上述研究中, 不论是 MD 模拟还是实验研究, 采用的均是单一能量的平坦化模式, 缺乏多步能量的实验研究.

两步能量修形法是本课题组对之前平坦化研究的延续^[17–19], 可以解决低能团簇束流过低的问题. 本研究致力于采用两步气体团簇离子束处理来改善表面粗糙度, 分析了 Ar 气体团簇离子束 (平均尺寸为 1000 atoms/cluster) 垂直辐照 4H-SiC (1000) 引起的平坦化效应, 对比了单一高能团簇、单一低能团簇, 以及两步能量团簇修形法的平坦化差异. 研究结果对提高平坦化效率、改善最终表面形貌具有重要意义.

2 实验

在自主设计的气体团簇离子加速器上引出目标团簇离子束, 其工作原理是: 在标准温度下, 通过进气管输送一定压强的高纯源气体, 气体穿过锥形喷嘴时, 因为喷嘴孔径极小, 导致喷嘴两头存在较大的压强差和温度差, 促使气体膨胀并绝热冷却, 冷凝成中性团簇; 离子器采用加热放电原理, 阴极采用钨丝材质, 高压放电产生热电子, 使中性团簇粒子电离, 形成团簇离子; 然后在加速器和三极透镜聚焦系统作用下, 单个的团簇离子聚集成团簇离子束; 团簇离子在 E 型永磁铁的磁场中受到洛伦兹力的作用, 并作圆周运动, 圆锥形气流束中的单原子离子和原子数较少的团簇离子质量轻, 圆周运动轨道半径小, 在洛伦兹力的作用下被偏转, 而重团簇离子几乎维持原路径向穿过磁场, 形成重团簇离子束^[17,19,20].

以惰性气体 Ar 作为工作气体, 源气压为 10 bar (1 bar = 10^5 Pa), 由飞行时间质谱仪 (time of flight mass spectrometer, TOF-MS) 测得产生的平均团簇尺寸为 1000 atoms/cluster. 高压气体在临

界直径为 65 μm 、锥角为 14°的锡铅合金圆锥形喷嘴中进行超声膨胀, 形成团簇粒子束. 喷嘴以脉冲模式供气, 改善了真空条件, 有利于获得较大的团簇. 喷嘴腔室和辐照室的真空度分别为 0.16 Pa 和 5×10^{-3} Pa.

以 4H-SiC(1000) 晶圆 (合肥科技材料技术有限公司) 为基体材料, 包括具有原子级平坦表面的 4H-SiC 和表面带有机机械损伤 (划痕) 的 4H-SiC, 机械损伤由 1 μm 粒径的金刚石研磨膏打磨而成. 实验用的 SiC 试片均切割成 4.0 mm \times 4.0 mm \times 0.5 mm 的方块, 置于 5 mm \times 5 mm 的铜质样品台, 由气体团簇离子束垂直辐照. 为了验证载能团簇离子会形成弧坑等半球形离子损伤, 研究两步能量修形法在弧坑修复、机械损伤去除中的优势, 两种初始形貌的 SiC 试片都经过了团簇的单一 15 keV 高能、单一 5 keV 低能、15–5 keV 两步能量法的修形处理, 离子剂量均为 3×10^{16} cm^{-2} , 15 和 5 keV 下团簇离子束流分别为 1.0 和 0.5 μA . 表 1 和表 2 分别列出了两种靶材的具体平坦化参数 (加速电压、离子剂量、抛光时间).

表 1 具有原子级平坦表面 4H-SiC 的团簇辐照参数 (团簇能量、离子剂量、辐照时间) 和辐照结果 (均方根表面粗糙度 R_q)

Table 1. The smoothing parameters (cluster energy, ion flux, and treatment time) and root mean square roughness R_q . The samples have atomically smooth initial surface.

团簇能量/keV	离子剂量/(10^{16} ions· cm^{-2})	辐照时间/min	均方根粗糙度/nm
0	0	0	0.15
15	3	20	0.99
5	3	40	0.61
15–5	1.5+1.5	10+20	0.62

表 2 4H-SiC(1000) 样品 (含有机机械损伤) 的平坦化参数 (团簇能量、离子剂量、平坦化时间) 和平坦化结果 (均方根表面粗糙度 R_q)

Table 2. The smoothing parameters (cluster energy, ion flux, and treatment time) and root mean square roughness R_q . The samples have mechanically polished (scratched) initial surface.

团簇能量/keV	离子剂量/(10^{16} ions· cm^{-2})	抛光时间/min	均方根粗糙度/nm
0	0	0	1.35
15	3	20	1.05
5	3	40	0.90
15–5	1.5+1.5	10+20	0.78

采用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM)(Shimadzu SPM-9500J3)、功率谱密度函数 (power spectral density, PSD) 等方法进行测试表征, 分析团簇辐照前后, 材料表面形貌的变化情况. AFM 测试采用 tapping 模式, 扫描面积为 5 μm \times 5 μm .

3 结果分析

3.1 团簇离子束对平坦表面的修形

为了验证载能团簇离子遗留的离子损伤程度与加速电压的关系, 同时避免初始表面形态中划痕、孔洞、突起等对最终表面形貌、粗糙度值 (团簇轰击后) 的影响, 采用具有原子级平坦表面的 4H-SiC(1000) 晶圆为研究对象, 初始粗糙度 $R_q = 0.15$ nm. 图 1 为经不同能量的 Ar 团簇垂直辐照后, 4H-SiC 的 AFM 表面形貌图. 图 1(a) 为 15 keV 团簇轰击后的表面形貌, 其表面均方根粗糙度 R_q 为 0.99 nm, 见表 1. 图 1(a) 表面可见大量细小颗粒, 尺寸介于 10–20 nm. 将图 1(a) 放大后, 如图 1(b) 所示, 观察到整个表面布满了弧坑, 直径约 25–35 nm, 弧坑数量巨大, 以致彼此之间存在堆叠、重合, 因而, 只有最后形成的弧坑才保留有完整的形貌, AFM 图像上显示白色细小颗粒即为环状弧坑的外边缘. 图 1(c) 为图 1(b) 中弧坑的截面轮廓图, 具体表现为中间低于 SiC 平均表面、边缘高于 SiC 平均表面的不平整结构, 图中弧坑直径约 30 nm、深 4 nm, 计算出该弧坑 R_q 为 1.13 nm. 对比图 1(d) 5 keV 团簇轰击后的表面形貌, 表面均方根粗糙度 R_q 为 0.61 nm, 见表 1, 形成的弧坑直径约 15–20 nm. 对比图 1(b) 和图 1(d) 中弧坑尺寸, 验证了弧坑直径与团簇能量的关系遵循 (1) 式, 表明低能团簇在很大程度上降低了对靶材造成的离子损伤, 形成的表面更平坦, 如果团簇能量可以无限降低直至趋于 0 keV, 理论上可以实现完全无损伤的靶材表面. 然而实际应用中, 团簇能量降低的同时, 离子束流也会迅速降低, 获得所需要的离子剂量将会相当困难.

而后, 采用团簇离子的两步能量修形法, 先后用 15 和 5 keV 的团簇离子轰击靶材, 每步离子剂量均为 1.5×10^{16} ions/ cm^2 . 最终 SiC 形貌如图 1(e), R_q 为 0.62 nm, 与单一 5 keV 辐照的结果一致, 但缩短了平坦化时间, 见表 1. 因此, 在 15 keV 高能

团簇轰击后,再用 5 keV 低能团簇进一步轰击,会改善表面形貌,有效地修复 15 keV 高能团簇产生的离子损伤,取而代之为 5 keV 产生的尺寸、数量都相对减小的弧坑. 综上所述,低能团簇辐照能削弱高能团簇造成的离子损伤,预计两步能量修形法可以在较短时间内获得更光滑的表面,平坦化效率更高.

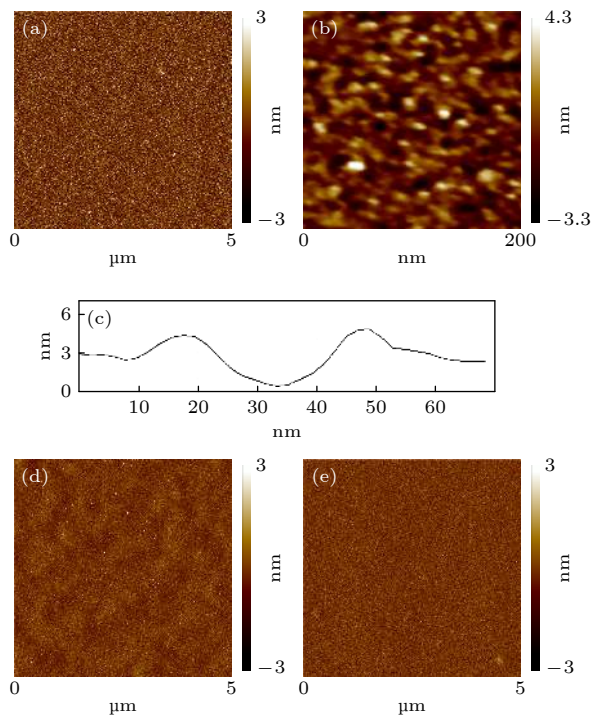


图 1 4H-SiC(1000) 经不同能量的 Ar 团簇垂直辐照后的 AFM 表面形貌图 (a) 15 keV; (b) 15 keV (更高倍率); (c) 图 (b) 中弧坑的截面轮廓图; (d) 5 keV; (e) 两步法, 15, 5 keV
Fig. 1. AFM images of 4H-SiC(1000) surface after Ar cluster bombardment at different energies: (a) 15 keV; (b) 15 keV at higher magnification; (c) cross section of a crater from Fig. (b); (d) 5 keV; (e) 15 keV and subsequent 5 keV.

功率谱密度函数是频率的函数,以图形形式揭示了周期性或随机性的表面特征及表面特征随频率(波长)的分布. 在频率空间比较各个样品的粗糙度水平,即比较指定空间频率范围内功率谱密度函数所覆盖区域的面积,覆盖面积越小,对应表面粗糙度也越低,表面越光滑^[17]. 通过傅里叶转换,可将 AFM 图像转换为 2D-PSD 函数曲线,为便于比较分析,将横坐标频率换算成波长,即本研究论文中所有 PSD 函数均为波长的函数. 图 2 为图 1 中 AFM 图像相对应的 PSD 函数曲线,在整个波长范围内,经 15-5 keV 团簇处理的 PSD 曲线远低

于 15 和 10 keV 的曲线,这是由于 5 keV 的低能团簇有效地消除了 15 keV 产生的弧坑,但与单一 5 keV 低能团簇相比,两者的曲线十分接近. PSD 数据进一步证明,5 keV 低能团簇可以修复先前 15, 10 keV 团簇所产生的离子损伤,降低粗糙度.

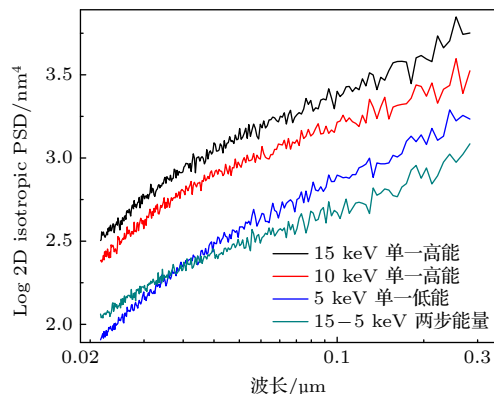


图 2 4H-SiC(1000) 经不同能量的团簇轰击后, AFM 图像对应的 PSD 曲线

Fig. 2. PSD functions of 4H-SiC (1000) surface after Ar cluster bombardment at different energies.

3.2 团簇离子对 4H-SiC 表面 (包含机械损伤) 的处理

以带有机机械损伤的 4H-SiC(1000) 晶圆为研究对象,对比研究了团簇离子束单一能量和两步能量修形法在机械损伤修复中的作用. 图 3 为经不同能量的 Ar 团簇垂直辐照后,4H-SiC(1000) 的 AFM 表面形貌图. 图 3(a) 为团簇轰击前的初始表面,4 H-SiC 片由 1 μm 粒径的金刚石研磨膏打磨而成,表面包含有很多 100 nm 宽、2—3 nm 深的条状划痕,均方根粗糙度 R_q 为 1.35 nm,见表 2. 经单一 15 keV 高能 Ar 团簇离子轰击后,见图 3(b),表面均方根粗糙度 R_q 降低至 1.05 nm(见表 2),表面划痕几乎全部除去,但 SiC 颗粒(即弧坑的边缘)变得粗大、松散,表明 15 keV 高能团簇可以快速除去划痕等机械损伤,粗糙度有所降低,但也会在靶材表面遗留下弧坑等离子损伤. 经单一 5 keV 低能 Ar 团簇离子轰击后,见图 3(c),表面均方根粗糙度 R_q 与 15 keV 的相差不明显,为 0.9 nm,但此时 SiC 颗粒(弧坑)较为细密,样品表面划痕数量有所减少,只有最宽、最深的划痕依然存在,表明 5 keV 低能团簇只能一定程度上除去部分浅划痕. 因此,与 15 keV 处理结果相比,由于 5 keV 低能团簇未除去的深划痕在粗糙度中的贡献占比

很大,同时在 5 keV 处理后,弧坑尺寸减小,对整体粗糙度的贡献减小,总的来说粗糙度稍有降低,却没法进一步突破.图 3(d)为经 15-5 keV 两步能量辐照后的形貌,表面均方根粗糙度 R_q 降低至 0.78 nm,样品表面所有划痕不复存在,且颗粒细密,表面光洁几乎无污染,证明两步能量模式的平坦化效果更加明显,先通过高能团簇轰击去除了所有划痕等机械损伤,再用低能团簇修复高能团簇遗留下的弧坑等离子损伤.

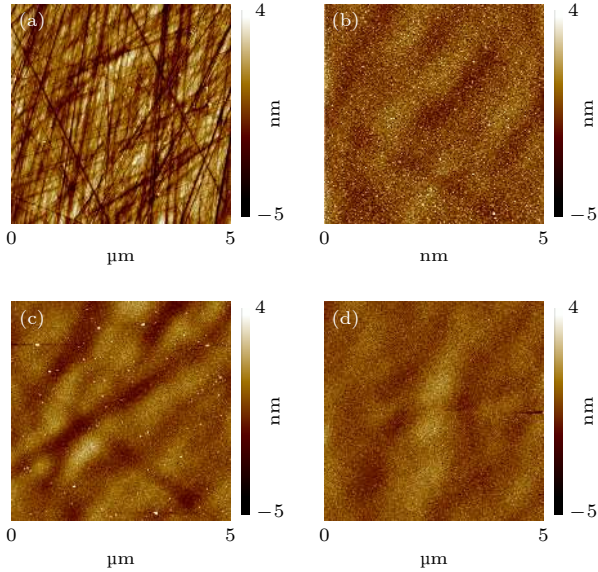


图 3 4H-SiC(1000) 经不同能量的 Ar 团簇垂直辐照后的 AFM 表面形貌图 (a) 原始形貌; (b) 15 keV; (c) 5 keV; (d) 15-5 keV 两步能量

Fig. 3. AFM images of mechanically polished 4H-SiC (1000) surface before and after Ar cluster bombardment with different energy: (a) Initial surface; (b) 15 keV; (c) 5 keV; (d) 15 and subsequent 5 keV.

图 4 为图 3 AFM 图像相对应的 PSD 频谱曲线, 0.02—0.05 和 0.05—2.00 μm 两个波长范围内的 PSD 表征着两种不同的表面形貌, 分别代表弧坑(团簇轰击形成的半球形离子损伤)和划痕(金刚石研磨膏打磨而成). 经过单一 15 keV 团簇处理后, 在 0.05—2.00 μm 波长范围内, PSD 曲线变化量最大. 波长为 0.3 μm 时, 粗糙度降低了两个数量级, 因为有效地去除了划痕. 然而, 在 0.02—0.05 μm 波长范围内, 与初始表面相比, 粗糙度反而增加, 这种粗化效应是由弧坑造成的. 经过单一 5 keV 团簇处理后, 在 0.05—2.00 μm 波长范围内, 粗糙度的减小值低于 15 keV, 因为低能团簇对靶材的溅射率降低, 在相同的离子剂量下, 对损伤层的去除效果较差. 另一方面, 在 0.02—0.05 μm 短波长范

围内, 与 15 keV 处理结果相比, 粗糙度降低了, 因为低能团簇离子形成的弧坑尺寸更小. 因此, 两步能量平坦化方法, 结合高能团簇快速去除划痕(较长波长)和低能量优化表面(产生较小的弧坑(较短波长))的优势, 可以进一步降低最终粗糙度. 实验证实了这种方法的有效性, 如图 4 所示. 两步能量修形法——15-5 keV 平坦化方法, 总剂量与单一能量处理时相同, PSD 函数在 0.05—2.00 μm 波长范围内, 表现出类似单一 15 keV 高能团簇的处理效果; 而在 0.02—0.05 μm 波长范围内, 与单一 5 keV 低能团簇的处理效果一致. 第一步高能团簇快速去除划痕, 第二步低能团簇修复高能团簇形成的弧坑, 降低弧坑尺寸, 使得最终表面更为平坦. 如果团簇能量进一步降低, 有望使 0.02—0.05 μm 波长范围内的 PSD 曲线也降低至原始表面的 PSD 曲线之下, 实现全局平坦化, 达到原子级的均方根粗糙度值.

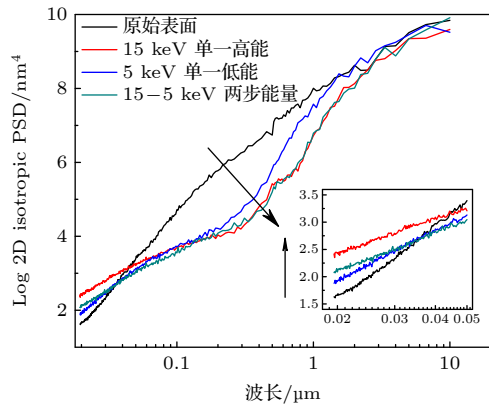


图 4 4H-SiC(1000) 经不同能量的团簇轰击后, AFM 图像对应的 PSD 曲线插图表示短波区域, 箭头表示粗糙度随团簇能量的增加而变化

Fig. 4. PSD functions of 4H-SiC (1000) surface after Ar cluster bombardment at different energies. The inset represents short wavelength region. The arrow represent change of the roughness with increasing cluster energy.

4 结 论

采用 Ar 气体团簇离子束对 4H-SiC(1000) 进行表面平坦化处理, 对比了单一高能团簇、低能团簇, 以及两步能量团簇修形法的辐照效果. 研究对象为两种初始形貌不同的靶材: 具有原子级平坦表面的 4H-SiC 和表面带有机机械损伤(划痕)的 4H-SiC. 第一种靶材处理结果表明, 高能团簇更容易在靶材表面遗留半球形离子损伤, 增加表面粗糙度. 对第二种带有机机械损伤的 SiC 靶材, 两步能量

修形法表现出更为显著的平坦化效应, 相比传统的单一高能团簇轰击, 第一步高能团簇可以保持产生高额溅射率, 而第二步低能团簇可以有效地修复高能团簇遗留下的离子损伤等, 更进一步优化表面形貌, 降低表面粗糙度. 相比传统的单一的低能团簇轰击, 可以同样达到最终的平坦表面, 同时由于两步能量初期的高能团簇溅射率高、束流大, 优先快速除去了大部分低能团簇难以消除的大凸起和深划痕, 极大地缩短了抛光时间. PSD 函数图像表明, 高能团簇处理可以有效地降低 0.05—2.00 μm 波长范围内的粗糙度, 与初始表面的划痕相对应. 而在 0.02—0.05 μm 波长范围内, 由于形成了弧坑, 粗糙度反而增加, 弧坑的大小取决于团簇能量. 因此, 为了有效地降低 0.05—2.00 μm 范围内的粗糙度, 有必要使用高能团簇处理, 而为了在 0.02—0.05 μm 的较短范围内改善粗糙度, 有必要进行低能团簇处理, 而两步能量修形法结合了两者的优势, 短时间内获得了平坦化效果最佳的最终表面.

参考文献

- [1] Yamada I, Matsuo J, Toyoda N, Kirkpatrick A 2001 *Mater. Sci. Eng., R* **34** 231
- [2] Toyoda N, Ogawa A 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 184003
- [3] Korobeishchikov N G, Nikolaev I V, Roenko M A 2019 *Nucl. Instrum. Methods B* **438** 1
- [4] Suzuki K, Kusakari M, Fujii M, Seki T, Aoki T, Matsuo J 2016 *Surf. Interface Anal.* **48** 1119
- [5] Toyoda N, Tilakaratne B, Saleem I, Chu W K 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 020901
- [6] Ieshkin A, Kireev D, Ozerova K, Senatulin B 2020 *Mater. Lett.* **272** 127829
- [7] Prasalovich S, Popok V, Persson P, Campbell E E B 2005 *Eur. J. Phys. D* **36** 79
- [8] Gspann J 1995 *Sens. Actuators A* **51** 37
- [9] Takeuchi D, Seki T, Aoki T, Matsuo J, Yamada I 1998 *Mater. Chem. Phys.* **54** 76
- [10] Matsuo J, Seki T, Yamada I 2003 *Nucl. Instrum. Methods B* **206** 838
- [11] Houzumi S, Takeshima K, Mochiji K, Toyoda N, Yamada I 2008 *Electron. Commun. Jpn.* **91** 312
- [12] Greer J A, Fenner D B, Hautala J, Allen L P, DiFilippo V, Toyoda N, Yamada I, Matsuo J, Minamid E, Katsumata H 2000 *Surf. Coat. Technol.* **133-134** 273
- [13] Isogai H, Toyoda E, Senda T, Izumome K, Kashima K, Toyoda N, Yamada I 2007 *Nucl. Instrum. Methods B* **257** 683
- [14] Seki T, Matsuo J 2007 *Surf. Coat. Technol.* **201** 8646
- [15] Toyoda N, Fujimoto A, Yamada I 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 06GF01
- [16] Matsuo J, Toyoda N, Akizuki M, Yamada I 1997 *Nucl. Instrum. Methods B* **121** 459
- [17] Zeng X M, Pelenovich V, Rakhimov R, Zuo W B, Xing B, Luo J B, Zhang X Y, Fu D J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 093601 (in Chinese) [曾晓梅, Vasilij Pelenovich, Rakhim Rakhimov, 左文彬, 邢斌, 罗进宝, 张翔宇, 付德君 2020 物理学报 **69** 093601]
- [18] Zeng X M, Pelenovich V, Wang Z S, Zuo W B, Belykh S, Tolstogouzov A, Fu D J, Xiao X H 2019 *Beilstein J. Nanotechnol.* **10** 135
- [19] Pelenovich V O, Zeng X M, Ieshkin A E, Chernysh V S, Tolstogouzov A B, Yang B, Fu D J 2019 *J. Surf. Invest.* **13** 344
- [20] Zeng X M, Pelenovich V, Liu C S, Fu D J 2017 *Chin. Phys. C* **41** 087003

Double-step gas cluster ion beam smoothing*

Vasily Pelenovich¹⁾²⁾³⁾ Zeng Xiao-Mei^{1)2)†} Luo Jin-Bao¹⁾
Rakhim Rakhimov¹⁾ Zuo Wen-Bin¹⁾ Zhang Xiang-Yu¹⁾
Tian Can-Xin²⁾ Zou Chang-Wei²⁾ Fu De-Jun¹⁾ Yang Bing³⁾

1) (*School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

2) (*School of Physics and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China*)

3) (*School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

(Received 2 September 2020; revised manuscript received 2 November 2020)

Abstract

In this study we use the double step gas cluster ion beam treatment to improve smoothing process of mechanically polished 4H-SiC (1000) wafers and compare it with conventional single-step smoothing. The first step is a higher energy treatment with 15 keV Ar cluster ions, and the second step is a lower 5 keV treatment. Single-step treatments are performed at 15 and 5 keV. It is shown that single-step 15 keV smoothing as compared with lower 5 keV one is very effective for removing the initial surface morphological feature (scratches), however, cluster ions impacting on the surface can create larger craters, resulting in roughness R_q of 1.05 nm. Whereas, 5 keV treatment at a selected fluence cannot remove initial scratches, which requires using higher fluences, i.e. such smoothing becomes time consuming. On the other hand, crater morphology with such a treatment is less developed, hence, the roughness slightly decreases to 0.9 nm. Using the double-step treatment, one can obtain the surface with lower R_q roughness of 0.78 nm as compared with single-step treatment, at the same total cluster ion fluence. Therefore, the double-step treatment combines the advantages of the effective smoothing of scratches at high energy and smaller crater morphology at low energy. To evaluate the contribution of the cluster morphology introduced by the accelerated clusters into the total roughness, the cluster ion beam treatment of an atomically smooth 4H-SiC (1000) surface is also carried out. It is shown that the crater diameter increases in a range of 15–30 nm with the cluster energy increasing. More detailed analysis of the smoothing process is carried out by using two-dimensional isotropic PSD function. It is shown that the cluster treatment of mechanically polished 4H-SiC wafers effectively reduces the roughness in a wavelength range of 0.05–0.20 μm and the efficiency of smoothing is higher at higher cluster energy. In a range of 0.02–0.05 μm , a roughening effect is observed, which is due to the formation of craters. This roughening effect can be effectively reduced by the subsequent lower energy step treatment, which can be shown by the PSD function analysis of the smooth SiC surface treated initially by cluster ion beam.

Keywords: gas cluster ion beam, surface smoothing, steps energy model, surface roughness

PACS: 36.40.–c, 36.40.Wa, 52.77.Bn, 78.67.Qa

DOI: 10.7498/aps.70.20201454

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11875210, U1832127) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2018A050506082, 2020A1515011531, 2020A1515011451).

† Corresponding author. E-mail: 1714399588@qq.com