

水平结构氢终端金刚石 MOSFET 的研究进展*

尹 灿¹ 邢艳辉^{1**} 张 璇² 张 丽² 于国浩² 张学敏² 张宝顺²⁽¹⁾ 北京工业大学 信息学部 光电子技术教育部重点实验室, 北京, 100124)⁽²⁾ 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米加工平台, 江苏, 苏州, 215123)

2024-01-08 收稿, 2024-03-04 收改稿

摘要: 氢等离子体处理后的金刚石表面具有导电性, 室温下二维空穴气 (Two-dimensional hole gas, 2DHG) 面密度可达 10^{13} cm^{-2} , 因此利用氢终端金刚石制备的场效应晶体管成为研究重点。本文基于金刚石优异的物理性质, 介绍了两种氢终端金刚石 2DHG 的形成机理, 以耗尽型氢终端金刚石 MOSFET 为例提出稳定 2DHG 及提高器件性能的方法, 总结增强型氢终端金刚石 MOSFET 的三种实现方法, 并综述氢终端金刚石功率器件研究现状、面临的问题以及对未来发展的展望。

关键词: 氢终端金刚石; 二维空穴气; 金属氧化物半导体场效应晶体管; 耗尽型; 增强型; 金属氧化物

中图分类号: TN301; O471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2024)03-0185-11

Research Progress on Horizontal Structure Hydrogen-terminated Diamond MOSFET

YIN Can¹ XING Yanhui¹ ZHANG Xuan² ZHANG Li² YU Guohao² ZHANG Xuemin²ZHANG Baoshun²⁽¹⁾ Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, CHN)⁽²⁾ Nanofabrication Facility, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu, 215123, CHN)

Abstract: When the diamond surface is treated by hydrogen plasma, an accumulation layer of two-dimensional hole gas (2DHG) will be formed with a density of about 10^{13} cm^{-2} . Therefore, field-effect transistors fabricated using hydrogen-terminated diamond (H-diamond) have become the focus of research. This paper is based on the outstanding physical properties of diamond and mainly discusses two formation mechanisms of H-diamond 2DHG, methods to stabilize 2DHG and improve device performance based on the depletion mode H-diamond MOSFET device structure, and three approaches to realize enhancement mode H-diamond MOSFET. Furthermore, the current research status, the challenges faced and prospects for future development are summarized.

Key words: H-diamond; 2DHG; MOSFET; depletion mode; enhancement mode; metal oxide

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60908012, 61575008, 61775007, 62074011, 62134008)

** 联系作者: E-mail: xingyanhui@bjut.edu.cn

引言

金刚石具有许多优异的特性,如超宽禁带宽度(5.5 eV)、高击穿场强($\geq 10 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$)、高热导率($22 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$)、高载流子迁移率($\mu_n=4\,500 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $\mu_p=3\,800 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)、高载流子饱和速度($v_n=1.5\times 10^7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $v_p=1.05\times 10^7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)^[1-2]等,是制备高温、高频、高功率电子器件的理想材料,被誉为“终极半导体”。在金刚石中掺杂不同元素可以实现n型和p型导电,然而,金刚石掺杂需要解决由杂质电离能高(磷元素电离能0.58 eV、硼掺杂金刚石电离能0.37 eV)带来的问题^[3]。20世纪90年代,研究人员发现氢(H)等离子体处理过的金刚石表面具有p型导电特性,氢等离子体刻蚀金刚石表面的石墨相,与表面的碳悬挂键成键(C—H键),形成氢终端金刚石表面。由于氢终端金刚石表面具有p型导电特性,被称为二维空穴气(Two-dimensional hole gas, 2DHG),其可用作导电沟道,极大地推动了金刚石场效应晶体管(Field effect transistor, FET)的研发。2012年K. Hirama等人^[4]利用NO₂处理氢终端金刚石表面,制备出漏极饱和电流为 -1.35 A/mm 的氢终端金刚石金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET),这也是迄今为止的漏极饱和电流最大值;2016年H. Kawarada等人^[5]在氢终端金刚石上沉积400 nm的Al₂O₃,栅漏电极间距为16 μm 时的击穿电压为1 708 V;2018年X. X. Yu等人^[6]报道了截止频率高达70 GHz的高频氢终端金刚石金属绝缘体半导体场效应晶体管(Metal-insulator-semiconductor field effect transistor, MISFET);2019年S. Imanishi等人^[7]在(110)晶向的多晶金刚石上制备Al₂O₃栅介质氢终端金刚石MOSFET,器件的载流子速度首次达到 10^7 cm/s ,在1 GHz下的最大输出功率密度为3.8 W/mm。相比于Si基GaN功率器件,氢终端金刚石MOSFET的输出电流密度偏低,实验发现被NO₂处理后的氢终端金刚石表面2DHG浓度增大^[8-9],可以提高器件输出电流。除此之外,科研人员还提出零栅源间距结构减小导电电阻^[10]、沉积高功函数金属氧化物增大2DHG浓度^[11]等提高器件性能的方案。由于氢终端金刚石2DHG面密度约为 10^{13} cm^{-2} ,因此制备的MOSFET天然就是耗尽型器件。然而增强型功率器件可以提高系统安全性、降低功耗。目前主要通过氢终端部分氧化为氧终端,降低2DHG浓度或耗尽氢终端金刚石沟道中的2DHG等方法实现增强型。

本文概述了氢终端金刚石表面2DHG形成机理,给出了稳定2DHG、增大2DHG浓度、降低导电电阻等提高器件性能的方法,在此基础上介绍了氢终端金刚石耗尽型和增强型MOSFET的实现方法,最后指出其面临的问题并对未来进行了展望。

1 氢终端金刚石二维空穴气的形成

未掺杂的纯净金刚石是极好的绝缘体(电阻率约为 $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$),1989年M. I. Ravi和K. V. Landstrass^[12]首次报道了使用化学气相沉积法(Chemical vapor deposition, CVD)制备的非故意掺杂金刚石薄膜表面具有较低的电阻率($10^5 \Omega\cdot\text{cm}$)。后来实验报道证明氢等离子体处理后的金刚石置于大气环境下产生了表面电导现象,导电载流子为二维空穴气,其面密度约为 10^{13} cm^{-2} ,霍尔迁移率在 $25\sim 80 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 之间,分布于靠近表面约10 nm的薄层内。然而对于氢终端金刚石表面导电机理的解释一直存有争议,目前被接受的观点主要有自发极化模型和转移掺杂模型。

1.1 自发极化模型

自发极化模型是K. Hirama等人^[13]提出的。C和H的电负性分别为2.5 eV和2.1 eV,由于二者电负性的差异,氢终端金刚石表面由于C—H偶极子的存在而产生电荷极化效应。带负电的电荷从氢原子转移到碳原子上,因此大气中带负电的吸附物被偶极子的表面电荷吸引到金刚石表面,诱导表面下方产生空穴,满足电中性条件,如图1所示。

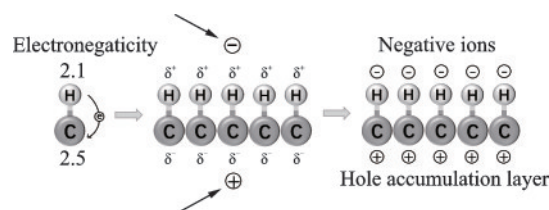


图1 自发极化模型原理图

Fig.1 Spontaneous polarization model for hole accumulation layer

1.2 转移掺杂模型

F. Maier等人^[13]实验证实氢终端只是产生金刚石表面电导的一个必要条件,而氢终端金刚石暴露在大气环境下也是形成表面电导必不可少的条件,由此提出转移掺杂模型。此模型认为氢终端金刚石暴露于空气中,在表面会吸附一薄薄水层,并发生还原反应: $2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$,氢终端金

金刚石表面与吸附水层接触的示意图如图 2(a)所示。电子从氢终端金刚石表面转移到水层,水吸附层充当金刚石表面的受主,其化学势 μ_e 低于氢终端金刚石的费米能级 E_F ;随着表面电子不断转移到吸附层中,空穴不断在表面积累,同时氢终端金刚石表面能带向上弯曲、吸附层化学势 μ_e 增大,直至 E_F 与 μ_e 相等,此时在氢终端金刚石表面就形成了稳定的 2DHG,如图 2(b)所示^[13]。J. Van der Weide 等人^[15]通过光电子能谱实验和“从头计算法”(ab initio)计算发现氢终端金刚石表面呈现负电子亲和能。J. B. Cui 等人^[16]通过功函数测量、光电子产额和光电子能谱实验,确定了氢终端金刚石表面的电子亲和能 χ 为 -1.3 eV,并认为负电子亲和能是由表面极性 C—H 键形成的电偶极子薄层所导致的。根据金刚石禁带宽度和电子亲和能得到氢终端金刚石表面的价带顶到真空能级的距离为 4.2 eV。吸附物作为金刚石表面受主,其电子亲和能应高于 4.2 eV,而大气中物质分子的电子亲和能都低于 2.5 eV,因此电子直接从金刚石转移到大气吸附物中似乎是不可能的。转移掺杂模型提出在氢终端金刚石表面吸附了一薄层水,水和吸附物一起充当表面受主,水层被其他类似作用的吸附层代替也能用这个模型来解释。

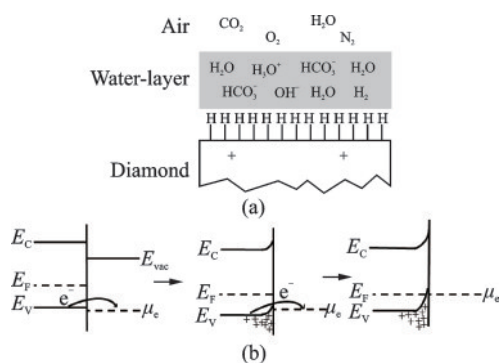


图 2 (a)氢终端金刚石表面与水层接触示意图;(b)金刚石与水层界面电子转移过程与能带弯曲示意图

Fig.2 (a) Schematic diagram of the hydrogenated diamond surface in contact with a water layer; (b) Energy band bending during the electron transfer process at the interface between H-diamond and the water layer

M. Kubovic 等人^[8]研究发现氢终端金刚石暴露于 NO_2 环境中能够增加表面 2DHG 浓度。S.G. Ri 等人^[17]认为 NO_2 气体的电子亲和能可能大于氢终端金刚石的功函数,电子会从半导体表面转移至 NO_2 ,在半导体表面留下空穴,增加表面的电导率,被称为“电荷转移模型”。图 3 为 NO_2 的吸附在表面导电层中产生 2DHG 的示意图^[17]。除 NO_2 外, NO 、

O_3 、 SO_2 等气体也可以增加氢终端金刚石表面的 2DHG 浓度^[18],其中 O_3 环境下的增幅最显著,且臭氧吸附非常稳定。X 射线光电子能谱显示臭氧处理过的氢终端金刚石表面出现 $\text{O} 1s$ 弱峰,同时 $\text{C} 1s$ 峰的键能有所降低,意味着能带向上弯曲。需要注意的是,如果在臭氧环境下施加紫外线,将导致氢终端金刚石表面转变为绝缘的氧终端。

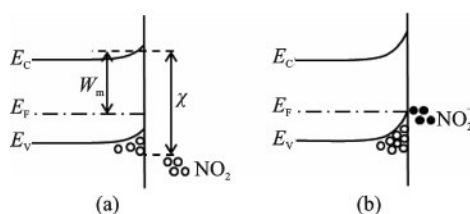


图 3 氢终端金刚石表面吸附 NO_2 产生 2DHG 的示意图:(a)吸附前;(b)吸附后

Fig.3 Schematics of the process of 2DHG generation on H-diamond surface due to the adsorption of NO_2 : (a) Before adsorption; (b) After adsorption

2 氢终端金刚石耗尽型 MOSFET

直接利用氢终端金刚石 2DHG 为沟道制备的 MOSFET 通常为耗尽型器件。由大气中吸附水层为受主的氢终端金刚石表面的 2DHG 热学和化学特性不稳定,用其制备的功率器件的沟道电流不够大、跨导较低,从而制约输出功率密度的提升。下面将分别从稳定与提升 2DHG 浓度、降低导通电阻、提高器件的栅控能力三个方面介绍提高氢终端金刚石 MOSFET 性能的研究。

2.1 稳定与提升 2DHG 浓度

氢终端金刚石表面的 2DHG 对环境气氛、温度、pH 值等非常敏感,例如含氧酸会使氢终端变成氧终端,使其表面失去导电性。F. Maier 等人^[14]发现在大气环境下低于 200°C 退火,经多重内反射红外光谱只检测到氢终端金刚石表面的 C—H 单键,电导保持在 $10^{-6}\sim 10^{-5}$ S; 230°C 及以上温度退火发现氢终端金刚石表面电导直线降低(10^{-10} S),检测不到 C—H 键。M. Riedel 等人^[19]探究了真空退火对氢终端金刚石表面电导的影响,发现低于 190°C 的真空退火,表面电导下降超过 5 个数量级,再次置于大气环境下,表面电导恢复; $250\sim 700^\circ\text{C}$ 下真空退火表面氢终端仍存在,但再次暴露在大气环境下,表面电导未恢复,然而置于臭氧或者氧自由基环境下,表面电导在空气中恢复。对比以上研究结果,可以发现有关环境因素对氢终端金刚石表面电导的影响还有待进一步研究。

为解决氢终端金刚石 2DHG 的稳定性问题,可在其表面沉积金属氧化物,并且选择合适的金属氧化物还可以提升 2DHG 浓度,同时可作为 MOSFET 的栅介质层,因此氢终端金刚石 MOSFET 器件结构得到了更广泛地研究。研究者们使用并分析了不同介质材料与氢终端金刚石界面的接触特性。C. Verona 等人^[20]研究了高功函数氧化物 (MoO_3 、 V_2O_5 、 WO_3 、 Nb_2O_5) 和低功函数氧化物 (Al_2O_3) 对氢终端金刚石 2DHG 的影响。结果显示与空气接触的氢处理金刚石 2DHG 面密度约为 10^{12} cm^{-2} ,高功函数氧化物使载流子面密度增加了一个数量级,方块电阻减小,迁移率下降,而 Al_2O_3 对 2DHG 几乎没有影响;同时研究了氧化物的时间稳定性和热稳定性:霍尔测试结果显示未被氧化物钝化的氢终端金刚石表面 2DHG 面密度、迁移率和方块电阻随温度变化明显,被氧化物覆盖的 2DHG 面密度、迁移率和方块电阻在 60 h 内有小幅度的变化,随着时间延长数值趋于稳定;此外高功函数氧化物的存在极大地增强了 2DHG 电性质的温度稳定性,在 250°C 内 2DHG 面密度保持稳定,其中 WO_3 的稳定温度可达到 350°C ;与高功函数氧化物相比, Al_2O_3 在 400°C 高温具有良好的鲁棒性,即温度升高,被 Al_2O_3 钝化的氢终端金刚石面对外界温度升高具有更强的抵抗能力。另外他们利用热蒸发法沉积了 10 nm V_2O_5 作为栅介质,制备出栅长 $2 \mu\text{m}$ 、栅宽 $200 \mu\text{m}$ 的 MOSFET 器件,最大漏极饱和电流约为 -280 mA/mm ,明显提高了器件的电学性能^[21]。K. G. Crawford 等人^[22]也探究了 V_2O_5 对氢终端金刚石 2DHG 的影响,结果显示大气诱导 2DHG 浓度为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,沉积 V_2O_5 后 2DHG 浓度增加至 6 倍,达到 $1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$,与 C. Verona 等人的结果一致,且 2DHG 浓度和迁移率从室温到 250°C 保持稳定,较大气诱导 2DHG 获得了明显提升。2017 年 Z. Y. Ren 等人^[23]首次将 MoO_3 作为介质层沉积在氢终端金刚石表面,制备出栅长 $4 \mu\text{m}$ 的耗尽型 MOSFET,由于正向栅击穿电压约为 -2 V ,使最大漏极饱和电流被限制在 -33 mA/mm ,器件的栅极峰值跨导 29 mS/mm ,导通电阻 $75.25 \Omega \cdot \text{mm}$,验证了 MoO_3 栅介质用于制备氢终端金刚石器件的可行性。

高功函数氧化物不仅可以起到钝化作用,还可以替代吸附层,促进电子从金刚石转移到介质层,从而提高 2DHG 浓度。其原理仍可用前述的“转移掺杂”模型解释:氢终端金刚石表面具有负电子亲和势,而氧化物的电子亲和势为正值且功函数较高,从而使其费米能级低于氢终端金刚石。两者接触后整个系统达到平衡状态,电子从金刚石表面流向氧化物,使氧化物表面带负电,金刚石表面带正

电,整个系统仍保持电中性,并导致氢终端金刚石表面电势提高,能带向上弯曲,如图 4 所示。

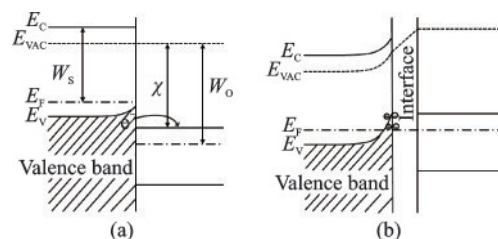


图 4 氢终端金刚石与高功函数氧化物的能带示意图: (a) 接触前; (b) 接触后

Fig.4 Energy band diagrams of H-diamond and high work function oxide: (a) Before contact; (b) After contact

与高功函数氧化物相比, Al_2O_3 的电子亲和能较小,不能诱导出更高浓度的 2DHG,但 Al_2O_3 作为半导体器件常用的高介电常数介质材料,其生长工艺成熟,材料质量高,因此也被广泛应用于氢终端金刚石功率器件。利用电感耦合等离子体增强原子层沉积 (Inductance coupled plasma enhanced atomic layer deposition, ICP-PEALD) 在 80°C 下沉积 Al_2O_3 介质层可有效保护空气吸附物^[6],但热稳定性较差。如果原子层沉积 (Atomic layer deposition, ALD) 在 450°C 下沉积 Al_2O_3 介质层,可去除空气吸附物后在表面再次诱导出新的 2DHG。D. Akira 等人^[24]在氢终端金刚石表面 450°C ALD 沉积 Al_2O_3 薄膜,通过霍尔测试对不同温度下的 2DHG 浓度和方块电阻进行表征。在 $27 \sim 500^\circ\text{C}$ 温度范围内,霍尔测试结果显示方块电阻几乎不变 ($1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{sq}$), 2DHG 浓度恒定在 $8 \times 10^{12} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 范围内,迁移率保持在 $50 \sim 100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,证实了高温生长的氧化铝具有优异的钝化能力。并且他们描述了高温 ALD 沉积 Al_2O_3 过程中氢终端金刚石表面电导变化过程,在这个过程中 C-H 键始终保留:沉积 Al_2O_3 薄膜之前,样品置于 N_2 氛围中 450°C 预热 15 min 去除氢终端金刚石表面的空气吸附物,如图 5 (a) 所示;沉积过程中一些其它吸附物或者 Al_2O_3 中存在的电荷缺陷、受主位点使得在金刚石表面形成新的 2DHG,如图 5 (b) 所示;去除 Al_2O_3 膜后,空气吸附物再次吸附在金刚石表面,如图 5 (c) 所示。关于受主位点的物理本质还需进一步研究。

2014 年 H. Kawarada 等人^[25]用 H_2O 作为氧化剂,在 450°C 条件下,采用 ALD 沉积 Al_2O_3 作为介质层,制备出栅长为 $2 \mu\text{m}$ 、源漏电极间距为 $6 \mu\text{m}$ 的氢终端金刚石 MOSFET。该器件在 400°C 真空环境下可以稳定工作,最大漏极饱和电流为 -35 mA/mm 。在同样的沉积条件下,该课题组制备出高达 1700 V 击穿电压的非对称结构氢终端金刚石 MOSFET^[5],

栅长为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、源漏电极间距为 $21\text{ }\mu\text{m}$ 、栅漏电极间距为 $17\text{ }\mu\text{m}$ ，最大漏极饱和电流为 -120 mA/mm 。在 450°C 下沉积 Al_2O_3 介质制备的器件电流和跨导一般不高，2020 年 Z. Y. Ren 等人^[26] 在 300°C 下沉积 Al_2O_3 栅介质层，发现其比低温生长 Al_2O_3 能更好地保护氢终端，栅长 $2\text{ }\mu\text{m}$ 器件的最大漏极饱和电流超过 -200 mA/mm 。

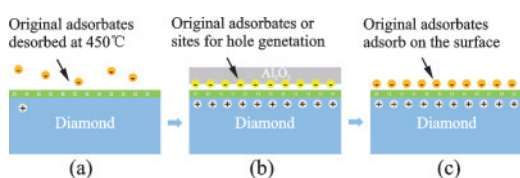


图5 ALD 沉积 Al_2O_3 薄膜诱导表面 2DHG 模型: (a) 450°C 时吸附物解吸附; (b) 新的吸附位点形成; (c) 去除 Al_2O_3 薄膜后, 原吸附物再次吸附在金刚石表面

Fig.5 ALD- Al_2O_3 thin films induced surface 2DHG model: (a) Original adsorbates desorbed at 450°C ; (b) Some new acceptor sites for 2DHG generation are formed; (c) After film removal, the original adsorbates adsorb on the diamond surface again

2.2 降低导通电阻提高器件性能

器件的导通电阻 R_{ON} 由金属与氢终端金刚石的欧姆接触电阻 R_{C} 、源漏电极和栅电极间距下的沟道电阻 R_{SD} 和栅极金属下的沟道电阻 R_{CH} 三部分组成, 金属和半导体接触是否能够表现欧姆特性主要取决于金属和半导体的功函数差。氢终端金刚石的功函数 (W_s) 为 4.9 eV , 形成欧姆接触要求金属的功函数 (W_m) 大于 4.9 eV 。金 (Au) 是制备氢终端金刚石器件欧姆接触的常用金属, 其功函数为 5.1 eV , 但与其与样品表面的粘附性较差。2020 年 X. Yuan 等人^[27] 研究了铂 (Pt)、钯 (Pd)、Au 作为源漏电极的欧姆接触特性以及热稳定特性, Pt、Pd 的功函数分别为 5.65 eV 、 5.12 eV , 其被 Ti/Au 覆盖以防止在空气被氧化。传输线模型 (Transmission line model, TLM) 测试曲线显示 Pt/Ti/Au 和 Pd/Ti/Au 电极相较于 Au 电极表现出良好的线性关系; 400°C 退火可以有效改善 Au 电极的电流-电压曲线的线性度, 但对于欧姆接触电阻的优化并不明显。Pt/Ti/Au 与氢终端金刚石形成欧姆接触时的比接触电阻率为 $2.7 \times 10^{-3}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$, 400°C 、8 h 退火后增大到 $3.1 \times 10^{-2}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$; Au/Ti/Pd 与氢终端金刚石形成欧姆接触时比接触电阻率为 $2.6 \times 10^{-4}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$, 退火后略有降低 ($1.1 \times 10^{-4}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$)。Ti 的功函数是 4.3 eV , 理论上会与氢终端金刚石形成肖特基接触。Y. Jingu 等人^[28] 发现沉积 Ti/Pt/Au 金属电极并 600°C 退火 1 h 后, 与氢终端金刚石形成了良好的欧姆接触。为

避免高温退火破坏氢终端金刚石的导电性, 他们开发了后制备氢终端的器件工艺流程, 即将氢终端的形成安排在高温工艺之后。退火形成的 TiC 合金与氢终端金刚石接触界面存在的共价键表现出较强的结合力; 3 nm TiC 表现为超浅结, 虽然侧边接触面积窄但测得的比接触电阻率很低 ($2.7 \times 10^{-7}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$)。而 Au 或 Pt/Au 电极欧姆接触区域下方为高电阻区域, 后氢终端处理后电极下方的氢终端金刚石表面也会被部分氧化。图 6 给出了后氢终端处理 Ti/Pt/Au 和 Au、Pt/Au 电极与氢终端金刚石接触横截面的示意图^[28]。K. Kudara 等人^[29] 在源漏区域二次生长重掺杂硼 ($1 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$) 金刚石, 并沉积 Ti/Pt/Au 作为电极, 500°C 、30 min 退火后, 对沟道区域进行后氢终端处理。TLM 测试获得沟道 2DHG 的方块电阻为 $6.8\text{ k}\Omega/\text{sq}$, 金属电极与重掺杂硼区域的欧姆接触电阻为 $1.45\text{ }\Omega\cdot\text{mm}$ 。进而制备了栅长 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、栅宽 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的氢终端金刚石 MOSFET, 获得了 -1.03 A/mm 的最大漏极饱和电流, 导通电阻为 $25\text{ }\Omega\cdot\text{mm}$ 。

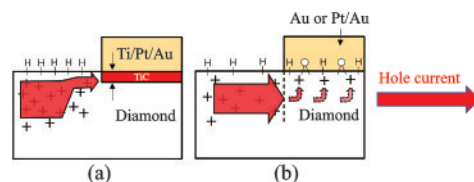


图6 (a) Ti/Pt/Au 和 (b) Au 或 Pd/Ti/Au 电极与氢终端金刚石接触横截面的示意图

Fig.6 Schematic cross-sections of (a) Ti/Pt/Au and (b) Au or Pd/Ti/Au electrodes in contact with H-diamond

零栅源间距结构 (即源极、漏极与栅极之间不存在间隙) 不仅能够降低 R_{SD} , 还可以提高栅极跨导, 其截面结构如图 7 所示。J. W. Liu 等人^[30] 以 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为介质层制备出零栅源间距以及非零栅源间距的氢终端金刚石 MOSFET, 结果显示零栅源间距器件的最大漏极饱和电流、栅极峰值跨导 (-224.1 mA/mm 、 70.4 mS/mm) 均大于非零栅源间距器件的 (-29.3 mA/mm 、 10.1 mS/mm), 对应的导通电阻分别为 $29.7\text{ }\Omega\cdot\text{mm}$ 和 $208.4\text{ }\Omega\cdot\text{mm}$ 。2020 年 J. F. Zhang 等人^[31] 利用长栅结构 ($L_g = 40\text{ }\mu\text{m}$) 占据源漏电极之间的区域以降低 R_{SD} , 这种特殊的结构被称为宽场效应晶体管 (Fat field-effect transistor, FATFET)。零栅源间距和 FATFET 结构在减小栅极与源漏电极间距的同时也增加了栅极泄漏电流, 使得器件的开关比降低。另外, R_{CH} 与氢终端金刚石本身特性相关, 增大 2DHG 浓度可以减小 R_{CH} , 上文已给出一些增大 2DHG 的方法, 这里不再赘述。Z. Y. Ren 等人^[32] 给出了非零栅源间距

器件的不同栅极长度与栅极峰值跨导和输出电流的关系,栅极长度小的器件更易得到高跨导和高输出电流密度。

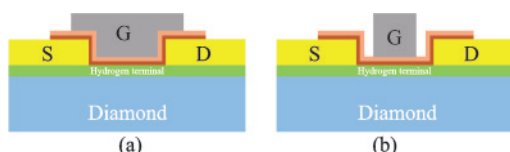


图7 氢终端金刚石 MOSFET 的截面图:(a)零栅源结构;
(b)非零栅源结构

Fig.7 Schematic diagrams of the H-diamond MOSFET:
(a) Without L_{GS} and L_{GD} ; (b) With L_{GS} and L_{GD}

2.3 提高器件性能的其它方法

为实现功率器件大电流输出,栅极电容和导电沟道之间需要强耦合。2012年 S. H. Cheng 等人^[33]发现高 k 绝缘层材料能够有效控制 2DHG,即在较低栅极电压下响应电荷,成功地实现了高功率金刚石器件的制备。高 k 材料通常利用溅射沉积(Sputtering deposition, SD)的方法生长,由于 SD 过程中的等离子体放电容易损坏金刚石表面的氢终端,因此需要沉积一层缓冲层来保护氢终端,进而研究者们开展了对双介质层氢终端金刚石功率器件的研究,其截面结构如图 7 所示。自 2012 年起, J. W. Liu 等人^[34-37]分别沉积 Ta_2O_5 、 HfO_2 、 Al_2O_3 、 CaF_2 等多种单介质材料及 Ta_2O_5/Al_2O_3 、 ZrO_2/Al_2O_3 等双介质层对器件进行钝化,结果显示 Ta_2O_5/Al_2O_3 双介质层比 Ta_2O_5 单介质层有更低的界面陷阱电荷密度,在栅长 $4\ \mu m$ 的 MOSFET 上得到最大漏极饱和电流为 $-97.7\ mA/mm$ 。另外分别计算了 HfO_2 和 Al_2O_3 介质与氢终端金刚石表面的价带带阶(ΔE_v),其数值分别为 $2.6\pm 0.2\ eV$ 、 $2.9\pm 0.2\ eV$,较大的异质结 ΔE_v 将使它们适合于制备 p 沟道 MOSFET。2019 年 Y. F. Wang 等人^[38]首次制备出 SD-YSZ/ALD- Al_2O_3 双介质层氢终端金刚石 MOSFET,器件阈值电压为 $1.6\ V$,迁移率为 $80.4\ cm^2\cdot V^{-1}s^{-1}$,最大漏极饱和电流仅为 $-5.5\ mA/mm$;后来又制备出 ALD- $HfAlO_x$ /ALD- Al_2O_3 双介质层氢终端金刚石 MOSFET^[39],器件的阈值电压为 $8.3\ V$,最大漏极饱和电流和栅极峰值跨导分别为 $-6.3\ mA/mm$ 和 $0.73\ mS/mm$ 。X. H. Lv 等人^[40]在 Al_2O_3 上溅射一层厚度为 $52.3\ nm$ 的 Gd_2O_3 ,所制备出的双介质层氢终端金刚石 MOSFET 的阈值电压为 $1.12\ V$,最大漏极饱和电流和栅极峰值跨导分别为 $-15.3\ mA/mm$ 和 $2.01\ mS/mm$ 。Y. F. Wang 等人^[41]沉积 $HfSiO_4$ 和 Al_2O_3 为介质层,制备出的器件最大漏极饱和电流和栅极峰值跨导分别为 $-25\ mA/mm$ 和 $5.5\ mS/mm$,

迁移率达到 $217.7\ cm^2\cdot V^{-1}s^{-1}$,是目前双介质层氢终端金刚石 MOSFET 中的较好结果。可以看出,相比于单介质层氢终端金刚石 MOSFET,双介质层器件的最大漏极饱和电流一般较低,尚需通过优化制备工艺来提高器件性能。

3 氢终端金刚石增强型 MOSFET

氢终端金刚石 MOSFET 天然为耗尽型器件,而增强型 MOSFET 有利于提高系统安全性和节能性。实现器件常关操作的方法也有很多,本文主要从以下三种结构进行介绍:一是采用共栅共源结构,通过器件外部连接实现常关操作,阈值电压完全由共栅共源结构中的增强型 Si 基 p-FET 控制;二是氢终端部分氧化为氧终端,降低 2DHG 浓度,通过改变导带底位置来控制阈值电压;三是通过耗尽氢终端金刚石器件沟道中的 2DHG 实现常关操作。

3.1 共栅共源结构

共栅共源结构常用于制备增强型 GaN 场效应晶体管。2020 年 T. Bi 等人^[42]将氢终端金刚石耗尽型 MOSFET 与 Si 基 p 沟道增强型场效应晶体管(p-FETs)相结合,制备出金刚石共栅共源结构器件,器件表现为常关特性,击穿电压超过 $1.7\ kV$ 。共栅共源结构不影响最大漏极饱和电流,氢终端金刚石 MOSFET 的阈值电压由增强型 Si 基 p-FET 控制,进而实现器件的常关操作。图 8 为共栅共源结构级联电路图^[43]。Si 基 p-MOSFET 栅极施加负压($V_{GS,Si} < 0$), $V_{GS,Si}$ 小于 Si 基 p-MOSFET 阈值电压($V_{th,Si}$),即 $V_{GS,Si} < V_{th,Si} < 0$ 时, Si 基 p-MOSFET 处于导通态,此时 $V_{G,dia} = V_{S,dia} = V_{D,Si} = V_{S,Si} = 0$,整个器件处于导通态。当 $V_{GS,Si} > V_{th,Si}$ 时, Si 基 p-MOSFET 处于关态,此时 $V_{D,Si} = V_{S,dia} < 0$ 、 $V_{GS,dia} = V_{G,dia} - V_{S,dia} = -V_{S,dia} > 0$ 。如果增大 $V_{D,dia}$,使得 $V_{GS,dia} \gg V_{th,dia}$,氢终端金刚石 MOSFET 处于关态;如果 $V_{D,dia}$ 特别小,氢终端金刚石 MOSFET 处于开态,但由于 Si 基 p-MOSFET 处于关态,使得整个器件结构处于关闭状态。2022 年 B. J. Liu 等人^[43]实现了 Si 基增强型 p-MOSFET 和氢终端金刚石耗尽型 MOSFET 共栅共源结构,器件的阈值电压为 $-0.8\ V$,栅极峰值跨导为 $1410\ mS/mm$,高跨导是该结构的一个优点。同年,国内也实现了耗尽型氢终端金刚石 MOSFET 与增强型 Si 基 p-FET 的共栅共源结构^[44],整个器件的阈值电压为 $-0.8\ V$,最大漏极饱和电流为 $-34.2\ mA/mm$,最大栅极峰值跨导为 $344.6\ mS/mm$ 。

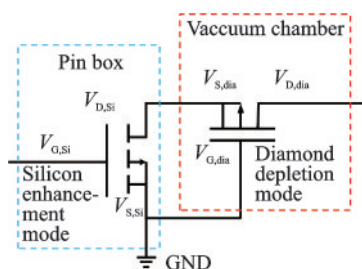


图8 Si 增强型 MOSFET 和氢终端金刚石耗尽型 MOSFET 共栅共源结构

Fig.8 Cascode configuration: a normally-off silicon p channel MOSFET with a normally-on H-diamond MOSFET

3.2 氢终端部分氧化为氧终端

将氢终端金刚石沟道中部分 C—H 键氧化为 C—O 键,部分氧终端可调制氢终端金刚石的电子亲和势,改变价带能级位置,降低金刚石表面 C—H 键密度,减小表面转移掺杂位点,降低沟道区的 2DHG 浓度,从而调控阈值电压,实现器件的常关。

2017 年 H. Y. Kitabayashi 等人^[45]利用紫外臭氧处理氢终端金刚石表面 3~5 min,将栅下沟道中 5 μm 长的氢终端部分氧化为氧终端,成功实现器件的常关操作,当栅漏电极间距为 24 μm 时,器件击穿电压高达 2 021 V,阈值电压为 -3.9 V,最大漏极饱和电流为 -5.2 mA/mm。器件截面结构和能带结构如图 9 所示^[45]。2018 年 Z. Y. Ren 等人^[46]采用紫外臭氧处理氢终端金刚石表面和铝膜热氧化制备氧化铝介质层,实现了增强型氢终端金刚石 MOSFET,器件栅长 2 μm ,阈值电压 -1 V,最大漏极饱和电流 -51.6 mA/mm,栅极峰值跨导 20 mS/mm。2020 年 J. F. Zhang 等人^[31]成功制备出部分氧终端

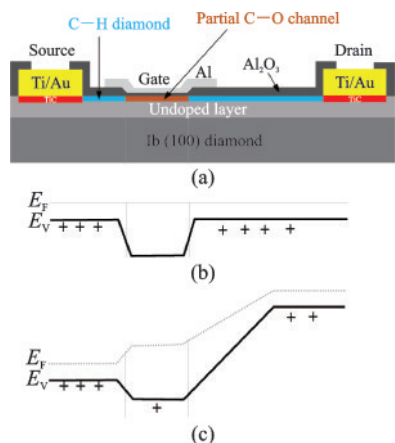


图9 (a) 部分氧终端沟道的氢终端金刚石 MOSFET 的截面图;(b)关态和(c)导通态下的能带图

Fig.9 (a) Schematic cross-section of the H-diamond MOSFET with partial C—O channel; Band diagrams of the H-diamond drift region and partial C—O channel of (b) off-state and (c) on-state

增强型氢终端金刚石 FATFET,栅长 40 μm ,阈值电压 -0.69 V,最大漏极饱和电流和 2DHG 迁移率分别为 -3.8 mA/mm 和 276 $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可见,氢终端部分氧化为氧终端的方法不需改变栅极绝缘层材料和器件结构就可制备增强型 MOSFET,但在一定程度上降低了最大漏极饱和电流。

3.3 耗尽沟道区的 2DHG

通过耗尽沟道区中 2DHG 制备氢终端金刚石增强型 MOSFET,目前主要实现方法有沉积低功函数氧化物或低功函数金属热氧化作为介质层、沉积低功函数栅极金属、沟道区掺杂薄层 N 杂质等。

3.3.1 低功函数氧化物作为介质层

用高功函数氧化物代替吸附层可以诱导出更多的空穴,增大 2DHG 浓度,从而提高饱和输出电流,这是提高耗尽型氢终端金刚石 MOSFET 器件性能的一个方法。相应地,沉积低功函数金属氧化物为介质层,可以制备氢终端金刚石增强型 MOSFET。2017 年 J. W. Liu 等人^[47]使用电子束蒸发氧化钇(Y_2O_3)作为介质材料,制备出氢终端金刚石增强型 MOSFET,器件栅长为 3.3 μm ,阈值电压约为 -1.8 V,最大漏极饱和电流为 -114.6 mA/mm。研究认为吸附层中的负电荷是 2DHG 形成的一个必要条件,常关操作是因为 Y_2O_3 薄膜中存在正电荷补偿负电荷,固定正电荷模型对于 2DHG 的作用呈弱反型,因此器件的阈值电压偏低。2022 年 J. N. Su 等人^[48]利用氧化镧(La_2O_3)作为栅介质层实现了增强型氢终端金刚石 MOSFET,阈值电压为 -0.797 V,最大漏极饱和电流为 -13.55 mA/mm,栅极峰值跨导和载流子迁移率分别为 4.37 mS/mm 和 202.2 $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。未沉积 La_2O_3 时,氢终端金刚石表面电子转移到吸附层中,导带底 E_C 和价带顶 E_V 向上弯曲;表面沉积 La_2O_3 之后,由于 La_2O_3 的功函数 (2.8 eV) 远低于氢终端金刚石表面的功函数,耗尽沟道中的 2DHG,导致 E_C 和 E_V 在界面处向下弯曲,从而实现器件的常关操作,如图 10 所示。

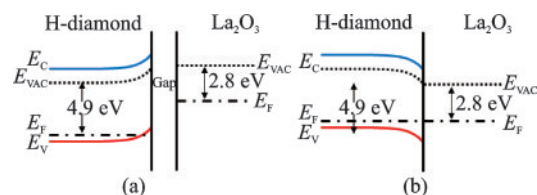


图10 La_2O_3 栅介质的氢终端金刚石 MOSFET 能带图: (a)沉积前;(b)沉积后

Fig.10 Band diagrams of La_2O_3 gate H-diamond MOSFET: (a) Before deposition; (b) After deposition

3.3.2 低功函数金属氧化作为介质层

2020 年 M. Zhang 等人^[49]通过电子束蒸发技术

在氢终端金刚石上沉积 5 nm 的 Ti 薄膜,然后在 120℃ 的空气中热氧化 10 h 形成 Ti/TiO_x,成功制备出增强型氢终端金刚石 MOSFET。该器件栅长 4 μm,源漏间距 20 μm,阈值电压 -0.14 V,最大漏极饱和电流 -6.8 mA/mm,栅极峰值跨导和最大迁移率分别为 4.3 mS/mm 和 313 cm²·V⁻¹·s⁻¹。低功函数金属氧化作为介质层实现增强型归因于 Ti 与氢终端金刚石的功函数差:Ti 的功函数(4.3 eV)低于氢终端金刚石的功函数,电子从 Ti 金属流向氢终端金刚石表面,从而耗尽 2DHG 实现常关操作。又由于 TiO_x 薄膜存在一定数量的固定负电荷,使沟道中感应出一部分正电荷,对 Ti 的低功函数效应产生了一定补偿,从而使器件的阈值电压接近 0 V。2022 年 S. He 等人^[50]先使用电子束蒸发 5 nm Sn($W_m=4.42$ eV),然后在 100℃ 下热氧化 24 h 形成 SnO_x,也制备出了增强型氢终端金刚石 MOSFET,器件的阈值电压 -0.5 V,最大漏极饱和电流 -21.9 mA/mm,栅极峰值跨导和载流子迁移率分别为 5.6 mS/mm 和 92.5 cm²·V⁻¹·s⁻¹。研究认为常关特性的实现是因为 Sn 未被完全氧化,其最外层电子可能耗尽了沟道中的 2DHG。

3.3.3 低功函数金属作为栅极材料

耗尽沟道区 2DHG 的一个简单易实现的操作是沉积低功函数金属栅,该方法不会降低 2DHG 浓度,也不会影响载流子迁移率。2021 年 M. H. Zhang 等人^[51]成功制备出钇(Y)栅增强型氢终端金刚石 MOSFET,阈值电压为 -0.21 V,最大漏极饱和电流为 -16.14 mA/mm,栅极峰值跨导和载流子迁移率分别为 7.97 mS/mm 和 233.08 cm²·V⁻¹·s⁻¹。未沉积栅极金属时,当氢终端金刚石暴露于空气中时,吸附层化学势低于金刚石费米能级,能带向上弯曲,在金刚石表面下 10 nm 处形成导电沟道;沉积 5 nm 的 Al₂O₃ 介质层和 Y 栅极金属($W_m=3.1$ eV)后,由于 Y 金属的费米能级位于氢终端金刚石的费米能级之上,电子从 Y 栅流向氢终端金刚石,耗尽沟道中的 2DHG,使氢终端金刚石的导带和价带在界面处向下弯曲,实现常关操作。该器件的能带结构如图 11 所示^[52]。

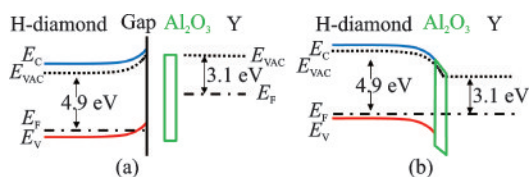


图 11 Y 栅氢终端金刚石 MOSFET 的能带结构示意图:
(a) 沉积前; (b) 沉积后

Fig.11 Schematics of band configuration for Y gate H-diamond MOSFET: (a) Before deposition; (b) After deposition

3.3.4 沟道区掺杂氮杂质

氢终端金刚石 MOSFET 沟道区内离子注入少剂量的施主杂质可耗尽 2DHG。氮(N)作为深施主杂质,施主能级位于导带底以下 1.7 eV,可抑制空穴在表面附近累积,从而实现器件常关操作。2019 年 N. Oi 等人^[52]在氢终端金刚石沟道区采用离子注入技术掺杂了一层浅且薄的 N 杂质,制备出阈值电压高达 -2.5 V 的增强型氢终端金刚石 MOSFET。N 离子注入区在距表面 10~20 nm 深度处,垂直宽度约 10 nm,横向长度固定在 5 或 10 μm。从能带角度分析,薄层 N 离子注入对氢终端金刚石表面能带没有影响,只是改变表面下 10~20 nm 处以及水平方向 5 或 10 μm 长度的能带位置,从而控制阈值电压。图 12 为器件的截面结构和对应的能带结构^[53]。

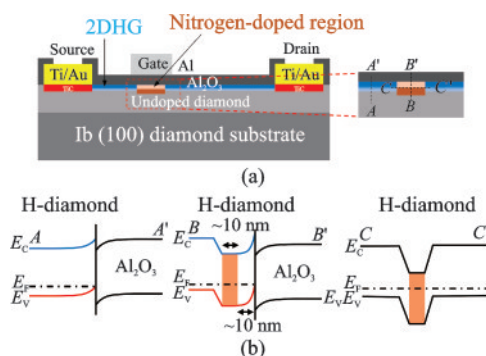


图 12 (a) N 注入 2DHG 区的氢终端金刚石 MOSFET 的截面示意图和 (b) 具有/不具有 N 注入区的沟道区的能带图

Fig.12 (a) Schematic diagram of H-diamond MOSFET with N-implanted region and (b) band diagrams at channel region with/without N-implanted region

综上所述,共栅共源结构的阈值电压由增强型 Si 基 FET 器件控制,该方法不牺牲器件的电流密度,并且可提高栅极跨导,但电学性能容易受到外部环境干扰,使得器件工作不稳定。沟道中 C—H 键部分氧化为 C—O 键的工艺操作简单,但紫外臭氧法对氢终端金刚石表面进行氧处理的方法难以精确控制阈值电压,并且由于 C—H 键的减少,金刚石表面吸附位点减少,使 2DHG 浓度降低,进而影响器件的最大输出电流。耗尽沟道中 2DHG 浓度实现常关操作与部分氧终端方法类似,都是降低 2DHG 浓度实现器件的常关操作,制备出的增强型器件饱和输出电流较低,但载流子迁移率得到很大提升。本文对增强型氢终端金刚石 MOSFET 的一些电学特性参数进行了总结,如表 1 所示,其中 I_{Dmax} 为器件的最大漏极饱和电流, g_m 为栅极峰值跨导。

表 1 氢终端金刚石增强型 MOSFET 电学特性参数总结

Tab.1 Summarization of electrical characteristic parameters of normally-off H-diamond MOSFET

Ref.	Dielectric layer	Method	$L_G/\mu\text{m}$	V_{th}/V	$I_{Dmax}/(\text{mA}\cdot\text{mm}^{-1})$	$\mu/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	$g_m/(\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1})$
[53]	ZrO ₂ /Zr	3.3.2	6	−2.70	−1.2	—	—
[54]	Al ₂ O ₃	3.2	2	−1.30	−91.0	47.10	—
[55]	Er ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	3.3.1	6	−0.49	−16.1	33.40-110.47	7.16
[56]	Al ₂ O ₃	3.1	5	—	−1.6	8.00	30.00
[57]	Al ₂ O ₃	3.3.4	4	−1.00	−293.0	20.00-40.00	—
[58]	Al ₂ O ₃	3.3.2	6	−1.20	−1.5	—	0.70

4 结语与展望

金刚石的 p 型和 n 型掺杂难度大,掺杂元素电离能高,而氢等离子体处理后的金刚石表现出表面电导现象,这一发现推动了氢终端金刚石功率器件的研究进展。目前普遍被接受的氢终端金刚石 2DHG 的形成机理有两种:自发极化模型和转移掺杂模型。2DHG 热学和化学特性不稳定,通常利用沉积金属氧化物的方法保护沟道中的 2DHG,提高氢终端金刚石 MOSFET 的热稳定性。高功函数氧化物不仅起到钝化作用,还可以替代氢终端金刚石的表面吸附层,促进电子从金刚石转移到介质层,提高载流子浓度从而增强器件性能。高 k 介质材料可以在较小的电场下提供较大的电荷响应,通常利用溅射方法沉积,但溅射过程的氢等离子体放电容易损坏金刚石表面的氢终端,需要缓冲层配合一起作栅介质,因此双介质层器件成为研究热点。通常情况下,氢终端金刚石 MOSFET 为耗尽型器件,而增强型器件是电子功率器件安全性的关键要求。利用共栅共源结构、氢终端部分氧化为氧终端、耗尽沟道区中的 2DHG 均能实现增强型器件。耗尽沟道 2DHG 的技术手段包括低功函数金属氧化物或低功函数金属氧化作为介质层、低功函数金属作为栅金属、深施主能级杂质掺杂等。

目前水平结构的氢终端金刚石器件研究主要基于提高 2DHG 的稳定性、优化器件结构和制备工艺等方面,如何控制氢终端金刚石的表面状态和界面特性仍是金刚石电子功率器件领域有待深入研究的课题。随着金刚石生长技术的发展、晶体尺寸的增大,以及研究者们对金刚石及界面性质理解的深入、器件设计和工艺参数的优化,氢终端金刚石器件的性能将得到不断提升,从而实现其在高温、高频、高功率应用领域的巨大潜能。

参 考 文 献

[1] Itsh'ak A, Klonsky O, Gelbstein Y, et al. Doping type influence on physical diamond properties[J]. Materials Research Express, 2022, 9(2): 025901.

[2] Kasu M, Oishi T. Recent progress of diamond devices for RF applications[C]. 2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Austin, TX: IEEE, 2016: 1-4.

[3] Balmer R S, Friel I, Heppelstone S, et al. Transport behavior of holes in boron delta-doped diamond structures[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(3): 033702.

[4] Hirama K, Sato H, Harada Y, et al. Diamond field-effect transistors with 1.3 A/mm drain current density by Al₂O₃ passivation layer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(9R): 090112.

[5] Kawarada H, Yamada T, Xu D, et al. Diamond MOSFETs using 2D hole gas with 1 700 V breakdown voltage[C]. 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Prague, Czech Republic: IEEE, 2016: 483-486.

[6] Yu X, Zhou J, Qi C, et al. A high frequency hydrogen-terminated diamond MISFET with f_T/f_{max} of 70/80 GHz [J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(9): 1373-1376.

[7] Imanishi S, Horikawa K, Oi N, et al. 3.8 W/mm RF power density for ALD Al₂O₃-based two-dimensional hole gas diamond MOSFET operating at saturation velocity [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(2): 279-282.

[8] Kubovic M, Kasu M, Kageshima H, et al. Electronic and surface properties of H-terminated diamond surface affected by NO₂ gas[J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(7-9): 889-893.

[9] Hirama K, Sato H, Harada Y, et al. Thermally stable operation of diamond field-effect-transistors by NO₂ adsorption and Al₂O₃ passivation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(8): 1111-1113.

- [10] Ren Z, Lv D, Xu J, et al. Performance of H-diamond MOSFETs with high temperature ALD grown HfO_2 dielectric [J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 106: 107846.
- [11] Russell S A, Cao L, Qi D, et al. Surface transfer doping of diamond by MoO_3 : a combined spectroscopic and hall measurement study [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(20): 202112.
- [12] Landstrass M I, Ravi K V. Hydrogen passivation of electrically active defects in diamond [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 55(14): 1391-1393.
- [13] Hirama K, Takayanagi H, Yamauchi S, et al. Spontaneous polarization model for surface orientation dependence of diamond hole accumulation layer and its transistor performance [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(11): 112107.
- [14] Maier F, Riedel M, Mantel B, et al. Origin of surface conductivity in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(16): 3472-3475.
- [15] Van Der Weide J, Zhang Z, Baumann P, et al. Negative-electron-affinity effects on the diamond (100) surface [J]. *Physical Review B*, 1994, 50(8): 5803-5806.
- [16] Cui J B, Ristein J, Ley L, et al. Electron affinity of the bare and hydrogen covered single crystal diamond (111) surface [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(2): 429-432.
- [17] Gi R, Tashiro K T K, Tanaka S T S, et al. Hall effect measurements of surface conductive layer on undoped diamond films in NO_2 and NH_3 atmospheres [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38(6R): 3492-3496.
- [18] Kubovic M, Kasu M. Enhancement and stabilization of hole concentration of hydrogen-terminated diamond surface using ozone adsorbates [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(11R): 110208.
- [19] Riedel M, Ristein J, Ley L, et al. Recovery of surface conductivity of H-terminated diamond after thermal annealing in vacuum [J]. *Physical Review B*, 2004, 69(12): 125338.
- [20] Verona C, Ciccognani W, Colangeli S, et al. Comparative investigation of surface transfer doping of hydrogen terminated diamond by high electron affinity insulators [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(2): 025104.
- [21] Verona C, Ciccognani W, Colangeli S, et al. V_2O_5 MISFETs on H-terminated diamond [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(12): 4647-4653.
- [22] Crawford K G, Cao L, Qi D, et al. Enhanced surface transfer doping of diamond by V_2O_5 with improved thermal stability [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 042103.
- [23] Ren Z, Zhang J, Zhang J, et al. Diamond field effect transistors with MoO_3 gate dielectric [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(6): 786-789.
- [24] Daicho A, Saito T, Kurihara S, et al. High-reliability passivation of hydrogen-terminated diamond surface by atomic layer deposition of Al_2O_3 [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(22): 223711.
- [25] Kawarada H, Tsuboi H, Naruo T, et al. C—H surface diamond field effect transistors for high temperature (400°C) and high voltage (500 V) operation [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(1): 013510.
- [26] Ren Z, Lv D, Xu J, et al. High temperature (300°C) ALD grown Al_2O_3 on hydrogen terminated diamond: band offset and electrical properties of the MOSFETs [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(1): 013503.
- [27] Yuan X, Liu J, Shao S, et al. Thermal stability investigation for Ohmic contact properties of Pt, Au, and Pd electrodes on the same hydrogen-terminated diamond [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(5): 055114.
- [28] Jingu Y, Hirama K, Kawarada H, et al. Ultrashallow TiC source/drain contacts in diamond MOSFETs formed by hydrogenation-last approach [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, 57(5): 966-972.
- [29] Kudara K, Arai M, Suzuki Y, et al. Over 1 A/mm drain current density and 3.6 W/mm output power density in 2DHG diamond MOSFETs with highly doped regrown source/drain [J]. *Carbon*, 2022, 188: 220-228.
- [30] Liu J, Liao M, Imura M, et al. Low on-resistance diamond field effect transistor with high-k ZrO_2 as dielectric [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6395.
- [31] Zhang J F, Chen W J, Ren Z Y, et al. Characterization and mobility analysis of normally off hydrogen-terminated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2020, 217(1): 1900462.
- [32] Ren Z, Ding S, Liang Z, et al. Diamond MOSFET with $\text{MoO}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ doubly stacked gate dielectric [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(4): 042104.
- [33] Cheng S, Sang L, Liao M, et al. Integration of high-dielectric constant Ta_2O_5 oxides on diamond for power devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(23): 232907.
- [34] Liu J, Liao M, Imura M, et al. Diamond field effect transistors with a high-dielectric constant Ta_2O_5 as gate material [J]. *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(24): 245102.
- [35] Liu J, Liao M, Imura M, et al. Band offsets of Al_2O_3 and HfO_2 oxides deposited by atomic layer deposition technique on hydrogenated diamond [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(25): 252108.
- [36] Liu J, Liao M, Cheng S, et al. Interfacial chemical

- bonding state and band alignment of CaF_2 /hydrogen-terminated diamond heterojunction[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(12): 123706.
- [37] Liu J, Liao M, Imura M, et al. High-k $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bilayer on hydrogenated diamond: band configuration, breakdown field, and electrical properties of field-effect transistors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(12): 124504.
- [38] Wang Y F, Wang W, Chang X, et al. Performance of hydrogen-terminated diamond MOSFET with bilayer dielectrics of $\text{YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 99: 107532.
- [39] Zhang M, Lin F, Wang W, et al. $\text{HfAlO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ bilayer dielectrics for a field effect transistor on a hydrogen-terminated diamond[J]. *Materials*, 2022, 15(2): 446.
- [40] Lv X, Wang W, Wang Y, et al. Hydrogen-terminated single crystal diamond MOSFET with a bilayer dielectric of $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. *Crystals*, 2023, 13(5): 783.
- [41] Wang Y F, Wang W, Chang X, et al. Hydrogen-terminated diamond field-effect transistor with a bilayer dielectric of $\text{HfSiO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 99: 107530.
- [42] Bi T, Niu J, 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 Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(10): 4006-4009.
- [43] Liu B, Bi T, Fu Y, et al. MOSFETs on (110) C—H diamond: ALD Al_2O_3 /diamond interface analysis and high performance normally-OFF operation realization [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(3): 949-955.
- [44] Ding S, Ren Z, Xing Y, et al. Single crystalline diamond p-channel cascode and inverter[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(11): 6471-6475.
- [45] 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 Letters*, 2017, 38(3): 363-366.
- [46] Ren Z, Chen W, Zhang J, et al. High performance single crystalline diamond normally-off field effect transistors[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2018, 7: 82-87.
- [47] Liu J, Oosato H, Liao M, et al. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y_2O_3 oxide insulator grown by electron beam evaporator[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(20): 203502.
- [48] Su J, Chen G, Wang W, et al. Electrical characteristics of normally off hydrogen-terminated diamond field effect transistors with lanthanum oxide gate dielectric [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(16): 162103.
- [49] Zhang M, Wang W, Chen G, et al. Normally off hydrogen-terminated diamond field-effect transistor with Ti/TiO_x gate materials[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(11): 4784-4788.
- [50] He S, Wang Y, Chen G, 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.
- [51] Zhang M, Wang W, Fan S, et al. Normally-off hydrogen-terminated diamond field effect transistor with yttrium gate[J]. *Carbon*, 2021, 176: 307-312.
- [52] Oi N, Kudo T, Inaba M, et al. Normally-off two-dimensional hole gas diamond MOSFETs through nitrogen-ion implantation [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(6): 933-936.
- [53] Wang F, Chen G, 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]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 134: 109774.
- [54] Chen G, Zhang S, Zhang M, et al. Normally-off C—H diamond FETs with partial Al/CO diamond junction attaining low off-state current [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(12): 6582-6586.
- [55] Chang C, Chen G, Shao G, et al. Normally-off hydrogen-terminated diamond field effect transistor with a bilayer dielectric of $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 123: 108848.
- [56] Matsumoto T, Kato H, Oyama K, et al. Inversion channel diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with normally off characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31585.
- [57] Zhu X, Shao S, Chan S, et al. High performance of normally-on and normally-off devices with highly boron-doped source and drain on H-terminated polycrystalline diamond [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(3): 2201122.
- [58] Wang Y F, Chang X, Zhang X, et al. Normally-off hydrogen-terminated diamond field-effect transistor with Al_2O_3 dielectric layer formed by thermal oxidation of Al [J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 81: 113-117.



尹 灿(YIN Can) 女,1997年12月生,在读硕士研究生,研究方向为氢终端金刚石 MOSFET。

邢艳辉(XING Yanhui) 女,1974年9月生,副教授,博士,主要研究方向为半导体材料与器件。