

复合漏电模型建立及阶梯场板 GaN 肖特基势垒二极管 设计研究*

刘成¹⁾, 李明¹⁾, 文章¹⁾, 顾钊源¹⁾, 杨明超¹⁾, 刘卫华¹⁾, 韩
传余¹⁾, 张勇²⁾, 耿莉^{1)†}, 郝跃³⁾

1) (西安交通大学微电子学院, 西安市微纳电子与系统集成实验室,
西安 710049)

2) (西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

3) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

准垂直 GaN 肖特基势垒二极管 (SBD) 因其低成本和高电流传输能力而备受关注。但其主要问题在于无法很好地估计器件的反向特性, 从而影响二极管的设计。本文考虑了 GaN 材料的缺陷以及多种漏电机理, 建立了复合漏电模型, 对准垂直 GaN SBD 的特性进行了模拟, 仿真结果与实验结果吻合。基于此所提模型设计出具有高击穿电压的阶梯型场板结构准垂直 GaN SBD。根据漏电流、温度和电场在反向电压下的相关性, 分析了漏电机理和器件耐压特性, 设计的阶梯型场板结构准垂直 GaN SBD 的 BFOM 达到 73.81 MW/cm^2 。

关键词: GaN 肖特基二极管, 漏电流, 击穿电压, 阶梯型场板

PACS: 73.40.Kp, 72.80.Ey, 73.40.Qv, 07.07.Df

基金:国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFB0404102)

† 通讯作者. E-mail: gengli@mail.xjtu.edu.cn, lwhua@xjtu.edu.cn

1 引言

GaN 作为第三代半导体的代表, 因其具有高击穿场^[1, 2]、高电子饱和速度^[3]等优异的物理特性, 已经成为高频、快速开关速度^[4]、高工作温度功率器件的理想选择。垂直 GaN SBD 引入了更均匀的电场和电流分布, 这使得高电流的良好传输成为可能^[5], 同时, 在处理高击穿电压、低反向漏电流时, 表现出更大的优势^[6]。然而, 由于垂直 GaN SBD 器件衬底成本高, 限制了其商业发展, 因

此，在蓝宝石衬底上生长的准垂直 GaN SBD 结构受到广泛关注。

漏电流是准垂直 GaN SBD 反向特性的关键参数，漏电流仿真对于器件的优化非常重要。然而，与漏电流相关的物理模型的不准确性给准垂直 GaN SBD 的设计带来了很大的困难。在 Bouzid 等人的研究中，考虑受体陷阱对准垂直 GaN SBD 反向漏电流的影响，通过电流-电压关系分析受体陷阱状态的影响^[7]。然而，对 $10^{-5}/\text{cm}^2$ 以上相对较高的反向电流密度所对应的相对较高的电场的研究仍然缺乏。由于 GaN 材料的大量缺陷和其他复杂的漏电机理，使用硅基器件物理模型模拟的反向漏电流表现出不可靠的值^[8]。因此，与漏电流相关的物理模型仍亟待进一步的研究。本文深入研究了与 GaN 功率器件相关的物理模型，基于所提出的新型复合器件漏电模型，模拟了 SBD 的反向 J - V 曲线，它与 Bian 等人的实验所得的反向 J - V 曲线^[9]非常吻合。这为本文后续提出并设计的阶梯型场板准垂直 GaN SBD 提供了重要手段和依据。

击穿电压是 GaN SBD 的一个重要特性，许多研究团队都在致力于提高器件的击穿电压。金属场板（FB）是在几乎不牺牲 GaN SBD 正向特性的前提下提高其击穿电压的一种重要终端结构^[10, 11]。传统平面场板可以有效提高 GaN 功率器件的击穿电压^[6, 12]，然而，平面场板结构展宽耗尽层、改善电场分布的能力难以与器件电学性能的期望相匹配。阶梯型场板结构作为复合场板结构的代表，是提高器件击穿电压的更好选择。

2 准垂直 GaN SBD 的复合漏电模型

2.1 器件漏电机理的物理模型

本研究结合若干已有的 GaN SBD 漏电流测试结果，从适用于 GaN 功率器件的仿真模型^[13, 14]获得如表 1 所示的 GaN SBD 复合漏电模型，并选取其中关键

物理模型进行说明。

表 1 GaN SBD 漏电模型及应用范围

Table 1. Summary of GaN SBD leakage current simulation models

模型种类	物理模型	应用范围
状态模型	能带变窄模型	不限
	不完全电离模型	较高掺杂
隧穿模型	陷阱辅助隧穿模型	缺陷相关材料
	非局域隧穿模型	较高电场
	肖特基隧穿模型	不限
复合模型	Auger复合模型	不限
	SRH复合模型	不限
迁移率模型	Albrecht 模型	较低电场
	GaN 饱和迁移率模型	较高电场
	平行电场迁移率模型	不限
电离模型	Selberherr电离模型	不限

不完全电离模型主要用来描述 GaN 中掺入的杂质不能完全电离的现象。因为半导体中载流子浓度高，降低了杂质的活化能，电离能($\Delta E_{D/A}$)与载流子浓度的关系模型公式为

$$\Delta E_{D/A} = \Delta E_{D/A,0} - \alpha_{n/p} \left(N_D^+ / N_A^- \right)^{1/3} \tag{1}$$

式中： $\Delta E_{D,0}$ 和 $\Delta E_{A,0}$ 是低掺杂水平下的施主和受主电离能。 N_D^+ 和 N_A^- 是原始受主和施主浓度的电离对应物。电离率 (α_n 和 α_p) 的值均设置为 $3.4 \times 10^{-6} \text{ meV}\cdot\text{cm}$ 。^[15]

考虑到 GaN 中的缺陷^[16]，本文采用陷阱辅助隧穿 (PAT) 模型来更准确地描述载流子传输过程，其中，电子从金属-半导体界面处的陷阱能级激发并隧穿进入 GaN SBD 中的导带^[17]。在接下来的研究工作中，本文通过定义受主陷阱能级及能量密度和能级位置来描述 GaN SBD 的声子辅助隧穿过程。

在肖特基势垒隧穿 (SBT) 模型中，通过假设肖特基势垒表面存在缺陷，

使得肖特基势垒变薄^[18]，从而增加了隧穿电流。隧穿电流 J_T 是肖特基接触附近的局部隧穿速率积分的函数，可以表示为

$$J_T = \frac{A^* E}{k} \left[\Gamma(E) \frac{1 + f_s(E)}{1 + f_m(E)} \right] dE \quad (2)$$

式中： $\Gamma(E)$ 表示隧穿概率， E 表示肖特基势垒表面的载流子能量， $f_s(E)$ 和 $f_m(E)$ 分别是半导体和金属中的 Fermi-Dirac 分布函数。

非局域隧穿（NT）模型主要用来描述能带间载流子的隧穿行为，对于描述 GaN SBD 的漏电流起主要作用^[19, 20]。如器件中存在足够高的电场，则局部能带弯曲足以允许电子从价带隧穿到导带。为了检验 SBT 模型和 NT 模型对准垂直 GaN SBD 漏电流的影响，提取了仿真和实验的反向 $J-V$ 实验测试曲线，实验对比模型使用图 1(c)中插图的结构^[9]，对比结果如图 1(a)、(b) 所示。从对比结果可以看出，SBT 模型和 NT 模型分别修正了漏电流小于/大于 $10^{-3}/\text{cm}^2$ 时对应的反向 $J-V$ 曲线，通过这些模型的修正作用，使得到的反向 $J-V$ 仿真曲线能够较为全面地反映不同反向电压下对应的漏电流传输情况。

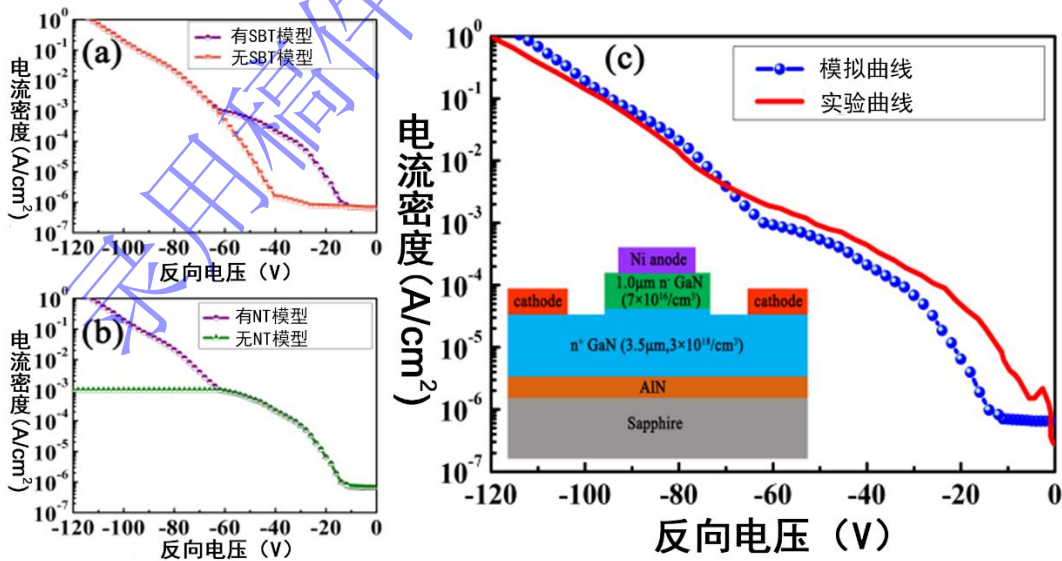


图 1 准垂直 GaN SBD 关键仿真模型：(a) SBT 模型；(b) NT 模型；(c) 准垂直 GaN SBD 的仿真和文献[9]提取的反向 $J-V$ 实验测试曲线比较。插图给出了仿真的器件结构。

Fig. 1. Key simulation model of quasi-vertical GaN SBDs: (a) SBT model; (b) NT model. (c)

Simulated and related experimental reverse J - V curves of the quasi-vertical GaN Schottky diode with the same structure as [9]. The inset shows the simulated device structure.

GaN 饱和迁移率模型用于描述高电场下载流子的行为，其中，在高电场情况下，饱和迁移率 $v_{h,sat}$ 设置为 7×10^6 cm/s。此外，Albrecht 模型^[21]是通过在迁移率中定义“albrct.n”来选择的，主要用于描述低电场中载流子的输运过程，这使得模拟结果与实验结果之间具有更好的一致性。

2.2 复合漏电模型的验证

为了验证本文提出的复合漏电模型的有效性，将采用复合模型仿真得到的反向 J - V 曲线与从文献[9]中对应结构的漏电流测试曲线进行了比较，如图 1(c) 所示，两者匹配很好，证明了所提复合漏电模型的合理性和准确性。

3 准垂直 GaN SBD 的设计

3.1 器件结构

在准垂直 GaN 器件的实际功率应用中，需要保证器件的击穿电压足够高。通过降低 n^- GaN 层掺杂浓度是提高准垂直 GaN 器件击穿电压的有效途径，但不可避免地会增加器件的导通电阻，影响器件的正向特性。为了提高准垂直 GaN SBD 的击穿电压，本文对几种场板结构进行了比较和讨论。

图 2 显示了几种不同场板结构仿真的准垂直 GaN SBD 的截面。在蓝宝石衬底上先构建掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的 $1 \mu\text{m}$ 厚 n^+ GaN 层，然后构建掺杂浓度为 $8 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的 $5 \mu\text{m}$ 厚的 n^- GaN 漂移层，器件长度均为 $300 \mu\text{m}$ ，阳极电极长度为 $80 \mu\text{m}$ ，阴极长度为 $40 \mu\text{m}$ 。为了减轻 n^- GaN 漂移区侧壁的局部电场集中效应并削弱深刻蚀工艺带来的刻蚀深度误差，在器件结构的设计过程中考虑了两步刻蚀工艺。第一步刻蚀深度为 $1.4 \mu\text{m}$ ，第二步腐蚀深度为 $3.6 \mu\text{m}$ ，器件表面淀积的钝化层厚度为 300nm 。

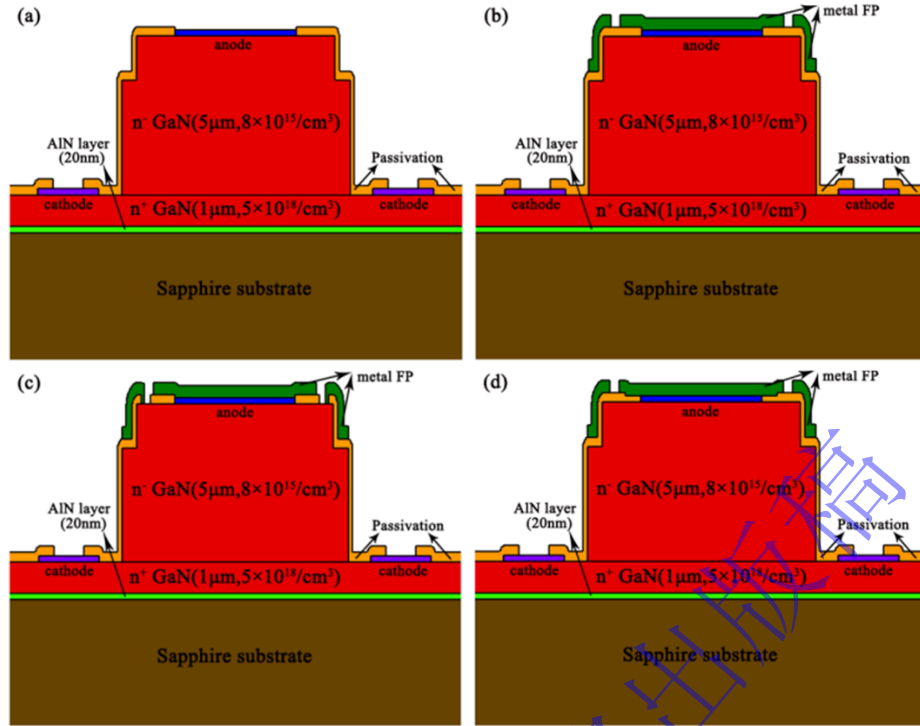


图 2 几种准垂直 GaN SBD 截面示意图: (a)无场板结构; (b)平面型场板结构; (c)接触型场板结构; (d)阶梯型场板结构。

Fig. 2. Cross-sections of different quasi-vertical GaN SBDs: (a) without FP; (b) with plane FP; (c) with contacted FP; (d) with stepped FP.

图 2(a) 展示了不含任何终端结构的常规器件结构。在图 2(b)展示了平面型场板结构，其中金属场板设计在 Ni/Al 肖特基阳极和钝化层周围。而 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 钝化层结合了 Si_3N_4 的高临界击穿场强和 SiO_2 的高稳定性、高强度的优点^[22, 23]，是准垂直型 GaN SBD 钝化层的一种可行选择。图 2(c)给出了接触型场板 GaN SBD 的结构图，其中金属场板与钝化层接触，可以通过与平面型场板结构进行比较，可获得金属场板与钝化层的相对位置对器件反向电学特性的影响。为了进一步减小 n^- GaN 漂移区边缘的电场集中效应，本文提出了图 2(d)所示的阶梯型场板结构，通过图 2(b)所示的平面型场板结构与图 2(d)所示的阶梯型场板结构的对比，来验证阶梯型场板结构对于改善准垂直 SBD 器件反向电学特性的有效性。

3.2 不同场板结构的反向特性

图 3(a)显示了不同场板结构的准垂直 GaN SBD 的电流密度 J 与反向电压 V 的关系。将反向漏电流密度为 1 A/cm^2 对应的反向电压设置为器件的击穿电压。当反向电压大于 300 V 时，与其他带场板的结构相比，阶梯型场板结构反向漏电流降低 2-4 个数量级，反向击穿电压明显改善。相对于图 3 (b)平面型场板结构，阶梯型场板结构的击穿电压有 30 V 以上的提升；而相对于图 3 (a)的无场板结构，击穿电压更是提高了约 230 V 。此外，与传统平面场板结构相比，阶梯型场板结构仅需要多出几个蚀刻步骤，不会显著增加制造过程的复杂性。

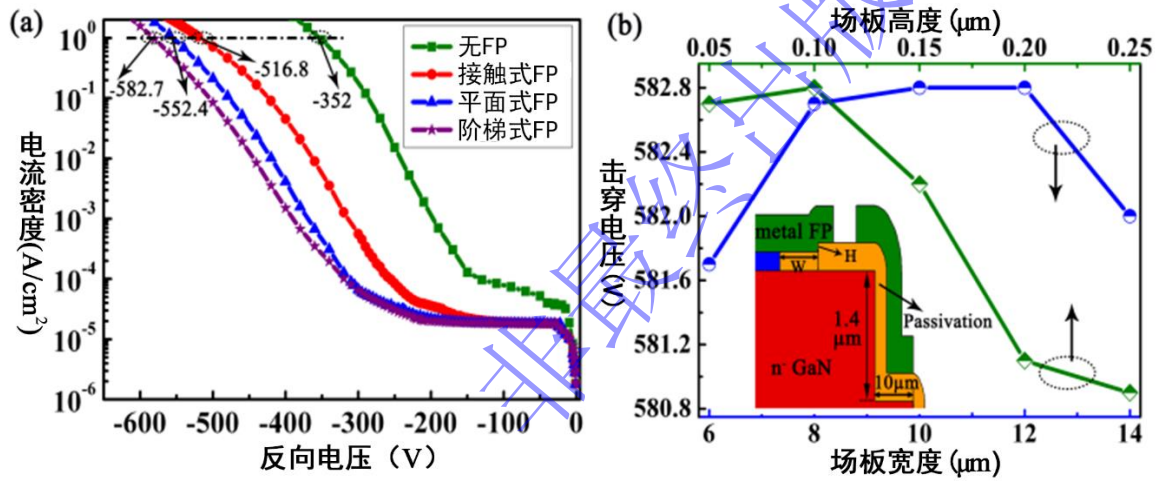


图 3 (a)不同场板终端结构的准垂直 GaN SBD 的反向 J - V 特性曲线；(b)阶梯型场板结构的几何参数与击穿电压的关系曲线（插图展示了阶梯型场板的结构示意图）

Fig. 3. (a) Reverse J - V curves of the quasi-vertical GaN SBDs with various FP structures; (b) Breakdown voltage of the stepped FP structure versus its geometric parameters. The inset shows the schematic diagram and geometric parameters of the stepped FP.

然后对阶梯型场板的结构几何参数进行优化，以改善准垂直 GaN SBD 的反向电学特性。采用控制单一变量的方法，依次改变阶梯型场板的阶梯高度和宽度，得到如图 3(b)所示的数据结果。根据图 3(b)的数据可以看出：当阶梯型场板的阶梯高度和长度分别取 0.1 μm 和 10 μm 时，反向击穿电压(BV)达到最大值。

3.3 电场分布

图 4(a)-(d)展示了不同场板终端结构的准垂直 GaN SBD 在 550V 反向电压下的电场分布图。图 4(a)展示了不含任何终端结构的常规器件结构；图 4(b)为平面型场板结构，金属场板设计在 Ni/Al 肖特基阳极和钝化层周围。图 4(c)给出了接触型场板结构图，其中金属场板与钝化层接触。图 4(d) 为本文提出的阶梯型场板结构。由电场分布图可以看出：阶梯型场板结构中 n^- GaN 漂移层的电场分布更加均匀，电场集中效应明显改善。由此推断，阶梯型场板具有较强的展宽耗尽层宽度的能力，从而有效降低器件表面和边缘的局部电场集中效应，使得最容易发生击穿的器件表面和边缘的电场分布得以改善，避免了器件过早击穿。

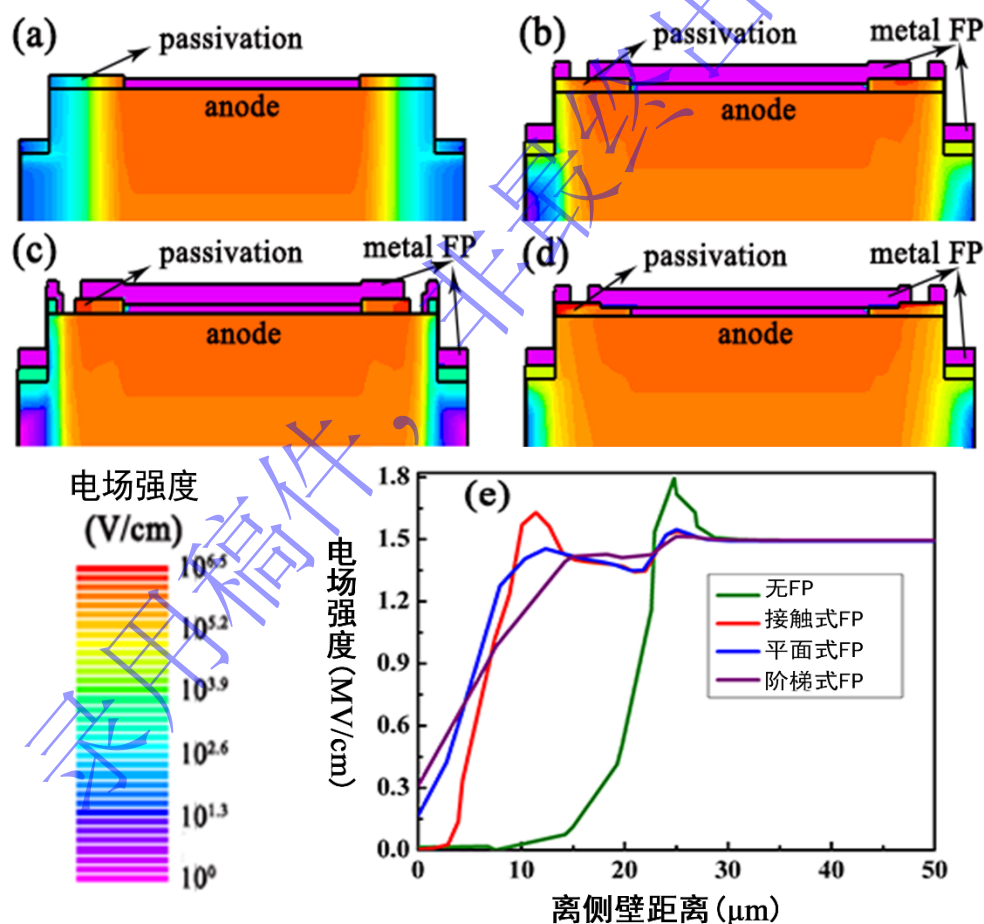


图 4 不同场板终端结构的准垂直 GaN SBD 的电场分布图：(a)无场板结构；(b)平面型场板结构；(c)接触型场板结构；(d)阶梯型场板结构；(e)不同场板终端结构 GaN SBD 的 n^- GaN 漂移层电场分布曲线

Fig. 4 Electric field distribution diagrams of the quasi-vertical GaN SBDs with various FP

structures: (a) without FP; (b) with plane FP; (c) with contacted FP; (d) with stepped FP. (e)

Electric field distribution curves of n^- GaN layers for different FP structures.

如图 4(e)所示, 本文沿着肖特基电极与 n^- GaN 漂移层的界面处给出了几种场板结构中 n^- GaN 漂移层的电场分布曲线。在高反向电压下, 阶梯型场板通过引入次级电场峰值来降低整体电场峰值。此外, 在阶梯型场板结构中, $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 钝化层承担了更多的电场分量, 降低了 n^- GaN 漂移层需承担的电场分量。由于 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 钝化层电场峰值对应的电场强度远小于 Si_3N_4 的临界击穿场强($5 \sim 10 \text{ MV/cm}$)^[24, 25], 而 Si_3N_4 的临界击穿场强明显大于 GaN 的临界击穿场强(3.3 MV/cm)^[26], 因此阶梯型场板可以起到降低 n^- GaN 层的峰值电场强度、保护 n^- GaN 漂移层的目的。

3.4 漏电机理分析

GaN SBD 中存在的位错/缺陷使得器件的漏电流机制复杂, 常见的漏电机理包括 Poole Frenke Emission (PFE)、Variable Range Hopping (VRH)、Space Charge Limited (SCL)、Fowler-Nordheim Tunneling (FNT) 等, 这些漏电机理的漏电流与反向电压 V 、电场 E 和温度 T 的幂指数等有一定的关系。具体漏电机理可以通过确定漏电流与反向电压 V 、电场 E 和温度 T 的线性依赖关系来确定。本文主要基于阶梯型场板结构准垂直 GaN SBD 的反向 J - V 曲线仿真结果, 来分析准垂直 GaN SBD 的主要漏电机理。在高电场下, 本文主要考虑了 PFE、Schottky Barrie Tunneling (SBT) 和 FNT 等漏电机理。

基于 PFE 机制的漏电流可以描述为^[27]

$$I \propto E \exp\left(\frac{q}{kT} \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon_s}}\right) \quad (3)$$

由 ST 机制决定的漏电流为

$$I \propto T^2 \exp\left(\frac{q}{2kT} \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon_s}}\right) \quad (4)$$

基于 FNT 机制的漏电流可以表示为^[28, 29]

$$\ln(I/E^2) \propto -\frac{1}{E} \quad (5)$$

式中： E 代表 n-GaN 漂移层的最大峰值电场强度。

图 5(a) 为 330 V 以上的高反向电压下，PFE 机制对应的 $\ln(I/E)$ 与 $E^{1/2}$ 、ST 机制对应的 $\ln(I/T^2)$ 与 $E^{1/2}$ 的线性依赖关系图。可以看出 $\ln(I/E)$ 与 $E^{1/2}$ 、 $\ln(I/T^2)$ 与 $E^{1/2}$ 均呈线性关系，分别符合式 (3) 与式 (4) 所对应的漏电流表达式，证明了存在 PFE 与 SBT 漏电机理。图 5(b) 为在 330 V 以上的高反向电压下，FNT 机制对应的 $\ln(I/E)$ 与 $-1/E$ 的线性依赖关系，可以看出 $\ln(I/E)$ 与 $-1/E$ 也呈线性关系，与式 (5) 对应的漏电流表达式相符，说明了 FNT 机制在 330 V 以上高反向电压下起作用。根据以上的分析可知，在高电场下，PFE、SBT 和 FNT 机制是准垂直 GaN SBD 主要的漏电机理。

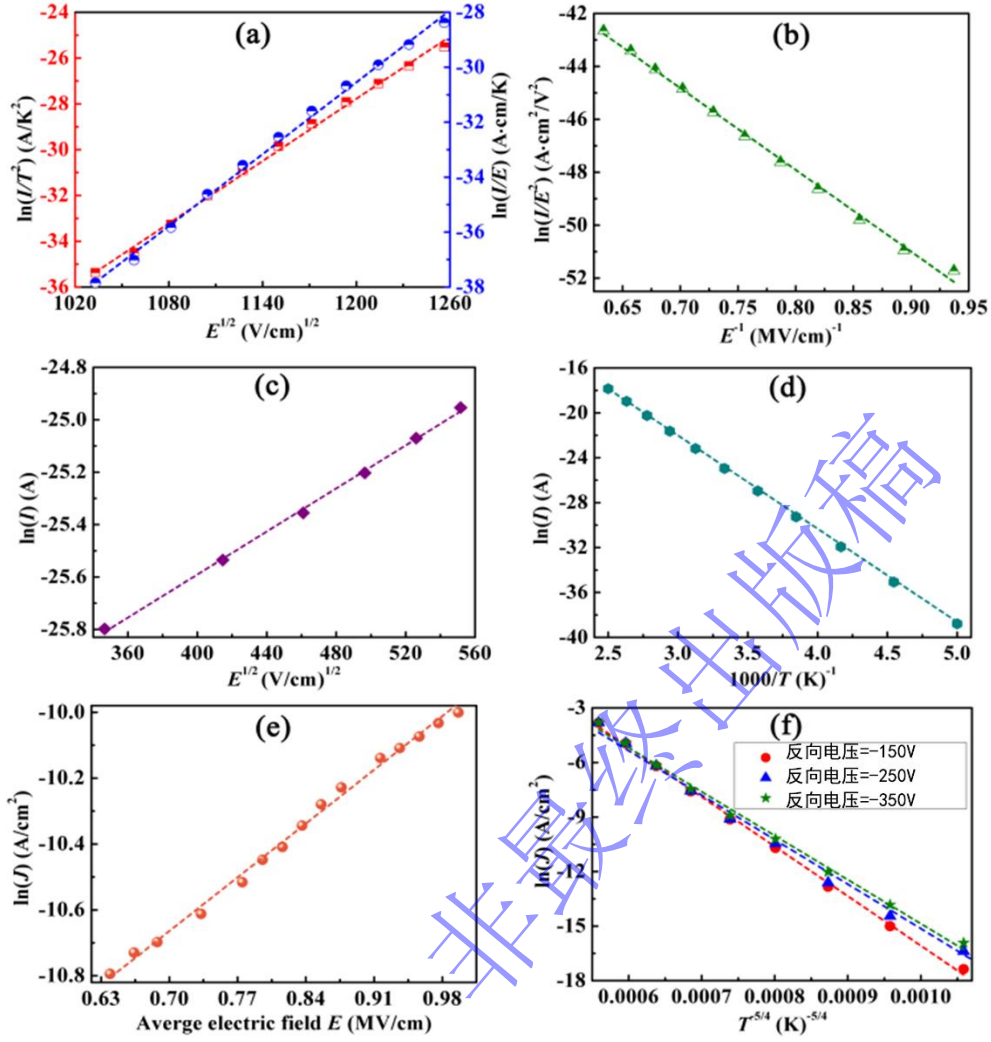


图 5 线性依赖关系图: (a)PFE 机制对应的 $\ln(I/T^2)$ 与 $E^{1/2}$ 和 SBT 机制对应的 $\ln(I/E)$ 与 $E^{1/2}$; (b) FNT 机制对应的 $\ln(I/E^2)$ 与 $1/E$; 在低电场下, 热电子发射机制对应的 (c) $\ln(I)$ 与 $E^{1/2}$ 与 (d) $\ln(I)$ 与 $1000/T$ 关系; 在中等电场强度下, VRH 机制对应的 (e) $\ln(J)$ 与 E ; (f) $\ln(J)$ 与 $T^{-5/4}$ 关系 (对应的温度范围为 220 ~ 400K)

Fig. 5 Plots of (a) $\ln(I/E)$ versus $E^{1/2}$ for PFE and $\ln(I/T^2)$ versus $E^{1/2}$ for SBT, (b) $\ln(I/E^2)$ versus $1/E$ for FNT under high reverse voltages from -580V to -330V, (c) $\ln(I)$ versus $E^{1/2}$ for thermal emission under small reverse voltages of lower than -30V, (d) temperature (200-400K) dependent plot of $\ln(I)$ versus $1000/T$, (e) $\ln(J)$ versus E and (f) $\ln(J)$ versus $T^{-5/4}$ (200-400K) for VRH under medium high reverse voltages from -300V to -120V.

但是, 当施加的反向电压低于 300 V 时, 曲线开始偏离线性关系, 表明上述漏电流机制组合不适用于反向电压相对较低的情况。在较小的反向电压下, 漏电流与温度 T 和反向电压 V 的依赖性变强, 热电子发射机制成为主要的漏电

流机制。假设热电子发射是这种情况下的主要漏电机理，其对应的漏电流表达式为

$$I_{TE} = AA^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\phi_b - \Delta\phi)}{kT}\right] \quad (6)$$

$$\Delta\phi = \left(\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (7)$$

式中： $\Delta\phi$ 为镜像力导致得势垒高度的降低量， E 为电场强度， ϵ_s 为 GaN 的介电常数， ϕ_b 为势垒高度。对式(6)、(7)求对数可得到

$$\ln(I_{TE}) = \frac{q}{kT} - \frac{q\phi_b}{kT} + \ln(AA^* T^2) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知当热电子发射机制起主要作用时，有 $\ln(I_{TE}) \propto \sqrt{E}$ 。如图 5(c)所示，在 30 V 以下对应的低反向电压下， $\ln(I)$ 和 $E^{1/2}$ 呈线性函数，说明热电子发射为主要的漏电流机制。如图 5(d)所示，在 200 ~ 400 K 的温度范围内，肖特基势垒高度 ϕ_b (0.72 eV)可以根据 $\ln(I)$ 与 $1000/T$ 的线性关系曲线的斜率来表示计算。

在 120 ~ 330 V 对应的中等反向电压下，VRH 机制用来描述载流子从一个深能级到另一个深能级可变范围跳变的物理过程，也可能在漏电机理中起重要作用。VRH 机制所描述的漏电流的表达式为^[9]

$$J = J(0) \exp\left[C \frac{eEa}{2kT} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}\right] \quad (9)$$

式中： $J(0)$ 是零电场对应的电流密度， T_0 是与 GaN 材料中与缺陷态密度相关的特征温度， E 为电场， e 为电子电荷， C 为常数， a 是电子波函数的局域半径。

为了验证 VRH 机制的有效性, 本文在反向电压为 120 ~ 300 V 的条件下求反向漏电流密度的对数值 $\ln(J_r)$ 与 E 和 $T^{5/4}$ 的函数关系。如图 5(e-f)所示, $\ln(J_r)$ 与 E 以及 $T^{5/4}$ 呈线性关系, 证明了 VRH 机制是中等强度电场下 GaN SBD 主要的漏电机制。

3.5 器件电学特性总结

最后, 本文进行阶梯型场板结构的正向 J - V 特性仿真, 并得到如图 6(a)所示的正向 J - V 特性曲线。在 2 V 的正向电压下, 阶梯型场板结构达到了超过 300 A/cm² 的正向电流密度, 电流摆幅约为 11 个数量级, 得到器件的比导通电阻 (R_{on}) 为 4.6 m Ω ·cm²。

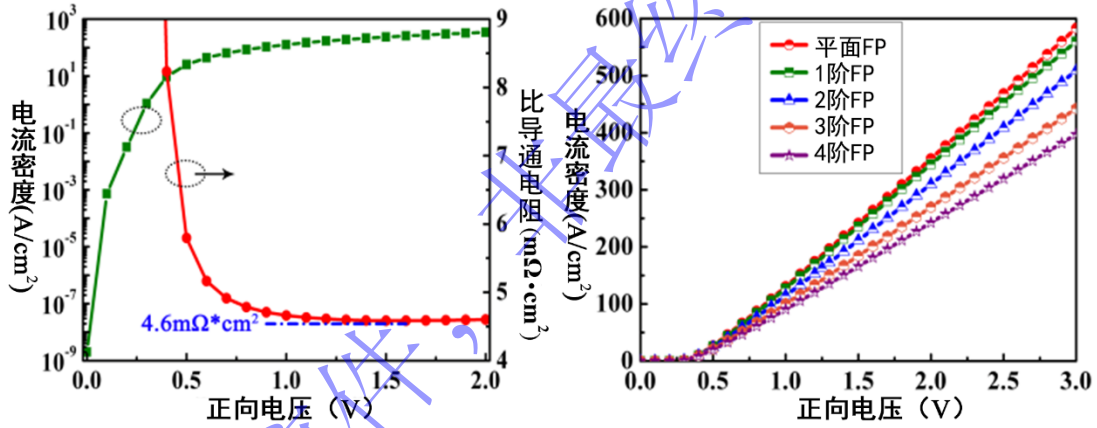


图 6 (a)含有阶梯型场板终端结构 GaN SBD 的正向 J - V 特性曲线; (b)多级阶梯型场板终端结构 GaN SBD 的正向 J - V 特性曲线

Fig. 6 (a) Forward J - V curve of the stepped FP structure; (b) Forward J - V curves of the quasi-vertical GaN SBDs with multi-stepped FP.

为了进一步说明阶梯型场板结构对改善 GaN SBD 电学特性的有效性, 本文尝试使用含有多个阶梯的多级场板结构进行了进一步研究, 得到的器件主要电学特性参数如表 2 所示。根据表 2 可知: 相对于不含阶梯的场板结构, 单级场板结构在几乎不牺牲正向电学特性的前提下, 可有效将击穿电压提升 30 V 以上。

对于多级场板结构，当增加阶梯型场板的阶数时，准垂直型 GaN SBD 的击穿电压呈现略微上升的趋势；然而器件的导通电阻明显增大，正向电学特性呈现明显恶化的趋势，如图 6(b)所示。

表 2 准垂直型 GaN SBD 多级阶梯型场板结构的主要电学参数

Table 2. Key electrical parameters of quasi-vertical GAN SBDS with multi-stepped FP

阶梯型场板结构	击穿电压(V)	开启电压(V)	导通电阻($\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	BFOM (MW/cm^2)
0 阶场板	552.4	0.42	4.4	69.35
1 阶场板	582.7	0.42	4.6	73.81
2 阶场板	584.2	0.42	5.1	66.92
3 阶场板	585.1	0.43	5.8	59.02
4 阶场板	586.4	0.44	6.5	52.90

为了综合考虑器件的整体电学特性，本文利用 Baliga 优值 BFOM ($\text{BV}^2/\text{R}_{\text{on}}$) 来描述正向电学特性和反向电学特性之间的折衷关系。如表 2 所示，单级阶梯型场板结构显示出最高的 BFOM 值，整体电学性能最优。

3.6 器件性能对比

图 7 拟合了近些年来研究文献^[9, 30-32]报道的蓝宝石衬底的准垂直 GaN SBD 击穿电压与导通电阻的散点分布图。其中 Li 等人报道的准垂直 GaN SBD 中采用新型 TiN 做肖特基金属^[33]，并代替了传统的 Ni 金属，最终得到的器件具有极低的导通电阻和高达 $119.05 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 的 BFOM 值。Gupta C 等人报道通过在 n^- GaN 漂移区上添加 p^- GaN 帽层结构^[34]，使得器件的 BFOM 高达 $104.49 \text{ MW}/\text{cm}^2$ ，然而，GaN p 型掺杂的工艺技术难点限制了其广泛应用。Bian 等人通过使用阳极选择性 F 离子处理工艺^[9, 35]，使器件的 BFOM 值从 $27.56 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 迅速提高至 $42.90 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。

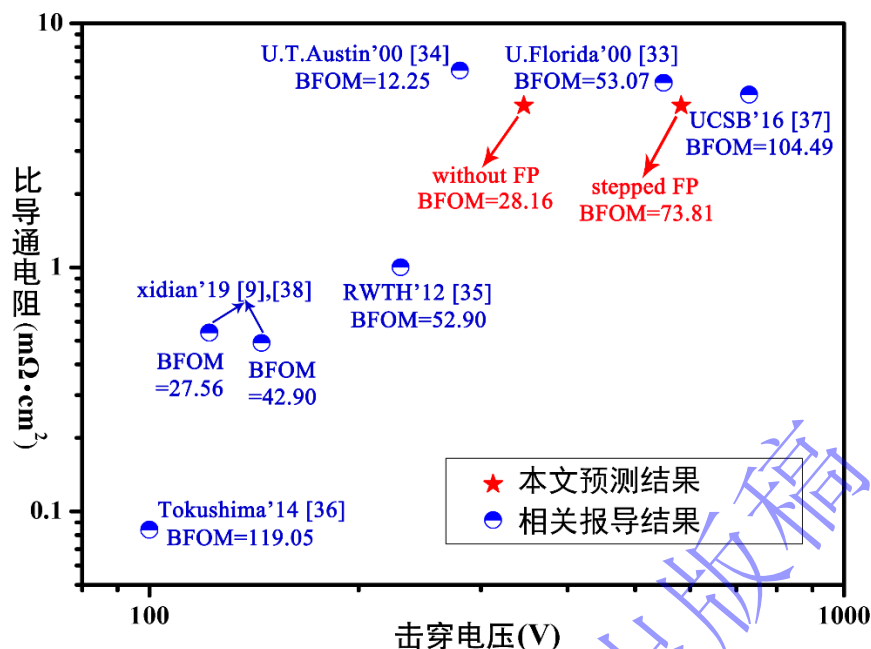


图 7 蓝宝石衬底准垂直型 GaN SBD 的击穿电压与导通电阻的对比图
(BFOM 单位为 MW/cm²)

Fig. 7. Benchmarking the breakdown voltage and on-resistance of quasi-vertical GaN SBDs on sapphire substrates.

本文通过引入阶梯型场板结构，使准垂直型 GaN SBD 的 BFOM 得到了很大的提高，达到了 73.81 MW/cm²，这说明阶梯型场板结构在高击穿电压和低导通电阻之间取得了很好的折衷，在准垂直 GaN SBD 设计中，阶梯型场板结构能够有效改善器件电学特性。

4 结论

综上所述，本文首先建立了器件的复合漏电模型，精准地描述了准垂直 GaN SBD 的反向 J - V 曲线。随后，采用场板结构来提高 GaN SBD 的击穿电压，基于构建的模型，对准垂直 GaN SBD 漏电模型和器件场板结构设计进行了设计和研究。结果表明，在不降低导通电阻的情况下，提出的阶梯型场板结构的 GaN SBD 的击穿电压得到了显著提升。进一步的分析表明，在高电场作用下，PFE、SBT 和 FNT 是准垂直 GaN SBD 主要的漏电机理。同时，在中小电场下，

热电子发射和 VRH 是主要的漏电机理。设计的单级阶梯型场板结构准垂直 GaN SBD 具有 73.81 MW/cm^2 的高 BFOM, 性能优良的准垂直器件结构的研究和开发将显著降低垂直型 GaN SBD 器件的成本, 便于推广使用, 提高其应用价值。

参考文献

- [1]Lee F C, Li Q 2013 *IEEE Trans. Power Electron.* **28** 4127
- [2]Zhang Y, Sun M, Liu Z, Piedra D, Lee H-S, Gao F, Fujishima T, Palacios T 2013 *IEEE Trans. Electron Devices* **60** 2224
- [3]Oka T 2019 *Jpn.J.Appl.Phys.* **58** Sb0805
- [4]Li Z D, Chow T P 2013 *IEEE Trans. Electron Devices* **60** 3230
- [5]Kizilyalli I C, Edwards A P, Nie H, Bui-Quang P, Disney D, Bour D 2014 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **35** 654
- [6]Saitoh Y, Sumiyoshi K, Okada M, Horii T, Miyazaki T, Shiomi H, Ueno M, Katayama K, Kiyama M, Nakamura T 2010 *Appl. Phys. Express* **3** 081001
- [7]Bouzzid F, Pezzimenti F, Dehimi L, Megherbi M L, Della Corte F G 2017 *Jpn.J.Appl.Phys.* **56** 094301
- [8]Lukasiak L, Jasinski J, Jakubowski A 2016 *12th Conference on Electron Technology (ELTE)* Wisla, POLAND, Sep 11-14, 2016 10175
- [9]Bian Z, Zhang T, Zhang J, Zhao S, Zhou H, Xue J, Duan X, Zhang Y, Chen J, Dang K, Ning J, Hao Y 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 084004
- [10]Ohta H, Kaneda N, Horikiri F, Narita Y, Yoshida T, Mishima T, Nakamura T 2015 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **36** 1180
- [11]Nomoto K, Hu Z, Song B, Zhu M, Qi M, Yan R, Protasenko V, Imhoff E, Kuo J, Kaneda N, Mishima T, Nakamura T, Jena D, Xing H G 2015 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* Washington DC, USA, Dec 7-9, 2015 pp9.7
- [12]Tanaka N, Hasegawa K, Yasunishi K, Murakami N, Oka T 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 071001
- [13]Li W, Nomoto K, Pilla M, Pan M, Gao X, Jena D, Xing H G 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 1635
- [14]Santi E, Peng K, Mantooth H A, Hudgins J L 2015 *IEEE Trans. Electron Devices* **62** 434

-
- [15]Kumar M, Bhat T N, Roul B, Rajpalke M K, Kalghatgi A T, Krupanidhi S B 2012 *Mater. Res. Bull.* **47** 1306
- [16]Cao Y, Chu R, Li R, Chen M, Chang R, Hughes B 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 062103
- [17]Yu L S, Liu Q Z, Xing Q J, Qiao D J, Lau S S, Redwing J 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 2099
- [18]Ozbek A M, Baliga B J 2011 *Solid State Electron* **62** 1
- [19]Jeong M, Solomon P M, Laux S E, Wong H S P, Chidambarrao D 1998 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, Ca, Dec 06-09, 1998 p733
- [20]Lei Y, Lu H, Cao D, Chen D, Zhang R, Zheng Y 2013 *Solid State Electron* **82** 63
- [21]Albrecht J D, Wang R P, Ruden P P, Farahmand M, Brennan K F 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 4777
- [22]Gignac L M, Parrill T M, Chandrashekhar G V 1995 *Thin Solid Films* **261** 59
- [23]Chevtchenko S A, Reshchikov M A, Fan Q, Ni X, Moon Y T, Baski A A, Morkoc H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 113709
- [24]Fujita S, Ohishi T, Toyoshima H, Sasaki A 1985 *J. Appl. Phys.* **57** 426
- [25]Vargheese K D, Rao G M 2001 *J. Vac. Sci. Technol.A* **19** 2122
- [26]Lei Y, Shi H, Lu H, Chen D, Zhang R, Zheng Y 2013 *J. Semicond.* **34** 054007
- [27]Tomer D, Rajput S, Hudy L J, Li C H, Li L 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 173510
- [28]Lenzlinger M, Snow E H 1968 *IEEE Trans. Electron Devices* **ED15** 686
- [29]Li A, Feng Q, Zhang J, Hu Z, Feng Z, Zhang K, Zhang C, Zhou H, Hao Y 2018 *Superlattices Microstruct.* **119** 212
- [30]Dang G T, Zhang A P, Mshewa M M, Ren F, Chyi J I, Lee C M, Chuo C C, Chi G C, Han J, Chu S N G, Wilson R G, Cao X A, Pearton S J 2000 *J. Vac. Sci. Technol.A* **18** 1135
- [31]Zhu T G, Lambert D J H, Shelton B S, Wong M M, Chowdhury U, Dupuis R D 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2918
- [32]Witte W, Fahle D, Koch H, Heuken M, Kalisch H, Vescan A 2012 *Semicond Sci Technol* **27** 085015
- [33]Li L, Kishi A, Liu Q, Itai Y, Fujihara R, Ohno Y, Ao J-P 2014 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **2** 168
- [34]Gupta C, Enatsu Y, Gupta G, Keller S, Mishra U K 2016 *PHYS STATUS SOLIDI A* **213** 878
- [35]Bian Z-K, Zhou H, Xu S-R, Zhang T, Dang K, Chen J-B, Zhang J-C, Hao Y 2019

Composite device model and quasi-vertical GaN SBD with stepped field plate achieving BFOM of 73.81MW/cm^{2*}

Cheng Liu¹⁾, Ming Li¹⁾, Zhang Wen¹⁾, Zhaoyuan Gu¹⁾, Mingchao Yang¹⁾, Weihua Liu¹⁾, Chuangyu Han¹⁾, Yong Zhang²⁾, Li Geng¹⁾[†], Yue Hao³⁾

1) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Quasi-vertical GaN barrier Schottky diodes have attracted much attention due to their low cost and high current transfer capability. The main problem lies that the reverse characteristics of the devices may not be well estimated, which affects the design of the diodes. In this paper, the defects of GaN materials and the leakage related tunneling mechanisms accompanying with other mechanisms are considered. Based on the established composite device models, the reverse leakage current is simulated which fits the recent experimental reports well. With the assistance of the proposed models, several field plate structures are discussed and simulated to get a quasi-vertical GaN barrier Schottky diode with high breakdown voltage. The major leakage mechanisms are also analyzed according to the linear dependence of leakage current, temperature and electric field in various reverse voltages. High BFOM up to

73.81MW/cm² is achieved by adopting the proposed stepped field plate structure.

Keywords: GaN SBD, leakage current, breakdown voltage, stepped field plate

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2017YFB0404102, 2017YFB1200902-09)

录用稿件，
非最终出版稿