

单晶金刚石氢终端场效应晶体管特性

任泽阳 张金凤 张进成 许晟瑞 张春福 全汝岱 郝跃

Characteristics of H-terminated single crystalline diamond field effect transistors

Ren Ze-Yang Zhang Jin-Feng Zhang Jin-Cheng Xu Sheng-Rui Zhang Chun-Fu Quan Ru-Dai
Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 208101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.208101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.208101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

硼氢协同掺杂 Ib 型金刚石大单晶的高温高压合成与电学性能研究

[Synthesis and electrical properties study of Ib type diamond single crystal co-doped with boron and hydrogen under HPHT conditions](#)

物理学报.2016, 65(11): 118103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.118103>

高压熔渗生长法制备金刚石聚晶中碳的转化机制研究

[Research on mechanism of carbon transformation in the preparation of polycrystalline diamond by melt infiltration and growth method under high pressures](#)

物理学报.2016, 65(6): 068101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068101>

添加 $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ 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 \$\text{Fe}\(\text{C}_5\text{H}_5\)_2\$ additive](#)

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

高质量高取向 (100) 面金刚石膜的可控性生长

[Preparation of the high-quality highly \(100\) oriented diamond films with controllable growth](#)

物理学报.2015, 64(2): 028101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028101>

单晶金刚石氢终端场效应晶体管特性

任泽阳 张金凤[†] 张进成 许晟瑞 张春福 全汝岱 郝跃

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

(2017年4月20日收到; 2017年8月23日收到修改稿)

基于微波等离子体化学气相淀积生长的单晶金刚石制作了栅长为2 μm 的耗尽型氢终端金刚石场效应晶体管, 并对器件特性进行了分析. 器件的饱和漏电流在栅压为 -6 V 时达到了 96 mA/mm , 但是在 -6 V 时栅泄漏电流过大. 在 -3.5 V 的安全工作栅压下, 饱和漏电流达到了 77 mA/mm . 在器件的饱和区, 宽 5.9 V 的栅电压范围内, 跨导随着栅电压的增加而近线性增大到 30 mS/mm . 通过对器件导通电阻和电容-电压特性的分析, 氢终端单晶金刚石的二维空穴气浓度达到了 $1.99 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$, 并且迁移率和载流子浓度均随着栅压向正偏方向的移动而逐渐增大. 分析认为, 沟道中高密度的载流子、大的栅电容以及迁移率的逐渐增加是引起跨导在很大的栅压范围内近线性增加的原因.

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.66.208101

1 引言

金刚石由于具有禁带宽度大、热导率高、载流子迁移率高等一系列的优点, 被业界称为终极半导体材料^[1-4], 在高温、高频、高功率电子器件应用方面具有很大的潜力. 然而n型和p型金刚石半导体材料常用的掺杂剂硼和磷的激活能分别为 0.37 和 0.6 eV , 室温下难以激活, 这严重阻碍了金刚石在电子器件领域的应用和发展^[5]. 幸运的是, 当把金刚石在氢等离子体氛围中处理之后, 会形成由碳-氢(C—H)键覆盖的表面即所谓氢终端表面, 这种表面暴露在空气中会产生一层二维空穴气(two-dimensional hole gas, 2DHG). 在室温下, 2DHG的载流子浓度通常在 10^{12} — 10^{14} cm^{-2} 范围, 迁移率 μ 通常在几十到 $200\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 范围^[6-9]. 氢终端表面为金刚石在电子器件领域的应用提供了新的思路. 目前, 基于氢终端表面的金刚石场效应晶体管已经实现了最大输出电流 1.3 A/mm ^[10], 截止频率 53 GHz , 最大振荡频率 120 GHz ^[11,12]和 1 GHz 下的输出功率密度 2.1 W/mm ^[6]. 尽管如此, 国内

基于单晶金刚石材料的场效应晶体管研究的公开报告却很少.

理论上, 在长沟道的氢终端金刚石场效应晶体管中, 器件的跨导 g_m 在栅源电压 V_{GS} 高于阈值电压 V_{TH} 时会随着栅电压的增加而线性增加. Kawarada等^[13,14]的报道指出, $2\text{ }\mu\text{m}$ 是金刚石氢终端场效应晶体管能够保持长沟器件特性的最小栅长. 然而, 在栅长 $\geq 2\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石氢终端场效应晶体管中, g_m 随着 $|V_{GS}-V_{TH}|$ 增加而增加的电压范围通常限制在 4 V 以内, 更高的正向栅电压会导致跨导退化^[15-18]. 若不考虑器件栅源和栅漏串联电阻, 长沟道器件的 g_m 主要由沟道载流子的浓度和迁移率来共同决定, 而短沟道器件的 g_m 主要由载流子的饱和速度决定. 因此, 研究 g_m 和 V_{GS} 的关系是研究氢终端表面金刚石场效应晶体管的沟道载流子特性的有效方法.

本文采用微波等离子体化学气相淀积的方法在高温高压的金刚石衬底上外延生长了 200 nm 厚的单晶金刚石层, 并且基于外延生长的单晶金刚石制作了氢终端表面的单晶金刚石金属-半导体场效应管(metal-semiconductor field effect transis-

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

tor, MESFET) 器件. 器件的 g_m 随 $|V_{GS}-V_{TH}|$ 变化而近线性增加的电压范围达到了 5.9 V, 在 -3.5 V 时, 最大跨导达到了 30 mS/mm.

2 实验过程

实验中使用的衬底是从元素六公司购买的面积为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 (001) 方向的 Ib 型高温高压衬底. 在外延生长之前, 衬底被精细抛光. 随后, 为了去除金刚石表面可能存在的非金刚石相以及获得氧终端金刚石表面, 将抛光后的金刚石衬底放入 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 的 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ (1 : 1) 的混合溶液中处理 1 h, 然后分别在丙酮、无水乙醇、去离子水

中清洗 15 min. 然后将金刚石衬底放入到微波等离子化学气相淀积设备的腔体中外延生长 200 nm 厚的单晶金刚石层. 生长过程中, 总的气体流量为 500 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 甲烷的浓度为 0.1%, 压力、微波功率和温度分别为 100 Torr (1 Torr = 1.33322×10^2 Pa), 1 kW 和 $900\text{ }^\circ\text{C}$. 生长完成之后, 将样品在氢等离子体氛围中保持 10 min, 然后在氢气氛围中冷却样品到室温, 就形成氢终端表面. 如图 1(a) 所示, 将氢终端样品暴露在空气中会出现一层吸附物, 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二维空穴气.

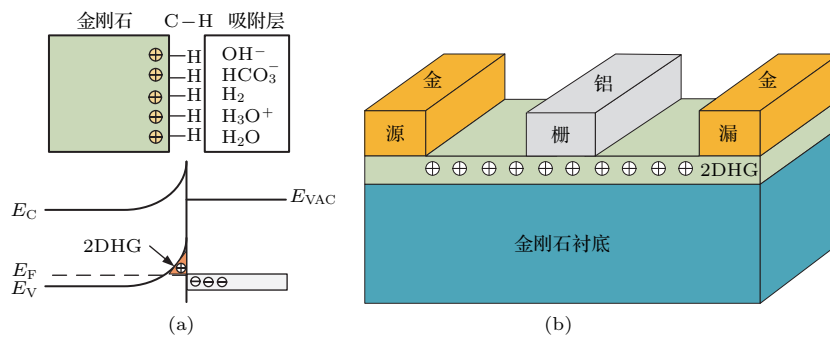


图 1 (a) 氢终端金刚石表面能带图和 (b) 金刚石 MESFET 器件结构示意图
 Fig. 1. (a) Schematic of the energy band structure of the H-diamond surface exposed to atmosphere and the schematic structure of the diamond MESFET.

为了保护氢终端金刚石表面, 首先使用热蒸发方法在金刚石表面蒸镀厚度 100 nm 的金层 [19]. 同时, 由于氢终端表面金刚石的能级非钉扎特性 [20] 和金的功函数大的原因, 金可以与氢终端的金刚石表面之间形成欧姆接触. 接着进行有源区光刻和金的湿法腐蚀. 使用 KI/I_2 溶液将有源区之外的金腐蚀掉, 然后将样品置于低功率的氧等离子体中处理 10 min 来完成器件隔离的工艺. 这是由于经过氧等离子体处理之后, 没有金保护的单晶金刚石表面会变为氧终端表面, 而氧终端表面金刚石的费米能级钉扎在价带以上 1.7 eV, 具有高绝缘性质. 接着在进行栅窗口光刻工艺和窗口中金的湿法腐蚀之后, 光刻胶下方留下的金形成源漏电极, 同时金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 nm 的铝层, 最后经过剥离工艺形成栅, 完成器件的制作. 如图 1(b) 所示, 在微波等离子化学气相淀积生长的单晶金刚石表面成功地制作出栅长为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的

MESFET 器件. 使用 Keithley 4200 半导体参数分析仪对器件特性进行了测试. 为了研究氢终端金刚石的表面特性, 分别对酸处理后的氧终端表面和氢等离子体处理后的氢终端表面样品进行了 X 射线光电电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 测试.

3 结果与讨论

对高温高压金刚石衬底和外延生长后的样品表面进行了原子力显微镜测试, 测试结果如图 2 所示. 生长之前, 样品经过精细抛光, 表面的均方根粗糙度达到 0.83 nm (图 2(a)), 在外延生长和氢终端处理之后表面的均方根粗糙度为 0.92 nm (图 2(b)). 样品表面粗糙度较小, 并且在表面只有极少的缺陷坑出现, 表明单晶金刚石具有较高的质量, 这有助于实现较高的器件性能.

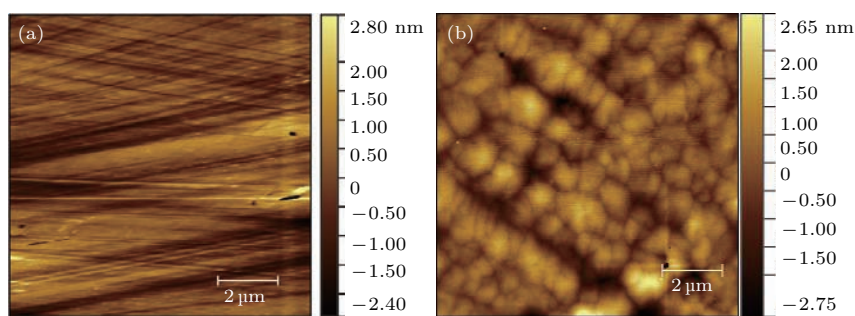


图2 (网刊彩色) (a) 金刚石衬底和 (b) CVD 外延单晶表面形貌

Fig. 2. (color online) Morphology of the (a) HPHT substrate and (b) CVD grown single crystal diamond.

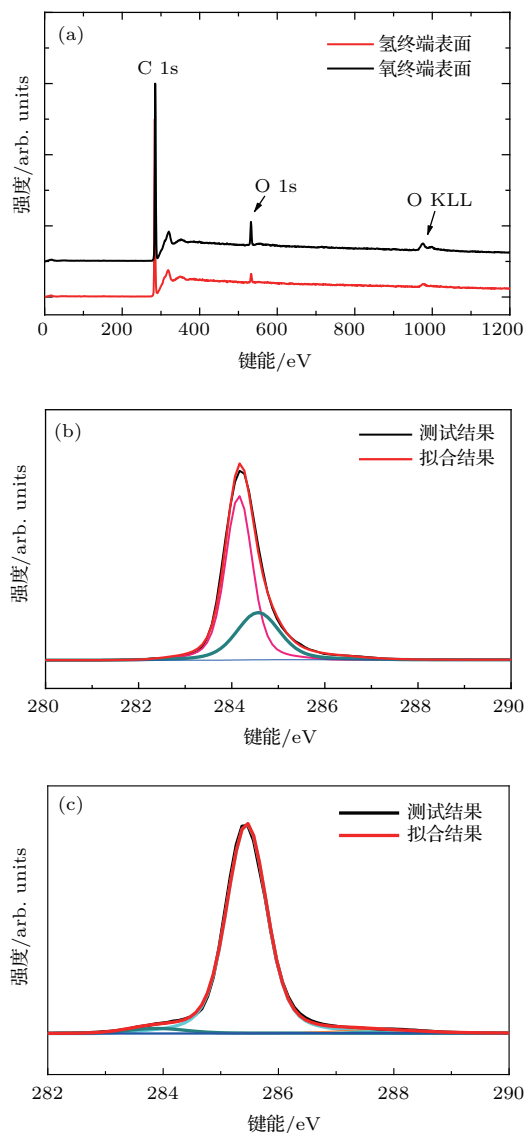


图3 (网刊彩色) (a) 酸处理后的和氢等离子体处理后的样品 XPS 测试全谱图; (b) 氢终端表面和 (c) 氧终端表面金刚石 XPS 测试的 C 峰结果

Fig. 3. (color online) (a) X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) result of the H-terminated and O-terminated diamond surface; spectrum of the C 1s peak of (b) H-terminated, and (c) O-terminated diamond surface.

为了研究氢终端处理前后样品表面的化学键结合状态的变化, 对样品进行了 XPS 测试, 测得的全谱如图 3(a) 所示. 通过对比可以发现, 氢终端金刚石表面的 O 1s 峰和 O KLL 峰的强度明显降低. 为了进一步研究金刚石表面碳 (C) 元素的结合状态, 对 C 峰进行了测试, 结果如图 3(b) 和 3(c) 所示. 通过对比可以看出, 氢终端金刚石的位置向低键能方向移动, 这主要是由于氢终端金刚石表面能带弯曲所致. 此外, 通过对测量结果的分峰拟合可以发现氢终端金刚石表面出现了位于 284.57 eV 处的 C—H 键相关的峰, 而且 287.87 eV 处的 C—O 键相关的峰消失. XPS 测试结果表明, 通过氢等离子体处理, 金刚石表面的 C—O 键断裂, 氧元素含量减少, 碳的悬挂键吸附了氢原子形成 C—H 键, 从而氧终端表面转变成氢终端表面.

器件的输出特性如图 4 所示, 表明器件为耗尽型的 p 沟道器件. 栅宽 50 μm 的器件 A 的输出特性测试结果显示, 最大输出电流在栅电压 -6 V 时达到了 96 mA/mm. 但是, 从图 4(a) 中可以看到, 漏源电压 V_{DS} 为零时漏极电流 I_{DS} 不为零, 说明栅极出现泄漏电流; 图 4(a) 的内插图给出了测量输出特性的同时测得的栅极电流, 可以看到当 $V_{GS} < -4$ V 时, 栅泄漏电流明显增大. 测试中也发现, 器件经过强正向栅电压偏置后容易出现器件特性的退化. 因此在测试过程中, 我们将栅电压限制在 -4 V 以下. 对于栅宽 100 μm 的器件 B, 如图 4(b) 在 $V_{DS} = 0$ 时没有观察到明显的栅极漏电现象. 线性区的导通电阻 (on-resistance, R_{on}) 随着 V_{GS} 的改变而改变, 并且在饱和区饱和电流 (saturation drain current, I_{DSat}) 的增加量随着 V_{GS} 的增加而不断增加, 这表明器件的 g_m 随着 V_{GS} 的增加不断增加. 通过对样品上其他器件的测试, 也都观察到了相同的现象.

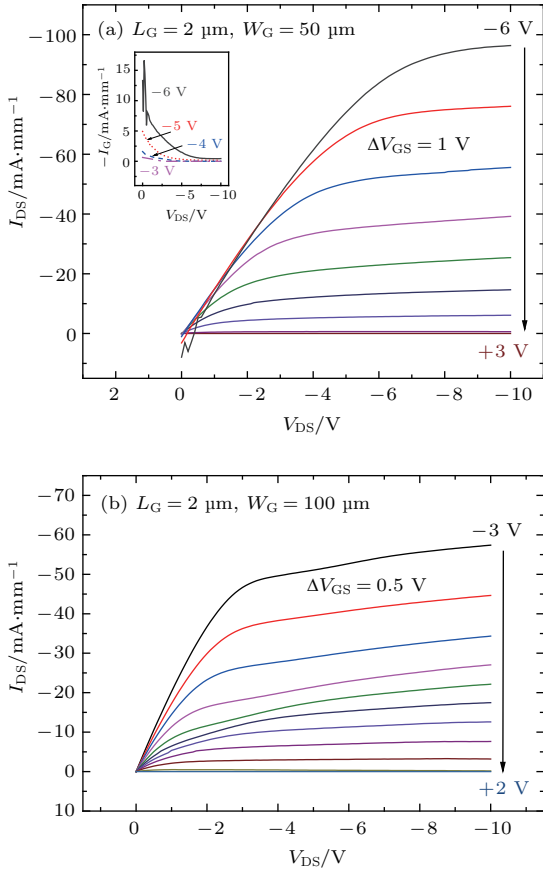


图4 (网刊彩色) 器件输出特性 (a) 栅宽 50 μm, 栅压范围 -6—+3 V; (b) 栅宽 100 μm, 栅压范围 -3—+2 V
 Fig. 4. (color online) Output characteristics of the diamond FETs with (a) $W_G = 50 \mu\text{m}$ for $V_{GS} = -6 \sim +3 \text{ V}$ and (b) $W_G = 100 \mu\text{m}$ for $V_{GS} = -3 \sim +2 \text{ V}$.

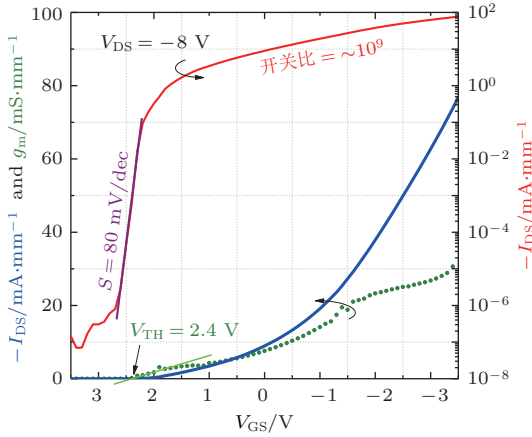


图5 (网刊彩色) 器件转移特性图, 器件栅长 2 μm, 栅宽 100 μm
 Fig. 5. (color online) Transfer and transconductance characteristics of the diamond FET with $L_G = 2 \mu\text{m}$ and $W_G = 100 \mu\text{m}$.

以下的讨论限于器件B. 该器件在 $V_{DS} = -8 \text{ V}$ 时的转移特性曲线(图5)表现出典型的长沟器件特性. 当 V_{GS} 从 $V_{TH}(2.4 \text{ V})$ 向负电压方向变化时,

g_m 基本保持线性增加, 并且在 -3.5 V 的栅电压下达到最大值 30 mS/mm . g_m 随 $|V_{GS} - V_{TH}|$ 变化而线性增加的电压范围达到了 5.9 V . 与此同时, 器件的开关比和亚阈值摆幅 S 分别达到了 10^9 和 80 mV/dec . 其中高达 10^9 的开关比是目前报道中的最高值, 这直接证明了外延生长的单晶金刚石层的高绝缘性和良好的器件制备工艺.

场效应管器件的特性主要是由栅下沟道载流子的分布和输运特性来决定的. 为了深入分析器件的特性, 进行了栅源之间的电容-电压($C-V$)测试, 结果如图6所示. 电容快速地从耗尽区 ($4 \text{ V} > V_{GS} > 3 \text{ V}$) 上升到平台区 ($2 \text{ V} > V_{GS} > -2 \text{ V}$), 然后随着电压的增加出现了第二个电容上升的区域 ($-2 \text{ V} > V_{GS} > -2.5 \text{ V}$). 类似的 $C-V$ 测试结果在一些铝栅的金刚石场效应管中有过报道 [21,22], 据分析在铝和金刚石的界面可能存在铝的氧化物层. 这个界面介质层使铝栅的金刚石 MESFET 器件实际上形成类似金属-氧化物-半导体 (MOS) 栅的器件结构, 提高器件栅极的耐压能力 [21-24]. 根据铝的功函数 4.28 eV 和氢终端金刚石表面的功函数 4.9 eV [25], 铝在氢终端金刚石表面若形成肖特基势垒, 则势垒高度仅 0.62 eV . 本研究制作的器件栅耐压远高于该势垒高度, 也从侧面证明器件形成了金属-氧化物-半导体的栅结构这个观点. $C-V$ 曲线的不同区域反映了载流子从耗尽到堆积再到进入介质层的不同状态. 假设金刚石和可能存在的介质层的介电常数均为 5.7 , 可以得到

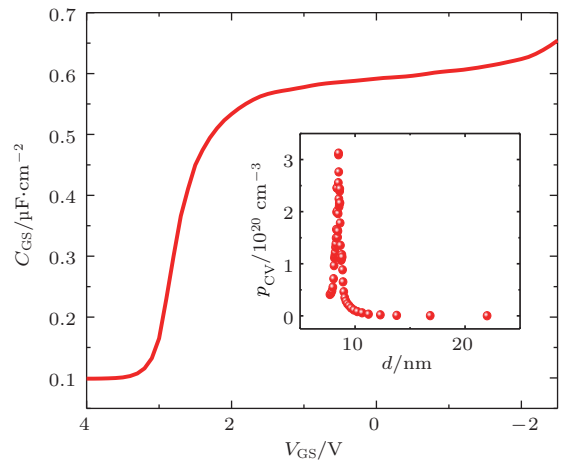


图6 金刚石基 MESFET 的 $C-V$ 特性测试结果, 测试频率 1 MHz , 插图为载流子浓度随深度的分布
 Fig. 6. Capacitance-voltage curve of the diamond-based MESFET measured at 1 MHz , the inset shows the $C-V$ carrier profile.

载流子浓度随深度(d)增加呈尖峰状分布(图6的内插图),浓度的峰值分布在金刚石表面下方8.5 nm处.这符合氢终端金刚石表面附近2DHG沿表面呈薄层状分布的特点.根据C-V测试结果,栅下沟道2DHG的最大浓度(p_s)可由(1)式积分计算得 $1.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

$$p_s = \int C_{GS} dV. \quad (1)$$

器件的导通电阻 R_{on} 是 V_{GS} 的函数,由 R_{on} 与不同 V_{GS} 下的沟道可动电荷浓度

$$p_{ch} = \int_{V_{GS0}}^{V_{GS}} C_{GS} dV \quad (V_{GS0} = 4 \text{ V})$$

的关系式可以提取出载流子的有效迁移率 μ :

$$R_{on} = R_{DS} + \frac{L_G}{W_G e \mu p_{ch}}, \quad (2)$$

其中 R_{DS} 是栅源和栅漏之间总的串联电阻, e 是电子电量($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$). R_{on} 和 $1/p_{ch}$ 关系的拟合结果如图7所示. R_{on} 和 $1/p_{ch}$ 的关系是非线性的,因此迁移率并不是常数.经验性地假设迁移率 μ 和 $1/p_{ch}$ 之间的关系满足 $\mu = \frac{L_G}{W_G e} \frac{1 - a_2/p_{ch}}{a_1}$,获得了较好的拟合结果,其中 a_1 和 a_2 的取值为 $a_1 = 1.85 \times 10^{33} \text{ } \Omega/\text{cm}^2$, $a_2 = 3.99 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

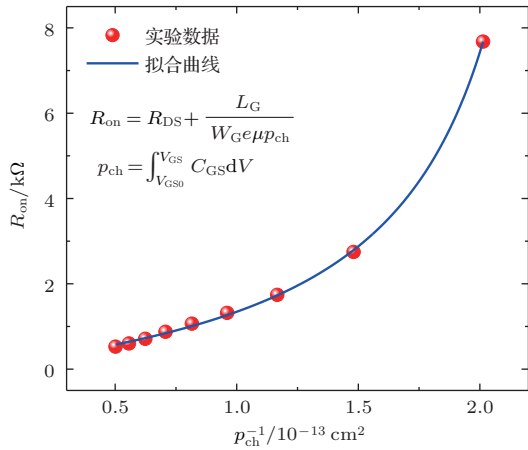


图7 导通电阻与 $1/p_{ch}$ 的关系

Fig. 7 On-resistance versus $1/p_{ch}$ relation and the fitting curve.

如图8所示,获得的迁移率较低(6.6—27.0 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$),随 V_{GS} 减小而增加,增幅逐渐减小,迁移率趋于饱和.根据前人总结的氢终端金刚石2DHG的大量霍尔迁移率测试数据[26],当空穴浓度较高(高于 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)时2DHG迁移率较低且变化不大,因此本文的迁移率特性与

沟道空穴浓度高($p_s = 1.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)的特点是一致的.氢终端金刚石晶体管提取的沟道载流子迁移率通常随着 V_{GS} 向负电压方向移动会达到一个最大值然后有所下降[16],但在本器件中由于栅偏压范围的限制,迁移率在强负栅压下的下降并没有表现出来.图8中给出了 p_{ch} 随 V_{GS} 的变化关系.当栅压高于阈值电压时,载流子浓度随栅压的增加而线性增加,表明栅能够有效控制沟道中高密度的载流子的堆积和耗尽,并且当沟道开启以后,在整个施加的栅电压范围内,栅控制能力是均一的.设器件的栅电容为 C_{ox} ,则由栅下可动电荷 $Q_{ch} = C_{ox}(V_{GS} - V_{TH}) = e p_{ch}$ 的关系可知, $C_{ox} = e \frac{\Delta p_{ch}}{\Delta V_{GS}} = 0.588 \text{ } \mu\text{F}/\text{cm}^2$,这在铝和氢终端金刚石形成的栅极电容中是一个较大的值.

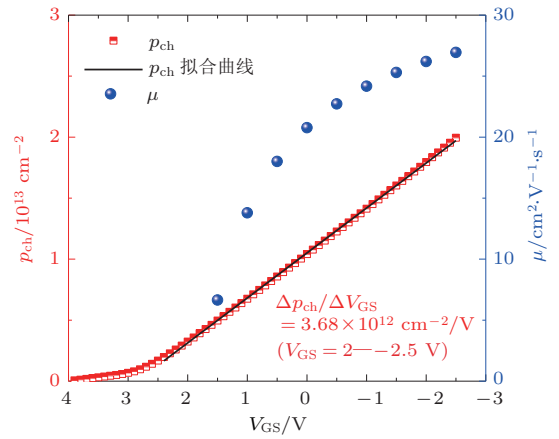


图8 沟道载流子浓度和迁移率与栅电压的关系

Fig. 8. Channel hole density p_{ch} calculated from the C-V curve and the channel mobility extracted from $R_{on}-1/p_{ch}$ relation.

本项研究中最重要的是器件特性是 g_m 随 $|V_{GS}-V_{TH}|$ 线性增加的电压范围较大,这有助于实现较大的饱和漏电流和最大跨导.在长沟器件输出特性的饱和区,跨导 g_m 与栅压的关系可以用(3)式来表示:

$$g_m = \mu C_{ox} \frac{W_G}{L_G} (V_{GS} - V_{TH}). \quad (3)$$

根据图6—图8的测量和分析结果,本文器件具有较大的沟道载流子浓度,因此阈值电压的绝对值较大,沟道开启后栅压变化范围 $|V_{GS}-V_{TH}|$ 达5.9 V;栅电容较大,因此栅控制电荷能力强,沟道电流对栅压的变化很敏感;再者载流子迁移率随着 V_{GS} 向 -2.5 V 移动而不断增大,因此形成跨导随栅压大范围变化持续增加的特性.但稍微不足的是

载流子迁移率较小,对跨导的大小有所限制. Kasu 等^[10]利用NO₂吸附的氢终端表面与Al₂O₃栅介质兼钝化介质结合,不仅实现了很高的载流子浓度($4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$),同时还保持了较高的载流子迁移率($110 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$),所以在很大的栅压范围内获得了高本征跨导(在 $7 \text{ V} > V_{\text{GS}} > -2 \text{ V}$ 高于跨导最大值的90%)和高达1.3 A/mm的饱和电流.所以,我们期望能够通过进一步提高氢终端金刚石表面2DHG的迁移率和密度来提高器件的性能.另一方面,可以预见,如果器件的栅能够耐受更大的栅正偏电压,则沟道特性的变化将导致在较大的栅压下出现近常数的跨导值.为了减少失真,在大信号线性微波放大器中希望能够有在较宽栅压范围保持较高的常数值跨导特性.因此,在接下来的研究中希望能够通过引入栅绝缘层提高栅耐压来进一步提高金刚石氢终端器件的特性.

4 结 论

本文基于微波等离子体化学气相淀积外延生长的单晶金刚石层制作了栅长为 $2 \mu\text{m}$ 的金属半导体场效应晶体管,器件表现出典型的长沟道器件特性. g_m 随 $|V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}}|$ 增加而近线性增加的电压范围达到了5.9 V.在 -3.5 V 的栅电压下,饱和电流和最大跨导分别达到了77 mA/mm和30 mS/mm.高达 $1.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的载流子浓度导致了较大的阈值电压(2.4 V),较高的栅电容和沟道载流子迁移率随栅压正偏不断增加的特性,是引起在很大的栅压范围内 g_m 近线性增大的原因.下一步将开展提高载流子迁移率和寻找合适的栅介质的相关研究,以提高金刚石场效应管器件的特性.金刚石作为新一代的超宽禁带半导体材料,其材料和器件近年来迅速成为新的研究热点.随着研究的深入和器件性能的提高,相信很快能够进一步发挥金刚石在高温、高压、高频、高功率半导体器件等领域巨大的应用潜力.

感谢西安交通大学王宏兴教授课题组对单晶金刚石氢终端处理提供的帮助和支持.

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, Lü X Y, Hou X, Hu S, Liu W J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 232
- [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] Yamasaki S, Gheeraert E, Koide Y 2014 *MRS Bull.* **39** 499
- [6] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2005 *Electron. Lett.* **41** 1249
- [7] Kasu M, Ueda K, Ye H, Yamauchi Y, Sasaki S, Makimoto T 2006 *Diamond Relat. Mater.* **15** 783
- [8] Hiramaka K, Sato H, Harada Y, Yamamoto H, Kasu M 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 1111
- [9] Kawarada H, Tsuboi H, Naruo T, Yamada T, Xu D, Daicho A, Saito T, Hiraiwa A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 013510
- [10] Hiramaka K, Sato H, Harada Y, Yamamoto H, Kasu M 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 080112
- [11] Russell S A O, Sharabi S, Tallaire A, Moran D A J 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 1471
- [12] 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
- [13] Kawarada H 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 090111
- [14] Matsudaira H, Miyamoto S, Ishizaka H, Umezawa H, Kawarada H 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 480
- [15] Feng Z B, Chayahara A, Mokuno Y, Yamada H, Shikata S 2010 *Diamond Relat. Mater.* **19** 171
- [16] Vardi A, Tordjman M, Del Alamo J A, Kalish R 2014 *IEEE Electron Dev. Lett.* **35** 1320
- [17] Wang W, Hu C, Li S Y, Li F N, Liu Z C, Wang F, Fu J, Wang H X 2015 *J. Nanomater.* **2015** 124640
- [18] Wang W, Fu K, Hu C, Li F N, Liu Z C, Li S Y, Lin F, Fu J, Wang J J, Wang H X 2016 *Diamond Relat. Mater.* **69** 237
- [19] 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
- [20] Calvani P, Corsaro A, Girolami M, Sinisi F, Trucchi D M, Rossi M C, Conte G, Carta S, Giovine E, Lavanga S, Limiti E, Ralchenko V 2009 *Diamond Relat. Mater.* **18** 786
- [21] Kubovic M, Kasu M, Yamauchi Y, Ueda K, Kageshima H 2009 *Diamond Relat. Mater.* **18** 796
- [22] Kasu M, Ueda K, Yamauchi Y, Makimoto T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 043509
- [23] Kasu M, Ueda K, Kageshima H, Yamauchi Y 2008 *Diamond Relat. Mater.* **17** 741
- [24] Cappelluti F, Ghione G, Russell S A O, Moran D A J, Verona C, Limiti E 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 783
- [25] Rezek B, Sauerer C, Nebel C E, Stutzmann M, Ristein J, Ley L, Snidero E, Bergonzo P 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2266
- [26] Hiramaka 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

Characteristics of H-terminated single crystalline diamond field effect transistors

Ren Ze-Yang Zhang Jin-Feng[†] Zhang Jin-Cheng Xu Sheng-Rui Zhang Chun-Fu
Quan Ru-Dai Hao Yue

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

(Received 20 April 2017; revised manuscript received 23 August 2017)

Abstract

Diamond has been considered as an ultimate semiconductor, which has great potential applications in high power, high frequency semiconductor devices. Up to now, the twodimensional hole gas (2DHG) induced on the hydrogen-terminated diamond surface is used most popularly to form electric conduction in diamond semiconductor at room temperature, due to the obstacle caused by lacking of easily-ionized dopants. A 200-nm-thick single crystalline diamond is grown by microwave plasma chemical vapor deposition on the type-Ib high-pressure high-temperature synthesized diamond substrate. Then the sample is treated in hydrogen plasma atmosphere to achieve hydrogen terminated diamond surface. The sample is characterized by X-ray photoelectron spectroscopy and atomic force microscope. After that, the normally-on hydrogen-terminated diamond field effect transistors are achieved. The device with a gate length of 2 μm delivers a saturation leakage current of 96 mA/mm at gate voltage $V_{\text{GS}} = -6$ V, at which, however, the gate leakage current is too large. The saturation current reaches 77 mA/mm at $V_{\text{GS}} = -3.5$ V with safety. The device shows typical long-channel behavior. The gate voltage varies almost linearly. In the saturation region of the device, the transconductance (g_m) increases near-linearly to 30 mS/mm with the increase of the gate voltage in a range of 5.9 V. Analyses of the on-resistance and capacitance-voltage ($C-V$) data show that the 2DHG under the gate achieves a density as high as $1.99 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, and the extracted channel carrier density and mobility are always kept increasing with V_{GS} negatively shifting to -2.5 V. The nearlinearly increasing of g_m in a large V_{GS} range is attributed to high 2DHG density, quite a large gate capacitance (good gate control), and increased mobility. The relevant researches of improving the carrier mobility in the channel and of finding proper gate dielectrics to improve the forward gate breakdown voltage are underway.

Keywords: diamond, hydrogen-terminated, field effect transistors

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

DOI: 10.7498/aps.66.208101

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