

宽禁带功率半导体器件技术

张波, 邓小川, 陈万军, 李肇基

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)是第三代半导体材料的典型代表。与常规半导体硅(Si)和砷化镓(GaAs)相比, 宽禁带半导体具有宽带隙、高饱和漂移速度、高临界击穿电场等突出优点, 是大功率、高温、高频、抗辐照应用场合下极为理想的半导体材料。该文总结了宽禁带SiC和GaN功率半导体器件研究的最新进展, 包括各种功率二极管和功率晶体管。同时对宽禁带SiC和GaN功率半导体器件发展所面临的 market 和技术挑战进行了分析与概述, 并对其发展前景进行了展望。

关键词 氮化镓; 功率器件; 碳化硅; 宽禁带半导体

中图分类号 TN3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.018

Wide Bandgap Semiconductors for Power Electronics

ZHANG Bo, DENG Xiao-chuan, CHEN Wan-jun, and LI Zhao-ji

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Wide bandgap semiconductors, such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN), are considered to be excellent candidates for high power, high frequency and high temperature applications in the commercial and military power distribution and conversion systems. The advantages of wide bandgap materials over the conventional Si and GaAs include wide bandgap, high saturation electron velocity, and high critical electric field. In this paper, the recent progress in the development of high-voltage SiC and GaN power switching devices is reviewed. The experimental performance of various rectifiers and transistors, which have been demonstrated, is discussed. Market and technical challenges on SiC and GaN power devices are also described. The future trends in device development and commercialization are pointed out.

Key words gallium nitride; power device; silicon carbide; wide bandgap semiconductor

随着微电子技术的发展, 传统Si和GaAs半导体器件性能已接近其材料本身决定的理论极限。而以碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)为代表的宽禁带半导体材料, 由于具有宽带隙、高饱和漂移速度、高临界击穿电场等突出优点, 成为制作大功率、高频、高温及抗辐照电子器件的理想替代材料^[1-2]。目前, SiC单晶生长技术和GaN异质结外延技术的不断成熟, 宽禁带功率器件的研制和应用在近年来得到迅速发展。

在美国国防先进研究计划局的宽禁带半导体技术计划WBGSTI、欧洲ESCAPEE和日本NEDO等多项研究计划的启动和推动下^[3-4], SiC和GaN等宽禁带半导体材料和器件的研制获得了飞速的发展, 国际上多家半导体厂商相继推出大功率、高频、高温的宽禁带半导体产品, 其应用领域正不断扩展。

下面就SiC和GaN器件在功率半导体技术领域的发展现状和发展挑战分别予以论述。

1 SiC功率半导体器件技术发展现状

1.1 SiC电力电子器件

SiC电力电子器件主要包括功率整流器(SBD、PiN和JBS等)、单极型功率晶体管(MOSFET、JFET和SIT等)和双极型载流子功率晶体管(BJT、IGBT和GTO等)。表1是目前国际上研制的部分4H-SiC功率整流器和单极型功率晶体管性能指标比较。

目前, SiC SBD已经市场化, 美国Cree、德国Infineon以及Microsemi等公司都有SiC SBD产品系列, 其主要应用领域是开关模式电源(SMPS)的有源功率因数校正(CCM PFC)和太阳能逆变器与电机驱动器等AC/DC和DC/DC电源转换应用。SiC SBD的出现将SBD的应用范围从250 V提高到了1 200 V。同时, 其高温特性好, 从室温到由管壳限定的175℃, 反向漏电流几乎没有增加。在3 kV以上的整流器应用领域, SiC PiN和SiC JBS二极管由于比Si整流器具有更高的击穿电压、更快的开关速度以及更小的体

积和更轻的重量而备受关注。在3英寸N型4H-SiC晶圆上, Cree公司10 kV/20 A PiN二极管系列的合格率已经达到40%, 10 kV/20 A的SiC JBS的合格率也达到37%, 10 kV/5 A SiC JBS的合格率超过40%^[8]。

表1 4H-SiC功率整流器和单极型功率晶体管性能对比

器件	V_b /kV	R_{on} /m Ω ·cm ²	$\frac{V_b^2}{R_{on}}$ /MW·cm ⁻²	参考文献
SBD	10.8	97.00	1202	[5]
SBD	2.7	2.57	2837	[6]
PiN	19.5	65.00	5850	[7]
JBS	10.0	---	---	[8]
DMOS	10.0	123.00	813	[9]
VJFET	11.0	130.00	931	[10]
SIT	0.7	1.10	445	[11]

在多子导电的SiC单极型功率晶体管研发方面, SiC MOSFET器件一直是众多半导体厂商的研究重点。文献[9]成功研制出阻断电压10 kV, 比导通电阻为123 m Ω ·cm²的SiC MOSFET。由于SiC MOSFET存在低反型层沟道迁移率和SiO₂层可靠性低的问题, 因此作为没有肖特基接触和MOS界面的单极器件SiC JFET就很有吸引力, 已成为SiC单极器件的研究热点方向。常类型Ti-VJFET器件的阻断电压已达到11 kV, 比导通电阻为130 m Ω ·cm²^[10]。目前市场上唯一销售的SiC开关元器件为SIT(静电感应晶体管), 耐压为1 200 V, 比导通电阻为12 m Ω ·cm²。

SiC双极型功率器件IGBT、BJT和GTO也取得很大进展, 表2列出了部分双极型器件性能指标比较。文献[13]报道了阻断电压12 kV, 比导通电阻仅为14 m Ω ·cm²的4H-SiC IGBT。与Si双极型晶体管相比, SiC双极型晶体管具有低20~50倍的开关损耗以及更低的导通压降。SiC BJT主要分为外延发射极和离子注入发射极BJT, 典型的电流增益在10~50之间。文献[16]报道了目前阻断电压最大的GTO器件, 击穿电压12.7 kV, 比导通电阻为35.2 m Ω ·cm²。

表2 4H-SiC双极型功率器件性能对比

器件	V_b /kV	R_{on} /m Ω ·cm ²	β	$\frac{V_b^2}{R_{on}}$ /MW·cm ⁻²	参考文献
IGBT	20.00	---	---	---	[12]
IGBT	12.00	14.0	---	10 285	[13]
BJT	9.28	49.0	7	1 727	[14]
BJT	3.20	8.1	44	1 264	[15]
GTO	12.70	35.2	---	4 582	[16]

1.2 SiC微波功率晶体管

SiC微波功率晶体管包括SiC MESFET、SiC BJT和SiC SIT等, 其中SiC MESFET具有工艺简单和技

术成熟等优点, 已正式装备美国海军的新一代预警机E2D。文献[17]报道了栅长0.45 μ m, 特征频率 f_t 为22 GHz, 最高振荡频率 f_{max} 为50 GHz的SiC MESFET器件。在X波段, Cree公司0.25 mm栅宽器件的输出功率密度为4.5 W/mm, 增益为7.6 dB, PAE为31%^[18]。在输出功率密度方面, 文献[19]采用栅场板埋沟结构, 将功率密度提高到7.8 W/mm@3 GHz。在SiC MESFET产品系列方面, Cree公司10 W和60 W的A/AB类放大器已经实用化, 并且能够提供SiC MESFET MMIC制程服务。图1是近几年SiC微波器件在不同工作频段下的输出功率密度。

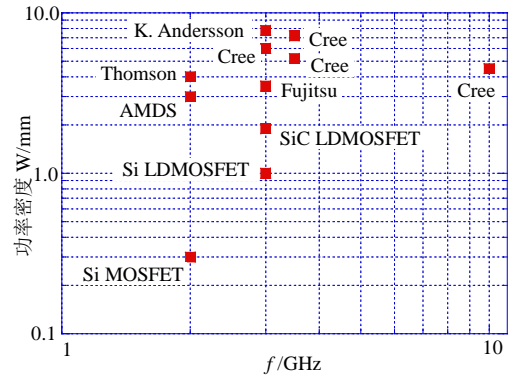


图1 不同工作频率下的输出功率密度

2 GaN功率半导体器件技术发展现状

2.1 GaN功率整流器

GaN功率整流器主要包括SBD和PiN二极管。与SiC材料不同, GaN除了可以利用GaN体材料制作器件以外, 还可以利用GaN的异质结构制作高性能器件。文献[20]成功研制出击穿电压近10 kV的纯GaN整流器。文献[21]报道了采用低温淀积GaN保护层作为结终端的AlGaIn/GaN SBD器件, 在基于Si衬底的AlGaIn/GaN外延材料上实现了1 000 V耐压。文献[22]利用Natural Super Junction概念在AlGaIn/GaN材料上实现了击穿电压高达9 300 V, 而比导通电阻为176 m Ω ·cm²的功率二极管。

文献[23-24]提出了一种突破传统GaN功率整流器性能限制的AlGaIn/GaN横向场控功率整流器结构(L-FER)。该结构通过肖特基-欧姆复合阳极, 实现了肖特基栅控2DEG沟道, 从而使得器件的开启电压由沟道的阈值电压(场控)决定而不再受肖特基势垒高度的影响。器件击穿电压为470 V, 正向开启电压仅为0.58 V, 比导通电阻为2.03 m Ω ·cm²。该结构不仅具有高压、高速及低功耗等优点, 还有与AlGaIn/GaN HEMT功率开关器件工艺兼容等特点。L-FER结构引起了国际同行的高度关注, 《Compound

semiconductor》和《Semiconductor Today》杂志对该研究结果进行了综述报道^[25-26]。

在GaN PiN功率整流器研究方面,由于在GaN材料上形成PN结技术不成熟,因此报道较少。文献[27]通过掺Mg形成P型,在GaN衬底上实现了击穿电压为540 V、开启电压为4.4 V、比导通电阻为 $3\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的GaN PiN功率整流器。

2.2 GaN功率开关器件

目前,基于GaN的功率开关器件主要包括AlGaIn/GaN HEMT(HFET)、GaN MOSFET和MIS-HEMT等结构。其中,AlGaIn/GaN HEMT具有工艺简单、技术成熟、优良的正向导通特性和高的工作频率等优点,成为GaN功率开关器件中最受关注的结构。

文献[28]报道了阻断电压10 400 V,比导通电阻仅为 $186\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的GaN功率开关器件,如图2所示。

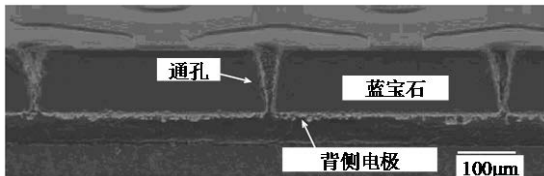


图2 AlGaIn/GaN高压HFET结构SEM图

众所周知,传统AlGaIn/GaN结构的晶体管是耗尽型(常开型)器件,而具有正阈值电压的增强型(常关型)功率开关器件能够确保功率电子系统的安全性、降低系统成本和复杂性等,是功率系统中的首选器件。因此,增强型HEMT器件实现技术也是研究者们极其关注的问题。文献[29]报道了具有正阈值电压的GIT器件,阈值电压为1 V,击穿电压为800 V,比导通电阻为 $2.6\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

除AlGaIn/GaN HEMT功率开关器件以外,基于GaN的功率MOSFET和MIS-HEMT结构也是研究者们关注的GaN功率开关器件。文献[30]采用 SiO_2 作为栅介质层,实现了击穿电压2 500 V、比导通电阻 $30\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、阈值电压2 V的N型GaN功率MOSFET器件。为了充分利用AlGaIn/GaN材料优势,同时具有MOSFET所有的绝缘栅和增强型工作类型等特点,文献[31]提出了MOS-HEMT混合型功率器件,其击穿电压为1 300 V,比导通电阻为 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。文献[32]研究了分别采用SiN和 TiO_2 作为绝缘栅介质的高压功率MIS-HEMT性能,其击穿电压分别为1 700 V和2 000 V,比导通电阻为 $6.9\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $15.6\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

2.3 GaN功率集成技术

近年来,虽然GaN分立高压功率器件(包括功率

整流器和功率开关器件)被广泛研究,对GaN智能功率集成技术的探索却相对缺乏。高度集成化的GaN智能功率技术将实现传统硅功率芯片技术所不能达到的工作安全性、工作速度及高温承受能力。文献[33]率先报道了单片集成功率晶体管和功率整流器的GaN Boost转换器,并在此基础上开发出GaN智能功率集成技术平台雏形,如图3所示。

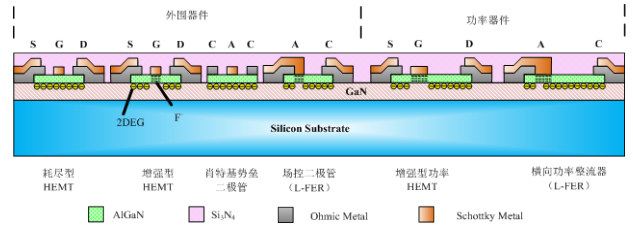


图3 GaN智能功率集成技术雏形

3 SiC和GaN功率器件技术发展挑战

近年来,Si功率器件结构设计和制造工艺日趋完善,已经接近其材料特性决定的理论极限,依靠Si器件继续完善来提高装置与系统性能的潜力十分有限。随着SiC和GaN外延材料和器件制造工艺取得重大进展,各种SiC和GaN功率器件的研究和开发蓬勃开展起来。尽管SiC和GaN功率器件取得了令人鼓舞的进展,已经有了许多实验室产品,而且部分产品已经进入市场,但是目前存在的几个主要市场和技术挑战限制了其商业化进程的进一步发展。SiC和GaN产品的大规模应用还需做大量工作。

3.1 SiC功率器件发展挑战

在商业化市场方面:(1) 昂贵的SiC单晶材料。由于目前世界上仅有寥寥数家公司能够提供SiC单晶片,包括领头羊美国Cree公司、道康宁(DowCorning)公司、欧洲SiCrystal公司和日本的新日铁公司等。但由于Cree公司技术性垄断,一片3英寸SiC单晶片的售价在2 000~3 000美元左右,一片高质量的4英寸SiC单晶片的售价约5 000美元,然而相应的4英寸Si片售价仅为7美元。如此昂贵的SiC单晶片已经严重阻碍了SiC器件进入民用功率半导体市场。(2) Cree公司的技术垄断。由于Cree公司在世界各国申请了许多专利,严重制约了其他公司在SiC领域的发展。

在技术挑战方面:(1) SiC单晶材料,包括缺陷密度的降低和消除,以及单晶片尺寸的增加。在导致SiC功率半导体性能和可靠性下降的致命缺陷微管密度降低和消除方面近年来取得很大进展,Cree公司在2007年开始供应零微管(Zero Micropipes)密度的4英寸SiC单晶片。目前材料缺陷的研究重点转

为位错缺陷(Screw dislocation、Basal plane dislocations、Edge dislocation)等其他缺陷对元件特性造成的影响。(2) SiC器件可靠性问题。SiC MOSFET器件目前存在两个主要技术难点没有完全突破: 低反型层沟道迁移率和高温、高电场下栅氧可靠性。目前报道的4H-SiC MOSFET的反型层沟道迁移率在 $30\sim 170\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 与Si MOSFET相比, 体现不出SiC MOSFET的优势。为此, 必须通过特殊栅氧化工艺(如 H_2 气氛中的氧化后退火、在NO或 N_2O 气氛中进行栅氧化或退火等)消除SiC/SiO₂界面缺陷来提高反型层沟道迁移率。对于SiC BJT功率器件, 现在急需解决的是电流增益退化问题。造成电流增益不稳定性原因目前仍不清楚, 其中一种可能性是由于外延基区内的堆垛层错所引起。(3) 高温大功率SiC器件封装问题。当SiC材料和工艺问题基本解决以后, 器件封装的可靠性问题将上升为影响高温大功率SiC器件性能的主要因素。

3.2 GaN功率器件发展挑战

在商业化市场方面: 相对于Si和SiC单晶衬底而言, GaN单晶生长技术还不成熟, 其成本和质量还很难与前两者相比, 因此在一定程度上阻碍了GaN功率器件的广泛应用。虽然基于大直径Si衬底的GaN外延片能够降低其成本, 但由于受其外延片结构的限制, 使得基于硅基的GaN功率器件纵向耐压受限, 其器件击穿电压多低于1 200 V, 从而限制了GaN功率器件在更高工作电压领域内的应用。基于蓝宝石衬底的GaN功率器件由于衬底低的热传导系数而限制了在大功率方面的应用。相对昂贵的SiC单晶片同样会阻碍基于SiC衬底的GaN功率器件的广泛应用。

GaN功率器件在技术方面, 同样存在着诸多挑战。(1) GaN材料不成熟: 材料缺陷导致临界击穿电场下降、Buffer衬底漏电等是GaN功率器件无法达到其材料理论极限的主要原因之一。(2) 制造工艺: 首先是增强型AlGaIn/GaN HEMT实现技术。目前国际上多采用超薄AlGaIn层结构、槽栅结构、P型栅结构和氟离子注入技术等来实现增强型功率开关器件。但上述技术均存在各自不足, 离商用化还有一定的距离。其次是缺乏高质量的绝缘栅生长技术阻碍了GaN功率MOSFET和MIS-HEMT器件的发展与应用。再者, 缺乏实用的掺杂技术、P型GaN制造工艺、高质量的钝化层生长工艺等。(3) 电流崩塌效应的理论研究: AlGaIn/GaN HMET功率开关器件的电流崩塌效应成为AlGaIn/GaN HMET最终走向实用化的最

严峻问题之一。目前, 通过表面钝化、场板、 δ -掺杂等方法可以一定程度上抑制GaN的电流崩塌效应。但迄今为止, 国内外尚未提出解释电流崩塌的完整理论。(4) GaN器件可靠性问题: 陷阱、材料缺陷、表面处理技术与钝化层保护、Buffer衬底漏电、高压大电流及高场下肖特基栅金属的退化、绝缘栅介质与表面电荷等问题均影响GaN器件的可靠性。(5) 大功率GaN器件封装问题: 与SiC器件一样, GaN器件也面临着封装问题的挑战。特别是GaN有着与SiC等量级的功率密度, 但热传导率却低于SiC, 因此加剧了GaN器件的热散问题, 从而对大功率GaN器件的封装提出了更严峻的挑战。

4 结束语

从Si器件和SiC器件的成本来看, 价格相差比较大。但如果从SiC器件带来的系统性能提升分析, 其带来的总体效益远远超过两类器件的价差。特别在高压复杂环境应用中, SiC器件的优势表现得非常明显。随着大尺寸SiC晶圆的发展, 价格最终不会成为制约的瓶颈。特别是2009年4月日本新日铁公司开始销售直径2~4英寸SiC晶圆, 将会进一步降低Cree公司在SiC晶圆的垄断地位。

对于GaN功率器件, 由于基于硅基的GaN外延衬底能够大幅度降低成本, 且在将来有望与硅基CMOS工艺兼容, 因此GaN功率器件也具有极其广阔的应用前景。GaN功率器件的发展方向十分明确, 就是瞄准工作电压在几十伏到1 200V左右的应用范围, 特别是600 V以下的巨大应用市场正是基于Si衬底的AlGaIn/GaN异质结所能发挥优势的范围。国际上众多著名半导体公司, 如IR、Rohm、Velox、Cree、Sanken、Toshiba、Panasonic、IMEC等都将开发该级别的GaN功率器件作为公司发展的重要战略之一。

目前国内在宽禁带半导体SiC和GaN电力电子器件领域, 几乎还是空白。考虑到SiC和GaN材料的特点和国际上宽禁带半导体功率器件的发展趋势和应用前景, 国内应该在稳步发展以雷达应用为背景的SiC MESFET和GaN HEMT微波功率器件的同时, 加快具有更广泛应用领域的SiC和GaN电力电子器件的研究和投入。

以SiC和GaN为代表的第三代半导体材料被誉为IT产业新的发动机, 在经济和军事领域具有广阔和特殊的应用前景。目前国际上宽禁带半导体功率器件面临的技术难度正在逐步降低, 随着大尺寸SiC晶圆和GaN外延衬底材料的发展, 以及SiC和GaN功

率器件在民用领域,特别是电动汽车领域的推广应用,相信下一个十年宽禁带半导体功率器件会大量应用于军事和民用的各个领域。

参 考 文 献

- [1] CHOW T P. High-voltage SiC and GaN power devices[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(1): 112-122.
- [2] BURK A A Jr, O'LOUGHLIN M J, SIERGIEJ R R, et al. SiC and GaN wide bandgap semiconductor materials and devices[J]. *Solid-State Electronics*, 1999, 43(8): 1459-1464.
- [3] ROSKER M. Wide bandgap and MMICs[J]. *III-Vs Review*, 2005, 18(4): 24-25.
- [4] 张波, 邓小川, 张有润, 等. 宽禁带半导体SiC功率器件发展现状及展望[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2009, 4(2): 111-118.
ZHANG Bo, DENG Xiao-chuan, ZHANG You-run, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide power devices—opportunity and challenge[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2009, 4(2): 111-118.
- [5] ZHAO J H, ALEXANDROV P, LI X. Demonstration of the first 10 kV 4H-SiC Schottky barrier diodes[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2003, 24(6): 402-404.
- [6] NISHIO J, OTA C, HATAKEYAMA T, et al. Ultralow-loss SiC floating junction schottky barrier diodes (Super-SBDs)[J]. *IEEE Trans Electron Device*, 2008, 55(8): 1954-1960.
- [7] SUGAWARA Y, TAKAYAMA D, ASANOK K, et al. 12~19 kV 4H-SiC pin diodes with low power loss[C]// *Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. Osaka, Japan: IEEE, 2001: 27-30.
- [8] PALMOUR J. Advances in SiC power technology[EB/OL]. [2007-03-07]. <http://www.mtosymposium.org>.
- [9] RYU S H, KRISHNASWAMI S, O'LOUGHLIN M, et al. 10 kV, 123 mΩ·cm² 4H-SiC power DMOSFETs[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2004, 25(8): 556-558.
- [10] ZHAO J H, ALEXANDROW P, ZHANG J, et al. Fabrication and characterization of 11 kV normally off 4H-SiC trench and implanted vertical junction FET[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2004, 25(7): 474-476.
- [11] TANAKA Y, OKAMOTO M, AKATSUKA A, et al. 700 V 1.0 mΩ·cm² Buried Gate SiC-SIT (SiC-BGSIT)[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, 27(11): 908-910.
- [12] SUI Y, WANG X, COOPER J A. High-voltage self-aligned p-channel DMOS-IGBTs in 4H-SiC[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2007, 28(8): 728-730.
- [13] ZHANG Q, JONAS C, SUMAKERIS J, et al. 12 kV 4H-SiC p-IGBTs with record low specific on-resistance[J]. *Materials Science Forum*, 2009, 600-603: 1187-1190.
- [14] ZHANG J, ZHAO J H, ALEXANDROV P, et al. Demonstration of first 9.2 kV 4H-SiC bipolar junction transistor[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(21): 1381-1382.
- [15] SUMI K, ANANT A, JAMES R, et al. High temperature characterization of 4H-SiC bipolar junction transistors. *Materials Science Forum*, 2005, 527-529: 1437-1440.
- [16] SUGAWARA Y, TAKAYAMA D, ASANO K, et al. 12.7kV ultra high voltage SiC commutated gate turn-off thyristor: SICGT[C]// *Proceedings of the 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2004: 365-368.
- [17] ALLEN S T, SADLER R A, ALCRN T S, et al. Silicon carbide MESFET's for high-power S-band applications [C]// *Proceedings of the 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. Denver, CO: IEEE, 1997: 57-60.
- [18] SADLER R A, ROBERT A, ALLEN S T, et al. SiC MESFET hybrid amplifier with 30 W output power at 10GHz[C]// *Proceedings of the IEEE Cornell Conference on Advanced Concepts in High Speed Semiconductor Devices and Circuits*. Ithaca, NY: IEEE, 2000: 173-177.
- [19] KRISTOFFER A, MATTIAS S, PER-ÅKE N, et al. Fabrication and characterization of field-plated buried-gate SiC MESFETs [J]. *IEEE Electron Devices Letters*, 2006, 27(7): 573-575.
- [20] ZHANG A P, JOHNSON J W, REN F. Lateral Al_xGa_{1-x}N power rectifiers with 9.7 kV reverse breakdown voltage[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(6): 823-825.
- [21] KAMADA A, MATSUBAYASHI K, NAKAGAWA A, et al. High-voltage AlGaIn/GaN schottky barrier diodes on Si substrate with low-temperature GaN cap layer for edge termination[C]// *Proceedings of the 20 International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*. Orlando, FL: IEEE, 2008: 225-228.
- [22] JOHNSON J W, ZHANG A P, LUO W B, et al. Breakdown voltage and reverse recovery characteristics of free-standing GaN Schottky rectifiers[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2002, 49(1): 32-36.
- [23] CHEN Wan-jun, WONG King-yuen, CHEN K J. Single-chip boost converter using monolithically integrated AlGaIn/GaN lateral field-effect rectifier and normally-off HEMT[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(5): 430-432.
- [24] CHEN Wan-jun, WONG King-yuen, HUANG Wei, et al. High-performance AlGaIn/GaN lateral field-effect rectifiers compatible with high electron mobility transistors [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(25): 253501.
- [25] Researchers unite HEMT and rectifiers[J/OL]. [2008-08-28]. <http://compoundsemiconductor.net/cws/article/magazine/35147>.
- [26] MIKE C. Heterostructuring for high speed, power and light[J]. *Semiconductor Today*, 2009, 4(2): 73-78.
- [27] LIMB J B, YOO D, RYOU J H, et al. High performance GaN pin rectifiers grown on free-standing GaN substrates [J]. *IEEE Electronics Letters*, 2006, 42(22): 1313-1314.
- [28] YANAGIHARA M, UEMOTO A, UEDA T, et al. Recent advances in GaN transistors for future emerging applications[J]. *Phys Status Solidi A*, 2009, 206(6): 1221-1227.
- [29] UEMOTO Y, HIKITA M, UENO H, et al. Gate injection transistor(GIT)—A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2007, 54(12): 3393-3399.
- [30] HUANG W, CHOW T P, NIYAMA Y, et al. Lateral

implanted RESURF GaN MOSFETs with BV up to 2.5 kV [C]//Proceedings of the 20 International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Orlando, FL: IEEE, 2008: 291-294.

- [31] HUANG W, LI Z; CHOW T P, et al. Enhancement-mode GaN Hybrid MOS-HEMTs with $R_{on,sp}$ of 20 $m\Omega \cdot cm^2$ [C]//Proceedings of the 20 International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Orlando, FL: IEEE, 2008: 295-298.
- [32] YAGI S, SHIMIZU M, INADA M, et al. High breakdown voltage AlGaIn/GaN MIS HEMT with SiN and TiO₂ gate insulator[J]. Solid-State Electronics, 2006, 50(6): 1057-1061.
- [33] WONG King-yuen, CHEN WAN-JUN, CHEN KEVIN J. Integrated voltage reference and comparator circuits for GaN smart power chip technology[C]//Proceedings of the 21th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Barcelona, Catalonia: IEEE, 2009: 57-60.



张波, 电子科技大学教授, 博士生导师。国家科技重大专项实施专家组专家; 国家自然科学基金委员会第十二届专家评审组专家; 国家集成电路人才培养基地专家指导组专家。一直从事新型功率半导体器件与功率集成系统的研究, 共主持国家863、国防973、国家自然科学基金等项目40余项, 为境内外多家企业开发成功功率半导体器件和功率集成电路产品, 销售过亿只。申请国际国内专利50项, 在IEEE Electron Device Letters、IEEE Trans Electron Device等学术刊物以及ISPSD、ICSICT等国际国内学术会议发表SCI、EI收录论文140余篇。

编辑 张俊