

用于聚焦高通量氩离子束的 wehnelt 离子透镜设计

陆大春, 刘红宇, 蒋衡*

深圳扩维原子科技有限公司 广东深圳

【摘要】Wehnelt 离子透镜是横向压缩离子束的主要技术手段, 在获得高分辨、高质量聚焦离子束方面起着关键作用。针对高通量氩离子束的传输与聚焦过程, 离子束流传输速率的提升, 本文设计了一种用于聚焦高通量氩离子束流的 wehnelt 离子透镜, 并采用 SIMION 仿真模拟软件对离子的命中区域进行了研究。研究表明, 通过合理布局透镜结构与电压配置, 能够使得 72% (2 keV) 或 65% (5 keV) 的离子聚焦在 10mm×10 mm 的矩形区域, 并且 99% 以上的离子能够聚焦在 20 mm×20 mm 的矩形区域。

【关键词】Wehnelt 离子透镜; 离子束; SIMION; 聚焦

【收稿日期】2024年5月25日

【出刊日期】2024年6月27日

【DOI】10.12208/j.pstr.20240005

Design of wehnelt ion lens for focusing high throughput argon ion beam

*Dachun Lu, Hongyu Liu, Heng Jiang**

Shenzhen creatom company, Guangdong, Shenzhen

【Abstract】Wehnelt ion lenses are commonly used techniques for transversely compressing ion beams, playing a crucial role in achieving high-resolution and high-quality focused ion beams. For the enhancement of ion beam current transmission rate in the transport and focusing process of high-throughput argon ion beams, this study designs a wehnelt ion lens specifically for focusing high-throughput argon ion beams. The ion impact area was investigated using SIMION simulation software. By optimizing the lens structure layout and voltage configuration, it was found that 72% (2 keV) or 65% (5 keV) of ions can be focused within a 10 mm × 10 mm rectangular area, and over 99% of ions can be focused within a 20 mm × 20 mm rectangular area.

【Keywords】Wehnelt Ion lens; Ion beam; SIMION; Focusing

引言

随着纳米技术的不断发展, 相关从业者与企业对材料的加工精度和设备性能的要求不断提升^[1,2]。传统的物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)等技术已经不能满足人们对复杂薄膜和纳米结构的精确控制需求^[3-6]。离子束技术由于其高度可控的能量和方向性, 成为解决这些问题的有效手段^[7]。特别是氩离子束, 其在表面清洁、刻蚀和沉积过程中, 具有高效、精确的特点, 因而在半导体行业和其他高科技领域中得到广泛应用^[8-10]。

高通量氩离子束不仅可以用于材料的精确刻蚀和清洗, 还能够在纳米加工中实现精细的图案定义和表面调控。其在半导体器件制造中, 如线路定义、

衬底清洁和掺杂等步骤中发挥着关键作用^[11,12]。此外, 在生物医学研究领域, 氩离子束被用于样品的表面调控和微结构制备, 例如细胞培养基表面的功能化处理 and 生物传感器的制备等^[13,14]。

离子束是指以近似一致的速度沿几乎同一方向运动的一群离子, 为了获取高品质的束流, 通常需要用离子透镜对初始束流进行对焦处理^[15]。离子透镜可以分为磁透镜和电透镜两大类, 磁透镜利用磁场对离子束施加力, 通过调节磁场的强度和方向来控制离子束的轨道。磁场会使离子束中的离子受到洛伦兹力的作用, 使其在空间中弯曲或偏折, 从而实现聚焦效果。磁透镜通常需要大型磁体来生成足够强的磁场以对离子束施加足够的力。这使得磁

*通讯作者: 蒋衡

透镜的设备相对较大和复杂, 需要更多的空间和资源来支持其运行和维护。与磁透镜相比, 电透镜具有能耗低, 规模紧凑, 方便集成的特点, 可以在有限的空间内对离子束进行聚焦。

其原理是通过调节电场的强度和形状来控制离子束的传输和聚焦。电场会对离子束的电荷产生作用力, 从而改变离子束的路径和焦距。本文中综合考虑空间分布等因素使用了电透镜, 采用了三个离子透镜对高通量的氩离子束进行逐级聚焦, 并在离子源处增添了 wehnelt 电极以此来提高离子源的效率与稳定性。

1 聚焦高通量氩离子束的 wehnelt 离子透镜简介及原理

本文所设计的离子透镜的设计灵感主要来源于 wehnelt 的想法, 这是在许多 FIB-SEM 系统中使用的一个成熟的技术。该离子透镜可以用于聚焦高通量的氩离子束, 高通量意味着更高的处理速度和更大的处理面积, 这对于工业生产尤其重要。在半导体制造和薄膜沉积等需要大规模处理的行业, 高通量氩离子束可以显著提高生产效率, 降低生产成本。

由离子源发出离子束后先通过 wehnelt 电极控制和优化离子源的离子发射特性, 提高其效率和稳定性, 之后经过多级电透镜进行聚焦, 基本原理为电场对带电离子的偏转作用, 图 1 为 wehnelt 离子透镜整体的原理示意图。

2 SIMION 仿真模拟及硬件实物

2.1 仿真模型的建立

我们通过几何语言编程在 SIMION8.0 平台中建立仿真模型, 如图 2-a 所示, 同时在距离离子源 220 mm 的距离处设置了样品基板, 并用程序监测和记录所击中离子的空间分布。该软件在几何定义、用户编程、数据记录和图像可视化方面可为电透镜的

输入、输出参数提供良好的交互接口。

2.2 参数设置及仿真结果

为使仿真结果最大限度地符合实际情况, 在仿真时, 离子初始状态的参数设置至关重要。我们在 SIMION8.0 平台中, 利用“Particles Define”功能进行初始离子的定义。

设置离子数量为 1000, 由于离子束为氩离子束, 因此将离子的电荷量设为 1, 质量设置为 39.948。离子束经由离子枪射出, 因此初始位置选为离子枪口, 还需要定义初始速度的方向和能量, 方向呈圆锥分布, 半角大小为 25° , 能量按照仿真需要进行设置。在 SIMION8.0 平台的“Fast Adjust Voltages”界面按需设置各级电压参数。

具有最佳离子光学的 2 keV 和 5 keV 离子束的轨迹以及所需电压的 SIMION 仿真结果如图 2-b 所示。

通过模拟得出: 当氩离子初始速度的能量为 2 keV 时, wehnelt 电极的电压为 2 kV、离子透镜 1 的电压为 -5.5 kV、离子透镜 2 的电压为 1.9 kV、离子透镜 3 的电压为 -5.5 kV 时, 可以使得氩离子束聚焦在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形区域内 72%。当氩离子初始速度的能量为 5 keV 时, wehnelt 电极的电压为 5 kV、离子透镜 1 的电压为 -9.3 kV、离子透镜 2 的电压为 4.5 kV、离子透镜 3 的电压为 -9.3 kV 时, 可以使得氩离子束聚焦在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形区域内 63%。

以上两种能量的氩离子束均能够超 99% 的聚焦在 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的矩形区域内。

我们在模拟中记录了 Ar 离子在样品基板表面形成的最终光斑大小, 并使用 Matlab 软件进行了数据分析, 图 2-c 展示了 Ar 离子在样品基板表面的空间分布图。

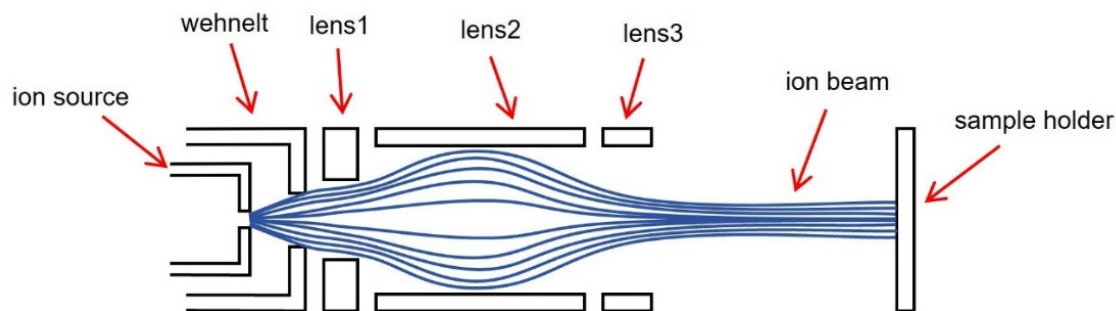


图 1 wehnelt 离子透镜原理示意图

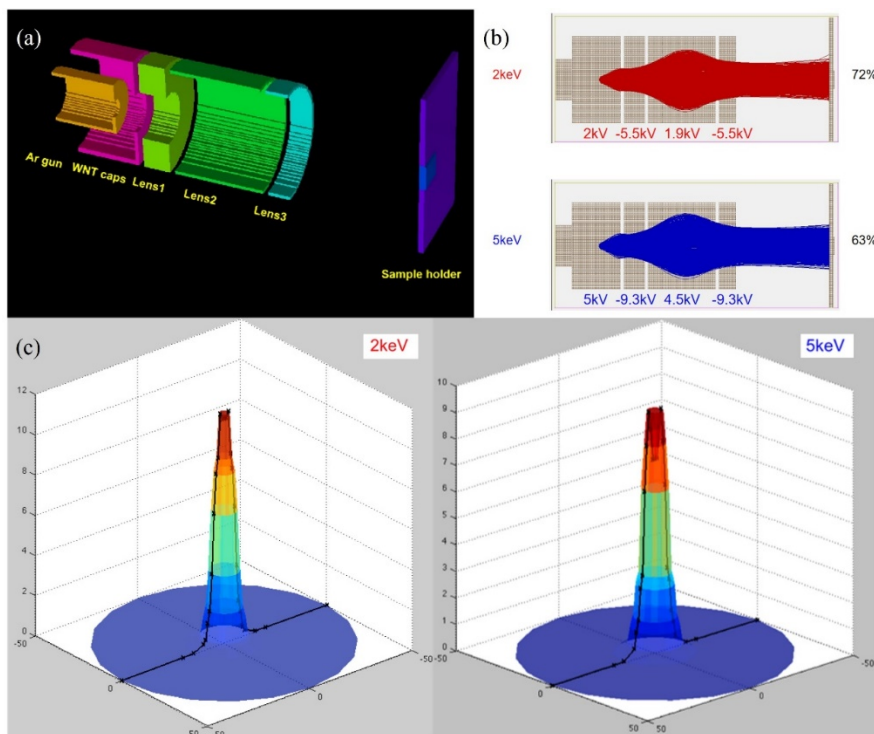


图2 (a) SIMION 仿真中的离子透镜模型结构图; (b) SIMION 仿真结果图; (c) Ar 离子在离子光学透镜聚焦后撞击样品基板的空间分布

2.3 优化设计

为了评估 wehnelt 离子透镜对离子束的聚焦效果, 我们使用从模拟中获得的电压设置对氩离子束的轮廓进行测量, 结果如图 3-a 所示, 在离子光学的帮助下, 大部分的离子集中在基质区域内 (从-12.7 mm 到 12.7 mm)。

等效束密度的空间分布也经过计算, 如图 3-b 所示。为了满足实际的应用需求, 在实验过程中我们需要确保 Ar 离子束在基底上均匀溅射。为此, 我们有意地使离子束轻微发散, 以获得整个基底区域相对均匀的束流电流分布。在模拟过程中, 为了实现这一目标, 我们略微降低了负透镜的电压, 并略微增加了正透镜的电压。图 3-c 展示了这种偏焦设置下 Ar 离子束的轮廓。光束密度分布如图 3-d 所示。

2.4 模型及实物

离子透镜的整体主要包括真空法兰、不锈钢固定杆、陶瓷固定环、wehnelt 电极, 以及三个圆柱形电极 (分别称为离子透镜 1、离子透镜 2 和离子透镜 3), 离子透镜总装如图 4-a 所示。将不锈钢固定杆固定在真空法兰内侧, 以支撑离子透镜, 其中不锈钢固定杆的直径为 6 mm, 对边 M6 螺纹孔中心距离为 80 mm, 整体杆长为 190 mm, 如图 4-b 所示。为

了达到电气绝缘的目的, 将陶瓷固定环通过 M3 螺纹孔与 wehnelt 电极及离子透镜固定。wehnelt 电极与三个离子透镜使用统一外径 (70 mm) 以便于整体组装。

wehnelt 电极的内径为 64 mm, 孔径为 24 mm, 孔径厚度为 3 mm, 离子透镜 1 的内径为 30 mm, 长度为 18 mm, 离子透镜 2 的内径为 64 mm, 长度为 55 mm, 离子透镜 3 的内径为 64 mm, 长度为 15 mm。每个离子光学透镜都通过卡普顿线连接到高压通电孔上, 并使用高压电源对其施加电压, 以此在每个电极上创建电场, 如图 4-c 及 4-d 为离子光学在团簇束流源系统中的组装实物图。

2.5 测试数据

此外, 我们还测试了在未安装 wehnelt 离子透镜的情况下, 离子源产生的不同能量离子束的发散特性。实验结果表明, 在缺乏任何离子光学装置的情况下, 束流呈现整体发散, 结果如图 5-a 所示。通过手动轻微调整每个离子光学透镜的电压, 可以更有效地聚焦 Ar 离子束。优化后的 Ar 离子束轮廓如图 5-c 所示。图 5-b 与 5-d 为上文图 3 中所提及的模拟得到的透镜电压及优化后的透镜电压下得到的氩离子束剖面图, 在此进行测试数据的汇总。

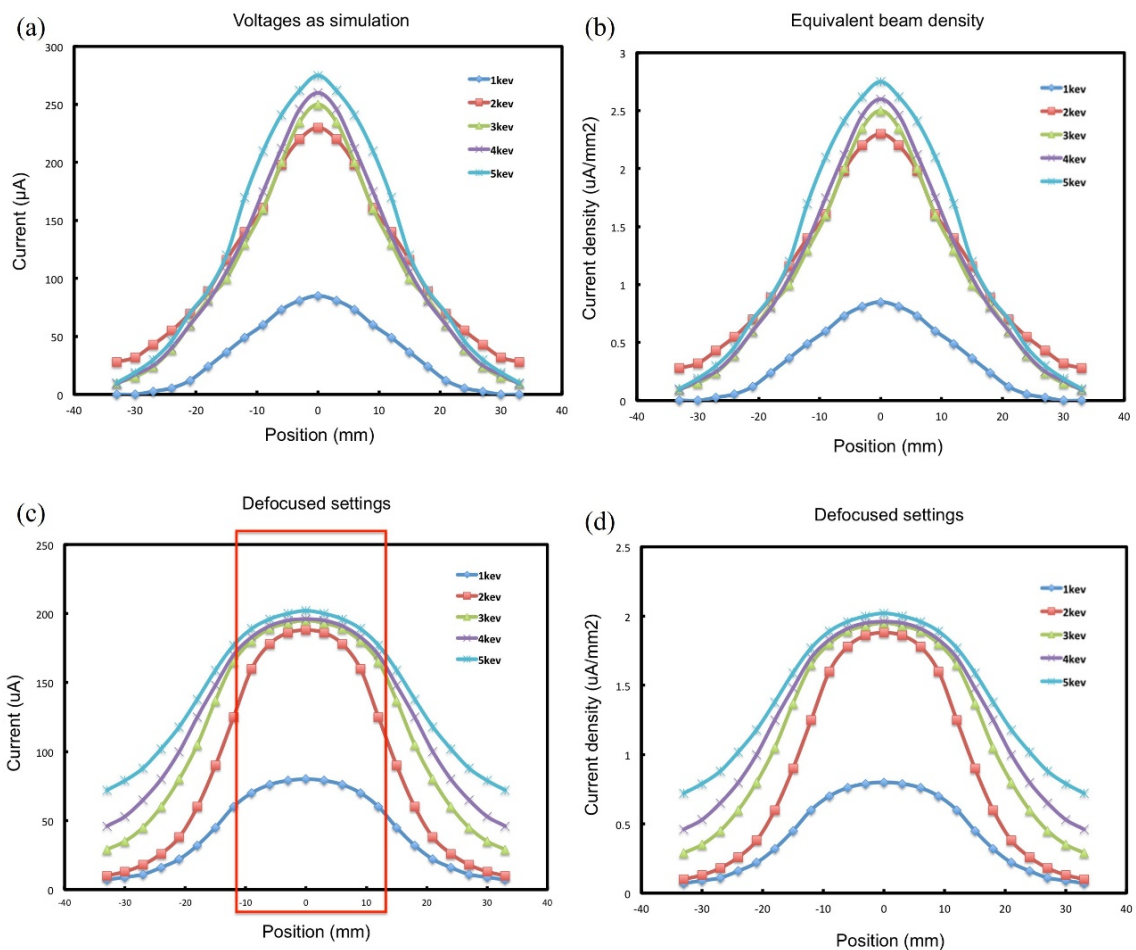


图 3 不同的光束能量下, (a)、(b) 利用模拟得到的各透镜电压设置的氩离子束剖面及光束密度图; (c)、(d) 各个透镜的偏焦电压设置获得的氩离子束剖面及光束密度图

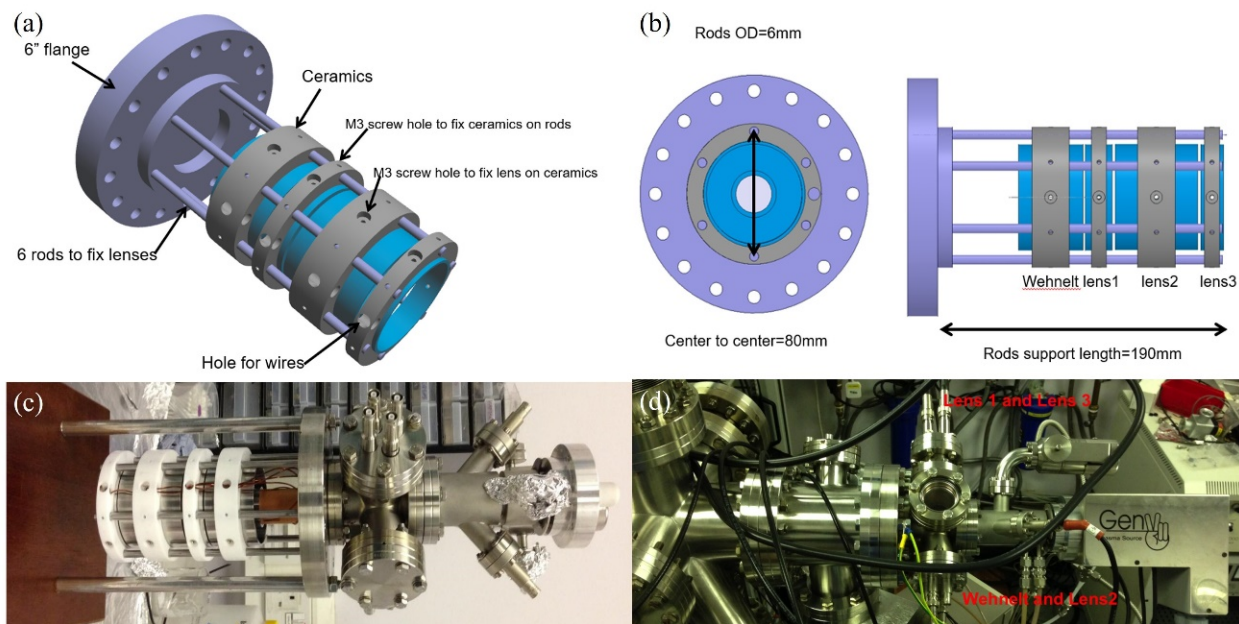


图 4 (a) 离子透镜总装图; (b) 离子透镜总装侧视图及主视图; (c)、(d) 离子透镜在团簇束流源系统中的组装实物图

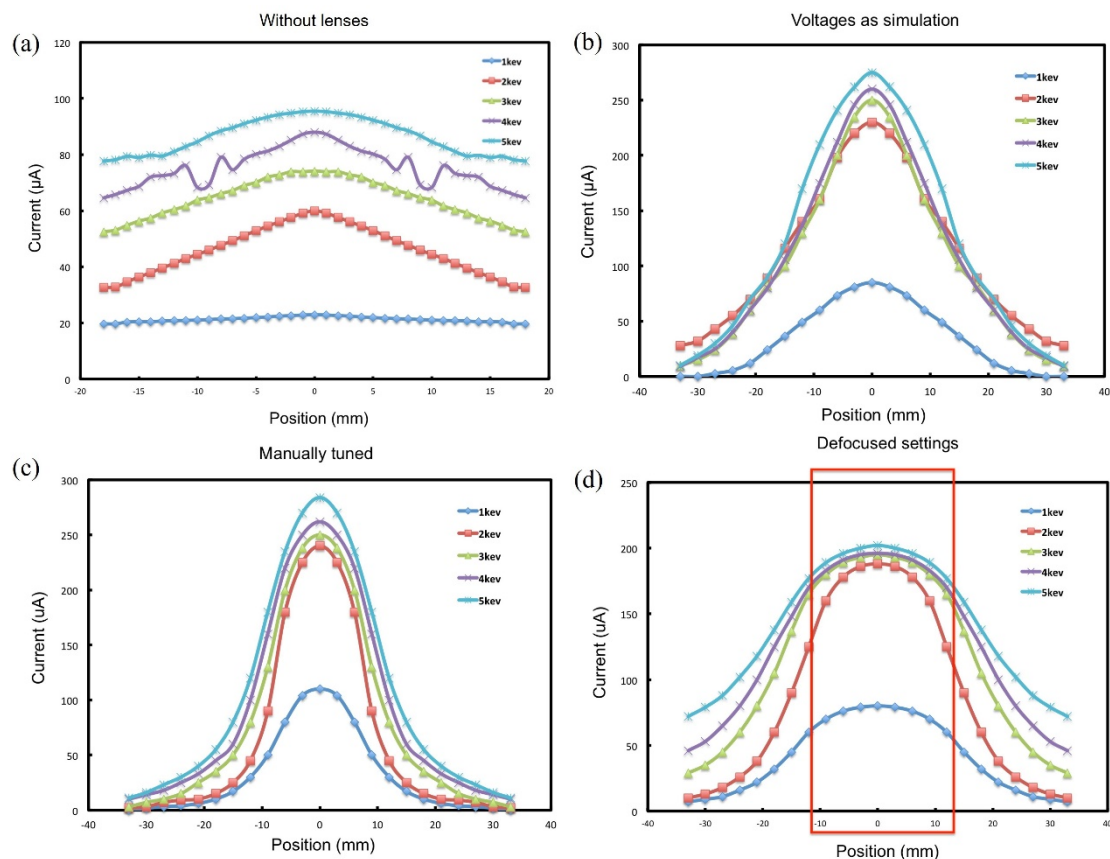


图 5 不同的光束能量下, (a) 未添加离子透镜的氩离子束剖面图; (b) 利用模拟得到的各透镜电压设置的氩离子束剖面图; (c) 各个透镜上使用手动调整电压设置的 Ar 离子束轮廓; (d) 各个透镜的偏焦电压设置获得的氩离子束剖面图

3 结论

本文设计了一个用于聚焦高通量氩离子束的 wehnelt 离子透镜, 整体由 wehnelt 电极与三个离子透镜组成。通过 SIMION 模拟仿真对各组件电压的合理设置可以将 72% (2 keV) 或 65% (5 keV) 的离子聚焦在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形区域, 并且 99% 以上的离子能够聚焦在 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的矩形区域。本文中研究的这种简单圆筒电极结构的离子透镜在高通量离子束流聚焦场景可充分发挥其横向压缩优势, 而且该透镜结构紧凑便于拼接的特点也可进一步拓展其在其他领域的应用。

参考文献

- [1] Awan IZ, Hussain SB, Haq A, et al. Wondrous Nanotechnology[J]. JOURNAL OF THE CHEMICAL SOCIETY OF PAKISTAN, 2016, 38(6): 1026-1055.
- [2] Payal, Pandey P. Role of Nanotechnology in Electronics: A Review of Recent Developments and Patents[J]. Recent Patents on Nanotechnology, 2022, 16(1): 45-66.
- [3] Kaloyeros AE, Arkles B. Review-Silicon Carbide Thin Film Technologies: Recent Advances in Processing, Properties, and Applications: Part II. PVD and Alternative (Non-PVD and Non-CVD) Deposition Techniques[J]. ECS JOURNAL OF SOLID STATE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2024, 13(4): 043001.
- [4] Vorobyova M, Biffoli F, Giurlani W, et al. PVD for Decorative Applications: A Review[J]. MATERIALS, 2023, 16(14): 4919.
- [5] Cho S, Lee JS, Jang H, et al. Comparative Studies on Crystallinity, Thermal and Mechanical Properties of Polyketone Grown on Plasma Treated CVD Graphene[J]. POLYMERS, 2021, 13(6): 919.
- [6] Guo Z, Li C, Zu P, et al. The kinetics of crack propagation in

- CVD graphene film[J]. DIAMOND AND RELATED MATERIALS, 2022, 126: 109056.
- [7] Huang L, Wu H, Cai G, et al. Recent Progress in the Application of Ion Beam Technology in the Modification and Fabrication of Nanostructured Energy Materials[J]. ACS NANO, 2024, 18(4): 2578-2610.
- [8] Ghyngazov S, Ovchinnikov V, Kostenko V, et al. Surface modification of ZrO₂-3Y₂O₃ ceramics with continuous Ar⁺ ion beams[J]. SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY, 2020, 388: 125598.
- [9] Honey S, Asim J, Ahmad I, et al. Modification in properties of Ni-NWs meshes by Ar⁺ ions beam irradiation[J]. MATERIALS RESEARCH EXPRESS, 2020, 7(6): 065008.
- [10] Liao Y, Su B, Fa T, et al. Etching of Low Energy Argon Ion Beam on Beryllium[J]. RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2023, 52(5): 1610-1615.
- [11] Chandrasekaran V, Titze M, Flores ARR, et al. High-Yield Deterministic Focused Ion Beam Implantation of Quantum Defects Enabled by In Situ Photoluminescence Feedback[J]. ADVANCED SCIENCE, 2023, 10(18).
- [12] Gupta D, Umopathy GR, Singhal R, et al. Nano-scale depth-varying recrystallization of oblique Ar⁺ sputtered Si(111) layers[J]. SCIENTIFIC REPORTS, 2020, 10(1).
- [13] Prakash J, Samriti, Wijesundera DN, et al. Ion beam nanoengineering of surfaces for molecular detection using surface enhanced Raman scattering[J]. Molecular Systems Design & Engineering, 2022, 7(5): 411-421.
- [14] Leveneur J, Zhang Y, Fiedler H, et al. Surface modification of collagen using low-energy noble gas ion implantation[J]. SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY, 2023, 468: 129768.
- [15] Yoshida R, Hara M, Oguchi H, 等. Micromachined multiple focused-ion-beam devices[J]. JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY B, 2016, 34(2): 022001.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS