

金刚石二维电导和场效应管研究新进展

张金风^{1,2}, 张进成¹, 任泽阳^{1,2}, 苏凯¹, 郝跃¹

(1. 西安电子科技大学, 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 微电子学院, 陕西西安 710071;
2. 西安电子科技大学芜湖研究院, 安徽芜湖 241002)

摘要: 金刚石表面沟道场效应管以氢终端金刚石表面的二维空穴气2DHG(Two-Dimensional Hole Gas)作为沟道实现输入电压对输出电流的控制, 是目前金刚石电子器件的主流结构. 该2DHG面电导具有可大范围调控的面电荷密度和较高空穴饱和漂移速度. 本文回顾了金刚石场效应管器件在直流、频率和功率特性的研究进展, 揭示了低迁移率是制约金刚石低功耗高速数字电路、高频器件和高功率微波器件发展的主要因素. 从理论和实验总结了金刚石表面电导出现的类调制掺杂的新掺杂机理, 尤其实现了室温下2DHG霍尔迁移率提升到 $680\text{ cm}^2/\text{Vs}$, 材料方阻从 $10\text{ k}\Omega/\text{sq}$ 数量级降低到 $1.4\text{ k}\Omega/\text{sq}$ 电导性能的突破. 相信这将会引起金刚石场效应管性能极大提升和器件的快速发展.

关键词: 金刚石; 氢终端; 场效应管; 二维空穴气

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB3608600); 自然科学基金(No.62127812, No.62374122)

中图分类号: TP211+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)06-2151-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240103

Research Progress of Two-Dimensional Electrical Conductivity and Field Effect Transistors of Diamond

ZHANG Jin-feng^{1,2}, ZHANG Jin-cheng¹, REN Ze-yang^{1,2}, SU Kai¹, HAO Yue¹

(1. State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China;
2. Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu, Anhui 241002, China)

Abstract: Diamond surface-channel field-effect transistor utilizes two-dimensional hole gas (2DHG) on the hydrogen-terminated diamond surface as the channel to realize the control on output current by input voltage, and it is the main-stream structure of diamond electronic devices. The 2DHG conductivity has a large range of controllable sheet density and a high saturation drift velocity. This paper reviewed the research progress of diamond field-effect transistors in DC, frequency, and power characteristics, and revealed that low mobility is the main limiting factor for the development of diamond-based low-power high-speed digital circuits, high-frequency devices, and high-power microwave devices. It summarized the theoretical and experimental research of a new doping mechanism similar to modulation doping that emerged for the diamond surface conductivity recently. At room temperature the 2DHG Hall mobility has increased to $680\text{ cm}^2/\text{Vs}$, and the relevant square resistance has decreased from about $10\text{ k}\Omega/\text{sq}$ to $1.4\text{ k}\Omega/\text{sq}$, which is expected to cause a great improvement in the performance of diamond field-effect transistors.

Key words: Diamond; hydrogen-terminated; field-effect transistor; two-dimensional hole gas

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3608600); National Natural Science Foundation of China (No.62127812, No.62374122)

1 引言

金刚石是超宽禁带半导体材料的典型代表, 具有击穿场强高、载流子输运特性好、热导率极高的特点(如表1所示), 适合制备高压、大功率、高频、高温电子

器件, 使雷达、卫星通信、电能转换等信息系统向更高频率、更大功率、更高效率、更小体积和抗极端恶劣工作环境方向发展的核心技术. 因此, 金刚石又被称为“终极半导体”. 然而, 除了氧化镓(Ga_2O_3)较容易实现n

型掺杂以外,几乎所有超宽禁带半导体普遍存在体掺杂电离能较高,在室温下难以激活的问题,制约器件的发展和应用. 同样,到目前为止,实现金刚石材料的体材料掺杂是十分困难的问题. 例如,在金刚石材料中掺

杂硼(B)和磷(P)实现p和n型掺杂,B和P在金刚石中的激活能分别约为0.37 eV和0.57 eV,室温下电离率仅约 10^{-6} ~ 10^{-3} ,这导致金刚石掺杂半导体难以制备pn结合场效应管的高电导沟道.

表1 半导体的物理性质和优值

参量	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	金刚石
带隙 E_g /eV	1.10	1.40	3.30	3.39	4.80~4.90	5.50
电子迁移率 μ^2 /(cm ² ·(V·s) ⁻¹)	1 400	8 000	550.00	600.00	300.00	2 200
电子饱和速度 v_{sat} /[10 ⁷ cm·s ⁻¹]	1.00	2.00	2.00	2.00	2.42	3.00
击穿电场 E_c /(MV·cm ⁻¹)	0.30	0.40	2.50	3.30	8.00	10.00
介电常数 ϵ	11.80	12.90	9.70	9.00	10.00	5.50
热导率 λ /(W·(cm·K) ⁻¹)	1.50	0.46	4.90	2.00	0.13~0.23	22.00
Baliga 优值BFOM(= $\epsilon\mu E_c^3$)	1.00	5.00	340.00	870.00	3 444	24 664
Huang 开关功率优值HMFOM(= $E_g\mu^{1/2}$)	1.00	3.00	7.00	10.00	12.00	40.00
Johnson 优值JFOM(= $v_{sat} E_c$)	1.00	2.00	17.00	28.00	29.00	33.00
Huang 芯片尺寸优值HCAFOM(= $\epsilon\mu^{1/2} E_c^2$)	1.00	5.00	48.00	85.00	279.00	619.00
Huang 散热优值HTFOM(= $\lambda/(\epsilon E_c)$)	1.00	0.23	0.80	0.10	0.01	1.70

然而,氢终端金刚石可以在室温下形成表面p型电导沟道,基于该表面电导的金刚石场效应管是金刚石电子器件的主流结构. 目前,面向高压、微波功率和数字电路方向,氢终端金刚石场效应管已取得了研究进展,为金刚石电子器件发展提供了重要技术途径.

2 金刚石氢终端表面电导

2.1 传统氢终端电导:转移掺杂和输运特性

在氢等离子体处理后的金刚石表面,碳的悬挂键会与氢成键,形成氢终端金刚石表面. 该表面的电子亲和能(χ)为-1.3 eV^[1],电子极易从金刚石表面逸出,从而出现p型表面导电层^[2,3],该导电层是一种具有量子效应的二维空穴气(2DHG)^[4]. 这类2DHG的产生机理有几种不同的理论解释^[5-7],其中最重要的是转移掺杂理论. 转移掺杂理论认为金刚石表面吸附了气态吸附物,吸附物的能带中具有比金刚石表面的价带能量要低的空能态,因此金刚石价带中的电子转移到吸附物的这些能态中形成类受主负电荷,在金刚石表面留下空穴形成2DHG(如图1所示). 该2DHG对氢终端的氢化程度、环境温湿度和酸碱度比较敏感^[7,8],通常加热到200 °C能使氢终端表面2DHG严重退化^[9].

研究人员还发现,一些具有高电子亲和能($\chi > 4.2$ eV)的固态氧化物,如MoO₃^[5,10]、V₂O₅^[11]、WO₃^[12]和Nb₂O₅^[9]等,也可以作为氢终端金刚石表面的受主材料,实现固态转移掺杂. 这些材料的导带中能量最低的空能态低于氢终端金刚石的价带顶(如图2所示),因此氢终端金刚石表面的电子也能够转移到它们的导带中,以固态转移掺杂形式在金刚石表面形成

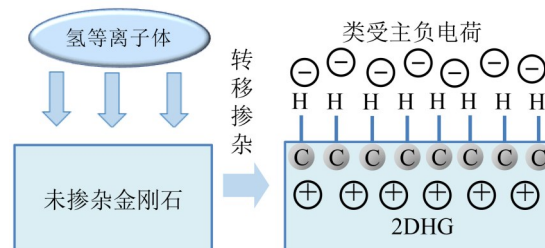


图1 氢终端金刚石表面的气态转移掺杂和二维空穴气电导

2DHG. 实验证明固态转移掺杂比气态吸附物转移掺杂具有更高的热稳定性^[9]. 然而,氢终端金刚石上性能最好的栅介质和钝化介质却是电子亲和能并不很高的氧化铝(Al₂O₃),即使在200 °C用原子层沉积(ALD)生长的Al₂O₃材料仍能保持2DHG的存在. 为了解释这一现象,早稻田大学Kawarada H团队^[13]和西安电子科技大学张金凤团队^[14]提出,ALD生长的Al₂O₃存在氧间隙缺陷,其能态低于氢终端金刚石表面价带顶,因此,也是通过固态转移掺杂形成类受主负电荷及2DHG. 不止Al₂O₃,在300 °C下ALD-HfO₂/氢终端金刚石结构中也存在类似的转移掺杂作用^[15].

日本佐贺大学的Kasu M团队发现氢终端金刚石表面吸附NO₂能够显著提高2DHG面密度,因此发展了一种吸附NO₂并用单层低温(80~150 °C)ALD-Al₂O₃介质或双层不同温度ALD-Al₂O₃介质来保护吸附层的氢终端金刚石2DHG材料结构,并大量应用于其场效应管器件当中^[16-20].

西安电子科技大学张金凤团队对固态转移掺杂理论对多种介质的场效应管器件研制进行了深入研究,

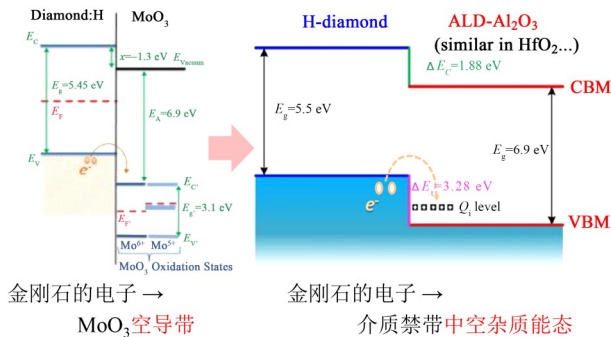
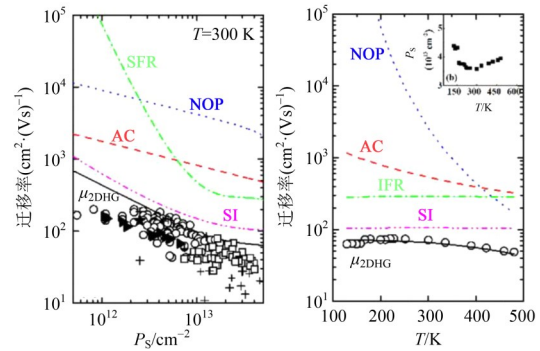


图2 氢终端金刚石表面的固态转移掺杂原理



(a) 随面密度的变化 (b) 随温度的变化
图3 氢终端金刚石表面二维空气迁移率

率先实现氢终端金刚石上 MoO₃ 栅介质的高性能金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) 器件, 该器件具有低导通电阻、高跨导和高饱和电流, 200 °C 下器件仍稳定工作^[21-23]. 该小组实现了 Al₂O₃ 作为转移掺杂栅介质的高稳定金刚石 MOSFET, 并且具有出色的重复测量稳定性和大信号脉冲开关特性^[14,24]. 他们还发现, 用 300 °C 的 ALD 工艺制备 HfO₂ 栅介质, 同样可以实现高性能的金刚石氢终端 MOSFET^[15,25].

氢终端金刚石表面 p 型电导不论是由气态吸附物还是固态转移掺杂获得, 通常在室温下的空穴面密度约为 10¹²~10¹³ cm⁻² 数量级, 霍尔迁移率通常 ≤ 200 cm²/Vs, 方块电阻通常 < 100 kΩ/sq. 公开报道的氢终端金刚石最低室温方块电阻为 719.3 Ω/sq, 对应的空穴霍尔面密度是 1.456 × 10¹⁴ cm⁻², 霍尔迁移率是 59.6 cm²/Vs, 由吸附 NO₂ 工艺得到^[16]. 长期以来, 氢终端金刚石的各种制备方法都很难让 2DHG 在较高的载流子浓度 (> 3 × 10¹² cm⁻²) 下实现高迁移率 (> 200 cm²/Vs). 然而, 该二维电导的空穴饱和和漂移速度可达到 1 × 10⁷ cm/s, 这是早稻田大学根据氢终端金刚石场效应管的频率特性和栅长对应关系报道的实验提取值^[26].

2.2 新型金刚石面电导和高迁移率特性

为探索氢终端金刚石 2DHG 迁移率低的原因, 2018 年, 西安电子科技大学张金凤团队综合考虑 2DHG 的多种散射机制, 给出该迁移率随空穴面密度和温度变化特性的定量理论解释^[27] (如图 3 所示), 发现制约氢终端金刚石 2DHG 迁移率的关键机制是表面负电荷散射. 之后的氢终端金刚石 2DHG 迁移率理论研究中, 日本材料科学研究所 (National Institute for Material Science, NIMS) Takahide Y 团队在计算中引入背景电离杂质散射^[28], 伊利诺伊州大学芝加哥分校 Dutta M 团队^[29,30] 引入远程界面极性声子散射, 但结论仍是表面负电荷散射最严重. 斯坦福大学 Peterson R 等人^[31] 则认为较低载流子浓度下, 还有另一种表面杂质散射也对迁移率有较大制约作用.

图 3 中离散符号为实验数据, 缩写 AC、NOP、IFR、

SI 分别表示声学声子散射、非极性光学声子散射、界面粗糙度散射和表面负电荷散射, 实线为 μ_{2DHG}, 表示 4 种散射机制共同作用获得的 2DHG 迁移率.

表面负电荷散射最严重, 其实是因为金刚石表面类受主负电荷和转移掺杂获得的 2DHG 之间距离太近, 对 2DHG 形成了非常强的散射作用. 如果能够加大补偿性负电荷和 2DHG 的距离, 将表面转移掺杂转变为类似半导体异质结中的调制掺杂结构, 就有可能提高 2DHG 迁移率. NIMS 的 Takahide Y 团队基于该理论认识, 将几乎没有电荷的二维 h-BN 薄膜转移到没有接触过空气的氢终端金刚石表面, 避免金刚石表面吸附物转移掺杂, 制备霍尔条场效应管并优化工艺, 以 h-BN (24 nm)/氢终端金刚石结构加栅压正偏, 成功获得了室温霍尔迁移率高达 680 cm²/Vs、方阻为 1.4 kΩ/sq 的 2DHG^[32]. 实现该高迁移率结构, 涉及到的技术和设备要点包括: (1) 高质量氢终端金刚石表面的制备技术; (2) 高纯低缺陷低陷阱的二维 h-BN 薄膜制备和快速剥离转印技术; (3) 为了实现 h-BN 薄膜和氢终端金刚石表面之间毫无空气吸附物的清洁界面, 二维材料和金刚石的材料制备设备以及若干器件工艺设备之间要建立可完全无空气的手套箱互连. 因此, h-BN/氢终端金刚石异质结的制备技术难度非常大.

虽然技术难度大, 该高迁移率成果仍然是氢终端金刚石表面电导研究这 30 余年来非常振奋人心的重大突破 (如图 4 所示), 说明该电导体系完全有可能取得高迁移率特性, 且是在较高 2DHG 浓度下取得高迁移率, 使表面电导提升一个数量级. 这种高迁移率、高电导特性将促使金刚石场效应管走出低迁移率困局, 所有器件特性都出现显著提升; 尤其在微波功率器件方面, 将显著提升器件的跨导和功率放大能力 (如图 5 所示), 促使金刚石场效应管在结构和性能优化方面走上一条类似主流固态微波功率器件 GaN, 高电子迁移率晶体管 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 器件的发展道路.

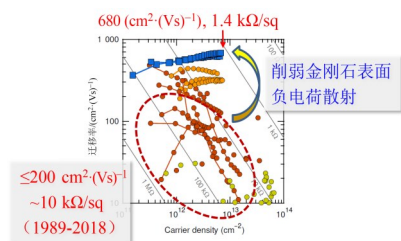


图4 削弱负电荷散射使金刚石表面2DHG迁移率提升和方阻下降

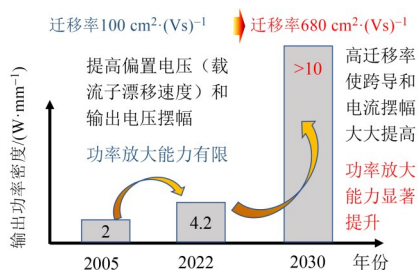


图5 高迁移率、高电导特性对金刚石微波功率场效应管发展的扭转作用

3 金刚石场效应管的进展和问题

基于氢终端金刚石表面电导的场效应管是目前主流的金剛石电子器件,从早年的金属-半导体场效应晶体管(Metal-Semiconductor Field Effect Transistor, MESFET)发展到近年的MOSFET.由于新型高电导h-BN/氢终端金刚石异质结的制备技术难度非常大,目前相关器件报道极少,这里涉及的器件都是基于转移掺杂的传统氢终端电导器件.近年来,器件结构从栅-源和栅-漏之间的氢终端表面没有氧化物介质保护发展到源漏之间全部用氧化物介质来钝化保护,

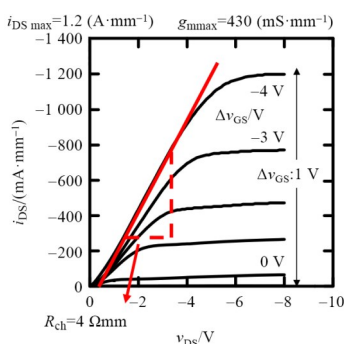
器件特性得到了显著改善,但同时也暴露出相关问题.

3.1 直流特性

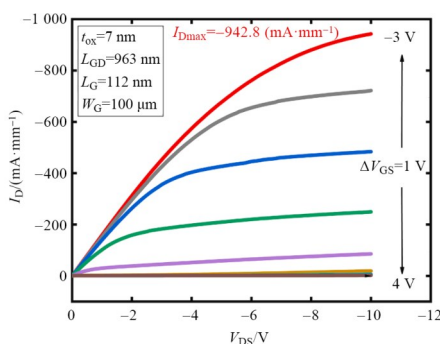
表2和图6给出了国际、国内金刚石电子器件直流特性的一些最好结果.最大输出漏极电流密度(I_{Dmax})能达到1.2~1.35 A/mm^[19, 33],但是最大跨导(g_{mmax})通常达不到300 mS/mm,并且最好的直流性能(如最大的 I_{Dmax} 和 g_{mmax})并不是由其栅长最小的器件获得^[34].氢终端金刚石器件并非栅长越小,电流密度等性能越好,这说明器件特性的随机性较强,这主要是氢终端电导本身对环境敏感,氢终端表面介质和金属的黏附性较差等因素造成,这些问题通过器件制备和封装工艺是可以改善的.

考虑到GaN HEMT以2DEG作为导电沟道和氢终端金刚石场效应管以2DHG作沟道非常相似,这里可以从材料到器件做一个电学特性的比较,来显示金刚石电子器件自身的特点.

氢终端金刚石2DHG和氮化物2DEG的载流子面密度相当,但前者的方块电阻约5~10 kΩ/sq,比后者200~500 Ω/sq的方块电阻约高出一个数量级,主要是因为前者的迁移率低约一个数量级以上.同样的电场和载流子浓度下,低迁移率会造成低的载流子漂移速率,影响跨导和电流密度,因此金刚石场效应管能够取得GaN HEMT水平的A/mm级输出电流难度极大,跨导也难以达到GaN HEMT水平.不过,采用ALD-Al₂O₃介质的氢终端金刚石MOSFET器件可实现真空下-263~400 °C正常工作^[35],同时实现高源漏击穿电压和较大的输入栅压范围,这相对于硅器件和GaN HEMT器件具有显著优势.



(a) 早稻田大学报道



(b) 西安电子科技大学等报道

图6 金刚石表面沟道场效应管的直流特性

3.2 高压特性

氢终端金刚石场效应管在高压下,强场集中在金刚石表面,器件的关态击穿主要由金刚石表面或介质/金刚石界面附近的漏电造成,而不是金刚石自身的碰

撞电离效应.因此,虽然金刚石自身的击穿场强很高,但为了提高器件的击穿电压,主要措施是发展高耐压、高可靠的器件表面介质.

早稻田大学发展了在氢终端金刚石表面上能够耐

表 2 金刚石电子器件直流特性若干结果

结构	栅长/ μm	$R_{\text{on}}/(\Omega\cdot\text{mm})$	$I_{\text{Dmax}}/(\text{A}\cdot\text{mm}^{-1})$	$G_{\text{mmax}}/(\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1})$	数据来源
金刚石吸附 NO_2 加氧化铝介质钝化 MOSFET	0.4	>5	1.350 0	200	文献[19]
氧化铝(111)金刚石 MOSFET(无钝化)	0.5	>5	1.200 0	430	文献[33]
金刚石 MOSFET(无钝化)	0.1	5.6	0.585 0	206	文献[36]
300 °CALD- Al_2O_3 /金刚石 MOSFET(钝化)	0.1	6.2	0.942 8	284	文献[37]

受高温和高压的 450 °CALD- Al_2O_3 介质工艺^[38,39], 氢终端金刚石表面仍具有电导特性良好的 2DHG. 利用 TiC 欧姆接触和厚度达到 200 nm 或 400 nm 的这种介质, 早稻田大学报道了耗尽型金刚石 MOSFET 在 10~700 K 温度范围正常工作^[35]、击穿电压/栅-漏间距比值在栅-漏间距 1~2 μm 达到 2 MV/cm 以上、在栅-漏间距 5~16 μm 保持在 1 MV/cm 的高压特性^[13]. 他们还报道了基于氢氧混合表面终端沟道^[40]和栅下引入氮离子注入层^[41]的增强型 MOSFET 器件, 两者的阈值电压都达到 -2.5 V, 后者栅-漏间距 2 μm 器件的击穿电压/栅-漏间距比值达到 2.7 MV/cm. Kim 等以 NO_2 吸附加 Al_2O_3 介质工艺, 报道了击穿电压 -2 568 V 且功率优值 874.6 MW/cm² 的器件性能^[42], 以及目前金刚石场效应管最高的关态击穿电压 -3 659 V^[43].

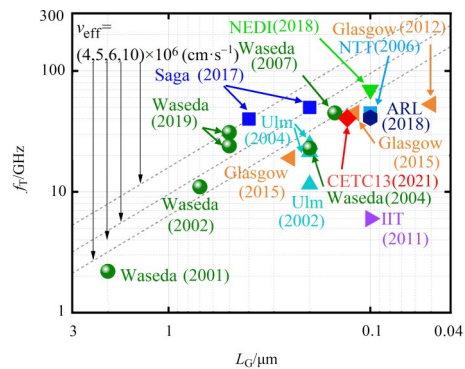
在横向场效应管器件当中, 金刚石 MOSFET 的关态击穿场强达到和 SiC、GaN 器件相当甚至偶尔略高的水平, 根据金刚石的高击穿场强特性, 还有继续提升的空间; 功率优值方面, SiC 高压器件通常竖式结构特性更佳, GaN HEMT 则有功率优值 2 093 MW/cm² 的性能报道^[44], 因此金刚石 MOSFET 的功率优值还比较差. 就功率优值而言, 氢终端金刚石场效应管 2DHG 的低迁移率特性造成导电电阻相对较高, 因此功率优值并没有表现出金刚石的材料优势.

3.3 频率特性

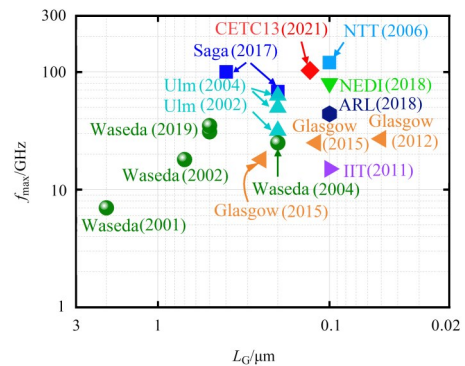
场效应管的小信号频率特性通常随器件的栅长减小而提升, 截止频率 f_T 在长沟道下与 $1/L_G^2$ 成正比, 而在短沟道下 $f_T = v_{\text{eff}}/(2\pi L_G)$ (v_{eff} 为沟道载流子有效速度). 场效应管要提高频率特性, 除了减小栅长, 还需要提高器件的跨导 g_m 、减小欧姆接触电阻 R_C 和栅-源、栅-漏间距, 并尽量提高 v_{eff} (如图 7 所示)^[36,45-56]. 在金刚石的氢终端电导特性欠佳的情况下, 研究人员仍在提升金刚石场效应管的频率、功率性能方面设法取得进展.

报道的氢终端金刚石场效应管 f_T 最高值记录为 2018 年中国电科 55 所郁鑫鑫等^[36]报道的 70 GHz, 该器件的成功之处在于栅长 100 nm 的情况下实现了极短的栅-源、栅-漏间距(均与栅长相等)和很低的 R_C . 2006 年, NTT 的 Kasu M 团队报道了在栅长 100 nm 时, 金刚石场效应管最高振荡频率(f_{max})达到 120 GHz^[45], f_{max}/f_T 比值为 3.2. 2021 年中国电科 13 所蔚翠等^[46]以栅长 130 nm

的器件获得 $f_{\text{max}}=103 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}}/f_T \approx 2.53$. 西安电子科技大学与中国电科 55 所合作, 以栅长 100 nm 的金刚石 MOSFET 获得 $f_T=41.3 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}}=80.6 \text{ GHz}$, 这是 300 °C 以上高温 ALD- Al_2O_3 栅介质的金刚石 MOSFET 器件的较好结果^[37].



(a) f_T 随栅长的变化关系



(b) f_{max} 随栅长的变化关系

图 7 金刚石场效应管小信号频率特性的研究进展

从图 7 可以看出, 除了个别案例以外, 金刚石场效应管的沟道载流子有效速度在大部分器件中都达不到饱和速度实验值 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 的 1/2, 这严重制约了器件表现出来的频率性能. 主要是由于器件的源-漏串联电阻过大、分压过多, 令沟道得到的横向电场受限, 降低了载流子的有效速度.

3.4 微波功率特性

氢终端金刚石场效应管虽然最大的 I_{Dmax} 可到 1 A/mm 以上, 最高击穿电压可达 3 kV 以上, 但同时获得高压和大电流特性却殊为不易. 为了提高金刚石微波功率器

件的输出功率密度^[56-70](如图8所示),国际上从提高输出电流、提高击穿电压、研发偏栅工艺、提高器件大信号特性等方面不断努力。

2019年早稻田大学以栅长0.5 μm、采用厚度达100 nm的450 °C ALD-Al₂O₃栅介质的器件报道了输出功率密度3.8 W/mm@1 GHz^[26],2022年中国电科13所用栅长0.9 μm、具有100 nm厚的Al₂O₃栅介质的MOSFET器件报道了 $V_{DS}=-58$ V情况下输出功率密度4.2 W/mm@2 GHz^[57],该器件同时也展示了3.1 W/mm@4 GHz和1.7 W/mm@10 GHz的更高频段输出功率特性,这些数据在相应的频率下都达到了金刚石场效应管输出功率密度的一流水平。

然而,图8也显示出跟GaN HEMT相比,金刚石场效应管在同样漏极直流偏置电压下的微波功率特性目前还比较差。氢终端金刚石2DHG低迁移率特性一方面造成器件本身 $I_{D,max}$ 和功率增益比较小,制约输出电流摆幅和输出功率密度;另一方面也增大了器件的饱和电压,对输出电压摆幅造成一定程度压缩。

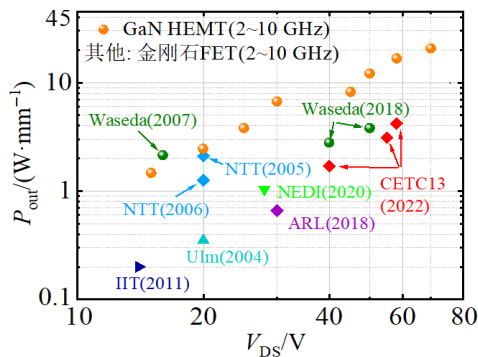


图8 金刚石微波功率场效应管的研究进展,GaN HEMT器件的微波功率特性用作对照

金刚石微波功率场效应管需要大的输出电流密度(摆幅)、较好的高压特性、频率特性来提高其性能,因此以上金刚石场效应管在直流、高压、频率、微波功率特性上暴露出的问题,在微波功率器件中都会充分展现出来。图9中总结说明了这些器件性能和材料特性之间的关系,可以看到最关键的底层问题是氢终端金刚石2DHG电导的低迁移率瓶颈问题。

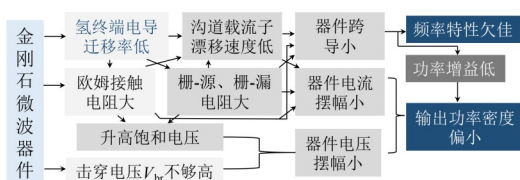


图9 制约金刚石微波器件频率、功率特性的主要因素

4 结束语

本文回顾了基于氢终端金刚石表面2DHG电导的金刚石场效应管器件在器件工艺和直流、高压、频率和微波功率特性等方面的研究进展。长期以来,表面转移掺杂形成的2DHG电导支持了金刚石电子器件性能不断提升,但是和GaN异质结2DEG等电导相比,其迁移率过低,这已经成为制约金刚石低功耗高速数字电路、高频器件和高功率微波器件发展和应用的关键因素。在理论和实验研究的共同促进下,最近出现了新掺杂原理即类调制掺杂形成的金刚石2DHG面电导,使2DHG室温霍尔迁移率提升到680 cm²/Vs,方阻降低一个数量级,这将引起金刚石场效应管在结构、工艺上的巨大变化和性能的突飞猛进,促使金刚石场效应管成为最强大的p型半导体场效应管。

面向未来,要实现这种类调制掺杂形成的高迁移率、高电导金刚石2DHG的广泛应用,仍有以下关键问题需要解决:

(1)降低制备工艺难度。文献[32]报道的高迁移率h-BN/氢终端金刚石2DHG结构制备方法工艺流程难度非常高,目前国际上其他研究团队难以精准复现该工艺,霍尔迁移率很难达到400 cm²/Vs。因此,需要降低其工艺难度,使该成果能够被学术同行普遍掌握,推动进一步发展。

(2)形成耗尽型高迁移率、高电导金刚石2DHG。文献[32]实现的是增强型2DHG表面电导,这种2DHG对于加大栅-漏间距、实现高压特性并不合适,并且对于通常工作在耗尽型模式下的微波功率器件并不合适。为了实现金刚石高迁移率2DHG的广泛应用,还必须发展其耗尽型器件结构,同时保持高迁移率特性。

(3)探究其输运特性机理。基于高迁移率h-BN/氢终端金刚石2DHG结构的物理分析可知,限制其迁移率的主要散射机制仍是异质界面电荷(电离杂质和陷阱电荷等)散射和金刚石表面粗糙度散射。因此,为了实现更高迁移率的2DHG,仍需提高氢终端表面清洁度、减少吸附电荷和表面陷阱,另一方面降低氢终端金刚石表面的粗糙度。

金刚石面电导的速场关系仍非常缺乏研究,表面转移掺杂金刚石2DHG在低迁移率下能够获得高的 v_{sat} 仍是未解之谜。对于准调制掺杂金刚石2DHG,不仅其高迁移率特性需要深入探索,其场速关系也需要大量的理论实验研究,充分发掘器件应用潜力。

参考文献

- [1] REZEK B, SAUERER C, NEBEL C E, et al. Fermi level on hydrogen terminated diamond surfaces[J]. Applied

- Physics Letters, 2003, 82(14): 2266-2268.
- [2] LANDSTRASS M I, RAVI K V. Hydrogen passivation of electrically active defects in diamond[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(14): 1391-1393.
- [3] LANDSTRASS M I, RAVI K V. Resistivity of chemical vapor deposited diamond films[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(10): 975-977.
- [4] HAUF M V, SIMON P, SEIFERT M, et al. Low dimensionality of the surface conductivity of diamond[J]. Physical Review B, 2014, 89(11): 115426.
- [5] RUSSELL S A O, CAO L, QI D C, et al. Surface transfer doping of diamond by MoO₃: A combined spectroscopic and Hall measurement study[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(20): 202112.
- [6] 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.
- [7] RI G, TASHIRO K, TANAKA S, et al. Hall effect measurements of surface conductive layer on undoped diamond films in NO₂ and NH₃ atmospheres[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1999, 38(6A): 3492.
- [8] YE H, KASU M, UEDA K, et al. Temperature dependent DC and RF performance of diamond MESFET[J]. Diamond and Related Materials, 2006, 15(4/5/6/7/8): 787-791.
- [9] VERONA C, CICCIGNANI 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.
- [10] TORDJMAN M, SAGUY C, BOLKER A, et al. Superior surface transfer doping of diamond with MoO₃[J]. Advanced Materials Interfaces, 2014, 1(3): 1300155.
- [11] CRAWFORD K G, CAO L, QI D C, et al. Enhanced surface transfer doping of diamond by V₂O₅ with improved thermal stability[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(4): 042103.
- [12] YIN Z Y, TORDJMAN M, VARDI A, et al. A diamond: H/WO₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(4): 540-543.
- [13] KAWARADA H, YAMADA T, XU D C, et al. Durability-enhanced two-dimensional hole gas of C-H diamond surface for complementary power inverter applications[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42368.
- [14] REN Z Y, LV D D, XU J M, et al. High temperature 300 °C ALD grown Al₂O₃ on hydrogen terminated diamond: Band offset and electrical properties of the MOSFETs[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(1): 013503.
- [15] REN Z Y, XING Y F, LV D D, et al. H-diamond MOS interface properties and FET characteristics with high-temperature ALD-grown HfO₂ dielectric[J]. AIP Advances, 2021, 11(3): 035041.
- [16] SATO H, KASU M. Maximum hole concentration for Hydrogen-terminated diamond surfaces with various surface orientations obtained by exposure to highly concentrated NO₂[J]. Diamond and Related Materials, 2013, 31: 47-49.
- [17] SAHA N C, OISHI T, KIM S, et al. 145-MW/cm² heteroepitaxial diamond MOSFETs with NO₂ p-type doping and an Al₂O₃ passivation layer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(7): 1066-1069.
- [18] SAHA N C, KIM S W, OISHI T, et al. 345-MW/cm² 2608-V NO₂ p-type doped diamond MOSFETs with an Al₂O₃ passivation overlayer on heteroepitaxial diamond[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(6): 903-906.
- [19] HIRAMA K, SATO H, HARADA Y, et al. Thermally stable operation of H-terminated diamond FETs by NO₂ adsorption and Al₂O₃ passivation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(8): 1111-1113.
- [20] KASU M. Diamond field-effect transistors for RF power electronics: Novel NO₂ hole doping and low-temperature deposited Al₂O₃ passivation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(1S): 01AA01.
- [21] REN Z Y, ZHANG J F, ZHANG J C, et al. Diamond field effect transistors with MoO₃ gate dielectric[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6): 786-789.
- [22] REN Z Y, ZHANG J F, ZHANG J C, et al. Polycrystalline diamond MOSFET with MoO₃ gate dielectric and passivation layer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(9): 1302-1304.
- [23] REN Z Y, ZHANG J F, ZHANG J C, et al. Polycrystalline diamond RF MOSFET with MoO₃ gate dielectric[J]. AIP Advances, 2017, 7(12): 125302.
- [24] REN Z Y, YUAN G S, ZHANG J F, et al. Hydrogen-terminated polycrystalline diamond MOSFETs with Al₂O₃ passivation layers grown by atomic layer deposition at different temperatures[J]. AIP Advances, 2018, 8(6): 065026.
- [25] REN Z Y, LV D D, XU J M, et al. Performance of H-diamond MOSFETs with high temperature ALD grown

- HfO₂ dielectric[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 106: 107846.
- [26] 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*, 2018, 40(2): 279-282.
- [27] LI Y, ZHANG J F, LIU G P, et al. Mobility of two-dimensional hole gas in H-terminated diamond[J]. *Physica Status Solidi(RRL) – Rapid Research Letters*, 2018, 12(3): 1700401.
- [28] SASAMA Y, KAGEURA T, KOMATSU K, et al. Charge-carrier mobility in hydrogen-terminated diamond field-effect transistors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(18): 185707.
- [29] SINGH R, BONOMO G, FARID S, et al. Surface-acoustics phonon scattering in 2D-hole gas of diamond based FET devices[J]. *Carbon*, 2020, 169: 488-500.
- [30] BONOMO G, MOHAMED A, FARID S, et al. Contribution of remote interface polar phonons in the hole mobility of diamond[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 101: 107650.
- [31] PETERSON R, MALAKOUTIAN M, XU X Q, et al. Analysis of mobility-limiting mechanisms of the two-dimensional hole gas on hydrogen-terminated diamond[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(7): 075303.
- [32] 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]. *Nature Electronics*, 2022, 5: 37-44.
- [33] KAWARADA H. High-current metal oxide semiconductor field-effect transistors on h-terminated diamond surfaces and their high-frequency operation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(9R): 090111.
- [34] RUSSELL S A O, SHARABI S, TALLAIRE A, et al. Hydrogen-terminated diamond field-effect transistors with cutoff frequency of 53 GHz[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(10): 1471-1473.
- [35] KAWARADA H, YAMADA T, XU D, et al. Wide temperature (10~700 K) and high voltage (~1 000 V) operation of C-H diamond MOSFETs for power electronics application[C]//2014 IEEE International Electron Devices Meeting. Piscataway: IEEE, 2014: 279-280.
- [36] 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 Letters*, 2018, 39(9): 1373-1376.
- [37] REN Z Y, MA Y C, YANG S Q, et al. High frequency single crystalline diamond MOSFET with high temperature (300 °C) ALD grown Al₂O₃ dielectric[J]. *Results in Physics*, 2023, 49: 106517.
- [38] HIRAIWA A, DAICHO A, KURIHARA S, et al. Refractory two-dimensional hole gas on hydrogenated diamond surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(12): 124504.
- [39] 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: 013510.
- [40] 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.
- [41] OI N, KUDO T, INABA M, et al. Normally-OFF two-dimensional hole gas diamond MOSFETs through nitrogen implantation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(6): 933-936.
- [42] SAHA N C, KIM S W, OISHI T, et al. 875 MW/cm² low-resistance NO₂ p-type doped chemical mechanical planarized diamond MOSFETs[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(5): 777-780.
- [43] SAHA N C, KIM S W, KOYAMA K, et al. 3 659 V NO₂ p-type doped diamond MOSFETs on misoriented heteroepitaxial diamond substrates[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 44(1): 112-115.
- [44] HYUNG-SEOK L, PIEDRA D, MIN S, et al. 3000 V 3mΩ · cm² InAlN/GaN MOSHEMTs with AlGaN back barrier[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(7): 982-984.
- [45] 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 Letters*, 2006, 27(7): 570-572.
- [46] YU C, HE Z Z, ZHOU C J, et al. High frequency hydrogen-terminated diamond MESFET with an f_{max} of 103 GHz[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 28: 102489.
- [47] ALEKSOV A, KUBOVIC M, KASU M, et al. Diamond-based electronics for RF applications[J]. *Diamond and Related Materials*, 2004, 13(2): 233-240.
- [48] ROSSI M C, CALVANI P, CONTE G, et al. RF power

- performance evaluation of surface channel diamond MES-FET[J]. MRS Online Proceedings Library, 2010, 1203(1): 1504.
- [49] HIRAMA K, TAKAYANAGI H, YAMAUCHI S, et al. High-performance p-channel diamond MOSFETs with alumina gate insulator[C]//2007 IEEE International Electron Devices Meeting. Piscataway: IEEE, 2007: 873-876.
- [50] KASU M. Diamond field-effect transistors for RF power electronics: Novel NO₂ hole doping and low-temperature deposited Al₂O₃ passivation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(1S): 01AA01.
- [51] KUBOVIC M, KASU M, KALLFASS I, et al. Microwave performance evaluation of diamond surface channel FETs[J]. Diamond and Related Materials, 2004, 13(4): 802-807.
- [52] MATSUDAIRA H, MIYAMOTO S, ISHIZAKA H, et al. Over 20 GHz cutoff frequency submicrometer-gate diamond MISFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2004, 25(7): 480-482.
- [53] RUSSELL S, SHARABI S, TALLAIRE A, et al. RF operation of hydrogen-terminated diamond field effect transistors: A comparative study[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(3): 751-756.
- [54] TANIUCHI H, UMEZAWA H, ARIMA T, et al. High-frequency performance of diamond field-effect transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2001, 22(8): 390-392.
- [55] UMEZAWA H, TANIUCHI H, ISHIZAKA H, et al. RF performance of diamond MISFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2002, 23(3): 121-123.
- [56] IVANOV T G, WEIL J, SHAH P B, et al. Diamond RF transistor technology with $f_T=41$ GHz and $f_{max}=44$ GHz[C]//2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. Piscataway: IEEE, 2018:1461-1463.
- [57] YU C, ZHOU C J, GUO J C, et al. Hydrogen-terminated diamond MOSFETs on (001) single crystal diamond with state of the art high RF power density[J]. Functional Diamond, 2022, 2(1): 64-70.
- [58] YU X X, HU W X, ZHOU J J, et al. 1.26 W/mm output power density at 10 GHz for Si₃N₄ passivated H-terminated diamond MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(10): 5068-5072.
- [59] KUDARA K, IMANISHI S, HIRAIWA A, et al. High output power density of 2DHG diamond MOSFETs with thick ALD-Al₂O₃[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(8): 3942-3949.
- [60] YU X X, HU W X, ZHOU J J, et al. 1 W/mm output power density for h-terminated diamond MOSFETs with Al₂O₃/SiO₂ Bi-Layer passivation at 2 GHz[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2021, 9: 160-164.
- [61] KASU M, UEDA K, YE H, et al. High RF output power for H-terminated diamond FETs[J]. Diamond and Related Materials, 2006, 15(4/5/6/7/8): 783-786.
- [62] KASU M, UEDA K, YE H, et al. 2 W/mm output power density at 1 GHz for diamond FETs[J]. Electronics Letters, 2005, 41(22): 1249.
- [63] KOLLURI S, KELLER S, DENBAARS S P, et al. Microwave power performance N-polar GaN MISHEMTs grown by MOCVD on SiC substrates using an Al₂O₃ etch-stop technology[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(1): 44-46.
- [64] KOLLURI S, KELLER S, DENBAARS S P, et al. N-polar GaN MIS-HEMTs with a 12.1 W/mm continuous-wave output power density at 4 GHz on sapphire substrate [J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(5): 635-637.
- [65] LIU R, SCHREURS D, DE RAEDT W, et al. A very compact power amplifier using GaN HEMTs in multilayer thin-film technology[C]//2010 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits. Piscataway: IEEE, 2010: 37-40.
- [66] JESSEN G H, GILLESPIE J K, VIA G D, et al. RF power measurements of InAlN/GaN unstrained HEMTs on SiC substrates at 10 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2007, 28(5): 354-356.
- [67] WU Y F, MOORE M, SAXLER A, et al. 40 W/mm double field-plated GaN HEMTs[C]//2006 64th Device Research Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 151-152.
- [68] ZHANG A P, ROWLAND L B, KAMINSKY E B, et al. Microwave power SiC MESFETs and GaN HEMTs[C]//IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices. Piscataway: IEEE, 2002, 47(5): 181-185.
- [69] WEIMANN N G, MANFRA M J, WACHTLER T. Unpassivated AlGaIn-GaN HEMTs with minimal RF dispersion grown by plasma-assisted MBE on semi-insulating 6H-SiC substrates[J]. IEEE Electron Device Letters, 2003, 24(2): 57-59.
- [70] WEIMANN N G, MANFRA M J, HSU J W P, et al. Al-GaN/GaN HEMTs grown by molecular beam epitaxy on

sapphire, SiC, and HVPE GaN templates[C]//Proceedings of the IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices. Piscataway: IEEE, 200: 126-133.

作者简介



张金凤 女,1977年9月出生,陕西铜川人.西安电子科技大学集成电路学部教授,博士生导师,国家级人才.主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料和器件.

E-mail: jfzhang@xidian.edu.cn



张进成 男,1976年7月出生,陕西富平人.西安电子科技大学二级教授,博士生导师,西安电子科技大学党委常委、副校长,国家级人才.主要研究方向为宽禁带与超宽禁带半导体器件与集成电路.中国电子学会会员编号:E190008613M.

E-mail: jchzhang@xidian.edu.cn



任泽阳 男,1991年8月出生,山东枣庄人.西安电子科技大学集成电路学部副教授,硕士生导师.主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料和器件.

E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn



苏凯 男,1988年10月出生,陕西铜川人.西安电子科技大学集成电路学部副教授.主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料及器件.

E-mail: ksu@xidian.edu.cn



郝跃 男,1958年3月出生,安徽阜阳人.中国科学院院士,西安电子科技大学集成电路学部教授,博士生导师.主要研究方向为宽禁带和超宽禁带半导体材料与器件、微纳半导体新器件及可靠性、SoC设计与设计方法学.中国电子学会会员编号:E190008304F.

E-mail: yhao@xidian.edu.cn