

Ar⁺离子辐照单晶3C-SiC的辐照肿胀效应 及三维微纳图案制备

应哲冕^{1,2} 张泽军³ 姚雨晴^{1,2} 雷前涛¹ 黄庆¹ 孙博¹ 汪颖⁴ 侯晨⁴
周利民⁴ 任峰⁵ 闫隆¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 钍基核裂变能重点实验室 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学技术大学 近代力学系 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室 合肥 230027)

4(中国科学院上海高等研究院 上海光源 上海 201210)

5(武汉大学 物理科学与技术学院 湖北省核固体物理重点实验室 武汉 430072)

摘要 为揭示Ar⁺离子辐照对单晶3C-SiC的肿胀演化规律及其对表面电子与力学性能的影响,并评估其在三维微纳结构制备中的应用可行性,采用140 keV的Ar⁺在室温下注入单晶3C-SiC,剂量为 $5\times 10^{15}\sim 2\times 10^{17}$ ions·cm⁻²,并结合开尔文探针力显微镜、纳米压痕和透射电子显微镜进行表征。结果表明:辐照肿胀高度随辐照剂量增加由27.1 nm增至56.4 nm;表面功函数呈非单调变化,并在高剂量下转为负值;硬度随剂量先升高后降低,在最高剂量下降至原始样品的77%。高剂量下形成约250 nm厚非晶层,并在Ar浓度峰值附近出现大量纳米气泡。结果说明,在高剂量条件下,纳米Ar气泡形成对辐照肿胀增强具有重要贡献;辐照诱导肿胀可用于单晶3C-SiC三维微纳结构的一步制备,并为其表面形貌与电子性质的协同调控提供了实验依据。

关键词 单晶3C-SiC, 辐照肿胀, 功函数, 微纳结构

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.260136

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.260136

Radiation swelling effects and 3D micro/nanopatterned fabrication of Ar-ion irradiated single-crystal 3C-SiC

YING Zhemian^{1,2} ZHANG Zejun³ YAO Yuqing^{1,2} LEI Qiantao¹ HUANG Qing¹ SUN Bo¹
WANG Ying⁴ HOU Chen⁴ ZHOU Limin⁴ REN Feng⁵ YAN Long¹

1(National Key Laboratory of Thorium Energy, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

4(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

5(School of Physics and Technology, Hubei Nuclear Solid Physics Key Laboratory, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

国家自然科学基金(No.12175302, No.12275348, No.12305339)资助

第一作者: 应哲冕, 女, 1997年出生, 2020年毕业于厦门大学, 现为博士研究生, 研究领域为材料辐照损伤, 专业为核技术及应用

通信作者: 闫隆, E-mail: yanlong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2026-04-03, 修回日期: 2026-04-20

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12175302, No.12275348, No.12305339)

First author: YING Zhemian, female, born in 1997, graduated from Xiamen University in 2020, doctoral student, focusing on the irradiation damage of materials caused by ion beams, major in nuclear technology and application

Corresponding author: YAN Long, E-mail: yanlong@sinap.ac.cn

Received date: 2026-04-03, revised date: 2026-04-20

Abstract [Background] Single-crystal 3C-SiC is a promising material for nuclear and micro/nano-device applications because of its excellent irradiation resistance, thermal stability, and mechanical properties. However, the swelling behavior of 3C-SiC under ion irradiation, together with the associated changes in electronic and mechanical properties, has not been systematically clarified, especially in relation to its potential use for surface micro/nano structuring. [Purpose] This study aims to explore the irradiation-induced swelling behavior of single-crystal 3C-SiC under Ar-ion irradiation, establish its relationship with work function and hardness evolution, and assess the feasibility of exploiting this swelling effect for three-dimensional (3D) micro/nanostructure fabrication. [Methods] Firstly, single crystals of 3C-SiC sample at size of 10 mm×10 mm×0.8 mm (including Si substrate) were obtained by laser cutting from a wafer with an epitaxial layer thickness of (300±30) nm. Then, these samples were irradiated by 140 keV Ar-ions at fluences ranging from 5×10^{15} ions·cm⁻² to 2×10^{17} ions·cm⁻² at room temperature, and the distributions of displacement damage (DPA) and Ar concentration were calculated using Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM). Subsequently, irradiation-induced swelling was characterized by the step-height method using atomic force microscopy (AFM) between adjacent irradiated and unirradiated regions, and Kelvin probe force microscopy (KPFM) was employed to measure the surface potential difference and evaluate the work function variation. Finally, nanoindentation testing was carried out to determine the hardness evolution with irradiation fluence, and cross-sectional transmission electron microscopy (TEM) was used to analyze the damaged layer, amorphization, and Ar bubble formation at high fluence. In addition, mask-assisted ion beam irradiation (MAIBI) was applied to fabricate 3D micro/nanopatterned structures on single-crystal 3C-SiC substrates. [Results] Experimental results show that irradiation-induced swelling is increased from ~27 nm to ~56 nm with increasing fluence from 5×10^{15} ions·cm⁻² to 2×10^{17} ions·cm⁻², and the formation of nanoscale Ar bubbles makes an important contribution to the enhanced irradiation-induced swelling at a high fluence. The work function of irradiated 3C-SiC shifts to negative values at high fluences, contrasting with 4H-SiC, where the work function remains positive and tends to stabilize near its pristine value. The nanoindentation hardness of irradiated 3C-SiC is initially increased with fluence, then is decreased to 77% of the pristine sample's hardness. Based on these irradiation-induced effects, 3D micro/nanopatterned structures are fabricated on single-crystal 3C-SiC substrates via MAIBI. [Conclusions] These findings in this study demonstrate that the irradiation swelling effect in single-crystal 3C-SiC can be effectively utilized for the one-step fabrication of 3D micro/nanostructures, providing a viable means of tuning its surface electronic properties.

Key words Single-crystal 3C-SiC, Irradiation swelling, Work function, Micro/nanostructure

碳化硅(SiC)具有优异的化学稳定性和力学性能,高热导率、低中子吸收截面以及良好的抗辐照性能^[1-2],因而在先进核反应堆结构材料^[3-4]及辐照温度监控^[5]、辐射探测器^[6-7]、电子器件^[8]等领域具有重要应用价值。在多种SiC晶型中,立方相3C-SiC因具有较高电子迁移率、较高硬度^[9],并可在Si、SiO₂等多种衬底上实现异质外延生长^[10]而受到广泛关注。此外,3C-SiC在辐照条件下表现出的各向同性肿胀特征^[11],使其在高温、高功率和强辐照环境中的应用优势更加突出。

围绕SiC的辐照效应,国内外已开展了大量研究,内容主要涉及辐照缺陷形成与演化、非晶化、肿胀行为以及力学、热学和电子学性质变化等方面。大量研究从实验和理论两方面揭示了SiC在离子或中子辐照下的点缺陷累积、缺陷团簇形成以及非晶化阈值等基本规律^[1,12-17],并逐步扩展到不同多型、

不同离子种类及不同辐照温度条件下的微结构演化研究^[18-22]。近年来,随着3C-SiC单晶材料的制备水平和表征手段的发展,针对3C-SiC,尤其是单晶外延层体系的辐照研究逐渐增多。已有研究表明,离子辐照可在3C-SiC中引起晶格畸变、应变积累、局域非晶化及气泡形成,退火或后续高能离子辐照还可能导致部分缺陷恢复和应变松弛^[23-25]。同时,层错等结构缺陷在气泡形核长大和辐照缺陷恢复过程中起着重要作用^[12],不同晶体结构条件下缺陷演化途径及其引起的硬度变化也存在明显差异^[26]。总体来看,现有研究已较为充分地揭示了3C-SiC的辐照微结构损伤演化特征,但辐照肿胀行为对于评估其在极端辐照环境下的结构稳定性和长期服役可靠性具有重要意义,针对单晶3C-SiC在辐照下的肿胀行为及其与力学性能关系的系统性研究仍显不足。特别是高剂量下纳米气泡对肿胀的作用、功函数变化

与损伤结构之间的关联,以及辐照诱导肿胀效应在微纳结构制备中的应用潜力,仍有待进一步阐明。尽管已有工作将掩模辅助离子束辐照(Mask-Assisted Ion Beam Irradiation, MAIBI)应用于单晶 4H-SiC 表面的微纳图案制备,并观察到伴随表面功函数变化^[27],但该方法向单晶 3C-SiC 体系的拓展及其辐照结构演化、表面电子性质与力学响应之间关系的系统研究仍有待开展。

在此,采用 140 keV Ar⁺在室温下对单晶 3C-SiC 进行不同剂量辐照,结合开尔文探针力显微镜(Kelvin Probe Force Microscopy, KPFM)、纳米压痕和截面透射电镜(Transmission Electron Microscope, TEM),系统研究 3C-SiC 样品的辐照诱导肿胀行为以及表面电势、功函数和纳米硬度的演化规律,并分析高剂量下 Ar 纳米气泡对肿胀的贡献。同时,本文对比讨论了 3C-SiC 与 4H-SiC 在辐照诱导肿胀行为及功函数演化方面的异同。在此基础上,进一步将可控辐照实验与 MAIBI 方法相结合,在 3C-SiC 衬底表面成功实现了三维微纳图案结构的一步制备。上述结果不仅有助于阐明 Ar⁺离子辐照 3C-SiC 的肿胀效应,也可作为 SiC 表面微纳加工与功能调控提供实验依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验所用 3C-SiC/Si 晶圆购自北京英创力科技有限公司,其结构为生长于(100)取向硅(Si)衬底上的无掺杂(200)取向 3C-SiC 单晶外延层,外延层厚度为(300±30) nm。辐照实验样品由该晶圆经激光切割获得,尺寸为 10 mm×10 mm×0.8 mm(包含 Si 衬底)。辐照前将 SiC 样品分别用丙酮、无水乙醇和去离子水浸泡,并超声清洗 5 min 后用氮气吹干,以去除表面污染物。实验中采用厚度为 10 μm、方孔边长为(18.7±0.5) μm 的铜网(购买于中镜科仪技术有限公司)作为离子束辐照掩模,并使用导电碳双面胶将铜网固定于 3C-SiC 样品表面。

1.2 离子辐照实验

离子辐照实验在武汉大学加速器实验室的 200 kV 离子注入机上进行。实验于室温条件下采用 140 keV Ar⁺离子对样品进行辐照,辐照剂量分别为 5×10^{15} ions · cm⁻²、 2×10^{16} ions · cm⁻²、 5×10^{16} ions · cm⁻²、 1×10^{17} ions · cm⁻² 和 2×10^{17} ions · cm⁻²。为保证辐照均匀性,离子束在样品表面进行扫描辐照。为研究辐照诱导肿胀行为,采用台阶高度法^[28],即在样品表面局部区域加以遮挡,从而形成相邻的

辐照区与未辐照区,并通过二者交界处形成的台阶进行分析。

采用蒙特卡罗程序 SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)^[29],在“包含完整损伤级联的详细计算”模式下对离子辐照位移损伤量(Displacement Per Atom, DPA)和 Ar 浓度分布进行模拟,结果如图 1 所示。模拟中, C、Si 和 Cu 的离位阈能分别取 21 eV、35 eV 和 29 eV; 3C-SiC 和 Cu 的密度分别取 3.21 g · cm⁻³ 和 8.96 g · cm⁻³。140 keV Ar⁺离子在 Cu 掩模中的注入深度约为 150 nm,如图 1(a)所示,说明所用铜掩模厚度足以阻挡离子束穿透。由图 1(b、c)可知,在最低剂量 5×10^{15} ions · cm⁻² 和最高剂量 2×10^{17} ions · cm⁻² 条件下,位移损伤峰值均位于距表面约 70 nm,对应峰值损伤分别为 5.4 dpa 和 217.5 dpa。Ar 浓度峰值位置则位于位移损伤峰值更深处。

1.3 表征方法

样品表面形貌及表面电势采用美国布鲁克公司的型号为 Multimode-8 的原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)的 KPFM 模式进行原位表征,所用导电探针为俄罗斯 MikroMasch 公司生产的 NSC18/Pt 探针;同时结合德国 Zeiss 公司的型号为 Axio Imager M2m 的光学显微镜(Optical Microscope, OM)观察样品及掩模表面形貌。微观结构分析采用日本 JEOL 公司的型号为 JEM-F200 的 TEM(加速电压为 200 kV)完成。截面 TEM 样品通过聚焦离子束技术在辐照区域制备。纳米压痕测试采用美国 KLA 公司的型号为 NanoFlip 的纳米压痕仪,配置金刚石 Berkovich 压头,并在连续刚度测试(Continuous Stiffness Measurement, CSM)模式下进行。为保证统计可靠性和测试精度,每个样品至少进行 10 个独立压痕测试。

2 结果与讨论

2.1 单晶 3C-SiC 的辐照诱导肿胀与功函数差

图 2 给出了单晶 3C-SiC 经 140 keV Ar⁺离子、剂量为 5×10^{16} ions · cm⁻² 辐照后,辐照区与未辐照区交界处形成台阶的形貌图和表面电势图像。为便于 KPFM 测试直接测量辐照诱导肿胀,在离子辐照过程中采用局部遮挡方式保留未辐照区域,从而在样品表面形成相邻的辐照区与未辐照区。图 2(a)为该台阶区域的形貌图,图 2(b)为对应位置提取的台阶高度剖面。由图可见,辐照区域相对于未辐照区域发生了明显抬升。对多个区域进行统计分析后得到,该剂量下台阶高度的平均值为(31.3±1.85) nm。

除表面肿胀外,离子辐照还引起了 3C-SiC 功函

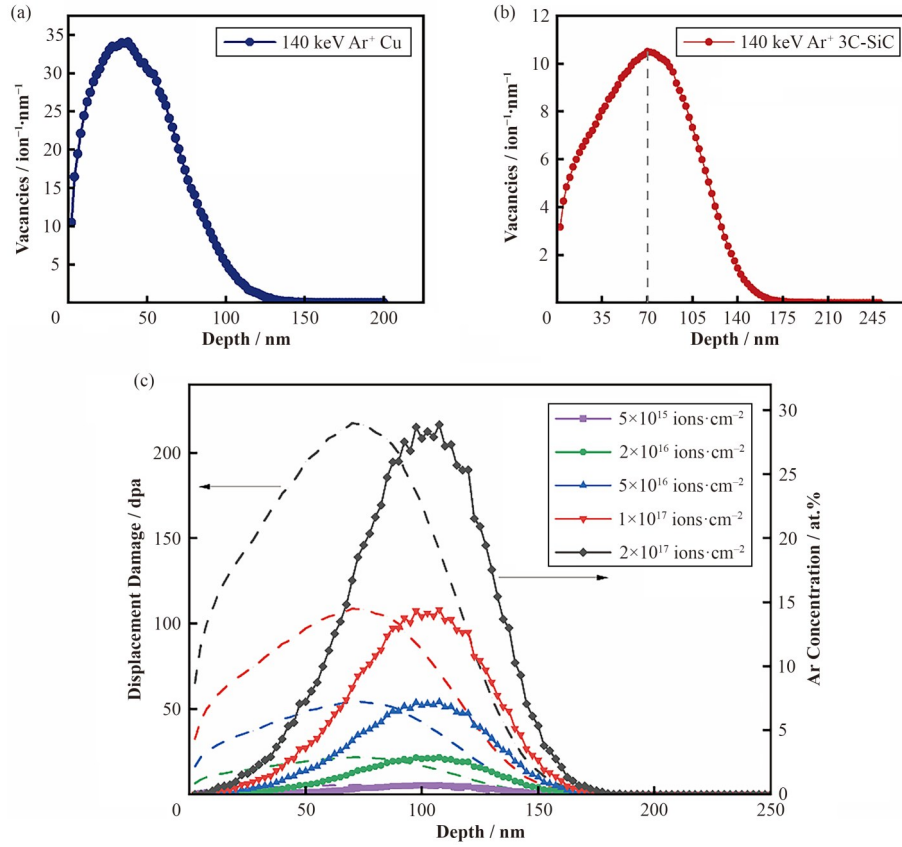


图1 140 keV Ar⁺离子辐照下的损伤分布(彩图见网络版) (a) Cu掩模中的空位分布,(b) 3C-SiC中的空位分布,(c) 不同剂量下3C-SiC中损伤及Ar浓度的深度分布

Fig.1 Damage distributions under 140 keV Ar⁺ ion irradiation (color online)

(a) Vacancy distribution in the Cu mask, (b) Vacancy distribution in 3C-SiC, (c) Depth distributions of damage and Ar concentration in 3C-SiC at different irradiation fluences

数的变化。KPFM测试通过测量样品与已知功函数参考探针之间的接触电势差(V_{CPD}),反映表面电势分布及功函数差异^[30]。根据探针功函数(Φ_{ip})与样品功函数(Φ_s)的关系,可得样品功函数满足 $\Phi_s = \Phi_{ip} - eV_{CPD}$ 。对于同一样品中的辐照区与未辐照区,其局域功函数变化($\Delta\Phi_s$)可由两区域之间测得的表面电势差(ΔV_{CPD})定量表征^[31]:

$$\Delta\Phi_s^{irra - unirra} = -e\Delta V_{CPD}^{irra - unirra} \quad (1)$$

式中: e 为元电荷。

图2(c)为图2(a)相同区域对应的原位表面电势图像,显示了单晶3C-SiC表面的电势分布特征。图中亮区对应未辐照区域,暗区对应辐照区域,表明两者之间存在明显的表面电势差异。图2(d)给出了辐照区与未辐照区表面电势的统计分布,二者平均电势差($\Delta V_{CPD}^{irra - unirra}$)为-114.3 mV,即辐照区表面电势低于未辐照区114.3 mV,说明经 $5 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量的Ar⁺离子辐照后3C-SiC样品功函数增大了114.3 meV。对该样品的多个区域重复测量后得到,辐照诱导表面电势差的平均值为(-108.0±6.7) mV。半导体材料中辐照引起的表面电势差通

常与辐照区和未辐照区界面处的能带弯曲有关,该过程用于补偿两区域费米能级差异^[32-33]。

2.2 Ar⁺离子辐照单晶3C-SiC的肿胀与功函数演化行为

在不同辐照剂量下,单晶3C-SiC表现出不同的表面肿胀高度和表面电势变化规律。图3给出了140 keV Ar⁺离子辐照条件下样品肿胀高度与表面电势差随剂量的变化关系。随着辐照剂量由 $5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 提高至 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$,单晶3C-SiC的表面肿胀高度由(27.1±1.2) nm增加到(56.4±2.9) nm,呈现明显的随剂量增加而单调升高的趋势。与此同时,辐照区与未辐照区之间的表面电势差呈现非单调变化:当剂量增加至 $2 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,表面电势差迅速降低至约-181.8 mV;当剂量进一步增加至 $5 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,回升至约-108.0 mV;而当剂量达到 $1 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,表面电势差分别转变为约101.2 mV和139.8 mV。也就是说,在低剂量区间($\leq 2 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$),辐照区相对于未辐照区表现为负电势差,表明3C-SiC功函数在低剂量辐照后升高;

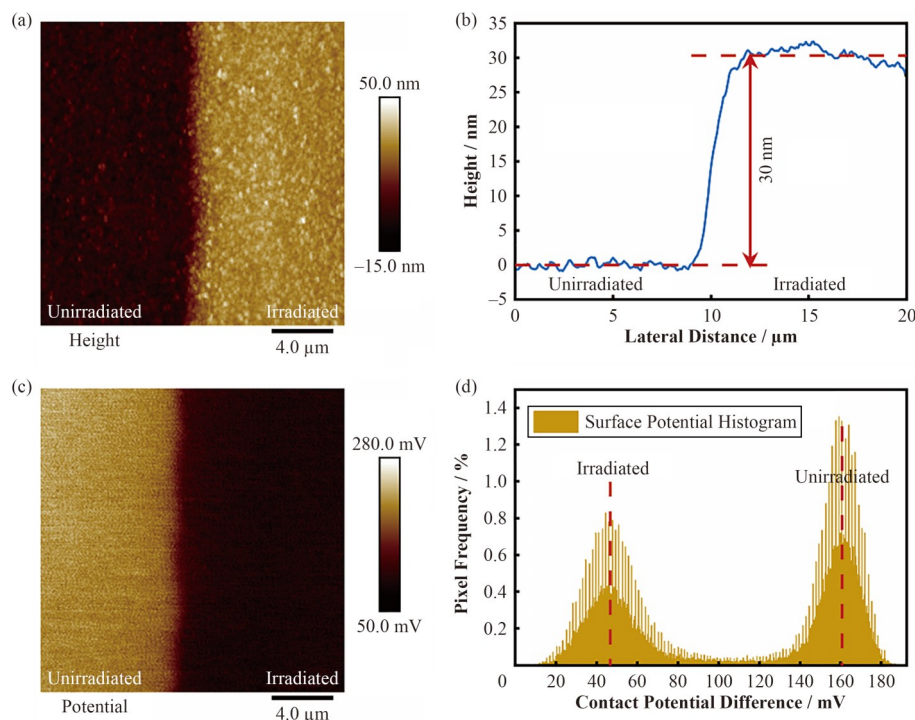


图2 140 keV Ar^+ 离子辐照单晶 3C-SiC 样品, 在 $5 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量下, 辐照区与未辐照区交界处形成台阶的表面形貌图(a)和原位表面电势图(c), (b)为对应于(a)的高度剖面图, (d)为对应于(c)的表面电势分布图(彩图见网络版)

Fig.2 Topographical (a) and surface potential image (c) of the irradiation-induced step at the interface between the irradiated and unirradiated areas after irradiation with 140 keV Ar^+ ions at a fluence of $5 \times 10^{16} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$. (b) Height profile showing the step in Fig.(a), (d) Surface potential distribution corresponding to the potential image in Fig.(c) (color online)

而当剂量超过 $1 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 后, 表面电势差转为正值, 说明中高剂量辐照后辐照区功函数反而低于未辐照区域。

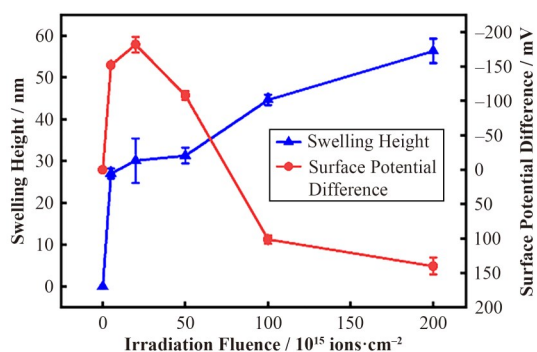


图3 3C-SiC 经 140 keV Ar^+ 离子辐照后, 肿胀高度(三角形符号)和对应表面电势差(圆形符号)随辐照剂量的变化

Fig.3 Variations of swelling height (triangles) and the corresponding surface potential difference (circles) with irradiation fluence for 3C-SiC irradiated with 140 keV Ar^+ ions

SiC 的辐照肿胀与辐照过程中点缺陷累积、非晶化以及空洞或气泡形成等微观结构演化密切相关。在低剂量辐照阶段, 点缺陷不断生成并聚集形成缺陷团簇, 进而导致复杂缺陷结构的形成并伴随晶格膨胀^[34-36]; 而在高剂量下, 晶态向非晶态转变, 以及辐照诱导空洞或气泡的持续生成与长大, 则逐

渐成为体积肿胀的主导因素^[35,37-38]。由于 SiC 的肿胀通常近似各向同性^[11], 其体积肿胀可由线性肿胀推算得到, 其中线性肿胀可定义为肿胀高度与损伤层厚度之比^[39], 损伤层厚度则根据 SRIM 模拟结果获得。图 4(a)汇总了不同离子辐照条件下 4H-SiC 与 3C-SiC 的肿胀结果^[27]。可以看出, 辐照诱导肿胀总体上随辐照剂量增加而增大, 表明累积辐照损伤与体积膨胀之间存在显著正相关关系。需要指出的是, 前人报道和本工作中获得的肿胀数据离散性较大。例如, 在 20 keV Ar^+ 离子辐照 4H-SiC 的研究中, 当辐照损伤超过 100 dpa 时, 推算得到的肿胀可达到 90%^[27], 该数值可能由于损伤层厚度较小而被放大。另一方面, 惰性气体离子能够与辐照产生的空位及空位团簇相互作用, 形成惰性气体气泡, 并进一步加剧 SiC 的体积膨胀^[37]。

与 4H-SiC 相比, 3C-SiC 的辐照功函数演化表现出一定相似性, 但在高剂量区间又存在明显差异, 如图 4(b)所示。前期研究表明, 辐照后 4H-SiC 的功函数在低剂量时先增大, 随后逐渐回到接近原始样品的水平^[27]。单晶 3C-SiC 在低剂量区间也表现出类似趋势, 即功函数先升高, 最大增幅约为 182 meV, 随后开始下降。然而, 两种 SiC 多型在高剂量下的响应明显不同: 4H-SiC 的功函数趋于稳定在接近未

辐照样品的水平,而3C-SiC的功函数则继续下降,在 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时其变化量达到 $\Delta\Phi \sim -140 \text{ meV}$ 。功函数的这种变化与高剂量辐照下的缺陷累积、非

晶化以及Ar气泡形成等结构演化密切相关,表明微观结构变化会对表面电子结构产生显著影响。

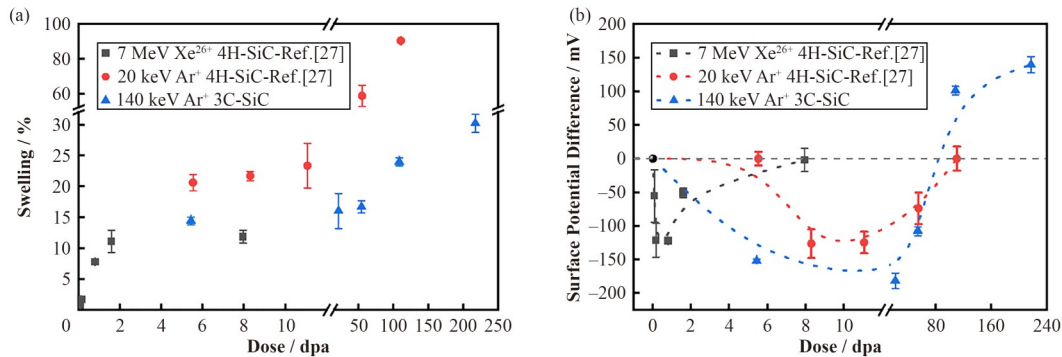


图4 4H-SiC和3C-SiC在离子辐照下的肿胀(a)和表面电势差(b)随辐照剂量的变化

Fig.4 Variations of swelling (a) and surface potential difference (b) for 4H-SiC and 3C-SiC with ion-beam irradiation dose

为进一步揭示辐照区域的微观结构特征,对高剂量辐照样进行了截面TEM表征。图5(a)为单晶3C-SiC经140 keV Ar⁺离子、剂量为 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 辐照后的TEM图像。观察到非晶层厚度约为250 nm,并且在与Ar浓度峰值相对应的深度范围内形成了明显的Ar气泡,如图5(a)及图1(c)中SRIM模拟结果所示。由于离子辐照引起的损伤沿深度方向分布不均,近表面受损层内晶体结构发生了显著无序化,而更深处未达到损伤层范围的区域仍保持晶态结构。对受损层进行选区电子衍射(Selected Area Electron Diffraction, SAED)分析(图5(a)插图)可见,其图样呈现弥散晕环,表明该区域已发生完全非晶化。相比之下,受损层边缘区域的SAED图样中弥散晕环和单晶衍射斑点共存,这是由于该选区同时覆盖了非晶受损层与下方未被离子束辐照损伤的晶体区域。其中,3C-SiC单晶(111)晶面的衍射斑点位置与弥散晕环基本重合,对应特征间距约为0.252 nm,表明受损非晶区域的局部原子排布仍保留与原始3C-SiC晶体(111)晶面结构相近的短程有序特征。

图5(b)为受损层局部放大图,可以看到大量尺寸较大且彼此重叠的气泡。根据图5(b)统计得到的气泡尺寸分布如图5(c)所示。由于尺寸小于4 nm的微小重叠气泡难以准确分辨,未纳入统计。可分辨气泡的最大直径为36.7 nm,平均直径为17.1 nm。SiC的辐照微观结构演化决定了其表面肿胀行为。已有研究表明,由中子或Ni离子辐照引起的非晶3C-SiC体积肿胀率为9.6%~12.6%^[40-42]。考虑到非晶化本身对体积肿胀的贡献低于Ar气泡形成所引起的膨胀效应,可以推断,在 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 高剂量条件下,Ar气泡的形成对辐照肿胀增强具有

重要贡献。

2.3 辐照单晶3C-SiC的力学性能

离子辐照不仅会引起单晶3C-SiC的肿胀和功函数变化,还会显著影响其力学性能,而这对于材料在辐照环境中的结构完整性至关重要。为评价Ar⁺离子辐照对力学性能的影响,对不同剂量辐照样进行了纳米压痕测试。根据SRIM模拟结果,位移损伤峰值位于距表面约70 nm处,如图1(b)所示。在本工作中,3C-SiC外延层厚度仅约300 nm,辐照损伤层厚度约250 nm,因此在接触深度为67.2 nm的条件下获得的硬度值属于以辐照层响应为主的表观纳米硬度,但仍会受到下方基体影响^[43-46]。由于所有样品具有相同的外延层/衬底结构,并采用相同的测试条件,该结果虽同时受到压痕尺寸效应、损伤梯度效应及基体效应的共同影响,但仍可用于比较不同辐照剂量下力学响应的相对变化趋势^[43-44, 46]。另一方面,67.2 nm的接触深度接近位移损伤峰值所在深度,有利于增强辐照层对压痕响应的贡献,从而更有效地反映辐照损伤对材料表观力学行为的影响。

图6(a)给出了未辐照样、最低剂量样品($5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$)和最高剂量样品($2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$)的硬度-压入深度曲线。可以看出,在一定压入深度范围内, $5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 样品的硬度整体高于未辐照样,而 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 样品的硬度则低于未辐照样,得到低剂量辐照引起硬化,而高剂量辐照导致软化的初步趋势。图6(b)为未辐照样及不同剂量辐照样在67.2 nm接触深度下的表观纳米硬度平均值及其标准差随剂量的变化关系。结果表明,随着Ar⁺离子剂量增加,单晶3C-SiC的纳米硬度呈

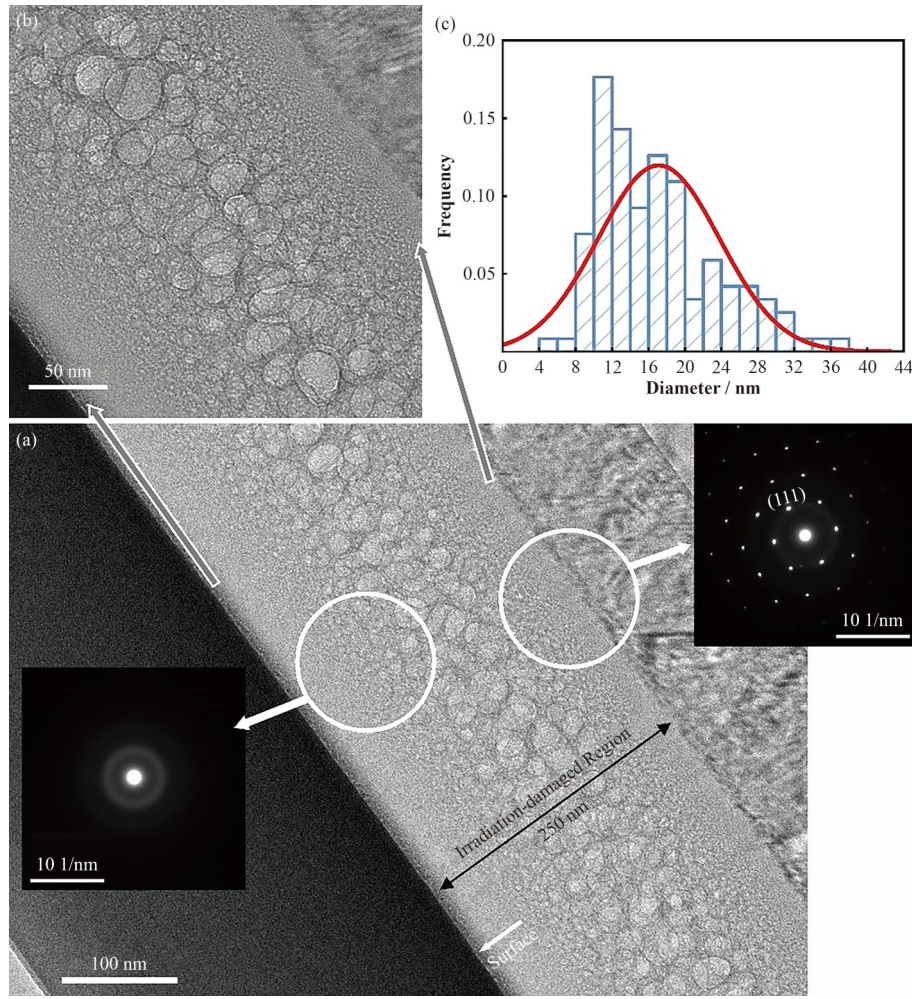


图5 单晶3C-SiC经剂量为 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的140 keV Ar^+ 离子辐照后的截面TEM图像
(a) 截面TEM图, 插图为白色圆圈标示区对应的SAED图样, (b) 受损层中气泡的局部放大图, (c) Ar 气泡直径统计分布图
Fig.5 (a) Cross-sectional TEM micrograph of single-crystal 3C-SiC after 140 keV Ar^+ ion irradiation with a fluence of $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$, the inserts show the SAED patterns of the region marked by the white circles, (b) Enlarged view showing the detail of bubbles in the damaged layer, (c) Corresponding diameter histogram of Ar bubbles

现先升高后降低的非单调演化行为。在低剂量区间 ($\leq 5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$), 样品发生辐照硬化, 硬度最高达到 $(17.6 \pm 0.3) \text{ GPa}$, 较原始样品 $(14.2 \pm 0.9) \text{ GPa}$ 提

高约24%; 随着剂量继续增加, 材料逐渐发生软化, 在 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时硬度降至 $(10.9 \pm 0.3) \text{ GPa}$, 仅为原始样品硬度的约77%。

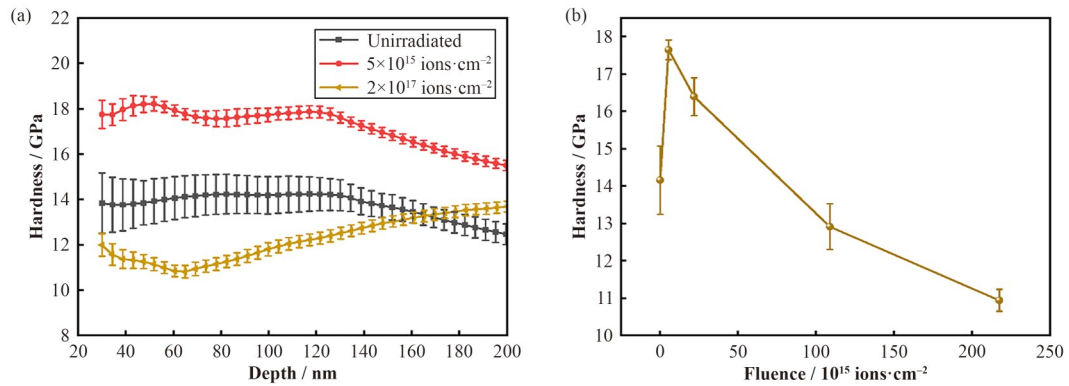


图6 单晶3C-SiC样品在未辐照、 $5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 辐照条件下的硬度-压入深度曲线(a)和纳米压痕硬度随 Ar^+ 离子辐照剂量的变化关系(b)(彩图见网络版)

Fig.6 (a) Hardness-indentation depth curves of the pristine sample and the samples irradiated at $5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$, and (b) evolution of the nanoindentation hardness with the Ar^+ ion fluence in single-crystal 3C-SiC samples (color online)

硬度与晶体材料中位错运动密切相关,因为其本质上反映了材料发生屈服变形时抵抗局部塑性流动的能力^[47]。单晶 3C-SiC 属于共价晶体,其硬度主要取决于 Si-C 共价键的密度、长度及其键合强度^[48-49]。在辐照过程中,缺陷累积与共价键破坏同时发生:若缺陷累积效应占主导,则材料硬度随损伤增加而升高;若共价键破坏占主导,则硬度降低^[15]。在较低辐照剂量下,缺陷团簇、位错环及 Ar 气泡等辐照诱导结构可阻碍压入过程中位错的成核与运动^[26,50],从而提高位错形核与扩展所需的临界应力,表现为辐照硬化。然而,当辐照剂量超过 $5 \times 10^{15} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 后, Si-C 键破坏加剧,同时伴随显著的非晶化和 Ar 气泡长大,使受损区域孔隙度升高。这些结构变化削弱了材料的承载能力,并抑制有效位错活动,最终导致材料软化^[50-51]。结合前述 TEM 结果可知,高剂量下显著增强的非晶化和气泡(或孔隙)演化与硬度下降趋势相一致,说明单晶 3C-SiC 在 Ar^+ 离子辐照过程中表现出“先硬化、后软化”的表观力学性能演化特征,即低剂量阶段以缺陷强化为主,而高剂量阶段则由孔隙化和非晶化主导。

2.4 Ar^+ 离子辐照单晶 3C-SiC 中的三维微纳图案结构

前文分析表明, Ar^+ 离子辐照可在单晶 3C-SiC 表面引起可调控的肿胀,并伴随功函数变化。这说明该辐照诱导肿胀效应不仅反映了材料在辐照作用下的结构与性能响应,而且具备作为表面微纳结构制备方法的潜力。基于此,本节进一步采用 MAIBI 方法在单晶 3C-SiC 表面验证这种辐照肿胀效应在三维微纳图案制备中的可行性。图 7(a,b) 分别示意了该方法的基本过程:首先将具有特定图形的掩模通过导电胶带固定在平整光滑的衬底表面,然后将样品置于真空腔中进行离子辐照。掩模开孔区域接受离子束辐照,而被掩模覆盖区域保持未辐照状态。辐照结束后移除掩模,即可在样品表面获得对应的三维微纳图案结构。

本工作采用商用方孔铜网作为掩模,如图 7(c) 所示,以部分遮挡单晶 3C-SiC 表面,使暴露区域接受 Ar^+ 离子辐照。图 7(d,e) 分别给出了经 140 keV Ar^+ 离子、剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 辐照后样品表面微结构的 OM 图像和三维形貌图。表征结果表明,单晶 3C-SiC 表面成功形成了大面积周期性方形台阶阵列。所得方形台阶边长为 $(18.4 \pm 0.5) \mu\text{m}$,与铜网掩模方孔边长 $(18.7 \pm 0.5) \mu\text{m}$ 基本一致;同时,样品表面图案化区域的整体尺寸也与掩模尺寸相匹配,说明图形实现了有效转移。辐照台阶表面的平均粗糙度为 1.65 nm,与未辐照区域的 2.09 nm 接近,表明

辐照诱导的面外膨胀较为均匀。

上述结果说明,前文揭示的辐照诱导肿胀行为能够直接表现为可控的表面形貌变化,从而在单晶 3C-SiC 上实现大面积、均匀且精确的微纳图案复制。与此同时,图 7(f) 所示的原位表面电势图像进一步表明,在所制备图案结构中仍保留了与前文一致的辐照诱导功函数变化趋势。这说明 MAIBI 不仅是对单晶 3C-SiC 辐照肿胀效应的直观验证,也表明该效应可进一步用于同步调控表面形貌与电子性质,反映出辐照损伤、肿胀行为、性能变化与微纳结构制备之间的关联。

从应用角度看,表面电势和功函数的可调变化使 MAIBI 方法在 3C-SiC 光电子器件中具有潜在应用价值。已有研究表明, SiC 器件中的界面功函数和能带匹配会影响肖特基势垒及光生载流子的分离与传输过程,从而影响器件的光响应性能^[52-53]。结合 3C-SiC 已在异质结光电传感与光电转换器件中的应用基础^[54-55],本工作实现的辐照诱导功函数调控及微纳图案同步制备,有望为 3C-SiC 基紫外探测和光电传感器件的界面能带设计提供新思路。

3 结语

本文采用 140 keV Ar^+ 离子在室温下对单晶 3C-SiC 进行了不同剂量辐照,系统研究了其表面肿胀演化、截面微观结构及功函数变化行为,辐照剂量范围为 $5 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。结果表明,随着辐照剂量增加,样品表面肿胀高度由约 27 nm 增加至约 56 nm。TEM 分析表明,在高剂量条件下,纳米尺度 Ar 气泡的形成对观测到的肿胀具有重要贡献。与 4H-SiC 中观察到的功函数变化规律不同, 3C-SiC 中辐照区与未辐照区之间的功函数差异在低剂量下先迅速增大至约 182 meV,而后随剂量进一步升高逐渐降低,并在高剂量下达到约 -140 meV。纳米压痕结果显示,辐照后单晶 3C-SiC 的表观硬度随剂量先升高后降低,在最高剂量下降至原始样品硬度的 77%。在此基础上,进一步利用掩模辅助离子束辐照技术,借助 3C-SiC 的辐照诱导肿胀效应实现了三维微纳图案结构的一步制备。 Ar^+ 离子辐照下单晶 3C-SiC 所表现出的结构与性能响应,以及三维微纳图案结构的成功制备,不仅加深了对 3C-SiC 辐照肿胀效应的认识,也进一步表明 MAIBI 在 3C-SiC 微纳加工中的应用潜力,可为 SiC 微机电系统器件、辐照纳米改性和纳米压印等方向提供新的思路。

致谢 感谢上海同步辐射光源 (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF) 的用户实验辅助系统对 AFM 和 TEM 表征的帮助。

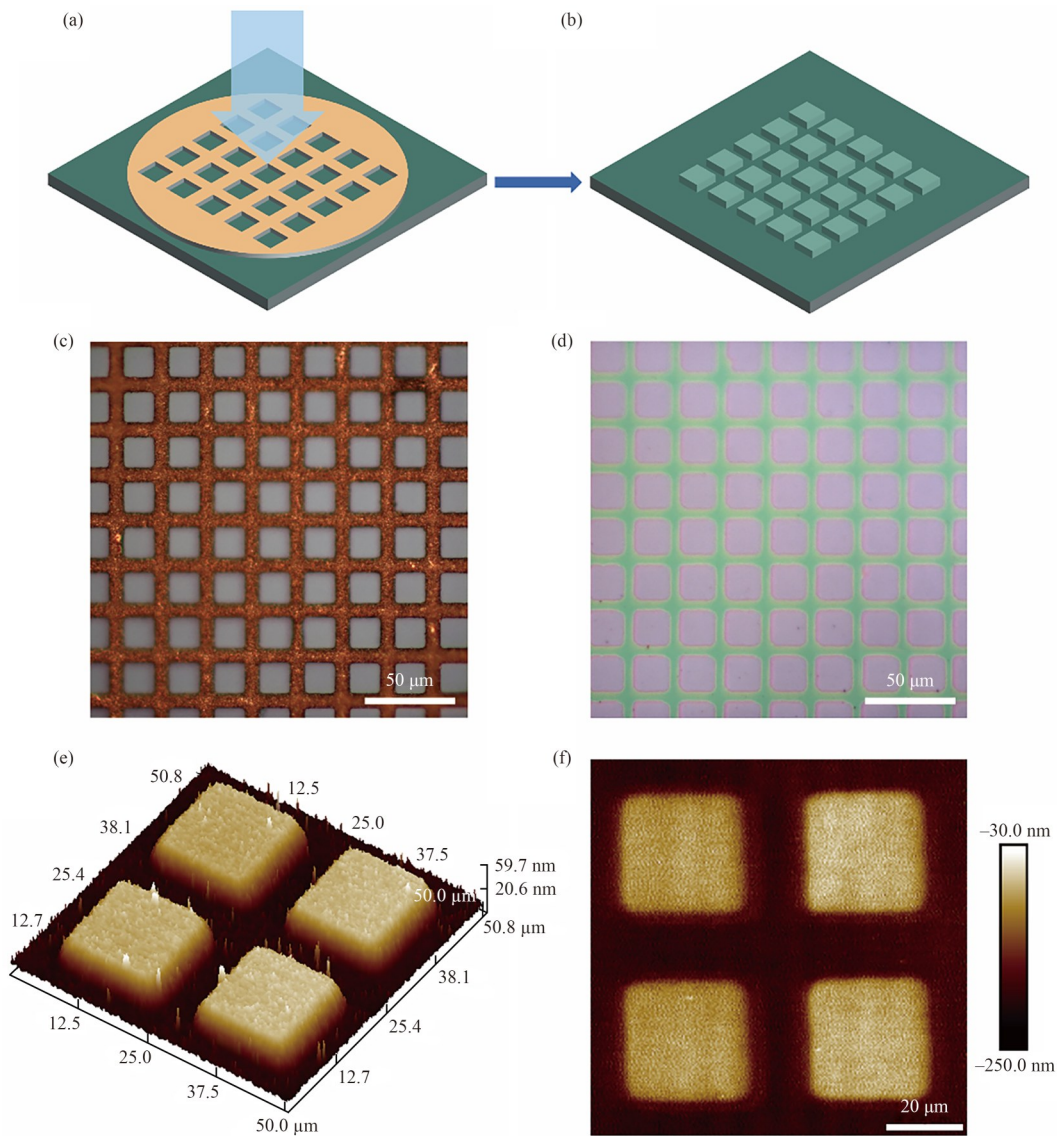


图7 MAIBI制备3D微纳图案结构的示意图及表征结果(彩图见网络版)

(a, b) MAIBI制备过程示意图,其中(a)为离子辐照过程中覆盖掩模的衬底,(b)为去除掩模后衬底表面形成的3D微纳结构;
(c) 带方孔铜网的OM图像;(d) 以铜网为掩模制备所得微结构的OM图像;(e) 辐照后3C-SiC衬底表面微纳结构的3D形貌图;
(f) 对应的表面电势图像。(d~f) 对应于单晶3C-SiC样品经140 keV Ar^+ 离子、剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 辐照后的结果

Fig.7 Schematic illustration and characterization of 3D micro/nanopatterned structures fabricated by MAIBI (color online)
(a, b) Schematic diagrams of the MAIBI process, showing (a) the substrate covered by a mask during ion irradiation and (b) the resulting 3D micro/nanostructures after mask removal; (c) OM image of a copper grid with square holes; (d) OM image of the microstructures fabricated using the copper grid as a mask; (e) 3D topographical image and (f) corresponding surface potential image of the micro/nanostructures on the irradiated 3C-SiC substrate. (d~f) Images correspond to a single-crystal 3C-SiC sample irradiated with 140 keV Ar^+ ions at a fluence of $1 \times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$

作者贡献声明 应哲冕负责实验研究,数据分析,初稿撰写及修订;张泽军负责资源支持,实验研究,论文审阅与修改;姚雨晴负责论文审阅与修改;雷前涛负责资源支持,论文审阅与修改;黄庆负责论文审阅与修改;孙博负责论文审阅与修改;汪颖负责资源支持,方法设计,论文审阅与修改;侯晨负责论文修改和资源支持;周利民负责论文审阅与修改;任峰负责资源支持;闫隆负责研究构思,方法设计,论文修改和整体指导。

参考文献

- 1 Snead L L, Nozawa T, Katoh Y, *et al.* Handbook of SiC properties for fuel performance modeling[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, **371**(1 - 3): 329 - 377. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.05.016.
- 2 Speer K, Sharma Y, Maximenko S, *et al.* SiC material properties[M]//SiC Technology Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 25 - 66. DOI: 10.1007/978-3-031-63418-5_2.

- 3 Katoh Y, Snead L L, Szlufarska I, *et al.* Radiation effects in SiC for nuclear structural applications[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2012, **16** (3): 143 – 152. DOI: 10.1016/j.cossms.2012.03.005.
- 4 Tan Z X, Cai J J. Neutronic analysis of silicon carbide cladding accident-tolerant fuel assemblies in pressurized water reactors[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(3): 48. DOI: 10.1007/s41365-019-0575-5.
- 5 刘心语, 张利民, 宁广胜, 等. 堆用 SiC 辐照温度监控器的研究进展[J]. *核技术*, 2023, **46**(9): 090001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090001.
LIU Xinyu, ZHANG Limin, NING Guangsheng, *et al.* Research progress on SiC irradiation temperature monitors for reactors[J]. *Nuclear Techniques*, 2023, **46**(9): 090001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090001.
- 6 Zafko B, Hrubčín L, Šagátová A, *et al.* Schottky barrier detectors based on high quality 4H-SiC semiconductor: Electrical and detection properties[J]. *Applied Surface Science*, 2018, **461**: 276 – 280. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.07.008.
- 7 浮海娟, 王林军, 王宏伟, 等. 4H-SiC 探测器对强激光等离子体下反应产物的测量[J]. *核技术*, 2019, **42**(2): 020501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020501.
FU Haijuan, WANG Linjun, WANG Hongwei, *et al.* The R & D of 4H-SiC detector for laser plasma products measurement[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, **42**(2): 020501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020501.
- 8 Matsunami H. Fundamental research on semiconductor SiC and its applications to power electronics[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2020, **96**(7): 235 – 254. DOI: 10.2183/pjab.96.018.
- 9 Nawaz A, Islam B, Mao W G, *et al.* Nanoscale elastic-plastic deformation and mechanical properties of 3C-SiC thin film using nanoindentation[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019, **16**(2): 706 – 717. DOI: 10.1111/ijac.13110.
- 10 Li X, Mu M M. Surface morphology of 3C-SiC layers grown on 4H-SiC substrates using TCS as silicon precursor[J]. *Solid State Communications*, 2024, **391**: 115650. DOI: 10.1016/j.ssc.2024.115650.
- 11 Snead L L, Katoh Y, Koyanagi T, *et al.* Dimensional isotropy of 6H and 3C SiC under neutron irradiation[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, **471**: 92 – 96. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.01.010.
- 12 Li B S, Liu H P, Shen T L, *et al.* Irradiation-induced microstructure damage in He-irradiated 3C-SiC at 1 000 °C [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, **40**(4): 1014 – 1022. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.026.
- 13 Ryazanov A I, Klaptsov A V, Kohyama A, *et al.* Radiation swelling of SiC under neutron irradiation[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, **307**: 1107 – 1111. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01114-5.
- 14 Weber W J, Gao F. Irradiation-induced defect clustering and amorphization in silicon carbide[J]. *Journal of Materials Research*, 2010, **25**(12): 2349 – 2353. DOI: 10.1557/jmr.2010.0292.
- 15 Yang Y T, Zhang C H, Su C H, *et al.* Dose dependence of nano-hardness of 6H-SiC crystal under irradiation with inert gas ions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2018, **422**: 50 – 53. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.02.035.
- 16 Chauhan V S, Riyad M F, Du X P, *et al.* Thermal conductivity degradation and microstructural damage characterization in low-dose ion beam-irradiated 3C-SiC [J]. *Metallurgical and Materials Transactions E*, 2017, **4** (2): 61 – 69. DOI: 10.1007/s40553-017-0107-3.
- 17 Zhang Z J, Jiang S M, Hu X T, *et al.* Study of the recrystallization behaviors induced by annealing and irradiation on amorphous SiC[J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, **137**: 015901. DOI: 10.1063/5.0232414.
- 18 Clay B T, Donnelly S E, Greaves G. Observations of He platelets during He ion irradiation in 3C SiC[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2022, **559**: 153426. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.153426.
- 19 周丽宏, 张崇宏, 杨义涛, 等. 离子辐照后 4H-SiC 晶体退火前后的光谱研究[J]. *核技术*, 2007, **30**(4): 314 – 317.
ZHOU Lihong, ZHANG Chonghong, YANG Yitao, *et al.* FTIR and Raman spectra of ion irradiated and annealed 4H-SiC[J]. *Nuclear Techniques*, 2007, **30**(4): 314 – 317.
- 20 Wang X, Zhang Y W, Han D, *et al.* Cross-sectional investigation of radiation damage of 2 MeV proton-irradiated silicon carbide[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, **29**(4): 57. DOI: 10.1007/s41365-018-0386-0.
- 21 Cheng G D, Chen Y, Yan L, *et al.* PL and ESR study for defect centers in 4H-SiC induced by oxygen ion implantation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, **28**(8): 105. DOI: 10.1007/s41365-017-0263-2.
- 22 Zhang L Q, Zhang C H, Hao C C, *et al.* Mechanical properties and surface characteristics of SiC fibers

- irradiated by swift heavy ions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(9): 113. DOI: 10.1007/s41365-022-01095-x.
- 23 Ying Z M, Yao Y Q, Zhang W, *et al.* Characterization of the damage in 3C-SiC crystal irradiated with 50 keV He⁺ ions[J]. Journal of Nuclear Materials, 2026, **624**: 156508. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2026.156508.
- 24 Sreelakshmi N, Gupta P, Gupta M, *et al.* Investigations on ion irradiation induced strain and structural modifications in 3C-SiC[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2024, **173**: 108170. DOI: 10.1016/j.mssp.2024.108170.
- 25 Costantini J M, Gutierrez G, Guillaumet M, *et al.* Optical spectroscopy study of damage in ion-irradiated 3C-SiC epilayers on a silicon substrate[J]. Journal of Applied Physics, 2023, **133**(19): 195901. DOI: 10.1063/5.0144496.
- 26 Wang Z Q, Zhang L M, AlMotasem A T, *et al.* Exploring defect behavior in helium-irradiated single-crystal and nanocrystalline 3C-SiC at 800 °C : a synergy of experimental and simulation techniques[J]. Acta Materialia, 2024, **279**: 120281. DOI: 10.1016/j.actamat.2024.120281.
- 27 Zhou Y Y, Li S M, Wang Y, *et al.* One-step ion beam irradiation manufacture of 3D micro/nanopatterned structures in SiC with tunable work functions[J]. Carbon, 2019, **148**: 387 - 393. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.04.011.
- 28 Koyanagi T, Kondo S, Hinoki T. The influence of sintering additives on the irradiation resistance of NITE SiC[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, **417**(1 - 3): 435 - 439. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.12.181.
- 29 Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P. SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, **268**(11 - 12): 1818 - 1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
- 30 Jacobs H O, Knapp H F, Müller S, *et al.* Surface potential mapping: a qualitative material contrast in SPM[J]. Ultramicroscopy, 1997, **69**(1): 39 - 49. DOI: 10.1016/S0304-3991(97)00027-2.
- 31 Ziegler D, Gava P, Güttinger J, *et al.* Variations in the work function of doped single- and few-layer graphene assessed by Kelvin probe force microscopy and density functional theory[J]. Physical Review B, 2011, **83**(23): 235434. DOI: 10.1103/physrevb.83.235434.
- 32 Walukiewicz W. Mechanism of Fermi-level stabilization in semiconductors[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1988, **37**(9): 4760 - 4763. DOI: 10.1103/physrevb.37.4760.
- 33 Kondo S, Mouri S, Hyodo Y, *et al.* Role of irradiation-induced defects on SiC dissolution in hot water[J]. Corrosion Science, 2016, **112**: 402 - 407. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.08.007.
- 34 Ryazanov A I, Klaptsov A V, Kohyama A, *et al.* Effect of helium on dislocation loop formation and radiation swelling in SiC[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, **329**: 486 - 491. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2004.04.107.
- 35 Lin Y R, Ku C S, Ho C Y, *et al.* Irradiation-induced microstructural evolution and swelling of 3C-SiC[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, **459**: 276 - 283. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.01.040.
- 36 Yang S B, Tokunaga S, Kondo M, *et al.* Non-destructive evaluation of the strain distribution in selected-area He⁺ ion irradiated 4H-SiC[J]. Applied Surface Science, 2020, **500**: 144051. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144051.
- 37 Zang H, Jiang W L, Liu W B, *et al.* Vacancy effects on the formation of He and Kr cavities in 3C-SiC irradiated and annealed at elevated temperatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, **389**: 40 - 47. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.11.017.
- 38 Barbot J F, Beaufort M F, Texier M, *et al.* Swelling and stacking fault formation in helium implanted SiC[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, **413**(3): 162 - 165. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.04.022.
- 39 Katoh Y, Kishimoto H, Kohyama A. Low temperature swelling in beta-SiC associated with point defect accumulation[J]. Materials Transactions, 2002, **43**(4): 612 - 616. DOI: 10.2320/matertrans.43.612.
- 40 Snead L L, Zinkle S J, Hay J C, *et al.* Amorphization of SiC under ion and neutron irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1998, **141**(1 - 4): 123 - 132. DOI: 10.1016/S0168-583X(98)00085-8.
- 41 Katoh Y, Kishimoto H, Kohyama A. The influences of irradiation temperature and helium production on the dimensional stability of silicon carbide[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, **307**: 1221 - 1226. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01062-0.
- 42 Zhang W, Li J, Cui J H, *et al.* Study on magnetism,

- swelling and their correlation of SiC ceramics under nickel ion irradiation[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2025, **108**(9): e20654. DOI: 10.1111/jace.20654.
- 43 Zak S, Trost C O W, Kreiml P, *et al.* Accurate measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation[J]. Journal of Materials Research, 2022, **37**(7): 1373 – 1389. DOI: 10.1557/s43578-022-00541-1.
 - 44 Fischer-Cripps A C. Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, **200**(14 – 15): 4153 – 4165. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.03.018.
 - 45 Saha R, Nix W D. Effects of the substrate on the determination of thin film mechanical properties by nanoindentation[J]. Acta Materialia, 2002, **50**(1): 23 – 38. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00328-7.
 - 46 Ma H L, Fan P, Qian Q Y, *et al.* Nanoindentation test of ion-irradiated materials: issues, modeling and challenges [J]. Materials, 2024, **17**(13): 3286. DOI: 10.3390/ma17133286.
 - 47 Park K H, Katoh Y, Kishimoto H, *et al.* Evaluation of dual-ion irradiated β -SiC by means of indentation methods [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, **307**: 1187 – 1190. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)00955-8.
 - 48 Gao F M, He J L, Wu E D, *et al.* Hardness of covalent crystals[J]. Physical Review Letters, 2003, **91**: 015502. DOI: 10.1103/physrevlett.91.015502.
 - 49 Craciun V, Craciun D, Socol G, *et al.* Investigations of Ar ion irradiation effects on nanocrystalline SiC thin films [J]. Applied Surface Science, 2016, **374**: 339 – 345. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.12.130.
 - 50 O'Connell J H, Neethling J H. Investigation of radiation damage and hardness of H- and He-implanted SiC[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2012, **167**(5): 299 – 306. DOI: 10.1080/10420150.2012.678008.
 - 51 Kerbirou X, Costantini J M, Sauzay M, *et al.* Amorphization and dynamic annealing of hexagonal SiC upon heavy-ion irradiation: Effects on swelling and mechanical properties[J]. Journal of Applied Physics, 2009, **105**(7): 073513. DOI: 10.1063/1.3103771.
 - 52 Prasad C V, Dharmiah P, Lee G H, *et al.* Interface engineering of 4H-SiC-based UV photodetectors: a comprehensive review[J]. Materials Today Advances, 2025, **28**: 100662. DOI: 10.1016/j.mtadv.2025.100662.
 - 53 Ando Y, Gohda Y, Tsuneyuki S. Dependence of the Schottky barrier on the work function at metal/SiON/SiC (0001) interfaces identified by first-principles calculations [J]. Surface Science, 2012, **606**(19 – 20): 1501 – 1506. DOI: 10.1016/j.susc.2012.05.023.
 - 54 Ninh D G, Hoang M T, Wang T, *et al.* Giant photoelectric energy conversion *via* a 3C-SiC Nano-Thin film double heterojunction[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **496**: 153774. DOI: 10.1016/j.cej.2024.153774.
 - 55 Nguyen T H, Vu T H, Pham T A, *et al.* Enhanced lateral photovoltaic effect in 3C-SiC/Si heterojunction under external electric field[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, **363**: 114746. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114746.