

AlGaIn/GaN 场板结构高电子迁移率晶体管的 场板尺寸优化分析*

魏 巍 郝 跃 冯 倩 张进城 张金凤

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2007 年 8 月 25 日收到, 2007 年 11 月 5 日收到修改稿)

对不同场板尺寸的 AlGaIn/GaN 场板结构高电子迁移率晶体管进行了研究, 建立简化模型分析场板长度对沟道电场分布的影响. 结果表明, 调整钝化层厚度和场板长度都可以调制沟道电场的分布形状, 当场板长度较小时, 随着长度的增大器件击穿电压随之增加, 而当长度增大到一定程度后器件击穿电压不再增加. 通过优化场板长度, 器件击穿电压提高了 64%, 且实验结果与模拟结果相符.

关键词: AlGaIn/GaN, 击穿电压, 场板长度

PACC: 7280E, 7340Q

1. 引 言

AlGaIn/GaN 异质结二维电子气出色的电流处理能力使得 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 成为制造微波大功率器件的理想选择^[1]. 提高击穿电压的传统做法是增大栅漏间距 L_{GD} , 这会增加开态电阻 R_{on} , 导致器件功率特性的退化^[2]. 场板技术的出现, 使得我们不用增大栅漏间距就能提高击穿电压, 在提高击穿电压的同时得到了较低的导通电阻. 同时, 场板会减少器件直流到射频的散射效应^[3], 极大地优化了器件的高频特性, 提高了器件功率密度、功率附加效率和相关增益, 且场板在工艺中容易实现. 所以, 场板 AlGaIn/GaN HEMT 已成为近年来的一个研究热点. Chimi 等^[4]采用一种新的场板设计进一步减小了栅长, 在 4 GHz 下获得了 12 W/mm 的单位栅宽功率密度. Xing 等^[5]报道了利用多层场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 当栅长为 1.5 μm , 栅漏间距从 4 到 28 μm 变化时, 最大击穿电压为 900 V. Wu 等^[6]报道了单层场板结构器件在工作电压为 120 V, 4 GHz 时的连续波输出功率密度 32.2 W/mm. 但是, 由于目前缺少关于场板尺寸对场板器件特性的影响机理和优化分析, 因此需要作进一步的研究.

本文利用 Silvaco 软件对不同场板尺寸的 AlGaIn/GaN 场板结构 HEMT (FP-HEMT) 进行二维模拟, 分析沟道中电场分布情况, 得出场板器件击穿电压随场板尺寸变化而变化的规律. 同时, 还制作出不同场板长度、不同栅长、不同栅漏间距的 AlGaIn/GaN FP-HEMT, 通过对比不同尺寸器件的特性, 得到一个优化的场板尺寸.

2. 场板尺寸对器件的影响

利用 Silvaco 软件对 AlGaIn/GaN FP-HEMT 器件进行了仿真, 器件结构如图 1 所示. L_{GS} , L_G , L_{FP} 和 L_{FD} 分别表示器件的栅源间距、栅长、场板长度和场板与漏之间的距离, 其中 L_G 决定了栅下的渡越时间, L_{FP} 决定了重塑电场区域的尺寸, L_{FD} 用来避免预击穿. 模拟中所用的 FP-HEMT 尺寸如下: 栅长为 1 μm , 栅源间距为 1.5 μm , 栅漏间距为 3.5 μm . 影响击穿电压最重要的两个尺寸参数分别为场板长度 L_{FP} , SiN 钝化层厚度 t . 模拟中, 源偏压 V_S 、栅偏压 V_G 都设为零.

首先分析钝化层厚度 t 对器件的影响. 考虑如下两个极端情况: 当 $t = 0$ 时, 场板相当于将栅极延长了 L_{FP} , 此时由于栅漏间距减小, 击穿电压反而会

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2002CB311904) 和国家自然科学基金 (批准号: 60676048, F040402) 资助的课题.

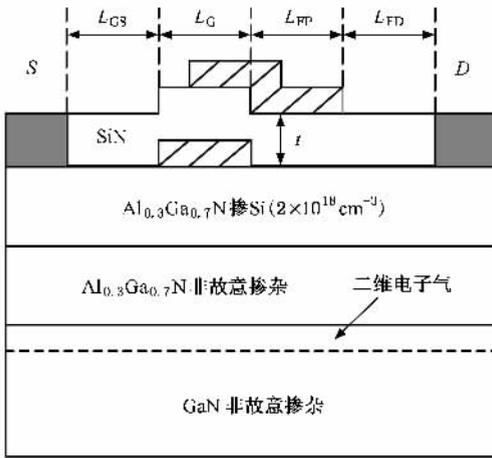


图1 场板仿真结构示意图

降低,当 t 趋向于无穷大时,场板的作用就可近似忽略,器件击穿电压也不会提高.由此可知,钝化层厚度存在一个优化值 t_{op} ,使得在其他因素不变的情况下,器件的击穿电压最高.

图2给出了不同 t 值($t = 200, 400, 800, 1200$ nm)条件下,漏偏压 $V_D = 50$ V,场板长度 $L_{FP} = 0.8$ μm 时沟道电场的分布情况.由图2可见,随着 t 值从 200 nm 变化到 1200 nm,场板下的电场峰值持续降低,而栅下面的电场峰值则持续上升.因此,通过控制钝化层厚度 t ,可以在一定程度上调制场板下电场峰值和栅下电场峰值的大小,也就是在一定程度上调制沟道电场分布的形状.

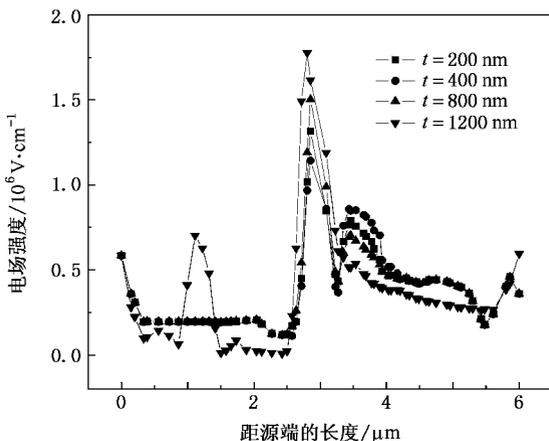


图2 不同钝化层厚度对电场分布的影响

进一步分析场板长度 L_{FP} 对击穿电压的影响.考虑如下两个极端情况,当场板长度 $L_{FP} = 0$ 时,相当于没有做场板的情况,击穿电压没有升高;当场板

长度 L_{FP} 增加到一定程度后,由于场板与漏端的距离减少,会引起击穿电压的降低.因此,场板长度 L_{FP} 也存在一个优化值.

图3给出了 $t = 800$ nm, $V_D = 100$ V 时,其他因素不变仅改变场板长度 L_{FP} 引起的电场分布变化情况.器件的源端、漏端和栅极两侧都存在一个电场峰值.当 $L_{FP} = 0$ 时,也就是没有场板时,栅靠近漏端边缘的电场峰值尤其高,从而导致器件过早击穿.当 $L_{FP} > 0$ 时,场板靠近漏端边缘处形成一个电场峰值,有效降低了栅两侧的电场峰值,特别是靠近漏端的栅边缘电场峰值,从而提高了击穿电压.随着场板长度的变化,沟道电场分布也发生变化.分析模拟表明,当场板长度 L_{FP} 较小时,随着 L_{FP} 的增大栅靠近漏端边缘的电场峰值显著下降,场板靠近漏端边缘处电场峰值则有所上升(图3中 L_{FP} 从 0 变化到 0.8 μm 的趋势),沟道最大电场峰值下降.当 L_{FP} 增大到一定程度后,栅下电场峰值不再随 L_{FP} 增大而下降,场板靠近漏端边缘处电场峰值也近似不变(图3中 L_{FP} 从 1.2 μm 变化到 1.4 μm 的趋势),此时的沟道最大峰值也不再下降.值得注意的是,随着 L_{FP} 增大,漏端电场峰值一直在增加,相对于栅和场板下的电场峰值,漏电场峰值较小.但是,当场板与漏端距离 L_{FD} 小到一定程度后,漏端电场峰值就可能高过栅或者场板下的电场峰值,从而在漏端发生击穿.

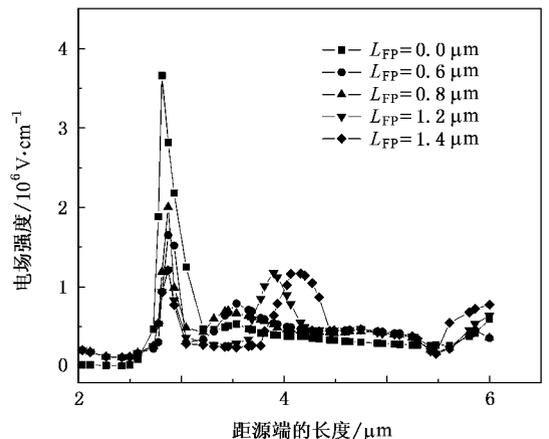


图3 不同场板长度对电场分布的影响

为了更深入地分析栅电场峰值和场板电场峰值随场板长度 L_{FP} 变化的趋势,我们建立了一个简化模型(图4)来代表栅和场板下沟道的电场分布.图4中的三角形区域 A 和三角形区域 C 分别表示栅近

漏端和场板近漏端下方的沟道电场分布,而区域 B 表示三角形区域 A 和三角形区域 C 之间的弧形区域.显然,三个区域的总面积可以近似为漏偏压 V_d .为了提高击穿电压,就需要在增大总面积的同时不升高电场峰值(也就是电场峰值不随着漏偏压的增大而升高),而增大三角形区域 A 和三角形区域 C 的面积都会导致电场峰值的升高.因此,区域 B 面积在提高击穿电压上有至关重要的作用.当场板长度 L_{FP} 很小时,三角形区域 A 和三角形区域 C 近似重叠,区域 B 的面积(也就是降在区域 B 上的偏压)很小,此时,场板对击穿电压提高的作用不明显.随着场板长度 L_{FP} 增大,区域 B 面积逐渐增大,击穿电压随着场板长度 L_{FP} 增大而升高.但是当场板长度 L_{FP} 增大到一定程度后,栅和场板两个峰值完全分离(图 5),此时,区域 B 面积不再随场板长度 L_{FP} 的增大而增大,击穿电压也不再升高.图 3 所示的电场峰值变化趋势也能通过我们的简化模型得到很好解释: V_D 固定,即总面积不变的情况下,显然电场峰值先随场板长度增加而减小,场板长度增大到一定程度后,由于两个三角形峰值完全分离,场板的增大不再引起电场峰值的降低.

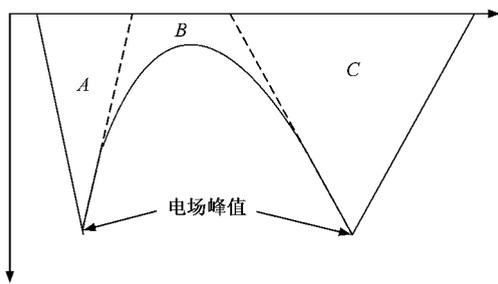


图 4 电场分布简化模型

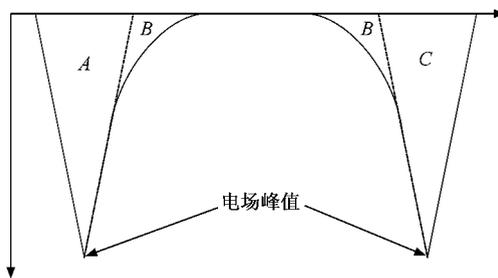


图 5 场板长度较大时的电场分布

综合分析结果可知,调整钝化层厚度 t 和场板长度 L_{FP} 都可以调制沟道电场分布形状.当场板长度

L_{FP} 较小时,随着 L_{FP} 的增大击穿电压增加,而当 L_{FP} 增大到一定程度后,击穿电压不会再增加.实际上,场板会引入寄生电容 C_{FP} ,场板长度 L_{FP} 越大,寄生电容 C_{FP} 越大.因此,为了使场板器件更好地适合微波功率的应用,需要对场板长度 L_{FP} 进行优化,使得在提高击穿电压的同时尽量保持小的场板长度 L_{FP} .

3. 实验与分析

为了研究场板尺寸对器件特性的影响,确定适合器件的优化场板尺寸.我们制作了不同场板长度、不同栅长、不同栅漏间距的 AlGaIn/GaN HEMT 器件.实验中使用的 AlGaIn/GaN 异质结材料样品衬底为 (0001) 面单面抛光蓝宝石.先在 $520\text{ }^\circ\text{C}$ 下用金属有机物化学气相淀积法 (MOCVD) 生长厚度约为 30 nm 的 GaN 成核层,接着在高温下依次生长厚度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaN 缓冲层, 8 nm 厚的未掺杂 AlGaIn 层以及 16 nm 厚的 Si 掺杂 AlGaIn 层,其中 Si 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \sim 2.0 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$.测量得到的 AlGaIn 层的 Al 组分为 27%, Hall 效应测量显示室温下该材料的方块电阻为 $305\text{ }\Omega$,电子迁移率为 $1427\text{ cm}^2/\text{Vs}$,电子面密度为 $1.43 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$.在台面隔离之后,用电子束蒸发 Ti (20 nm) / Al (120 nm) / Ni (55 nm) / Au (45 nm) 作欧姆接触,再在 N_2 气氛下进行快速 $830\text{ }^\circ\text{C}$, 30 s 和 $200\text{ }^\circ\text{C}$, 10 s 二次退火,然后蒸发栅极 Ni (20 nm) / Au (200 nm).电子束蒸发 SiO_2 150 nm 作钝化层,最后蒸发金属 Ni (20 nm) / Au (200 nm) 作长度不同的场板.器件结构如图 6 所示,器件尺寸如表 1 所列.图 7 为栅和场板的扫描电子显微镜图像.

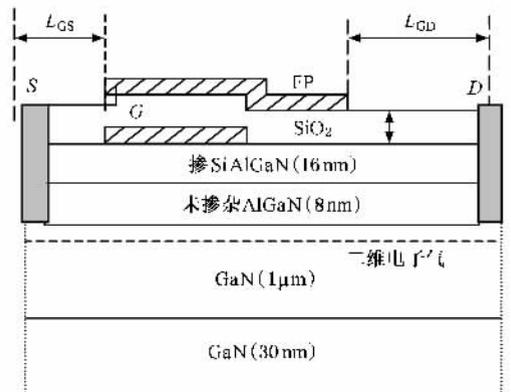


图 6 场板 AlGaIn/GaN HEMT 结构示意图

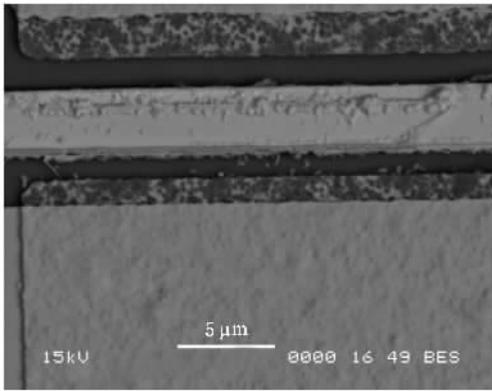


图7 栅和场板的局部扫描电子显微镜照片

表1 实验制作的器件尺寸

$L_G/\mu\text{m}$	$L_{GS}/\mu\text{m}$	$L_{GD}/\mu\text{m}$	$L_{FP}/\mu\text{m}$
1.0	1.3	3.3	0.4, 0.7, 0.9
0.8	1.3	3.3	0.6, 0.9
0.8	1.5	3.1	0.3, 0.6, 0.9
0.8	1.5	2.7	0.3, 0.6, 0.9
0.8	1.5	4.0	0.3, 0.4, 0.6, 0.9
1.2	1.5	4.0	0.7, 1.0, 1.2, 1.5
1.2	1.5	3.3	0.4, 0.7, 0.9

测试所使用的仪器为 HP4156B 型半导体参数分析仪, 安捷伦 B1500 型半导体参数分析仪和 Signatone S1160 型低噪声探针台。为了分析栅漏间距对场板器件击穿电压的影响, 对相同场板长度(0.6 μm)、栅长(0.8 μm)和不同栅漏间距(2.7, 3.1, 3.3, 4.0 μm)器件的击穿电压进行了考察。场板前击穿电压如图 8 所示。从图 8 可以看出, 场板前, 随栅漏间距的增大器件击穿电压近似呈线性增加。做完场板后器件击穿电压如图 9 所示。从图 9 可以看出, 器件击穿电压与栅漏间距间关系变弱, 随着栅漏间距增大击穿电压增加很少。

下面再研究栅长对器件击穿电压的影响。固定场板长度(0.9 μm)、栅漏间距(3.3 μm)、选取不同的栅长(0.8, 1.0, 1.2 μm)的器件来考察击穿电压, 得到如图 10 所示的结果。从图 10 可以看出, 对于不同栅长的场板器件, 击穿电压差别很小。

由于栅长对击穿电压影响很小, 我们选取栅长为 0.8, 1.2 μm , 栅漏间距为 4.0 μm 的器件, 针对不同场板长度(0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5 μm)考察场板长度对击穿电压的影响, 所得结果如图 11 所示。从图 11 可以看出: 场板长度 L_{FP} 为 0.3

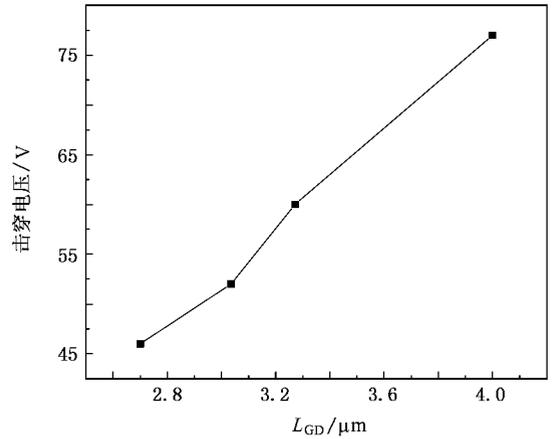


图8 做场板前栅漏间距对击穿电压的影响

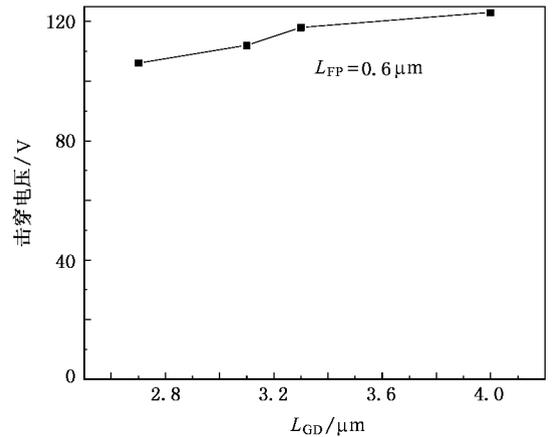


图9 做场板后栅漏间距对击穿电压的影响

μm 时, 击穿电压为 106 V。随着 L_{FP} 增大, 击穿电压也升高, 当 L_{FP} 达到 1.0 μm 时, 击穿电压为 180 V。而当 L_{FP} 大于 1.0 μm 时, 击穿电压随 L_{FP} 增大而升高很

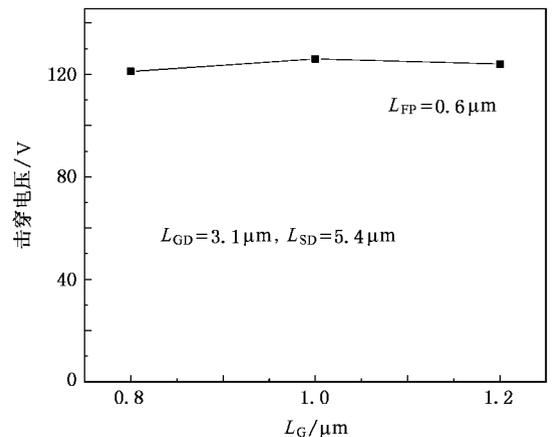


图10 做场板后栅长对击穿电压的影响

少到 L_{FP} 为 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 击穿电压为 185 V . 值得注意的是, L_{FP} 在 $0.3\text{--}1.0 \mu\text{m}$ 时, 击穿电压与场板长度的关系为非线性; 当 L_{FP} 大于 $1.0 \mu\text{m}$ 后, 可以认为尽管 L_{FP} 增大但是击穿电压几乎保持不变. 过大的场板长度会产生额外寄生电容, 从而影响器件的微波功率特性, 因此理想的场板长度应在 $0.9\text{--}1.0 \mu\text{m}$ 范围内.

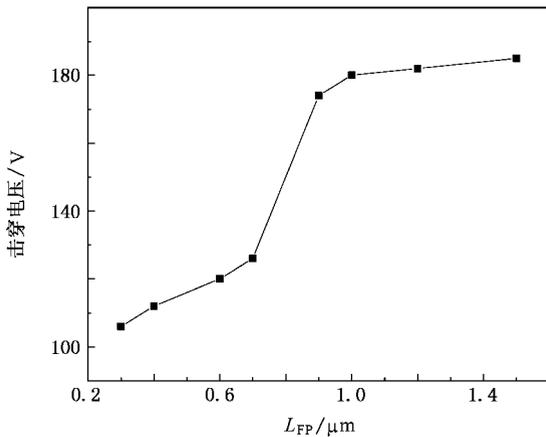


图 11 场板长度对击穿电压的影响

4. 结 论

本文利用 Silvaco 软件模拟了场板尺寸对 AlGaIn/GaN FP-HEMT 器件的影响, 并建立了一个简化模型来分析场板长度对沟道电场分布的影响. 仿真结果表明, 调整钝化层厚度 t 和场板长度 L_{FP} 都可以调制沟道电场的分布形状. 制作了不同场板尺寸的 AlGaIn/GaN FP-HEMT, 对于场板器件的栅漏间距、栅长和场板长度这三个因素而言, 场板长度对器件击穿电压的影响最大, 器件击穿电压随着场板长度增大而升高的趋势为非线性, 且当场板长度增大到一定程度后, 击穿电压不再升高. 模拟结果与实验结果符合很好. 通过对场板长度的优化, 器件的击穿电压从 110 V 左右提高到 180 V 左右. 对于我们制作的器件, 优化的场板尺寸在 $0.9\text{--}1.0 \mu\text{m}$ 之间.

感谢本实验室的马晓华老师为本文测试工作提出建议并予以帮助, 感谢倪金玉博士生长了蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 异质结材料.

- [1] Vetury R, Zhang N Q, Keller S, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Electron Dev.* **48** 560
- [2] Guo L L, Feng Q, Hao Y, Yang Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2894 (in Chinese) [郭亮良、冯倩、郝跃、杨燕 2007 物理学报 **56** 2894]
- [3] Dora Y, Chakraborty A, McCarthy L, Keller S, Denbaars P, Mishra U K 2006 *IEEE Electron Dev. Lett.* **27** 713

- [4] Chini A, Buttari D, Coffie R, Heikman S, Mishra U K 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 17
- [5] Xing H L, Dora Y, Chini A, Keller S, Mishra U K 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 161
- [6] Wu Y F, Saxler A, Moore M, Smith R P, Sheppard S, Chavarkar P M, Wisleder T, Mishra U K, Parikh P 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 117



Geometrical optimization of AlGaIn/GaN field-plate high electron mobility transistor^{*}

Wei Wei Hao Yue Feng Qian Zhang Jin-Cheng Zhang Jin-Feng

(Key Laboratory for Wide Band-gap Semiconductor Materials and Devices of Ministry of Education ,
School of Microelectronics , Xidian University , Xi'an 710071 ,China)

(Received 25 August 2007 ;revised manuscript received 5 November 2007)

Abstract

Results of investigation on AlGaIn/GaN field-plate high electron mobility transistor with different field-plate (FP) geometry are presented. The effect of the field-plate length L_{FP} on the electric field distribution in the channel is thoroughly analyzed by establishing a simplified model. The simulation gives the following estimates : Both the FP length L_{FP} and the thickness t of the insulator under the FP , can reshape the electric field distribution in the channel. If L_{FP} is short , the breakdown voltage V_{br} increases with L_{FP} . When L_{FP} increases to a certain extent , V_{br} keeps invariable. After optimizing L_{FP} in this paper , V_{br} has been increased by 64% . Good agreement between experimental and simulation data is achieved.

Keywords : AlGaIn/GaN , breakdown voltage , field-plate length

PACC : 7280E , 7340Q

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2002CB311904) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60676048 , F040402).