

栅场板对 AlGaIn/GaN HEMT 击穿特性的调控

王进军*, 徐晨昱, 杨嘉伦, 刘宇, 冯岩, 张世奇
(陕西科技大学 电子信息与人工智能学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 栅场板对提升 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)击穿电压的物理机理以及相关理论问题缺乏深入的研究。本文通过在传统的 AlGaIn/GaN HEMT 结构中引入栅场板来调控器件内部的电场分布以提高器件的击穿电压,并基于 Silvaco TCAD 软件对器件进行了建模。通过模拟计算研究了栅场板长度、厚度以及绝缘介质材料对器件沟道电场分布及击穿电压调制作用。结果表明:沟道电场峰值随栅场板长度增加而降低,但是当栅场板长度增加到某一数值继续增长的时候,反而会引发沟道电场峰值降低;栅场板厚度对沟道电场的分布几乎没有影响;栅场板下绝缘介质介电系数越大,沟道峰值电场强度越小;栅场板长度为 2.00 μm 时,器件击穿电压高达 800 V。

关键词: AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管; 击穿特性; 峰值电场; 栅场板

中图分类号: TN386 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2395(2024)01-0187-07

Regulation of Gate-field Plate on Breakdown Characteristics of AlGaIn/GaN HEMT

WANG Jinjun*, XU Chenyu, YANG Jialun, LIU Yu, FENG Yan, ZHANG Shiqi

(School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The physical mechanism and related theoretical issues of improving the breakdown voltage of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) by gate field plate are not studied deeply. In this paper, a gate-field plate is introduced into the traditional AlGaIn/GaN HEMT structure to regulate the electric field distribution within the device and increase the breakdown voltage of the device. The device is modeled based on Silvaco TCAD software. The effects of gate field plate length, thickness and insulating material on the channel electric field distribution and breakdown voltage modulation of the device are studied by simulation calculation. The results show that the peak value of the channel electric field decreases with the increase of the length of the gate field plate, but when the length of the gate field plate increases to a certain value, the peak value of the channel electric field decreases; The thickness of grid field plate has little effect on the distribution of channel electric field; The higher the dielectric coefficient of the insulating medium under the grid field plate, the smaller the peak electric field intensity of the channel; the device breakdown voltage is more than 800 V when the length of the gate field plate is 2.0 μm .

Key words: AlGaIn/GaN high electron mobility transistor; breakdown characteristics; peak electric field; gate-field plate

0 引言

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)在高频高压工作状态下,由于器件承受极高的

工作电压,栅极右侧出现电力线集聚,产生电场峰值,导致器件击穿,无法达到 GaN 材料耐压的理论极限值^[1-6]。目前,提升器件击穿电压的一种常用方法是在器件结构中引入栅场板。

收稿日期:2022-11-30;接受日期:2023-03-10

基金项目:陕西省教育厅科研计划专项项目(18JK0103)

* 通信作者:王进军(1980-),男,陕西礼泉人,硕士,副教授,研究方向为宽禁带半导体材料与器件。E-mail:wangjinjun6113@163.com

引文格式:王进军,徐晨昱,杨嘉伦,等.栅场板对 AlGaIn/GaN HEMT 击穿特性的调控[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(1):187-193. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023049

2003年 Ando 等制作的 SiC 衬底场板结构 GaN HEMT^[7], 击穿电压达到 160 V。2004年, Xing 等采用了双层场板技术^[8]使器件在 24 μm 的栅漏距离下达到了 900 V 的耐压。2006年 Dora 等提出了一种自对准“斜场极板”技术^[9]使得器件在空气中击穿电压超过 1000 V。2007年 默江辉等制作了带有栅终端场板结构^[10] GaN 基 HEMT, 栅漏击穿电压高达 120 V。2012年 Xie 等提出一种连接源极和栅漏之间的空气场板^[11], 在栅源间距 6 μm 栅极长度 0.8 μm 的情况下击穿电压达到 375 V。2018年 Kwak 等提出了一种源桥场板结构^[12]用于提高 RF (Radio Frequency) AlGaIn/GaN HEMT 的功率效率; 同年 Kabemura 等提出了 Γ 形栅场板^[13], 设计出了 500 V 的 HEMT 器件; 2018年, Bai 等提出了一种结型场板^[14]的器件击穿电压高达 1 340 V; 2019年 Kwak 等提出了一种源极桥接场板^[15]和附加底板(BP)结构, 器件最高击穿电压 341 V。2019年 Zhang 等提出了一种用于毫米波 AlGaIn/GaN HEMT 的创新型凹陷浮场板结构^[16]用于提高器件击穿电压。

综上所述, 目前的研究工作主要集中在引入栅场板对器件击穿电压的提升方面^[17], 至于栅场板对器件内部电场分布调制的物理机理以及相关理论问题缺乏深入的研究。本文在采用 Silvaco 软件中的 Atlas 器件仿真工具对栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 的器件结构建模的基础上, 通过数值计算方法研究栅场板长度、厚度以及绝缘材料对器件内部电场分布以及击穿电压的调制作用, 并对相关结论进行物理分析与解释。

1 栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 数值计算模型

栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 的器件结构如图 1 所示, 自下而上分别是 300 nm 的蓝宝石衬底、700 nm 的高阻型 GaN 缓冲层、50 nm 的非故意掺杂 (UID) GaN 沟道层、50 nm 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层、50 nm 的 SiO_2 绝缘层, 器件栅、源、漏三个电极之间用 SiO_2 绝缘层隔开。源电极为 Ti/Al/Ti/Au 复合电极, 其长度 L_s 设置为 1.8 μm ; 漏电极为 Ti/Al/Ti/Au 复合电极, 其长度 L_d 设置为 1.8 μm , 栅极 Ti/Au 为复合电极, 其长度 L_g 设置为 0.8 μm , 栅源电极间距 $L_{gs}=1.2 \mu\text{m}$, 栅漏

电极间距 $L_{gd}=2.2 \mu\text{m}$, 栅场板长度 L 在仿真过程中长度可调。

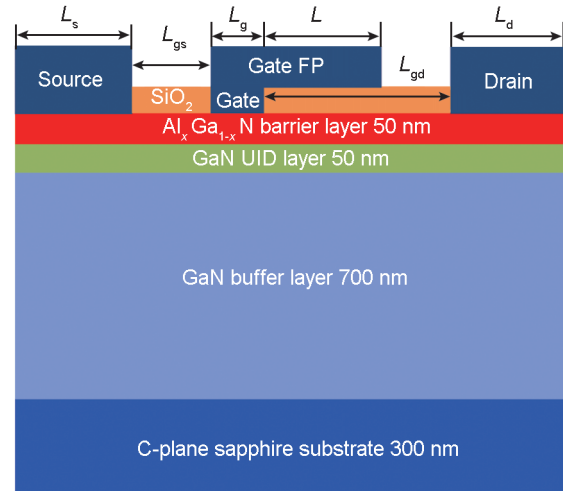


图 1 栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构

Fig. 1 Structure of gate-field plate AlGaIn/GaN HEMT device

采用 Silvaco TCAD 软件中的 Atlas 组件建立的栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 数值模拟模型如图 2 所示。非故意掺杂 (UID) GaN 沟道层 GaN 在未掺杂的情况下默认为 n 型, 背景载流子浓度设置为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率设置为 $1\ 000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。为了防止 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层中 Al 组分的高致使 AlGaIn 势垒层的表面形貌、晶体质量及 AlGaIn/GaN 界面质量下降, 应变诱生的深能级缺陷增多, 对 2DEG 的散射增强引起载流子迁移率出现退化, Al 的摩尔组分 x 取 0.25, 背景载流子浓度设置为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层和 GaN 缓冲层界面处即沟道层产

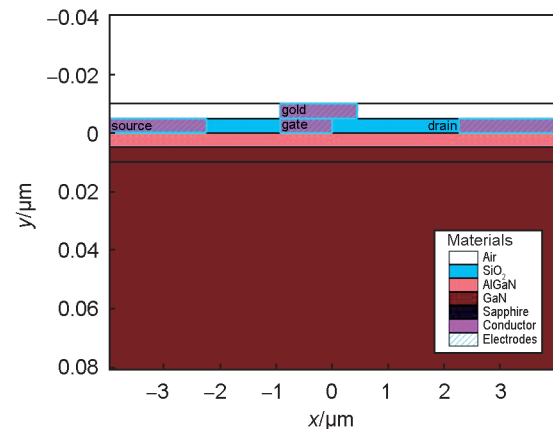


图 2 栅场板 AlGaIn/GaN HEMT 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model of gate-field plate AlGaIn/GaN HEMT

生二维电子气(2DEG), 2DEG 主要来源是 Al_xGa_{1-x}N 和 GaN 自发极化效应和压电极化效应, 2DEG 密度设置为 $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。源、漏电极与势垒层的接触类型为欧姆接触, 考虑源漏寄生电阻, 设 $R_s=R_d=100 \Omega$; 栅极与势垒层的接触为肖特基接触, 势垒高度设置为 $\phi=0.9 \text{ eV}$ 。

Al_xGa_{1-x}N 的模型参数可依据 GaN 和 AlN 的模型参数用 Al 的摩尔组分线性插值计算得到, GaN 和 AlN 的模型参数如表 1 所示。Al_xGa_{1-x}N 的禁带宽度可以表示为^[18]:

$$E_g(x) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - x(1-x) = 6.13x + 3.47(1-x) - x(1-x) \quad (1)$$

模拟计算中所用的基本方程有泊松方程、电流连续性方程和扩散-漂移方程^[19]:

$$\nabla^2 \Psi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-), \quad (2)$$

$$\nabla \vec{J}_n = qR + q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (3)$$

$$-\nabla \vec{J}_p = qR + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n \nabla \Phi_n, \quad (5)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p \nabla \Phi_p, \quad (6)$$

其中, Ψ 代表电势的分布, ϵ 代表介电常数, q 代表单位电荷量, n 、 p 分别指电子与空穴密度, N_D^+ 代表电离施主浓度, N_A^- 代表电离受主浓度, \vec{J}_n 、 \vec{J}_p 分别为电子和空穴电流密度, R 代表电子和空穴的复合率, Φ_n 、 Φ_p 代表电子和空穴的准费米势。

另外, 为了更精确地计算器件内部的载流子运动状态以及杂质分布, 仿真中选用高场饱

表 1 $T=300 \text{ K}$ 下的材料参数

Table 1 Material parameters with $T=300 \text{ K}$

材料参数	GaN	AlN	Al _{0.25} Ga _{0.75} N
介电常数	9.5	8.5	9.3
带隙/eV	3.47	6.13	3.95
电子亲和力/eV	3.4	1.9	3.0
电子迁移/(cm ² /V·s)	1000	300	825
电子饱和速度/(cm/s)	1.5×10^7	1.5×10^7	1.5×10^7
有效导带态密/cm ⁻³	2.6×10^{18}	4.1×10^{18}	3.0×10^{18}

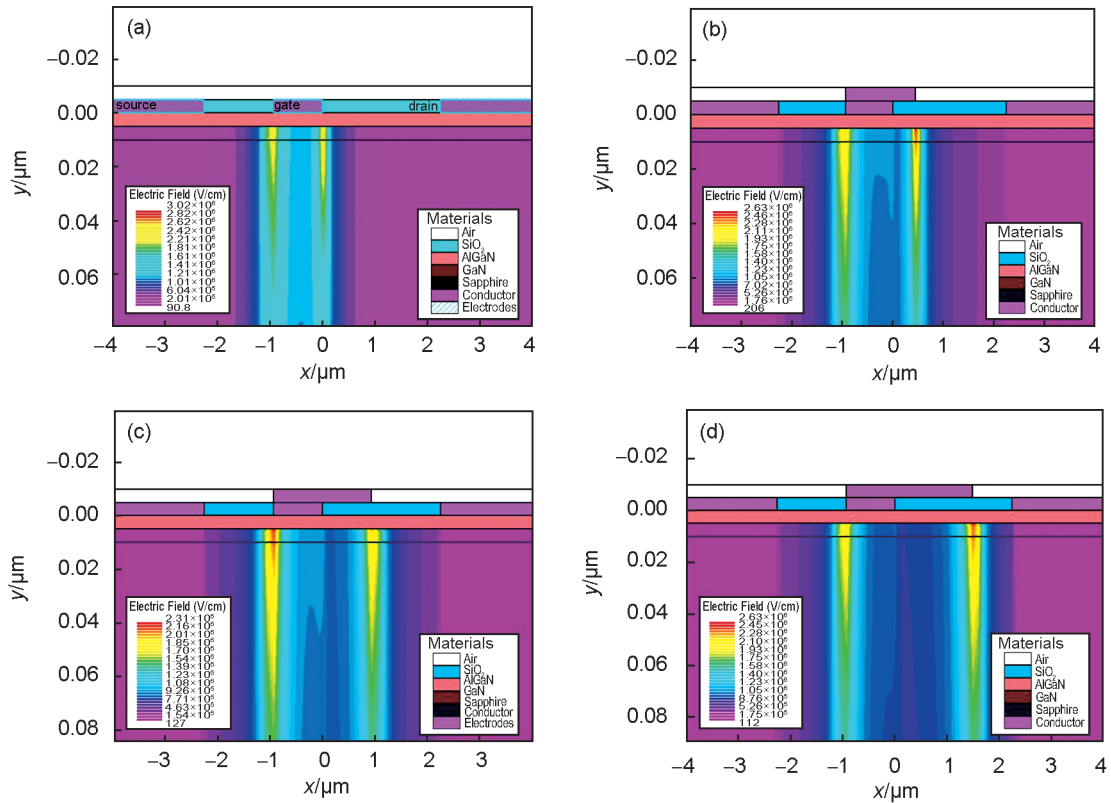


图 3 不同栅场板长度下器件沟道电场分布

(a) 0.0 μm ; (b) 1.5 μm ; (c) 2.0 μm ; (d) 2.5 μm

Fig.3 Electric field distribution in devices under different gate plate lengths

(a) 0.0 μm ; (b) 1.5 μm ; (c) 2.0 μm ; (d) 2.5 μm

和迁移率模型(High-field saturation mobility Model),费米统计模型(Fermi Statistics Model)等。通过数值方法联立求解可得到与器件性能有关的各种参数以及器件工作的物理过程。模拟计算过程中不考虑载流子效应,认为载流子的温度和晶格温度相等,均为300 K。

2 结果与讨论

2.1 场板长度对 AlGaIn/GaN HEMT 导电沟道电场分布的调控

栅极电压 $V_G = -5$ V,漏极电压 $V_D = 10$ V,栅场板厚度为 $0.005 \mu\text{m}$,栅场板长度 L 分别取 $0 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 情况下,器件内部电场分布的 ATLAS 数值模拟结果如图3所示。从图3(a)可以看出无栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件内部栅靠漏端峰值电场强度高达 3.02×10^6 V/cm;图3(b)可以看出栅场板的长度 L 为 $1.5 \mu\text{m}$ 时,栅靠漏端峰值电场强度为 2.64×10^6 V/cm;从图3(c)可以看出栅场板长度变至 $2 \mu\text{m}$ 后,栅靠漏端峰值电场强度被降低到了 2.31×10^6 V/cm。可见栅场板对器件峰值电场强度有抑制作用,产生上述结果的主要原因是因为场板会在 AlGaIn 势垒层中形成耗尽层,缓解了栅边缘的耗尽层的弯曲程度,降低栅边缘的峰值电场。如图4(a)所示,没有栅场板时,漏端加电压,栅电极肖特基结反向偏置,AlGaIn 耗尽层边界发生弯曲,耗尽层边界曲线曲率较大,电场线向栅极边缘集中,在同样的偏置电压下,栅极边缘耗尽层电场值远大于栅极正下方耗尽层电场值;而如图4(b)所示,当加上增加场板后,场板、绝缘层和半导体构成了 MIS (Metal Insulator Semiconductor) 结构,栅压使得 MIS 结构处于耗尽状态,耗尽区与栅电极肖特基结的耗尽区连成一体,AlGaIn 耗尽层中一部分原来以栅极为终点的电场线改为以场板为终点,这等效于在场板下方耗尽层表面引入了额外的固定负电荷,它对电场的影响可看作是无穷大的半导体中间增加了一层电负电荷,这些负电荷除产生垂直于表面的电场外,也产生平行于表面的电场。每一个负电荷在其左边产生指向左的电场,在其右边产生指向右的电场。向左的电场削弱了耗尽层中正电荷产生的

电场,减小了栅边缘电场峰值。在场板下面大部分区域内,负电荷产生的横向电场是互相削弱的,但在场板边缘,所有负电荷产生的向右横向电场是互相加强的,在场板边缘产生一个电场峰值。然而,从图3(d)可以看出当栅场板长度分别增加至 $2.5 \mu\text{m}$ 时,靠漏端峰值电场强度反而上升到了 2.63×10^6 V/cm。这是由于栅场板长度过大,场板边缘电场与漏边缘的电场相互交叠叠加,电场强度增强。

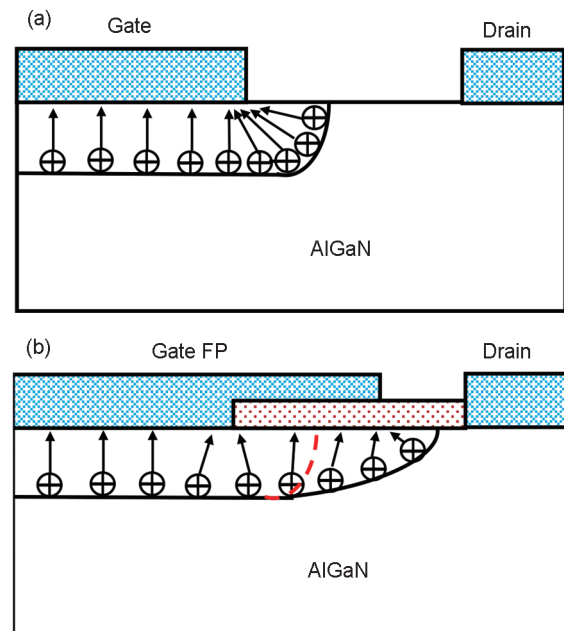


图4 栅场板结构 AlGaIn 耗尽层电场分布曲率效应示意图
Fig. 4 Schematic diagram of curvature effect of electric field distribution in AlGaIn depletion layer of gate field plate structure

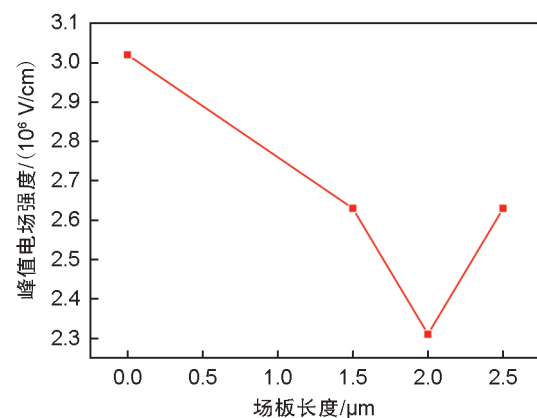


图5 不同栅场板长度下的沟道峰值电场
Fig. 5 The peak electric field of the channel under different grid-field plate lengths

峰值电场强度随栅场板长度 L 的变化规律如图5所示。可见,栅场板对器件的沟道电

表2 绝缘介质材料的相对介电系数

Table 2 Relative permittivity of insulating dielectric materials

SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	HfO ₂
3.9	7.0	9	25

场分布具有调控作用,沟道电场峰值随栅场板长度增加而降低,但是当栅场板长度增加到某一数值继续增长的时候,反而会引起沟道电场峰值降低,因此栅场板并不是越长效果越好,栅场板长度为 2 μm 左右时沟道电场峰值最低。

2.2 栅场板厚度对 AlGaN/GaN HEMT 导电沟道电场分布的调控

栅极电压 $V_G = -5$ V,漏极电压 $V_D = 10$ V 不变,栅场板长度固定为 2 μm,栅场板的厚度分别取为 0.005 μm, 0.003 μm, 0.001 μm 情况下器件内部电场的分布如图 6 所示。由图 6 可以看出,栅场板厚度对器件中电场的分布几乎没有影响。这主要是因为根据平行平板电容器理论, MIS 电容中的电场及分布主要取决于电容极板上加的电压、绝缘介质厚度以及绝缘介质的介电系数,三种情况下器件中 Ti/Au 栅场板下的 SiO₂ 绝缘介质层厚度都是 50 nm,而 Ti/Au 栅场板只是作为 MIS 电容的上电极,栅场板厚度对电场及其分布几乎没有影响。

2.3 栅场板下绝缘介质材料对 AlGaN/GaN HEMT 导电沟道电场分布的调控

栅极电压 $V_G = -5$ V,漏极电压 $V_D = 10$ V 不变,栅场板长度 L 固定为 2 μm,栅场板厚度固定为 0.005 μm,栅场板下绝缘介质厚度取 50 nm,绝缘介质材料分别取氧化硅(SiO₂)、氮化

硅(Si₃N₄)、氧化铝(Al₂O₃)、氧化铪(HfO₂)情况下器件内部电场的分布如图 7 所示。四种绝缘介质材料对应的相对介电系数如表 2 所示。从图 7 可以看出,栅场板下绝缘介质材料的对器件的沟道电场的分布具有一定的影响,绝缘介质材料相对介电系数越大,器件中栅靠漏端峰值电场强度越小。峰值电场强度随绝缘介质材料的相对介电系数的变化规律如图 8 所示。

2.4 栅场板长度对 AlGaN/GaN HEMT 击穿电压的调控

栅极电压 $V_G = -5$ V,栅场板厚度取 0.005 μm,栅场板下 HfO₂ 绝缘介质材料厚度取 50 nm,栅场板长度 L 分别取 0 μm、1.0 μm、1.25 μm、1.5 μm、1.75 μm、2.0 μm 情况下对漏源电压进行扫描, AlGaN/GaN HEMT 器件的 I_d-V_d 输出特性曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,没有栅场板 AlGaN/GaN HEMT 的击穿电压大约只有 235 V 左右。而加入栅场板后,器件击穿电压随着栅场板长度的增加显著提升,栅场板长度 $L = 2.0$ μm 时器件击穿电压高达 800 V 以上。可见栅场板对 AlGaN/GaN HEMT 的击穿特性具有明显的调控作用,可以有效提高 AlGaN/GaN HEMT 器件的耐压值。

3 结论

在建立栅场板 AlGaN/GaN HEMT 数值模拟模型的基础上,采用 Silvaco 软件模拟了栅场板长度、厚度以及场板下绝缘介质材料对器件内部电场分布的调制作用;结果表明栅场板对器件的沟道电场分布具有调控作用,沟道电场峰值随栅场板长度增加而降低,但是当栅场板

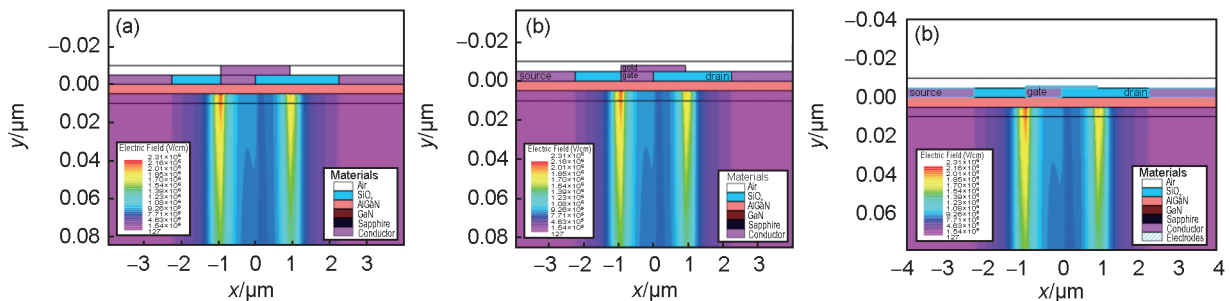


图6 不同栅场板厚度下器件沟道电场分布

(a) 0.005 μm; (b) 0.003 μm; (c) 0.001 μm

Fig. 6 Electric field distribution in devices with different gate plate thickness

(a) 0.005 μm; (b) 0.003 μm; (c) 0.001 μm

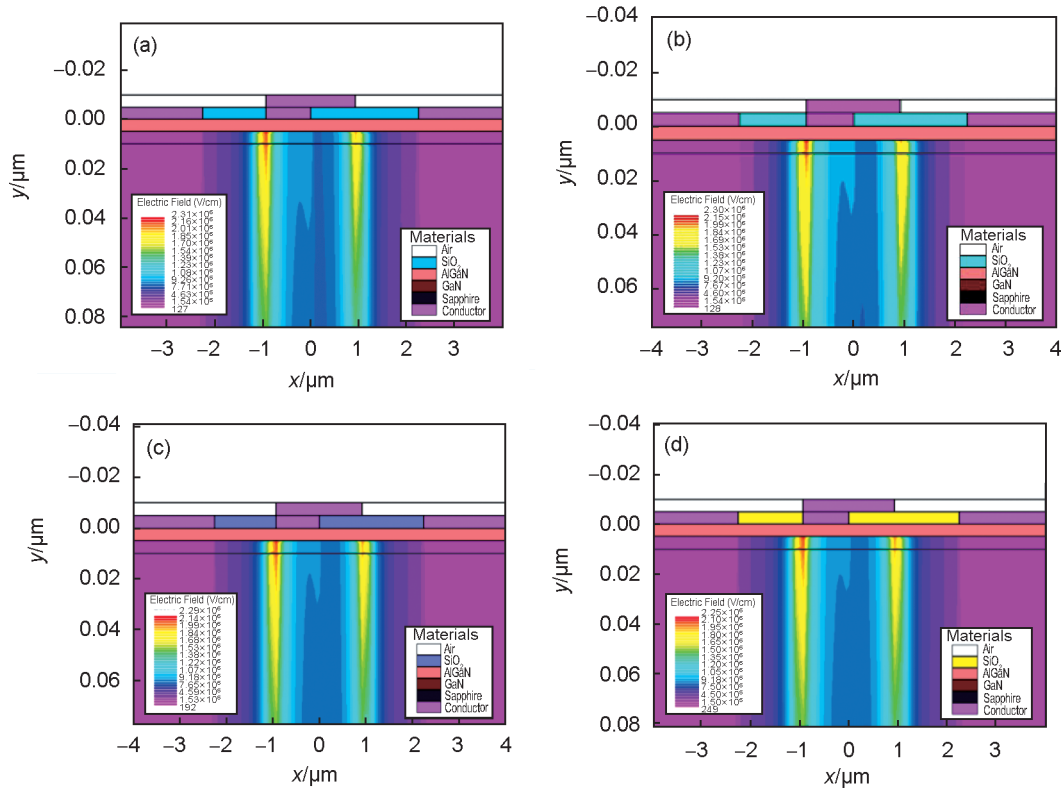


图7 栅场板下不同绝缘介质器件沟道电场分布

(a) SiO₂; (b) Si₃N₄; (c) Al₂O₃; (d) HfO₂

Fig. 7 Electric field distribution in devices with different insulating mediums under the gate field plate

(a) SiO₂; (b) Si₃N₄; (c) Al₂O₃; (d) HfO₂

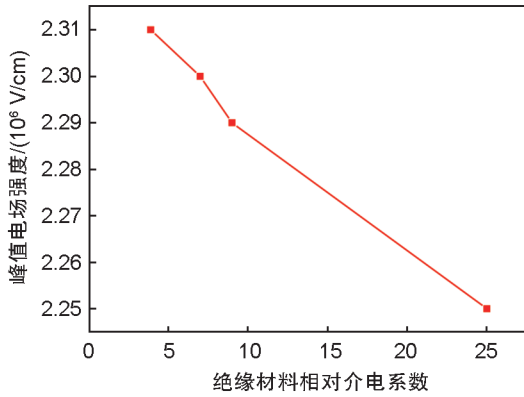


图8 栅场板下不同绝缘介质的沟道峰值电场

Fig. 8 The peak electric field of the channel under different gate field plate insulating dielectrics

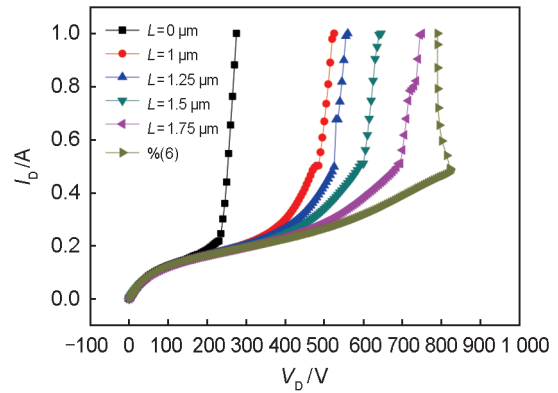


图9 不同栅场板长度下器件的I_D-V_D输出特性曲线

Fig. 9 I_D-V_D output characteristic curves of devices with different gate plate lengths

长度增加到某一数值继续增长的时候,反而会
引起沟道电场峰值升高,因此栅场板并不是越
长效果越好,栅场板长度为 2 μm 左右时沟道电
场峰值较低;栅场板厚度对器件中电场的分布
几乎没有影响;栅场板下绝缘介质材料的对器
件的沟道电场的分布具有一定的影响,绝缘介
质材料相对介电系数越大,器件中栅靠漏端峰

值电场强度越小。器件击穿电压随着栅场板长
度的增加在增加,栅场板长度 L=2.0 μm 时器
件击穿电压高达 800 V 以上。

参考文献:

[1] OKUMURA H. Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-power Devices[J]. *Jpn J Appl*

- Phys*, 2006, **45**(10R): 7565. DOI: 10.1143/jjap.45.7565.
- [2] SUMI H, TAKAHASHI H, SOEJIMA T, *et al.* Ku-band, 120-W Power Amplifier Using Gallium Nitride FETs[C]// 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2009: 1389–1392. DOI: 10.1109/MWSYM.2009.5165965.
- [3] YANG C, LUO X R, SUN T, *et al.* High Breakdown Voltage and Low Dynamic ON-resistance AlGaIn/GaN HEMT with Fluorine Ion Implantation in SiN_x Passivation Layer[J]. *Nanoscale Res Lett*, 2019, **14**(1): 191. DOI: 10.1186/s11671-019-3025-8.
- [4] WANG C, HE Y L, ZHENG X F, *et al.* AlGaIn/GaN HEMTs with 0.2 μm V-gate Recesses for X-band Application[J]. *J Semicond*, 2012, **33**(3): 034003. DOI: 10.1088/1674-4926/33/3/034003.
- [5] POLYAKOV A Y, SMIRNOV N B, GOVORKOV A V, *et al.* Electrical Properties of GaN (Fe) Buffers for AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor Structures[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(4): 042110. DOI: 10.1063/1.2838734.
- [6] YU H B, LISESIVDIN S B, BOLUKBAS B, *et al.* Improvement of Breakdown Characteristics in AlGaIn/GaN/Al_xGa_{1-x}N HEMT Based on a Grading Al_xGa_{1-x}N Buffer Layer[J]. *Phys Status Solidi A*, 2010, **207**(11): 2593–2596. DOI: 10.1002/pssa.201026270.
- [7] ANDO Y, OKAMOTO Y, MIYAMOTO H, *et al.* 10-W/mm AlGaIn-GaN HFET with a Field Modulating Plate[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, **24**(5): 289–291. DOI: 10.1109/LED.2003.812532.
- [8] XING H L, DORA Y, CHINI A, *et al.* High Breakdown Voltage AlGaIn-gan HEMTs Achieved by Multiple Field Plates[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, **25**(4): 161–163. DOI: 10.1109/LED.2004.824845.
- [9] DORA Y, CHAKRABORTY A, MCCARTHY L, *et al.* High Breakdown Voltage Achieved on AlGaIn/GaN HEMTs with Integrated Slant Field Plates[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2006, **27**(9): 713–715. DOI: 10.1109/LED.2006.881020.
- [10] 默江辉, 蔡树军, 冯震, 等. GaN基HEMT栅终端场板结构研究[J]. 半导体技术, 2007, **32**(6): 478–480. DOI: 10.3969/j.issn.1003-353X.2007.06.005.
MO J H, CAI S J, FENG Z, *et al.* Study on the Gate-terminated Field-plates for GaN-based HEMT[J]. *Semicond Technol*, 2007, **32**(6): 478–480. DOI: 10.3969/j.issn.1003-353X.2007.06.005.
- [11] XIE G, XU E, LEE J M, *et al.* Breakdown-voltage-enhancement Technique for RF-based AlGaIn/GaN HEMTs with a Source-connected Air-bridge Field Plate[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2012, **33**(5): 670–672. DOI: 10.1109/LED.2012.2188492.
- [12] KWAK H T, CHANG S B, JUNG H G, *et al.* Thermal Analysis of AlGaIn/GaN High-electron-mobility Transistor and Its RF Power Efficiency Optimization with Source-bridged Field-plate Structure[J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2018, **18**(9): 5860–5867. DOI: 10.1166/jnn.2018.15572.
- [13] KABEMURA T, UEDA S, KAWADA Y, *et al.* Enhancement of Breakdown Voltage in AlGaIn/GaN HEMTs: Field Plate Plus High Passivation Layer and High Acceptor Density in Buffer Layer[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2018, **65**(9): 3848–3854. DOI: 10.1109/TED.2018.2857774.
- [14] BAI Z Y, DU J F, YU Q. A Novel Junction Field Plates AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors with High Breakdown Voltage and Baliga's Figure of Merit for Power Electronics Application[C]// 2018 International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, 2018: 42–45. DOI: 10.1109/ELTECH.2018.8401421.
- [15] KWAK H T, JANG K W, KIM H J, *et al.* DC Characteristics of AlGaIn/GaN High-electron Mobility Transistor with a Bottom Plate Connected to Source-bridged Field Plate Structure[J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2019, **19**(4): 2319–2322. DOI: 10.1166/jnn.2019.16004.
- [16] ZHANG S, WEI K, MA X H, *et al.* Millimeter-wave AlGaIn/GaN HEMT Breakdown Voltage Enhancement by a Recessed Float Field Plate[J]. *Appl Phys Express*, 2019, **12**(5): 054007. DOI: 10.7567/1882-0786/ab196c.
- [17] WANG H, MAO W, ZHAO S, *et al.* Unidirectional p-GaN Gate HEMT with Composite Source-drain Field Plates[J]. *Sci China Informa Sci*, 2022, **65**(2): 261–262. DOI: 10.1109/TED.2022.3159283.
- [18] 郝跃, 张金凤, 张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 9–16.
HAO Y, ZHANG J F, ZHANG J C. Nitride Wide Band Gap Semiconductor Materials and Electronic Devices[M]. Beijing: Science Press, 2013: 9–16.
- [19] ATLAS User's Manual: Device Simulation Software[M]. Version 5.20.2.R, SILVACO International, Santa Clara, CA, 2015.