

文章编号: 1000-7032(2015)10-1178-10

## GaN HEMT 器件结构的研究进展

于 宁<sup>1</sup>, 王红航<sup>2</sup>, 刘飞飞<sup>1</sup>, 杜志娟<sup>1</sup>, 王岳华<sup>1</sup>, 宋会会<sup>1</sup>, 朱彦旭<sup>1\*</sup>, 孙 捷<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学电子信息与控制工程学院 光电子技术实验室, 北京 100124;

2. 电子科技大学中山学院 电子薄膜与集成器件国家重点实验室中山分实验室, 广东 中山 528402)

**摘要:** GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 具有大的禁带宽度、高电子饱和速度、异质结界面的高二维电子气浓度、高击穿电压以及高的热导率, 这一系列特性使它在高频、高功率、高温等领域得到了广泛的认可。本文首先论述了制约氮化镓高电子迁移率晶体管器件性能提高所遇到的问题及解决方法; 然后, 着重从优化材料结构设计和器件结构设计角度, 阐述了氮化镓高电子迁移率晶体管器件在高频高功率领域的最新研究进展; 最后, 讨论了器件进一步发展的方向。

**关键词:** 高电子迁移率晶体管; 氮化镓; 高频; 结构设计

中图分类号: TN386.3 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153610.1178

## Research Progress of GaN HEMT Device Structure

YU Ning<sup>1</sup>, WANG Hong-hang<sup>2</sup>, LIU Fei-fei<sup>1</sup>, DU Zhi-juan<sup>1</sup>,  
WANG Yue-hua<sup>1</sup>, SONG Hui-hui<sup>1</sup>, ZHU Yan-xu<sup>1\*</sup>, SUN Jie<sup>1</sup>

(1. *Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

2. *State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices,*

*University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan 528402, China)*

\* *Corresponding Author, E-mail: zhuyx@bjut.edu.cn*

**Abstract:** GaN high electron mobility transistor (HEMT) has been widely acknowledged for use in high-frequency, high-power, and high-temperature applications because of their features such as its wide band gap, high electron saturation velocity, high 2-DEG density at the hetero-interface, high breakdown voltage (BV), and high thermal conductivity. The issues that limit the gallium nitride high electron mobility transistor device performance improvement and some solutions are introduced firstly. And then, the latest research progress on the high-frequency, high-power area of gallium nitride high electron mobility transistor is reviewed in detail with focus on the material structural design and the device structural design. Finally, the direction for the development of the device is discussed briefly.

**Key words:** high electron mobility transistor; GaN; high-frequency; structural design

收稿日期: 2015-07-21; 修订日期: 2015-08-13

基金项目: 北京市15青年拔尖项目(311000543115501); 中山市科技计划(2014A2FC305); 国家自然科学基金(61204011); 科研基地建设(PXM2015\_014204\_500008)资助项目

## 1 引言

高电子迁移率晶体管 (HEMT) 是一种异质结场效应晶体管, 这种器件依靠半导体异质结中具有量子效应的二维电子气 (2DEG) 形成导电沟道, 评判器件的性能是由二维电子气的密度、迁移率的大小和饱和速度等因素共同决定的。HEMT 具有电子迁移率高、电流大、击穿电压高等特点, 广泛应用于高频大功率的场合。GaN 材料具有禁带宽、击穿电场强、电子饱和速度高、热导率高等特点, 广泛应用于高温、高辐射领域半导体器件的制作, 并能降低能耗。同时, GaN 材料具有很强的自发和压电极化效应, 该特性能够提高 HEMT 结构中二维电子气的密度和迁移率, 因此基于 GaN 材料的 HEMT 成为目前高频功率器件和功率开关器件等领域的研究热点。

目前, GaN HEMT 结构以 AlGaIn/GaN 异质结为主, 由于该异质结构导带的偏移比较大, 在异质结附近能产生很强的自发和压电极化效应, 因此不需要特意掺杂就能在界面处堆积高浓度的 2DEG, 这样就可以使掺杂原子和载流子在空间上得到分离, 减小了二者之间的库仑作用及杂质散射的影响, 所以 HEMT 具有其他结构难以达到的高电子迁移率。

## 2 GaN HEMT 器件的发展需要解决的问题

GaN HEMT 器件应该具有以下特性: 高输出阻抗、高击穿电压、高跨导、良好的欧姆接触、好的夹断特性、在大的电流和电压范围内保持电流增益截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{max}$  具有较高值以及高可靠性等<sup>[1]</sup>。图 1 给出了目前已知 GaN HEMT

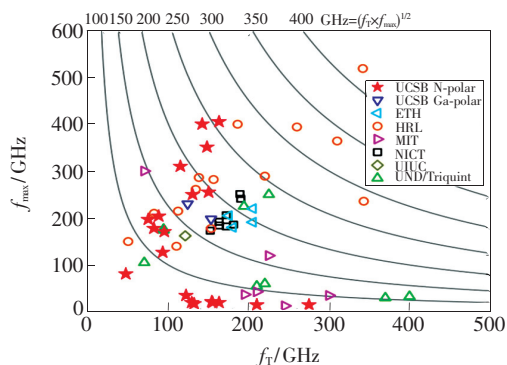


图 1 GaN HEMT 的  $f_T$  及  $f_{max}$  比较<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Comparison of  $f_T$  and  $f_{max}$  of GaN HEMT<sup>[2]</sup>

的频率特性参数, 图 2 为 GaN HEMT 击穿电压和特征导通电阻的参数, 并给出 Si-MOS 极限、4H-SiC 极限、Si-IGBT 极限与 GaN 极限的对比。器件性能的提高主要从器件结构设计和材料结构设计两方面来实现。

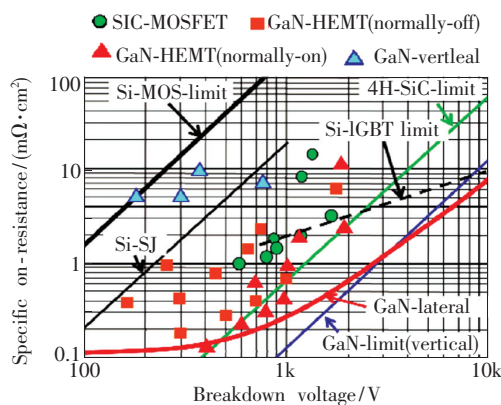


图 2 GaN HEMT 的击穿电压和特征导通电阻参数<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Breakdown voltage parameters and specific on-resistance parameters of GaN HEMT<sup>[3]</sup>

### 2.1 电流崩塌效应

电流崩塌效应制约着 HEMT 器件功率密度和功率附加效率的提高。对于电流崩塌效应, 有许多模型对其进行解释, 如虚栅模型、陷阱模型、应力模型等。其中虚栅模型最为成熟, 当栅漏电压较大时, 会在栅漏之间产生大电场, 电子从栅隧穿到 AlGaIn 表面, 被栅漏之间的表面态俘获, 导致耗尽区向漏端延伸, 形成虚栅, 沟道中的 2DEG 减少, 器件出现电流崩塌效应<sup>[4]</sup>。抑制电流崩塌效应可以采用器件钝化、场板和生长盖帽层等方法。

### 2.2 短沟道效应

为了提高器件的频率特性, 器件的栅长应尽可能地小。随着栅长的缩短, GaN HEMT 器件会出现明显的短沟道效应。短沟道效应使器件的亚阈值电流增加、阈值电压漂移、饱和特性退化、跨导降低、频率特性变差。抑制短沟道效应可以通过减薄势垒层厚度或者采用 InAlN 等能产生高 2DEG 浓度的势垒层材料<sup>[5]</sup>。

### 2.3 缓冲层泄漏电流

GaN HEMT 缓冲层中的杂质和大量的晶格缺陷会使缓冲层产生较高浓度的背景电子, 造成缓冲层漏电严重, 无法得到高的输出阻抗。目前减小缓冲层泄漏电流的方法主要有两种: 一是在缓

冲层中掺杂,进行 p 掺杂或引入深能级势阱从而减小泄漏电流;二是使用背势垒结构。

### 2.4 衬底材料选择问题

目前 GaN HEMT 器件使用的衬底主要是蓝宝石和 SiC 材料。GaN HEMT 器件需要好的散热性,蓝宝石材料电导率很低,无法达到散热好的要求;SiC 虽然热导率高、散热性好,但是成本偏高。如何制作良好的 Si 衬底以降低成本以及寻找新型衬底成为需要继续解决的问题。

## 3 材料结构优化设计

1993 年,美国 APA Optics 公司的 Khan 等<sup>[6]</sup>最早制造出 AlGaIn/GaN HEMT 器件,以蓝宝石为衬底,其栅长为  $4\ \mu\text{m}$ ,室温跨导为  $28\ \text{mS/mm}$ 。此后 HEMT 技术得到了快速的发展,大量的研究成果涌现出来,使得 HEMT 工艺逐渐趋于成熟,但还有很多问题制约着 HEMT 发展,这就首先需要从材料的结构优化上来解决。

### 3.1 AlN 插入层

通常在 AlGaIn/GaN HEMT 器件中,提高 Al-GaN 势垒层中的 Al 组分可以有效提高 2DEG 的浓度。但是,Al 组分的增加会使 AlGaIn 与 GaN 之间的晶格失配加大,容易产生弛豫,所以又必须减小 AlGaIn 层的厚度。而且 Al 组分的加大会产生界面缺陷,减低 2DEG 迁移率,很难有效提高 HEMT 的器件性能。AlN 插入层的引入可以有效降低合金的无序散射,减小对载流子的影响,并且能增大导带断续,提高 2DEG 浓度<sup>[7]</sup>。2001 年,Shen 等<sup>[8]</sup>在 AlGaIn 和 GaN 异质结的界面处加入了一层  $1\ \text{nm}$  厚的 AlN 层,改善了 HEMT 器件 2DEG 的输送能力,表现出很好的直流和射频特性。当栅源电压  $V_{\text{GS}}$  为  $2\ \text{V}$  时,饱和电流为  $1\ \text{A/mm}$ ,器件在  $8\ \text{GHz}$  条件下的输出功率为  $8.4\ \text{W/mm}$ ,功率附加效率为  $28\%$ 。加入 AlN 层能够优化 HEMT 器件的开关特性和栅肖特基泄漏特性,但是该结构会增大源漏的欧姆接触电阻<sup>[9]</sup>,这个问题可以通过将源和漏刻蚀到 2DEG 界面以下,然后在源漏重新生长  $n^+$  GaN 层的方法来解决<sup>[10]</sup>。

### 3.2 盖帽层

在 AlGaIn/GaN 异质结上方引入相应的盖帽层可以起到减小反向电流、抑制电流崩塌效应、减小欧姆接触电阻等作用。2002 年,Coffie 等<sup>[11]</sup>在 n 型的 Si 掺杂 AlGaIn 势垒层上生长了一层  $50\ \text{nm}$

厚的 p 型 Mg 掺杂 GaN 盖帽层,发现在没有钝化时,输出功率即达到  $3.0\ \text{W/mm}$ ,功率附加效率也得到了提高, $f_{\text{T}}$  和  $f_{\text{max}}$  分别为  $20\ \text{GHz}$  和  $38\ \text{GHz}$ ,表现出良好的频率特性并对电流崩塌效应有抑制作用,图 3 为该器件的结构图。2007 年,Kikkawa 等<sup>[12]</sup>采用 Y 型肖特基栅和 n 掺杂 GaN 盖帽层结构制作了 AlGaIn/GaN HEMT 器件,Al 组分为  $0.3$ ,栅长为  $100\ \text{nm}$ ,击穿电压为  $190\ \text{V}$ , $f_{\text{max}}$  达到了  $180\ \text{GHz}$ , $f_{\text{T}}$  为  $85\ \text{GHz}$ ,器件的增益、效率和可靠性都得到了很大提高。

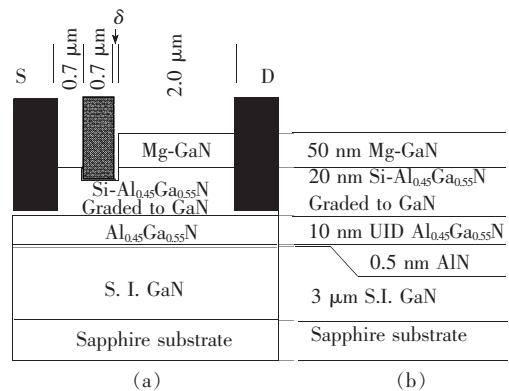


图 3 p 型盖帽层 HEMT 结构示意图

Fig. 3 Structure of p-capped HEMT

### 3.3 背势垒结构

在 GaN HEMT 器件中,提高器件性能的一个方法为减小栅长。但当器件的栅长减小到纳米尺度时,会产生严重的短沟道效应,所以不能通过不断减小栅长来提高器件性能。当栅长很小时,缓冲层泄漏电流将变得很大,引起严重的电流崩塌效应。为了抑制缓冲层的泄漏电流,必须提高 GaN 缓冲层的电阻率或者提高异质结对 2DEG 的限制能力,阻止 2DEG 从缓冲层一侧逸出。在缓冲层掺杂 Fe、Mg、C 等可以提高缓冲层的电阻率,从而抑制泄漏电流,但它们在 GaN 中的激活率很低<sup>[13]</sup>,所以效果不理想。

2005 年,Palacios 等<sup>[14]</sup>在 AlGaIn/GaN HEMT 的缓冲层中引入 InGaIn 背势垒,提高了对 2DEG 的限域性,从而改善了器件高压下的夹断特性,有效抑制了电流崩塌效应,提高了器件的效率和线性度。器件栅长为  $160\ \text{nm}$ , $f_{\text{T}}$ 、 $f_{\text{max}}$  分别为  $128\ \text{GHz}$  和  $168\ \text{GHz}$ ,图 4 为其机构图和能带图。2006 年,Palacios 等<sup>[15]</sup>在 AlGaIn/GaN HMET 器件中加入新型的超薄 InGaIn/GaN 异质结形成的背势垒层,加强了对 2DEG 的限制,提高了输出电导和夹断

特性。器件栅长为 100 nm,  $f_T, f_{max}$  分别为 153 GHz 和 230 GHz。

2011 年, Lee 等<sup>[16]</sup> 首次将  $In_{0.15}Ga_{0.85}N$  背势垒引入  $InAlN/GaN$  HEMTs 来抑制短沟道效应,  $f_T$  为 300 GHz, 电子迁移速度为  $(1.37 \sim 1.45) \times 10^7$  cm/s, 跨导为 530 mS/mm。2014 年, 加州大学圣芭芭拉分校的研究人员<sup>[17]</sup> 将一个从  $InAlN$  组渐变至  $AlN$  的渐变层引入  $AlN/InAlN/AlGaN$  背势垒结构, 将该背势垒结构应用于 3 nm 沟道厚度的 n 型 GaN HEMT, 获得了  $0.663 \Omega \cdot mm$  的低导通电阻, 最大跨导 718 mS/mm。

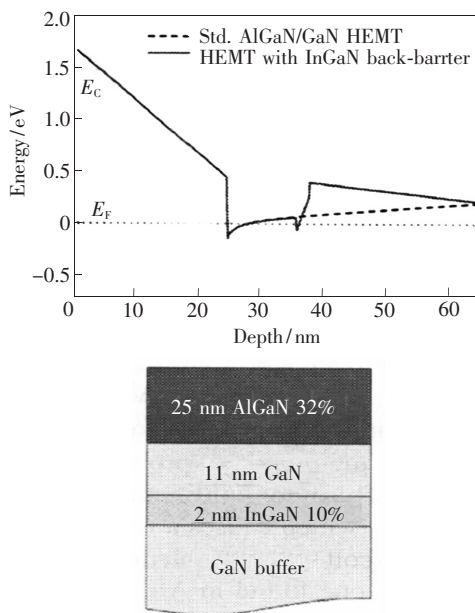


图 4 引入 InGaIn 背势垒层的 GaN HEMT 能带图和器件结构

Fig. 4 Band diagram of a double heterojunction AlGaIn/GaN HEMT with an InGaIn back-barrier

### 3.4 采用 N 面 GaN

GaN 晶体为纤锌矿结构, Ga、N 原子为 ABAB 的六方层堆垛结构, 每个 Ga(N) 原子都与周围的 4 个 N(Ga) 原子呈类金刚石四面体结构成键。由于 GaN 晶体原子排列沿 C 轴是非中心对称的, 以平行于 C 轴的 Ga—N 键作为参照, 若每一个 Ga—N 键中的 N 原子更靠近衬底, 则该 GaN 晶体为 N 面; 若每一个 Ga—N 键中的 Ga 原子更靠近衬底, 则该 GaN 晶体为 Ga 面<sup>[18]</sup>, 图 5 所示为 Ga 面和 N 面 GaN。首先, Ga 面 GaN 与 N 面 GaN 的极化方向相反, 二者在结构上不同, 所以在 N 面 GaN HEMT 中, 2DEG 与源漏电极之间只有一层

GaN; 而在 Ga 面 GaN HEMT 中, 2DEG 与源漏电极隔有 AlGaIn 势垒层。GaN 的欧姆电阻要小于 AlGaIn 的欧姆电阻, 所以 N 面 GaN HEMT 具有更好的欧姆接触, 这使得 N 面 GaN HEMT 更适合于高频应用。其次, Ga 面 GaN HEMT 中, 栅长的减小需要等比例缩小栅极到 2DEG 的距离, 这样就必须减小 AlGaIn 势垒层厚度, 将导致 2DEG 浓度的减小。而 N 面 GaN HEMT 的顶层为 GaN, 减小这层的厚度不会影响 2DEG 的浓度。从图 6 可以看出, N 面 GaN HEMT 表面 GaN 下层的 AlGaIn 势垒层可以看做背势垒, 抑制 2DEG 从沟道中逸出, 所以 N 面 GaN HEMT 更具优势。

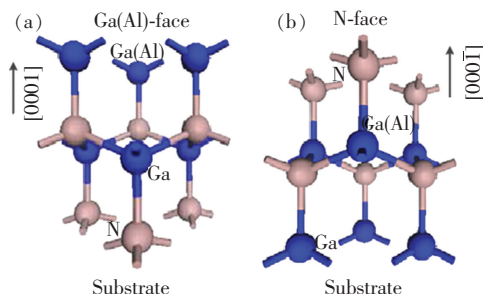


图 5 Ga 面 GaN (a) 与 N 面 GaN (b) 的原子结构

Fig. 5 Atomic structure of Ga-polar GaN (a) and N-polar GaN (b)

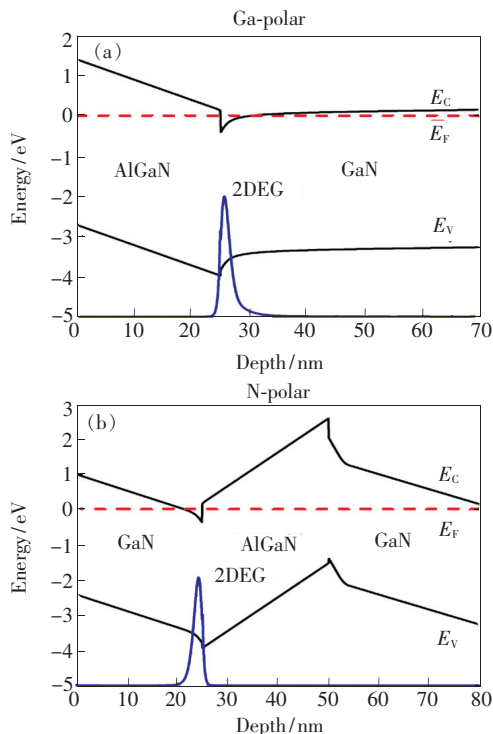


图 6 Ga 面 GaN (a) 与 N 面 GaN (b) HEMT 的能带结构图

Fig. 6 Equilibrium band diagrams of generic Ga-polar (0001) (a) and N-polar (000-1) (b) heterostructures

2011年, Seshadri Kolluri 等<sup>[19]</sup>利用 MOCVD 方法在斜切蓝宝石衬底上生长 N 面 GaN 制成 N 面 AlGaIn/GaN MISHEMT, 用 PECVD 沉积  $\text{Si}_x\text{N}_y$  钝化层, 栅长为 700 nm, 击穿电压高达 170 V。正是高的击穿电压使得器件在 4 GHz 工作频率时输出功率密度达到了 12.1 W/mm, 功率附加效率为 55%。这是当时输出功率密度最大的 N 面 GaN HEMT 器件, 同时也接近当时蓝宝石衬底 GaN HEMT 器件的最好成绩。2012年, Nidhi 等<sup>[20]</sup>在 SiC 衬底上制成 N 面 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 器件采用自对准技术, GaN 沟道厚度为 7 nm, 可以得到更好的小信号特性, 电子电荷密度为  $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 电子迁移率为  $600 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,  $f_T$  达到了 275 GHz。2013年, Denninghoff 等<sup>[21]</sup>制作了一种 N 面 GaN MIS-HEMT 结构, 该结构生长在蓝宝石衬底上, 拥有一个新颖的 In-AlN/AlGaIn 背势垒层, 跨导为 1.89 S/mm, 漏电流为 4 A/mm,  $f_T$  和  $f_{\text{max}}$  分别为 204 GHz 和 405 GHz。该器件在高功率、高频率器件应用方面具有很大的潜能。

### 3.5 自支撑衬底

由于 GaN 和蓝宝石及 SiC 等材料晶格不匹配, 所以把 GaN 缓冲层生长在蓝宝石或 SiC 衬底上时会影响 GaN 的质量。GaN 和衬底之间的 AlN 成核层不能很好地解决问题。解决晶格失配问题的根本方法是使用 GaN 自支撑衬底。2012年, Wang 等<sup>[22]</sup>用低压有机化学汽相淀积 (LP-MOCVD) 技术将 AlGaIn 材料生长在自支撑 GaN 衬底上, 发现其位错密度远远小于生长在蓝宝石衬底上的位错密度。

## 4 器件结构优化设计

### 4.1 钝化

钝化就是在器件表面沉积介质薄膜形成钝化保护层。导致电流崩塌效应的原因有很多, 栅漏之间具有高密度表面态是一个重要原因。钝化对抑制表面态具有很好的效果<sup>[23]</sup>, 而且钝化不会引入寄生电容而影响高频特性。Hanawa 等<sup>[24]</sup>探索了 GaN/AlGaIn HEMT 关态击穿电压与钝化层相对介电常数  $\epsilon_r$  和钝化层厚度  $d$  的关系, 发现击穿电压随着  $\epsilon_r$  和  $d$  的增大而增大, 这是因为高  $k$  和厚的钝化层能够减弱栅漏之间的电场。2000年, 加州大学圣塔芭芭拉分校的 Green 等<sup>[25]</sup>提出用

钝化层来减小 GaN HEMT 的电流崩塌效应。他们在器件表面沉积了一层 350 nm 厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜, 使器件在 4 GHz 时输出功率密度增加了 100%, 击穿电压提高了 25%, 功率密度达到了当时在蓝宝石衬底上最好的 4 W/mm。2013年, Tang 等<sup>[26]</sup>利用钝化的技术设计很好地降低了泄漏电流, 抑制了电流崩塌效应。图 7 为该结构示意图, 钝化层为 AlN/ $\text{SiN}_x$  结构, 用等离子体增强原子层沉积生长了一层 4 nm AlN, 用 PECVD 生长了一层 50 nm  $\text{SiN}_x$ , 栅漏间距为 15  $\mu\text{m}$ 。栅为 T 型栅, 源漏电压为 600 V 时, 关态电流为 0.7  $\mu\text{A}/\text{mm}$ , 击穿电压达到 632 V。佛罗里达大学的研究人员制作了一种 AlGaIn/GaN/AlN 金属-绝缘体-半导体 HEMT (MISHEMT) 结构<sup>[27]</sup>, AlN 层不仅作为钝化层, 同样也作为栅绝缘层, 如图 8 所示。金属肖特基接触栅很容易引起电流崩塌效应、高栅漏等可靠性问题, MISHEMT 结构能有效抑制这些问题。AlN 层同时作为钝化层和栅绝缘层是可行的, 对于栅漏间距为 37.5  $\mu\text{m}$  的器件, 其击穿电压高达 2 000 V。

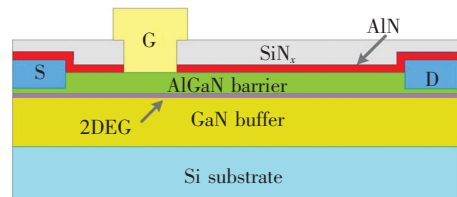


图 7 具有 AlN/ $\text{SiN}_x$  钝化层结构 HEMT 截面图  
Fig. 7 Cross-sectional schematic of AlGaIn/GaN HEMT with 4-nm AlN/50-nm  $\text{SiN}_x$  passivation

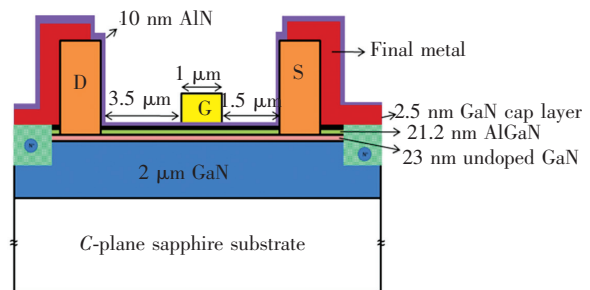


图 8 AlGaIn/GaN/AlN MISHEMT 结构示意图  
Fig. 8 Schematic cross section of AlGaIn/GaN/AlN MISHEMT device

### 4.2 场板

场板 (Field plate) 能够改变靠近栅极边缘耗尽层边界的弯曲程度, 进而改变耗尽层中电场分布, 来实现高的击穿电压。在源漏之间的钝化层上生长一层与栅极材料相同的金属层并将其与栅

极或源极相连, 由于其电势与 AlGaIn 耗尽层电势不等, 产生垂直表面的纵向电场, 改变了 AlGaIn 耗尽层内电场分布<sup>[28]</sup>。场板可以显著降低靠近漏端栅边缘的电场, 其电场峰值的降低能减弱势垒层表面的高场陷阱效应, 使表面陷阱俘获电子能力下降, 从而抑制电流崩塌。

2003 年, Okamoto 等<sup>[29]</sup>在 AlGaIn/GaN HEMT 器件上引入了一个 1  $\mu\text{m}$  厚的场板, 该场板的引入使得器件的击穿电压从 50 V 提高到了 160 V, 栅宽大于 1 mm, 输出功率为 8.1 W/mm, 线性增益为 8.5 dB, 功率附加效率为 42%。图 9 为该器件原理图。2005 年, Ando 等<sup>[30]</sup>进行了两场板 Al-GaN/GaN HEMT 的研究, 通过在原有场板上加入第二层场板, 击穿电压从 125 V 增加到了 250 V。受益于第一层场板, 没有出现电流崩溃, 器件获得了 6.6 W/mm 的输出功率和 17.5 dB 的线性增益。结构图如图 10 所示。

2010 年, Bahat-Treidel 等<sup>[31]</sup>在使用 AlGaIn 势垒层的基础上引入了多场板结构 (MGFPs), 击穿电压超过 700 V, 获得了一个小的导通电阻率 0.68  $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。由于过剩的栅-沟道和栅-漏电

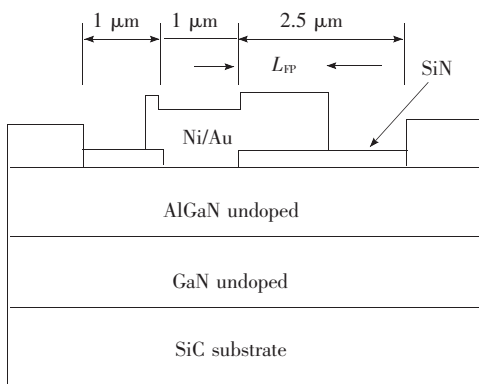


图 9 单场板结构示意图

Fig. 9 Schematic of fabricated AlGaIn/GaN heterojunction FET with a field-modulating plate

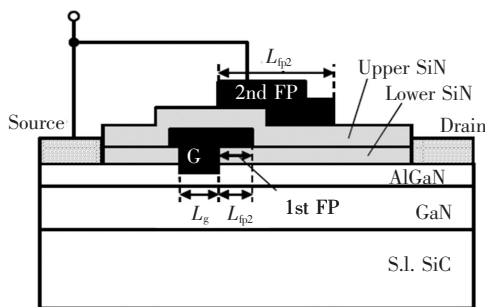


图 10 双场板结构示意图

Fig. 10 Schematic of a fabricated dual-FP-FET

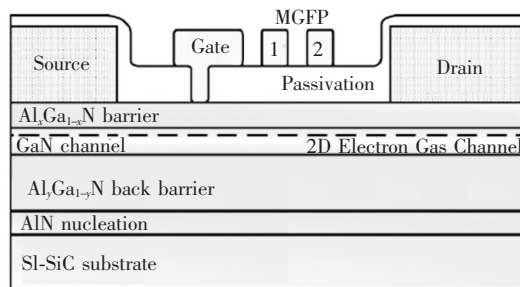


图 11 多场板结构示意图

Fig. 11 Planar-gate GaN-based DH-HEMT structure with multiple grating field plates (MGFPs)

容, 器件的  $f_T$  和  $f_{max}$  减小。图 11 为其结构图。

2012 年, Xie 等<sup>[32]</sup>制作了一种具有新颖的源终端空气桥场板结构的 HEMT, 该场板结构跨过栅极, 连接源端和栅漏, 如图 12 所示。与相同规格但采用常规场板的 HEMT 结构相比, 其击穿电压增加了 3 倍, 漏泄电流减少了 1 个数量级。2014 年, 日本东北大学研究人员通过淀积多层 SiCN 介电薄膜制成倾斜场板<sup>[33]</sup>, 如图 13 所示, 应用倾斜场板的 AlGaIn/GaN HEMT 比采用传统场板的 HEMT 更能抑制电流崩塌效应。他们首次从实验上证实了倾斜场板能够提高击穿电压, 相对于传统场板结构, 采用倾斜场板的 HEMT 击穿电压提高了 66%<sup>[34]</sup>。

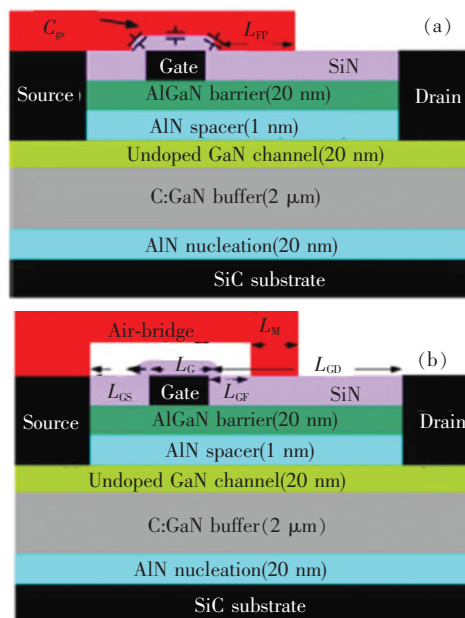


图 12 (a) 采用传统结构场板的 HEMT; (b) 采用新型空气桥结构场板的 HEMT。

Fig. 12 (a) Schematic cross section of AlGaIn/GaN HEMT with conventional field-plate. (b) AlGaIn/GaN HEMT with novel air-bridge field-plate.

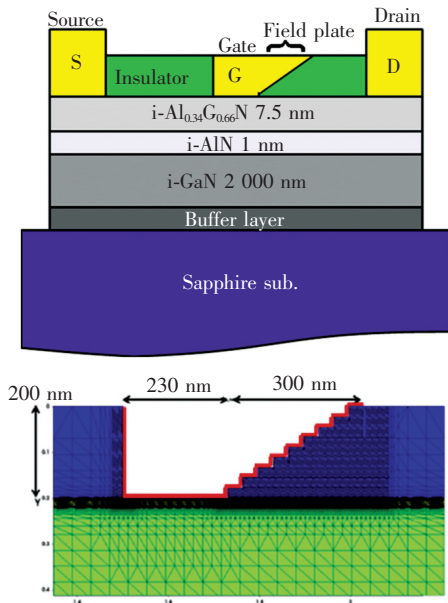


图 13 采用倾斜场板结构的 GaN/AlGaIn HEMT 示意图  
Fig. 13 Cross sectional view of AlGaIn/GaN HEMT with slant field plate

### 4.3 栅结构设计

为了提高器件的性能,栅长变得越来越小,亚阈电流增加、输出电导增大等短沟道效应问题更加凸显出来。同时随着栅长减少到纳米尺度,会在高频条件下出现集肤效应(Skin effect),从而导致器件产生较大的栅阻,导致最高振荡频率 $f_{\max}$ 无法得到提高<sup>[35]</sup>。为了解决这些问题,栅槽和一系列栅结构(T栅、r栅、 $\tau$ 栅)得以出现。

2012年,Zhou等制作了T形栅和Y形栅并将其进行对比<sup>[36]</sup>,HEMT结构采用 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ 双异质结结构, $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ 层可以看做背势垒起到抑制短沟道效应的作用,高Al组分的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 层作为势垒层以提高2DEG的浓度,上方有一GaN盖帽层用来提高势垒高度。结果表明,T栅HEMT能够很好地抑制电流崩塌效应,但是频率特性受到影响;而Y型栅很好地提高了 $f_T$ 和 $f_{\max}$ ,输出功率密度和功率附加效率都得到了提高,这是因为Y栅的栅长较短并且有较低的寄生电容。

肖特基栅存在高的栅泄漏电流和低的击穿电压等问题,使用金属-绝缘体-半导体栅能有效抑制栅泄漏电流并提高击穿电压。为了使HEMT功率器件更适应CMOS工艺,首尔大学的研究人员<sup>[37]</sup>使用TaN材料取代Au应用于源漏栅电极,结合 $\text{HfO}_2$ 栅绝缘层,制成硅衬底MOS-HEMT。

TaN材料具有电阻率低、功函数高和热稳定性好等特点,通过优化TaIn材料的溅射功率和退火温度,器件获得了低导通电阻( $3.58\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )和高击穿电压(1.4 kV),表现出良好的潜质。

栅槽是指在AlGaIn势垒层上做一个凹槽,使栅和沟道之间的距离减小,从而加强栅对沟道的控制能力。该结构有利于克服电流崩塌效应及短沟道效应。饱和电流随栅槽深度的增大而减小,最大跨导随栅槽深度的增大而增大<sup>[38]</sup>。2014年,Choi等<sup>[39]</sup>制作了一种具有槽栅结构的金属-绝缘体-半导体HEMT(MIS-HEMTs),他们采用了一种新颖的 $\text{SiN}_x/\text{HfO}_2$ 双栅绝缘层结构,如图14所示。他们先用等离子体增强原子层沉积(PEALD)设备生长了一层5 nm的高质量 $\text{SiN}_x$ ,然后再生长一层 $\text{HfO}_2$ ,得到了良好的器件特性,阈值电压为1.65 V,击穿电压为900 V,漏泄电流小于 $10^{-9}\text{ A/mm}$ ,开态电阻为 $1.84\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。Hsieh等<sup>[40]</sup>制作的MIS-HEMTs包括槽栅结构和

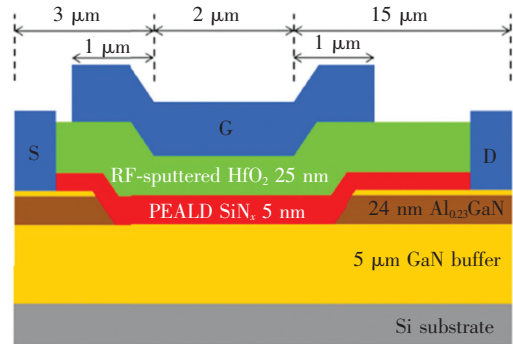


图 14 槽栅双层栅绝缘层 HEMT 结构图  
Fig. 14 Cross-sectional schematic of gate recessed GaN MIS-HEMT with 5 nm PEALD  $\text{SiN}_x/25\text{ nm}$  RF-sputtered  $\text{HfO}_2$  as gate insulator

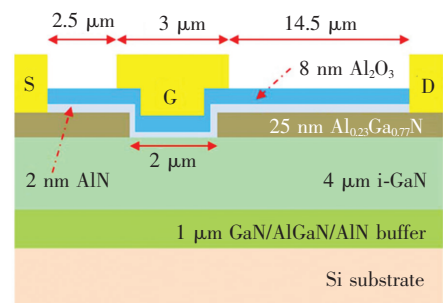


图 15 槽栅  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$  栅极绝缘层 MIS-HEMT 结构示意图  
Fig. 15 Schematic cross section of a recessed normally-OFF GaNMIS-HEMT with  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$  stacks as gate insulator

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$  栅极绝缘层, 如图 15 所示, 通过等离子增强原子层沉积在 GaN 层和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层之间制作了一层 AlN 界面钝化层, 有效减少了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  之间的界面陷阱密度。该增强型器件有着极低的阈值电压滞后和电流崩塌。

#### 4.4 器件等比例缩小

器件尺寸的缩小可以使器件的性能得到一定的提高。当栅长小于 100 nm 时, 通过等比例缩小能有效减小短沟道效应对器件性能的影响, 提高器件频率。HRL 实验室的研究人员<sup>[41]</sup>通过等比例缩小使器件获得了很好的高频特性,  $f_T$  超过 450 GHz (伴随着  $f_{\max}$  为 440 GHz),  $f_{\max}$  接近 600 GHz (伴随着  $f_T$  为 310 GHz), 这些特性有利于微波功率器件的功率放大。这一器件的研制经历了

四代过程, 第一代是纵向缩小并通过分子束外延 (MBE) 制作低电阻 GaN 欧姆接触; 第二代是横向缩小源漏电极间距, 用自对准技术制作栅极; 第三代实验  $n^+$ -GaN 与 2DEG 直接接触; 第四代是在前三代基础上使用非对称自对准栅技术制作高频性能优良器件。四代器件的结构如图 16 所示。

2015 年, HRL 实验室研究人员<sup>[42]</sup>结合自对准栅技术和欧姆接触再生技术, 制作了栅长仅有 20 nm、栅源及栅漏间距为 50 nm 的耗尽型 HEMT, 减少了外在栅电容, 提高了电子速率, 从而获得已知的最高  $f_T$  (454 GHz), 同时也获得了较高的  $f_{\max}$  (444 GHz)。

## 5 总结与展望

高频、大功率、高温和抗辐射等领域的应用, 要求 GaN HEMT 器件具有高的输出阻抗、高的击穿电压、好的夹断特性、高的截止频率等特性。虽然 GaN HEMT 器件已取得了不小的进步, 但是仍然无法完全适合于实际应用, 器件仍然存在着不少问题: 电流崩塌效应和电流泄漏的问题没有得到完全解决, 输出功率和截止频率还有很大的提升空间, 成本仍然是个大问题。所以我们需要在以下几个方面继续取得突破进展: (1) 探索电流崩塌的机制, 研究新型 GaN HEMT 结构来抑制短沟道效应和电流崩塌效应; (2) 研究新的栅结构和盖帽层, 提高钝化层的质量; (3) 兼顾器件各个方面性能的提高; (4) 解决 N 面 GaN 材料的内部杂质和缺陷问题; (5) 进一步探索器件在 Si 衬底上的生长, 降低成本, 方便融入传统 Si 工艺生产中。

作为微波器件领域的代表, GaN HEMT 在未来的实际应用中必将有着广阔的空间, 国内的 GaN HEMT 研究应该更进一步地紧跟世界先进水平, 促进我国半导体产业的发展。

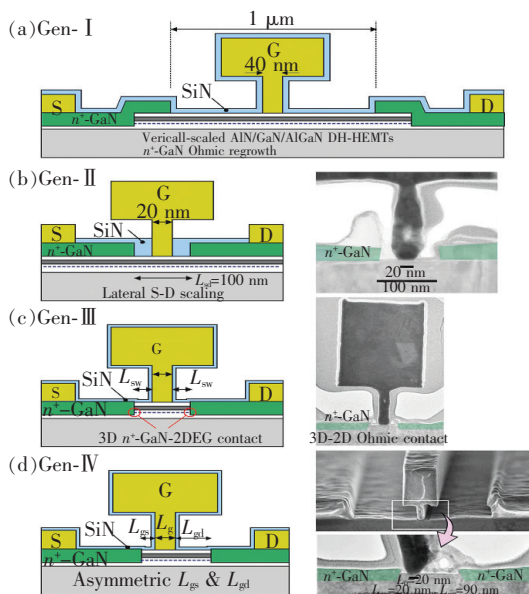


图 16 HRL 实验室 HEMT 等比例缩小实验研究过程。(a) 第一代; (b) 第二代; (c) 第三代; (d) 第四代。

Fig. 16 Technology cross sections of HRL's four GaN HEMT scaling generations. (a) Generation I. (b) Generation II. (c) Generation III. (d) Generation IV.

## 参 考 文 献:

- [1] Zhang J F, Hao Y. Current research status of GaN high electron mobility transistors [J]. *Power Electron.* (电力电子技术), 2008, 42(12):63-66 (in Chinese).
- [2] Man H W, Stacia K, Nidhi S D, et al. N-polar GaN epitaxy and high electron mobility transistors [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2013, 28(7):074009-1-7.
- [3] Kachi T. Current status of GaN power devices [J]. *IEICE Electron. Express*, 2013, 10(21):2005-2011.
- [4] Ma B X, Zhang J C, Guo L L, et al. Effects of passivation and FP structure on current collapse in an AlGaIn/GaN HEMT [J]. *Chin. J. Semicond.* (半导体学报), 2007, 28(1):73-77 (in Chinese).



- [ 5 ] Zhang X W, Jia K J, Fang Y L, *et al.* Development research of the millimeter wave GaN-based HEMT device material structure [J]. *Semicond. Technol.* (半导体技术), 2012, 37(8):634-637 (in Chinese).
- [ 6 ] Khan M A, Bhattarai A, Kuznia J N, *et al.* High-electron-mobility transistor based on a GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(9):1214-1215.
- [ 7 ] Zhong L J, Xing Y H, Han J, *et al.* Influence of growth time of AlN interfacial layer on electrical properties of AlGaN/AlN/GaN HEMT materials [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(7):830-834 (in Chinese).
- [ 8 ] Shen L, Heikman S, Moran B, *et al.* AlGaN/AlN/GaN high-power microwave HEMT [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2001, 22(10):457-459.
- [ 9 ] Zhang J C, Wang C, Yang Y, *et al.* Effect of an AlN spacer layer on AlGaN/GaN HEMTs [J]. *Chin. J. Semicond.* (半导体学报), 2005, 26(12):2396-2400 (in Chinese).
- [10] Wu Y F, Kopolnek D, Kozodoy P, *et al.* AlGaN/GaN MODFETs with low Ohmic contact resistances by source/drain n<sup>+</sup> re-growth [C]// 24th IEEE International Symposium on Compound Semiconductors, San Diego: IEEE, 1998:431-434.
- [11] Coffie R, Buttari D, Heikman S, *et al.* p-capped GaN-AlGaN-GaN high-electron mobility transistors (HEMTs) [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2002, 23(10):588-590.
- [12] Kikkawa T, Makiyama K, Imanishi K, *et al.* High  $f_{\max}$  GaN-HEMT with high breakdown voltage for millimeter-wave applications [C]// 4th IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, Portland: IEEE, 2007:32-35.
- [13] Kaufmann U, Kunzer M, Obloh H, *et al.* Origin of defect-related photoluminescence bands in doped and nominally undoped GaN [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 59(8):5561-5567.
- [14] Palacios T J, Palacios T J, Chakraborty A, *et al.* AlGaN/GaN HEMTs with an InGaN-based back-barrier [C]// Device Research Conference Digest, Santa Barbara: IEEE, 2005:181-182.
- [15] Palacios T, Chakraborty A, Heikman S, *et al.* AlGaN/GaN high electron mobility transistors with InGaN back-barriers [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2006, 27(1):13-15.
- [16] Lee D S, Gao X, Guo S, *et al.* 300-GHz InAlN/GaN HEMTs with InGaN backbarrier [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2011, 32(11):1525-1527.
- [17] Lu J, Zheng X, Guidry M, *et al.* Engineering the (In, Al, Ga)N back-barrier to achieve high channel-conductivity for extremely scaled channel-thicknesses in N-polar GaN high-electron-mobility-transistors [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2014, 35(9):0921079-1-3.
- [18] Yao Y L, Zhang J C. Progress in the development of N-polar GaN material and device [J]. *Microelectronics* (微电子学), 2013, 43(4):581-585 (in Chinese).
- [19] 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 Dev. Lett.*, 2011, 32(5):635-637.
- [20] Nidhi H, Dasgupta S, Lu J, *et al.* Scaled self-aligned N-polar GaN/AlGaN MIS-HEMTs with  $f_T$  of 275 GHz [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2012, 33(7):961-963.
- [21] Denninghoff D, Lu J, Ahmadi E, *et al.* N-polar GaN/InAlN/AlGaN MIS-HEMTs with 1.89 S/mm extrinsic transconductance, 4 A/mm drain current, 204 GHz  $f_T$  and 405 GHz  $f_{\max}$  [C]// IEEE Device Research Conference Proceedings, Univ. Notre Dame: IEEE, 2013:197-198.
- [22] Wang D, Zhou H, Zhang J, *et al.* Study on growing thick AlGaN layer on *c*-plane sapphire substrate and free-standing GaN substrate [J]. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* (中国科学:力学与天文学), 2012, 55(12):2383-2388 (in English).
- [23] Yan W, Han W H, Zhang R P, *et al.* Research progress on the process of AlGaN/GaN HEMTs [J]. *Micronanoelectron. Technol.* (微纳电子技术), 2011, 48(2):79-86 (in Chinese).
- [24] Hanawa H, Onodera H, Nakajima A, *et al.* Numerical analysis of breakdown voltage enhancement in AlGaN/GaN HEMTs with a high-*k* passivation layer [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2014, 61(3):769-775.
- [25] Green B M, Chu K K, Chumbes E M, *et al.* The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaN/GaN HEMTs [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2000, 21(6):268-270.
- [26] Tang Z, Huang S, Jiang Q, *et al.* High-voltage (600-V) low-leakage low-current-collapse AlGaN/GaN HEMTs with AlN/SiN<sub>x</sub> passivation [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2013, 34(3):366-368.

- [27] Hwang Y, Ahn S, Dong C, *et al.* High breakdown voltage in AlN/GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistors [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2014, 32(5):2166-2746.
- [28] Mo J H, Cai S J. Summarize for the investigation of the field-plate structure in GaN-based HEMT [J]. *Semicond. Technol.* (半导体技术), 2006, 31(6):401-405 (in Chinese).
- [29] Okamoto Y, Ando Y, Miyamoto H, *et al.* An 80W AlGaIn/GaN heterojunction FET with a field-modulating plate [C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Philadelphia: IEEE, 2003:225-228.
- [30] Ando Y, Wakejima A, Okamoto Y, *et al.* Novel AlGaIn/GaN dual-field-plate FET with high gain, increased linearity and stability [C]// IEEE International Electron Devices Meeting, Washington: IEEE, 2005:585-588.
- [31] Bahat-Treidel E, Hilt O, Brunner F, *et al.* AlGaIn/GaN/AlGaIn DH-HEMTs breakdown voltage enhancement using multiple grating field plates (MGFPs) [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2010, 57(6):1208-1216.
- [32] Xie G, Xu E, Lee J, *et al.* Breakdown-voltage-enhancement technique for RF-based AlGaIn/GaN HEMTs with a source-connected air-bridge field plate [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2012, 33(5):670-672.
- [33] Kobayashi K, Hatakeyama S, Yoshida T, *et al.* Current collapse suppression in AlGaIn/GaN HEMTs by means of slant field plates fabricated by multi-layer SiCN [J]. *Solid-state Electron.*, 2014, 101(s):63-69.
- [34] Kobayashi K, Hatakeyama S, Yoshida T, *et al.* Improved breakdown voltage and RF characteristics in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors achieved by slant field plates [J]. *Appl. Phys. Express*, 2014, 7(9):0965019-1-7.
- [35] Zhang X C. Short Channel Effects and Structure Optimization of Millimeter-wave AlGaIn/GaN HEMT [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013 (in Chinese).
- [36] Zhou J J, Dong X, Kong C, *et al.* Developing the Ka-band GaN power HEMT devices [C]// 2012 5th Global Symposium on Millimeter Waves, Harbin: IEEE, 2012:617-620.
- [37] Ogyun S, Min W H. AlGaIn/GaN MOS-HEMTs-on-Si employing sputtered TaN-based electrodes and HfO<sub>2</sub> gate insulator [J]. *Solid-state Electron.*, 2015, 105:1-5.
- [38] Wang C, Quayn S, Zhang J F, *et al.* Simulation and experimental investigation of recessed-gate AlGaIn/GaN HEMT [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2009, 58(3):1966-1970 (in Chinese).
- [39] Choi W, Seok O, Ryu H, *et al.* High-voltage and low-leakage-current gate recessed normally-off GaN MIS-HEMTs with dual gate insulator employing PEALD-SiN<sub>x</sub>/RF-sputtered-HfO<sub>2</sub> [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2014, 35(2):175-177.
- [40] Hsieh T, Chang E Y, Song Y, *et al.* Gate recessed quasi-normally off Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/GaN MIS-HEMT with low threshold voltage hysteresis using PEALD AlN interfacial passivation layer [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2014, 35(7):732-734.
- [41] Shinohara K, Regan D C, Tang Y, *et al.* Scaling of GaN HEMTs and Schottky diodes for submillimeter-wave MMIC applications [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2013, 60(10s):2982-2996.
- [42] Tang Y, Shinohara K, Regan D, *et al.* Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with  $f_T/f_{max}$  of 454/444 GHz [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2015, 36(6):549-551.



于宁(1990 -),男,山东烟台人,硕士研究生,2013年于常州大学获得学士学位,主要从事 GaN HEMT 器件及探测器方面的研究。  
E-mail: yuning@emails.bjut.edu.cn



朱彦旭(1977 -),男,河北秦皇岛人,博士,副教授,2007年于北京工业大学获得博士学位,主要从事 GaN HEMT 器件、半导体发光二极管、激光器、太阳能电池等半导体器件的研究。  
E-mail: zhuyx@bjut.edu.cn