

**不同晶面的氢终端单晶金刚石场效应晶体管特性**

张金凤 徐佳敏 任泽阳 何琦 许晟瑞 张春福 张进成 郝跃

**Characteristics of hydrogen-terminated single crystalline diamond field effect transistors with different surface orientations**

Zhang Jin-Feng Xu Jia-Min Ren Ze-Yang He Qi Xu Sheng-Rui Zhang Chun-Fu Zhang Jin-Cheng Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 028101 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191013

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191013>

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**

单晶金刚石氢终端场效应晶体管特性

Characteristics of H-terminated single crystalline diamond field effect transistors

物理学报. 2017, 66(20): 208101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.208101>

高跨导氢终端多晶金刚石长沟道场效应晶体管特性研究

Characterization of high-transconductance long-channel hydrogen-terminated polycrystal diamond field effect transistor

物理学报. 2018, 67(6): 068101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171965>

硅/锗基场效应晶体管沟道中载流子散射机制研究进展

Progress of the study on carrier scattering mechanisms of silicon/germanium field effect transistors

物理学报. 2019, 68(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191146>

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

物理学报. 2018, 67(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响

Effect of edge inclination of single crystal diamond on homoepitaxial growth

物理学报. 2018, 67(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181537>

## 不同晶面的氢终端单晶金刚石场效应晶体管特性\*

张金凤<sup>1)</sup> 徐佳敏<sup>1)</sup> 任泽阳<sup>1)†</sup> 何琦<sup>1)</sup> 许晟瑞<sup>1)</sup>  
张春福<sup>1)</sup> 张进成<sup>1)2)</sup> 郝跃<sup>1)</sup>

1) (西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体技术国防重点学科实验室, 西安 710071)

2) (陕西省石墨烯联合实验室, 西安 710071)

(2019年7月2日收到; 2019年11月5日收到修改稿)

通过微波等离子体化学气相沉积技术生长单晶金刚石并切割得到(110)和(111)晶面金刚石片,以同批器件工艺制备两种晶面上栅长为6 μm的氢终端单晶金刚石场效应管,从材料和器件特性两方面对两种晶面金刚石进行对比分析。(110)面和(111)面金刚石的表面形貌在氢终端处理后显著不同,光学性质则彼此相似。 $V_{GS} = -4$  V时,(111)金刚石器件获得的最大饱和电流为80.41 mA/mm,约为(110)金刚石器件的1.4倍;其导通电阻为48.51 Ω·mm,只有(110)金刚石器件导通电阻的67%。通过对器件电容-电压特性曲线的分析得到,(111)金刚石器件沟道中最大载流子密度与(110)金刚石器件差异不大。分析认为,(111)金刚石器件获得更高饱和电流和更低导通电阻,应归因于较低的方阻。

**关键词:** 单晶金刚石, (110)晶面, (111)晶面, 场效应晶体管**PACS:** 81.05.ug, 85.30.De, 84.37.+q**DOI:** 10.7498/aps.69.20191013

## 1 引言

金刚石拥有一系列优点,比如禁带宽度大(5.5 eV),热导率高[22 W/(cm·K)],击穿场强大(> 10 MV/cm),载流子迁移率高[电子4500 cm<sup>2</sup>/(V·s)、空穴3800 cm<sup>2</sup>/(V·s)]<sup>[1-4]</sup>。因此金刚石被认为是理想的半导体材料,特别是在高频、高功率和高温器件应用中具有远大前景。然而金刚石的体掺杂剂硼和磷的激活能较大,室温下难以激活。由C—H键覆盖的金刚石表面即氢终端金刚石表面,可由氢等离子体处理金刚石表面获得,其暴露在空气中会吸附类受主原(离)子基团,室温下也可在亚表面区域产生一层二维空穴气(two-dimensional hole gas, 2 DHG),非常适合用作场

效应晶体管的导电沟道。目前大多数金刚石器件都是制备在氢终端金刚石上。

室温下,氢终端金刚石表面2 DHG的浓度范围为10<sup>12</sup>—10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>,霍尔迁移率范围为1—200 cm<sup>2</sup>/(V·s),不同晶面的氢终端单晶金刚石在载流子浓度、迁移率、方阻等方面有所不同<sup>[5-9]</sup>。根据文献报道,基于多晶金刚石制备的氢终端场效应晶体管的输出电流往往大于单晶金刚石器件<sup>[10-13]</sup>,这与多晶金刚石的择优取向是⟨110⟩和⟨111⟩等晶向有关。目前,氢终端金刚石场效应晶体管特性已达最大输出电流为1.3 A/mm<sup>[14]</sup>、截止频率为70 GHz<sup>[15]</sup>、最大振荡频率为120 GHz<sup>[16]</sup>和1 GHz下的输出功率密度为3.8 W/mm<sup>[17]</sup>。然而,迄今还未见直接比较基于同一单晶金刚石母体的不同晶面上器件特性的公开报道。

\* 国家重点研发计划(批准号: 2018YFB0406504)、国家重点实验室基金(批准号: 6142605180102)、国家自然科学基金(批准号: 61874080)和博士后创新人才支持计划(批准号: BX20190263)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn

采用微波等离子体化学气相淀积 (MPCVD) 的方法在高温高压 (HPHT) 金刚石衬底上外延生长单晶金刚石, 对其切割分别得到 (110) 和 (111) 晶面的单晶金刚石片, 并且基于两种不同晶面的单晶金刚石制备金属-半导体场效应晶体管 (MESFET). (110) 和 (111) 晶面单晶金刚石上栅长为  $6\ \mu\text{m}$  的器件分别获得  $58.02\ \text{mA}/\text{mm}$  和  $80.41\ \text{mA}/\text{mm}$  的输出电流, 为了研究不同晶面氢终端单晶金刚石的差异性, 我们从材料和器件两个层面进行分析研究.

## 2 实验过程

实验中使用的金刚石衬底是高温高压型衬底. 首先, 对衬底进行预处理: 先进行精细抛光, 获得平整的表面; 然后将抛光后的衬底放入  $250\ ^\circ\text{C}$  的  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  (1:1) 混合溶液中处理 1 h, 去除衬底表面的非金刚石相; 接着将衬底分别在丙酮、无水乙醇、去离子水中超声清洗 15 min, 获得洁净的表面; 最后用含 2% 氧气的氢等离子体对衬底刻蚀 30 min, 去除抛光带来的机械损伤. 其次, 将预处理后的衬底放入 MPCVD 设备的腔体中外延生长得到  $3.5\ \text{mm}$  厚的单晶金刚石, 通过激光切割以及研磨后得到 (110) 和 (111) 晶面单晶金刚石. 生长

过程中压强、温度和微波功率分别为  $320\ \text{mbar}$ ,  $915\ ^\circ\text{C}$ ,  $3.9\ \text{kW}$ , 气体总流量为  $200\ \text{sccm}$ ,  $\text{CH}_4$  浓度为 6%. 最后, 将两种不同晶面的样品在氢等离子体氛围中处理 20 min, 并在氢气氛围中冷却到室温, 得到氢终端金刚石表面.

图 1 所示为器件的制备流程. 首先使用电子束蒸发的方法在氢终端金刚石表面蒸镀  $100\ \text{nm}$  厚的金 [18], 用来与氢终端金刚石形成欧姆接触, 同时保护氢终端表面. 接着进行有源区光刻和金的湿法腐蚀, 使用  $\text{KI}/\text{I}_2$  溶液将有源区之外的金腐蚀掉. 再将腐蚀后的样品置于低功率的氧等离子体中处理 10 min, 使有源区之外暴露出的氢终端表面变为高阻的氧终端表面, 形成器件之间的隔离区. 接着进行栅窗口光刻, 湿法腐蚀去掉窗口中的金, 光刻胶下方留下的金则作为源、漏电极, 同时由于金的横向腐蚀, 实际的源、漏电极间距大于栅窗口定义的栅长. 最后再次使用电子束蒸发的方法在样品表面蒸镀  $100\ \text{nm}$  厚的铝, 金属剥离后得到栅电极, 完成整个 MESFET 器件的制备. 制备的器件栅长为  $6\ \mu\text{m}$ , 栅宽为  $50\ \mu\text{m}$ . 对 (110) 和 (111) 晶面单晶金刚石片分别进行了原子力显微镜 (AFM)、光致发光 (PL) 和 Raman 测试, 用 Keithley 4200 半导体分析仪测试分析所制成器件的  $I$ - $V$  特性、 $C$ - $V$  特性.

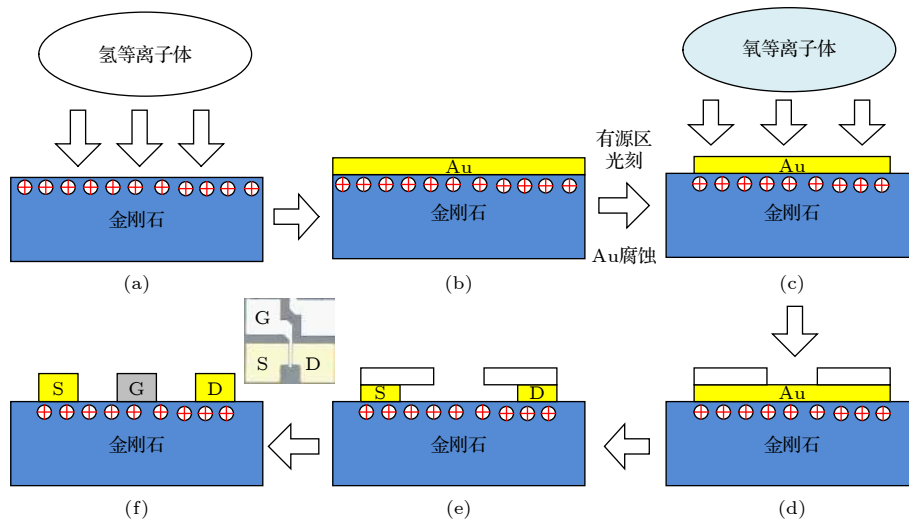


图 1 器件制备流程图 (a) 氢等离子体处理; (b) Au 沉积; (c) 隔离工艺; (d) 栅窗口光刻; (e) Au 腐蚀; (f) Al 沉积及剥离, 右上角为器件俯视图显微照片

Fig. 1. Schematic diagram of the device fabrication process: (a) Hydrogen plasma treatment; (b) gold deposition; (c) device isolation; (d) gate window photolithography; (e) wet etching of gold; (f) aluminum deposition and lifting off. The inset at the upper right corner of (f) is the top view of the device.

### 3 结果与讨论

分别对氢等离子体处理前后的 (110) 和 (111) 单晶金刚石表面进行 AFM 测试, 测试面积为  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ . 氢等离子体处理前后的样品测试结果分别如图 2 和图 3 所示. 处理之前, (110) 面和 (111) 面金刚石表面的均方根粗糙度分别为 1.75 nm 和 1.24 nm. 处理之后, (110) 氢终端金刚石表面出现大小不一的鹰眼状刻蚀坑, 均方根粗糙度大幅度增大, 为 13.5 nm. 出现刻蚀坑的原因可能是, 氢处理之前的样品上存在位错, 这些位错在经过氢等离子体刻蚀后形成了大小不一的刻蚀坑<sup>[19]</sup>. (111) 氢终端金刚石表面呈现为排列有序的长条状形貌, 而且表面粗糙度变化不大, 均方根粗糙度为 1.14 nm.

Raman 和 PL 测试结果如图 4 所示, 测试时采用的都是波长为 514.5 nm 的激光器. (110) 和 (111) 面金刚石的拉曼谱都出现了位于  $1332.5\ \text{cm}^{-1}$  的  $\text{SP}^3$  杂化 C—C 键对应的金刚石特征峰, 峰位没有发生明显的位移, 说明样品中张应力小. 尖锐的

特征峰和平整的基线表明 (110) 和 (111) 金刚石的结构有序度都很高, 没有明显的非晶相存在. 图 4(a) 中插图所示为特征峰的半高宽 (FWHM), (111) 金刚石半高宽为  $4.0\ \text{cm}^{-1}$ , (110) 金刚石为  $3.9\ \text{cm}^{-1}$ , 近似一致. 从图 4(b) 可以看出, (110) 和 (111) 金刚石的 PL 光谱都有明显的光致发光峰, 尤其在波长约为 700 nm 附近存在明显的宽峰, 而且该宽峰不是左右对称型的, 这表明其是由多个峰组合而成. 对于 CVD 金刚石而言, 该发光中心一般与 N, Si 有关. 此外, PL 光谱图中还存在波长为 575.7 nm 和 637.9 nm 的发光中心, 且 (111) 金刚石的峰强度较高, 这表明了两个样品都存在中性的氮空位缺陷 (即  $[\text{N-V}]^0$ )、带负电的氮空位缺陷 (即  $[\text{N-V}]^-$ )<sup>[20,21]</sup>. Raman 和 PL 光谱图表明, 源于同一颗 CVD 单晶金刚石的 (110) 和 (111) 金刚石片并没有因为表面晶向不同引起光学性质上的显著差异.

图 5 给出制备的栅长  $L_G = 6\ \mu\text{m}$ , 栅宽  $W_G = 50\ \mu\text{m}$  的 MESFET 的栅-源二极管的  $I$ - $V$  特性.  $V_{\text{GS}} = 3\ \text{V}$  时, 器件 A 与 B 的反向栅漏电皆小于  $2 \times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$ . 然而当栅电压小于  $-3\ \text{V}$  时, 器件 A 与 B 的正向栅漏电迅速增大, 并且在栅电压为

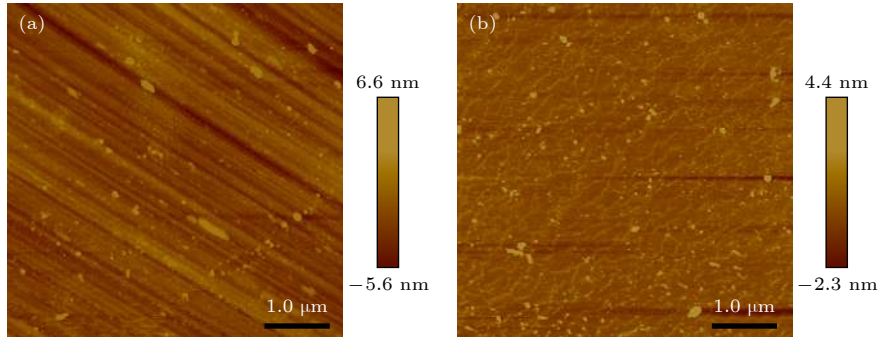


图 2 氢等离子体处理前的金刚石表面形貌 (a) (110) 面; (b) (111) 面

Fig. 2. Surface morphology of the diamond before hydrogen plasma treatment: (a) (110) plane; (b) (111) plane.

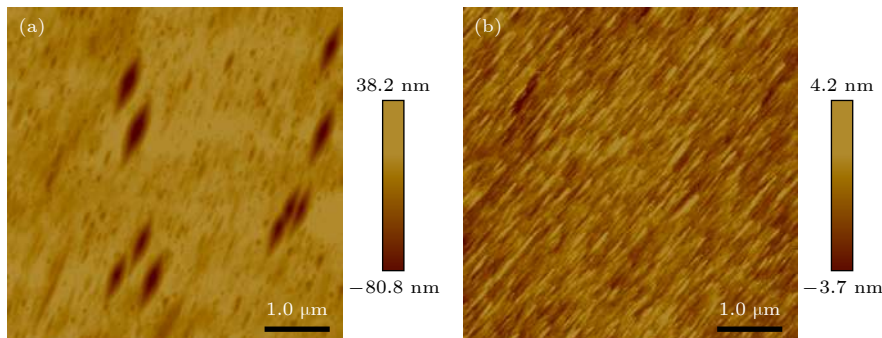


图 3 氢等离子体处理后的金刚石表面形貌 (a) (110) 面; (b) (111) 面

Fig. 3. Surface morphology of the diamond after hydrogen plasma treatment: (a) (110) plane; (b) (111) plane.

-4 V 时分别达  $4.0 \times 10^{-4}$  和  $1.4 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>. 器件 A 栅泄漏电流较大的可能原因之一是氢等离子体处理后 (110) 氢终端金刚石表面出现了刻蚀坑. 本文的器件和大量采用 Al 栅的氢终端金刚石 MESFET 的栅正向耐压都远大于 Al 与氢终端金

刚石表面的肖特基势垒高度 (0.62 eV)<sup>[22]</sup>, 其原因可能是在 Al 与氢终端金刚石之间生成一层氧化铝, 这一氧化层使 Al 栅的氢终端金刚石 MESFET 器件实际上成为了金属-氧化物-半导体 (MOS) 的器件结构<sup>[23-25]</sup>. 而且, 器件 A 和 B 的栅

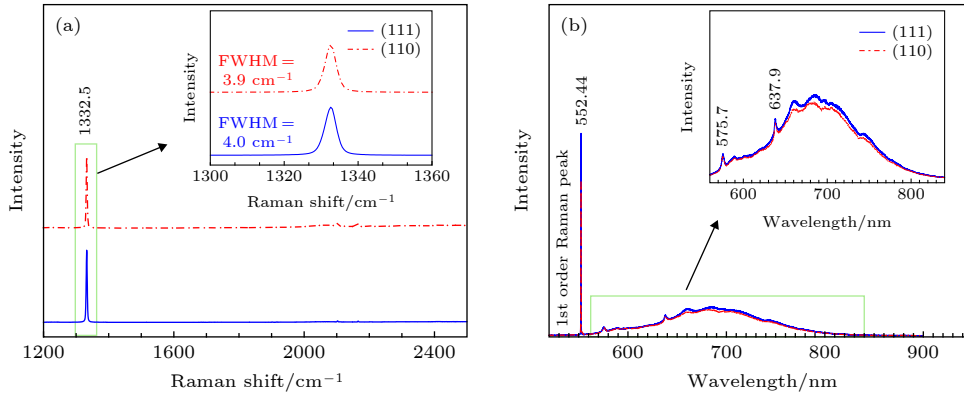


图 4 不同表面金刚石的 (a) Raman 光谱图, (b) PL 光谱

Fig. 4. (a) Raman spectra and (b) photoluminescence (PL) spectra of the diamond plates with different surface orientations.

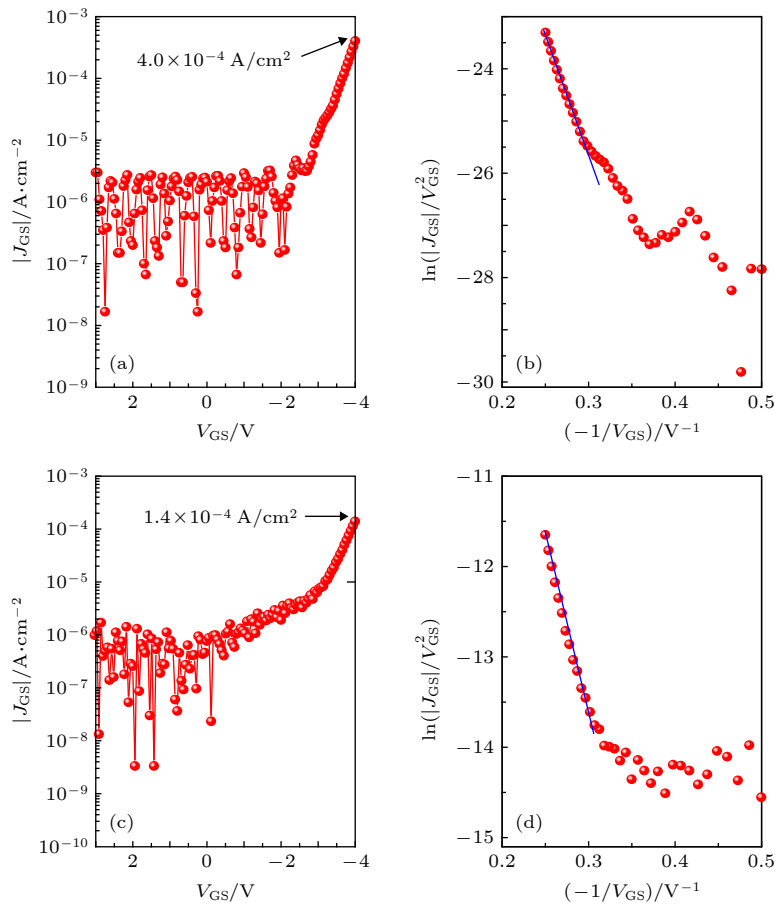


图 5 栅-源二极管的  $I$ - $V$  特性以及正向偏置下的拟合结果 (a) A 器件  $I$ - $V$  特性; (b) 图 (a) 部分栅压区的拟合结果; (c) B 器件  $I$ - $V$  特性; (d) 图 (c) 部分栅压区的拟合结果

Fig. 5. Current-voltage characteristics of the gate-source diodes and fitting results at the forward bias: (a) and (b) are for device A; (c) and (d) are for device B.

漏电近似与 3 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(由铝膜氧化得到)MOS 器件<sup>[26]</sup>处于同一水准,但是高于 34.1 nm HfO<sub>2</sub> (4 nm ALD-HfO<sub>2</sub>/30.1 nm SD-HfO<sub>2</sub>) MOS器件<sup>[27]</sup>,这也从另一面说明 Al 栅 MESFET 器件中应存在非故意引入的氧化铝介质层. 当栅电压小于 -3.3 V 时,栅-源二极管的  $I$ - $V$  特性可以通过关系式  $I \propto V^2 \exp(a/V + b)$  进行 Fowler-Nordheim 隧穿机制拟合<sup>[28]</sup>,其中  $a$  和  $b$  是拟合参数. 这表明高的正向偏置栅压下,空穴的隧穿是引起栅的正向泄漏电流的主要因素.

器件的输出特性如图 6 所示,都是耗尽型的 p 沟道器件. 器件 A 的最大输出电流  $I_{Dmax}$  在栅电压  $V_{GS} = -4$  V 时为 -58.02 mA/mm,而器件 B 的为 -80.41 mA/mm,约为器件 A 的 1.4 倍. 线性区的导通电阻  $R_{on}$  随着栅电压变化而变化,当  $V_{GS} = -4$  V 时,器件 A 的导通电阻  $R_{on}$  为 71.93  $\Omega \cdot \text{mm}$ ,器件 B 的为 48.51  $\Omega \cdot \text{mm}$ ,后者只有前者的 67%. 器件转移特性如图 7 所示,两者都是  $V_{DS} = -6$  V

时测得的. 从  $\sqrt{|I_D|} - V_{GS}$  关系中得到器件 A, B 的阈值电压  $V_T$  分别为 0.43 V 和 0.61 V. 随着  $V_{GS}$  从  $V_T$  向 -4 V 移动,器件 A 和 B 的跨导都近似地线性增大,其最大值  $g_{mmax}$  可分别达到 18.9 mS/mm 和 21.51 mS/mm. 此外,器件 A 与 B 的开关比 (on/off ratio) 都达到  $10^8$  以上,在关态下的漏极电流与栅电流比较可知主要由栅漏电造成,说明器件隔离工艺和金刚石绝缘性都较好.

图 8 总结了部分已报道的栅长 4—11  $\mu\text{m}$  的单晶金刚立场效应管最大饱和电流和最大跨导值随栅长的变化关系,同时列入本文的器件数据. 可以发现,在长沟道器件中,栅长 6  $\mu\text{m}$  的器件获得的最大饱和电流和跨导都拥有明显的优势,尤其是 (111) 金刚石上的器件 B.

场效应管器件的特性主要由栅下沟道中载流子浓度、分布以及输运特性来决定的. 为了深入分析器件的特性,测试了器件在 1 MHz 下栅-源二极管的  $C$ - $V$  曲线,结果如图 9 所示. 设栅下沟道中载

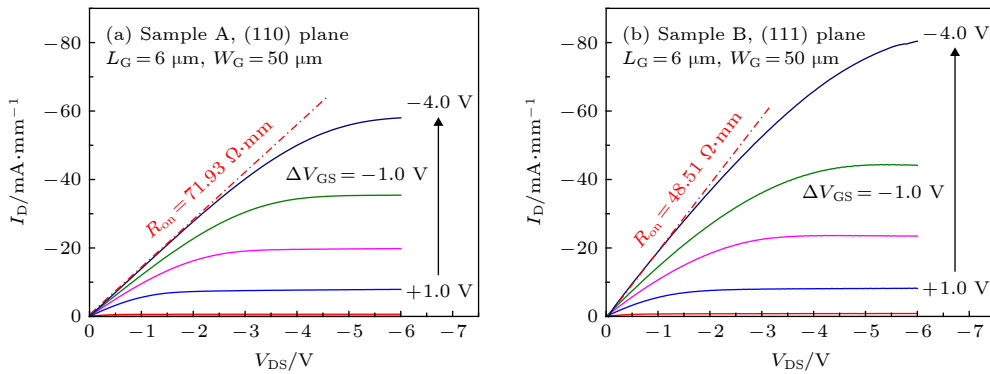


图 6 输出特性 (a) 器件 A; (b) 器件 B

Fig. 6. Output characteristics: (a) Device A; (b) device B.

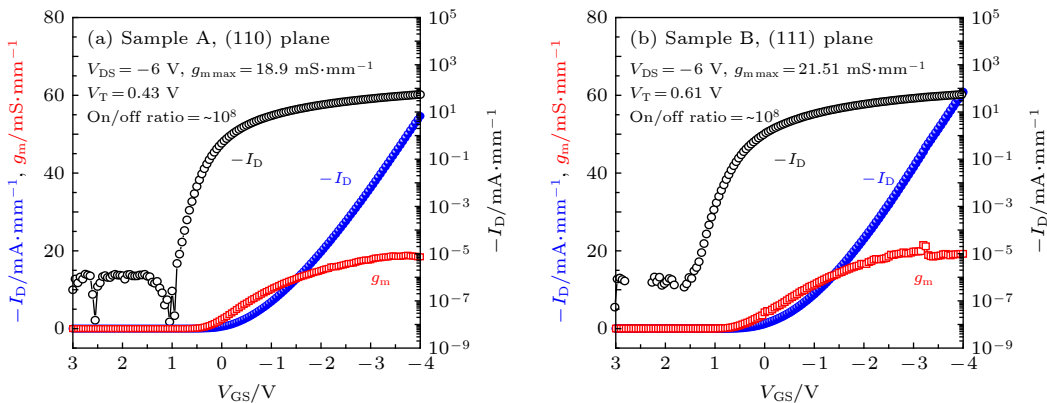


图 7 转移特性 (a) 器件 A; (b) 器件 B

Fig. 7. Transfer and transconductance characteristics: (a) Device A; (b) device B.

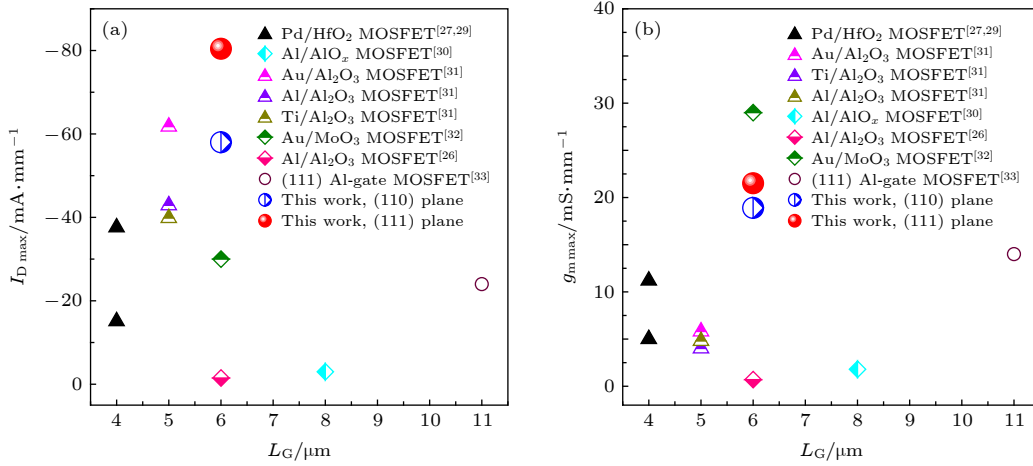


图 8 氢终端金刚石场效应管输出电流 (a) 和最大跨导 (b) 随栅长的变化 (数据来自文献 [26,27,29–33]), MOSFET 器件给出了栅金属和栅介质

Fig. 8. Summary of the reported (a)  $I_{Dmax}$  and (b) maximum transconductance of hydrogen-terminated diamond FETs dependent on the gate length [26,27,29–33]. The gate metal and gate dielectric are given for MOSFETs.

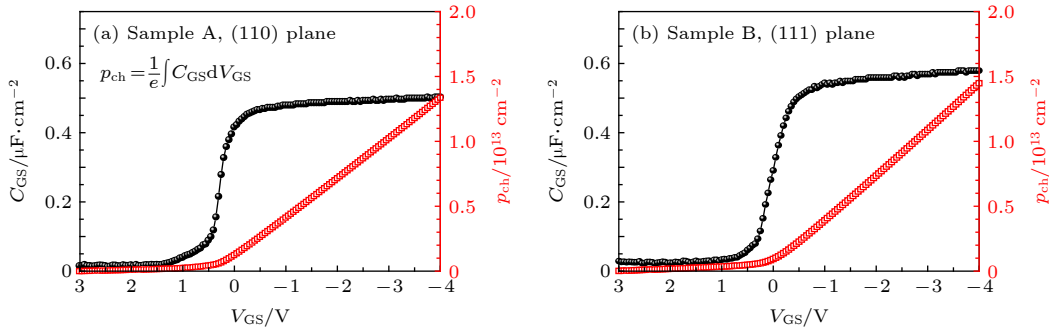


图 9 栅源二极管的  $C-V$  特性以及计算出的沟道载流子浓度随  $V_{GS}$  的变化 (a) 器件 A; (b) 器件 B

Fig. 9. Capacitance-voltage characteristics of the gate-source diode and the calculated hole density in the gated channel as a function of  $V_{GS}$ : (a) Device A; (b) device B.

流子的浓度为  $p_{ch}$ , 通过  $C-V$  曲线以及关系式  $p_{ch} = \frac{1}{e} \int C_{GS} dV_{GS}$  ( $e$  为基本电荷电量  $1.6 \times 10^{-19} C$ ), 可以计算得到器件 A 的沟道载流子最大浓度为  $1.34 \times 10^{13} cm^{-2}$ , 器件 B 的为  $1.45 \times 10^{13} cm^{-2}$ , 近似是器件 A 的 1.08 倍.

由于器件 A 和 B 的沟道载流子浓度差异并不大, 而饱和电流和导通电阻的差异较大, 可以推测出 (111) 面的沟道载流子迁移率应略高于 (110) 面的沟道载流子迁移率, 方阻则应低于 (110) 面. Kawarada 等 [9] 报道了氢终端金刚石的霍尔特性, Kasu 等 [34] 报道了吸附  $NO_2$  的氢终端金刚石的霍尔特性, 都展示了 (111) 面的方阻低于 (110) 面, 且两者的方阻都明显低于 (100) 面, 有利于制备高性能器件. 本文的结果从器件层面有力地证明了这一结论.

## 4 总 结

本文研究切割同一母体单晶金刚石获得的 (110) 和 (111) 面金刚石片表面晶向对金刚石材料和器件特性的影响. 材料特性方面, AFM 测试结果表明, (110) 金刚石表面在做完氢终端处理后出现了鹰眼状的刻蚀坑, 均方根粗糙度大幅度增加, 分析认为该刻蚀坑是原样品中延伸到表面的位错经过氢等离子体刻蚀后所得. PL 和 Raman 测试结果表明 (111) 金刚石和 (110) 面金刚石光学性质相似.

基于 (110) 和 (111) 单晶金刚石制备了栅长为  $6 \mu m$  的 Al 栅氢终端金刚石 MESFET 器件 A 与 B. 在  $V_{GS} = -4 V$  时, 器件 A 的导通电阻为  $71.93 \Omega \cdot mm$ , 获得  $-58.02 mA/mm$  的最大饱和电

流; 而器件 B 的导通电阻为  $48.51 \Omega \cdot \text{mm}$ , 大小只有器件 A 的 67%, 最大饱和电流为  $-80.41 \text{ mA/mm}$ , 约为器件 A 的 1.4 倍. 由转移特性可得, 器件 A 与 B 的最大跨导分别为 18.9 和  $21.51 \text{ mS/mm}$ , 且都有较大的开关比约  $10^8$ . 通过  $C-V$  曲线我们得到器件 A 的栅下沟道中最大载流子浓度为  $1.34 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 器件 B 的为  $1.45 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 近似是器件 A 的 1.08 倍. 器件 B 拥有大饱和电流和低导通电阻的主要原因是其方阻更低. 本文的器件数据和已报道的栅长 4—11  $\mu\text{m}$  的单晶金刚石场效应管进行了比较, 可以发现, 最大饱和电流和跨导都拥有明显的优势, 尤其是 (111) 金刚石制备的氢终端场效应管.

## 参考文献

- [1] Wort C J H, Balmer R S 2008 *Mater. Today* **11** 22
- [2] Baliga B J 1989 *IEEE Electron Dev. Lett.* **10** 455
- [3] Zhang C M, Zheng Y B, Jiang Z G, Lv X Y, Hou X, Hu S, Liu W J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 088103
- [4] Fang C, Jia X P, Yan B M, Chen N, Li Y D, Chen L C, Guo L S, Ma H A 2015 *Acta. Phys. Sin.* **64** 228101 (in Chinese) [房超, 贾晓鹏, 颜丙敏, 陈宁, 李亚东, 陈良超, 郭龙锁, 马红安 2015 物理学报 **64** 228101]
- [5] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2005 *Electron. Lett.* **41** 1249
- [6] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2006 *Diamond Relat. Mater.* **15** 783
- [7] Hiramata K, Sato H, Harada Y, Yamamoto H, Kasu M 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 1111
- [8] Kawarada H, Tsuboi H, Naruo T, Yamada T, Xu D, Daicho A, Saito T, Hiraiwa A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 013510
- [9] Kawarada H 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 090111
- [10] Ren Z Y, Zhang J F, Zhang J C, Xu S R, Zhang C F, Quan R D, Hao Y 2017 *Acta. Phys. Sin.* **66** 208101 (in Chinese) [任泽阳, 张金凤, 张进成, 许晟瑞, 张春福, 全汝岱, 郝跃 2017 物理学报 **66** 208101]
- [11] Zhang J F, Yang P Z, Ren Z Y, Zhang J C, Xu S R, Zhang C F, Xu L, Hao Y 2018 *Acta. Phys. Sin.* **67** 068101 (in Chinese) [张金凤, 杨鹏志, 任泽阳, 张进成, 许晟瑞, 张春福, 徐雷, 郝跃 2018 物理学报 **67** 068101]
- [12] Ren Z Y, Zhang J F, Zhang J C, Zhang C F, Xu S R, Li Y, Hao Y 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 786
- [13] Ren Z Y, Zhang J F, Zhang J C, Zhang C F, Chen D Z, Yang P Z, Li Y, Hao Y 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 1302
- [14] Hiramata K, Sato H, Harada Y, Yamamoto H, Kasu M 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 080112
- [15] Yu X X, Zhou J J, Qi C J, Cao Z Y, Kong Y C, Chen T S 2018 *IEEE Electron Dev. Lett.* **39** 1373
- [16] Ueda K, Kasu M, Yamauchi Y, Makimoto T, Schwitters M, Twitchen D J, Scarsbrook G A, Coe S E 2006 *IEEE Electron Dev. Lett.* **27** 570
- [17] Imanishi S, Horikawa K, Qi N, Okubo S, Kageura T, Hiraiwa A, Kawarada H 2018 *IEEE Electron Dev. Lett.* **40** 279
- [18] Wang J J, He Z Z, Yu C, Song X B, Xu P, Zhang P W, Guo H, Liu J L, Li C M, Cai S J, Feng Z H 2014 *Diamond Relat. Mater.* **43** 43
- [19] Umezawa H, Tatsumi N, Kato Y, Shikata S I 2013 *Diamond Relat. Mater.* **40** 56
- [20] Achard J, Tallaire A, Sussmann R, Silva F, Gicquel A 2005 *J. Cryst. Growth.* **284** 396
- [21] Tallaire A, Achard J, Secroun A, Gryse O D, Weerd F D, Barjon J, Silva F, Gicquel A 2006 *J. Cryst. Growth.* **291** 533
- [22] Rezek B, Sauerer C, Nebel C E, Stutzmann M, Ristein J, Ley L, Snidero E, Bergonzo P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2266
- [23] Kubovic M, Kasu M, Yamauchi Y, Ueda K, Kageshima H 2009 *Diamond Relat. Mater.* **18** 796
- [24] Kasu M, Ueda K, Yamauchi Y, Makimoto T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 043509
- [25] Kasu M, Ueda K, Kageshima H, Yamauchi Y 2008 *Diamond Relat. Mater.* **17** 741
- [26] Wang Y F, Chang X H, Zhang C F, Fu J, Fan S W, Bu R, Zhang J W, Wang W, Wang H X, Wang J J 2018 *Diamond Relat. Mater.* **81** 113
- [27] Liu J W, Liao M Y, Lmura M, Koide Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 092905
- [28] Nissan C Y, Shappir J, Frohman B D 1985 *Solid-State Electron.* **28** 717
- [29] Liu J W, Koide Y 2017 *Methods. Mol. Biol.* **15** 217
- [30] Wang Y F, Wang W, Chang X, Fu J, Liu Z, Zhao D, Shao G, Fan S, Bu R, Zhang J, Wang H X 2019 *Sci. Rep.* **9** 5192
- [31] Saha N C, Kasu M 2019 *Diamond Relat. Mater.* **92** 81
- [32] Ren Z Y, Zhang J F, Zhang J C, Zhang C F, Yang P Z, Chen D Z, Li Y, Hao Y 2018 *J. Semicond.* **39** 72
- [33] Kasu M, Kubovic M, Aleksov A, Teofilov N, Sauer R, Kohn E, Makimoto T 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** L975
- [34] Kasu M 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 01AA01



# Characteristics of hydrogen-terminated single crystalline diamond field effect transistors with different surface orientations\*

Zhang Jin-Feng<sup>1)</sup> Xu Jia-Min<sup>1)</sup> Ren Ze-Yang<sup>1)†</sup> He Qi<sup>1)</sup> Xu Sheng-Rui<sup>1)</sup>  
Zhang Chun-Fu<sup>1)</sup> Zhang Jin-Cheng<sup>1)2)</sup> Hao Yue<sup>1)</sup>

1) (*State Key Discipline Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Technology, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Shaanxi Joint Key Laboratory of Graphene, Xi'an 710071, China*)

( Received 2 July 2019; revised manuscript received 5 November 2019 )

## Abstract

Diamond has great potential applications in high-power, high-frequency semiconductor devices because of its wide band gap (5.5 eV), high thermal conductivity (22W/(cm·K)), and high carrier mobility (4500 cm<sup>2</sup>/(V·s) for electron, and 3800 cm<sup>2</sup>/(V·s) for hole). It has been widely considered as an ultimate semiconductor. From the analysis of our previous work, we find that the output current of field effect transistor based on hydrogen-terminated polycrystalline diamond is usually larger than that based on single crystal diamond, and that the preferential orientations of the polycrystalline diamond are mainly <110> and <111> shown by XRD results. Therefore, in order to further analyze the effect of surface orientation on the device performance of hydrogen-terminated diamond field effect transistor (FET), we study the devices fabricated respectively on the (110) plane and (111) plane single crystal diamond plates obtained from a single 3.5-mm-thick single crystal diamond grown by the microwave plasma chemical vapor deposition on the high-pressure high-temperature synthesized diamond substrate. Prior to processing the device, these diamond plates are characterized by atomic force microscope, Raman spectra and photoluminescence (PL) spectra. The results of Raman and PL spectra show that (110) plane and (111) plane plates originating from the same CVD single crystal diamond have no significant difference in optical property. Then the normally-on hydrogen-terminated diamond FET with a gate length of 6 μm is achieved. The device on (111) plane delivers a saturation drain current of 80.41 mA/mm at a gate voltage  $V_{GS} = -4$  V, which is approximately 1.4 times that of the device on (110) plane. Meanwhile, the on-resistance of the device on (111) plane is 48.51 Ω·mm, and it is only 67% of the device on (110) plane. Analyses of the capacitance-voltage show that the hole concentration of the gated device on (110) plane and (111) plane are  $1.34 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup> and  $1.45 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup>, respectively, approximately at the same level. In addition, the hole density of the device on both (110) and (111) plane increase near-linearly with the increase of gate voltage from the threshold voltage to -4 V, indicating that the control effect of the gate on the carrier in the channel is uniform. The possible reason for the higher saturation drain current as well as the lower on-resistance of the device on (111) plane is that its sheet resistance is lower.

**Keywords:** single crystal diamond, (110) plane, (111) plane, field effect transistors

**PACS:** 81.05.ug, 85.30.De, 84.37.+q

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191013

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFB0406504), the Foundation of State Key Laboratory of China (Grant No. 6142605180102), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61874080), and the National Postdoctoral Program for Innovative Talents (Grant No. BX20190263).

† Corresponding author. E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn