

硅终端金刚石半导体与场效应管器件研究进展

刘金龙¹, 赵子辰¹, 赵上熳¹, 朱肖华¹, 王 鹏¹, 郭津瑞¹, 郭明明², 魏俊俊¹, 陈良贤¹, 李建林², 李成明¹

(1. 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083; 2. 河南飞孟金刚石股份有限公司, 河南 孟州 454763)

摘 要: 金刚石作为超宽禁带半导体材料的代表, 逐渐成为大家关注的热点。尽管在材料制备、器件研制与性能方面取得了一定进展, 但其半导体掺杂技术至今没有很好解决。氢终端金刚石由于具有典型的二维空穴气而被广泛应用于微波功率器件的研究, 但其存在稳定性不佳、界面态浓度较高等问题。相比而言, 近年来出现的硅终端(C—Si)金刚石具有比氢终端(C—H)金刚石更低的界面态密度、更高的阈值电压、载流子密度和稳定性等优点, 有望解决氢终端金刚石半导体器件的问题。硅终端金刚石电子器件表现出高阈值电压的增强型特性, 其机制尚不明确。本文从氢终端金刚石的结构、导电机理出发, 分析限制其发展的主要问题, 并综述了硅终端金刚石的导电机理、制备方法以及相应的界面结构, 初步分析了硅终端 MOSFETs 的性能水平, 最后阐述了目前硅终端金刚石发展存在的问题并展望了其发展前景。

关键词: 硅终端金刚石; 金刚石半导体; 场效应管器件

中图分类号: TQ163; TN303 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-3005-10

网络出版时间: 2023-08-14



Research Progress on Silicon-Terminated Diamond Semiconductors and Field-Effect Transistor Devices

LIU Jinlong¹, ZHAO Zichen¹, ZHAO Shangman¹, ZHU Xiaohua¹, WANG Peng¹, GUO Jinrui¹, GUO Mingming², WEI Junjun¹, CHEN Liangxian¹, LI Jianlin², LI Chengming¹

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Henan Famous Diamond Industrial Co., Ltd, Mengzhou 454763, Henan, China)

Abstract: Diamond as a representative of ultra-wide bandgap semiconductor material has attracted recent attention. Although some progress is made in material preparation, device development and performance, semiconductor doping technology is not resolved so far. Hydrogen-terminated (C—H) diamond is widely used in microwave power devices due to its typical two-dimensional hole gas, but it has some problems such as poor stability and high interface state concentration. In contrast, silicon-terminated (C—Si) diamond that emerged in recent years has some advantages of lower interface state density, higher threshold voltage, carrier density, and stability rather than C—H diamond. C—Si diamond electronics exhibit the enhanced properties with high threshold voltages through an unclear mechanism. This review analyzed the structure and conduction mechanism of C—H diamond, the main problems that limit its development, represented the conduction mechanism, preparation method and corresponding interface structure of C—Si diamond, and discussed the performance level of C—Si diamond MOSFETs. In addition, the existing problems in the development of C—Si diamond were also discussed, and its future development was prospected.

Keywords: silicon-terminated diamond; diamond semiconductor; field-effect transistor devices

金刚石具有众多优异的性质, 如超宽禁带、高载流子迁移率、高击穿电场、高热导率等, 是电力

电子功率器件的理想材料^[1-5]。但是, 对于禁带宽度较宽的本征金刚石来说, 如何使其半导体化, 成为

收稿日期: 2023-06-01。 修订日期: 2023-06-17。

基金项目: 国家磁约束核聚变发展研究专项资助(2019YFE03100200);
国家重点研发计划项目(2022YFB3608601)。

第一作者: 刘金龙(1985—), 男, 博士, 研究员。

通信作者: 李成明(1962—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-06-01. Revised date: 2023-06-17.

First author: LIU Jinlong (1985—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: liujinlong@ustb.edu.cn

Correspondent author: LI Chengming (1962—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

阻碍金刚石半导体器件发展和应用的难题之一。

值得关注的是,对于金刚石表面进行适当的修饰,便可以在其表面形成二维空穴气(2DHG),为金刚石电子器件的开发提供了有效方法^[6–11]。为此,研究者利用金刚石表面转移掺杂或自发极化原理,制备了具有 p 型导电的氢终端金刚石金属氧化物场效应管(MOSFETs),并利用不同的栅介质获得了 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 载流子迁移率和高于 $300 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的室温霍尔迁移率^[12],近年来其霍尔迁移率达到 $680 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,方阻达到 $1.4 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ ^[13],氢终端金刚石 MOS 器件性能得到显著提高。尽管如此,氢终端金刚石半导体的缺点也逐渐暴露,例如基于氢终端金刚石与氧化物介电层的 MOSFET 器件依然存在界面态密度高、空穴迁移率低、稳定性差等问题^[14–16],限制了其进一步作为高频高功率器件的应用。

幸运的是,H 和 Si 与 C 键合形成的偶极子拥有相似的电负性,甚至,C—Si 偶极子的电负性差要大于 C—H 偶极子,而以 C—Si 键合的 SiO_2 /金刚石的电子亲和势比 C—H 金刚石低大约 1.0 eV ,预示着硅终端金刚石也具有与氢终端金刚石 MOSFET 相类似的 2DHG 特性^[17]。此外,研究发现由于碳硅键较强的结合力,硅终端(C—Si)金刚石场效应管在 673 K 时仍表现出较好的稳定性^[18],且硅终端界面与栅氧化物介电层具有较好的兼容性,易获得较低的界面态密度。因此,硅终端金刚石有望成为代替氢终端金刚石的下一代高性能半导体。

本文从氢终端(C—H)金刚石结构、导电机理及其性能特点出发,分析了氢终端金刚石 MOSFETs 存在的问题。随后,阐述了硅终端金刚石的导电本质,归纳总结了其制备方法。之后,对于硅终端金刚石的界面结构进行分析,初步总结了目前硅终端金刚石的性能水平,并与氢终端金刚石 MOSFETs 的漏极电流密度($I_{\text{D,max}}$)与阈值电压(V_{th})进行对比。最后介绍了硅终端金刚石 MOSFETs 发展存在的问题,提出硅终端金刚石半导体的未来展望。

1 C—H 金刚石 MOSFETs 概述

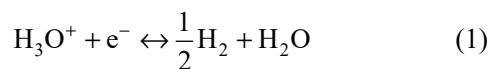
1994 年,日本早稻田大学 Kawarada 等^[19]报道了具有二维空穴气的氢终端金刚石金属半导体场效应晶体管(MESFET),在此之后,经过许多研究者大量研究,基于氢终端金刚石二维空穴气的电子器件得到快速发展^[20–25]。

关于氢终端金刚石二维空穴气的形成机制的理

论解释尚不统一。目前,主要有两种解释为研究者们所接受。其中一种是固定偶极子产生的电场极化效应^[26],由于 C—H 偶极子之间的电负性,会导致在其内部存在一个电场。当 C—H 金刚石表面暴露在空气中,周围带负电荷的分子被吸附在 C—H 表面,而负电荷分子大多吸附在表面上的 H 原子处。负电荷分子的大量聚集导致氢终端表面能带向上弯曲,并导致层下电子的逃逸,生成 2DHG^[18]。

Kawarada 等^[27]在 450°C 对 C—H 金刚石表面进行原子层沉积(ALD) Al_2O_3 钝化再生 2DHG。该 Al_2O_3 钝化层也被用作栅极氧化物。研究发现制备的氢终端金刚石 MOSFETs 具备良好的导电性能,具有正常的夹断操作和较高的漏极电流密度。

转移掺杂模型是另外一种氢终端金刚石 2DHG 的重要产生机理^[28]。转移掺杂模型认为,当氢终端金刚石暴露在空气中时,水或其他吸附物吸附在其表面,由于这些吸附物能级低于氢终端金刚石表面的价带顶(VBM),造成氢终端金刚石表面费米能级与吸附层的化学势差,吸附层中会发生还原反应:



随着还原反应的不断进行,相应的提高了吸附层相对于金刚石表面的化学势,金刚石表面的能带向上弯曲,电子向吸附层中持续转移,使空穴在金刚石表面累积,直到化学势的初始差被空穴积聚层所补偿,反应达到平衡,最终在氢终端金刚石表面生成稳定的 2DHG 导电层。

近年来,金刚石基电子器件逐渐表现出较高的器件性能,如日本早稻田大学基于氢终端(C—H)金刚石 P 型沟道研制的 MOSFETs 耐压能力接近 2000 V ,有望用于新能源汽车的逆变器,可将由传统能源汽车产生的 CO_2 排放量减少 18% ^[29]。此外,目前基于氢终端金刚石表面 p 型沟道制作的场效应管器件,其最高截止频率达到 70 GHz ^[30],最高振荡频率可达 120 GHz ^[31],功率密度在 1 GHz 下达到 3.8 W/mm^2 ^[32], 2 GHz 下实现 4.2 W/mm^2 ^[33],正在逐渐赶上 GaN 器件性能。

通常认为,金刚石表面的吸附物和 C—H 偶极子是形成 2DHG 导电层的必要条件^[18]。而在高温或高温有氧的环境中,对氢终端金刚石表面受主吸附物和 C—H 偶极子的严重影响不容忽视^[26],研究发现当温度从 100°C 上升到 300°C 时,器件的开关比由 10^7 降至 10^3 ,性能出现明显的退化现象^[34]。

此外,氢终端金刚石表面的几乎所有悬垂键均为饱和状态,虽大大降低了表面态,但与之相

伴的一个问题是其表面没有额外的悬挂键^[35], 这降低了 MOS 器件中栅氧化物与金刚石表面接触的稳定性, 也限制了氢终端金刚石 MOSFETs 的进一步发展。

2 C—Si 金刚石 MOSFETs

C—Si 金刚石具有比 C—H 金刚石更低的界面态密度、高的阈值电压、高的空穴迁移率等^[36], 同时具有高的漏极电流密度和正常关断操作特性^[26], 此外, 通过在硅终端金刚石表面沉积半导体或金属材料, 经氧化可以形成具有高温稳定性的栅极氧化物^[37]。如 SiO₂ 作为栅极氧化物的 C—Si 金刚石具有比 C—H 金刚石更加优异的稳定性^[38]。因此, 人们对 C—Si 金刚石 MOSFETs 研究产生了极大的兴趣。

2.1 C—Si 金刚石 MOSFETs 机理

目前, 对硅终端金刚石表面 2DHG 的形成机制的报道尚不系统, 与氢终端相似, 人们更倾向于将其解释为转移掺杂原理。通常, 分子掺杂物的功函数远高于金刚石, 分子掺杂物的费米能级(E_F)位于金刚石的价带顶之下。当分子掺杂物在金刚石表面大量附着时, 由于金刚石与分子掺杂物之间存在的化学势差异, 导致电子自发地从金刚石的价带转移到分子掺杂物的导带中, 使金刚石表面上的空穴大量累积形成 p 型表面掺杂。这种 p 型表面转移掺杂是由分子受体和金刚石表面之间的能级排列驱动的^[39]。由于氢终端金刚石吸附层的最低未占据分子轨道(LUMO)在金刚石表面的价带最大值以下, 电子转移到吸附层导致界面势的形成和金刚石费米能级的向下移动, 导致能级排列改变, 直到能量无法驱动电子转移。

Oslinker 等^[40]通过 MoO₃ 在氧化硅终端(111)金刚石表面吸附实现了表面转移掺杂, 并利用高分辨率芯能级光电子能谱和开尔文探针分析了其机理^[40]。当 MoO₃ 吸附在 0.2~0.6 mL 范围以上时, 硅终端金刚石表面呈现 p 型导电, MoO₃ 的最低非占据能级与硅终端金刚石表面价带顶有 1.3 eV 的差距, 因此形成由硅终端金刚石向 MoO₃ 的电子转移掺杂, 从而硅终端金刚石表面形成 p 型导电沟道。

哈尔滨工业大学朱嘉琦团队^[41]同样验证了硅终端金刚石表面的转移掺杂效应。当金刚石暴露于空气时, 水分子会吸附到金刚石表面, 当水分子 pH≈6 时, 电化学电位(μ_e)为-5.3 eV^[42], 低于 C—H 金刚石表面的 E_F , 电子从 C—H 表面的 VBM 转移

到水吸附层的未占据电子层, 直到 E_F 等于 μ_e ; 因此, 可以在 C—H 金刚石表面形成 2DHG。在其研究中, 根据 Si 处理的 IIa 型金刚石表面的 X 射线光电子能谱(XPS)和开尔文探针力显微镜(KPFM)显示, E_F 比 VBM 高 0.2 eV, 表面功函数为 4.89 eV。电子亲和能计算为 $\chi=0.38$ eV。pH=0~14 时的电化学电位几乎全部低于 Si 处理后的 E_F 。因此, 从化学势窗口看, Si 处理后的金刚石表面具有转移掺杂形成 2DHG 沟道的条件。

2.2 C—Si 金刚石的制备

2.2.1 硅分子束沉积 硅分子束沉积(MBD)是一种通过直流电加热薄硅条, 在样品表面沉积硅原子, 并进行原位真空退火形成极薄硅原子层的技术。与分子束外延相区别, 用该方法沉积硅原子层时为室温条件下, 并不会导致 Si 原子层的外延生长。澳大利亚 La Trobe 大学 Schenk 等^[43]报道了采用分子束沉积法制备 C—Si 终端金刚石的研究。实验首先将 IIb (100)晶向金刚石经刻蚀处理, 在氢等离子体中进行氢终止形成氢终端, 然后在超高真空腔内 450 °C 退火 1 h, 以解吸空气中的污染物, 并去除与空穴积聚层相关的表面杂质。将样品降至常温, 用硅分子束沉积法在氢终端金刚石上沉积 1 层厚度为 2.7 Å 的 Si 膜, 随后在 920 °C 进行真空原位退火 15 min。在此过程中, 氢终端金刚石表面的 C—H 键被替换为 C—Si 键^[44-46], 形成 C—Si 终端金刚石。

Fu Y 等^[35]用硅分子束沉积的方法制备了常关型 C—Si 金刚石 MOSFETs。实验在 C—H 金刚石上沉积了 0.5 nm 厚的硅(Si 单位为 1.85 ML), 然后在 920 °C 进行 15 min 的原位退火, 实现了硅终端, 并利用 ALD 沉积了 100 nm 薄 Al₂O₃ 层。制备的 C—Si 金刚石具有清晰的 C—Si 层, 厚度在 0.3~1.0 nm 之间。当 L_{SD} 尺寸为 3 μm 具有-10V 的高阈值电压和-156 mA/mm 的大电流密度。

由于 Si 十分容易被氧化形成 SiO₂, 因而在利用硅分子束沉积制备 C—Si 金刚石时, 必须保证环境的真空度。如果真空度较低, 被电流加热蒸发的 Si 原子还未到达样品表面就可能已被氧化。再者, SiO₂ 具有极高的热稳定性, 将会导致后续真空原位退火形成 C—Si 金刚石变得困难。

2.2.2 磁控溅射 磁控溅射是通过在阴极靶上施加一个环形磁场, 实现磁场对荷电粒子的约束, 从而提高等离子体密度以增加溅射率的一种

材料沉积方法。由于将电子和高密度等离子体束缚在靶面附近,使离子有效的轰击靶面,因而不只可以显著的提高溅射速率,还可以对二次电子的运动进行控制,减少高能离子对衬底的轰击。该方法具有易操作、速度快、损伤小等特点。

Qiao 等^[41]通过磁控溅射法制备了 C—Si 金刚石。在沉积硅之前,通过在 500 °C 4 h 的超高真空退火,来去除金刚石表面的氧气和杂质。然后,在表面溅射 20 nm 的硅层,对 900 °C 真空石英管中的样品加热 3 h 形成 C—Si 键合。最后用 HF 去除多余

的单原子硅,保留键合的硅原子。

图 1 为硅处理后的金刚石表面 XPS 分析结果,经过 XPS 宽扫描后,可以清晰地观察到其测量光谱 Si 2p (101.87 eV)和 Si 2s (153.54 eV),初步表明 Si 存在于金刚石表面^[47]。并对 Si 2p 光谱拟合并分裂为 101.70 和 102.22 eV 峰,分别对应于与金刚石表面结合的 C—Si 键和氧化 Si 键。证实了通过磁控溅射的方法可以制备出 C—Si 金刚石,这种便捷、易操作的制备方法,为研究者提供了一种新的 C—Si 金刚石 MOSFETs 的制备思路。

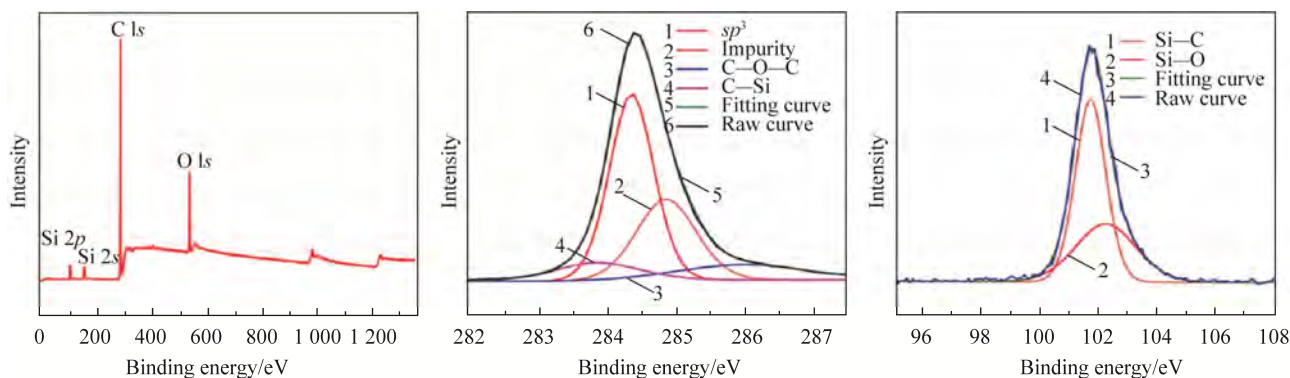


图 1 硅处理后的金刚石表面的 XPS 结果^[41]

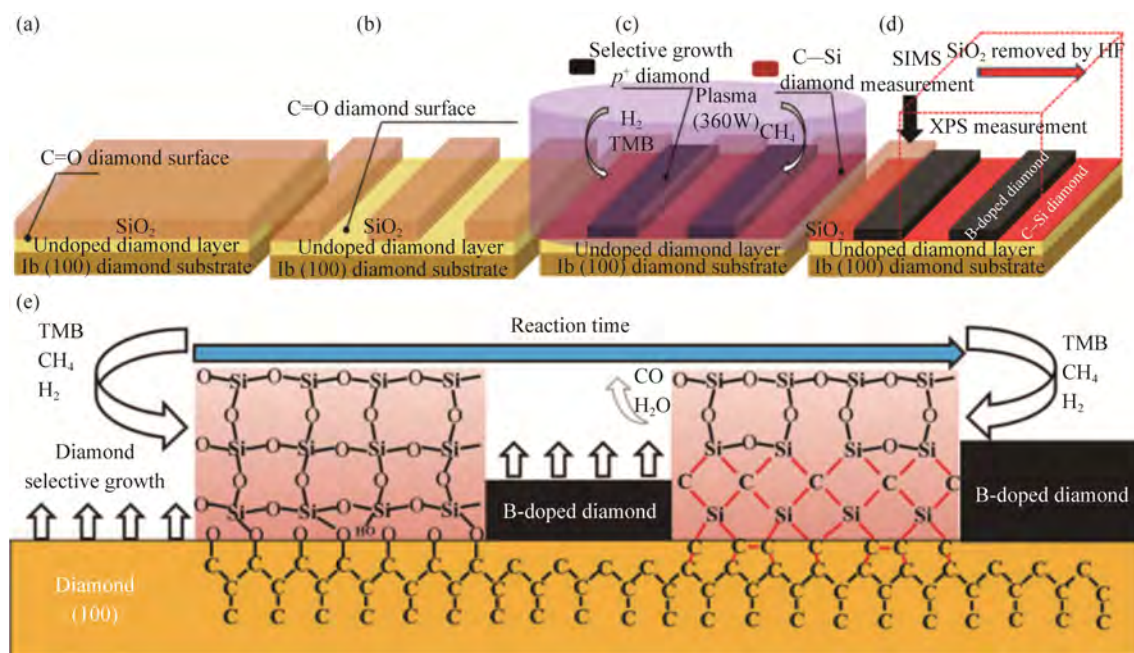
Fig. 1 XPS spectra of the Si-treated diamond surface^[41]

2.2.3 选择气相沉积生长 化学气相沉积(CVD)是将化学气体或蒸汽在基体表面反应合成涂层或薄膜材料的一种方法。简而言之,它是将两种或两种以上的气态原材料通进一个反应腔室内,通过化学反应使其在所需样品的表面生成一种新的物质。将化学气相沉积法与光刻工艺有机地结合起来,可以大大提高 C—Si 金刚石制备效率。图 2 为选择气相沉积生长制备硅终端金刚石流程及界面结构^[48]。首先,在臭氧气氛下紫外照射 3 h 去除金刚石表面可能存在的 C—H 键,形成氧终端金刚石。然后,利用正硅酸四乙酯化学气相沉积 (TEOS-CVD)技术,在金刚石表层沉积 SiO₂ 层,再通过气体电感耦合等离子体反应离子刻蚀 (ICP-RIE)形成条带结构。最后,在 SiO₂ 掩膜下由微波等离子体辅助化学气相沉积(MPCVD)硼掺杂选择性金刚石的均匀外延生长,并在 SiO₂/金刚石界面形成 C—Si 键。相对于分子束沉积法,选择气相沉积生长制备硅终端工艺更为简捷便利。特别是在选择生长的过程中完成重掺杂(p+)金刚石的形成和硅终端 2DHG 导电沟道的构建。但在其步骤的精简得同时也存在诸多得问题,如金刚

石表面硅终端形成具有不可测性。换言之,硅终端金刚石表面得 C—Si 键数量无法得到精确调控。其次,在等离子体增强刻蚀过程中,不可避免的会对硅终端金刚石界面造成损伤,影响其器件性能。最后,在生长过程中氢原子有与金刚石表面重新结合的可能,使硅终端金刚石表面 C—Si 键密度降低,影响其表面性能。

2.3 C—Si 金刚石的键合与界面

2.3.1 C—Si 金刚石的键合 图 3 为氢终端和硅终端不同电负性偶极子和金刚石/SiO₂ 界面 C—Si 金刚石亚表面的空穴聚集示意图。与氢终端金刚石 C—H 偶极子相似,硅终端金刚石 C—Si 偶极子也具有类似结构,而在 C—Si 偶极子中 Si 的电负性为 1.8, C—Si 偶极子的电负性差为 0.7 个鲍林单位,要高于 C—H 偶极子 0.4 个鲍林单位(C:2.5, H:2.1)。由此, C—Si 偶极子具有更大的偶极矩,可能表现出更负的电子亲和势。Schenk 等^[43]对金刚石 C(100):Si-(3×1) 表面进行了分析。发现在超真空 920 °C 退火后金刚石与 Si 原子层之间形成了 C—Si 键。经测量 C(100)面上 C—Si 金刚石表面的电子亲和势为(-0.86±0.1)eV,后续经测量(111)面的电子亲和势为-0.76 eV^[34]。

图 2 制备流程及界面结构示意图^[48]Fig. 2 Diagram of preparation process and interface structure^[48]

由于 C—H 偶极子的自发极化与空穴的累积相关, C—H 偶极子的电负性与 C—Si 偶极子具有相似的特性, 且 C—Si 偶极子具有更大的负电子亲和势, 因此可以预测 C—Si 金刚石将表现出 p 型导电。Schenk 等^[49]通过控制注入 O₂ 和 H₂O 分子的量以及在空气中暴露的条件下, 研究了硅(100)金刚石表面的氧化效应, 发现硅终端表面平滑呈台阶结构, 氧化表面保留了-0.26 eV 的负电子亲和能, 在内部形成了空穴累积层^[50]。值得关注的是, 由于 SiO₂ 是一种理想的栅介质, 金刚石中的 C 与 SiO₂ 中的 Si 直接键合为金刚石 MOSFETs 提供了更可靠的性能。

当金刚石氢化后, 金刚石的 VBM 比 SiC 高 1.5 eV 以上^[51]。当电子亲和力接近-0.9 eV 时^[52], SiC/金刚石界面的能带偏移约为 1.0 eV, 足以在 C—Si 结合的金金刚石亚表面积累空穴。值得注意的是, C—Si 金刚石界面不可避免的出现氧化现象, 换言之, 我们希望在硅终端金刚石的界面形成 C—Si—O 键合, 而避免 C—O—Si 键合的生成。这主要是由于 C—O 键合会导致金刚石表面态密度升高^[53], 而高界面态密度会降低金刚石器件沟道的性能。如 SiC 半导体器件的迁移率被限制在 100 cm²·V⁻¹·s⁻¹ 以下^[54]。界面态密度(D_{it})可由以下公式算出:

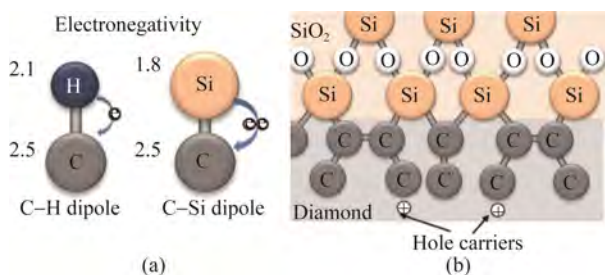
$$SS = (\ln 10) \frac{K_B T}{q} \frac{C_{OX} + C_D + qD_{it}}{C_{OX}} \quad (2)$$

其中: K_B 、 T 、 q 、 C_D 、 C_{OX} 分别为 Boltzmann 常数、温度、元电荷、耗尽层电容、栅氧化物电容。深层阈值区 C_D 可忽略, C_{OX} 为平面 Al₂O₃/SiO₂ 电容器的电容, C_{OX} 可处理为 $C_{OX}^{-1} = C_{SiO_2}^{-1} + C_{Al_2O_3}^{-1}$ 。对于不同栅长终端金刚石表面的沟道空穴迁移率(μ_{FE}), 可由以下关系得到:

$$\mu_{FE} = \frac{g_m L_G}{C_{OX} |V_{DS}|} \quad (3)$$

其中: g_m 为沟道宽度归一化的跨导, 可由线性区域的 I_D - V_{DS} 特性曲线导出。 L_G 为器件的栅极长度。

Fu 等^[53]采用选择气相生长法制备了 C—Si 金刚石 MOSFETs 并对其表面的键合进行了分析。图 4 为制备的器件沟道区 C—Si 金刚石表面的 Anger 电

图 3 (a)不同电负性的 C—Si 和 C—H 偶极子示意图; (b)金刚石/SiO₂ 界面 C—Si 金刚石亚表面的空穴聚集示意图^[48]Fig. 3 (a) Schematic of C—Si and C—H dipoles with different electronegativities; (b) Hole accumulation on C—Si diamond sub-surface at diamond/SiO₂ interface under electric field^[48]

2.3.2 C—Si 金刚石的界面分析与表征 一般认为, 当形成 C—Si 金刚石时, 会在金刚石末端界面形成单分子层或多分子层, 类似于 SiC/金刚石界面,

子能谱。将场发射 Anger 微探针测得的 C—Si 金刚石表面的俄歇电子能谱(AES)结果与标准 SiC 和 SiO₂ 材料的典型 AES 数据对比,推测金刚石表面同时存在 C—Si 和 O—Si 信号,由于硅谱峰更接近 SiC 的典型数据, C—Si 相关成分占主导地位。

另外, Zhu 等^[34]利用 EELS 光谱对硅终端金刚石界面进行了分析,硅终端金刚石界面的 EELS 结果如图 5 所示。研究发现(108±0.5)eV 处的峰从表面向金刚石内部区域逐渐变宽,并且在区域 3、2、1(圆圈)向较低值移动,证明其界面处 Si 键合方式发生变化,结果表明在其表面生成了 C—Si 键。

此外,与 C—H 金刚石 MOSFETs 的有关报道中发现,不同的金刚石晶向对于终端金刚石器件的性能有着强烈的影响^[56–62]。而金刚石(111)晶面具有更多的悬挂键,会使 C—Si 键合增加,且(111)金刚石中硼的掺杂浓度要比(100)金刚石中硼的掺杂浓度高^[63]。在氢终端(111)金刚石中,金刚石(111)表面具有较高密度的偶极子,产生空穴密度约为(100)金刚石的 2 倍^[64–65]。同样,对于 C—Si 金刚石来说也有影响,有关报道称在(111)金刚石面上沉积硅原子时会显示出二维(2×2)菱形硅结构,而在(100)界面生成

(3×1)结构^[66]。因此,在研究 C—Si 金刚石 MOSFETs 时必须要考虑其界面的特性。

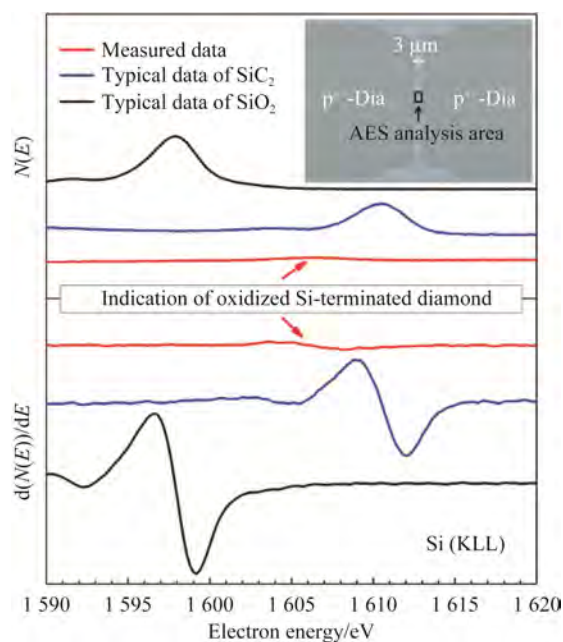


图4 器件沟道区 C—Si 金刚石表面的 Anger 电子能谱^[55]
Fig. 4 Auger electron energy spectrum of C—Si diamond surface in device channel region^[55]

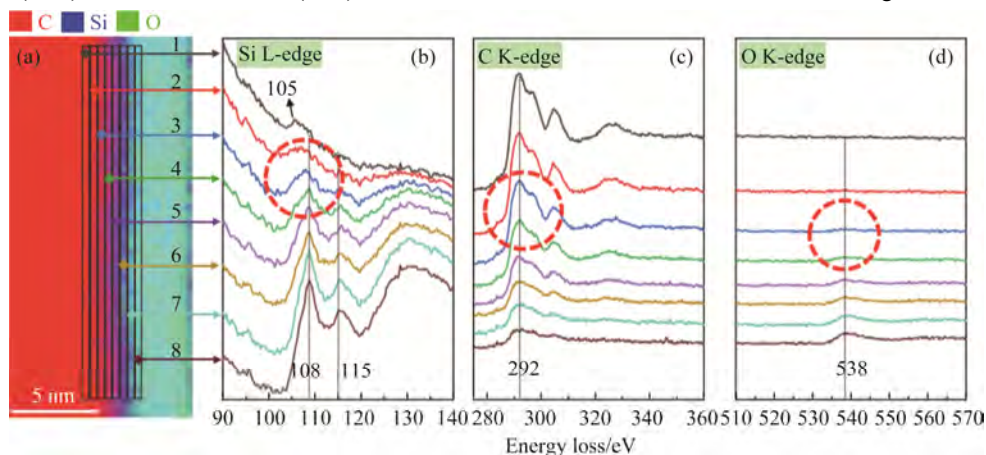


图5 (a)C、Si、O 元素叠加的 EELS 图。EELS 图中界面附近区域的(b) Si L 边, (c) C K 边, (d) O K 边的 EELS 光谱。红色虚线框包含界面区域的光谱特征^[34]

Fig. 5 (a) EELS map of the superimposed C, Si, and O elements. EELS spectra of (b) Si L-edge, (c) C K-edge, (d) O K-edge of the regions near the interface in the EELS map. The red dashed box contains the spectra features of the interface region^[34]

2.4 C—Si 金刚石器件特性

目前基于 C—Si 沟道的金刚石场效应管器件均呈现典型的增强型特征,这主要是由于硅终端金刚石表面栅氧化物的钝化作用所致。氧化硅基的金刚石表面具有较高的负电子亲和势,在其表面形成了较低的能带弯曲,导致表面沟道空穴导电性的消失,进而使得阈值电压向更负的方向偏移,获得关断状态。只有当栅极偏压增加到足够大时,空穴才会在栅极下方聚集形成 2DHG 沟道,使其导通,表现出

增强型半导体器件的特性。同时由表面硅自氧化生成的栅氧化物有较好的热稳定性,硅终端金刚石 MOSFETs 表现出较好的高温稳定的增强型器件性能。北京科技大学朱肖华^[66]制备了硼掺杂的 C—Si(001)单晶金刚石 MOSFETs 并对其输出和转移特性曲线进行了分析,研究发现,当 $V_{DS} = -1$ V 时,对应栅长的阈值电压分别为 3.0、-7.5、-6.0、-4.5 V,且当 $V_{DS} = 0 \sim -30$ V, $V_{GS} = -40 \sim 5$ V 时,栅长 L_G 分别为 4、8、10、14 μm 的最大输出电流密度分别为 -220、

-125、-86、-55 mA/mm, 器件表现出明显的增强型特性。

此外, 对氢终端和硅终端金刚石 MOSFETs 的高温稳定性对比分析发现, 随着温度的逐渐升高, 氢终端金刚石器件的电流密度先急剧下降, 而后趋于平稳状态, 在温度超过 100 °C 时, 其性能开始显著恶化; 然而在硅终端金刚石器件中, 其电流密度却呈现先下降后逐渐上升趋势, 并且当温度进一步升高到一定程度时, 电流密度反而比室温下有所升高。这一现象的产生是因为在外延层上掺有浓度不均匀的硼, 使得在高温下掺杂金刚石与衬底之间的电阻降低^[67-68], 导致其空穴载流子增加, 进而增加了其电流密度。另外, 硅终端器件中金刚石表面的栅介质 SiO₂ 能够与之形成稳定的 C—Si 键, 因而具有较高的热稳定性。

Fu 等^[55]采用原子层沉积法在(111)金刚石表面 300 °C 沉积 100 nm 厚的 Al₂O₃ 栅极绝缘体, 并制备了高性能的常关型氧化硅终端金刚石 MOSFETs。研究发现, 阈值电压(V_{th})约为 -5.3 V, $L_{SD}=3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $V_{GS}=-40\text{ V}$ 时具有较高的漏电流密度($I_{D,max}$)为 -300 mA/mm。说明采用 Al₂O₃ 绝缘栅的工艺比使用 SiO₂ 绝缘栅的 C—Si 金刚石器件具有更好的性能。

图 6 为部分增强型硅终端金刚石器件与氢终端金刚石器件的漏电流密度 $I_{D,max}$ 与阈值电压的数据总结^[17, 21, 23, 35, 39, 66, 70-71]。整体而言, 硅终端场效应管具有综合的高电流和阈值电压。尽管对于部分综合性能优异的氢终端金刚石 MOSFETs 来说会表现出较高的饱和漏电流^[70], 但在增强型器件中硅终端整体具有显著高的阈值电压。

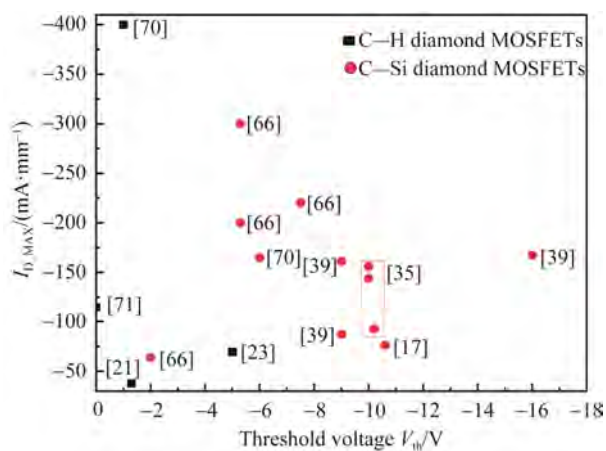


图 6 氢终端和硅终端金刚石 MOSFETs 性能对比

Fig. 6 Comparison of performance MOSFETs between C—H and C—Si diamond

为了提高硅终端金刚石场效应管器件的电流密度, 进一步开发了硼掺杂增强沟道电流浓度, 降低界面态的方法。通过利用重掺杂技术和选择生长技术在金刚石表面制备重硼掺杂区和未掺杂区, 可以在 SiO₂/金刚石形成碳硅键的同时有效降低源漏极欧姆接触电阻, 提高硅终端金刚石器件的综合性能, 增加其输出电流密度。再者, 随着温度的升高和偏压的施加, 硼原子变为受主离子态, 空穴载流子浓度得到增加。Zhu 等^[34]利用选择气相沉积法制备了具有高迁移率和良好的正常关断操作的 C—Si 界面 SiO₂/(111)金刚石 MOSFETs。通过对 C—Si 金刚石界面进行了分析发现, 金刚石与沉积的 SiO₂ 界面均匀平整, 且呈现出无应变的结构特征, 当 L_G 为 10 μm 时, 通过计算其沟道空穴迁移率达到 $200\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 界面态密度低至 $3.8\times 10^{11}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$ 。

此外, 对其电学性能进行了研究分析。当 $V_{DS}=-1\text{ V}$ 、 $L_G=4\text{ }\mu\text{m}$ 时具有最大的阈值电压为 -16 V。当 $V_{GS}=-40\text{ V}$ 、 L_G 为 4 μm 时, W_G 归一化后的最大漏极电流密度为 -167 mA/mm。在 $V_{DS}=-30\text{ V}$ 时器件的开/关比约为 10^7 。研究发现, I_D-V_{DS} 曲线并不饱和, 主要是由于在该器件中, 硼掺杂电极高于沟道区域的位置。加栅压时, 栅下电场不均匀, 部分电场向掺硼方向弯曲, 这种较低的有效电场导致较高的导通电阻, 进而导致不饱和电流分布。

3 结论与展望

硅终端金刚石有望表现出优异的器件性能。一方面, C—Si 偶极子比 C—H 具有更大的偶极矩, 更有利于 2DHG 中空穴的累积。另一方面, C—Si 金刚石的表面态密度更低。但随着人们对于 C—Si 金刚石 MOSFETs 的深入研究, 发现 C—Si 金刚石也存在诸多的问题:

1) 由于硅极易被氧化, 在制备过程中不可避免有氧气掺入, 在硅终端金刚石表面生成 C—O—Si 键, 导致其表面态密度升高, 对其器件的性能造成影响, 降低其迁移率。

2) 对于 C—Si 金刚石而言, 在金刚石表面的键合相对较为复杂。换言之, C—Si 金刚石器件的性能来源于其表面氧化物还是硅单质作用尚未得到直接确认, SiO₂/金刚石界面的作用机理仍未形成明确的结论。

3) 对于如何增强硅终端金刚石器件的耐压性, 减少界面态对沟道载流子耗尽作用, 提高其载流子

浓度和稳定性, 仍是其未来研究发展的主要方向。

针对于此, 可以围绕硅终端金刚石表面键合氧原子取代并分析其能带结构以揭示其作用机理; 通过原位制备等方式减少制备过程中的氧化因素以增加其导电性; 结合掺杂技术调控空穴浓度以增加其导电性能等方向进一步开展研究。总之, 硅终端金刚石作为有效的增强型器件已表现出良好的性能, 为其进一步与耗尽型器件的逻辑集成提供了有效的思路。与此同时, 理想的硅终端金刚石半导体仍以形成低界面态密度的界面为目标, 构建与硅器件工艺兼容的高质量栅介质结构, 会使器件进一步发挥高迁移率与稳定性优势, 在未来将具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] BADER S J, LEE H, CHAUDHURI R, et al. Prospects for wide bandgap and ultrawide bandgap CMOS devices[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2020, 67(10): 4010–4020.
- [2] 刘金龙, 李成明, 陈良贤, 等. 高频大功率金刚石薄膜场效应管的研究进展[J]. 无机材料学报, 2010, 25(9): 897–905.
LIU Jinlong, LI Chengming, CHEN Liangxian, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 2010, 25(9): 897–905.
- [3] 贾燕伟, 何健, 何萌, 等. h-BN/diamond 异质结的制备与沟道载流子输运性质[J]. 物理学报, 2022, 71(22): 319–326.
JIA Yanwei, HE Jian, HE Meng, et al. Acta Phys Sin (in Chinese), 2022, 71(22): 319–326.
- [4] 王维, 蔚翠, 何泽召, 等. h-BN/Al₂O₃ 栅介质氢终端金刚石场效应晶体管[J]. 半导体技术, 2022, 47(9): 687–691.
WANG Wei, YU Cui, HE Zezhao, et al. Semicond Technol (in Chinese), 2022, 47(9): 687–691.
- [5] 马志斌. MPCVD 金刚石的制备与应用研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1): 1–4.
MA Zhibin. Diam Abras Eng (in Chinese), 2021, 41(1): 1–4.
- [6] KUDRYAVTSEV O S, BAGRAMOV R H, SATANIN A M, et al. Fano-type effect in hydrogen-terminated pure nanodiamond[J]. Nano Lett, 2022, 22(7): 2589–2594.
- [7] YU C, ZHOU C J, GUO J C, et al. Transport properties of the two-dimensional hole gas for H-terminated diamond with an Al₂O₃ passivation layer[J]. Crystals, 2022, 12(3): 390.
- [8] ZHANG M H, LIN F, WANG W, et al. HfAlO_x/Al₂O₃ bilayer dielectrics for a field effect transistor on a hydrogen-terminated diamond[J]. Materials, 2022, 15(2): 446.
- [9] XING K J, AUKARASEREENONT P, RUBANOV S, et al. Hydrogen-terminated diamond MOSFETs using ultrathin glassy Ga₂O₃ dielectric formed by low-temperature liquid metal printing method[J]. ACS Appl Electron Mater, 2022, 4(5): 2272–2280.
- [10] NEBEL C E. CVD diamond: a review on options and reality[J]. Funct Diam, 2023, 3(1): 1–10.
- [11] 胡晓君, 郑玉浩, 陈成克, 等. 纳米金刚石薄膜的掺杂、表/界面调控及性能研究[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(5): 865–874.
HU Xiaojun, ZHENG Yuhao, CHEN Chengke, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2022, 51(5): 865–874.
- [12] SASAMA Y, KOMATSU K, MORIYAMA S, et al. High-mobility diamond field effect transistor with a monocrystalline h-BN gate dielectric[J]. APL Mater, 2018, 6(11): 111105.
- [13] SASAMA Y, KAGEURA T, IMURA M, et al. High-mobility p-channel wide-bandgap transistors based on hydrogen-terminated diamond/hexagonal boron nitride heterostructures[J]. Nat Electron, 2022, 5(1): 37–44.
- [14] DRICHE K, UMEZAWA H, ROUGER N, et al. Characterization of breakdown behavior of diamond Schottky barrier diodes using impact ionization coefficients[J]. Jpn J Appl Phys, 2017, 56(4S): 04CR12.
- [15] HE S, WANG Y F, CHEN G Q, et al. Normally-off hydrogen-terminated diamond field-effect transistor with SnO_x dielectric layer formed by thermal oxidation of Sn[J]. Materials, 2022, 15(14): 5082.
- [16] CHANG C D, CHEN G Q, SHAO G Q, et al. Normally-off hydrogen-terminated diamond field effect transistor with a bilayer dielectric of Er₂O₃/Al₂O₃[J]. Diam Relat Mater, 2022, 123: 108848.
- [17] BI T, NIU J X, OI N, et al. Application of 2DHG diamond p-FET in cascode with normally-OFF operation and a breakdown voltage of over 1.7 kV[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2020, 67(10): 4006–4009.
- [18] 付裕. 氢终端和硅终端金刚石 MOSFET 研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
FU Yu. Study on hydrogen-terminated and silicon-terminated diamond MOSFET[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [19] KAWARADA H, AOKI M, ITO M. Enhancement mode metal-semiconductor field effect transistors using homoepitaxial diamonds[J]. Appl Phys Lett, 1994, 65(12): 1563–1565.
- [20] LIU J, OHSATO H, DA B, et al. Investigation of Ohmic Contact Resistance, Surface Resistance, and Channel Resistance for Hydrogen-Terminated Diamond MOSFETs[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2022, 69(3): 1181–1185.
- [21] LIU J W, LIAO M Y, IMURA M, et al. Normally-off HfO₂-gated diamond field effect transistors[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(9): 092905.
- [22] OI N, KUDO T, INABA M, et al. Normally-OFF two-dimensional hole gas diamond MOSFETs through nitrogen-ion implantation[J]. IEEE Electron Device Lett, 2019, 40(6): 933–936.
- [23] LIU J W, OHSATO H, LIAO M Y, et al. Logic circuits with hydrogenated diamond field-effect transistors[J]. IEEE Electron Device Lett, 2017, 38(7): 922–925.
- [24] YANG Y, KOECK F A, WANG X Y, et al. Surface transfer doping of MoO₃ on hydrogen terminated diamond with an Al₂O₃ interfacial layer[J]. Appl Phys Lett, 2022, 120(19): 120.
- [25] ZHANG M H, WANG W, WEN F, et al. Large V_{TH} of normally-OFF field effect transistor with yttrium gate material directly deposited on hydrogen-terminated diamond[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2022, 69(7): 3563–3567.
- [26] KAWARADA H. Diamond p-FETs using two-dimensional hole gas for high frequency and high voltage complementary circuits[J]. J Phys D: Appl Phys, 2023, 56(5): 053001.
- [27] KAWARADA H, YAMADA T, XU D, et al. Wide temperature (10 K–700 K) and high voltage (~1 000 V) operation of C-H diamond MOSFETs for power electronics application[C]// 2014 IEEE International Electron Devices Meeting. San Francisco, CA, USA. IEEE, 2015: 11.2.1–11.2.4.
- [28] LEY L, RISTEIN J, MEIER F, et al. Surface conductivity of the diamond: a novel transfer doping mechanism[J]. Phys B Condens

- Matter, 2006, 376–377: 262–267.
- [29] KITABAYASHI Y, KUDO T, TSUBOI H, et al. Normally-off C–H diamond MOSFETs with partial C–O channel achieving 2-kV breakdown voltage[J]. IEEE Electron Device Lett, 2017, 38(3): 363–366.
- [30] YU X X, ZHOU J J, QI C J, et al. A high frequency hydrogen-terminated diamond MISFET with f_T/f_{max} of 70/80 GHz[J]. IEEE Electron Device Lett, 2018, 39(9): 1373–1376.
- [31] UEDA K, KASU M, YAMAUCHI Y, et al. Diamond FET using high-quality polycrystalline diamond with f_T of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz[J]. IEEE Electron Device Lett, 2006, 27(7): 570–572.
- [32] IMANISHI S, HORIKAWA K, OI N, et al. 3.8 W/mm RF power density for ALD Al_2O_3 -based two-dimensional hole gas diamond MOSFET operating at saturation velocity[J]. IEEE Electron Device Lett, 2018, 40(2): 279–282.
- [33] YU C, ZHOU C J, GUO J C, et al. Hydrogen-terminated diamond MOSFETs on (0 0 1) single crystal diamond with state of the art high RF power density[J]. Funct Diam, 2022, 2(1): 64–70.
- [34] ZHU X H, BI T, YUAN X L, et al. C–Si interface on $SiO_2/(111)$ diamond p-MOSFETs with high mobility and excellent normally-off operation[J]. Appl Surf Sci, 2022, 593: 153368.
- [35] FU Y, CHANG Y H, KONO S, et al. –10 V threshold voltage high-performance normally-OFF C–Si diamond MOSFET formed by p-diamond-first and silicon molecular beam deposition approaches[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2022, 69(5): 2236–2242.
- [36] SCHENK A K, SEAR M J, DONTSCHUK N, et al. Development of a silicon–diamond interface on (111) diamond[J]. Appl Phys Lett, 2020, 116(7): 071602.
- [37] TSAI A, AGHAJAMALI A, DONTSCHUK N, et al. Epitaxial formation of SiC on (100) diamond[J]. ACS Appl Electron Mater, 2020, 2(7): 2003–2009.
- [38] GEIS M W, GREGORY J A, PATE B B. Capacitance-voltage measurements on metal- SiO_2 -diamond structures fabricated with (100)- and (111)-oriented substrates[J]. IEEE Trans Electron Devices, 1991, 38(3): 619–626.
- [39] EDMONDS M T, WANKE M, TADICH A, et al. Surface transfer doping of hydrogen-terminated diamond by $C_{60}F_{48}$: Energy level scheme and doping efficiency[J]. J Chem Phys, 2012, 136(12): 011605.
- [40] OSLINKER B, HOXLEY D, TADICH A, et al. Surface transfer doping of oxidised silicon-terminated (111) diamond using MoO_3 [J]. Diam Relat Mater, 2023, 133: 109712.
- [41] QIAO P F, LIU K, ZHANG S, et al. Origin of two-dimensional hole gas formation on Si-treated diamond surfaces: surface energy band diagram perspective[J]. Appl Surf Sci, 2022, 584: 152560.
- [42] CHAKRAPANI V, ANGUS J C, ANDERSON A B, et al. Charge transfer equilibria between diamond and an aqueous oxygen electrochemical redox couple[J]. Science, 2007, 318(5855): 1424–1430.
- [43] SCHENK A, TADICH A, SEAR M, et al. Formation of a silicon terminated (100) diamond surface[J]. Appl Phys Lett, 2015, 106(19): 191603.
- [44] GRAUPNER R, MAIER F, RISTEIN J, et al. High-resolution surface-sensitive C1s core-level spectra of clean and hydrogen-terminated diamond (100) and (111) surfaces[J]. Phys Rev B, 1998, 57(19): 12397–12409.
- [45] KINSKY J, GRAUPNER R, STAMMLER M, et al. Surface vibrations on clean, deuterated, and hydrogenated single crystal diamond(100) surfaces studied by high-resolution electron energy loss spectroscopy[J]. Diam Relat Mater, 2002, 11(3–6): 365–370.
- [46] XUE K, HO H P, XU J B. Local study of thickness-dependent electronic properties of ultrathin silicon oxide near SiO_2/Si interface[J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40(9): 2886–2893.
- [47] SORARÙ G D, D'ANDREA G, GLISENTI A. XPS characterization of gel-derived silicon oxycarbide glasses[J]. Mater Lett, 1996, 27(1–2): 1–5.
- [48] BI T, CHANG Y H, FEI W X, et al. C–Si bonded two-dimensional hole gas diamond MOSFET with normally-off operation and wide temperature range stability[J]. Carbon, 2021, 175: 525–533.
- [49] SCHENK A K, SEAR M J, TADICH A, et al. Oxidation of the silicon terminated (100) diamond surface[J]. J Phys: Condens Matter, 2017, 29(2): 025003.
- [50] SEAR M J, SCHENK A K, TADICH A, et al. P-type surface transfer doping of oxidised silicon terminated (100) diamond[J]. Appl Phys Lett, 2017, 110(1): 011605.
- [51] STUTZMANN M, GARRIDO J A, EICKHOFF M, et al. Direct biofunctionalization of semiconductors: a survey[J]. Phys Stat Sol (a), 2006, 203(14): 3424–3437.
- [52] SCHENK A K, TADICH A, SEAR M J, et al. The surface electronic structure of silicon terminated (100) diamond[J]. Nanotechnology, 2016, 27(27): 275201.
- [53] SOUKIASSIAN P, AMY F. Silicon carbide surface oxidation and SiO_2/SiC interface formation investigated by soft X-ray synchrotron radiation[J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2005, 144–147: 783–788.
- [54] TACHI K, KANEKO M, KIMOTO T. Mobility improvement of 4H-SiC (0001) MOSFETs by a three-step process of H_2 etching, SiO_2 deposition, and interface nitridation[J]. Appl Phys Express, 2021, 14(3): 031001.
- [55] FU Y, CHANG Y H, ZHU X H, et al. 300 mA/mm drain current density P-type enhancement-mode oxidized Si-terminated (111) diamond MOSFETs with ALD Al_2O_3 gate insulator[C]//2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2022: 121–124.
- [56] CHEN G Q, WANG W, HE S, et al. Leakage Current reduction of normally off hydrogen-terminated diamond field effect transistor utilizing dual-barrier Schottky gate[J]. J Appl Phys, 2022, 132(1): 015702.
- [57] WANG F, CHEN G Q, WANG W, et al. High-threshold-voltage and low-leakage-current of normally-off H-diamond FET with self-aligned Zr/ ZrO_2 gate[J]. Diam Relat Mater, 2023, 134: 109774.
- [58] KUNTUMALLA M K, ZHENG Y S, ATTRASH M, et al. Microwave N_2 plasma nitridation of H-diamond (111) surface studied by ex situ XPS, HREELS, UPS, TPD, LEED and DFT[J]. Appl Surf Sci, 2022, 600: 154085.
- [59] FUKUSHIMA H, TANAKA M M, UMEZAWA H, et al. Development of differential amplifier circuits based on radiation hardened H-diamond MOSFET (RADDFET)[J]. Diam Relat Mater, 2023, 134: 109758.
- [60] 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): 028101.
ZHANG Jinfeng, XU Jiamin, REN Zeyang, et al. Acta Phys Sin (in Chinese), 2020, 69(2): 028101.
- [61] 陈珈希, 张喜云, 李尚升, 等. 碳酸钙掺杂对1b 型金刚石沿不同晶面生长行为的影响[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(11): 2053–2059.

- CHEN Jiayi, ZHANG Xiyun, LI Shangsheng, et al. *J Synth Cryst* (in Chinese), 2021, 50(11): 2053–2059.
- [62] PAKES C I, GARRIDO J A, KAWARADA H. Diamond surface conductivity: properties, devices, and sensors[J]. *MRS Bull*, 2014, 39(6): 542–548.
- [63] KAWAI S, YAMANO H, SONODA T, et al. Nitrogen-terminated diamond surface for nanoscale NMR by shallow nitrogen-vacancy centers[J]. *J Phys Chem C*, 2019, 123(6): 3594–3604.
- [64] CRAWFORD K G, MAINI I, MACDONALD D A, et al. Surface transfer doping of diamond: a review[J]. *Prog Surf Sci*, 2021, 96(1): 100613.
- [65] VERONA C, ARCIPRETE F, FOFFI M, et al. Influence of surface crystal-orientation on transfer doping of V_2O_5/H -terminated diamond[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 112(18): 181602.
- [66] 朱肖华. CVD 金刚石制备及金刚石金属氧化物场效应晶体管研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- ZHU Xiaohua. Preparation of CVD diamond and study on diamond metal oxide field effect transistor (in Chinese, dissertation). Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [67] KITAGOH S, OKADA R, KAWANO A, et al. Cross-sectional TEM study and film thickness dependence of T_c in heavily boron-doped superconducting diamond[J]. *Phys C Supercond Appl*, 2010, 470: S610–S612.
- [68] LAGRANGE J P, DENEUVILLE A, GHEERAERT E. A large range of boron doping with low compensation ratio for homoepitaxial diamond films[J]. *Carbon*, 1999, 37(5): 807–810.
- [69] FU Y, KONO S, KAWARADA H, et al. Electrical characterization of metal/ Al_2O_3/SiO_2 /oxidized-Si-terminated (C–Si–O) diamond capacitors[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2022, 69(7): 3604–3610.
- [70] FEI W X, BI T, IWATAKI M, et al. Publisher's Note: "Oxidized Si terminated diamond and its MOSFET operation with SiO_2 gate insulator"[J]. *Appl Phys Lett*, 2020, 116(26): 212103.
- [71] LIU J W, OOSATO H, LIAO M Y, et al. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y_2O_3 oxide insulator grown by electron beam evaporator[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, 110(20): 203502.