

# 金刚石表面损伤层及其对外延 金刚石性能的影响研究

程奕赫<sup>1,2</sup>, 马孟宇<sup>1,2</sup>, 刘庆彬<sup>1,2</sup>, 何泽召<sup>1,2</sup>, 蔚 翠<sup>1,2</sup>, 冯志红<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄 050051; 2. 固态微波器件与电路全国重点实验室, 河北石家庄 050051)

**摘要:** 氢终端金刚石诱导的二维空穴气是金刚石实现半导体化的重要途径。机械抛光作为金刚石衬底制备的关键工艺, 会不可避免引入亚表面损伤层, 导致表面晶格畸变、缺陷密度升高, 并在氢等离子体处理时的选择性刻蚀中, 引发表面形貌恶化、粗糙度上升, 显著抑制二维空穴气输运特性, 制约氢终端金刚石电性能与器件应用。本文以(001)取向的化学气相沉积单晶金刚石衬底为研究对象, 通过调控电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀时间实现亚表面损伤层的去除, 系统研究ICP刻蚀时间对金刚石表面形貌、损伤层结构及氢终端电性能的影响。研究表明: 随着ICP刻蚀时间的增加, 氢处理后的样品表面刻蚀坑与划痕逐渐消失, 形貌恶化得到有效抑制; 透射电子显微镜显示, 精抛光后金刚石存在约80 nm的亚表面损伤层, 经15 min的ICP刻蚀后可基本去除, 仅残留约1.5 nm的表面重构层; 且随着损伤层的逐步去除, 氢终端金刚石载流子浓度由 $1.16 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 降至 $5.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ , 迁移率由 $66.3 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 提升至 $98.3 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。进一步对损伤层去除后的样品进行单晶同质外延, 获得了低缺陷、高纯金刚石外延层, 并且迁移率进一步提升至 $122 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。本研究明确了ICP刻蚀去除亚表面损伤层对氢终端金刚石电性能的调控规律, 为优化氢终端金刚石表面质量与电特性提供理论与实验参考。

**关键词:** 单晶金刚石; 同质外延; 氢终端; 电感耦合等离子体刻蚀; 损伤层; 电特性

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(XXXX)XX-0001-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20260325

## Study on the Surface Damage Layer of Diamond and Its Influence on the Performance of Epitaxial Diamond

CHENG Yihe<sup>1,2</sup>, MA Mengyu<sup>1,2</sup>, LIU Qingbin<sup>1,2</sup>, HE Zezhao<sup>1,2</sup>, YU Cui<sup>1,2</sup>, FENG Zhihong<sup>1,2\*</sup>

(1. The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Co., Limited, Shijiazhuang, Hebei 050051, China;

2. National Key Laboratory of Solid-State Microwave Devices and Circuits, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

**Abstract:** Hydrogen-terminated diamond-induced two-dimensional hole gas is an important pathway for achieving semiconductor behavior in diamond. Mechanical polishing, as a key process in the preparation of diamond substrates, inevitably introduces a subsurface damage layer, leading to surface lattice distortion and increased defect density. During selective etching in hydrogen plasma treatment, it causes deterioration of surface morphology and an increase in roughness, significantly suppressing the transport properties of the two-dimensional hole gas and limiting the electrical performance and device applications of hydrogen-terminated diamond. This study focuses on (001)-oriented chemical vapor deposition single-crystal diamond substrates. By controlling the inductively coupled plasma(ICP) etching time, the subsurface damage layer can be removed, and the effects of ICP etching time on diamond surface morphology, damage layer structure, and hydrogen-terminated electrical properties were systematically investigated. The results show that with increased ICP etching time, the etching pits and scratches on the hydrogen-treated sample surfaces gradually disappear, and surface deterioration is effectively suppressed. Transmission electron microscopy reveals that polished diamond has a subsurface damage layer of about 80 nm, which can be almost completely removed after 15 minutes of ICP etching, leaving only a surface reconstruction layer of approximately 1.5 nm. Moreover, as the damage layer is gradually removed, the carrier concentration of hydrogen-terminated diamond decreases from  $1.16 \times 10^{13}/\text{cm}^2$  to  $5.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ , while mobility increases from  $66.3 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  to  $98.3 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . Further homoepitaxial growth on the damage layer-removed samples produced a low-defect, high-purity diamond epitaxial layer, with mobility further increased to  $122 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . This study clarifies the regulation of hydrogen-terminated diamond electrical performance through ICP etching removal of the subsurface damage layer and provides theoretical and experimen-

tal references for optimizing the surface quality and electrical characteristics of hydrogen-terminated diamond.

**Keywords:** single-crystal diamond; homoepitaxy; hydrogen terminal; inductively coupled plasma etching; damage layer; electrical properties

## 0 引言

金刚石凭借其 5.5 eV 的超宽禁带、22 W/(cm·K) 的超高热导率、超 10 MV/cm 的击穿场强以及优异的载流子迁移率(电子 4 500 cm<sup>2</sup>/(V·s)、空穴 3 800 cm<sup>2</sup>/(V·s)) 等优点,在高频高功率电子器件、量子技术、激光热管理等前沿领域展现出极大的应用潜力<sup>[1-2]</sup>。通过氢等离子体处理金刚石可在金刚石表面形成稳定的 C-H 键,使表面呈现负的电子亲和势,当吸附大气中的特定化学势的物质时,会在金刚石表面诱导产生二维空穴气(Two-Dimensional Hole Gas, 2DHG),为场效应晶体管等器件提供高导电性沟道,这是实现金刚石半导体化的重要途径之一<sup>[3]</sup>。

氢终端处理的效果依赖于金刚石衬底的表面质量,但金刚石的超高硬度与脆性,导致机械抛光过程中不可避免地引入亚表面损伤层,其深度可达数十纳米至数微米,主要表现为位错、微裂纹、晶格畸变及纳米级缺陷簇<sup>[4-5]</sup>。这一损伤层在抛光后通常不能够直接观测到<sup>[6]</sup>,但其不仅严重影响金刚石的晶体完整性,还会在氢终端处理过程中引发显著的表面质量恶化。研究表明,氢等离子体对缺陷区域具有优先刻蚀效应,会在损伤位点形成鹰眼状刻蚀坑、凸起或不规则条纹,导致表面粗糙度大幅升高<sup>[7]</sup>,这会严重影响 2DHG 载流子输运特性,造成迁移率降低<sup>[8]</sup>,严重制约氢终端金刚石的电性能<sup>[9]</sup>,对于实现高性能氢终端金刚石 FET 器件,特别是大栅宽器件造成致命影响<sup>[10]</sup>。

对于金刚石抛光带来的损伤,目前已开展多种表面预处理技术研究,包括紫外线辅助抛光<sup>[11]</sup>、等离子体辅助抛光等<sup>[12]</sup>。Lu 等人<sup>[13]</sup>使用溶胶抛光膜配合金刚石磨粒对单晶金刚石(100)面进行抛光,亚表面损伤层仅 2 nm,但其化学物质引入的污染无法忽视。Deng 等人<sup>[14]</sup>开发了大气压电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)增强的无磨料抛光技术,以大气压 ICP 产生高浓度羟基自由基,以改性单晶硅为抛光板实现无损伤抛光,但设备复杂、需真空环境,难以工业化。因此,有人提出,在抛光后进行处理。Achard 等在抛光后结合 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 等离子体刻蚀和 ICP 技术来改善金刚石的表面形貌<sup>[15]</sup>。Marie-Laure 等人<sup>[16]</sup>通过引入 Ar 离子,优化了氧离子刻蚀易产生蚀坑、增大粗糙度的缺陷,实现了金刚石衬底的平滑化与亚表面抛光损伤的有效去除。Friel 等人<sup>[17]</sup>用 Cl<sub>2</sub> 代替 O<sub>2</sub>,避免了氧等离子体选择性刻蚀,能够均匀地去除表面,利用 Ar/Cl<sub>2</sub> ICP 刻蚀消除机械加工表面的

损伤,获得干净平整的表面。

尽管现有研究已证实 Ar/Cl<sub>2</sub> ICP 刻蚀在金刚石损伤层去除中的优势,但尚未明确不同刻蚀时间下以及损伤层去除程度与氢终端金刚石载流子迁移率、浓度等电性能的内在关联。此外,氢等离子体与残留损伤层的相互作用仍缺乏系统表征,基于上述研究现状,本文针对氢终端金刚石中亚表面损伤层诱发表面恶化的关键问题,提出通过调控 ICP 刻蚀时间实现损伤层精准去除的技术方案。通过系统研究不同 ICP 刻蚀时间对金刚石表面形貌、损伤层厚度及氢终端特性的影响规律,最终实现氢终端金刚石表面粗糙度的降低与二维空穴气输运特性的优化,为高性能金刚石半导体器件的制备提供理论参考。

## 1 实验方法

本研究选用 10 mm×10 mm×0.5 mm 的(001)取向的 CVD 金刚石单晶衬底,首先对衬底进行精细抛光处理,使用无轴磨转机,采用铸铁抛光盘配合抛光液(强氧化剂、金刚石磨料和金属氧化物混合溶液)对金刚石进行精细抛光,抛光盘转速为 50 r/min,压力为 0.54 MPa;获得平整光滑的衬底表面后,将衬底放入体积比浓度  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{H}_2\text{SO}_4}=1:4$  的混合强酸溶液之中,加热至 200 °C 进行酸煮,以去除抛光后衬底表面可能存在的金属以及其他如石墨之类的残留物。

采用 ICP 刻蚀来去除抛光产生的亚表面损伤层。在 ICP 处理之前先对设备进行预清洗:先后通入 SF<sub>6</sub>/Ar、O<sub>2</sub>/Ar 对腔体进行预清洗,去除腔体内杂质。然后将样品放入腔体,当真空度达到预定值后,通入 40 mL/min 的 Cl<sub>2</sub> 和 20 mL/min 的 Ar 作为刻蚀气体,上电极功率设置为 500 W,下电极功率设置为 100 W,刻蚀 0、5、10、15 min 一系列不同时间后取出样品。

对 ICP 刻蚀之后的金刚石样品,进行氢等离子体处理工艺,依靠氢等离子体的选择性刻蚀使得缺陷区域得以呈现。将样品放入 2.45 GHz/6 kW 微波等离子体化学气相沉积设备腔体中,当腔压达到  $1 \times 10^{-4}$  Pa 以下时,通入 900 mL/min 的 H<sub>2</sub>,氢处理过程中压强、温度和微波功率分别为  $6.5 \times 10^3$  Pa、670 °C 和 1 500 W,设定为 15 min,之后再在氢气氛围中自然冷却至室温后取出。

为进一步探究其对氢终端工艺的影响,本研究使用 2.45 GHz/6 kW 微波等离子体化学气相沉积设备,对抛光后未刻蚀样品与经 15 min ICP 刻蚀处理的样品分别进行同质外延。每次外延的生长过程参数相同:微波功率为 3 500 W, H<sub>2</sub> 流量为 192 mL/min, CH<sub>4</sub>

流量为8 mL/min,生长温度为860 °C,生长时间为10 min,同样在氢气氛围中降温冷却后取出。

为保证实验变量的统一性,本实验采用同一片衬底,测试流程如图1所示:在抛光后进行ICP刻蚀与氢处理,之后再次抛光,变更ICP刻蚀时间重复实验,以此保证衬底本征性质的统一。在每步处理后均通过原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)进行表征分析金刚石的表面形貌;利用激光共聚焦显微镜(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)测试样品完整形貌特征;利用透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)来观察截面微观结构,表征损伤层厚度变化;在外延后,使用二次离子质谱(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS)测试外延薄膜的杂质含量;用霍尔测试系统测试样品的电特性,获取载流子浓度、迁移率等关键参数。

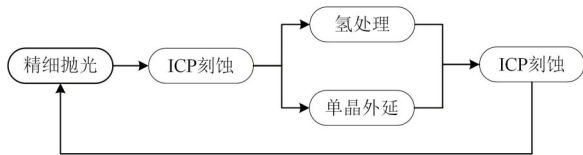


图1 实验流程

Figure 1 Experimental flowchart

## 2 实验结果与分析

本实验研究了不同ICP刻蚀时间对金刚石表面形貌的影响规律。为探究每个实验阶段金刚石表面粗糙度的变化,使用AFM对每个实验组在10 μm×10 μm扫描面积下的样品表面进行了表征。图2是未经过ICP刻蚀的样品的表面形貌图,从图2(a)和(c)可以看出,抛光后金刚石表面光滑平整,无明显划痕,在AFM图像中可观测到精细抛光特有的条纹,均方根(Root Mean Square, RMS)为0.151 nm。图2(b)和(d)显示了抛光后直接进行15 min氢处理后的样品表征结果,相比于氢处理前的样品,氢处理后样品在光显下可观测到明显的划痕,如图2(d)中的红框所示;在AFM图中可以看到大量的划痕与刻蚀坑,RMS增加至1.104 nm。这一现象源于机械抛光过程中,金刚石粉末对金刚石表面的机械划伤与机械挤压作用<sup>[18-19]</sup>,破坏了金刚石表面完美的晶格结构,显著提高了该区域的化学反应活性,氢等离子体更容易攻击这些高活性位点,会优先刻蚀,最终引发表面形貌恶化。此类缺陷在抛光后难以直接观测,但会严重干扰后续工艺与器件性能。

图3为不同ICP刻蚀时间下,样品在抛光后、ICP刻蚀后及氢处理后的AFM形貌对比(每次选取随机两个位置P1、P2进行测量)。其中图3(a)、(d)、(g)分别为5、10、15 min刻蚀组的初始抛光表面;图3

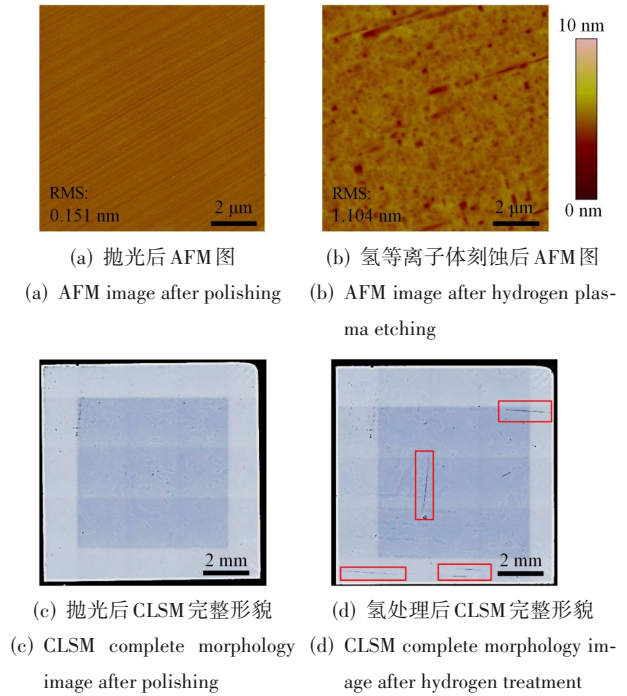


图2 AFM图和CLSM完整形貌图

Figure 2 AFM images and CLSM complete morphology image

(b)、(e)、(h)为对应ICP刻蚀后的表面;图3(c)、(f)、(i)为进一步氢处理后的表面。对比ICP前后样品的表面形貌可以看出,ICP刻蚀对于表面形貌未产生明显影响,说明该ICP刻蚀工艺对于金刚石的刻蚀作用是近似非选择性的,金刚石表面被均匀地去除一层。对于ICP刻蚀5 min的样品,氢处理之后表面形貌有着大量的划痕与刻蚀坑,但明显少于不做ICP刻蚀时的氢处理形貌,可以推测5 min的刻蚀时间并不足以将损伤层刻蚀干净,损伤层依旧有残留。当刻蚀时间增加至10 min时,只留下一些较浅的划痕,刻蚀坑已基本不见,此时的损伤层已经接近去除。当刻蚀时间增加至15 min时,氢处理后的金刚石表面形貌已经看不到刻蚀痕迹,说明抛光引起的损伤层已经完全去除。

为了更直观地观察到损伤层厚度的变化情况,在抛光后与15 min的ICP后对样品进行TEM截面的表征,如图4所示。图4(a)为经过精抛光后的TEM图像,从中可以看到靠近表面的损伤层呈现“暗-亮-暗”三层结构,这与文献中报道的一致<sup>[20-21]</sup>:最外层的暗层为机械抛光直接作用形成的严重损伤层,晶格被严重破坏;中间的亮层为过渡区,表示应力诱导的高密度缺陷层;最内层的暗层为压缩层,仅残留静压缩应力,且向体相方向逐渐释放,图像由暗到明逐渐过渡。经测量,该损伤层的总厚度约为80 nm。图4(b)为经过ICP刻蚀15 min后的截面TEM测试图,可见表

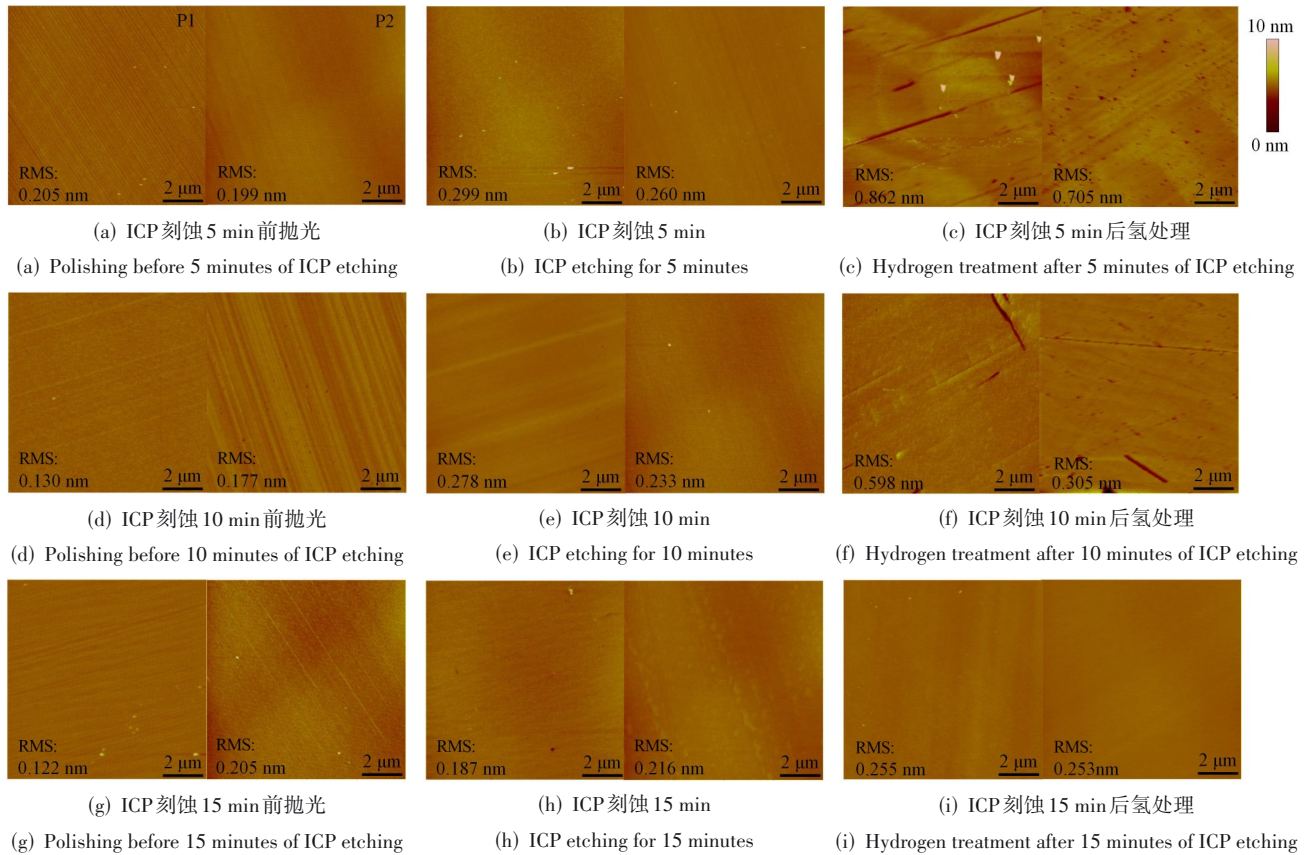


图3 ICP刻蚀5、10、15 min前后的AFM形貌图

Figure 3 AFM images of the ICP-etched samples before and after 5, 10, and 15 minutes

面损伤层已基本完全去除,仅观察到厚度约1.5 nm的亮层,可能是ICP刻蚀后表面重构引起的晶格畸变层。

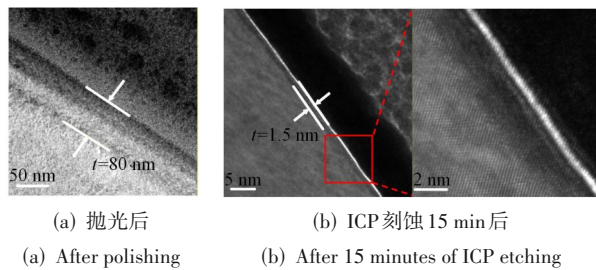


图4 损伤层TEM图

Figure 4 TEM images of the damaged layer

样品经氢处理后的电性能测试结果如图5所示。随着ICP刻蚀时间的增加,载流子浓度呈逐渐降低趋势,由 $1.16 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 降至 $5.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ ;载流子迁移率则由 $66.3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 提升至 $98.3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;方阻升高,由 $8130 \Omega/\text{square}$ 提高到 $17670 \Omega/\text{square}$ 。这一变化规律的机制在于:氢终端金刚石的载流子迁移率主要受表面粗糙度与缺陷散射的影响,ICP刻蚀时间延长使亚表面损伤层逐步去除,表面平整度与晶格完整性显著提升,载流子输运过程中的散射概率大幅降

低,从而实现迁移率的持续升高;而表面粗糙度的降低导致表面悬挂键减少,C-H密度降低,所以使得载流子浓度呈现缓慢下降趋势。载流子浓度降低带来的影响超过迁移率提升带来的效果,从而使样品的方阻随刻蚀时间增加而升高。

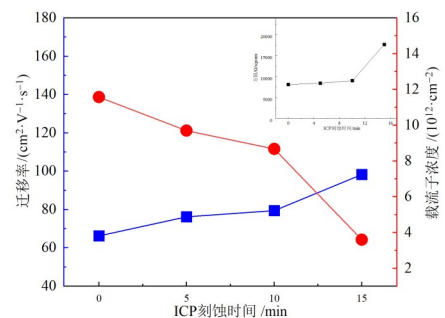


图5 氢处理后电特性图

Figure 5 Electrical characteristics after hydrogen treatment

分别对抛光后未刻蚀样品与经15 min ICP刻蚀处理的样品进行短时间同质外延生长,下图显示了外延生长后的AFM表征结果,直观反映了损伤层存在与否对金刚石外延表面的显著调控作用。如图6(a)所示,对于未经过ICP刻蚀的样品,其外延层表面可以观

察到大量的抛光划痕与坑洞,这些源自损伤层的缺陷在外延生长中并未被消除,反而进一步加深凸显,导致表面粗糙度高达2.065 nm。图6(b)显示经过15 min的ICP刻蚀后再进行外延的样品,此时抛光引起的损伤层已基本去除,外延层表面呈现均匀平整的形貌特征,无明显缺陷坑与划痕,表面粗糙度降为0.692 nm,证实损伤层的去除可以有效改变衬底表面状态,为高质量外延提供良好基础。图6(c)为在ICP刻蚀15 min后外延样品的SIMS测试结果,氮原子浓度在金刚石表面下深度为231 nm处发生突变,且整个外延层区域氮原子

浓度均低于SIMS的检测限( $1 \times 10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup>),表明通过短时间外延生长成功制备了厚度约为231 nm的高纯金刚石外延层,有效抑制了氮杂质的引入。氮在金刚石中会引起代位氮原子NS<sup>0</sup>、氮与空位集合体(NV<sup>-</sup>、NV<sup>0</sup>)之类的缺陷,会通过散射与陷阱效应降低载流子的迁移率,而在高纯外延层中氮含量的有效控制,可以减少上述缺陷的形成,提升金刚石晶体的完整度与纯度,进而提升迁移率。霍尔测试表明,迁移率由66 cm<sup>2</sup>/(V·s)提升至122 cm<sup>2</sup>/(V·s),进一步验证了损伤层的去除对氢终端电学性能的提升作用。

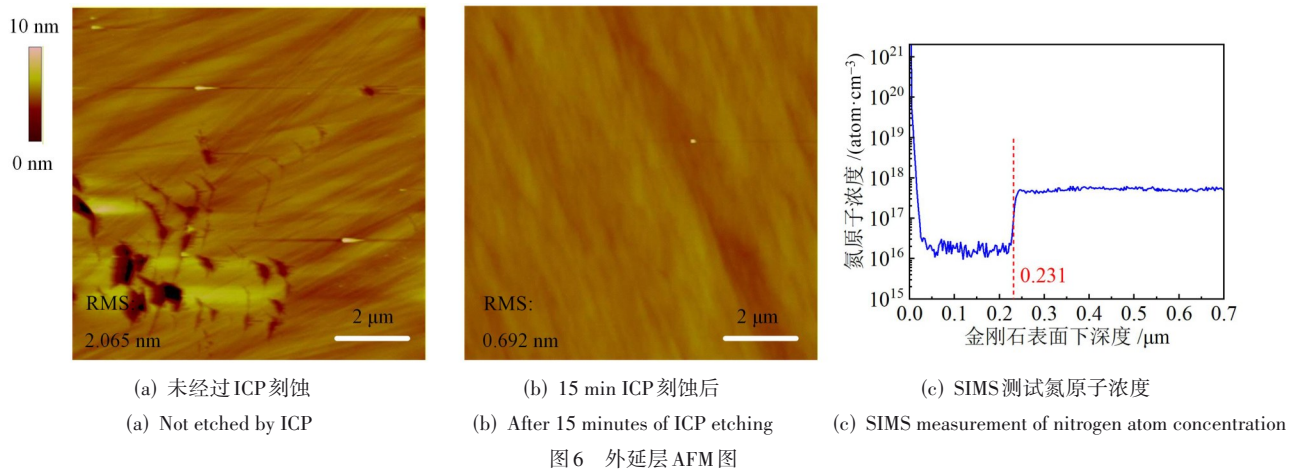


图6 外延层AFM图

Figure 6 AFM images of the epitaxial layer

### 3 结论

本文针对机械抛光亚表面损伤层诱发氢等离子体刻蚀表面恶化的问题,以(001)取向的CVD金刚石为研究对象,系统地探究了ICP刻蚀时间对其表面形貌、损伤层结构及氢终端电输运特性的调控规律。研究表明,随着ICP刻蚀时间的增加,氢处理后的衬底表面恶化减弱,无明显刻蚀痕迹。随着ICP刻蚀时间的增加,氢处理后的衬底表面的划痕与刻蚀坑逐渐消失;且TEM测试显示,精抛光后的金刚石衬底存在约80 nm、呈暗-亮-暗三层结构的亚表面损伤层,在ICP刻蚀15 min后损伤层基本消失。同时,随ICP刻蚀时间从0 min延长至15 min,损伤层的逐步去除导致表面缺陷与粗糙度降低,使载流子散射减少,氢终端金刚石迁移率由66.3 cm<sup>2</sup>/(V·s)提升至98.3 cm<sup>2</sup>/(V·s);载流子浓度因表面C-H键密度减少而呈缓慢下降趋势,由 $1.16 \times 10^{13}$ /cm<sup>2</sup>降至 $5.3 \times 10^{12}$ /cm<sup>2</sup>。最后,进一步对抛光与ICP 15 min后的样品分别进行短时间外延,发现去除损伤层可以获得低缺陷高纯金刚石外延层,在杂质降低与表面形貌质量优化的共同作用下,迁移率进一步提升至122 cm<sup>2</sup>/(V·s)。本文通过Ar/Cl<sub>2</sub>混合气的ICP刻蚀去除金刚石抛光产生的亚表面损伤

层,可以有效改善氢终端金刚石的表面质量与二维空穴气输运特性,为优化氢终端金刚石电特性提供理论与实验参考。

### 参考文献

- [1] Kasu M, Ueda K, Yamauchi Y, et al. Diamond-based RF power transistors: Fundamentals and applications[J]. *Diamond and Related Materials*, 2007, 16(4/5/6/7): 1010-1015.
- [2] Kohn E, Denisenko A. Concepts for diamond electronics [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(10): 4333-4339.
- [3] Crawford K G, Maini I, Macdonald D A, et al. Surface transfer doping of diamond: A review[J]. *Progress in Surface Science*, 2021, 96(1): 100613.
- [4] Ye Sheng, Zheng Yuting, Zhao Shangman, et al. Evolutionary features of subsurface defects of single crystal diamond after dynamic friction polishing[J]. *Functional Diamond*, 2024, 4(1): 2316147.
- [5] Zheng Yuting, Ye Haitao, Thornton R, et al. Subsurface cleavage of diamond after high-speed three-dimensional dynamic friction polishing[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 101: 107600.

- [6] Tatsumi N, Harano K, Ito T, et al. Polishing mechanism and surface damage analysis of type IIa single crystal diamond processed by mechanical and chemical polishing methods[J]. *Diamond and Related Materials*, 2016, 63: 80-85.
- [7] 张金凤, 徐佳敏, 任泽阳, 等. 不同晶面的氢终端单晶金刚石场效应晶体管特性[J]. *物理学报*, 2020, 69(2): 254-261. Zhang Jinfeng, Xu Jiamin, Ren Zeyang, et al. Characteristics of hydrogen-terminated single crystalline diamond field effect transistors with different surface orientations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 254-261. (in Chinese)
- [8] Tsukioka K. Energy distributions and scattering mechanisms of carriers in diamond[J]. *Diamond and Related Materials*, 2009, 18(5/6/7/8): 792-795.
- [9] Kato Y, Umezawa H, Shikata S I, et al. Effect of an ultraflat substrate on the epitaxial growth of chemical-vapor-deposited diamond[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(2): 025506.
- [10] 张金凤, 张进成, 任泽阳, 等. 金刚石二维电导和场效应管研究新进展[J]. *电子学报*, 2024, 52(6): 2151-2160. Zhang Jinfeng, Zhang Jincheng, Ren Zeyang, et al. Research progress of two-dimensional electrical conductivity and field effect transistors of diamond[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(6): 2151-2160. (in Chinese)
- [11] Yamamura K, Emori K, Sun R, et al. Damage-free highly efficient polishing of single-crystal diamond wafer by plasma-assisted polishing[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 353-356.
- [12] Deng Hui, Endo K, Yamamura K. Plasma-assisted polishing of gallium nitride to obtain a pit-free and atomically flat surface[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 531-534.
- [13] Lin Yingchao, Lu Jing, Tong Ruilong, et al. Surface damage of single-crystal diamond (100) processed based on a sol-gel polishing tool[J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 83: 46-53.
- [14] Luo Hu, Ajmal K M, Liu Wang, et al. Atomic-scale and damage-free polishing of single crystal diamond enhanced by atmospheric pressure inductively coupled plasma[J]. *Carbon*, 2021, 182: 175-184.
- [15] Achard J, Tallaire A, Mille V, et al. Improvement of dislocation density in thick CVD single crystal diamond films by coupling  $H_2/O_2$  plasma etching and chemo-mechanical or ICP treatment of HPHT substrates[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2014, 211(10): 2264-2267.
- [16] Hicks M L, Pakpour-Tabrizi A C, Zuerbig V, et al. Optimizing reactive ion etching to remove sub-surface polishing damage on diamond[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(24): 244502.
- [17] Friel I, Clewes S L, Dhillon H K, et al. Control of surface and bulk crystalline quality in single crystal diamond grown by chemical vapour deposition[J]. *Diamond and Related Materials*, 2009, 18(5/6/7/8): 808-815.
- [18] Wade T, Geis M W, Fedynyshyn T H, et al. Effect of surface roughness and H-termination chemistry on diamond's semiconducting surface conductance[J]. *Diamond and Related Materials*, 2017, 76: 79-85.
- [19] Chen Xingqiao, Yang Mingyang, Mu Yuanyuan, et al. The influence of process parameters on hydrogen-terminated diamond and the enhancement of carrier mobility [J]. *Materials*, 2025, 18(1): 112.
- [20] Han Xiaotong, Peng Yan, Wang Xiwei, et al. Microwave plasma etching treatment for single crystal diamond[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(9): 4995-5004.
- [21] Schuelke T, Grotjohn T A. Diamond polishing[J]. *Diamond and Related Materials*, 2013, 32: 17-26.

#### 作者简介



程奕赫 男, 2001年3月出生于山西省运城市, 硕士研究生, 研究方向为半导体材料。  
E-mail: 798462190@qq.com



马孟宇 男, 1996年5月出生于辽宁省锦州市, 工程师, 主要研究方向为超宽禁带半导体材料。  
E-mail: cetemamy@163.com



**刘庆彬** 男,1985年7月出生于黑龙江省七台河市,高级工程师,主要研究方向为超宽禁带半导体材料。

E-mail: liuqingbin163@163.com



**蔚 翠** 女,1983年出生于河北省衡水市,研究员,长期从事半导体技术研究工作,涉及宽禁带半导体、量子传感器件等。

E-mail: yuc@cetc.cn



**何泽召** 男,1986年3月出生于河北省石家庄市,高级工程师,主要研究方向为超宽禁带半导体器件与材料。

E-mail: hezz@cetc.cn



**冯志红** 男,1973年出生于吉林省四平市,研究员,长期从事半导体技术研究工作,涉及宽禁带半导体、固态太赫兹、碳电子等。

E-mail: fengzh@cetc.cn