

研究综述

金刚石散热衬底在 GaN 基功率器件中的应用进展

贾鑫¹, 魏俊俊¹, 黄亚博¹, 邵思武¹, 孔月婵²,
刘金龙¹, 陈良贤¹, 李成明¹, 叶海涛³

(1.北京科技大学, 北京 100083; 2.南京电子器件研究所, 南京 210016;
3.School of Engineering, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK)

摘要: 氮化镓 (GaN) 基功率器件性能的充分发挥受到沉积 GaN 的衬底低热导率的限制, 具有高热导率的化学气相沉积 (CVD) 金刚石, 成为 GaN 功率器件热扩散衬底材料的优良选择。相关学者在高导热金刚石与 GaN 器件结合技术方面开展了多项技术研究, 主要包括低温键合技术、GaN 外延层背面直接生长金刚石的衬底转移技术、单晶金刚石外延 GaN 技术和高导热金刚石钝化层散热技术。对 GaN 功率器件散热瓶颈的原因进行了详细评述, 并对上述各项技术的优缺点进行了系统分析和评述, 揭示了各类散热技术的热设计工艺开发和面临的技术挑战, 并认为低温键合技术具有制备温度低、金刚石衬底导热性能可控的优势, 但是大尺寸金刚石衬底的高精度加工和较差的界面结合强度对低温键合技术提出挑战。GaN 外延层背面直接生长金刚石则具有良好的界面结合强度, 但是涉及到高温、晶圆应力大、界面热阻高等技术难点。单晶金刚石外延 GaN 技术和高导热金刚石钝化层散热技术则分别受到单晶金刚石尺寸小、成本高和工艺不兼容的限制。因此, 开发低成本大尺寸金刚石衬底, 提高晶圆应力控制技术和界面结合强度, 降低界面热阻, 提高金刚石衬底 GaN 器件性能方面, 将是未来金刚石与 GaN 器件结合技术发展的重点。

关键词: 金刚石; 氮化镓; 电子器件; 转移技术; 高热导率; 界面热阻

中图分类号: TB43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0111-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.013

Application Progress of Diamond Heat Dissipation Substrate in GaN-based Power Devices

JIA Xin¹, WEI Jun-jun¹, HUANG Ya-bo¹, SHAO Si-wu¹, KONG Yue-chan²,
LIU Jin-long¹, CHEN Liang-xian¹, LI Cheng-ming¹, YE Hai-tao³

(1.University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China; 3.School of Engineering, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK)

ABSTRACT: The full realization of superior properties of gallium nitride (GaN)-based power devices is limited by the low

收稿日期: 2020-02-27; 修订日期: 2020-05-07

Received: 2020-02-27; Revised: 2020-05-07

基金项目: 装备预研基金项目 (614280301031704); 国家重点研发计划项目 (2018YFB0406501)

Fund: Equipment Advanced Research Fund Project (614280301031704), National Key Research and Development Program of China (2018YFB0406501)

作者简介: 贾鑫 (1989—), 男, 博士研究生, 主要从事金刚石膜研究。

Biography: JIA Xin (1989—), Male, Ph. D. student, Research focus: diamond film.

通讯作者: 魏俊俊 (1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事薄膜及真空技术。邮箱: weijj@ustb.edu.cn

Corresponding author: WEI Jun-jun (1981—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: thin film and vacuum technology. E-mail: weijj@ustb.edu.cn

引文格式: 贾鑫, 魏俊俊, 黄亚博, 等. 金刚石散热衬底在 GaN 基功率器件中的应用进展[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 111-123.

JIA Xin, WEI Jun-jun, HUANG Ya-bo, et al. Application progress of diamond heat dissipation substrate in GaN-based power devices[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 111-123.

thermal conductivity of substrates, so the diamond with the highest thermal conductivity becomes an excellent heat dissipation substrate for GaN. Relevant scholars have carried out a lot of research on the combination of high thermal conductivity diamond and GaN devices, including low-temperature bonding technology, substrate transfer technology for directly growing diamond on the back of GaN epitaxial layer, single crystal diamond epitaxial GaN technology and heat dissipation technology for high thermal conductivity diamond passivation layer technology. The reasons of thermal bottleneck for GaN power devices were discussed in detail, and the advantages and disadvantages of these technologies were analyzed and reviewed systematically. The thermal design process development and challenges of various heat dissipation technologies were revealed. The low-temperature bonding technology had the advantages of low temperature and controllable quality of diamond substrate. However, the low-temperature bonding technology had challenges in the high-precision processing and low interface bonding force of large-size diamond films. The diamond directly growing on back of GaN epitaxial layer had excellent interface bonding strength, but technical difficulties were involved such as high temperature, high stress of wafer, and high thermal boundary resistance. The GaN epitaxial technology on single crystal diamond and high thermal conductivity diamond passivation layer technology were limited by the small size of the single crystal diamond wafer, high cost and incompatible process, respectively. Therefore, the development of diamond substrate with low cost and large size, the improvement of stress control of wafer and high interface bonding strength, the reduction of low thermal boundary resistance of GaN/diamond and the enhancement of the performance of GaN-on-diamond devices will be the focus of future development for GaN-on-diamond devices technology.

KEY WORDS: diamond; GaN; electronic devices; transfer technology; high thermal conductivity; thermal boundary resistance

GaN 作为第三代半导体材料,具有宽禁带(室温下 3.39 eV)、高电子饱和速率(2.5×10^7 cm/s)、高击穿场强(3.3 MV/cm)等优异性能,非常适用于研制高频、大功率微波毫米波器件及电路,在 5G 通讯、航天、国防等领域具有极高的应用价值,在国际上引起了广泛关注^[1-4]。

近年来,基于 GaN 微波功率器件的设计和工艺不断提高和改进,其理论输出功率越来越高(4 GHz, ~40 W/mm),频率越来越大,体积越来越小^[5-8]。然而,在尺寸小型化和功率增大化的条件下,GaN 基微波功率器件的可靠性和稳定性受到严重挑战,其中最主要的原因是 GaN 基功率器件随着功率密度的增加,芯片有源区的热积累效应迅速增加,导致其各项性能指标迅速恶化,使其大功率优势未能充分发挥。因此,散热问题成为制约 GaN 基功率器件进一步发展和广泛应用的主要技术瓶颈之一。受传统封装散热技术的限制无法解决这一难题,必须从 GaN 器件近端结热区着手提升其热传输能力,因此探讨 GaN 基器件的高效散热课题成为其进一步推进 GaN 器件发展的重要方向。金刚石因具有超高热导率逐渐成为 GaN 器件热沉材料的首选,近年来金刚石作为 GaN 热沉或者衬底技术方面和热管理技术领域均取得较大进展。

本文针对 GaN 功率器件散热问题进行简要分析,介绍近年来国内外正在开展的高热导率金刚石膜提高 GaN 功率器件散热技术,并阐述和概括各项技术路线的技术问题和发展方向。

1 GaN 基 HEMT (高电子迁移率晶体管) 散热瓶颈

尽管 GaN 功率器件的理论输出功率密度可达

40 W/mm 以上,但是由于现阶段因其自身热效应问题导致 GaN HEMT 器件功率密度仅为 3~5 W/mm^[9],由此可见其自身优势远远未发挥。主要原因是在高偏置电压工作状态下,过大的功率耗散导致器件升温,而传统的低热导率衬底和散热途径的散热能力有限,阻碍热量向周围环境扩散(见图 1a)^[10],进而加强声子散射,引起势阱中载流子迁移率下降,使器件的静态 I—V 特性衰减,这种现象被称为“自热效应”^[11-16]。Kuzmik 等人^[17]报道 GaN HEMTs 器件功率密度达到 6 W/mm 时,沟道温度可超过 200 °C,且随着耗散功率的增加而升高。尤其是当器件小型化时,电流密度日益增大,器件的自热效应愈加明显,导致器件的峰值温度迅速增加,可靠性呈指数下降^[1,11-12,18-23](图 1b)。

此外, GaN 功率器件常用衬底材料(蓝宝石、硅、碳化硅)的热导率较低,极大限制了器件散热和高功率性能的需求。如表 1 是常用衬底材料和 GaN 常见性能的对比结果,仅依靠传统的衬底材料(硅、碳化硅),通过被动冷却技术,难以满足高功率条件下的散热需求,严重限制 GaN 基功率器件潜力的释放^[24-29]。因此,提高器件可靠性,必须要解决其有源区的热累积问题,提升内部热传递能力,尤其是有源区附近的传热能力成为提升器件功率密度、实现大功率特性的关键途径。采用高导热率的金刚石作为 GaN 基功率器件的散热衬底或者热沉,有望改善其“自热效应”,实现高频、高功率的应用。然而, GaN 与金刚石存在较大晶格失配和热失配等问题,如何将金刚石作为 GaN 基功率器件的热沉或衬底,目前已经报道了多种技术形式,其中主要有多晶金刚石衬底 GaN 散热技术、单晶金刚石衬底散热技术、高导热金刚石钝化层散热技术等。

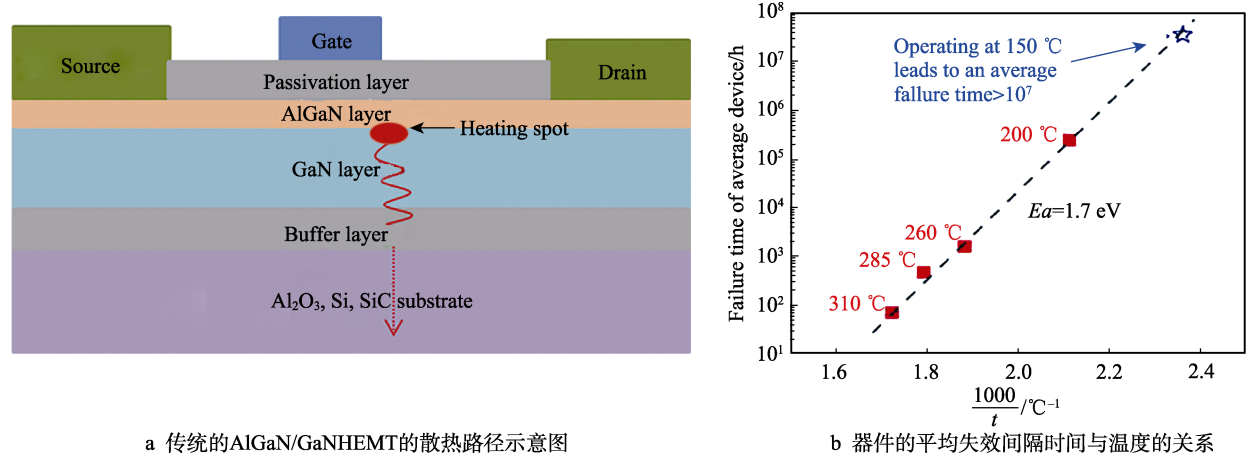


图 1 传统的 AlGaIn/GaN HEMT 的散热路径示意图^[10]及器件的平均失效间隔时间与温度的关系^[18]
Fig.1 Schematic diagram of AlGaIn/GaN HEMT with thermal path through substrate (a)^[10], arrhenius plot showing a mean time to failure plot (b)^[18]

表 1 各种衬底材料及 GaN 的常见性能^[24-27]
Tab.1 Properties of various substrate materials and GaN layer^[24-27]

Parameters	Al ₂ O ₃	6H-SiC	Si	Diamond	GaN
Lattice (Mismatch)/%	16.1	3.5	41	11	—
Coefficient of thermal expansion/(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	7.5	4.2	2.6	~1.0	5.59
CTE (Mismatch)/%	-25	23	56	73	—
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	27	490	150	2000	130

2 多晶金刚石衬底 GaN 散热技术

最早将高热导率金刚石作为 GaN 功率器件散热衬底的是 G. H. Jessen 和 Felix Ejeckam 等人^[30-31]。其基本理念是使高热导率金刚石足够近的接触器件有源区（产热区域），通过热传导的方式将热量迅速传输出去。目前制备金刚石衬底 GaN 基器件技术主要分两种方式：基于低温键合技术和基于 GaN 外延层生长金刚石技术。其中低温键合的基本思路是将 GaN 外延层从原始的 Si 衬底上剥离下来，然后在暴露的 GaN 表面添加中间层，从而与多晶金刚石衬底结合，使 GaN 基器件的有源区与 CVD 金刚石衬底接触，降低功率器件结温；而外延生长技术则是在 GaN 基底上，通过衬底转移以及 CVD 生长方式直接生长出金刚石热扩散层。两种方式各有优劣，并且均取得了显著的技术进步。

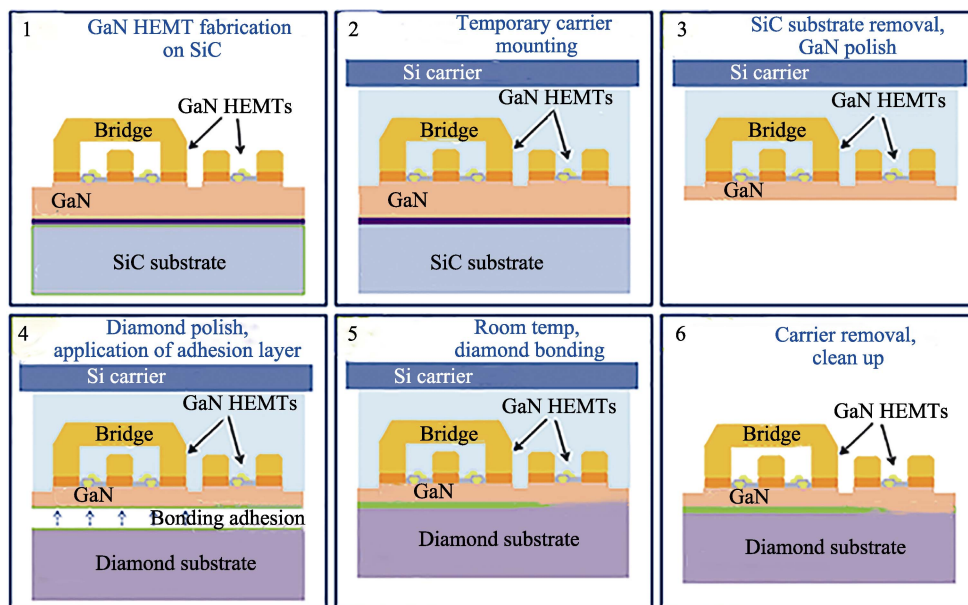
2.1 低温键合技术

最先开展 GaN/金刚石低温键合方法的是 BAE Systems（英国航空航天公司）^[32-35]，其技术路线如图 2a 所示，首先在 SiC 基 GaN 外延层制备 HEMT 器件，然后将 GaN 基 HEMT 晶片键合在临时载体晶片（Temp Carrier）上，去除 SiC 衬底和部分 GaN 的形核层和过渡层，并将其表面和金刚石衬底加工到纳米级粗糙度；随后在 GaN 和金刚石衬底分别沉积键

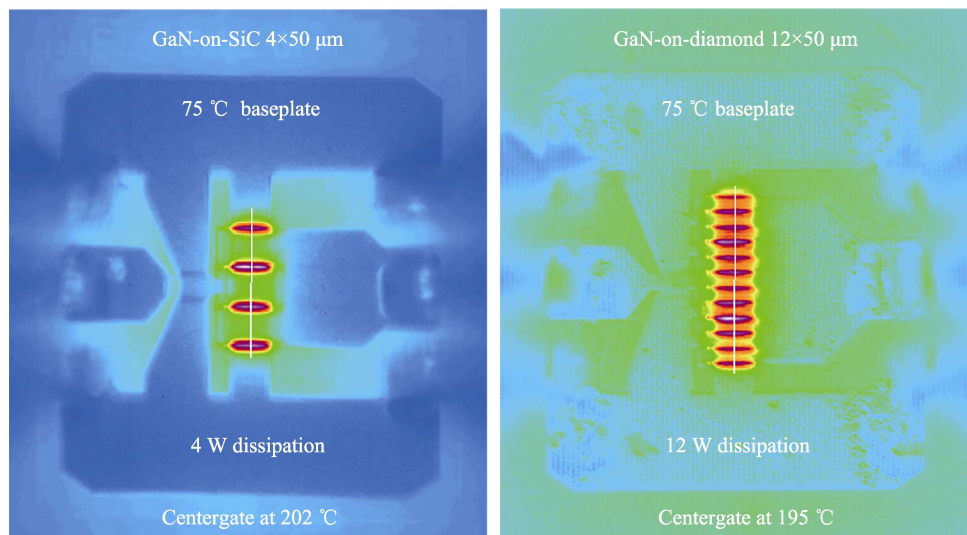
合介质（键合介质可能为 SiN、BN、AlN 等），在低于 150 °C 的温度键合，最后去除临时载体晶片，最终获得金刚石衬底 GaN HEMT 器件。其团队早期制备的 1 英寸金刚石衬底 GaN 结构键合的成功率达到 70%，随后采用该技术路线将金刚石衬底 GaN 晶片推广到 3~4 英寸^[34,36]。

早期器件解决了空气桥结构缺失，大幅提升了金刚石衬底 GaN HEMT 的 RF 增益和增益功率效率（PAE）。经过改进工艺，实现了 10 GHz、40 V 的漏极偏压下 11 W/mm 的 RF 输出功率密度，且 PAE 为 51%，输出功率密度高于 SiC 衬底 GaN HEMTs 的 3 倍，结温更低^[37]（图 2b）。BAE Systems 采用热导率更高的金刚石衬底（2160 W/(m·K)）^[34]，键合介质为 35 nm 厚的硅，GaN/金刚石在室温下的界面热阻（TBR）为(34±0.15) (m²·K)/GW，获得输出功率密度是 SiC 衬底 GaN 器件的 3.6 倍。除 BAE Systems 外，东京大学的 Fengwen Mu^[38-39]采用表面活化键合法，在室温下使用 27 nm 厚的 Si 键合层制备出金刚石衬底 GaN 晶片，实现了界面层的无缝界面，但是作者未对该结构的器件性能进行检测。

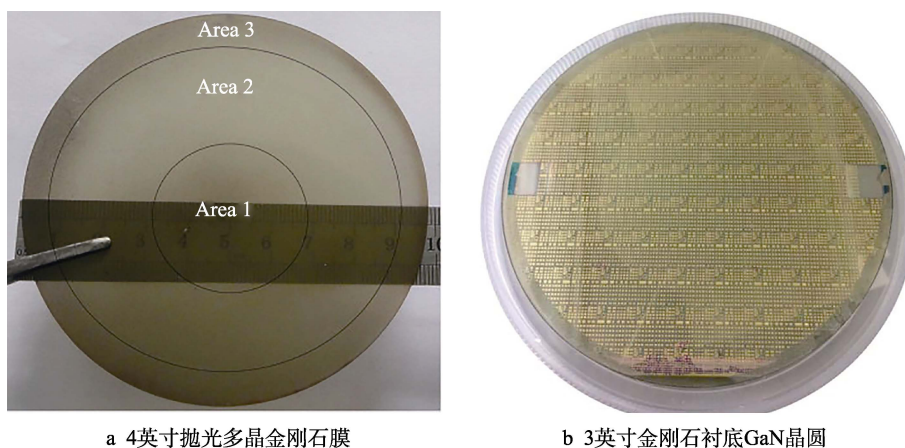
国内方面，北京科技大学几十年来一直在高导热金刚石膜制备及加工方面开展基础研究工作^[27,40-43]，目前已经获得尺寸大于 4 英寸、热导率大于 1500 W/(m·K)的抛光多晶金刚石膜（图 3a），基本满足低温键合对尺寸、热导率、表面光洁度及面形度等方面的



a 工艺流程



b 金刚石基GaN和SiC基GaN HEMT的红外热成像图

图2 金刚石衬底 GaN 的低温键合技术^[34,36-37]Fig.2 Low-temperature bonding technology for GaN-on-diamond: (a) process of technology; (b) comparison of IR thermography images for GaN-on-SiC HEMT and GaN-on-diamond HEMT^[34,36-37]图3 4英寸抛光多晶金刚石膜^[42]和3英寸金刚石衬底 GaN 晶圆^[44]Fig.3 Macrograph of 4-inch diamond wafer after polishing^[42], with radial uniformity <5%, Ra<2 nm (a), 3-inch GaN-on-diamond wafer (b)^[44]

基本要求。基于此，南京电子器件研究所（NEDI）与北京科技大学合作，成功将 3 英寸的 GaN HEMTs 外延层转移到多晶金刚石衬底上（图 3b）^[44-45]。模拟结果表明，外延层的厚度和界面热阻对结温的大小有很大影响，认为界面热阻每增加 10 (m²·K)/GW，结点温度增加 10 K^[46]。电学性能测试结果显示，衬底转移前后的残余应变未影响二维电子气密度和电学特性；最大电流密度从 968 mA/mm 增加到 1005 mA/mm 时，PAE 从 50.9%降低到 50.5%；相对于传统的 SiC 衬底 GaN 器件，功耗为 10 W/mm 时，1.25 mm 厚的 GaN HEMTs 峰值结温从 241 ℃（SiC 衬底）下降到 191 ℃；但是金刚石与 GaN 的界面热阻相对较大，达到 51 (m²·K)/GW，并认为需要在提高金刚石衬底和键合层的热导率、减少键合层厚度及优化键合工艺等方面进一步优化，进而提升热扩散效果。此外，西安交通大学等人^[47-48]采用 Mo/Au（5 nm/11 nm）作为键合层，在室温下初步将 GaN 和多晶金刚石进行键合。

总体来说，采用低温键合技术制备金刚石衬底 GaN 的团队集中在 BAE Systems 和 NEDI 研究团队，其主要研究成果对比见表 2。低温键合技术具有使用高质量、高导热率的金刚石衬底及键合过程不存在高温和氢等离子体环境的优势，同时也获得了良好的电学特性和散热效果。然而该技术路线的难点在于大尺寸金刚石衬底的高精度加工，尤其是对平行度、变形

量及表面粗糙度的极高要求；去除原始衬底后 GaN 外延层表面的高精度加工等，实现键合层的低热阻和高质量键合强度也是实现器件制备的关键。

表 2 主要研究机构低温键合制备金刚石衬底 GaN 器件对比^[32,36,41,45]

Tab.2 Comparison of low-temperature bonding technology for GaN-on-diamond by main research institutes^[32,36,41,45]

Parameters	BAE Systems	NEDI
Bonding temperature/℃	<150	<180
Size (inch)	3~4	3
Power density/(W·mm ⁻¹)	11	10
PAE/%	51	50.5
Relative SiC/GaN power density	>3.6	>3

2.2 基于 GaN 外延层背面直接生长金刚石

另一种制备金刚石衬底 GaN 器件的方法，与低温键合技术不同之处是：去除衬底及部分 GaN 缓冲层后，在外延层背面首先沉积一层介电层用于保护 GaN 外延层，而后再沉积金刚石衬底（厚度~100 μm）。以美国的 Group 4 Labs（第四实验室团队）^[16,49-55]的研究为主，其工艺流程如图 4a 所示。Group 4 Labs

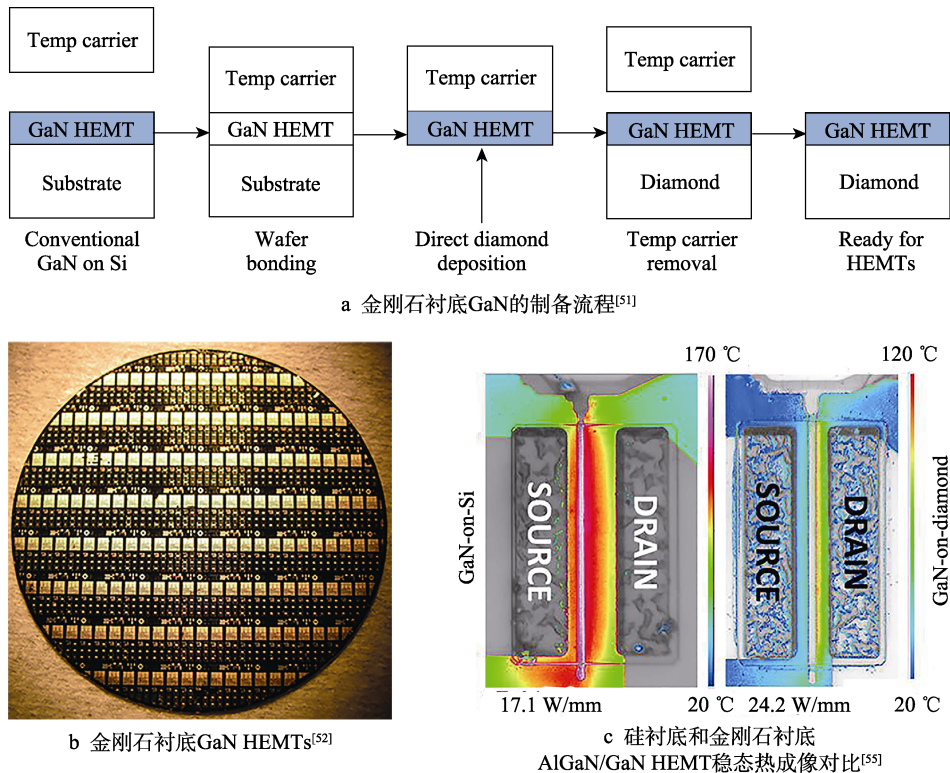


图 4 金刚石衬底 GaN 制备流程^[51]、金刚石衬底 GaN HEMTs^[52]、硅衬底和金刚石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 稳态热成像对比^[55]

Fig.4 Preparation process of GaN-on-diamond wafers (a)^[51], GaN-on-diamond Wafer of HEMT arrays (b)^[52], comparison of steady-state thermoreflectance maps of AlGaIn/GaN-on-Si and AlGaIn/GaN-on-diamond HEMTs (c)^[55]

在 DARPA 资助下首先获得三个重要结果：1) GaN 可以长时间暴露在极端温度 ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 而电学特性未出现可检测的变化^[53]; 2) GaN 薄膜与金刚石之间的热失配不会对器件造成影响^[49]; 3) 金刚石可以沉积在硅基 GaN 上^[12]。采用该方法成功测出金刚石衬底 GaN HEMT 的 I - U 曲线^[54]。

同样的, DARPA 提出从晶体管有源区的产热 $1\text{ }\mu\text{m}$ 范围内进行热传输的近结热传输 (NJTT) 项目。基于该项目, Group 4 Labs 通过直接生长技术, 率先实现了金刚石衬底 GaN 的功率密度是传统 SiC 衬底 GaN 器件的 3.87 倍, 且工作热点温度降低了 40%~50%^[11,54]。但是, 实验初期, 该技术还存在以下方面需要进一步提升: 1) 金刚石热导率 $>1500\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 2) 晶圆直径为 100 mm 的厚度偏差 (TTV) $<10\text{ }\mu\text{m}$; 3) 线性厚度偏差 (直径为 100 mm 的晶圆线性厚度偏差 (LTV)) $<10\text{ }\mu\text{m}$; 4) 直径为 100 mm 的晶圆变形量 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 。Element 6 公司的相关技术人员加入该研究团队, 从而帮助 Group 4 Lab 顺利解决上述问题, 但并未详细报道解决方案。基于上述结构, G. H. Jessen 等人^[30-31]和 Felbinger^[56-57]测量了金刚石衬底 GaN HEMTs 器件的直流特性和小信号特性, 获得最大电流密度为 1072 mA/mm ($U_{\text{GS}}=1\text{ V}$), 最大输出功率密度为 2.79 W/mm , 功率增益效率为 47% (10 GHz , $U_{\text{ds}}=25\text{ V}$)。Kelson D. Chabak^[58]和 D. I. Babić^[59]利用该技术将 $130\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 CVD 金刚石衬底与 GaN 外延层结合, 并对 GaN 芯片完成封装, 功率密度达到 4 W/mm 。Groups 4 Labs 的 D. Francis 和 Tyhach M 等^[11,52,60-63]采用该技术首次展示了 4 英寸的 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石衬底 GaN HEMTs (图 4b), 为目前报道最大直径的金刚石衬底 GaN 晶圆。

在成功制备出金刚石衬底 GaN HEMTs 的基础上, 主要研究方向瞄向器件的稳定性和散热能力, 其中 D. C. Dumka^[16]和 Felix Ejeckam^[64]报道了金刚石衬底 GaN HEMTs 器件在 IDS 和 IGS 饱和电流条件下, 在温度为 290 、 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下分别连续稳定运行 9000 、 3000 h , 实现了 40 V 偏置电压下最大电流密度超过 1 A/mm , 通道温度相对 SiC 衬底 GaN HEMTs 器件降低了 25%。D. C. Dumka^[66-67]报道了金刚石衬底 GaN HEMTs 在 10 GHz 条件下, 射频功率密度高达 7.9 W/mm , PAE 超过 46%。美国空军研究实验室 (AFRL)^[16,50,65]针对该团队制备的金刚石衬底 GaN 与硅衬底 GaN 的各项电学性能进行对比 (表 3), 认为金刚石衬底 GaN 相较于传统衬底 GaN 的 HEMT 器件, 其稳定性和可靠性更高。而 Marko J. Tadjert^[55]采用稳态热反射成像法对比硅衬底与金刚石衬底的 GaN HEMTs 的结温, 结果显示, 在更高功率密度条件下, 金刚石衬底 GaN HEMTs 可以得到更低的结温和平均温度 (图 4c)。

表 3 AFRL 对比金刚石衬底 GaN HEMTs 和 Si 衬底 GaN HEMTs 上直流和射频特性的平均值 (和标准偏差)^[16,50,65]

Tab.3 Comparison of DC and RF characteristics GaN-on-Si HEMT and GaN-on-diamond HEM^[16,50,65]

Parameters	GaN-on-Diamond	GaN-on-Si
$R_c/(\Omega\cdot\text{mm})$	0.36(0.11)	0.49(0.09)
$R_{sh}/(\Omega\cdot\text{sq}^{-1})$	441(39.4)	429(17.8)
Gm Peak/(mS·mm ⁻¹)	238(18.6)	214(5.3)
U_{th}/V	-3.58(0.04)	-3.81(0.05)
$J_{max}/(\text{mA}\cdot\text{mm}^{-1})$	813(56.3)	697(39.6)
$J_{dss}/(\text{mA}\cdot\text{mm}^{-1})$	707(56.6)	617(57.3)
$J_{gl}/(\mu\text{A}\cdot\text{mm}^{-1})$	-5.66(5.49)	-0.56(0.84)
U_{bk}/V	25.75(10.64)	27.94(5.02)
Glag@5 V/%	7.9(N/A)	7.1(N/A)
Dlag@5 V/%	10.0(N/A)	10.6(N/A)

尽管 GaN 表面生长金刚石的稳定性和散热能力等问题已经得到初步解决, 但金刚石与 GaN 之间的界面热阻如果不能得到有效降低, 则金刚石衬底 GaN 器件的散热性能将不能够得到有效发挥, 因此后续的学者更多关注于优化 GaN/金刚石的界面热阻 (TBR) (表 4)。James W. Pomeroy^[16,68-69]首先采用 Raman 热成像技术和时域热反射技术 (TDTR), 测量了金刚石与 GaN 之间的界面热阻, 并认为介电层厚度从 90 nm 减薄到 50 nm 后, 界面热阻从 $41\text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$ 降低到 $17\text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$, 与传统的 SiC 基 GaN 相比, 金刚石衬底 GaN HEMTs 的功耗提升 25%, 沟道峰值温度降低 40%。Huarui Sun 等人^[70]则认为界面热阻取决于形核层质量、介电层厚度等, 并认为更薄的介电层、最优的生长和成核技术, 将会继续降低金刚石衬底与

表 4 文献中 GaN 外延层背面沉积金刚石的界面热阻总结

Tab.4 Summary of GaN-on-diamond thermal boundary resistance (TBR) in the literature

Ref.	Interlayer	Method	TBR/(m ² ·K·GW ⁻¹)
[16]	~50 nm dielectric	Raman	18
[68]	~25 nm dielectric	Raman	27
[69]	~50 nm dielectric	TDTR	17
[70]	~28 nm SiN _x	TTR	12
[71]	~30 nm SiN _x	TDTR	29
[73]	~5 nm SiN _x	TDTR	6.5
[74]	~5 nm SiN _x	TDTR	9.5
[75]	~100 nm SiN _x	TDTR	38

GaN 之间的界面热阻。而 Jungwan Cho^[71]采用 30 nm 厚的 SiN 作为介电层, 获得了金刚石衬底与 GaN 之间的界面热阻为 $29 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$ 。Dong Liu^[72]采用粒径为 30 nm 和 100 nm 的纳米金刚石粉进行引晶, 制备金刚石衬底 GaN 晶片, 认为采用更小粒径的纳米金刚石粉进行引晶, GaN/金刚石界面无微观缺陷, 且结构稳定, 界面热阻更均匀。Yan Zhou 等人^[73]对比了 5 nm 厚的 SiN 和 AlN 薄膜作为介电层对界面热阻的影响, 并采用 5 nm 厚的 SiN 作为介电层, 获得了已报道最低的界面热阻 $\sim 6.5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$ (图 5)。Yates^[74]分别研究了无介电层、5 nm 厚的 AlN、5 nm 厚的 SiN

介电层对界面热阻和界面结构的影响, 认为采用 5 nm 厚的 SiN 介电层获得的界面热阻 $<10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$; 同时电子能量损失谱显示, 在 SiN 和金刚石界面处形成了 Si—C—N 层, 该层的存在可以提高界面结合力。Xin Jia^[75]采用瞬态热反射技术测量采用 100 nm 厚的 AlN、SiN 作为介电层的界面热阻, 认为介电层表面电荷状态对金刚石形核和界面结构产生了较大影响。总之, 学者认为采用更小粒径的纳米金刚石粉预处理介电层表面、更薄的介电层、增强 GaN/金刚石的界面结合强度、降低界面处缺陷, 可以使界面热阻更均匀、更低。

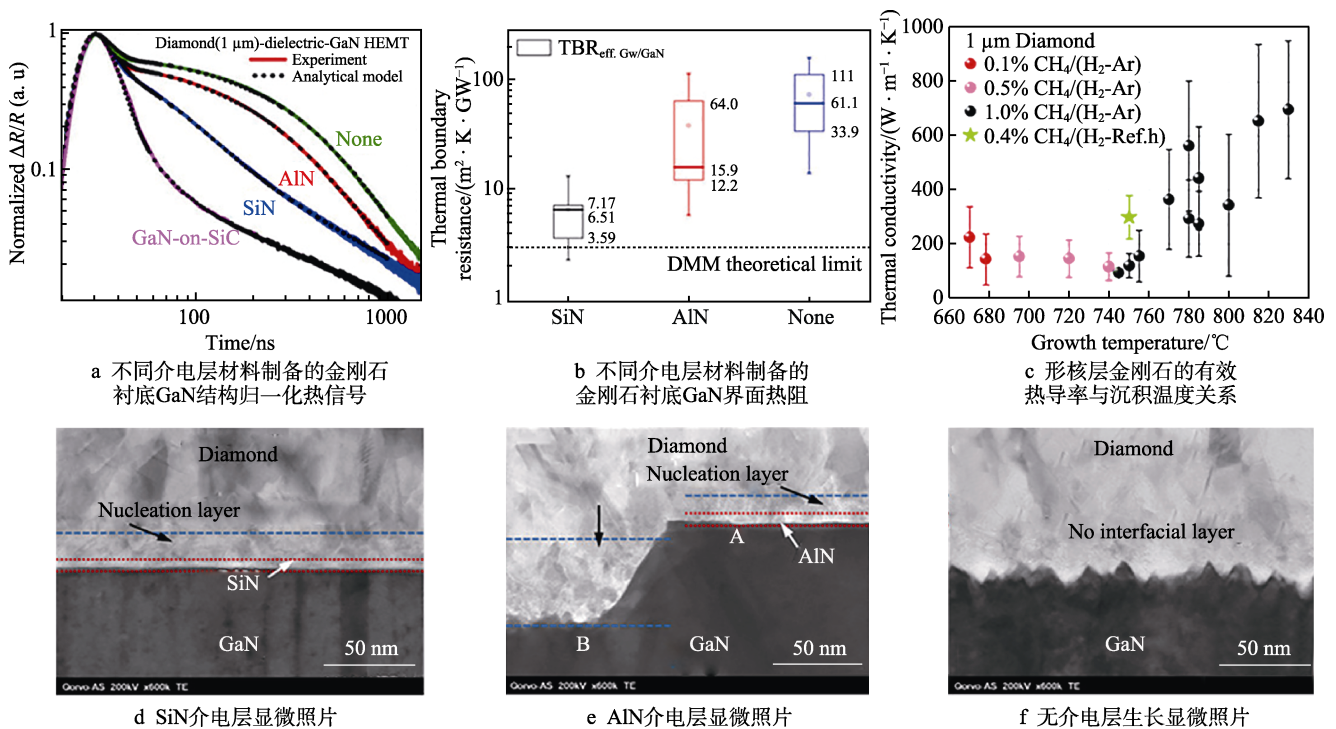


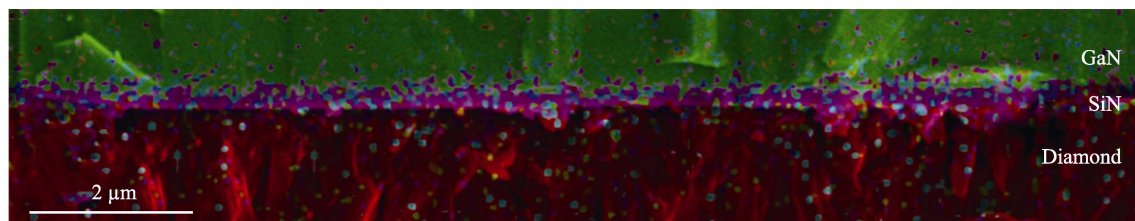
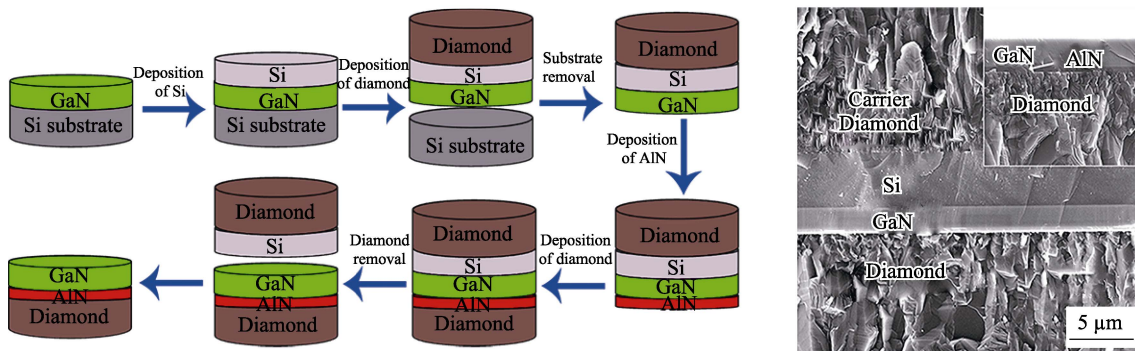
图 5 金刚石与 GaN 的透射电镜界面形貌、金刚石与 GaN 的界面热阻、形核层金刚石的有效热导率^[73]

Fig.5 Transmission electron microscopy micrographs of cross sections of GaN-on-diamond interfaces, effective thermal boundary resistance between diamond and GaN, and effective thermal conductivity of the first micrometer of diamond^[73]

北京科技大学作为国内最早开展 GaN 外延层背面直接生长技术的研究单位, 首先研究了 GaN 外延层在微波氢等离子环境中的分解机制^[76], 认为在 GaN 外延层表面添加过渡层及等离子体气氛中添加氮气可以抑制 GaN 外延层的分解; 同时研究了过渡层厚度对 GaN 上沉积金刚石膜结合力的影响^[76-77]; 采用两步法成功在 GaN 表面沉积金刚石膜。随后在 GaN 外延层转移、金刚石衬底 GaN 晶片制备等相关领域申请了相关专利^[78-81]; 在此之后, 研究了 SiN、AlN 作为介电层对制备金刚石衬底 GaN 晶片界面热阻和金刚石形核密度的影响, 通过对介电层选取及预处理可以有效提高金刚石的形核密度和良好的界面结构, 进一步降低金刚石与 GaN 之间的界面热阻, 提升其热扩散潜力

(图 6), 且初步获得的界面热阻为 $\sim 38 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$ ^[75,82]。但是, 在制备金刚石衬底 GaN 结构过程中仍然存在 GaN 外延层转移困难, 高温沉积过程中热失配过大导致的晶圆变形大、界面热阻大等问题。

需要注意的是, 虽然直接沉积法在散热能力方面体现出极为突出的优势, 但是研究表明, 该技术由于涉及到高温沉积, 对热失配控制是重大挑战; GaN 外延层临时转移后沉积金刚石膜过程中也存在损伤风险; 金刚石形核层较低的热导率不利于其热传输。然而相较于键合技术获得的金刚石基 GaN 的最低 TBR ($35 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$), 该技术可以使界面热阻降到更低 ($\sim 6.5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/GW}$), 这也说明该技术在制备金刚石基 GaN 方面也具有极大潜力。

a 金刚石衬底GaN的界面电子能谱图^[75]

b 双面金刚石制备金刚石衬底GaN晶圆流程及界面形貌

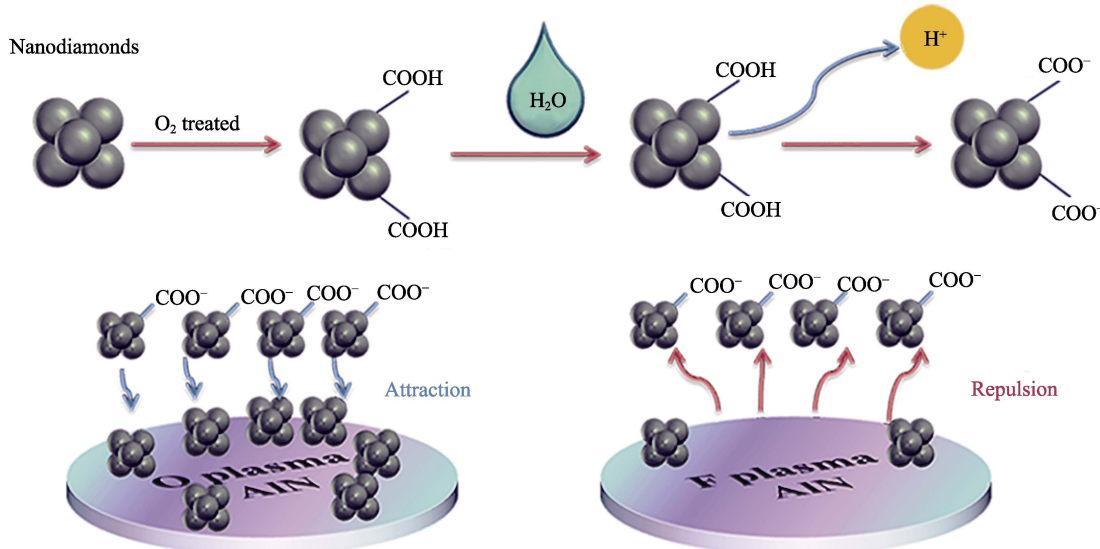
c AlN介电层对纳米金刚石粉的吸引和排斥^[82]

图 6 北京科技大学制备的金刚石衬底 GaN 结果

Fig.6 Result of GaN-on-diamond prepared by USTB: (a) electron energy spectrum of GaN/diamond interface^[75]; (b) process flow of GaN-on-diamond wafers and cross-sectional morphology of GaN/diamond; (c) attraction and repulsion of nano-diamond on the AlN surface^[82]

3 其他散热技术途径

除主流的低温键合技术和 GaN 外延层背面直接沉积金刚石制备金刚石衬底 GaN 晶片外,另有单晶金刚石衬底外延沉积 GaN 和高导热金刚石钝化层散热技术,用于解决 GaN 基功率器件的散热问题。

3.1 单晶金刚石衬底外延 GaN

随着单晶金刚石制备技术不断发展和完善,单晶金刚石衬底直接外延 GaN 晶片也被用于改善散热需求,其中具有代表性的研究机构有瑞士的 EPFL^[83]、Element 6 和日本的 NTT 团队^[84-86]。瑞士 EPFL 的

Dussaigne^[83]在(111)单晶金刚石衬底上采用 MBE 技术外延沉积得到了粗糙度为 1.3 nm (2 μm×2 μm) 的 GaN 外延层,随后在此基础上又沉积出粗糙度为 0.6 nm 的 AlGaIn/GaN 异质结材料,二维电子气迁移率达到 750 cm²/(V·s),面密度为 1.4×10¹³ cm⁻²。同年,德国 ULM 大学的 Alomari 等人采用 MBE 技术^[84],在 3 mm×3 mm 的单晶金刚石(111)衬底上外延得到 AlGaIn/GaN HEMTs,异质结二维电子气迁移率为 731 cm²/(V·s),面密度为 1.3×10¹³ cm⁻²,基于此材料制备的栅长为 0.2 μm 的 HEMTs,电流密度为 0.73 A/mm,跨导为 137.5 mS/mm,电流增益频率为 21 GHz,最高振荡频率为 42 GHz。

2011 年日本 NTT 公司的 Hirama 等人^[85]同样在单晶金刚石衬底上研制出 GaN 基 HEMTs, 其结构如图 7 所示。他们采用金属有机物气相外延 (MOCVD) 技术制备 AlN/GaN/GaN 异质结材料, 异质结二维电子气迁移率为 $730 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 面密度为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。该结构的最大输出电流密度为 220 mA/mm , 电流增益截止频率和最高振荡频率分别为 3 GHz 和 7 GHz 。对比传统的 SiC 衬底, 增加同样梯度的功率密度, 金刚石衬底的 HEMTs 温度增加幅度更小。2012 年又获得了具有功率输出的 GaN 基 HEMTs^[86], 1 GHz 时的输出功率密度为 2.13 W/mm , 增益为 28 dB , 功率附加效率为 46% , 电流增益截止频率和最高振荡频率分别为 5 GHz 和 18 GHz , 其频率和功率特性曲线如图 8 所示。R. F. Webster 等人^[87]在多晶金刚石衬底表面成功沉积位错密度为 $\sim 7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的单晶 GaN 外延层, 但薄膜破损严重, 远未能达到器件级别。显然单晶金刚石衬底外延 GaN 实现了 AlN/GaN/GaN HEMTs 的异质外延和器件制备, 但是难度依然极大, GaN 和金刚石的晶格常数和热膨胀系数差异巨大, 也给制备带来巨大困难, 此外单晶尺寸和成本进一步限制其应用。

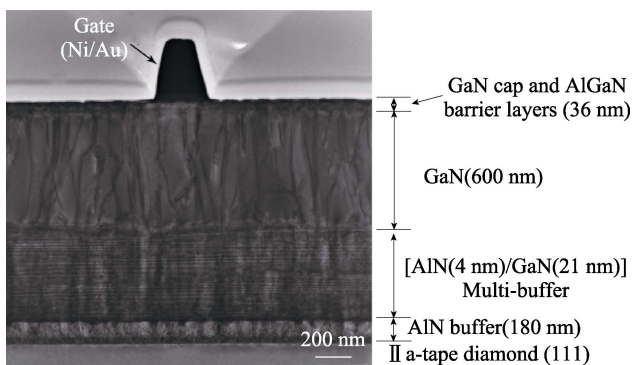


图 7 单晶金刚石(111)衬底外延生长 AlGaIn/GaN HEMT 的断面 TEM 图

Fig.7 Cross-sectional bright-field TEM image of the AlGaIn/GaN HEMT structure epitaxially grown on a diamond (111) substrate

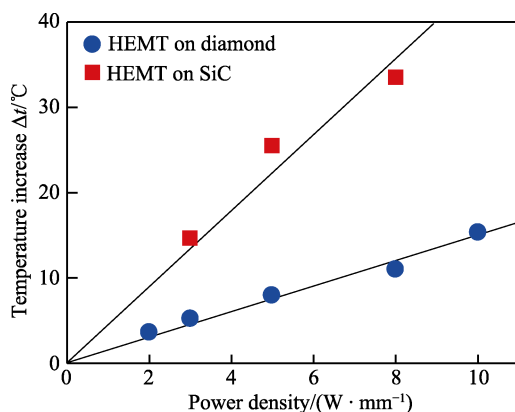


图 8 AlGaIn/GaN HEMT 在金刚石和 SiC 衬底上的温升对比^[86]

Fig.8 Comparison of device temperature rise for AlGaIn/GaN HEMTs on diamond and SiC substrates^[86]

3.2 高导热金刚石钝化层散热技术

德国的 M. Seelman-Eggebert^[88]从理论和实验两个方面探讨了高热导率金刚石钝化层用于 GaN-FETs 上热扩散, 详细讨论了 GaN-FETs 工艺条件与低温沉积金刚石的工艺兼容性, 并采用选择性低温 (沉积温度 400°C) 生长金刚石膜的方法在 GaN-FETs 的栅极上沉积 $0.7 \mu\text{m}$ 厚的金刚石膜, 对比沉积金刚石膜前后晶体管的输出特性和传输特性, 其变化不明显, 认为这是第一次可以在 III—V 族半导体晶体管器件上直接沉积金刚石用于热扩散, 但具体的金刚石冷却效果并未进行验证。

Alomari 等人^[89]在 InAlN/GaN HEMTs 上直接生长纳米金刚石薄膜, 结果表明, InAlN/GaN HEMTs 与纳米金刚石薄膜具有良好的相容性, 并且获得器件的电流增益截止频率和最高振荡频率分别为 4.2 GHz 和 5 GHz 。Meyer^[90]研究了纳米金刚石帽层技术对 GaN HEMTs 性能的影响, 并且首次获得了大信号功率特性, 在 4 GHz 时, 输出功率密度为 5.8 W/mm , 增益 10.1 dB , 功率附加效率为 32.6% 。Tadjer 等人^[91-92]研究了纳米金刚石帽层对 GaN HEMTs 的影响, 发现纳米金刚石对器件的钝化效果优于传统的氮化硅钝化层, 器件工作温度相对降低了 20% 。除实验尝试外, 另有 Wang 等人^[93]采用有限元模型对纳米金刚石膜包覆 GaN 外延层与传统的 GaN HEMTs 结构热扩散性能进行对比 (如图 9 所示), 并认为纳米金刚石包

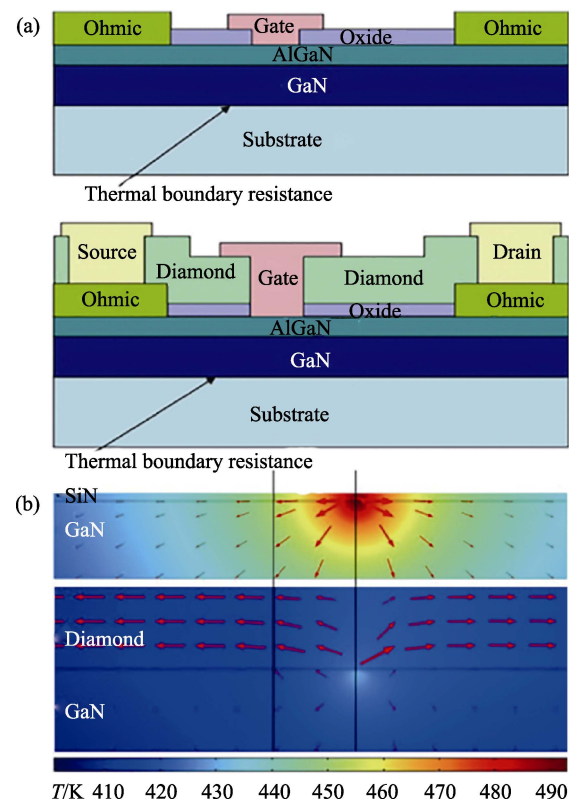


图 9 两种结构的 GaN 基 HEMT 模型及散热能力对比^[93]

Fig.9 Comparison of two GaN HEMT structures and heat dissipation capabilities^[93]

覆可以显著提高器件的性能,其横向热导率与初始几微米厚密切相关,最重要的是金刚石层与热源接近,使得这种方法比热其他的热控方法更有利,特别是脉冲器件。尽管采用该技术具有巨大潜力,但是在制作 HEMTs 的过程中,沉积纳米金刚石薄膜往往受到器件工艺条件的限制,沉积温度一般较低,纳米金刚石膜的热导率并不高,这些都限制了该技术的应用和推广。

4 结论

GaN 基功率器件的高频高功率性能优势由于有源区结热问题而未能充分发挥,传统衬底及封装散热技术难以解决目前的热瓶颈难题。因此,具有高热导率的金刚石衬底能够满足 GaN 基功率器件的散热需求。研究表明,与传统的 SiC 衬底 GaN 基功率器件相比,金刚石衬底 GaN 器件具有更高的散热能力,并且有望实现 GaN 基功率器件的小型化和大功率化,从而促进在射频功率器件和微波功率器件相关领域的广泛应用。

然而金刚石衬底与 GaN 外延层的结合技术并未成熟,还存在许多难题亟需解决,距离产业化尚有距离。笔者认为金刚石衬底与 GaN 外延层结合技术的研究将趋于以下几个方面:1) 针对低温键合技术主要以降低金刚石加工成本,实现键合层的低热阻和高质量键合强度为目标;2) 针对 GaN 外延层背面沉积技术,以实现 GaN 外延层的高效率转移,提高金刚石形核层热导率,提高 GaN 外延层转移后电学特性,实现 GaN 外延层沉积金刚石衬底的大面积为研究方向;3) 其他技术手段主要存在单晶金刚石衬底尺寸小、纳米金刚石钝化层沉积工艺与器件加工的兼容性等问题,这都将极大限制这些技术手段的发展和应用。因此,解决上述问题,将为 GaN 功率器件实现高频、高功率应用,提供广阔前景,并带来更大效益。

参考文献:

- [1] ISHIZAKI T, YANASE M, KUNO A, et al. Thermal simulation of joints with high thermal conductivities for power electronic devices[J]. *Microelectronics reliability*, 2015, 55(7): 1060-1066.
- [2] SCHWITTER B K, PARKER A E, MAHON S J, et al. Impact of bias and device structure on gate junction temperature in AlGaIn/GaN-on-Si HEMTs[J]. *IEEE transactions on electron devices*, 2014, 61(5): 1327-1334.
- [3] ZHAO Xiao-ning, LI Xiu-qing. Overview of the development of wide band-gap semiconductor technologies for military and aeronautical applications in advanced countries[J]. *Semiconductor technology*, 2009, 34(7): 621-625.
- [4] KANAMURA M, OHKI T, KIKKAWA T, et al. Recent progress in GaN HEMT for high-frequency and high-power applications[J]. *IEEE*, 2012, 244: 156-158.
- [5] ASIFKHAN M, BHATTARAI A, KUZNIA J N, et al. High electron mobility transistor based on a GaN/Al_xGa_{1-x}N heterojunction[J]. *Applied physics letters*, 1993, 63(9): 1214-1215.
- [6] WANG X, HU G, MA Z, et al. AlGaIn/AlN/GaN/SiC HEMT structure with high mobility GaN thin layer as channel grown by MOCVD[J]. *Journal of crystal growth*, 2007, 298: 835-839.
- [7] WANG X L, CHEN T S, XIAO H L, et al. An internally-matched GaN HEMTs device with 45.2 W at 8 GHz for X-band application[J]. *Solid-state electronics*, 2009, 53(3): 332-335.
- [8] WU Y F, MOORE M, SAXLER A, et al. 40 W/mm double field-plated GaN HEMTs[J]. *IEEE*, 2006, 238: 151-152.
- [9] GUO Huai-xin, KONG Yue-chan, HAN Ping, et al. Progress of chip-level thermal management for GaN power devices[J]. *Research & progress of SSE*, 2018, 38(5): 316-323.
- [10] MALCOLM K D. Characterization of the thermal properties of chemical vapor deposition grown diamond films for electronics cooling[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2016: 1-4.
- [11] TYHACH M, ALTMAN D, BEMNSTEIN S, et al. Next generation gallium nitride HEMTs enabled by diamond substrates[J]. *IEEE*, 2014, 245: 1-4.
- [12] POMEROY J, BEMNARDONI M, SARUA A, et al. Achieving the best thermal performance for GaN-on-diamond[J]. *IEEE*, 2013, 243: 1-4.
- [13] CHATTOPADHYAY M K, TOKEKAR S. Temperature and polarization dependent polynomial based non-linear analytical model for gate capacitance of Al_mGa_{1-m}N/GaN MODFET[J]. *Solid state electronics*, 2006, 50(2): 220-227.
- [14] HODGES C, POMEROY J, KUBALL M. Probing temperature gradients within the GaN buffer layer of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with Raman thermography[J]. *Journal of applied physics*, 2014, 115(6): 064504.
- [15] TYHACH M, ALTMAN D, BEMSTEIN S. GaN on diamond technology: Impact and challenges of next generation GaN[J]. *ASME*, 2015, 46: 1-4.
- [16] DUMKA D C, CHOU T M, JIMENEZ J L, et al. Electrical and thermal performance of AlGaIn/GaN HEMTs on diamond substrate for RF applications[J]. *IEEE*, 2013, 243: 104.
- [17] KUZMIK J, JAVORKA R, ALAM A, et al. Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using DC characterization method[J]. *IEEE transactions on electron devices*, 2002, 49(8): 1496-1498.
- [18] SINGHAL S, LI T, CHAUDHARI A, et al. Reliability of large periphery GaN-on-Si HFETs[J]. *Microelectronics reliability*, 2006, 46(8): 1247-1253.
- [19] SCHWITTER B K, PARKER A E, MAHON S J, et al.

- Impact of bias and device structure on gate junction temperature in AlGaIn/GaN-on-Si HEMTs[J]. IEEE transactions on electron devices, 2014, 61(5): 1327-1334.
- [20] DARWISH A M, BAYBA A J, HUNG H A. Thermal resistance calculation of AlGaIn-GaN devices[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2004, 52(11): 2611-2620.
- [21] CHEN X, DONMEZER F N, KUMAR S, et al. A numerical study on comparing the active and passive cooling of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE transactions on electron devices, 2014, 61(12): 4056-4061.
- [22] ALBRECHT J D, RUDEN P P, BINARI S C, et al. AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor model including thermal effects[J]. IEEE transactions on electron devices, 2000, 47(11): 2031-2036.
- [23] HODGES C, POMEROY J, KUBALLI M. Probing temperature gradients within the GaN buffer layer of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with Raman thermography[J]. Journal of applied physics, 2014, 115(6): 064504.
- [24] MISHRA U K, PARIKH P, WU Y F. AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6): 1022-1031.
- [25] BHATNAGAR M, BALIGA B J. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices[J]. IEEE transactions on electron devices, 1993, 40(3): 645-655.
- [26] LESZCZYNSKI M, TEISSEYRE H, SUSKI T, et al. Lattice parameters of gallium nitride[J]. Applied physics letters, 1996, 69(1): 73-75.
- [27] ZHU R H, MIAO J Y, LIU J L, et al. High temperature thermal conductivity of free-standing diamond films prepared by DC arc plasma jet CVD[J]. Diamond and related materials, 2014, 50: 55-59.
- [28] 闫雄伯, 魏俊俊, 陈良贤, 等. 基于 X 射线光电子能谱定量分析金刚石自支撑膜高温石墨化[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 139-146.
- YAN Xiong-bo, WEI Jun-jun, CHEN Liang-xian, et al. Quantitative analysis on graphitization of CVD free-standing diamond films at high temperatures based on X-ray photoelectron spectroscopy[J]. Surface technology, 2019, 48(5): 139-146.
- [29] 熊礼威, 彭环洋, 汪建华, 等. 甲烷体积分数对纳米金刚石薄膜形貌的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 72-77.
- XIONG Li-wei, PENG Huan-yang, WANG Jian-hua, et al. Effect of methane concentration on the morphology of nanocrystalline diamond films[J]. Surface technology, 2016, 45(3): 72-77.
- [30] JESSEN G H, GILLESPIE J K, VIA G D, et al. AlGaIn/GaN HEMT on diamond technology demonstration[J]. IEEE, 2006, 238: 271-274.
- [31] FRANCIS D, WASSERBAUER J, FAILI F, et al. GaN-HEMT epilayers on diamond substrates: Recent progress [J]. CS mantech, 2007, 23: 133-136.
- [32] CHU K K, CHAO P C, DIAZ J A, et al. Low temperature substrate bonding technology for high power GaN-on-diamond HEMTs[J]. Lester eastman conference on high performance devices, 2014, 46: 1-4.
- [33] CHAO P C, CHU K, CREAMER C, et al. Low-temperature bonded GaN-on-diamond HEMTs with 11 W/mm output power at 10 GHz[J]. IEEE transactions on electron devices, 2015, 62(11): 3658-3664.
- [34] CHAO P C, CHU K, CREAMER C. A new high power GaN-on-diamond HEMT with low-temperature bonded substrate technology[J]. CS mantech, 2013, 34: 179-182.
- [35] CHU K, CHAO P C, CREAMER C. Method for gallium nitride on diamond semiconductor wafer production: U. S., 14/800, 387[P]. 2019-02-07.
- [36] CHAO P C, CHU K, DIAZ J, et al. GaN-on-diamond HEMTs with 11 W/mm output power at 10 GHz[J]. MRS advances, 2016, 1(2): 147-155.
- [37] CHU K K, CHAO P C, DIAZ J A, et al. High-performance GaN-on-diamond HEMTs fabricated by low-temperature device transfer process[J]. IEEE, 2015, 246: 114.
- [38] MU F, HE R, SUGA T. Room temperature GaN-diamond bonding for high-power GaN-on-diamond devices[J]. Scripta materialia, 2018, 150: 148-151.
- [39] MU F, SUGA T. Room temperature GaN bonding by surface activated bonding methods[J]. IEEE, 2018, 249: 214.
- [40] LI Cheng-ming, WANG Li-mei, CHEN Liang-xian, et al. Free-standing diamond films deposited by DC arc plasma jet on graphite substrates with a destroyable Ti interlayer [J]. Diamond and related materials, 2009, 18(11): 1348-1352.
- [41] AN Kang, LI Cheng-ming, YAN Xion-gbo, et al. Fracture behavior of diamond films deposited by DC arc plasma jet CVD[J]. Ceramics international, 2018, 44(11): 13402-13408.
- [42] LI Cheng-ming, ZHU Rui-hua, LIU Jin-long, et al. Effect of arc characteristics on the properties of large size diamond wafer prepared by DC arc plasma jet CVD[J]. Diamond and related materials, 2013, 39: 47-52.
- [43] 刘金龙, 安康, 陈良贤, 等. CVD 金刚石自支撑膜的研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 15-24.
- LIU Jin-Long, AN Kang, CHEN Liang-Xian, et al. Research progress of freestanding CVD diamond films[J]. Surface technology, 2018, 47(4): 15-24.
- [44] LIU T, KONG Y, WU L, et al. 3-inch GaN-on-diamond HEMTs with device-first transfer technology[J]. IEEE electron device letters, 2017, 38(10): 1417-1420.
- [45] 陈堂胜, 孔月婵, 吴立枢. 金刚石衬底 GaNHEMT 研究进展[J]. 固体电子学研究与进展, 2016(5): 360-364.
- CHEN Tang-sheng, KONG Yue-chan, WU Li-shu. The research progress of GaN-on-diamond HEMTs[J]. Research & progress of SSE, 2016, 36(5): 360-364.
- [46] GUO H, KONG Y, CHEN T. Thermal simulation of high power GaN-on-diamond substrates for HEMT applications[J]. Diamond and related materials, 2017, 73: 260-266.

- [47] ZHAI W, ZHANG J, CHEN X, et al. FEM thermal and stress analysis of bonded GaN-on-diamond substrate[J]. AIP advances, 2017, 7(9): 095105.
- [48] WANG K, RUAN K, HU W, et al. Room temperature bonding of GaN on diamond wafers by using Mo/Au nano-layer for high-power semiconductor devices[J]. Scripta materialia, 2020, 174: 87-90.
- [49] BLEVINS J D, VIA G D, SUTHERLIN K, et al. Recent progress in GaN-on-diamond device technology[J]. CS mantech, 2014, 234: 105-108.
- [50] VIA G D, FELBINGER J G, BLEVINS J, et al. Wafer-scale GaN HEMT performance enhancement by diamond substrate integration[J]. Physica status solidi, 2014, 11(3-4): 871-874.
- [51] EJECKAM F, MITCHELL T, KONG K, et al. Ultra-cool GaN on diamond power amplifiers for Satcom[J]. Microwave journal, 2018, 61(6): 36-40.
- [52] MARKO J T, TRAVIS J. A fundamental advantage in technology: The power of synthetic diamond[EB/OL]. (2017-04-28) [2020-02-27]. <https://akashsystems.com/technology/>
- [53] EJECKAM F, FRANCIS D, FAILI F, et al. GaN-on-diamond semiconductors[J]. Applied physics letters, 2012, 504: 498.
- [54] EJECKAM F, FRANCIS D, FAILI F, et al. GaN-on-diamond: A brief history[J]. IEEE, 2014, 244: 1-5.
- [55] TADJER M J, ANDERSON T J, ANCONA M G, et al. GaN-on-diamond HEMT technology with TAVG=176 °C at PDC, max=56 W/mm measured by transient thermoreflectance imaging[J]. IEEE electron device letters, 2019, 40(6): 881-884.
- [56] FELBINGER J G, CHANDRA M V S, SUN Y, et al. Comparison of GaN HEMTs on diamond and SiC substrates [J]. IEEE electron device letters, 2007, 28(11): 948-950.
- [57] FELBINGER J, CHANDRA M V S, SUN Y, et al. Fabrication & characterization of GaN-on-diamond HEMTs[J]. Presented at wocsemmad, 2007, 87: 654.
- [58] CHABAK K D, GILLESPIE J K, MILLER V, et al. Full-wafer characterization of AlGaIn/GaN HEMTs on free-standing CVD diamond substrates[J]. IEEE electron device letters, 2009, 31(2): 99-101.
- [59] BABIC D I, QDIDUC K, PYENIGALL A, et al. GaN-on-diamond field-effect transistors: From wafers to amplifier modules[J]. IEEE, 2010, 242: 6-66.
- [60] DIDUCK Q, FELBINGER J, EASTMAN L F, et al. Frequency performance enhancement of AlGaIn/GaN HEMTs on diamond[J]. Electronics letters, 2009, 45(14): 758-759.
- [61] FRANCIS D, FAILI F, BABIC D, et al. Formation and characterization of 4-inch GaN-on-diamond substrates[J]. Diamond and related materials, 2010, 19(2-3): 229-233.
- [62] CHO J, LI Z, BOZORG-GRAYELI E, et al. Improved thermal interfaces of GaN-diamond composite substrates for HEMT applications[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2012, 3(1): 79-85.
- [63] TYHACH M, BEMSTEIN S, SALEDAS P, et al. Advancements in gan-on-diamond hemt and MMIC fabrication[J]. Meeting abstracts of the Electrochemical Society, 2011(31): 2083-2083.
- [64] EJECKAM F, BABIC D, FAILI F, et al. 3000+ hours continuous operation of GaN-on-diamond HEMTs at 350 °C channel temperature[J]. IEEE, 2014, 244: 242-246.
- [65] TADJER M J, ANDERSON T J, GALLAGHER J C, et al. Thermal performance improvement of GaN-on-diamond high electron mobility transistors[J]. IEEE, 2018, 249: 120.
- [66] DUMKA D C, CHOU T M, FAILI F, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on diamond substrate with over 7 W/mm output power density at 10 GHz[J]. Electronics letters, 2013, 49(20): 1298-1299.
- [67] ALVAREZ B, FRANCIS D, FAILI F, et al. Elimination of leakage in GaN-on-diamond[J]. IEEE, 2016, 247: 124.
- [68] POMEROY J W, BEMARDONI M, DUMKA D C, et al. Low thermal resistance GaN-on-diamond transistors characterized by three-dimensional Raman thermography mapping[J]. Applied physics letters, 2014, 104(8): 083513.
- [69] POMEROY J W, SIMON R B, SUN H, et al. Contactless thermal boundary resistance measurement of GaN-on-diamond wafers[J]. IEEE electron device letters, 2014, 35(10): 1007-1009.
- [70] SUN H, SIMON R B, POMEROY J W, et al. Reducing GaN-on-diamond interfacial thermal resistance for high power transistor applications[J]. Applied physics letters, 2015, 106(11): 111906.
- [71] CHO J, WON Y, FRANCIS D, et al. Thermal interface resistance measurements for GaN-on-diamond composite substrates[J]. IEEE, 2014, 244: 114.
- [72] LIU D, FRANCIS D, FAILI F, et al. Impact of diamond seeding on the microstructural properties and thermal stability of GaN-on-diamond wafers for high-power electronic devices[J]. Scripta materialia, 2017, 128: 57-60.
- [73] ZHOU Y, ANAYA J, POMEROY J, et al. Barrier layer optimization for enhanced GaN-on-diamond device cooling[J]. ACS applied materials & interfaces, 2017, 9(39): 34416-34422.
- [74] LUKE Y, JONATHAN A, XING G, et al. Low thermal boundary resistance interfaces for GaN-on-diamond devices[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(28): 24302-24309.
- [75] JIA X, WEI J, KONG Y, et al. The influence of dielectric layer on the thermal boundary resistance of GaN-on-diamond substrate[J]. Surface and interface analysis, 2019, 51(7): 783-790.
- [76] 田寒梅, 刘金龙, 陈良贤, 等. 微波等离子体下 GaN 的分解与纳米金刚石膜的沉积[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(1): 7-12.
- TIAN Han-mei, LIU Jin-long, CHEN Liang-xian, et al. Decomposition of GaN and direct deposition of nano-diamond film in microwave plasma[J]. Journal of synthetic crystals, 2015, 44(1): 7-12.

- [77] LIU Jin-long, TIAN Han-mei, CHEN Liang-xian, et al. Preparation of nano-diamond films on GaN with a Si buffer layer[J]. *New carbon materials*, 2016, 31(5): 518-524.
- [78] 魏俊俊, 贾鑫, 李成明. 一种采用双金刚石层实现 GaN 原始衬底转移的方法及应用: 中国, CN109637965A[P]. 2019-04-16.
- WEI Jun-jun, JIA Xin, LI Cheng-ming. The method and application for realizing original substrate of GaN transfer using double diamond layers: China, CN109637965A[P]. 2019-04-16.
- [79] 刘金龙, 李成明, 陈良贤. 一种 GaN/金刚石膜复合片的制备方法: 中国, CN104328390A[P]. 2015-02-04.
- LIU Jin-long, LI Cheng-ming, CHEN Liang-xian. The method for preparing GaN/diamond film composite material: China, CN104328390A[P]. 2015-02-04.
- [80] 李成明, 贾鑫, 魏俊俊. 一种基于非自支撑 GaN 对粘制备金刚石基 GaN 的方法: 中国, CN107204282B[P]. 2019-07-09.
- LI Cheng-ming, JIA Xin, WEI Jun-jun. Method for preparing GaN-on-diamond based on bonding of non-free-standing GaN: China, CN107204282B[P]. 2019-07-09.
- [81] 李成明, 贾鑫, 魏俊俊. 一种制备金刚石基衬底氮化镓晶体管的方法: 中国, CN109256336A[P]. 2019-01-22.
- LI Cheng-ming, JIA Xin, WEI Jun-jun. Method for preparing transistor GaN-on-diamond: China, CN109256336A[P]. 2019-01-22.
- [82] JIA Xin, WEI Jun-jun, HUANG Ya-bo, et al. Enhancement of diamond seeding on aluminum nitride dielectric by electrostatic adsorption for GaN-on-diamond preparation [J]. *Journal of materials research*, 2020, 403: 18.
- [83] DUSSAIGNE A, GONSCHOREK M, MALINVEMI M, et al. High-mobility AlGaIn/GaN two-dimensional electron Gas heterostructure grown on (111) single crystal diamond substrate[J]. *Japanese journal of applied physics*, 2010, 49(6): 1212-1219.
- [84] ALOMARI M, DUSSAIGNE A, MARTIN D, et al. AlGaIn/GaN HEMT on (111) single crystalline diamond [J]. *Electronics letters*, 2010, 46(4): 299.
- [85] HIRAMA K, TANIYASU Y, KASU M. AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors with low thermal resistance grown on single-crystal diamond (111) substrates by metalorganic vapor-phase epitaxy[J]. *Applied physics letters*, 2011, 98(16): 1214.
- [86] HIRAMA K, KASU M, TANIYASU Y. RF high-power operation of AlGaIn/GaN HEMTs epitaxially grown on diamond[J]. *IEEE electron device letters*, 2012, 33(4): 513-515.
- [87] WEBSTER R F, CHEMS D, KUBALLI M, et al. Electron microscopy of gallium nitride growth on polycrystalline diamond[J]. *Semiconductor science and technology*, 2015, 30(11): 114007.
- [88] SEELMANN-EGGEBERT M, MEISEN P, SCHAUDEL F, et al. Heat-spreading diamond films for GaN-based high-power transistor devices[J]. *Diamond and related materials*, 2001, 10(3-7): 744-749.
- [89] ALOMARI M, DIPALO M, ROSSI S, et al. Diamond overgrown InAlN/GaN HEMT[J]. *Diamond and related materials*, 2011, 20(4): 604-608.
- [90] MEYER D J, FEYGELSON T I, ANDERSON T J, et al. Large-signal RF performance of nanocrystalline diamond coated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *IEEE electron device letters*, 2014, 35(10): 1013-1015.
- [91] TADJER M J, ANDERSON T J, FEYGELSON T I, et al. Nanocrystalline diamond capped AlGaIn/GaN high electron mobility transistors via a sacrificial gate process[J]. *Physica status solidi (A)*, 2016, 213(4): 893-897.
- [92] TADJER M J, ANDERSON T J, HOBART K D, et al. Reduced self-heating in AlGaIn/GaN HEMTs using nanocrystalline diamond heat-spreading films[J]. *IEEE electron device letters*, 2011, 33(1): 23-25.
- [93] WANG A, TADJER M J, CALLE F. Simulation of thermal management in AlGaIn/GaN HEMTs with integrated diamond heat spreaders[J]. *Semiconductor science & technology*, 2013, 28(5): 055010.

(上接第 57 页)

- [25] 曹京宜, 张海永, 杨文静, 等. KCC-1/PVDF 超疏水与超滑表面的制备及其性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 152-158.
- CAO J Y, ZHANG H Y, YANG W J, et al. Preparation and properties of KCC-1/PVDF superhydrophobic and ultra-slip surfaces[J]. *Surface technology*, 2020, 49(6): 152-158.
- [26] 蒋翔, 田蒙蒙, 雷瑜, 等. 铜基超疏水表面的制备及防腐特性[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(4): 87-94.
- JIANG X, TIAN M M, LEI Y, et al. Fabrication and corrosion resistance of copper-based superhydrophobic surface[J]. *Journal of South China University of Technology (natural science edition)*, 2020, 48(4): 87-94.
- [27] 彭娜, 徐群杰, 刘伟, 等. 白铜超疏水表面的构建及耐蚀性能的研究[J]. *上海电力学院学报*, 2016, 32(4): 371-375.
- PENG N, XU Q J, LIU W, et al. Study on the construction of the superhydrophobic surface on copper-nickel alloy and corrosion resistance[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2016, 32(4): 371-375.
- [28] 刘雷, 张粤, 李霞, 等. 铝合金表面耐久性超疏水防护膜的制备与表征[J]. *化工学报*, 2020, 71(10): 4750-4759.
- LIU L, ZHANG Y, LI X, et al. Preparation and characterization of durable superhydrophobic protective coatings on aluminum alloy[J]. *CIESC journal*, 2020, 71(10): 4750-4759.