

高跨导氢终端多晶金刚石长沟道场效应晶体管特性研究

张金凤 杨鹏志 任泽阳 张进成 许晟瑞 张春福 徐雷 郝跃

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

Zhang Jin-Feng Yang Peng-Zhi Ren Ze-Yang Zhang Jin-Cheng Xu Sheng-Rui Zhang Chun-Fu Xu Lei Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 068101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20171965

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171965>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

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 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.208101>

[复合超硬材料的高压合成与研究](#)

Syntheses and studies of superhard composites under high pressure

物理学报.2017, 66(3): 038103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.038103>

[铝-金刚石界面电子特性与界面肖特基势垒的杂化密度泛函理翻SE06的研究](#)

Interface electronic structure and the Schottky barrier at Al-diamond interface: hybrid density functional theory HSE06 investigation

物理学报.2017, 66(8): 088102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.088102>

[添加Fe\(C₅H₅\)₂合成氢掺杂金刚石大单晶及其表征](#)

Crystal growth and characterization of hydrogen-doped single diamond with Fe(C₅H₅)₂ additive

物理学报.2015, 64(12): 128101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.128101>

[高温高压下掺硼宝石级金刚石单晶生长特性的研究](#)

Studies on synthesis of boron-doped Gem-diamond single crystals under high temperature and high pressure

物理学报.2014, 63(19): 198101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198101>

高跨导氢终端多晶金刚石长沟道场效应晶体管特性研究

张金凤[†] 杨鹏志 任泽阳 张进成 许晟瑞 张春福 徐雷 郝跃

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

(2017年9月4日收到; 2017年12月28日收到修改稿)

基于多晶金刚石制作了栅长为4 μm 的铝栅氢终端金刚石场效应晶体管. 器件的饱和漏源电流为160 mA/mm, 导通电阻低至37.85 $\Omega\cdot\text{mm}$, 最大跨导达到32 mS/mm, 且跨导高于最大值的90%的栅压(V_{GS})范围达到3 V ($-2\text{ V} \leq V_{\text{GS}} \leq -5\text{ V}$). 通过传输线电阻分析以及器件的导通电阻和电容-电压特性分析, 发现氢终端多晶金刚石栅下沟道中的空穴面浓度达到了 $1.56 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$, 有效迁移率在前述高跨导栅压范围保持在约170 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 分析认为, 较低的栅漏串联电阻、沟道中高密度的载流子和在大范围栅压内的高水平迁移率是引起高而宽阔的跨导峰和低导通电阻的原因.

关键词: 金刚石, 氢终端, 场效应晶体管

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

DOI: 10.7498/aps.67.20171965

1 引言

金刚石具有禁带宽度大(5.45 eV)、热导率高(22 W/(cm·K))、载流子迁移率高(电子4500 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、空穴3800 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)等一系列优点, 在高温、高频、高功率电子器件方面具有巨大的应用潜力^[1-3]. 然而, 金刚石的n型和p型体掺杂(硼和磷)在室温下难以激活, 在氢终端金刚石表面(即由C—H键覆盖的表面, 可由氢等离子体处理金刚石表面获得)通过空气吸附等效应却可以在室温下出现空穴载流子, 形成表面p型电导^[4,5]. 因此, 氢终端金刚石场效应晶体管(field effect transistor, FET)成为金刚石电子器件的核心结构.

单晶和多晶金刚石都可用于制备金刚石电子器件, 单晶因为没有晶界且纯度高, 理论上更适合制备高性能器件, 但是面积小(如4.5 mm × 4.5 mm)、价格非常昂贵, 故器件成本和工艺难度都相当高. 多晶较容易获得尺寸达2英寸

(1 in = 2.54 cm)的晶圆, 且存在晶粒直径可达100 μm 以上、杂质浓度较低的高质量多晶材料, 也可以实现高性能器件. 目前, 已经报道的氢终端金刚石FET最大输出电流1.3 A/mm(单晶)^[6]、截止频率 $f_{\text{T}} = 53\text{ GHz}$ (单晶)^[7], 最大振荡频率 $f_{\text{MAX}} = 120\text{ GHz}$ (多晶)^[8]和1 GHz下的输出功率密度2.1 W/mm(单晶)^[9]. 国内关于多晶和单晶金刚石FET研究, 已报道了1 GHz微波功率特性, 输出功率密度分别为320 mW/mm和450 mW/mm^[10].

FET器件在放大器中作为受控电流源, 输出电流与输入电压之间的比例系数为跨导(g_{m}), 因此跨导是表征器件放大能力的重要指标. 由器件的转移特性可获得跨导随栅源电压(V_{GS})的变化曲线, 好的跨导特性意味着该曲线上具有宽阔的高跨导区, 这种特性非常有利于实现高的频率特性和高线性的微波功率放大. 例如文献^[8]报道, 栅长0.1 μm , $f_{\text{MAX}} = 120\text{ GHz}$ 的高性能多晶金刚石FET器件, 跨导最大值为143 mS/mm, 且跨导高于最大值的90%的栅压范围达到1.5 V.

[†] 通信作者. E-mail: jfzhang@xidian.edu.cn

本文制作了高性能的长沟氢终端多晶金刚石FET, 栅长 $4\ \mu\text{m}$ 的器件的最大跨导达到 $32\ \text{mS}/\text{mm}$, 且实现了宽阔的高跨导区. 为了研究相关的机理, 对器件特性进行了深入的分析.

2 实验过程

用于器件制备的金刚石是从元素六公司购买的利用化学气相淀积法制备的尺寸为 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$ 的(001)多晶金刚石材料. 将金刚石分别在丙酮、无水乙醇、去离子水中清洗 $15\ \text{min}$, 去除金刚石表面可能存在的有机和无机污染物, 获得清洁的金刚石表面. 然后将金刚石材料放入到微波等离子化学气相淀积设备的腔体中, 用氢等离子体处理. 处理过程中, 氢气流量为 $500\ \text{sccm}$ ($1\ \text{sccm} = 1\ \text{mL}/\text{min}$), 压力和微波功率分别为 $80\ \text{mbar}$ 和 $2\ \text{kW}$. 处理完成之后, 在氢气氛围中冷却样品到室温, 形成氢终端表面. 将氢终端表面暴露在空气中若干小时, 表面会出现一层含有某些带电离子(如 OH^- 和 HCO_3^- 等^[5])的吸附物,

氢终端金刚石表面的电子会转移到吸附层中, 从而在金刚石表面产生一层空穴载流子. 随后使用热蒸发技术在金刚石表面蒸发厚度 $100\ \text{nm}$ 的金(Au)层, 一方面保护氢终端金刚石表面, 另一方面Au可以和氢终端金刚石表面之间形成欧姆接触. 接着进行有源区光刻和Au的湿法腐蚀, 用 KI/I_2 溶液将有源区之外的Au腐蚀掉, 然后将样品置于低功率的氧等离子体中处理 $10\ \text{min}$, 则暴露出来的氢终端金刚石表面会变为具有高绝缘性质的氧终端表面, 形成器件之间的隔离区. 栅窗口光刻和将窗口中的Au进行湿法腐蚀后, 光刻胶下方留下的Au形成源漏电极, 同时Au的横向腐蚀将使源漏电极间距大于栅窗口对应的栅长. 再使用热蒸发工艺在样品表面蒸发厚度为 $100\ \text{nm}$ 的铝(Al)层, 利用光刻胶的掩膜作用在剥离工艺之后形成自对准栅, 完成器件的制作, 器件俯视图和剖面结构示意图见图1. 所制备的金属-半导体场效应管(MESFET)器件栅长(L_G)为 $4\ \mu\text{m}$, 栅宽(W_G)为 $50\ \mu\text{m}$. 使用Keithley 4200半导体参数分析仪对器件的电流-电压(I - V)特性和电容-电压(C - V)特性进行了测试.

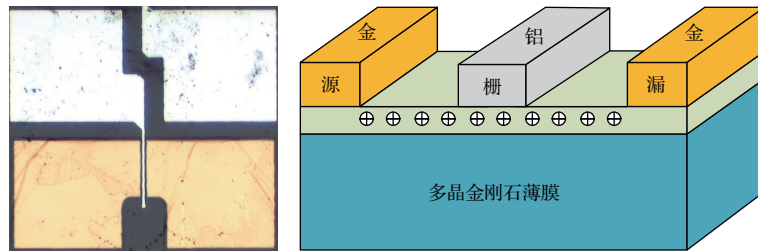


图1 多晶金刚石FET器件俯视图和剖面结构示意图

Fig. 1. The top view and schematic cross-section structure diagram of the diamond FET.

3 结果与讨论

器件的输出特性和饱和区的转移特性如图2和图3所示. 在栅源电压 $V_{GS} = -5\ \text{V}$ 时, 饱和输出电流 $I_{D\text{sat}} = 160\ \text{mA}/\text{mm}$, 由漏源电压 V_{DS} 在 $0.1\ \text{V}$ 以下的 I - V 数据可得到导通电阻 $R_{\text{on}} = 37.85\ \Omega \cdot \text{mm}$. 转移特性在 V_{DS} 为 $-9\ \text{V}$ 时测量, 可提取出阈值电压 $V_{\text{TH}} = 1.4\ \text{V}$. 随着 V_{GS} 从 V_{TH} 向负电压方向变化, g_m 曲线呈平顶宽峰状, 在 $V_{GS} = -3.5\ \text{V}$ 时达到最大值 $32\ \text{mS}/\text{mm}$, 跨导高于最大值的90%的高跨导区栅压范围达到 $3\ \text{V}$ ($-2\ \text{V} \leq V_{GS} \leq -5\ \text{V}$), 占 V_{TH} 以上可测栅压范围的近一半. 而且, 根据 g_m 与 V_{GS} 的关系曲线形状, 如果栅源之间还可以进一步加负压, 则高跨导

区还可以再加宽. 与如此宽阔的高跨导区相对应, 器件的 $I_{D\text{sat}}$ 已达到国际上同等栅长的高性能氢终端金刚石MESFET的电流水平. 例如, 根据Hirama等^[6]报道的器件 $I_{D\text{sat}}$ 随栅长的变化规律, $L_G = 4\ \mu\text{m}$ 的器件在 $V_{GS} - V_{\text{TH}} = -5\ \text{V}$ 时, $I_{D\text{sat}}$ 约为 $100\ \text{mA}/\text{mm}$, 从图2可以看到本文器件在同样的栅压下电流也在这个水平.

器件的跨导高与导通电阻低有密切的关系. 根据Matsudaira等^[11]报道的氢终端金刚石FET的电流增益截止频率 f_T 随栅长的倒数 $1/L_G$ 变化的关系, $2\ \mu\text{m}$ 的栅长是器件从长沟特性向短沟特性的过渡点. 图4和图5总结了已报道的长沟道Al栅氢终端单晶或多晶金刚石MESFET和金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)器件的跨导和导通电阻随栅长变化的规律, 图中也列入了本文的器

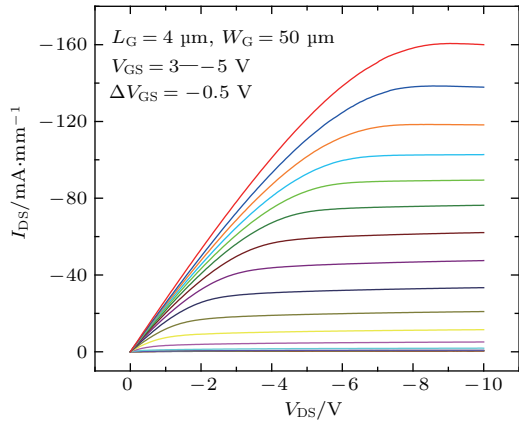


图2 器件输出特性

Fig. 2. Output characteristics of the diamond FET.

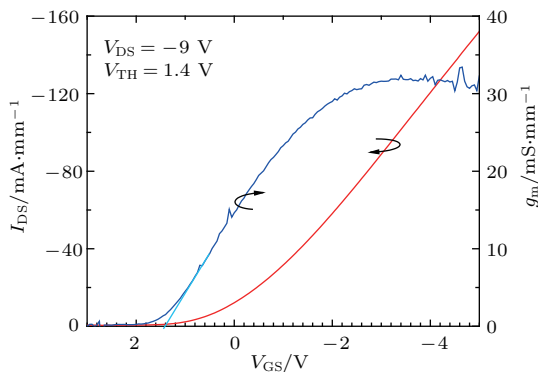


图3 器件转移特性图

Fig. 3. Transfer and transconductance characteristics of the diamond FET.

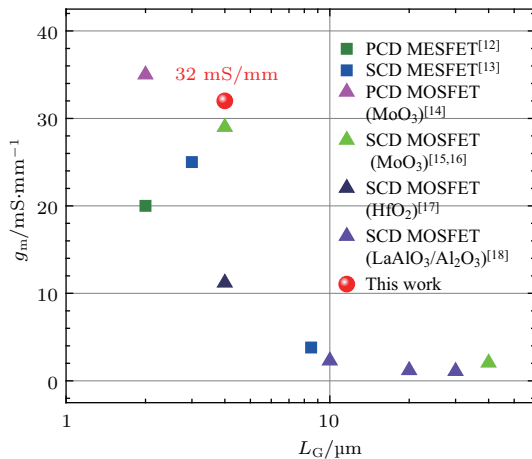


图4 长沟 Al 栅氢终端金刚石 FET 器件的跨导随栅长的变化 (数据来自文献 [12—18]), 图中 SCD 和 PCD 分别指单晶金刚石和多晶金刚石, 各 MOSFET 器件后的圆括号中给出了栅介质的成分

Fig. 4. Summary of the reported maximum transconductance dependent on the gate length of the long-channel Al-gated hydrogen-terminated diamond FETs [12—18]. The terms SCD and PCD represent single-crystal diamond and poly-crystal diamond. The composition of the gate dielectric of each MOSFET device is given in the parentheses in the legend.

件数据. 可以看到, 随着栅长的减小, 跨导增加和导通电阻减小的趋势非常明显. 本文的栅长 4 μm 的 MESFET 器件获得的高跨导和低导通电阻具有明显的优势.

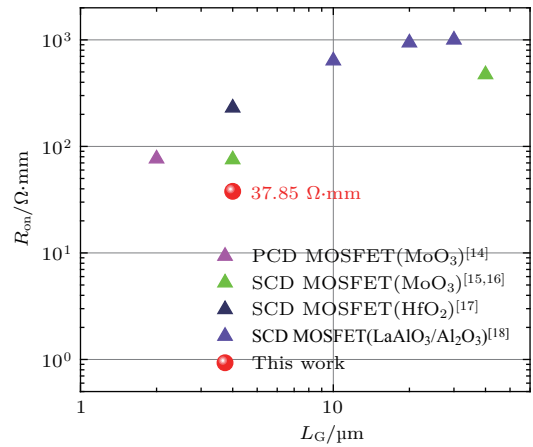


图5 长沟 Al 栅氢终端金刚石 FET 器件的导通电阻随栅长的变化 (数据来自文献 [14—18])

Fig. 5. Summary of the reported on-resistance dependent on the gate length of the long-channel Al-gated hydrogen-terminated diamond FETs [14—18].

为了进一步分析本器件中低导通电阻和高跨导的物理机制, 我们测试了片上传输线测试结构的电阻随电极间距的变化关系 [19] (图6). 提取出源漏电极的欧姆接触电阻 $R_C = 5.52 \Omega \cdot \text{mm}$ (对应比接触电阻率 $\rho_C = 5.30 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$), 氢终端多晶金刚石材料的方块电阻为 $5.71 \text{ k}\Omega/\text{sq}$. 与已报道的氢终端金刚石方阻数据 $5\text{—}20 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ [20,21] 相比,

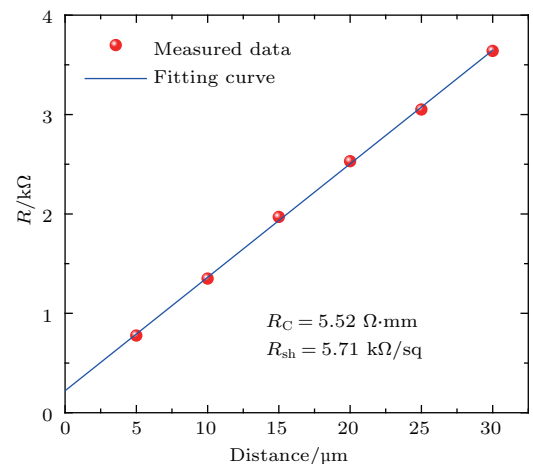


图6 片上传输线测试结构的电阻随电极间距的变化, 电极宽度为 50 μm [19]

Fig. 6. Resistance vs. contact distance relation of the transmission line model [19] pattern with a contact width of 50 μm on the diamond wafer.

该方阻属于较低水平. 器件的源极串联电阻 (R_S) 和漏极串联电阻 (R_D) 均由欧姆接触电阻和非零的栅-源和栅-漏通道电阻 (R_a) 组成. 本文器件的栅极位于源极和漏极的正中间, 所以 R_S 和 R_D 相等, 可求得 $R_S = R_C + R_a = 14.08 \Omega \cdot \text{mm}$.

测得的器件 g_m 即外跨导与器件的本征跨导 g_{m0} 之间具有如下关系:

$$g_{m0} = \frac{g_m}{1 - R_S \cdot g_m}. \quad (1)$$

将所求得的 $R_S = 14.08 \Omega \cdot \text{mm}$ 代入 (1) 式可得 g_{m0} 峰值达 58 mS/mm .

设栅下沟道电阻为 R_{ch} , 则 R_{on} 可按以下关系分解:

$$R_{on} = R_S + R_D + R_{ch}. \quad (2)$$

根据 $R_{on} = 37.85 \Omega \cdot \text{mm}$, 可求出在 $V_{GS} = -5 \text{ V}$ 时 $R_{ch} = 9.69 \Omega \cdot \text{mm}$, 相当于栅下的方块电阻 (R_{sh_ch}) 已降低到 $2.42 \text{ k}\Omega/\text{sq}$, 比氢终端金刚石材料的原始方块电阻 ($5.71 \text{ k}\Omega/\text{sq}$) 的一半还要低.

测试了器件在 1 MHz 下栅-源之间的 $C-V$ 曲线, 如图 7 所示. 大量采用 Al 栅的氢终端金刚石 MESFET 器件和本文器件的栅正向耐压都显著高于 Al 在氢终端金刚石表面的肖特基势垒高度理论值 (仅 $0.62\text{--}0.82 \text{ eV}$), 分析其原因可能是在 Al 和金刚石的界面形成了氧化铝层, 使 MESFET 器件实际上形成类似 MOS 栅的器件结构 [22,23]. 因此 Al 栅氢终端金刚石 MESFET 用 MOSFET 器件的物理模型来分析更合适. 图 7 中 $C-V$ 曲线的实验平带电压 V_{FB} 由 $d^2C_{GS}/dV_{GS}^2 = 0$ 对应的栅压位置 [24] 确定, 为 1.67 V . 电容从 V_{FB} 向器件阈值电压 ($V_{TH} = 1.4 \text{ V}$) 上升, 随后进入宽广的平台区 ($0 \text{ V} > V_{GS} > -5 \text{ V}$), 反映了栅对沟道载流子的控制作用从耗尽作用转变为累积作用. 曲线上的电容最大值为 $0.374 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, 若假设 Al 栅和金刚石之间的氧化铝介质的介电常数为 3.5 [21], 则介质的厚度约为 8.3 nm , 与文献报道的 $5\text{--}10 \text{ nm}$ 相符 [22,25]. 设栅下沟道的载流子面密度为 p_{ch} , 则由 $p_{ch} = \frac{1}{e} \int C_{GS} dV_{GS}$ (e 为基本电荷电量 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) 可求出沟道载流子最大密度为 $1.56 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

MOSFET 器件中 R_{on} 与沟道载流子的有效迁移率 μ_{eff} 具有如下关系:

$$R_{on} = R_S + R_D + \frac{L_G}{W_G \mu_{eff} C_{ox} |V_{GS} - V_{TH}|}. \quad (3)$$

设 C_{ox} 近似为图 7 的 $C-V$ 曲线电容最大值 ($0.374 \mu\text{F}/\text{cm}^2$), 由 (3) 式可得到 μ_{eff} 随栅压的变化关系如图 8 所示. 随着 V_{GS} 从 V_{TH} 向负电压方向变化, μ_{eff} 先迅速上升, 随后在 V_{GS} 达到 -1.5 V 后饱和, 保持约在 $170 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 基本不变. μ_{eff} 达到近恒定值的栅压范围, 与前述高跨导区的栅压范围 $-2 \text{ V} \leq V_{GS} \leq -5 \text{ V}$ 基本一致, 还与图 8 插图的栅下沟道方阻 R_{sh_ch} 降到材料方阻 R_{sh} 以下的栅压范围一致. 已报道的氢终端金刚石 FET 器件的 μ_{eff} 通常约为 $20\text{--}200 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ [6,9,10,26], 且在较高的负栅压 (即栅极强正偏状态) 下会出现迁移率的明显下降 [21]. 而本文器件获得了负栅压下高而近似恒定的 μ_{eff} , 并且沟道载流子密度可达到相当高的水平, 令 R_{sh_ch} 乃至 R_{on} 显著降低, g_{m0} 显著提高, 实现了良好的器件特性.

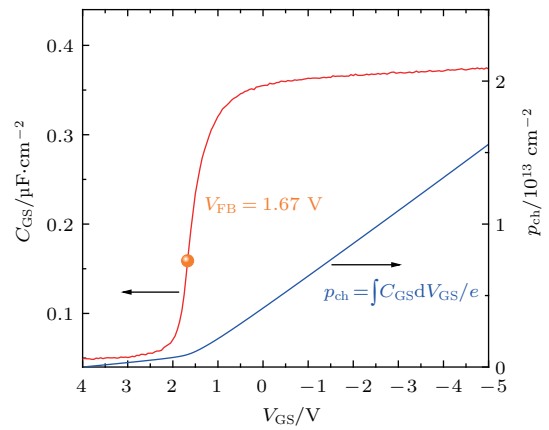


图 7 器件的 $C-V$ 特性以及所计算出的沟道空穴浓度随 V_{GS} 的变化
Fig. 7. Capacitance-voltage characteristics of the device, and the calculated hole density in the channel as a function of V_{GS} .

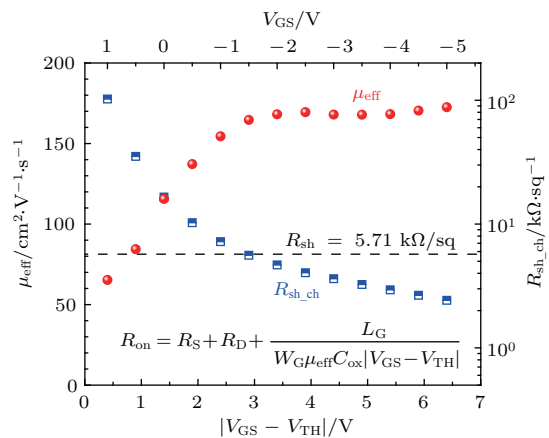


图 8 有效迁移率 μ_{eff} 和沟道方阻 R_{sh_ch} 随栅压的变化
Fig. 8. Gate voltage dependences of the mobility μ_{eff} and the square resistance R_{sh_ch} .

4 结 论

基于多晶金刚石成功制备出导通电阻 $37.85 \Omega \cdot \text{mm}$ 、最大跨导达到 32 mS/mm 、栅长 $4 \mu\text{m}$ 的 Al 栅氢终端金刚石 MESFET. 器件转移特性显示出宽阔的高跨导区, 跨导高于最大值的 90% 的栅压范围达到 3 V ($-2 \text{ V} \leq V_{\text{GS}} \leq -5 \text{ V}$). 根据传输线电阻测试结果, 发现器件获得的低导通电阻一方面是由于栅下沟道的方阻在高的负栅压下显著下降, 另一方面是氢终端金刚石材料本身获得了较低的方阻, 令源漏之间的串联电阻处于较低的水平. 较低的源漏串联电阻也有利于提高外跨导. 进一步利用器件的电容-电压特性发现器件的栅下沟道载流子密度达到了 $1.56 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$; 由导通电阻随栅压的变化曲线提取有效迁移率, 发现有效迁移率在 $-5 \text{ V} \leq V_{\text{GS}} \leq -1.5 \text{ V}$ 范围出现近恒定高值区 ($170 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$). 高载流子浓度和高迁移率有利于降低栅下沟道电阻, 提高本征跨导. 综上所述, 较低的栅源和栅漏串联电阻、沟道中高密度的载流子和在大范围栅压内的高水平迁移率是获得器件高而宽阔的跨导峰和低导通电阻的原因.

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] 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]
- [4] Nebel C E, Rezek B, Zrenner A 2004 *Diamond Relat. Mater.* **13** 2031
- [5] Maier F, Riedel M, Mantel B, Ristein J, Ley L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3472
- [6] Hirama K, Sato H, Harada Y, Yamamoto H, Kasu M 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 090112
- [7] Russell S A O, Sharabi S, Tallaire A, Moran D A J 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 1471
- [8] 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
- [9] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2005 *Electron. Lett.* **41** 1249
- [10] Wang J J, He Z Z, Yu C, Song X B, Wang H X, Lin F, Feng Z H 2016 *Diamond Relat. Mater.* **70** 114
- [11] Matsudaira H, Miyamoto S, Ishizaka H, Umezawa H 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 480
- [12] Feng Z H, Wang J J, He Z Z, Dun S B, Cui Y, Liu J L, Zhang P W, Hui G, Li C M, Cai S J 2013 *Sci. China: Tech. Sci.* **56** 957
- [13] Gluche P, Aleksov A, Vescan A, Ebert W, Kohn E 1997 *IEEE Electron Dev. Lett.* **18** 547
- [14] Ren Z, Zhang J, Zhang J, Zhang C, Chen D, Yang P, Li Y, Hao Y 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 1302
- [15] Ren Z, Zhang J, Zhang J, Zhang C, Xu S, Li Y, Hao Y 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 786
- [16] Zhang J F, Ren Z Y, Zhang J C, Zhang C F, Chen D Z, Xu S R, Li Y, Hao Y 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 100301
- [17] Liu J W, Liao M Y, Imura M, Koide Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 092905
- [18] Liu J W, Liao M Y, Imura M, Oosato H, Watanabe E, Tanaka A, Iwai H, Koide Y 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 084108
- [19] Reeves G K, Harrison H B 2005 *IEEE Electron Dev. Lett.* **3** 111
- [20] Moran D A J, Fox O J L, Mclelland H, Russell S, May P W 2011 *IEEE Electron Dev. Lett.* **32** 599
- [21] Hirama K, Takayanagi H, Yamauchi S, Jingu Y, Umezawa H, Kawarada H 2007 *IEEE International Electron Devices Meeting* Washington, D.C., United States, December 10–12, 2007 p873
- [22] Kubovic M, Kasu M, Yamauchi Y, Ueda K, Kageshima H 2009 *Diamond Relat. Mater.* **18** 796
- [23] Kasu M, Ueda K, Yamauchi Y, Makimoto T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 043509
- [24] Winter R, Ahn J, McIntyre P C, Eizenberg M 2013 *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Nanometer Struct.* **31** 030604
- [25] Kasu M, Ueda K, Kageshima H, Yamauchi Y 2008 *Diamond Relat. Mater.* **17** 741
- [26] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2006 *Diamond Relat. Mater.* **15** 783

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

Zhang Jin-Feng[†] Yang Peng-Zhi Ren Ze-Yang Zhang Jin-Cheng Xu Sheng-Rui
Zhang Chun-Fu Xu Lei Hao Yue

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

(Received 4 September 2017; revised manuscript received 28 December 2017)

Abstract

Diamond has a great potential to be used in high-power, high-voltage and high-frequency semiconductor devices due to its wide band gap (5.5 eV), high breakdown field (> 10 MV/cm), high thermal conductivity (22 W/(cm·K)), and good carrier transport property. High-quality polycrystal diamond with large size wafers (up to several inches) is more easily obtained than the expensive monocrystal diamond plate with the size of only several mm², and the good performance of electronic device on polycrystal diamond has been reported. So we fabricate a normally-on hydrogen-terminated polycrystal diamond field effect transistor with a 4- μ m aluminum gate by using a gold mask process. The saturation drain current is 160 mA/mm, and the on-resistance is as low as 37.85 Ω ·mm. The maximum transconductance reaches 32 mS/mm, and the gate voltage range with the transconductance higher than 90% of its maximum value reaches 3 V (-2 V $\leq V_{GS} \leq -5$ V). An Ohmic contact resistance of 5.52 Ω ·mm and a quite low square resistance of 5.71 k Ω /sq for the hydrogen-terminated diamond are extracted from the analysis of transmission line model measurement. On the basis of the analyses of the obtained results, the on-resistance of device dependent on gate voltage, and the capacitance-voltage data measured at the gate-source diode, we find that the hole sheet density under the gate reaches 1.56×10^{13} cm⁻² at a gate voltage of -5 V, and the extracted effective mobility of the holes stays at about 170 cm²/(V·s) in the aforementioned gate voltage range with high transconductance. In summary, the high and broad transconductance peak and the low on-resistance are attributed to the relatively low gate-source and gate-drain series resistance, the high-density carriers in the channel, and the high-level mobility achieved over a large gate voltage range. The relevant research of finding proper dielectrics for the gate insulator and the passivation layer is under way to further improve the device performance.

Keywords: diamond, hydrogen-terminated, field effect transistors

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

DOI: 10.7498/aps.67.20171965

[†] Corresponding author. E-mail: jfzhang@xidian.edu.cn