

具有场板结构GaN HEMT电场分布解析模型

杜江锋, 赵金霞, 伍捷, 杨月寒, 武鹏, 靳翀, 陈卫

(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】基于具有场板结构GaN HEMT器件物理和基本器件方程, 导出了器件加场板前后表面电场分布和峰值电场解析模型。当场板长度 L_{FP} 与绝缘层厚度 t_{ox} 最优时, GaN HEMT栅极边缘电场峰值可降低至未加场板时的22%; 若保持峰值电场恒定, 则其漏端电压可由没有场板时的50 V提高到加场板后的225 V, 增幅高出4倍。该解析模型所导出的电场分布与国外新近发表的源于器件方程和经验公式的模拟和实验结果基本吻合, 为GaN HEMT器件场板设计提供了理论依据。

关键词 解析模型; 击穿电压; 电场分布; 场板; GaN

中图分类号 TN304.2⁺3

文献标识码 A

Electric Field Distribution Analytic Model for Field-Plated GaN HEMT

DU Jiang-feng, ZHAO Jin-xia, WU Jie, YANG Yue-han, WU Peng, JIN Chong, and CHEN Wei

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

Abstract In the light of physics and basic equations of GaN-based high-electron mobility transistors (HEMT) with a field-plate, an analytic model of the surface electric field distribution and peak electric field are achieved. According to our model, when the field-plate length L_{FP} and dielectric layer thickness t_{ox} are optimized, the peak electric field decreases to 22 % compared with the condition with no field plate. With a well designed field plate applied, the maximum drain voltage can be improved from 50 V to 225 V while the peak electric field remaining unchanged. The results obtained from the model agree with those from the numerical simulation reported recently. The conclusions afford a good theoretical guidance to the design for GaN HEMT with field plate.

Key words analytic model; breakdown voltage; electric field distribution; field plate; GaN

氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)在高温大功率微波器件方面有广泛的应用。实验及模拟表明, 对该类器件加场板结构能够有效抑制表面电场, 从而提高其击穿电压^[1-8], 这主要是由于在场板边缘会产生另一个峰值电场, 并通过分压作用削弱栅极边缘的电场峰值。目前, 国内外有许多这方面的报道, 但多数基于实验及模拟研究, 关于理论和带场板的AlGaIn/GaN HEMT电场解析模型方面的研究则很少, 且只给出电场分布曲线及表面电场峰值的经验公式^[1]。

本文从异质结器件物理结构出发, 考虑器件内部电荷分布, 建立器件结构模型。再以泊松方程为基础, 求解各区域电场分布, 最终得到沿器件表面电场解析式及栅极边缘和场板边缘峰值电场解析结

果。将其与文献[3]的实验和模拟结果进行比较, 验证了该解析模型的合理性。

1 GaN HEMT电场分布理论与模型

图1为具有场板结构的AlGaIn/GaN HEMT器件示意图, 各层分别为: i-GaN缓冲层、i-AlGaIn势垒层和Insulator钝化层, 在AlGaIn/GaN异质结界面处形成二维电子气(2-DEG) 导电沟道, 利用栅极肖特基势垒控制沟道通断。在栅漏之间钝化层上形成与栅极金属连接的金属场板。其中, w_0 为栅极与i-AlGaIn所形成的肖特基势垒宽度; d_0 为AlGaIn层厚度; ϵ_d 为AlGaIn层介电常数; n_{s0} 为2-DEG面密度; n_p 为极化电荷面密度, $qn_{s0}=qn_p$ 。本文讨论栅极电压为零的情况, 其中漏端电压为 V_{DS} 。

收稿日期: 2006-09-10; 修回日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(6140449)

作者简介: 杜江锋(1976-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事GaN微波功率器件和电路方面的研究。

1.1 未加场板器件电场分布

电场集中在漏极和栅极之间，忽略源极影响。将电场分解为横向表面电场 $E_x(x)$ 和纵向电场 $E_y(x)$ 。

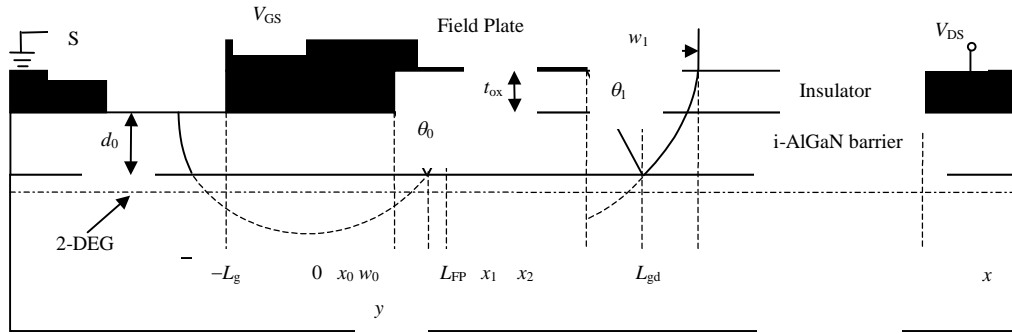


图1 具有场板结构GaN HEMT器件模型

在栅极下方 $x \in (-L_g, 0)$ ，器件结构类似平行板电容器，栅极下耗尽层表面电场为：

$$E_y(x) = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (1)$$

在栅边缘附近 $x \in (0, w_0)$ ， $V(x, 0)$ 逐渐增大至 $V(x, d_0)$ ，将纵向电场按横坐标展开到一阶，可得：

$$E_y(x) = E_y(0) \left(1 - \frac{x}{w_0} \right) \quad (2)$$

在耗尽层以外至漏极区域，可认为器件表面无电荷，即没有电力线终止，电场沿水平方向， E_y 可忽略。当 $x \in (-L_g, x_0)$ 时，基于文献[9]对场板结构产生表面电场的分析方法，横向电场为：

$$E_x(x) = \gamma \exp\left(-\frac{\alpha x}{d_0}\right) \quad (3)$$

式中 $\alpha = 0.6$ ； γ 为待定系数。再由边界条件 $V(x, d_0) = V_1, V(x, 0) = 0$ ，可得：

$$E_x(x) = \frac{0.6V_1}{d_0} \exp\left(-\frac{0.6(x-x_0)}{d_0}\right) \quad x \in (-L_g, x_0) \quad (4)$$

再对 $E_x(x)$ 积分得沟道电势 $V(x)$ ，由式(1)可得纵向电场：

$$E_y(x) = \frac{V_1}{d_0} \exp\left(-\frac{0.6(x-x_0)}{d_0}\right) \quad x \in (-L_g, 0) \quad (5)$$

式(2)、(4)、(5)为分段解得的纵向和横向电场分布。当 $x \in (-L_g, 0)$ 时，可得其总电场为：

$$E(x) = \sqrt{E_x^2(x) + E_y^2(x)} = 1.17 \frac{V_1}{d_0} \exp\left(-\frac{0.6(x-x_0)}{d_0}\right) \quad (6)$$

当 $x \in (x_0, L_{gd})$ 时，耗尽层产生一个弧形边角结面，近似为圆柱面。利用泊松方程的圆柱对称解求

假设栅极下AlGaIn层全部耗尽，以栅极边缘为原点建立坐标系，分别求解各区域电场分布。

电场分布^[10]，将平面坐标转化为柱面坐标，方程组如下：

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} [rE(r)] = \frac{qN_d}{\epsilon_d} \\ \frac{2\theta_0}{\pi} \int_r^{r_w} E(r) dr = V(r) \end{cases} \quad (7)$$

忽略 $E_y(x)$ ，则 $E(r) \approx Cr^{-1} \approx Cx^{-1}$ 。再由边界条件 $V(x_0, d_0) = V_1, V(L_{gd}, d_0) = V_{DS}$ ，可得此区域总电场为：

$$E(x) = \sqrt{1 + \left[\frac{5}{3} \exp\left(-\frac{0.6x_0}{d_0}\right) \left(1 - \frac{x_0}{w_0}\right) \right]^2} E_x(x_0) x_0 x^{-1} \quad (8)$$

根据不同区域的电场分布，最终获得未加场板时电场分布为：

$$E(x) = \begin{cases} E(x_0) \exp\left(\frac{x-x_0}{5/3 d_0 + x_0}\right) & x \in (-L_g, x_0) \\ E(x_0) x_0 x^{-1} & x \in (x_0, L_{gd}) \end{cases} \quad (9)$$

若只考虑横向电势降落， $E_x(x)$ 在 x_0 处连续，可获得未加场板时栅极边缘电场峰值为：

$$E(x_0) = \sqrt{1 + \left[\frac{5}{3} \exp\left(-\frac{0.6x_0}{d_0}\right) \left(1 - \frac{x_0}{w_0}\right) \right]^2} \times \frac{\frac{\pi}{2\theta_0} V_{DS}}{x_0 \ln \frac{L_{gd}}{x_0} + \frac{\pi}{2\theta_0} \frac{5}{3} d_0} \quad (10)$$

1.2 加场板后器件电场分布

图1中场板长度为 L_{FP} ；氧化层厚度为 t_{ox} ；介电常数为 ϵ_t 。由于场板的分压作用，总电场由两部分构成：栅极下耗尽层产生的电场 $E_0(x)$ 和场板覆盖区域耗尽层产生的电场 $E_1(x)$ 。

首先, 求解栅极下耗尽层产生的电场 $E_0(x)$ 。仍按未加场板时方法求解, 其边界条件 $V(x_0, d_0)=V_1$, $V(x_1, d_0)=V_{1x}$, 可得电场分布:

$$E_0(x) = \begin{cases} E_0(x_0) \exp\left(\frac{x-x_0}{(5/3)d_0+x_0}\right) & x \in (-L_g, x_0) \\ E_0(x_0) x_0 x^{-1} & x \in (x_0, x_1) \end{cases} \quad (11)$$

接着求解场板覆盖区域电场分布 $E_1(x)$ 。按前文所述方法, 分别求出各分段的横向电场和纵向电场分布, 可得场板下耗尽层产生电场分布为:

$$E_1(x) = \begin{cases} E_1(L_{FP}) \exp\left(\frac{x-x_1}{(5/3)t'_{ox}+x_1-L_{FP}}\right) & x \in (w_0, x_1) \\ E_1(L_{FP}) (x_1-L_{FP})(x+2L_{FP}-x_1)^{-1} & x \in (x_1, L_{gd}) \end{cases} \quad (12)$$

综上, 可得具有场板结构器件的总电场分布和峰值电场分布为:

$$E_g = E_f = \frac{\frac{\pi}{2\theta_0} AV_{DS}}{\left(x_0 \ln \frac{x_1}{x_0} + \frac{\pi}{2\theta_0} d_0 \frac{5}{3}\right) A + \frac{\theta_1}{\theta_0} \left[(x_1-L_{FP}) \ln \frac{L_{gd}-L_{FP}}{x_1-L_{FP}} + \frac{\pi}{2\theta_1} t'_{ox} \frac{5}{3}\right] B} \quad (16)$$

式中 $A = 1.17 \exp(-0.6(x_1-L_{FP})/t'_{ox})/0.6$; $B = \sqrt{1 + \left[\frac{5}{3} \exp\left(-\frac{0.6x_0}{d_0}\right) \left(1 - \frac{x_0}{w_0}\right)\right]^2}$ 。

2 模型结果与分析讨论

基于所建器件模型, 分段求解出未加场板与加场板时的电场分布解析式(9)和式(13)及峰值电场表达式(10)与式(16)。取 $V_g=0\text{ V}$, $d_0=20\text{ nm}$, $w_0=40\text{ nm}$, $t_{ox}=100\text{ nm}$, $w_1=150\text{ nm}$, $L_{FP}=1\text{ }\mu\text{m}$, $L_{gd}=6\text{ }\mu\text{m}$, 可得电场分布曲线如图2和图3所示。

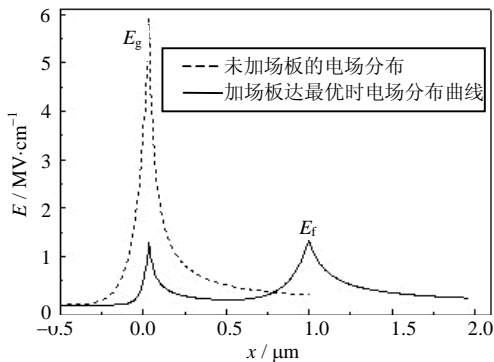


图2 相同漏端电压下加场板前后电场分布曲线
当源漏电压 $V_{DS} = 50\text{ V}$, $\epsilon_d = 9.5$, $\epsilon_t = 7.5$ 由解

$$E(x) = \begin{cases} E(x_0) \exp\left(\frac{0.6(x-x_0)}{d_0}\right) & x \in (L_g, x_0) \\ E(x_0) x_0 x^{-1} + E(L_{FP}) \exp\left(\frac{0.6(x-L_{FP})}{t'_{ox}}\right) & x \in (x_0, L_{FP}) \\ E(L_{FP}) (x_1-L_{FP})(x-2L_{FP}+x_1)^{-1} & x \in (L_{FP}, L_{gd}) \end{cases} \quad (13)$$

式中

$$E(x_0) = E_g = \sqrt{1 + \left[\frac{5}{3} \exp\left(-\frac{0.6x_0}{d_0}\right) \left(1 - \frac{x_0}{w_0}\right)\right]^2} E_x(x_0) \quad (14)$$

$$E(L_{FP}) = E_f = 1.17 E_x(x_1) \frac{\exp(-0.6(x_1-L_{FP})/t'_{ox})}{0.6} \quad (15)$$

考虑到当 $E_g=E_f$ 时, 即峰值减小为最优值的情况^[1], 可得峰值电场强度为:

$$\frac{\pi}{2\theta_0} AV_{DS}$$

析模型所得电场分布曲线如图2所示, 将其与文献[3]模拟所得曲线比较, 其分布具有很好的一致性。

图3为加场板后达最优时电场分布曲线, 分析结果可知, 当保持峰值电场相同时, 漏端耐压由50 V提高至225 V, 故加场板可明显提高器件击穿电压。

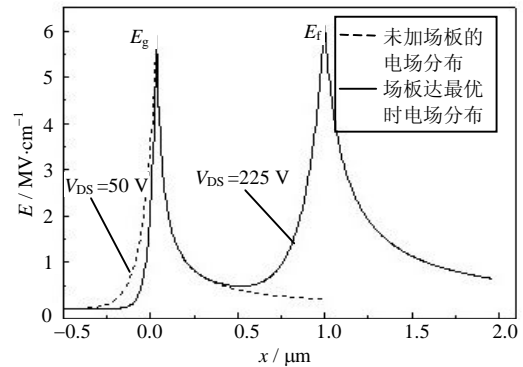


图3 相同峰值电场下所加漏端电压的比较

由所得峰值电场解析式(10)、(16)可知, 器件表面电场峰值与 V_{DS} 、 t_{ox} 和 L_{FP} 因素密切相关。将式(10)与文献[1]中经验公式 $E_0 \approx 0.35(nV_{ds})^{-0.52}(d/21\epsilon_d)^{-0.38}$ 作比较, 其结果虽然数值上有一定的误差, 但峰值电场随漏极电压变化趋势基本相同。

击穿电压 V_{BR} 将达到一固定值并与 L_{FP} 的继续增大无关。该结果可证实击穿电压随 L_{FP} 的增大并不是趋于饱和, 而是先达到最优值, 再达一个略微减小

的饱和值,这与文献[6]的模拟结果是一致的。

介质层物理参数 ϵ_i 分别为7.5、3.9,当 $V_{DS}=130\text{ V}$, $d_0=20\text{ nm}$ 时,击穿电压 V_{BR} 与 t_{ox} 对应关系如图4所示。由解析模型可知,若 $t'_{ox}=\epsilon_d t_{ox}/\epsilon_i$ 越大,场板边缘电场 E_p 将被削弱,则击穿电压 V_{BR} 增大。同时,介质层厚度 t_{ox} 的增加也会对场板长度 L_{FP} 有一定的限制,在设计中要折中考虑。

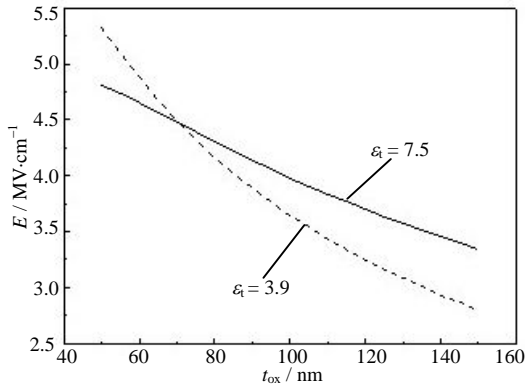


图4 氧化层厚度与场板边缘峰值电场的关系

3 结论

基于GaN HEMT器件物理和基本方程,本文通过求解其横、纵向电场分布,导出了该器件加场板前后的电场分布解析模型,当场板长度 L_{FP} 与绝缘层厚度 t_{ox} 均为最优值时,GaN器件栅极边缘峰值电场可降低至未加场板时的22%;若保持峰值电场恒定,其漏端电压 V_{DS} 由未加场板时的50 V提高到加场板后的225 V。模型所给出的电场分布和峰值电场与国外新近发表的数值模拟结果基本吻合,从而证实了该模型的合理性。所建立的电场解析模型可用于指导GaN HEMT器件场板结构的优化设计,从而解决GaN HEMT当前所面临的如何提高器件工作电压的技术难题,为实现微波大功率器件提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] SHREEPAD K, MICHAEL S S. Field-plate engineering for HFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(12): 2534-2540.
- [2] LI Xing-hui, DORA Y, CHINI A, et al. High breakdown voltage AlGaIn-GaN HEMTs achieved by multiple field plate[J]. IEEE Electron Devices, 2004, 25(4): 161-163.
- [3] SHREEPAD K, UMESH K M. Enhancement of breakdown voltage in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using a field plate[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(8): 1515-1520.
- [4] WATARU S, YOSHIHARU T, MASAHIKO K, et al. High breakdown voltage AlGaIn-GaN power-HEMT design and high current density switching behavior[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(12): 2528-2531.
- [5] LI J, CAI S J, PAN G Z, et al. High breakdown voltage GaN HFET with field plate[J]. Electronics Letters. 2001, 37(3): 196-197.
- [6] WATARU S, MASAHIKO K, YOSHIHARU T, et al. Design optimization of high breakdown voltage AlGaIn-GaN power HEMT on an insulating substrate for Ron A-VB tradeoff characteristics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(1): 106-110.
- [7] KUMAR V, CHEN G, GUO S, et al. Field-plated 0.25 μm gate-length AlGaIn/GaN HEMTs on 6H-SiC with power density of 9.1 W/mm at 18 GHz[J]. Electronics Letters, 2005, 41(19): 1080-1081.
- [8] ADIVARAHAN V, YANG J, KOUDYMOV A, et al. Stable CW operation of field-plated GaN-AlGaIn MOSHFETs at 19 W/mm[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 26(8): 535-537.
- [9] 陈星弼. p-n⁺结有场板时表面电场分布的简单公式[J]. 电子学报, 1986, 14(1): 36-43.
- [10] 陈星弼. 功率MOSFET与高压集成电路[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990: 86-101.

编辑 张俊